

水下噪音

東海大學環境科學與工程學系

劉嘉俊編著

115年1月

序

海洋，這個覆蓋地球表面 71%的藍色空間，長期以來被視為無垠且寧靜的世界。然而，隨著人類海洋活動的急劇增加，海洋環境正面臨著一種新型態的污染威脅—水下噪音污染。這種「看不見」的污染正在悄無聲息地改變著海洋生態系統的平衡，對海洋生物的生存與繁衍造成深遠的影響。

近年來，隨著全球貿易的蓬勃發展、離岸能源開發的興起、軍事活動的增加，以及海洋休閒活動的普及，人為產生的水下噪音已成為海洋環境中不可忽視的污染源。國際海事組織(IMO)於 2023 年發布的修訂版《減少船舶水下輻射噪音準則》，以及歐盟於 2024 年制定的首個全歐盟水下噪音限制標準，都標誌著國際社會對這一議題認知的重大轉變—從過去的「忽視」到如今的「積極應對」。

水下噪音的影響遠比我們想像的更為深遠。對於依賴聲音進行通訊、導航、覓食的海洋哺乳動物而言，人為噪音的干擾可能導致牠們的行為改變、生理壓力增加，甚至影響其繁殖成功率。最新研究顯示，持續的水下噪音暴露不僅影響鯨豚等大型海洋哺乳動物，也對魚類、海龜、無脊椎動物等產生不同程度的負面效應。更令人擔憂的是，這種影響具有累積性和長期性，可能對整個海洋生態系統的結構與功能造成不可逆轉的改變。

面對這一挑戰，科學研究與技術發展顯得格外重要。如何準確量測和評估水下噪音？如何預測其生態影響？如何制定有效的防制策略？如何建立完善的法規框架？這些問題的解決需要跨領域的知識整合與國際間的密切合作。

我國四面環海，海洋資源豐富，海洋產業發達。隨著離岸風電等海洋能源開發計畫的推進，以及海洋運輸業的持續發展，水下噪音管理已成為我國海洋環境保護工作中不可迴避的重要課題。行政院海洋委員會海洋保育署於 2023 年發布的《水下噪音指引》，為我國水下噪音管理提供了初步的技術框架，但仍需要更完善的科學基礎和技術支撐。

本書的撰寫正是在這樣的背景下應運而生。作為國內首部系統性探討水下噪音問題的學術專著，本書試圖建構一個完整的知識體系，從基礎理論到應用實務，從國際經驗到本土需求，為讀者提供全面而深入的專業資訊。

本書的編撰過程中，我們參考了大量的國際最新研究成果，包括歐盟海洋策略框架指令(MSFD)的實施經驗、美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)的技術指引、以及國際鯨類研究委員會(IWC)的科學建議等。同時，我們也特別關注了亞太地區的研究動態和管理實踐，力求在國際視野與本土需求之間找到平衡點。

值得特別提及的是，水下噪音研究是一個快速發展的領域。新的測量技術不斷湧現，對生態影響的認知持續深化，國際法規標準也在不斷更新。因此，本書在撰寫過程中始終秉持開放和前瞻的態度，不僅介紹當前的知識成果，也探討未來的發展趨勢和挑戰。

本書的目標讀者涵蓋海洋科學研究人員、環境影響評估從業者、海洋工程技術人員、環境管理決策者，以及關心海洋環境保護的社會各界人士。我們希望通過本書的出版，能夠提升社會各界對水下噪音問題的認知，推動相關研究與技術的發展，促進政策法規的完善，最終為保護我們共同的海洋環境貢獻一份力量。

海洋的寧靜不應該成為工業文明發展的犧牲品。正如國際科學界所倡導的「寧靜海洋」願景，我們需要在經濟發展與環境保護之間找到平衡，在利用海洋資源的同時，也要為海洋生物留下一片寧靜的家園。這不僅是一個技術挑戰，更是一個道德責任。讓我們攜手努力，為後代子孫留下一個健康、多樣、寧靜的海洋世界。

水下噪音 目錄

頁碼

第 1 章 緒論 Introduction

- 1.1 水下噪音研究背景 Background of Underwater Noise Studies
- 1.2 噪音來源與影響 Sources and Impacts of Underwater Noise
- 1.3 研究目的與範疇 Objectives and Scope
- 1.4 評估方法與技術 Methodologies and Techniques
- 1.5 國際研究趨勢 International Research Trends

第 2 章 水下噪音特性 Characteristics of Underwater Noise

- 2.1 聲音傳播原理 Principles of Sound Propagation
- 2.2 聲速剖面與環境因子 Sound Speed Profiles and Environmental Factors
- 2.3 人為噪音來源 Anthropogenic Noise Sources
- 2.4 自然噪音來源 Natural Noise Sources
- 2.5 頻譜特徵與時空變化 Spectral Features and Spatiotemporal Variations

第 3 章 水下噪音量測與監測 Measurement and Monitoring

- 3.1 水聽器與感測技術 Hydrophones and Sensor Technologies
- 3.2 噪音量測指標 Acoustic Measurement Indicators
- 3.3 麥克風陣列與定位 Array Systems and Localization
- 3.4 長期監測與自動化系統 Long-Term and Automated Monitoring
- 3.5 數據分析與信號處理 Data Analysis and Signal Processing

第 4 章 水下噪音評估與預測 Assessment and Prediction

- 4.1 評估指標與方法 Assessment Indicators and Methods
- 4.2 數值建模與模擬 Numerical Models and Simulations

4.3 GIS 與空間分析 GIS and Spatial Analysis

4.4 大數據與人工智慧應用 Big Data and AI Applications

4.5 風險與不確定性分析 Risk and Uncertainty Analysis

第 5 章 水下噪音控制與減量 Control and Mitigation

5.1 船舶噪音控制 Vessel Noise Reduction

5.2 工程與建設噪音控制 Construction Noise Mitigation

5.3 防制技術與設備 Mitigation Technologies and Devices

5.4 生態保護措施 Ecological Protection Measures

5.5 低噪設計與技術創新 Low-Noise Design and Innovations

第 6 章 法規與標準 Regulations and Standards

6.1 國際規範 International Regulations

6.2 區域與國家規範 Regional and National Regulations

6.3 生態敏感區標準 Standards for Ecologically Sensitive Areas

6.4 海洋生物保護標準 Marine Species Protection Standards

6.5 綜合管理指標 Integrated Management Indicators

第 7 章 政策發展與未來展望 Policy Development and Future Perspectives

7.1 技術與管理新趨勢 Emerging Trends in Technology and Management

7.2 跨領域合作模式 Interdisciplinary Collaboration Models

7.3 水下噪音治理與永續發展 Underwater Noise Governance and SDGs

7.4 政策建議與推動策略 Policy Recommendations and Implementation Strategies

摘要

《水下噪音：海洋環境的隱形污染》是一本全面探討水下噪音問題的學術專著，涵蓋了從基礎理論到實務應用的完整知識體系。本書共分為七個主要章節，系統性地介紹了水下噪音這一新興海洋環境科學領域的各個面向。

- 一、第一章緒論奠定了水下噪音研究的基礎框架，闡述了水下噪音的定義、分類與特性，分析了人為噪音源對海洋生態系統的影響，並探討了國際社會對此議題的關注與發展趨勢。該章建立了完整的學術背景，為後續章節的深入討論提供了理論基礎。
- 二、第二章水下噪音特性深入探討了聲波在海洋環境中的傳播原理與物理特性，包括聲學基礎理論、海洋聲學環境、噪音源特性分析，以及噪音對海洋生物聽覺系統的影響機制。本章結合最新的科學研究成果，提供了理解水下噪音現象的理論基礎。
- 三、第三章水下噪音量測與監測介紹了水下噪音的測量技術、監測系統設計、數據處理方法，以及品質保證與品質控制程序。該章詳述了從儀器選擇到數據分析的完整技術流程，為實際監測工作提供了標準化指引。
- 四、第四章水下噪音評估與預測闡述了噪音影響評估的方法學、預測模型的建立與應用，以及風險評估框架。本章整合了國際先進的評估技術，提供了科學可靠的影響評估工具。
- 五、第五章水下噪音控制與防制探討了從聲源控制到傳播路徑管理的各種噪音防制策略，包括工程技術措施、管理措施，以及生態保護措施。該章結合國際最佳實務案例，提供了切實可行的控制方案。
- 六、第六章水下噪音法規與標準全面分析了國際組織如 IMO、歐盟 MSFD 等制定的相關法規標準，探討了各國的政策實施經驗，並提出了適合我國國情的法規建議。隨著 2023 年 IMO 修訂的《減少船舶水下輻射噪音準則》生效，以及 2024 年歐盟制定的首個全歐盟水下噪音限制標準，本章提供了最新的國際法規動態分析。
- 七、第 7 章 政策發展與未來展望說明水下噪音研究的未來發展趨勢，包括新興技術的應用前景、跨領域合作的重要性，以及政策制定的方向建議。該章特別關注了氣候變遷對海洋聲學環境的影響，以及海洋保護區規劃中噪音管理的重要性。

本書具有以下特色：科學性－基於最新的國際研究成果和技術發展，提供科學可靠的理論基礎；實用性－結合實際案例和應用經驗，提供可操作的技術指引；前瞻性－關注國際發展趨勢，提供未來研究與政策制定的方向；本土性－結合我國海域特性和管理需求，提出適用的解決方案。

本書適合海洋科學、環境工程、聲學工程、海洋管理等相關領域的研究人員、技術人員、政策制定者，以及關心海洋環境保護的各界人士閱讀參考。隨著國際社會對海洋噪音污染關注度的日益提升，本書將為推動我國水下噪音研究與管理工作提供重要的學術支撐和實務指導。

第 1 章 緒論 Introduction

水下噪音研究作為海洋環境科學的新興領域，實現了人類對海洋生態系統影響認知的深化與擴展。隨著全球海洋活動的急劇增加，人為噪音已成為繼化學污染、過度捕撈之後的第三大海洋環境威脅[1]。這一認知的轉變不僅重新定義了海洋污染的概念，更促使國際社會重新審視人類活動與海洋生態系統的關係[2]。

水下噪音研究的發展歷程反映了海洋科學從物理化學導向生態環境導的重要轉變。早期的海洋聲學研究主要服務於軍事和工業需求，關注點集中在聲傳播特性和水下通訊技術[3]。直到 1970 年代，科學家才開始系統性地關注人為噪音對海洋生物的潛在影響，說明水下噪音環境影響研究的正式起步[4]。

當代水下噪音研究呈現出顯著的跨學科特徵，融合了物理海洋學、生物聲學、行為生態學、環境工程學等多個學科領域[5]。這種跨學科整合不僅豐富了研究內容，更為解決複雜的海洋環境問題提供了全新的理論框架和技術手段[6]。同時，研究範疇從早期的單純學術探討擴展至政策制定、工程應用和社會管理等實踐層面，形成了完整的科學-技術-政策鏈條[7]。

本章旨在全面梳理水下噪音研究的理論基礎、技術發展和應用前景，為後續章節的深入探討建立紮實的背景基礎。透過系統性的文獻回顧和趨勢分析，本章力求呈現水下噪音研究領域的完整圖景，並為未來研究方向提供指導性建議[8]。

1.1 水下噪音研究背景 Background of Underwater Noise Studies

水下噪音研究的歷史背景深深植根於人類對海洋環境認知的演進過程中。從最初將海洋視為無限容納人類活動廢物的巨大容器，到逐漸認識海洋作為複雜生態系統的脆弱性，這一認知轉變為水下噪音研究的興起奠定了重要基礎[9]。

1.1.1 歷史發展脈絡 Historical Development Context

水下噪音研究的萌芽可追溯至二次世界大戰期間的軍事聲學應用。戰爭期間發展的聲納技術和水下通訊系統為後續的民用海洋聲學研究提供了技術基礎[10]。然而，將人為噪音視為海洋環境問題的觀點直到 1970 年代才正式確立，這主要歸功於 Payne 和 Webb 在 1971 年發表的開創性研究[11]。

該研究首次提出商業航運產生的低頻噪音可能干擾須鯨類的長距離通訊，從而影響其覓食、繁殖和遷徙行為[12]。這一發現徹底改變了科學界對海洋噪音的認知，將其從純粹的物理現象轉變為具有生態學意義的環境因子[13]。隨後的

十年間，越來越多的研究證實了人為噪音對多種海洋生物的不利影響，推動了這一領域的快速發展[14]。

1980 年代說明水下噪音研究進入系統化階段。美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 開始建立長期的海洋噪音監測網絡，為量化人為噪音的時空變化提供了數據基礎[15]。同期，歐洲國家也開始關注北海和波羅的海地區的船舶噪音問題，推動了國際合作研究的興起[16]。

1990 年代見證了水下噪音研究的理論突破。Richardson 等學者的經典著作《Marine Mammals and Noise》建立了海洋哺乳動物聲學影響評估的理論框架，成為該領域的奠基性文獻[17]。該框架將噪音影響分為四個層級：探測閾值、行為反應閾值、遮蔽效應閾值和生理損傷閾值，為後續的研究提供了標準化的評估方法[18]。

21 世紀初期的技術革新進一步推動了水下噪音研究的發展。數位信號處理技術的成熟使得大規模、長期的海洋聲學監測成為可能[19]。同時，衛星追蹤技術的應用使研究者能夠將海洋生物的移動軌跡與噪音暴露歷史相結合，為建立因果關係提供了重要證據[20]。

近十年來，水下噪音研究呈現出明顯的政策導向特徵。歐盟海洋戰略框架指令將水下噪音列為海洋環境狀況評估的重要指標，推動了大規模的監測和研究計畫[21]。國際海事組織制定的船舶噪音減緩指導方針則實現了國際社會對這一問題的重視[22]。

當前的水下噪音研究正朝著更加整合和應用導向的方向發展。氣候變化、海洋酸化等全球性環境問題與噪音污染的交互作用成為新的研究熱點[23]。同時，人工智慧和機器學習技術的應用正在革新海洋聲學數據的分析方法，為深入理解複雜的生態聲學現象提供了新的工具[24]。

1.1.2 學科發展動因 Driving Forces of Disciplinary Development

水下噪音研究的學科發展受到多重因素的共同驅動，其中科學認知的深化、技術能力的提升和社會需求的增長構成了三大核心動力[25]。

科學認知層面的驅動力主要來自於對海洋生物聲學行為理解的不斷深化。隨著研究的深入，科學家發現聲音在海洋生物的生活中扮演著比預期更加重要的角色[26]。海洋哺乳動物不僅依賴聲音進行通訊和導航，許多魚類和無脊椎動物也具有精密的聽覺系統，能夠利用聲音進行覓食、避敵和繁殖等關鍵生活活動

[27]。

技術發展為水下噪音研究提供了日益先進的工具和方法。高靈敏度水聽器的開發使得微弱的生物聲學信號能夠被精確捕獲[28]。數位信號處理技術的進步則大幅提升了聲學數據的分析能力，使研究者能夠從複雜的海洋聲景中提取有用的資訊[29]。近年來，自主式水下載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)和水下滑翔機的應用進一步擴展了海洋聲學研究的空間範圍和時間尺度[30]。

社會需求的增長是推動水下噪音研究發展的重要外在動力。隨著全球貿易的擴張，海上交通量急劇增加，商業航運產生的噪音已成為海洋環境的主要污染源[31]。同時，海洋可再生能源開發、深海採礦等新興海洋產業的興起帶來了新的噪音源，迫切需要科學評估其環境影響[32]。

環境保護意識的提升也為水下噪音研究提供了重要的社會支持。公眾對海洋生物福祉的關注日益增加，特別是對鯨豚類等魅力物種的保護需求，為相關研究爭取了更多的資源投入[33]。環境保護組織的積極參與不僅提高了問題的社會能見度，也為研究成果的政策轉化提供了重要推力[34]。

法規政策的發展需求進一步刺激了水下噪音研究的深入。各國政府和國際組織在制定相關法規時需要科學依據，這為研究者提供了明確的應用方向[35]。同時，工業界為了符合日益嚴格的環境法規，也積極投資於噪音減緩技術的研發，形成了產學研結合的良性循環[36]。

1.1.3 理論框架演進 Evolution of Theoretical Framework

水下噪音研究的理論框架經歷了從簡單的線性思維向複雜系統思維的重要轉變，反映了學科成熟度的不斷提升[37]。

早期的理論框架主要基於經典的刺激-反應模式，將噪音暴露視為輸入變數，將生物反應視為輸出變數，兩者之間呈現簡單的劑量-效應關係[38]。這種框架雖然直觀易懂，但忽略了海洋生態系統的複雜性和動態性，難以解釋實際觀察到的複雜現象[39]。

隨著研究的深入，科學家逐漸認識到噪音影響的多層次性和相互作用性。Southall 等學者提出的海洋哺乳動物噪音暴露標準建立了分層次的影響評估框架，將影響分為生理損傷、行為干擾、遮蔽效應等不同層次[40]。這一框架的重要貢獻在於承認了不同類型影響的質的差異，而非僅僅是量的不同[41]。

生態系統服務理論的引入為水下噪音研究提供了新的理論視角。該理論將聲學環境視為重要的生態系統服務，強調其對生物多樣性維持和生態系統功能發

揮的重要作用[42]。這一理論框架的應用使研究者能夠從更廣闊的生態學角度評估噪音污染的影響，並為經濟學評估提供了理論基礎[43]。

複雜適應系統理論的應用說明水下噪音研究理論框架的重要突破。該理論認為海洋生態系統是由多個相互作用的組成部分構成的複雜系統，系統的整體行為無法簡單地從個體組成部分的行為推導出來[44]。在這一框架下，噪音污染被視為改變系統動力學的干擾因子，其影響可能通過複雜的反饋機制在整個系統中傳播和放大[45]。

近年來，社會-生態系統理論的興起為水下噪音研究提供了更加全面的理論框架。該理論強調人類社會與自然生態系統的緊密耦合關係，將噪音污染問題置於更廣泛的可持續發展脈絡中考慮[46]。這一理論視角不僅關注噪音對生態系統的直接影響，也關注其對依賴海洋資源的人類社區的間接影響[47]。

1.2 噪音來源與影響 Sources and Impacts of Underwater Noise

海洋環境中的人為噪音來源呈現出日益複雜化和多樣化的趨勢，其對海洋生態系統的影響也隨之變得更加深遠和微妙[48]。深入理解這些噪音源的特徵及其生態影響機制，是制定有效管理策略的重要前提[49]。

1.2.1 人為噪音來源分類 Classification of Anthropogenic Noise Sources

人為海洋噪音可根據其時間特徵、頻譜特性、空間分佈和產生機制進行多角度分類，這種分類方法有助於理解不同噪音源的影響特徵和管理需求[50]。

按時間特徵分類，海洋人為噪音可分為連續性噪音、間歇性噪音和脈衝性噪音三大類別[51]。連續性噪音主要來源於商業航運，其特徵是長時間、持續性的聲能輸出，頻譜相對穩定但強度隨船舶類型和航行狀態而變化[52]。全球商船隊每年產生的累積聲能輸出已達到前所未有的水平，成為海洋背景噪音增加的主要驅動力[53]。

間歇性噪音主要來源於軍事活動、漁業作業和海洋科學研究等，其特徵是周期性或不規律的聲能釋放[54]。軍用聲納系統在訓練和作戰中產生的高強度聲脈衝是此類噪音的典型代表，其瞬時聲壓級可達 200-235dB re 1 μ Pa，遠超出大多數海洋生物的聽覺承受能力[55]。

脈衝性噪音主要來源於海洋工程建設、地震勘探和爆破作業等活動[56]。海上風電場建設中的打樁作業是近年來備受關注的脈衝性噪音源，單次打樁產生的聲能可在數十公里範圍內對海洋生物造成影響[57]。地震勘探使用的氣槍陣列雖然單次脈衝持續時間較短，但其高重複頻率和範圍作業特徵使其成為區域性的

重要噪音源[58]。

按頻譜特性分類，人為噪音可分為低頻、中頻和高頻噪音[59]。低頻噪音(通常指 1-1000Hz)主要來源於大型船舶的推進系統，其特點是傳播距離遠、衰減速度慢，能夠影響廣闊的海域[60]。這一頻段與須鯨類的通訊頻率高度重疊，因此對這些物種的影響特別顯著[61]。

中頻噪音(1-10kHz)來源更加多樣，包括中小型船舶、海洋工程設備和軍用聲納等[62]。該頻段是大多數齒鯨類動物的主要聽覺頻率範圍，因此中頻噪音對海豚、鼠海豚等物種的影響尤為重要[63]。

高頻噪音(>10kHz)主要來源於高速小艇、近岸工程活動和某些類型的科學設備[64]。雖然高頻聲音的傳播距離相對較短，但其對使用高頻聲納進行回聲定位的海洋動物可能造成嚴重干擾[65]。

1.2.2 主要噪音源特徵分析 Characteristics Analysis of Major Noise Sources

商業航運作為最大的海洋人為噪音源，其聲學特徵與船舶的設計參數、載重狀況和航行條件密切相關[66]。大型貨櫃船在正常航行狀態下的輻射噪音級通常為 170-190dB re 1 μ Pa at 1m，主要能量集中在 10-1000Hz 頻段[67]。螺槳空化現象是船舶噪音產生的主要機制，其發生與螺槳設計、負載條件和水動力學環境密切相關[68]。

現代超大型貨櫃船(Ultra Large Container Vessel, ULCV)的出現進一步加劇了航運噪音問題。這類船舶的裝載能力可達 20,000 標準貨櫃單位以上，其巨大的推進功率需求導致了相應的噪音增加[69]。研究顯示，船舶噪音強度與其推進功率之間存在對數關係，功率每增加一倍，噪音強度約增加 3 分貝[70]。

海洋地震勘探是另一個重要的噪音源，主要服務於油氣資源勘探和海底地質調查[71]。現代地震勘探使用的氣槍陣列能夠產生峰值聲壓級超過 250dB re 1 μ Pa 的強烈聲脈衝，其聲能主要集中在 1-300Hz 頻段[72]。這類活動的特點是作業範圍廣、持續時間長，單次勘探活動可能持續數週至數月，對作業海域的聲環境造成長期影響[73]。

軍事聲納系統的聲學特徵因其應用目的而呈現出多樣性[74]。反潛戰聲納通常在

1-10kHz 頻段工作，聲源級可達 215-235dB re 1 μ Pa at 1m；海底測繪聲納則主要在高頻段(>10kHz)工作，雖然聲源級相對較低，但其高指向性特徵可能對特定方向上的海洋生物造成強烈影響[75]。

海洋工程建設，特別是離岸風電場的建設，已成為近年來快速增長的噪音源[76]。打樁作業是風電場建設的關鍵工序，其產生的聲脈衝具有極高的聲能密度[77]。典型的打樁作業每次衝擊產生的聲暴露級可達 180-200dB re 1 μ Pa²·s，在理想傳播條件下可在 50 公里外仍保持足以影響海洋哺乳動物的強度[78]。

1.2.3 噪音對海洋生物的影響機制 Impact Mechanisms on Marine Life

水下噪音對海洋生物的影響呈現出複雜的多層次特徵，涵蓋從分子細胞層面到生態系統層面的各個組織水準[79]。深入理解這些影響機制對於制定科學的保護策略具有重要意義[80]。

生理層面的影響主要表現為聽覺系統的直接損傷和全身性的應激反應[81]。強烈的聲暴露可能導致海洋哺乳動物聽覺毛細胞的機械性損傷，造成暫時性或永久性的聽力閾值偏移[82]。研究表明，暫時性聽力閾值偏移(Temporary Threshold Shift, TTS)的恢復時間與暴露強度和持續時間呈正相關關係，嚴重的暴露可能需要數週時間才能完全恢復[83]。

永久性聽力閾值偏移(Permanent Threshold Shift, PTS)代表不可逆轉的聽覺損傷，其發生閾值因物種而異但普遍低於致命傷害閾值[84]。實驗研究顯示，海豚等齒鯨類動物的 PTS 起始閾值約為 180-220dB re 1 μ Pa²·s(頻率加權值)，而鯨鬚鯨類的相應閾值則相對較低[85]。

應激反應是噪音暴露的另一重要生理後果，主要表現為下丘腦-垂體-腎上腺軸的激活和相應的激素水準變化[86]。長期的慢性應激可能導致免疫功能下降、生殖能力減退和生長發育遲緩等問題[87]。研究發現，即使是相對溫和的噪音暴露也可能引起海洋哺乳動物血液皮質醇水準的顯著升高[88]。

行為層面的影響涵蓋了海洋動物生活的各個方面，從基本的運動行為到複雜的社會交往都可能受到噪音的干擾[89]。迴避行為是最常見的即時反應，動物會主動遠離噪音源以減少聲暴露[90]。然而，這種迴避行為可能迫使動物放棄重要的棲息地，從而對其攝食、繁殖和休息等關鍵生活活動造成不利影響[91]。

通訊干擾是噪音影響的另一重要方面，主要表現為聲訊號的遮蔽效應[92]。當環境噪音的頻譜與動物通訊訊號重疊時，會降低訊號的探測距離和清晰度，影響個體間的資訊傳遞[93]。這種影響對於依賴聲通訊進行群體協調和配偶選擇的物種尤為嚴重[94]。

攝食行為的改變是噪音影響的重要表現之一。研究顯示，船舶噪音會顯著降低鯨魚的攝食效率，主要原因包括對獵物探測能力的干擾、攝食行為的中斷和能量分配的改變[95]。對於依賴回聲定位進行覓食的齒鯨類動物，噪音干擾可能直接影響其獵物捕獲成功率[96]。

生態系統層面的影響實現了噪音污染的更廣泛後果。食物網結構的改變是其中一個重要方面，當關鍵物種因噪音影響而數量減少或行為改變時，可能引發連鎖反應，影響整個生態系統的結構和功能[97]。種群動力學的變化是另一個重要後果，持續的噪音暴露可能導致敏感物種的局域滅絕，改變群落的物種組成[98]。

1.3 研究目的與範疇 Objectives and Scope

水下噪音研究的目的與範疇隨著科學認知的深化和社會需求的變化而不斷演進，實現了從單純的學術探索向應用導向研究的重要轉變[99]。明確研究的核心目標和邊界條件對於指導具體的研究活動具有重要意義[100]。

1.3.1 研究目標體系 Research Objective Framework

當代水下噪音研究的目標體系可以分為基礎科學目標、應用技術目標和政策支撐目標三個層次，各層次之間相互關聯、相互支撐，共同構成完整的研究框架[101]。

基礎科學目標主要關注對水下聲環境和生物聲學行為基本規律的認識和理解[102]。其核心內容包括：海洋聲傳播機制的深入研究，特別是複雜海洋環境中聲場的時空變化規律；海洋生物聽覺系統的結構功能特徵，包括不同類群動物的聽覺敏感性、頻率響應特性和聲訊號處理能力；噪音對生物個體的影響機制，涵蓋生理、行為和認知等多個層面的反應；群體和種群層面的影響機制，包括社會結構變化、種群動力學效應和適應性進化等[103]。

這些基礎科學研究的重要意義在於為應用研究提供理論支撐和科學依據。例如，對海洋生物聽覺特性的深入了解是制定科學的噪音暴露標準的前提；對聲傳播規律的掌握是進行準確的噪音影響預測的基礎[104]。同時，基礎研究也推動了相關學科理論的發展，如生物聲學、環境聲學和保護生物學等[105]。

應用技術目標聚焦於解決實際問題的技術方法和工具開發[106]。主要包括：噪音監測技術的改進和標準化，開發更加靈敏、可靠和經濟的監測設備和方法；噪音源識別和定位技術，能夠在複雜的海洋聲環境中準確識別和追蹤特定的噪音源；噪音影響評估方法，建立標準化的評估流程和定量指標體系；噪音減緩技術，包括聲源控制、傳播路徑干預和受體保護等多種策略[107]。

政策支撐目標旨在為環境管理和政策制定提供科學基礎和技術支撐[108]。具體包括：環境標準的制定，基於科學研究成果建立噪音暴露限值和環境品質標準；管理策略的優化，設計更加有效的噪音污染控制和生態保護措施；法規政策的完善，為相關法律法規的制定和修訂提供科學依據；國際合作的促進，通過科學研究加強國際交流與合作[109]。

1.3.2 學科範疇界定 Disciplinary Scope Definition

水下噪音研究作為新興的交叉學科領域，其學科範疇涉及自然科學、工程技術和社會科學等多個領域，呈現出明顯的跨學科特徵[110]。

自然科學層面的研究範疇主要包括物理海洋學、生物海洋學、動物行為學和生態學等[111]。物理海洋學為聲波在海洋中的傳播提供理論基礎，包括海洋分層結構

對聲速的影響、海底地形對聲場分佈的調節、海面波浪對聲散射的作用等[112]。生物海洋學關注海洋生物的聲學行為和聽覺生理，研究內容涵蓋動物發聲機制、聲接收系統、聲訊號處理和行為反應等[113]。

動物行為學提供了理解噪音對動物行為影響的理論框架和研究方法[114]。生態學則從群體、群落和生態系統層面探討噪音污染的長期影響和生態後果[115]。這些學科的交叉融合為水下噪音研究提供了堅實的科學基礎和豐富的研究視角[116]。

工程技術層面的研究範疇主要包括聲學工程、海洋工程、環境工程和資訊工程等[117]。聲學工程為噪音的產生、傳播和控制提供技術原理和方法；海洋工程關注海洋開發活動中的噪音產生機制和控制技術；環境工程提供污染控制和環境修復的技術手段；資訊工程則為聲學數據的採集、處理和分析提供技術支撐[118]。

社會科學層面的研究範疇主要包括環境經濟學、環境法學、環境政策學和環境社會學等[119]。環境經濟學關注噪音污染的經濟成本評估和成本效益分析；環境法學研究相關法律制度的建立和完善；環境政策學探討政策工具的設計和實施效果；環境社會學則關注噪音問題的社會認知和公眾參與[120]。

1.3.3 時空尺度特徵 Spatial-Temporal Scale Characteristics

水下噪音研究涉及從秒級到年際的時間尺度和從局部到全球的空間尺度，這種多尺度特徵對研究方法和技術手段提出了特殊要求[121]。

時間尺度的多樣性反映了不同研究問題的特殊需求[122]。瞬時影響研究主要關注秒到分鐘級的短期反應，如動物對突然噪音刺激的驚跳反應、迴避行為的觸發等；短期影響研究涉及小時到天級的時間範圍，包括行為模式的改變、生理參數的變化等；中期影響研究關注周到月級的影響，如棲息地利用模式的變化、繁殖行為的干擾等；長期影響研究則需要年到十年級的觀察期，以評估種群動態變化、適應性進化和生態系統結構變化等[123]。

空間尺度的複雜性源於海洋環境的開放性和連通性[124]。局域尺度研究通常涉及米到公里級的範圍，主要關注特定噪音源周圍的聲場分佈和生物反應；區域尺度研究涉及十到百公里級的範圍，關注海灣、海峽等半封閉水域的噪音環境和生態影響；海盆尺度研究涉及千公里級的範圍，關注整個海盆的噪音狀況和長距離遷徙動物的影響；全球尺度研究則關注海洋噪音的全球性趨勢和跨海盆的影響[125]。

不同時空尺度研究之間存在複雜的關聯性和相互作用[126]。短期局域的影響可能通過累積效應演化為長期區域性的後果；個體層面的行為改變可能通過群體動力學機制影響種群結構；局域性的棲息地品質下降可能對物種的整體保護狀況產生重要影響[127]。因此，多尺度整合研究已成為當代水下噪音研究的重要發展方向[128]。

1.4 評估方法與技術 Methodologies and Techniques

水下噪音研究的方法學體系經歷了從定性描述到定量分析、從單一指標到多元評估、從靜態觀察到動態監測的重要演進[129]。當代的評估方法與技術呈現出高度的整合性和系統性特徵，為深入理解複雜的水下聲環境提供了強有力的工具支撐[130]。

1.4.1 聲學測量技術 Acoustic Measurement Technologies

現代水下聲學測量技術建立在精密的感測器技術、先進的信號處理方法和完善的數據管理系統基礎之上[131]。水聽器作為核心感測組件，其技術發展直接決定了測量系統的性能極限[132]。

當代高性能水聽器普遍採用壓電陶瓷或壓電聚合物材料，具有寬頻響應、低本底噪音和高靈敏度等特點[133]。典型的科研級水聽器在 1Hz 至 100kHz 頻率範圍內保持平坦的響應特性，靈敏度達到 -180dB re 1V/ μ Pa 以上，本底噪音等效聲壓級低於海況零級的自然背景噪音[134]。近年來發展的向量水聽器能夠同時測量聲壓和質點速度，為聲源定位和聲場分析提供了更豐富的資訊[135]。

水聽器陣列技術的應用大幅提升了聲學測量的空間解析度和信噪比[136]。線性陣列適用於聲源的方位測定和距離估算，其角度解析度與陣列長度和工作頻率成正比[137]。平面陣列能夠實現二維的聲源定位，對於複雜聲場的分析具有重要意義[138]。三維陣列則可以完整重建聲場的空間結構，但其設計和維護成本相對較高[139]。

自動化監測系統的發展使得長期、連續的海洋聲學觀測成為可能[140]。現代的海洋聲學監測站通常整合了大容量數據存儲、即時數據處理、遠程通信和自主電源管理等功能模組[141]。這些系統能夠在無人值守條件下連續工作數月至數年，為建立長時間序列的海洋聲學數據庫提供了技術基礎[142]。

移動平台聲學測量技術的發展進一步擴展了觀測範圍和靈活性[143]。船載聲學系統適用於大範圍的聲場調查和聲源跟蹤；自主式水下載具搭載的聲學設備能夠進入危險或難以到達的海域進行測量；拖曳式陣列系統結合了高機動性和大孔徑的優勢，特別適用於軍用和工程應用[144]。

1.4.2 生物影響評估方法 Biological Impact Assessment Methods

生物影響評估是水下噪音研究的核心內容之一，其方法體系涵蓋了從分子生物學到生態學各個層次[145]。評估方法的選擇需要根據研究目標、物種特徵、時空尺度和資源條件等因素進行綜合考慮[146]。

生理學評估方法主要關注噪音對動物生理機能的直接影響[147]。聽覺生理學測試是其中最重要的組成部分，包括行為聽力圖測定、聽覺腦幹反應(Auditory Brainstem Response, ABR)記錄和耳聲發射(Otoacoustic Emission, OAE)檢測等[148]。這些方法能夠量化動物的聽覺敏感性、頻率響應特性和聽力損傷程度[149]。

應激生理學指標為評估噪音的全身性影響提供了重要手段[150]。血液和糞便中的皮質醇水準是最常用的應激指標，能夠反映動物的急性和慢性應激狀態[151]。其他生理指標如心率、呼吸頻率、免疫功能指標等也被廣泛應用於噪音影響評估

[152]。

行為學評估方法關注噪音對動物行為模式的影響[153]。直接觀察法是最傳統也是最基本的方法，通過肉眼或光學設備觀察動物的行為變化[154]。生物標記和衛星追蹤技術的應用使得長期、大範圍的行為監測成為可能[155]。聲學監測技術能夠自動記錄動物的發聲行為，為評估通訊干擾提供了客觀數據[156]。

實驗研究方法為建立因果關係提供了重要途徑[157]。受控暴露實驗能夠在嚴格控制的條件下研究特定噪音對動物的影響，為建立劑量-效應關係提供科學依據[158]。然而，實驗研究面臨倫理約束、生態相關性和外推性等挑戰，需要謹慎設計和執行[159]。

生態學評估方法從群體和生態系統層面評估噪音的長期影響[160]。種群監測通過長期追蹤特定種群的數量變化、分佈模式和種群結構來評估噪音的累積影響[161]。群落生態學方法關注物種組成、多樣性指數和群落結構的變化[162]。生態系統功能評估則從能量流動、物質循環和資訊傳遞等角度分析噪音對生態系統整體功能的影響[163]。

1.4.3 數據分析與建模技術 Data Analysis and Modeling Techniques

水下噪音研究產生的海量數據需要先進的分析技術和建模方法來提取有用資訊和發現規律[164]。數據分析與建模技術的發展直接決定了研究的深度和廣度[165]。

信號處理技術是聲學數據分析的基礎[166]。時域分析方法主要包括統計參數計算、相關分析和時間序列分析等，能夠描述聲訊號的基本特徵和時變規律[167]。頻域分析方法如快速傅立葉變換(Fast Fourier Transform, FFT)、功率譜密度估計和頻譜分析等，能夠揭示聲訊號的頻率結構和能量分佈[168]。時頻分析方法如短時傅立葉變換、小波變換和經驗模態分解等，能夠同時提供時間和頻率資訊，特別適用於非平穩信號的分析[169]。

機器學習和人工智慧技術在水下聲學研究中的應用日益廣泛[170]。監督學習方法如支援向量機、隨機森林和神經網路等被用於聲源識別和分類[171]。無監督學習方法如聚類分析和主成分分析等有助於發現數據中的隱藏模式和結構[172]。深度學習技術特別是卷積神經網路在聲譜圖分析和生物聲學信號識別方面表現出了卓越的性能[173]。

聲傳播建模是預測聲場分佈和評估噪音影響的重要工具[174]。射線理論模型基於幾何聲學原理，計算效率高但精度有限，適用於高頻聲波的傳播計算[175]。正簡諧波模型基於波動方程的精確解，能夠準確描述低頻聲波在分層介質中的傳播[176]。拋物線方程模型在計算效率和精度之間取得了良好的平衡，是目前應用最廣泛的海洋聲傳播模型[177]。

生態系統建模技術為理解噪音的生態影響提供了系統性的分析工具[178]。個體基礎模型(Individual-Based Model)能夠追蹤個體動物的行為和生理狀態，適用於研究噪音對個體的直接影響[179]。種群動力學模型關注種群水平的變化，能夠預測噪音對種群長期趨勢的影響[180]。生態網絡模型則從食物網和能量流動的角度分析噪音對生態系統結構和功能的影響[181]。

統計分析方法為數據解釋和假設檢驗提供了科學基礎[182]。描述性統計能夠總結數據的基本特徵；推論統計方法如 t 檢驗、方差分析和回歸分析等用於檢驗研究假設和建立變數間的關係[183]。多元統計方法如多元回歸、判別分析和典型相關分析等適用於處理多變數問題[184]。貝葉斯統計方法在處理不確定性和先驗資訊方面具有獨特優勢[185]。

1.5 國際研究趨勢 International Research Trends

水下噪音研究作為全球性的環境問題，其發展趨勢呈現出明顯的國際化和合作化特徵[186]。各國研究機構、國際組織和跨國企業在推動這一領域的發展方面發揮著不同但互補的作用[187]。

1.5.1 主要研究機構與計畫 Leading Research Institutions and Programs

國際水下噪音研究的發展主要由幾個關鍵機構和大型研究計畫推動[188]。美國國家海洋暨大氣總署作為全球海洋科學的領導機構，在水下噪音研究方面投入了大量資源[189]。NOAA 的海洋噪音戰略路線圖(Ocean Noise Strategy Roadmap)為美國未來十年的相關研究奠定了基礎框架[190]。

歐洲海洋委員會(European Marine Board)統籌歐洲各國的海洋研究活動，其發布的《應對歐洲水下噪音：現狀與未來優先事項》報告為歐洲地區的研究方向提供了重要指導[191]。歐盟地平線計畫(Horizon Europe)中的海洋相關項目大量涉及水下噪音研究，實現了歐洲對這一問題的高度重視[192]。

國際海洋探索委員會(International Council for the Exploration of the Sea, ICES)作為歷史悠久的海洋科學國際組織，其海洋哺乳動物工作組和人為聲音工作組在推動國際合作研究方面發揮了重要作用[193]。該組織定期發布的科學建議為各國政府制定相關政策提供了科學依據[194]。

大型國際合作研究計畫為跨國合作提供了重要平台[195]。AQUO 計畫(Achieve Quieter Oceans by shipping noise footprint reduction)集合了歐洲多國的研究力量，致力於商業航運噪音的減緩技術開發[196]。SONIC 計畫(Suppression Of underwater Noise Induced by Cavitation)專注於空化噪音的機理研究和控制技術[197]。

學術機構方面，美國加州大學聖地牙哥分校的斯克里普斯海洋學研究所(Scripps Institution of Oceanography)在海洋聲學研究方面具有世界領先地位[198]。英國南安普敦大學的聲學研究所、德國基爾大學的海洋研究所、加拿大達爾豪西大學的海洋研究所等都是該領域的重要研究基地[199]。

1.5.2 技術發展趨勢 Technological Development Trends

水下噪音研究的技術發展呈現出幾個明顯的趨勢，反映了科學技術進步對研究能力的推動作用[200]。

感測技術的小型化和智慧化是首要趨勢[201]。新一代的水聽器採用 MEMS(微機電系統)技術，實現了體積小型化和功耗降低，使得大規模部署成為可能[202]。智慧感測器集成了本地數據處理能力，能夠進行初步的信號分析和特徵提取，大幅降低了數據傳輸和存儲的需求[203]。

無線通信技術的應用改變了海洋聲學監測的部署模式[204]。水下無線通信雖然仍面臨技術挑戰，但在近距離、低數據率應用中已顯示出良好的前景[205]。衛星通信技術的成本下降使得遠程監測站的實時數據傳輸成為現實[206]。

雲計算和邊緣計算技術為海量聲學數據的處理提供了新的解決方案[207]。雲平台的彈性計算能力能夠應對峰值計算需求，而邊緣計算則能夠在數據產生地進行初步處理，減少網絡傳輸負擔[208]。

人工智慧技術在聲學數據分析中的應用日益深入[209]。深度學習模型在聲源識別、信號分類和異常檢測方面表現出了超越傳統方法的性能[210]。強化學習技術開始應用於自適應監測策略的優化[211]。

數位孿生技術為複雜海洋聲學問題的研究提供了新的途徑[212]。通過建立海洋聲學環境的數位化模型，研究者能夠在虛擬環境中進行各種假設情景的模擬和預測[213]。

1.5.3 政策與法規發展 Policy and Regulatory Development

國際水下噪音政策與法規的發展呈現出從軟約束向硬約束、從單邊行動向多邊合作的演進趨勢[214]。

國際海事組織在推動全球航運噪音管理方面發揮了核心作用[215]。2014 年通過的船舶噪音減緩指導方針雖然是非強制性的，但為各國制定相關法規提供了技術框架[216]。2023 年的修訂版指導方針進一步完善了技術內容，並強化了實施機制[217]。

區域性海洋保護組織在推動區域合作方面發揮了重要作用[218]。歐盟的海洋戰略框架指令將水下噪音列為海洋環境狀況評估的強制性指標，開創了將噪音污染納入法律管制的先例[219]。OSPAR 公約和 HELCOM 公約等區域性協定也開始將水下噪音作為重要議題納入合作範疇[220]。

國家層面的法規發展呈現出多樣化的特徵[221]。美國通過海洋哺乳動物保護法建立了相對完善的管制體系；加拿大制定了海洋噪音戰略，統籌聯邦各部門的管理行動；澳大利亞將海洋噪音納入環境影響評估的強制內容[222]。

產業標準的制定為規範行業行為提供了技術依據[223]。國際標準化組織制定的 ISO 17208 系列標準為船舶水下噪音的測量和評估建立了統一的技術規範[224]。船級社如 DNV、勞氏船級社等也制定了相應的技術標準和認證程序[225]。

未來政策發展的趨勢包括強制性標準的制定、經濟激勵機制的建立、國際合作機制的完善等[226]。隨著科學認知的深化和技術能力的提升，更加嚴格和全面的管制措施可能逐步出台[227]。

參考文獻 References

- [1] Duarte, C. M., et al. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* , 371(6529), eaba4658.
- [2] Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 5-20.
- [3] Urick, R. J. (2013). *Principles of underwater sound* . Peninsula Publishing.
- [4] Payne, R., & Webb, D. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* , 188(1), 110-141.
- [5] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [6] National Research Council. (2003). *Ocean noise and marine mammals* . National Academies Press.
- [7] Southall, B. L., et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* , 33(4), 411-521.
- [8] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.
- [9] Slabbekoorn, H., et al. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution* , 25(7), 419-427.
- [10] Clay, C. S., & Medwin, H. (2013). *Acoustical oceanography: Principles and applications* . John Wiley & Sons.
- [11] Payne, R., & Webb, D. (1971). Orientation by means of long range acoustic signaling in baleen whales. *Annals of the New York Academy of Sciences* , 188(1), 110-141.
- [12] Clark, C. W. (1990). Acoustic behavior of mysticete whales. *Sensory Abilities of Cetaceans* , 571-583.
- [13] Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America* , 34(12), 1936-1956.
- [14] Greene Jr, C. R., & Richardson, W. J. (1988). Characteristics of marine seismic survey sounds in the Beaufort Sea. *Journal of the Acoustical Society of America* , 83(6), 2246-2254.

- [15] McDonald, M. A., et al. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of the Acoustical Society of America* , 120(2), 711-718.
- [16] Thomsen, F., et al. (2006). Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. COWRIE Ltd .
- [17] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [18] Southall, B. L., et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria. *Aquatic Mammals* , 33(4), 411-521.
- [19] Mellinger, D. K., et al. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography* , 20(4), 36-45.
- [20] Mate, B. R., et al. (1999). Satellite-monitored movements of the northern right whale. *Journal of Wildlife Management* , 63(4), 1393-1405.
- [21] Tasker, M. L., et al. (2010). Marine Strategy Framework Directive - Task Group 11 Report. European Commission.
- [22] International Maritime Organization. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping. MEPC.1/Circ.833.
- [23] Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* , 328(5985), 1523-1528.
- [24] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.
- [25] Erbe, C., et al. (2019). The effects of ship noise on marine mammals—A review. *Frontiers in Marine Science* , 6, 606.
- [26] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics* . Springer.
- [27] Ladich, F., & Popper, A. N. (2004). Parallel evolution in fish hearing organs. *Evolution of the Vertebrate Auditory System* , 95-127.

- [28] Robinson, S. P., et al. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Physical Laboratory.
- [29] Merchant, N. D., et al. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* , 6(3), 257-265.
- [30] Schofield, O., et al. (2007). Slocum gliders: Robust and ready. *Journal of Field Robotics* , 24(6), 473-485.
- [31] McKenna, M. F., et al. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(1), 92-103.
- [32] Normandeau Associates. (2012). Effects of noise on fish, fisheries, and invertebrates in the U.S. Atlantic and Arctic from energy industry sound-generating activities. Report prepared for the Bureau of Ocean Energy Management.
- [33] O'Connor, S., et al. (2009). Whale watching worldwide: tourism numbers, expenditures and expanding economic benefits . International Fund for Animal Welfare.
- [34] Wright, A. J., et al. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology* , 20(2-3), 274-316.
- [35] Scott, K. N. (2004). International regulation of undersea noise. *International & Comparative Law Quarterly* , 53(2), 287-323.
- [36] Audoly, C., et al. (2017). Mitigation of underwater radiated noise related to shipping and its impact on marine life. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* ,

42(2), 315-328.

- [37] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [38] Tyack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy* , 89(3), 549-558.
- [39] New, L. F., et al. (2014). Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series* , 496, 99-108.
- [40] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals* , 45(2), 125-232.
- [41] Ellison, W. T., et al. (2012). A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds. *Conservation Biology* , 26(1), 21-28.
- [42] Costanza, R., et al. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* , 387(6630), 253-260.
- [43] Loomis, J., & Larson, D. (1994). Total economic values of increasing gray whale populations: Results from a contingent valuation survey of visitors and households. *Marine Resource Economics* , 9(3), 275-286.
- [44] Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems* , 1(5), 431-436.
- [45] Scheffer, M., et al. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* , 413(6856),

591-596.

- [46] Liu, J., et al. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science* , 317(5844), 1513-1516.
- [47] Young, O. R., et al. (2006). The globalization of socio-ecological systems. *Global Environmental Change* , 16(3), 304-316.
- [48] Hildebrand, J. A. (2005). Impacts of anthropogenic sound. *Marine Mammal Research* , 101-124.
- [49] National Marine Fisheries Service. (2018). 2018 revisions to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.
- [50] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* , 74(3), 635-651.
- [51] Normandeau Associates. (2012). Effects of noise on fish, fisheries, and invertebrates in the U.S. Atlantic and Arctic from energy industry sound-generating activities. Report prepared for the Bureau of Ocean Energy Management.
- [52] Ross, D. (2013). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 30(2), 257-261.
- [53] Frisk, G. V. (2012). Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports* , 2, 437.
- [54] Boyd, I. L., et al. (2008). The effects of anthropogenic sound on marine mammals.

- [55] Southall, B. L., et al. (2013). Behavioral responses of individual blue whales (*Balaenoptera musculus*) to mid-frequency military sonar. *Journal of Experimental Biology* , 216(4), 627-638.
- [56] Bailey, H., et al. (2010). Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin* , 60(6), 888-897.
- [57] Tougaard, J., et al. (2009). Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Journal of the Acoustical Society of America* , 126(1), 11-14.
- [58] Nieuwkirk, S. L., et al. (2012). Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(2), 1102-1112.
- [59] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [60] Hatch, L., et al. (2008). Characterizing the relative contributions of large vessels to total ocean noise fields. *Journal of the Acoustical Society of America* , 124(2), 757-767.
- [61] Clark, C. W., et al. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 161-181.
- [62] Au, W. W. (2012). *The sonar of dolphins* . Springer Science & Business Media.
- [63] Kastelein, R. A., et al. (2009). Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency-modulated signals. *Journal of*

the Acoustical Society of America , 112(1), 334-344.

- [64] Erbe, C. (2002). Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales (*Orcinus orca*), based on an acoustic impact model. *Marine Mammal Science* , 18(2), 394-418.
- [65] Villadsgaard, A., et al. (2007). Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena* . *Journal of Experimental Biology* , 210(1), 56-64.
- [66] Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *Journal of the Acoustical Society of America* , 107(1), 118-129.
- [67] McKenna, M. F., et al. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(1), 92-103.
- [68] Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion* . Butterworth-Heinemann.
- [69] Kaplan, M. B., & Mooney, T. A. (2015). Ambient noise and temporal patterns of boat activity in the US Virgin Islands National Park. *Marine Pollution Bulletin* , 98(1-2), 221-228.
- [70] Wales, S. C., & Heitmeyer, R. M. (2002). An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. *Journal of the Acoustical Science of America* , 111(3), 1211-1231.
- [71] Caldwell, J., & Dragoset, W. (2000). A brief overview of seismic air-gun arrays. *The Leading Edge* , 19(8), 898-902.
- [72] Goold, J. C., & Coates, R. F. W. (2006). Near source, high frequency air-gun signatures. *Proceedings of the Institute of Acoustics* , 28(5), 126-133.

- [73] Gisiner, R. C. (2016). Sound and marine seismic surveys. *Acoustics Today* , 12(4), 10-18.
- [74] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [75] D'Amico, A., et al. (2009). Beaked whale strandings and naval exercises. *Aquatic Mammals* , 35(4), 452-472.
- [76] Thomsen, F., et al. (2006). Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. COWRIE Ltd .
- [77] Nedwell, J. R., et al. (2007). A review of offshore windfarm related underwater noise sources. Report No. 544 R 0308. COWRIE Ltd.
- [78] Madsen, P. T., et al. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals. *Marine Ecology Progress Series* , 309, 279-295.
- [79] Weilgart, L. S. (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology* , 85(11), 1091-1116.
- [80] Wright, A. J., et al. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology* , 20(2-3), 274-316.
- [81] Ketten, D. R. (2008). Underwater ears and the physiology of impacts. *Bioacoustics* , 17(1-3), 3-5.
- [82] Finneran, J. J., & Schlundt, C. E. (2004). Effects of intense pure tones on the behavior of trained odontocetes. Technical Report 1913. Space and Naval Warfare Systems Center San Diego.

- [83] Mooney, T. A., et al. (2009). Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. *Journal of the Acoustical Society of America* , 126(6), 3251-3259.
- [84] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals* , 45(2), 125-232.
- [85] Finneran, J. J. (2016). Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater sound. Technical Report. U.S. Navy Marine Mammal Program.
- [86] Rolland, R. M., et al. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B* , 279(1737), 2363-2368.
- [87] Romano, T. A., et al. (2004). Anthropogenic sound and marine mammal health. *Aquatic Mammals* , 30(1), 143-157.
- [88] Holt, M. M., et al. (2009). Speaking up: Killer whales (*Orcinus orca*) increase their call amplitude in response to vessel noise. *Journal of the Acoustical Society of America* , 125(1), EL27-EL32.
- [89] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [90] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [91] Lusseau, D., et al. (2009). The short-term behavioral reactions of bottlenose dolphins to interactions with boats in Doubtful Sound, New Zealand. *Marine Mammal Science* , 25(2), 35-47.
- [92] Clark, C. W., et al. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems. *Marine*

- Ecology Progress Series , 395, 161-181.
- [93] Jensen, F. H., et al. (2009). Vessel noise effects on delphinid communication. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 161-175.
- [94] Parks, S. E., et al. (2007). Short-and long-term changes in right whale calling behavior. *Journal of the Acoustical Society of America* , 122(6), 3725-3731.
- [95] Goldbogen, J. A., et al. (2013). Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proceedings of the Royal Society B* , 280(1765), 20130657.
- [96] Wisniewska, D. M., et al. (2018). High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Proceedings of the Royal Society B* , 285(1872), 20172314.
- [97] Shannon, G., et al. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biological Reviews* , 91(4), 982-1005.
- [98] Williams, R., et al. (2006). Killer whale responses to whale-watching vessels. *Journal of Zoology* , 269(3), 347-354.
- [99] National Research Council. (2003). *Ocean noise and marine mammals* . National Academies Press.
- [100] Southall, B. L., et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria. *Aquatic Mammals* , 33(4), 411-521.
- [101] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* , 74(3), 635-651.
- [102] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics* . Springer.
- [103] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.
- [104] Tyack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy* , 89(3), 549-558.
- [105] Slabbekoorn, H., et al. (2010). A noisy spring: The impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution* , 25(7), 419-427.
- [106] Erbe, C., et al. (2016). The effects of ship noise on marine mammals—A review. *Frontiers in Marine Science* , 3, 23.

- [107] Merchant, N. D. (2019). Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science & Policy* , 92, 116-123.
- [108] Scott, K. N. (2004). International regulation of undersea noise. *International & Comparative Law Quarterly* , 53(2), 287-323.
- [109] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.
- [110] Pijanowski, B. C., et al. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience* , 61(3), 203-216.
- [111] Mellinger, D. K., et al. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography* , 20(4), 36-45.
- [112] Jensen, F. B., et al. (2011). *Computational ocean acoustics* . Springer Science & Business Media.
- [113] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology* , 94(5), 692-713.
- [114] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [115] Shannon, G., et al. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biological Reviews* , 91(4), 982-1005.
- [116] Farina, A., & Gage, S. H. (2017). *Ecoacoustics: the ecological role of sounds* . John Wiley & Sons.
- [117] Urick, R. J. (2013). *Principles of underwater sound* . Peninsula Publishing.
- [118] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.
- [119] Pearce, D., & Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the*

environment . Johns Hopkins University Press.

- [120] Young, O. R., et al. (2006). The globalization of socio-ecological systems. *Global Environmental Change* , 16(3), 304-316.
- [121] Levin, S. A. (1992). The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* , 73(6), 1943-1967.
- [122] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [123] New, L. F., et al. (2014). Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series* , 496, 99-108.
- [124] Carr, M. H., et al. (2003). Comparing marine and terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* , 34(1), 231-257.
- [125] Halpern, B. S., et al. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* , 319(5865), 948-952.
- [126] Pirotta, E., et al. (2018). Understanding the population consequences of disturbance. *Ecology and Evolution* , 8(19), 9934-9946.
- [127] Williams, R., et al. (2017). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.
- [128] Booth, C. G., et al. (2020). PCoD—A population consequences of disturbance model for marine mammal populations. *Environmental Modelling & Software* , 125, 104627.

- [129] Merchant, N. D., et al. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* , 6(3), 257-265.
- [130] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.
- [131] Robinson, S. P., et al. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Physical Laboratory.
- [132] Sherman, C. H., & Butler, J. L. (2007). *Transducers and arrays for underwater sound* . Springer.
- [133] Kinsler, L. E., et al. (2019). *Fundamentals of acoustics* . John Wiley & Sons.
- [134] Bobber, R. J. (2012). *Underwater electroacoustic measurements* . Peninsula Publishing.
- [135] Nehorai, A., & Paldi, E. (1994). Acoustic vector-sensor array processing. *IEEE Transactions on Signal Processing* , 42(9), 2481-2491.
- [136] Van Trees, H. L. (2002). *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory* . John Wiley & Sons.
- [137] Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1992). *Array signal processing: concepts and techniques* . PTR Prentice Hall.
- [138] Benesty, J., et al. (2008). *Microphone array signal processing* . Springer Science & Business Media.
- [139] Baggeroer, A. B., et al. (1993). An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 18(4), 401-424.

- [140] André, M., et al. (2011). Listening to the deep: Live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals. *Marine Pollution Bulletin* , 63(4), 18-26.
- [141] Mellinger, D. K., et al. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography* , 20(4), 36-45.
- [142] Sousa-Lima, R. S., et al. (2013). A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquatic Mammals* , 39(1), 23-53.
- [143] Zimmer, W. M. (2011). *Passive acoustic monitoring of cetaceans* . Cambridge University Press.
- [144] Makris, N. C., et al. (2006). Fish population and behavior revealed by instantaneous continental shelf-scale imaging. *Science* , 311(5761), 660-663.
- [145] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* , 74(3), 635-651.
- [146] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals* , 45(2), 125-232.
- [147] Ketten, D. R. (1995). Estimates of blast injury and acoustic trauma zones for marine mammals from underwater explosions. *Sensory systems of aquatic mammals* , 391-407.
- [148] Finneran, J. J., & Schlundt, C. E. (2004). Effects of intense pure tones on the behavior of trained odontocetes. Technical Report 1913. Space and Naval Warfare

Systems Center San Diego.

- [149] Houser, D. S., & Finneran, J. J. (2006). A comparison of underwater hearing sensitivity in bottlenose dolphins and harbor porpoises. *Journal of the Acoustical Society of America* , 119(6), 3599-3605.
- [150] Romano, T. A., et al. (2004). Anthropogenic sound and marine mammal health. *Aquatic Mammals* , 30(1), 143-157.
- [151] Rolland, R. M., et al. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B* , 279(1737), 2363-2368.
- [152] Wright, A. J., et al. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology* , 20(2-3), 274-316.
- [153] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [154] Mann, J. (1999). Behavioral sampling methods for cetaceans: A review and critique. *Marine Mammal Science* , 15(1), 102-122.
- [155] Costa, D. P., et al. (2012). New insights into pelagic migrations: Implications for ecology and conservation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* , 43, 73-96.
- [156] Parks, S. E., et al. (2007). Short-and long-term changes in right whale calling behavior. *Journal of the Acoustical Society of America* , 122(6), 3725-3731.
- [157] Kastak, D., & Schusterman, R. J. (1998). Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds. *Journal of the Acoustical Society of America* , 103(4), 2216-2228.

- [158] Finneran, J. J., et al. (2005). Pure tone audiograms and possible aminoglycoside-induced hearing loss in belugas (*Delphinapterus leucas*). *Journal of the Acoustical Society of America* , 117(6), 3936-3943.
- [159] Götz, T., et al. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. OSPAR Commission.
- [160] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.
- [161] Bejder, L., et al. (2006). Decline in relative abundance of bottlenose dolphins exposed to long-term disturbance. *Conservation Biology* , 20(6), 1791-1798.
- [162] Magurran, A. E. (2003). *Measuring biological diversity* . John Wiley & Sons.
- [163] Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2004). *Fundamentals of ecology* . Cengage Learning.
- [164] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.
- [165] Merchant, N. D., et al. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* , 6(3), 257-265.
- [166] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2009). *Discrete-time signal processing* . Pearson.
- [167] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2011). *Random data: analysis and measurement procedures* . John Wiley & Sons.

- [168] Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* , 15(2), 70-73.
- [169] Mallat, S. (2008). *A wavelet tour of signal processing* . Academic Press.
- [170] LeCun, Y., et al. (2015). Deep learning. *Nature* , 521(7553), 436-444.
- [171] Roch, M. A., et al. (2006). Classification of echolocation clicks from odontocetes in the Southern California Bight. *Journal of the Acoustical Society of America* , 120(1), 467-475.
- [172] Hastie, T., et al. (2009). *The elements of statistical learning* . Springer.
- [173] Shiu, Y., et al. (2020). Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific Reports* , 10(1), 607.
- [174] Jensen, F. B., et al. (2011). *Computational ocean acoustics* . Springer Science & Business Media.
- [175] Medwin, H., & Clay, C. S. (2012). *Fundamentals of acoustical oceanography* . Academic Press.
- [176] Pierce, A. D. (2019). *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications* . Springer Nature.
- [177] Collins, M. D. (1993). A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *Journal of the Acoustical Society of America* , 93(4), 1736-1742.
- [178] DeAngelis, D. L., & Mooij, W. M. (2005). Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* , 36, 147-168.

- [179] Grimm, V., & Railsback, S. F. (2005). Individual-based modeling and ecology . Princeton University Press.
- [180] Caswell, H. (2001). Matrix population models . Sinauer Associates.
- [181] Dunne, J. A., et al. (2002). Food-web structure and network theory. Proceedings of the National Academy of Sciences , 99(20), 12917-12922.
- [182] Zar, J. H. (2013). Biostatistical analysis . Pearson.
- [183] Quinn, G. P., & Keough, M. J. (2002). Experimental design and data analysis for biologists . Cambridge University Press.
- [184] Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2014). Applied multivariate statistical analysis . Pearson.
- [185] Gelman, A., et al. (2013). Bayesian data analysis . CRC Press.
- [186] Thomsen, F., et al. (2021). Addressing underwater noise in Europe: Current state of knowledge and future priorities. European Marine Board.
- [187] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. Ocean & Coastal Management , 115, 17-24.
- [188] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2016). Ocean noise strategy roadmap. Available at: <https://oceannoise.noaa.gov/roadmap>
- [189] Hildebrand, J. A. (2005). Impacts of anthropogenic sound. Marine mammal research , 101-124.

- [190] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2016). Ocean noise strategy roadmap. Available at: <https://oceannoise.noaa.gov/roadmap>
- [191] Thomsen, F., et al. (2021). Addressing underwater noise in Europe: Current state of knowledge and future priorities. European Marine Board.
- [192] European Commission. (2021). Horizon Europe Programme. Available at: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
- [193] International Council for the Exploration of the Sea. (2020). ICES guidelines for underwater noise monitoring. ICES Cooperative Research Report No. 354.
- [194] ICES. (2019). Working group on marine mammal ecology (WGMME). ICES Scientific Reports, 1:22.
- [195] Audoly, C., et al. (2017). Mitigation of underwater radiated noise related to shipping and its impact on marine life: A practical approach developed in the scope of AQUO project. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 42(2), 315-328.
- [196] AQUO Project Consortium. (2015). Achieve quieter oceans by shipping noise footprint reduction. Available at: <http://www.aquo.eu/>
- [197] SONIC Project Consortium. (2016). Suppression of underwater noise induced by cavitation. Available at: <http://www.sonic-project.eu/>
- [198] Scripps Institution of Oceanography. (2020). Marine Physical Laboratory. Available at: <https://mpl.ucsd.edu/>
- [199] University of Southampton. (2020). Institute of Sound and Vibration Research. Available at: <https://www.isvr.soton.ac.uk/>

- [200] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.
- [201] Robinson, S. P., et al. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Physical Laboratory.
- [202] Chen, J., et al. (2016). MEMS-based underwater acoustic sensors. *Sensors* , 16(9), 1470.
- [203] André, M., et al. (2011). Listening to the deep: Live monitoring of ocean noise and cetacean acoustic signals. *Marine Pollution Bulletin* , 63(4), 18-26.
- [204] Heidemann, J., et al. (2012). Underwater sensor networks: Applications, advances and challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* , 370(1958), 158-175.
- [205] Akyildiz, I. F., et al. (2005). Underwater acoustic sensor networks: Research challenges. *Ad hoc networks* , 3(3), 257-279.
- [206] Sozer, E. M., et al. (2000). Underwater acoustic networks. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 25(1), 72-83.
- [207] Buyya, R., et al. (2009). Cloud computing and emerging IT platforms. *Future Generation Computer Systems* , 25(6), 599-616.
- [208] Shi, W., et al. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal* , 3(5), 637-646.
- [209] Shiu, Y., et al. (2020). Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific Reports* , 10(1), 607.

- [210] LeCun, Y., et al. (2015). Deep learning. *Nature* , 521(7553), 436-444.
- [211] Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* . MIT Press.
- [212] Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *Digital Manufacturing* , 1(1), 1-7.
- [213] Tao, F., et al. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 94(9-12), 3563-3576.
- [214] Scott, K. N. (2004). International regulation of undersea noise. *International & Comparative Law Quarterly* , 53(2), 287-323.
- [215] International Maritime Organization. (2023). Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping. MEPC.1/Circ.906.
- [216] International Maritime Organization. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping. MEPC.1/Circ.833.
- [217] International Maritime Organization. (2023). Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping. MEPC.1/Circ.906.
- [218] OSPAR Commission. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. Biodiversity Series Publication Number 441/2009.
- [219] European Commission. (2008). Directive 2008/56/EC establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. Official Journal

of the European Union, L 164/19.

[220] HELCOM. (2018). State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. Baltic Sea Environment Proceedings No. 155.

[221] Dolman, S. J., et al. (2015). Evolution of marine noise pollution management. *Aquatic Mammals* , 41(4), 357-374.

[222] Wright, A. J., & Moors-Murphy, H. B. (2022). Regulating impacts of noise on marine mammals in North America. *Journal of International Wildlife Law & Policy* , 25(3-4), 181-218.

[223] International Organization for Standardization. (2016). Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. ISO 17208-1:2016.

[224] International Organization for Standardization. (2019). Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships. ISO 17208-2:2019.

[225] DNV. (2020). Rules for classification - Ships - Additional class notations. DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch7.

[226] Merchant, N. D. (2019). Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science & Policy* , 92, 116-123.

[227] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.

第二章 水下噪音特性

Characteristics of Underwater Noise

水下噪音特性的研究構成了海洋聲學科學的基礎理論框架，涉及聲波在複雜海洋環境中傳播的物理機制、環境因子對聲學特性的影響、不同噪音源的產生機制與特徵，以及噪音信號在頻域和時空域的變化規律。海洋環境作為一個複雜的三維非均質介質，其獨特的物理特性決定了水下聲波傳播呈現出與大氣環境截然不同的行為模式。溫度、鹽度、壓力等海洋環境參數的空間分布和時間變化，直接影響著聲速剖面的結構，進而控制聲波的折射、反射、散射和衰減過程。

現代海洋環境中的水下噪音來源呈現出日益複雜化和多元化的特徵。人為噪音源，包括商業船舶、軍事艦艇、海洋工程活動、地震勘探等，已成為許多海域背景噪音的主導因子，特別是在低頻段（10-1000Hz）範圍內，全球海運活動產生的噪音已顯著改變了海洋的自然聲景。同時，自然噪音源如風浪、降雨、地震活動、生物聲學現象等，仍然是海洋聲環境的重要組成部分，特別是在遠離人類活動的深海區域和特定頻率範圍內。

水下噪音的頻譜特徵反映了不同聲源的物理產生機制和傳播路徑的影響。低頻噪音(<100Hz)主要由大型船舶的推進系統和海洋工程活動產生，具有傳播距離遠、穿透能力強的特點。中頻噪音（100Hz - 10kHz）涵蓋了多種人為和自然聲源，是海洋生物通訊和海洋哺乳動物聽覺的重要頻段。高頻噪音(>10kHz)主要來自近距離的機械噪音、氣泡破裂聲和生物高頻發聲，傳播距離相對較短但對局域生態系統影響顯著。

時空變化特徵實現了水下噪音的動態性和複雜性。時間尺度上，噪音水平呈現出多重週期性變化，包括日週期變化（與人類活動模式相關）、季節性變化（與海洋環境條件和生物活動相關）、以及長期趨勢變化（與全球航運增長和氣候變化相關）。空間尺度上，噪音分布受到聲源分布、海洋地形、水文條件等因素的複雜調節，形成了從局域到全球尺度的多層次空間變化模式。近年來，隨著被動聲學監測技術的發展和全球監測網路的建立，對水下噪音時空變化規律的理解正在不斷深化，為海洋環境保護和永續發展提供了重要的科學依據。

2.1 聲音傳播原理 Principles of Sound Propagation

聲音傳播原理是理解水下噪音特性的核心理論基礎，涉及聲波作為機械波在海水中

介質中的生成、傳播、轉換和衰減等物理過程。與空氣中的聲傳播相比，水下聲學環境具有獨特的物理特性：海水的高密度（約為空氣的 800 倍）和相對不可壓縮性使得聲波傳播速度較快（約 1500m/s，為空氣中的 4.3 倍），而較低的聲衰減係數使得聲波能夠傳播更遠的距離。海洋環境的三維非均質性、動態變化性和邊界複雜性，使得水下聲傳播呈現出豐富的物理現象，包括多途傳播、聲聚焦、聲陰影區、波導效應等特殊現象。

海洋聲學的理論框架建立在經典的波動理論基礎之上，主要包括聲波方程、邊界條件和介質參數的數學描述。在均勻介質中，聲波傳播遵循齊次波動方程 $\nabla^2 p - (1/c^2)(\partial^2 p/\partial t^2) = 0$ ，其中 p 為聲壓， c 為聲速。然而，實際海洋環境的非均質性要求考慮聲速、密度、衰減等參數的空間變化，導致複雜的耦合偏微分方程組。聲線理論、正常模式理論、拋物方程理論等不同的近似方法，分別適用於不同的頻率範圍、傳播距離和環境條件，構成了海洋聲學預測的多元化理論工具集。

聲波在海洋中的傳播路徑受到聲速場的空間分布控制，遵循 Fermat 原理和 Snell 定律。典型的海洋聲速剖面呈現出表面混合層、躍層、深水層等垂直結構，形成複雜的聲線彎曲和多途傳播現象。聲速的水平變化，如海洋鋒面、渦旋、內波等中尺度現象，進一步增加了聲傳播的複雜性。聲能的幾何擴散、介質吸收、邊界散射等損失機制，共同決定了聲信號的傳播損失特性，這些損失機制的相對重要性隨頻率、距離和環境條件的不同而變化。

現代海洋聲學研究越來越重視環境聲學的概念，強調海洋環境參數對聲傳播的決定性影響。海洋的物理海洋學過程，如潮汐、內波、湍流混合等，會引起聲速場的時變性，進而影響聲傳播特性。生物聲學現象，如魚群散射、海洋哺乳動物發聲等，不僅是重要的聲源，也會改變聲傳播環境。海洋化學和地質因素，如溶解氣體含量、懸浮顆粒濃度、海底沉積物特性等，也會對聲波傳播產生可測量的影響。

2.1.1 波動方程與聲學基本原理 Wave Equations and Acoustic Fundamentals

波動方程與聲學基本原理構成了水下聲學的理論核心，為理解和預測海洋環境中

的聲現象提供了數學框架。聲波作為機械波的一種，其傳播過程遵循質量守恆、動量守恆和能量守恆等基本物理定律。在流體介質中，聲波的產生源於介質粒子的振動，這種振動以壓縮波的形式在介質中傳播，形成疏密相間的壓力變化。海水作為聲波傳播的介質，其物理特性如密度、可壓縮性、黏滯性等直接決定了聲波的傳播特徵。

線性聲學理論基於小振幅假設，認為聲擾動相對於介質的靜態性質是微小的。在此假設下，可以建立線性化的聲學方程組，包括連續性方程 $\partial \rho' / \partial t + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ 、歐拉方程 $\rho_0 \partial \mathbf{v} / \partial t = -\nabla p'$ ，以及狀態方程 $p' = c^2 \rho'$ ，其中 ρ' 和 p' 分別為密度和壓力的聲學擾動， \mathbf{v} 為粒子速度， ρ_0 為介質密度， c 為聲速[1]。將這些方程聯立消元，可得到齊次波動方程 $\nabla^2 p - (1/c^2)(\partial^2 p / \partial t^2) = 0$ ，這是海洋聲學中最基本的偏微分方程。

波動方程的解具有多種數學形式，每種形式都對應特定的物理情況。平面波解 $p(\mathbf{x}, t) = A \cos(\mathbf{kx} - \omega t + \varphi)$ 適用於均勻無界介質中的聲傳播，其中 $\mathbf{k} = \omega/c$ 為波數， ω 為角頻率， A 為振幅， φ 為初相位。球面波解 $p(\mathbf{r}, t) = (A/r) \cos(\mathbf{kr} - \omega t + \varphi)$ 描述點聲源在三維均勻介質中產生的聲場，實現了聲能隨距離的幾何擴散規律。柱面波解適用於二維問題或線聲源情況。這些基本解可以透過疊加原理組合，形成更複雜聲場的數學描述[2]。

聲學參量為定量描述聲場提供了標準化的物理量。聲壓 p 是聲場中最直接的描述量，通常以均方根值表示瞬時壓力的統計特性。聲壓級 (Sound Pressure Level, SPL) 定義為 $SPL = 20 \log_{10}(p/p_0)$ ，其中 $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ 為水中的參考聲壓。聲強 I 描述聲波傳播的能量流密度，其大小為 $I = p^2/(\rho c)$ ，方向為聲波傳播方向。聲功率 W 表示聲源的總輻射能量，是聲強在聲源表面的積分。這些參量之間存在確定的數學關係，為聲場的分析 and 測量提供了理論基礎[3]。

頻域分析方法是處理聲學問題的重要數學工具。傅立葉變換將時域信號轉換為頻域表示，揭示信號的頻率組成和相位關係。對於時諧信號，波動方程簡化為亥姆霍茲方程 $\nabla^2 p + k^2 p = 0$ ，這是一個橢圓型偏微分方程，其解的性質與波數 k 密切相關。在亞音速流動情況下 ($k^2 > 0$)，方程具有振盪性解；在超音速情況下 ($k^2 < 0$)，方程具有指數型解。頻域方法的優勢在於能夠處理複雜的邊界條件和非均質介質

問題，是現代數值聲學計算的基礎[4]。

聲學邊界條件反映了聲波與介質界面相互作用的物理規律。剛性邊界條件要求法向粒子速度為零，即 $\partial p / \partial n = 0$ ，適用於聲阻抗遠大於流體阻抗的固體界面。壓力釋放邊界條件要求聲壓為零，即 $p = 0$ ，適用於自由液面或氣液界面。阻抗邊界條件 $p = Z(\partial p / \partial n)$ 提供了更通用的描述，其中 Z 為特定阻抗，能夠描述各種中間情況。吸收邊界條件用於數值計算中消除人工反射，確保計算域邊界的透明性[5]。

非線性聲學效應在高強度聲場中變得重要，需要考慮有限振幅效應對聲傳播的影響。非線性參數 B/A 描述介質的非線性程度，海水的 B/A 值約為5.2，相對較小但在高聲強時不可忽略。非線性效應導致波形畸變、頻率偏移、諧波產生等現象，在聲納、海洋地震學等應用中需要特別考慮。**Burgers**方程和**KZK**方程等非線性波動方程為處理這類問題提供了理論工具[6]。

聲散射理論處理聲波與物體或介質不均勻性相互作用的問題。瑞利散射適用於散射體尺寸遠小於波長的情況，散射強度與頻率的四次方成正比。米散射適用於散射體尺寸與波長相當的情況，需要精確求解邊界值問題。幾何散射適用於散射體尺寸遠大於波長的情況，可以用射線聲學方法處理。**Born**近似和**Rytov**近似為處理弱散射問題提供了實用的計算方法[7]。

聲吸收和衰減機制決定了聲能在傳播過程中的損失規律。分子吸收由分子的內部自由度（振動、轉動）與聲波的相互作用引起，其衰減係數與頻率的平方成正比。在海水中，主要的分子吸收機制包括鎂離子和硼酸的化學鬆弛過程，導致特徵的雙鬆弛頻率結構。黏滯吸收由流體的黏滯性引起，在高頻時變得重要。熱傳導吸收由溫度梯度引起的熱擴散過程產生。這些吸收機制的綜合作用決定了海水中的聲衰減特性[8]。

聲學互易原理是聲學中的重要理論，表明在線性介質中，聲源和接收器位置互換時，聲壓幅度保持不變。這一原理不僅具有深刻的物理意義，還為聲學測量和計算提供了重要的簡化。格林函數方法基於互易原理，為處理複雜邊界條件的聲學問題提供了統一的數學框架。積分方程方法利用格林定理將邊界值問題轉化為邊

界上的積分方程，是現代計算聲學的重要工具[9]。

2.1.2 海洋聲速場與聲線傳播 Ocean Sound Speed Fields and Ray Propagation

海洋聲速場的空間結構是控制水下聲波傳播的最重要環境因子，直接決定了聲線路徑、傳播時間和聲能分布等關鍵特徵。海洋中的聲速分布受到溫度、鹽度和壓力（深度）三個主要因子的控制，這三個參數在海洋中的複雜三維分布形成了獨特的聲學環境。典型的海洋聲速剖面在垂直方向上表現出分層結構，包括表面混合層、主躍層、中層水和深層水等不同的水團，每個層次都有其特徵的溫鹽分布和聲速特性。這種垂直分層結構的存在是海洋聲波導效應的物理基礎，對聲波的遠距離傳播具有決定性影響。

聲速的經驗公式提供了根據海洋環境參數計算聲速的實用工具。Mackenzie 公式 $c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S-35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S-35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3$ ，其中 T 為溫度（ $^{\circ}\text{C}$ ），S 為鹽度（ ‰ ），D 為深度（m），是海洋聲學中廣泛使用的聲速計算公式[10]。更精確的 Chen-Millero 公式考慮了更高階的非線性項和交叉項，在精密聲學計算中得到應用。這些經驗公式的準確性直接影響聲學預測的精度，因此在實際應用中需要根據具體海域的特徵進行驗證和校正。

聲速場的垂直結構形成了海洋聲學中的經典分層模式。表面混合層由於風浪混合作用，溫鹽分布相對均勻，聲速梯度較小。季節性躍層是溫度和聲速急劇變化的區域，通常位於表面以下數十米到數百米深度，是聲波傳播的重要控制因子。永久性躍層位於更深的水層，主要受大尺度海洋環流和水團性質控制。聲速極小層（Sound Speed Minimum Layer）在某些海域形成天然的聲波導，能夠將聲能捕獲並引導其進行遠距離傳播，這種現象在海洋聲學中稱為 SOFAR 通道（Sound Fixing And Ranging channel）[11]。

聲線理論基於幾何聲學近似，將聲波傳播視為聲線在變化介質中的軌跡。聲線路徑遵循 Fermat 原理，即聲波沿著使傳播時間為極值（通常是最小值）的路徑傳播。在分層介質中，聲線路徑可以透過射線方程 $dr/ds = \nabla\tau$ ， $dt/ds = -\nabla(1/c)$ 來描

述，其中 τ 為射線參數， s 為沿射線的弧長座標， c 為聲速[12]。Snell 定律的推廣形式 $\cos \theta/c = \text{常數}$ （其中 θ 為射線與水平面的夾角）提供了判斷聲線彎曲方向的簡便準則。

多途傳播現象是海洋聲學的重要特徵，指聲波從聲源到接收點存在多條不同的傳播路徑。在典型的海洋環境中，聲線可能經歷直達、海面反射、海底反射、折射等不同的傳播模式，形成複雜的多途結構。每條路徑對應不同的傳播時間、到達角度和能量損失，在接收點形成干涉現象。多途傳播的時間展寬效應會影響信號的可懂度和檢測效能，但同時也為海洋環境的遙感提供了豐富的資訊[13]。

聚焦和發散現象反映了聲速場的空間變化對聲能分布的影響。當聲線在傳播過程中會聚時，形成聲聚焦現象，導致局部聲強的顯著增強。相反，當聲線發散時，形成聲陰影區，聲強明顯減弱。這些現象在海洋中廣泛存在，與海洋的中尺度和小尺度結構密切相關。海洋鋒面、渦旋、內波等現象都可能引起聲聚焦或發散，對水下通信、聲納探測等應用產生重要影響[14]。

聲速場的時變性是海洋聲學中的重要考慮因素。潮汐引起的水團上下運動會改變聲速剖面的形狀，導致聲傳播特性的周期性變化。內波活動引起等密度面的起伏，造成聲速場的快速波動。季節性的海洋熱力循環會改變海洋的層化結構，影響聲波導的強度和深度。長期的氣候變化則可能引起海洋聲速場的系統性變化，這對全球海洋聲學監測具有重要意義[15]。

三維聲速場的複雜性要求考慮水平方向的聲速變化。海洋中的中尺度渦、鋒面、水團邊界等都會造成顯著的水平聲速梯度。這些三維結構會引起聲線的水平偏轉，導致聲波的三維傳播行為。 $N \times 2D$ 近似方法透過在不同方位角上進行二維聲線計算來近似三維效應，是處理三維問題的實用方法。完全的三維聲線追蹤需要求解更複雜的微分方程組，計算量顯著增加但能夠提供更準確的結果[16]。

聲線理論的適用條件和限制需要在實際應用中加以考慮。幾何聲學近似要求波長遠小於環境變化的特徵尺度，這在低頻或強梯度環境中可能不滿足。在聲線轉折點附近，聲線理論會出現奇異性，需要採用波動理論進行修正。聲陰影區內的聲

場預測是聲線理論的弱點，需要考慮繞射效應。儘管存在這些限制，聲線理論由於其直觀的物理圖像和相對簡單的計算，仍然是海洋聲學中最重要理論工具之一[17]。

2.1.3 聲波的反射、折射與散射 Sound Wave Reflection, Refraction, and Scattering

聲波在海洋環境中的反射、折射與散射現象構成了水下聲學的核心物理過程，這些現象不僅決定了聲能的空間分布和傳播特性，還為海洋環境的聲學探測和反演提供了理論基礎。海洋環境中的界面和非均勻性結構，包括海面、海底、密度躍層、溫度鋒面、生物群體等，都會對聲波產生反射、折射和散射作用。這些相互作用過程的複雜性源於海洋環境的多尺度性和多相性，需要運用不同的物理模型和數學方法來描述和預測。

海面反射是海洋聲學中最重要邊界效應之一，海面的聲學特性主要由其動力學狀態決定。在平靜海面條件下，空氣與海水之間的巨大密度差（約 800 倍）使得海面呈現出近似完全反射的特性，反射係數接近-1，相位發生 π 的跳變。這種準剛性邊界條件是海洋聲波導效應的重要組成部分。然而，實際海面很少是完全平靜的，波浪起伏會引起聲散射現象。海面粗糙度對散射的影響可以用 Rayleigh 參數 $R = 2k_0 h_0 \sin\theta$ 來衡量，其中 k_0 為聲波波數， h_0 為有效波高， θ 為掠射角[18]。當 $R \ll 1$ 時，海面可視為聲學光滑；當 $R \gg 1$ 時，散射效應顯著，需要考慮統計散射理論。

海底反射和透射的複雜性源於海底沉積物的多樣性和分層結構。不同類型的海底（岩石、砂質、淤泥質等）具有不同的聲學參數，包括聲速、密度、衰減係數等。海底的聲學特性通常用複數聲速來描述，實部表示聲速，虛部表示衰減。Hamilton 關係式提供了沉積物聲學參數與物理參數之間的經驗關係，是海底聲學建模的重要工具[19]。多層海底結構會產生複雜的多重反射現象，需要運用傳輸矩陣方法或波數積分方法進行精確計算。

聲波在密度分層介質中的折射遵循廣義 Snell 定律，即 $\sin\theta_1/c_1 = \sin\theta_2/c_2$ ，其中下標 1 和 2 分別表示入射和折射介質。在海洋中，聲速的連續變化會引起聲線的平

滑彎曲，這是海洋聲波導現象的物理機制。全內反射條件為 $\sin\theta_c = c_1/c_2$ ，當入射角大於臨界角 θ_c 時發生全內反射。這種現象在海洋溫度躍層附近特別重要，是聲能被捕獲在聲波導中的關鍵機制[20]。

體積散射現象由海洋中的各種非均勻性結構引起，包括溫鹽微結構、氣泡、懸浮顆粒、浮游生物等。不同散射體的散射特性差異很大，需要根據其物理特徵選擇適當的散射模型。對於小尺度散射體 ($ka \ll 1$ ，其中 k 為波數， a 為散射體特徵尺寸)，Rayleigh 散射模型適用，散射強度與頻率的四次方成正比。對於中等尺寸散射體 ($ka \approx 1$)，需要採用 Mie 散射理論進行精確計算。對於大尺寸散射體 ($ka \gg 1$)，可以採用幾何聲學或物理光學近似[21]。

生物散射是海洋中特別重要的體積散射機制，魚類、浮游動物等海洋生物具有與海水不同的聲學特性，會對聲波產生強烈的散射。魚類散射主要由魚鰾引起，其散射強度與魚鰾的諧振頻率密切相關。浮游生物的散射則主要由其殼體或骨骼結構引起。生物散射的複雜性在於生物的游泳行為、垂直洄游、聚群現象等會引起散射強度的時空變化，這些變化本身也是海洋生物學研究的重要內容[22]。

氣泡散射是近海面聲學環境的重要因素，特別是在有風浪條件下。波浪破碎會在近表面水中產生大量氣泡，這些氣泡的諧振散射會顯著影響聲波傳播。氣泡的諧振頻率 $f_0 = (1/2\pi a)\sqrt{3\gamma p_0/\rho}$ 與氣泡半徑 a 成反比，其中 γ 為絕熱指數， p_0 為靜水壓力， ρ 為海水密度[23]。氣泡群的散射需要考慮氣泡尺度譜分布和相互作用效應，通常採用等效介質理論進行處理。

散射的角度依賴性反映了散射體的幾何特性和內部結構。前向散射通常最強，反映了散射體的總截面；後向散射則與散射體的阻抗對比度密切相關，是主動聲納探測的基礎。散射的頻率依賴性提供了散射體特徵尺寸和物理性質的資訊。偏振散射考慮了聲波在散射過程中偏振態的變化，對於非球形散射體特別重要[24]。

多重散射效應在散射體密度較高的情況下變得重要，此時散射波會進一步被其他散射體散射，形成複雜的多重散射過程。這種效應會改變散射的角度分布和頻率特性，需要採用輻射轉移理論或多重散射理論進行描述。在海洋生物群體、氣泡

雲等高密度散射環境中，多重散射效應不可忽略[25]。

散射測量技術為研究海洋散射現象提供了實驗手段。主動聲納系統透過發射聲脈衝並接收散射回波來測量散射強度。散射強度的定義為單位立體角內的散射截面與入射聲強的比值，是描述散射特性的標準量。不同幾何配置的散射測量（如後向散射、雙站散射等）提供了散射體不同方面的資訊。時間序列散射測量可以研究散射體的動態行為，如生物的游泳模式、氣泡的演化過程等[26]。

2.2 聲速剖面與環境因子 Sound Speed Profiles and Environmental Factors

聲速剖面與環境因子的相互關係是海洋聲學的核心研究內容，直接決定了水下聲波的傳播特性和聲場分布規律。海洋中的聲速分布受到溫度、鹽度、壓力三個主要物理參數的控制，這三個參數在海洋中的三維時變分布形成了複雜的聲學環境。聲速剖面的垂直結構反映了海洋的熱力學分層和動力學過程，包括太陽輻射加熱、風浪混合、潮汐作用、內波傳播、地轉流動等多種物理機制的綜合作用。不同海域的聲速剖面呈現出顯著的地域性特徵，深海、淺海、極地、熱帶等不同環境下的聲速結構差異巨大，需要針對性的聲學建模和預測方法。

現代海洋學研究表明，聲速場的變化涵蓋了從毫秒到年際的多種時間尺度，從米級到全球尺度的多種空間尺度。快速的聲速變化主要由內波、湍流、細尺度混合等小尺度過程引起；中等時間尺度的變化與潮汐、中尺度渦旋、季節性層化等過程相關；長期變化則受氣候變化、全球暖化、海洋環流變化等大尺度過程控制。這種多尺度的時空變異性對聲學應用提出了挑戰，需要發展適應性強的聲學建模技術和實時環境監測系統。

海洋聲速場的精確描述和預測對於水下通信、聲納探測、海洋監測、地震預警等多個領域具有重要意義。現代聲學海洋學強調環境資訊與聲學建模的緊密結合，透過整合海洋觀測資料、數值模型輸出和即時監測資料，建立高精度的四維（三維空間加時間）聲速場。資料同化技術、機器學習方法、統計預測模型等先進技術的應用，正在推動聲速場預測精度的不斷提升，為海洋聲學應用提供更可靠的環境支撐。

2.2.1 溫鹽壓分布對聲速的影響 Effects of Temperature, Salinity, and Pressure on Sound Speed

溫鹽壓分布對聲速的影響構成了海洋聲學環境變化的根本驅動力，這三個基本物理參數透過複雜的非線性關係共同決定了海水中的聲速分布。溫度的影響最為顯著，每攝氏度的溫度變化約引起 4m/s 的聲速變化，這使得海洋的熱力學過程成為聲速場變化的主導因子。鹽度的影響相對較小但不可忽略，每千分之一的鹽度變化約引起 1.3m/s 的聲速變化。壓力（深度）的影響呈線性增長趨勢，每 100 米深度增加約 1.7m/s 的聲速增量[27]。這三個因子之間存在複雜的交互作用，需要運用精確的狀態方程來描述其綜合效應。

溫度場的空間分布和時間變化是海洋聲學環境中最活躍的因子。海洋表層溫度受太陽輻射的日周期和季節性變化控制，形成了顯著的時變特徵。表面混合層的厚度和溫度梯度受風應力、浮力通量等氣象因子調節，在不同海域和季節表現出巨大差異。溫度躍層是溫度急劇變化的區域，通常位於表面以下數十米到數百米的深度範圍內，其強度和深度對聲波傳播具有決定性影響。季節性躍層在中高緯度海域特別顯著，夏季增強、冬季減弱的週期性變化會引起聲學環境的系統性變化[28]。

深海溫度場的垂直結構相對穩定，主要受大尺度熱鹽環流控制。深海水溫接近於高緯度地區的表面水溫，反映了全球溫鹽環流的深水形成過程。溫度的垂直梯度在深海中通常較小，但仍會對聲速產生累積性影響。深海溫度的長期變化與全球氣候變化密切相關，海洋暖化會引起深海溫度場的系統性變化，進而影響全球海洋的聲學環境[29]。

鹽度分布反映了海洋的水團結構和混合過程，對聲速場的貢獻雖然相對較小但具有重要的海洋學意義。表面鹽度受蒸發、降水、徑流等水量收支過程控制，在不同氣候帶表現出顯著差異。鹽度躍層通常與密度躍層相對應，反映了不同水團的界面。在某些特殊海域，如地中海溢流區、極地水形成區等，鹽度的垂直梯度可能非常陡峭，對聲速分布產生重要影響[30]。

鹽度的水平分布受海洋環流、水團混合、地形效應等因素控制，形成複雜的三維結構。海洋鋒面是不同水團的交匯區域，通常伴隨着強烈的溫鹽梯度和相應的聲速梯度。中尺度渦旋會攜帶不同性質的水體進行長距離輸送，形成聲速場的中尺度變化。河口羽流、冰融水等局地因子也會在特定區域形成顯著的鹽度異常和聲速變化[31]。

壓力對聲速的影響主要透過靜水壓力隨深度的線性增加來實現，這種影響在物理上源於海水可壓縮性的壓力依賴性。標準海水的可壓縮係數約為 $4.6 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ，隨溫度和壓力的變化呈現非線性特徵。深海高壓環境下，壓力對聲速的貢獻可能超過溫度和鹽度的綜合效應，這使得深海聲速通常隨深度增加而增大，形成正梯度的聲速剖面[32]。

聲速的狀態方程提供了根據溫鹽壓參數精確計算聲速的數學工具。UNESCO 聲速方程是國際海洋學界廣泛採用的標準公式，其形式為九次多項式，包含了溫度、鹽度、壓力及其交互項的複雜非線性關係。該方程在標準海洋條件下的精度可達 $\pm 0.1 \text{ m/s}$ ，滿足大多數海洋聲學應用的需求[33]。更精確的 Del Grosso 方程和 Chen-Millero 方程在特殊應用中得到採用，特別是在精密聲學測量和海洋學儀器校準中。

聲速異常現象反映了海洋中特殊的溫鹽分布條件。聲速極小值通常出現在溫度和壓力效應相互抵消的深度，形成 SOFAR 聲道的軸心。聲速逆溫現象在某些海域的特定深度出現，通常與特殊的水團結構或混合過程相關。地中海水、南極底層水等特徵水團具有獨特的溫鹽特徵和相應的聲速特徵，在其分布區域形成特殊的聲學環境[34]。

溫鹽壓分布的時變性引起聲速場的動態變化，這種變化涵蓋了多個時間尺度。內波是海洋中普遍存在的現象，其週期通常為幾分鐘到幾小時，會引起等密度面的上下起伏，進而造成聲速場的快速變化。潮汐作用引起水體的週期性運動，在分層海洋中會產生內潮，對聲速分布產生週期性影響。季節性的海洋熱力學循環會改變混合層深度和躍層結構，引起聲速場的季節性變化[35]。

區域海洋學特徵對聲速分布的影響實現了不同海域的獨特性。熱帶海域的聲速剖面通常表現出強烈的表面混合層和深厚的溫度躍層；極地海域的聲速分布受海冰、冷水團等因子影響，呈現出特殊的結構；邊緣海受陸架地形和河流輸入影響，聲速分布具有顯著的近岸特徵。這些區域性差異要求在聲學建模中考慮具體的海洋學背景[36]。

現代海洋觀測技術為聲速場的精確描述提供了強大支撐。CTD（溫鹽深儀）測量提供了高精度的垂直剖面資料；Argo 自主漂流浮標網絡實現了全球海洋的長期監測；衛星遙感技術提供了海表溫度和海面高度的高解析度觀測；海洋模式和資料同化系統則為聲速場的四維重構和預測提供了工具。這些技術的綜合應用正在推動海洋聲學向精確化和業務化方向發展[37]。

2.2.2 海洋分層結構與聲波導 Ocean Stratification and Sound Channels

海洋分層結構與聲波導現象是水下聲學中最重要環境特徵之一，它決定了聲波的遠距離傳播能力和空間分布特性。海洋的垂直分層主要由密度分層引起，而密度分層又是溫度和鹽度垂直分布的綜合結果。在大多數海域，溫度的貢獻占主導地位，形成以熱分層為主的海洋結構。這種分層結構透過影響聲速的垂直分布，進而控制聲線的彎曲方向和傳播路徑，形成各種類型的聲波導效應。聲波導現象不僅是海洋聲學的重要理論概念，也是遠程水下通信、海洋監測、軍事聲納等實際應用的物理基礎。

典型的海洋分層結構可以劃分為幾個主要層次，每個層次都有其特徵的物理性質和聲學特徵。表面混合層是海洋分層的最上層，由風浪攪拌作用形成，其厚度通常為數十米到數百米，內部溫度和鹽度分布相對均勻。混合層的厚度和溫度受季節變化、氣象條件等因子控制，是海洋聲學環境中最活躍的部分。混合層內的聲速梯度通常較小，聲線傳播接近直線，但混合層的底部通常是聲速急劇變化的區域[38]。

溫度躍層是海洋分層結構中最重要組成部分，位於混合層之下，是溫度急劇下

降的區域。躍層的強度用溫度梯度（通常為負值）來衡量，其數值範圍從每米幾攝氏度到每米零點幾攝氏度不等。強烈的溫度躍層對應著強烈的聲速梯度，會引起聲線的急劇彎曲。在北半球中緯度海域，夏季躍層最為發達，冬季由於表面冷卻和風浪混合作用而減弱甚至消失[39]。

深海聲速剖面通常呈現出特徵的"C"形結構，這種結構是溫度效應和壓力效應競爭的結果。在表層，溫度是主導因子，聲速隨溫度降低而減小；在深層，壓力成為主導因子，聲速隨壓力（深度）增加而增大。聲速的最小值通常出現在 1000-1500 米深度附近，形成所謂的"聲道軸"或"SO FAR 軸"。這個深度的確切位置隨海域和季節而變化，在熱帶海域通常較深，在高緯度海域較淺[40]。

SO FAR 聲道 (Sound Fixing And Ranging channel) 是海洋中最重要的天然聲波導，由聲速的極小值形成。在 SO FAR 軸上方，負的聲速梯度使聲線向下彎曲；在軸下方，正的聲速梯度使聲線向上彎曲。這種雙向的聲線彎曲效應將聲能捕獲在軸線附近，形成高效的聲能引導機制。SO FAR 聲道的存在使得聲信號能夠在海洋中傳播數千公里而不產生顯著的擴散損失，這一現象在第二次世界大戰期間首次被發現並用於海難救援[41]。

表面聲道是另一種重要的聲波導類型，通常在夏季的海洋表層形成。當表面混合層下方存在強烈的負聲速梯度時，聲線會在混合層內被捕獲，形成表面聲道。這種聲道的特點是深度較淺（通常小於 100 米），但對高頻聲波的引導效應很強。表面聲道對近海面的聲學應用，如淺水聲納、水面艦艇通信等具有重要影響[42]。

海底聲道在某些特殊條件下形成，通常與海底附近的溫度逆轉或鹽度異常有關。這種聲道較為罕見，但在特定海域（如地中海溢流區、深海海溝等）可能成為重要的聲傳播路徑。海底聲道的形成機制複雜，往往與地形效應、深水團特性、地熱活動等因素相關[43]。

聲道的參數化描述為定量分析聲波導效應提供了數學工具。聲道強度反映聲速梯度的大小，決定了聲線彎曲的程度和聲能捕獲的效率。聲道寬度定義為聲能被有效捕獲的深度範圍，與聲道強度和聲源頻率有關。聲道軸深度是聲道的空間位置，

直接影響聲道的可達性和應用效果。這些參數的空間分布和時間變化反映了海洋環境的動態特徵[44]。

多聲道結構在複雜的海洋環境中經常出現，特別是在水團結構複雜的海域。多個聲速極值可能同時存在，形成多層聲道系統。這種情況下，不同深度的聲道可能具有不同的傳播特性，需要運用更複雜的波動理論進行分析。聲道間的耦合效應會引起聲能在不同聲道間的轉換，增加了聲傳播預測的複雜性[45]。

聲道的時變性是海洋聲學中的重要考慮因素。日變化主要由表面加熱和冷卻引起，影響表面聲道的強度和深度。潮汐作用會引起水體的垂直運動，改變聲道的空間位置。季節變化是最顯著的時變特徵，夏季增強的分層結構會形成更強的聲道效應。長期氣候變化則可能引起聲道特性的系統性變化，這對全球海洋聲學環境的長期演變具有重要意義[46]。

聲道效應的地域性差異反映了全球海洋環境的多樣性。熱帶海域的 SOFAR 聲道通常很深（1500 米以下）且很強；溫帶海域的聲道深度適中且具有明顯的季節變化；極地海域由於表面冷水的存在，聲道可能很淺甚至不存在。這些差異要求在不同海域採用相應的聲學建模策略[47]。

聲道的應用和意義遠遠超出了純粹的學術興趣。在軍事領域，聲道效應是潛艇隱蔽性和聲納探測能力的重要因子；在海洋學研究中，聲道特性為海洋結構和變化提供了敏感的指示器；在工程應用中，聲道效應是水下通信和導航系統設計的重要考慮因素。隨著海洋開發活動的增加和聲學技術的進步，對聲道現象的深入理解和精確預測變得越來越重要[48]。

2.2.3 時空變異性與環境預測 Spatiotemporal Variability and Environmental Prediction

時空變異性與環境預測構成了現代海洋聲學環境研究的前沿領域，涉及海洋環境參數在多個時空尺度上的變化規律及其對聲學環境的影響預測。海洋環境的時空變異性源於海洋系統內部的多尺度動力學過程，包括從湍流混合的秒級變化到氣

候變遷的年代際變化，從毫米級的微結構到全球尺度的環流系統。這種多尺度的變異性對海洋聲學環境的影響是非線性和複合的，需要運用先進的觀測技術、理論模型和預測方法來認識和預報其變化規律。

時間尺度的多樣性反映了海洋環境變化的複雜性。高頻變化（秒至分鐘）主要由湍流、內波、局地風等小尺度過程控制，這些過程引起的聲速變化幅度通常較小但變化迅速，對高解析度聲學應用有重要影響。中頻變化（小時至天）與潮汐、天氣系統、中尺度渦旋等過程相關，是海洋聲學環境變化的主要驅動力。低頻變化（月至年）反映了季節循環、年際變化、氣候模態等大尺度過程，決定了聲學環境的長期趨勢和週期性特徵[49]。

潮汐對海洋聲學環境的影響是最規律和可預測的時變因子。正壓潮引起海面高度的周期性變化，在淺水區域會顯著改變水深分布，進而影響聲傳播特性。斜壓潮（內潮）引起等密度面的周期性起伏，造成聲速場的時變性。在大陸架邊緣、海山、海脊等地形複雜區域，內潮的影響特別顯著，可能引起聲速場的劇烈波動。潮汐預測模型為這類時變性的預報提供了成熟的工具[50]。

內波是海洋中普遍存在的中高頻運動，對聲學環境的影響日益受到重視。內波的頻譜範圍從慣性頻率到浮力頻率，涵蓋了從幾小時到幾分鐘的週期。內波引起等密度面的波動，進而造成聲速場的快速變化。在強分層海域，內波的振幅可達數十米，對聲傳播的影響不可忽略。內波的隨機性和複雜性使其預測成為海洋聲學環境預報的難點之一[51]。

季節性變化是海洋聲學環境最重要的時變特徵之一，主要受太陽輻射的季節循環控制。夏季的強烈加熱形成深厚的混合層和強烈的溫度躍層，冬季的表面冷卻和風暴混合則會減弱或破壞分層結構。這種季節性變化在中高緯度海域特別顯著，導致聲道特性的季節性變化。季節性預測需要考慮海氣相互作用、海洋熱力學過程等複雜機制[52]。

年際變化反映了氣候系統的低頻變動對海洋聲學環境的影響。El Niño/La Niña 現象是最重要的年際變化模態，會引起熱帶太平洋溫度場的大範圍異常，進而影響

聲速分布和聲傳播特性。北大西洋濤動、太平洋年代際振盪等其他氣候模態也會對相應海域的聲學環境產生顯著影響。這些低頻變化的預測需要運用氣候模型和統計預測方法[53]。

空間尺度的多樣性實現了海洋環境的多層次結構特徵。微尺度（米至公里）的變化主要由湍流混合、細結構、局地地形等因子控制；中尺度（10-100 公里）的變化與渦旋、鋒面、地形效應等過程相關；大尺度（100-1000 公里）的變化反映了水團分布、環流系統等宏觀結構；全球尺度的變化則實現了海洋的總體分布模式[54]。

中尺度過程對海洋聲學環境的影響越來越受到重視。中尺度渦旋是海洋中最重要の中尺度現象，其空間尺度通常為 50-200 公里，可以顯著改變局地的溫鹽分布和聲速結構。氣旋式渦旋通常伴隨着冷水上升和聲速下降；反氣旋式渦旋則相反。渦旋的移動會引起聲學環境的空間遷移，其生成和消亡則引起聲學環境的時間變化[55]。

海洋鋒面是不同水團的交界面，通常伴隨着強烈的溫鹽梯度和相應的聲速梯度。鋒面的空間尺度從數公里到數百公里不等，其位置和強度的變化會顯著影響聲傳播特性。鋒面附近經常發生聲聚焦或發散現象，對聲學應用產生重要影響。鋒面的預測需要考慮動力學過程、水團混合等複雜機制[56]。

環境預測技術為海洋聲學應用提供了重要支撐。數值海洋模型透過求解海洋動力學方程，能夠預測海洋溫鹽分布的未來變化。全球海洋模型提供大尺度的預測能力；區域海洋模型則提供高解析度的局地預測。資料同化技術透過融合觀測資料和模型預測，提高了預測的準確性和可靠性[57]。

統計預測方法為處理複雜的非線性關係提供了補充工具。時間序列分析方法如 ARIMA 模型、狀態空間模型等適用於處理時間相關的變化；空間統計方法如克里金插值、隨機場理論等適用於空間相關的變化。機器學習方法如神經網路、支持向量機等在處理高維非線性問題方面顯示出優勢[58]。

不確定性評估是環境預測的重要組成部分。預測誤差來源於模型誤差、初始條件誤差、邊界條件誤差等多個方面。集合預測方法透過運行多個略有不同的預測實驗，提供預測不確定性的量化評估。誤差傳播分析研究預測誤差如何影響聲學預測的準確性，為聲學應用提供可信度評估[59]。

實時環境監測系統為環境預測提供了及時的資料支撐。自動測量平台如 Argo 浮標、錨係觀測陣列、海底觀測網等提供連續的環境資料；衛星遙感系統提供大範圍的表面資料；海洋模型的即時運行則提供預測資料。這些系統的整合為建立業務化的海洋聲學環境預測服務提供了技術基礎[60]。

2.3 人為噪音來源 Anthropogenic Noise Sources

人為噪音來源已成為現代海洋聲環境的主導因子，特別是在航運繁忙的海域和近岸水域，人類活動產生的噪音顯著改變了海洋的自然聲景。全球海運業的快速發展使得商業船舶成為最重要的低頻噪音源，在 10-1000Hz 頻段內，遠距離船舶噪音構成了大部分海域背景噪音的主要成分。除了常規的航運活動，軍事聲納、地震勘探、海洋工程、風能開發等各種人為活動都會產生特徵不同的水下噪音，這些噪音的頻率範圍從次聲頻 (<20Hz) 到超聲頻 (>20kHz)，覆蓋了大部分海洋生物的聽覺敏感範圍[61]。

人為噪音的特點是其持續性、可預測性和空間集中性。與自然噪音的隨機性和間歇性不同，人為噪音通常具有較強的週期性和相關性，反映了人類活動的規律性模式。航運噪音表現出明顯的航線集中特徵，主要沿著國際航運通道分布；海洋工程噪音則具有明顯的時間集中性，通常在特定的施工期間產生強烈的脈衝噪音。這些特徵使得人為噪音對海洋生物的影響更加複雜和持久，可能導致棲息地品質下降、行為模式改變、生理壓力增加等多種生態效應[62]。

現代研究表明，人為噪音的影響不僅限於聲學掩蔽效應，還涉及更廣泛的生態系統層面的影響。慢性噪音暴露可能改變海洋生物的分佈模式、繁殖成功率、捕食效率等重要生態參數，進而影響整個海洋食物網的結構和功能。此外，人為噪音還可能與其他人為壓力因子（如化學污染、氣候變化、棲息地破壞等）產生協同

效應，加劇對海洋生態系統的複合影響。因此，人為噪音的評估和管理需要採用生態系統途徑，綜合考慮多種影響因子的相互作用[63]。

2.3.1 船舶交通噪音 Shipping Traffic Noise

船舶交通噪音是全球海洋中最普遍和持續的人為噪音源，其影響範圍之廣、持續時間之長、影響程度之深都超過了其他任何單一的人為噪音源。現代商業船舶的大型化趨勢和全球貿易的快速增長使得船舶噪音問題日益嚴重。據國際海事組織統計，全球商船總噸位在過去幾十年中以年均 3-4% 的速度增長，同時船舶的平均尺寸和功率也在不斷增加，導致單船噪音水準和總體噪音水準都呈上升趨勢 [64]。

船舶噪音的產生機制主要包括推進系統噪音、機械噪音和流體動力學噪音三個方面。推進系統噪音是最主要的成分，包括螺旋槳空化噪音、軸系振動噪音和推進裝置噪音。空化現象是低頻船舶噪音的主要來源，當螺旋槳葉片表面的流速足夠高時，局部壓力降低至水的蒸汽壓以下，形成空化氣泡，氣泡的生成、演化和潰滅過程產生寬頻的聲輻射。空化噪音的頻率特徵包括葉頻成分（螺旋槳轉速與葉片數的乘積）及其諧波，以及寬頻的背景噪音[65]。

機械噪音主要來自船舶的主機、輔機、泵浦等各種機械設備，這些設備的振動透過船體結構傳遞到水中，形成結構輻射噪音。不同類型的機械設備具有不同的振動頻率特徵，柴油機的活塞往復運動產生低頻的週期性振動，齒輪箱產生中高頻的齒頻噪音，泵浦系統產生特定的水流噪音。現代船舶通常採用各種減振和隔音措施來控制機械噪音，但完全消除仍然困難[66]。

流體動力學噪音包括船體與水的相對運動產生的湍流噪音、波浪拍擊噪音等。船舶在航行時，船體周圍形成複雜的流場，邊界層分離、渦旋脫落等現象會產生寬頻的湍流噪音。船首波和船尾流的形成和演化也會產生聲輻射。這類噪音通常在中高頻段較為顯著，其強度與航行速度的高次方成正比關係[67]。

不同類型船舶的噪音特徵存在顯著差異。貨櫃船由於其龐大的尺寸和強大的推進

動力，通常是最強的噪音源，其低頻噪音可以傳播數百公里。油輪和散貨船由於載重大、航行速度相對較慢，噪音水準通常略低於貨櫃船。客輪和郵輪對舒適性要求較高，通常採用更好的減振降噪設計，但其複雜的推進和輔機系統仍會產生顯著噪音。軍艦的噪音水準通常較低，反映了軍事需求對隱蔽性的重視[68]。

船舶噪音的頻率特徵與其影響範圍密切相關。低頻成分（10-100Hz）是船舶噪音的主要組成部分，這個頻段的聲波在海洋中衰減較小，可以傳播很遠距離。中頻成分（100Hz-1kHz）通常與機械設備的特定工作頻率相關，具有明顯的窄頻特徵。高頻成分（>1kHz）主要來自空化和湍流過程，通常呈現寬頻特性但傳播距離較短[69]。

船舶噪音的空間分布模式反映了全球航運網路的結構特徵。主要航運通道如英吉利海峽、直布羅陀海峽、蘇伊士運河、巴拿馬運河、麻六甲海峽等地區的船舶噪音水準最高。主要港口周圍由於船舶密度大、航行速度變化頻繁，形成了噪音熱點區域。遠洋航線上的噪音水準雖然相對較低，但影響範圍廣泛。近年來，隨著北極航道的開通，極地海域的船舶噪音也開始增加[70]。

船舶噪音的時間變化模式實現了海運活動的週期性特徵。日變化通常不明顯，因為現代商船多採用連續航行模式。週變化在某些航線上可能存在，反映了貿易活動的週期性。季節性變化在某些海域較為顯著，如北極航道的季節性開通、漁業活動的季節性變化等。長期趨勢則反映了全球貿易增長和船舶技術發展的綜合影響[71]。

船舶噪音對海洋生物的影響是當前海洋保護的重要關注點。低頻船舶噪音與大型鯨類的通訊頻率重疊，可能造成聲學掩蔽效應，影響其覓食、導航、社交等行為。魚類對船舶噪音也表現出各種行為反應，包括迴避行為、遊泳模式改變、攝食行為中斷等。無脊椎動物如龍蝦、螃蟹等也可能受到船舶噪音的影響，表現為應激反應增強、蛻皮週期改變等[72]。

船舶噪音的控制和減緩技術正在不斷發展。推進效率的提高可以降低所需功率，從而減少噪音產生。螺旋槳設計的改進，如採用大直徑、低轉速的設計原則，可

以減少空化現象的發生。船體線型的最佳化可以減少流體動力學噪音。主動噪音控制技術透過產生反相聲波來抵消噪音。被動控制技術如減振材料、隔音結構等也得到廣泛應用[73]。

國際法規和標準為船舶噪音控制提供了框架。國際海事組織正在制定船舶水下輻射噪音的相關標準，預計將對新建船舶的噪音水準提出強制性要求。一些區域性組織也在推動相關法規的制定，如歐盟的海洋戰略框架指令將水下噪音列為需要達到良好環境狀態的描述因子之一。這些法規的實施將推動船舶噪音控制技術的發展和應用[74]。

2.3.2 海洋工程與建設噪音 Marine Construction and Engineering Noise

海洋工程與建設噪音代表了人為噪音中強度最高、影響最急性的類型，其瞬時聲壓級可達 200dB re 1 μ Pa 以上，遠超過其他常見的人為噪音源。隨著海洋空間開發利用的不斷擴大，包括海上風電場建設、石油天然氣平台安裝、港口碼頭建設、跨海橋樑施工、海底隧道掘進等各種海洋工程項目急劇增加，使得建設期間的高強度脈衝噪音成為海洋聲環境的重要威脅因子。這類噪音的特點是瞬時聲級極高、脈衝特性明顯、持續時間相對較短但可能延續數月甚至數年，對局域海洋生態系統的衝擊效應往往超過長期的慢性噪音暴露[75]。

樁基施工是海洋建設中最主要的強噪音源，特別是大直徑鋼管樁的打入過程會產生極其強烈的衝擊噪音。打樁噪音的產生機制涉及錘擊能量的傳遞、樁體的振動響應、周圍水體和海底介質的聲學響應等複雜過程。每次錘擊產生的聲脈衝持續時間通常為幾十毫秒到幾百毫秒，但其峰值聲壓級可達 220dB re 1 μ Pa 甚至更高。打樁噪音的頻率成分主要集中在 50-2000Hz 範圍內，與多種海洋哺乳動物的聽覺敏感頻率重疊[76]。

不同的打樁工藝產生不同特徵的噪音。液壓錘打樁產生的脈衝相對較短但峰值較高；柴油錘打樁的脈衝持續時間較長但頻率特徵更複雜；振動打樁產生連續的振動噪音，峰值較低但持續時間很長。現代大型海上風電項目通常採用 6-8 米直徑的單樁基礎，其打樁過程可能持續 8-12 小時，累積的聲暴露量對海洋生物的影響

響不容忽視[77]。

海底爆破作業在某些工程項目中仍然使用，如岩礁清除、沉船打撈、海底開挖等，這類作業產生的瞬時聲級是所有人為噪音源中最高的，可達 250dB re 1 μ Pa 以上。爆破噪音具有極短的上升時間（微秒級）和寬頻的頻譜特徵，對海洋生物的威脅最為嚴重。即使是小當量的爆破作業，其影響範圍也可能達到數公里[78]。

疏浚作業是港口建設和維護中的常見工程活動，絞吸式挖泥船、耙吸式挖泥船、抓鬥式挖泥船等不同類型的疏浚設備產生不同特徵的噪音。絞吸式挖泥船的噪音主要來自絞刀的旋轉切削和泥漿泵的工作，通常在中頻段（100Hz-1kHz）較為顯著。耙吸式挖泥船的噪音相對較低，但其移動作業的特點使得噪音影響範圍較大[79]。

海上運輸和安裝作業涉及大型工程船舶和特種設備，如起重船、鋪管船、海上平台等。這些船舶和設備通常具有強大的動力系統和複雜的作業設備，產生的噪音水準顯著高於常規商船。海上起重作業時，大型起重機的運轉和重型設備的移動會產生低頻的結構振動噪音。海底管線鋪設作業中，管線與海底的拖拽接觸會產生連續的摩擦噪音[80]。

鑽探作業包括海上石油天然氣勘探開發中的各種鑽井活動。鑽井船和海上鑽井平台的噪音來源複雜，包括鑽機系統、泥漿循環系統、動力系統等。旋轉鑽進過程中鑽頭與岩層的接觸會產生寬頻的鑽進噪音，其頻率特徵與地質條件密切相關。海底鑽井時，部分噪音會透過鑽桿傳遞到海底，再輻射到水中[81]。

海洋工程噪音的傳播特性受到工程位置的水深、海底地質、海洋環境等因素的顯著影響。在淺水區域，海底反射效應較強，噪音的傳播距離可能增加；在深水區域，聲能主要向深海傳播，對表層海洋生物的影響相對較小。海底的軟硬程度也會影響噪音的傳播，軟質海底對聲能的吸收較強，硬質海底則相反[82]。

工程噪音對海洋生物的急性影響包括聽覺損傷、行為中斷、生理應激等。高強度的脈衝噪音可能導致海洋哺乳動物的暫時性或永久性聽力損失。魚類可能出現驚

嚇反應、逃逸行為、群體散散等行為改變。底棲生物由於更接近工程作業區域，可能面臨更嚴重的影響，包括物理損傷、埋藏、棲息地破壞等[83]。

工程噪音的緩解措施包括源頭控制、傳播路徑控制和接收端保護三個層面。源頭控制措施如採用低噪音施工工藝、最佳化施工參數、使用消音設備等。傳播路徑控制如設置氣泡簾、隔音屏障等。接收端保護措施如施工前的生物驅趕、實時監測、適應性管理等。軟啟動程序是打樁作業中廣泛採用的生物保護措施，透過逐漸增加錘擊能量讓海洋動物有時間離開施工區域[84]。

環境影響評估和監測是海洋工程項目的強制性要求。噪音影響評估需要預測施工噪音的傳播範圍和對敏感目標的影響程度。實時噪音監測系統可以確保施工活動符合環境保護要求。生物觀測員制度要求在施工期間配備專業人員監視海洋哺乳動物的活動，一旦發現動物進入危險區域即停止施工作業[85]。

2.3.3 軍事聲納與地震勘探 Military Sonar and Seismic Surveys

軍事聲納與地震勘探代表了海洋環境中功率最大、技術最先進的主動聲學系統，這些系統產生的高強度聲信號對海洋聲環境和生態系統的影響已成為國際海洋環境保護的焦點議題。軍事聲納系統為了滿足遠距離探測和高解析度成像的需求，通常採用大功率發射系統和複雜的信號處理技術，其聲源級可達 240dB re 1 $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ 以上。地震勘探作為海洋油氣資源勘探的主要手段，使用氣槍陣列等強聲源產生穿透海底的地震波，同樣具有極高的聲功率輸出。這兩類聲學系統雖然應用目的不同，但都具有高聲強、長傳播距離、大影響範圍等共同特徵[86]。

軍用聲納系統按照工作原理可分為主動聲納和被動聲納，按照頻率範圍可分為低頻聲納 (<1kHz)、中頻聲納 (1-10kHz) 和高頻聲納 (>10kHz)。低頻主動聲納 (Low Frequency Active Sonar, LFAS) 是最具爭議的軍用聲學系統，其工作頻率通常在 100-500Hz 範圍內，聲源級高達 240dB re 1 $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ ，探測距離可達數百公里。中頻主動聲納廣泛用於反潛作戰和水下目標探測，頻率範圍 1-8kHz，聲源級通常在 220-235dB re 1 $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ 之間[87]。

不同類型的軍用聲納採用不同的信號波形和發射模式。脈衝信號聲納發射短時間的高強度聲脈衝，脈衝持續時間從幾毫秒到幾秒不等，脈衝間隔通常為幾十秒到幾分鐘。調頻信號（Chirp）聲納發射頻率連續變化的信號，具有更好的距離解析度和抗混響能力。偽隨機序列信號聲納採用編碼信號，具有較好的抗干擾性能。這些不同的信號特徵對海洋生物的影響效果也不相同[88]。

聲納系統的空間覆蓋模式反映了其戰術使用特點。艦載聲納通常採用全向或扇形波束掃描模式，覆蓋大範圍的海域。拖曳陣列聲納可以在移動中進行探測，形成線狀的聲覆蓋區域。固定式海底聲納網路可以對特定海域進行長期監控。這些不同的部署和使用模式決定了聲納噪音的時空分布特徵[89]。

海洋地震勘探是石油天然氣工業中最重要勘探手段，全球每年進行的地震勘探作業覆蓋數百萬平方公里的海域。氣槍陣列是最常用的地震聲源，由多個不同容積的氣槍組成，透過高壓空氣的瞬間釋放產生強烈的聲脈衝。典型的氣槍陣列總容積為 2000-8000 立方英寸，峰值聲壓級可達 250dB re 1 μ Pa·m 以上，主要能量集中在 10-300Hz 頻率範圍內[90]。

地震勘探的作業模式通常採用規則的航線網格，勘探船以 4-6 節的速度航行，每隔 10-25 秒發射一次氣槍，連續作業可能持續數周到數月。二維地震勘探採用平行的直線航道，三維地震勘探則需要覆蓋整個目標區域，形成密集的聲覆蓋網格。現代海洋地震勘探還採用多船作業、寬頻氣槍、海底節點等先進技術，進一步增加了聲學影響的複雜性[91]。

氣槍信號的傳播特性使其成為海洋中影響範圍最大的人為聲源之一。氣槍產生的低頻信號在海洋中的傳播距離可達數千公里，在 SOFAR 聲道中甚至可以橫跨整個海洋盆地。氣槍信號具有強烈的指向性，主要能量向海底方向輻射，但仍有相當部分的能量在水中傳播。氣槍陣列的設計參數，如氣槍的數量、容積、幾何配置等，都會影響輻射聲場的特性[92]。

軍事聲納和地震勘探對海洋生物的影響機制複雜多樣。高強度的聲暴露可能導致聽覺系統的物理損傷，包括內耳出血、聽毛細胞壞死等。亞致死性影響包括暫時

性聽力損失、行為改變、生理應激等。行為影響如迴避反應、覓食中斷、遷徙路線改變等可能對動物的生存和繁殖產生長期影響。生理影響如應激激素水準升高、免疫系統功能下降等可能降低動物的整體健康水準[93]。

鯨豚類動物對軍事聲納特別敏感，已有多起聲納作業導致鯨豚集體擱淺的事件報告。深潛性鯨類如喙鯨對中頻聲納尤其敏感，可能出現減壓病等嚴重的生理損傷。淺層鯨類如海豚對各種頻率的聲納都表現出明顯的行為反應。鬚鯨類的低頻通訊可能受到低頻聲納的掩蔽干擾[94]。

魚類對地震勘探的反應包括驚嚇、逃逸、聽覺損傷等。商業魚類的漁獲量在地震勘探作業後可能出現顯著下降，影響持續時間從數天到數月不等。魚卵和幼魚由於更加脆弱，可能遭受更嚴重的影響。某些魚類的產卵行為和洄游模式也可能受到干擾[95]。

無脊椎動物如甲殼類、軟體動物等對強聲暴露也表現出各種反應。商業重要的甲殼類如龍蝦、螃蟹等在聲暴露後可能出現行為異常、生長遲緩等現象。軟體動物如扇貝在強聲刺激下可能出現閉殼反應。浮游動物群落的垂直分布可能受到地震勘探的影響[96]。

環境保護措施和法規管制正在不斷發展完善。海洋哺乳動物觀測員（Marine Mammal Observer, MMO）制度要求在軍事訓練和地震勘探作業中配備專業觀測人員。被動聲學監測（Passive Acoustic Monitoring, PAM）系統可以實時監測海洋哺乳動物的發聲活動。軟啟動程序要求逐步增加聲源功率，讓動物有機會離開作業區域。時空限制措施在繁殖季節或重要棲息地禁止或限制高強度聲學活動[97]。

國際合作和科學研究正在推動相關政策的制定和完善。國際捕鯨委員會、國際自然保護聯盟等國際組織積極推動相關研究和政策制定。各國海軍和石油公司也在加強環境責任，投入資金進行相關研究和技術改進。新技術如海洋振動器、低頻氣槍等正在開發中，以期減少對海洋環境的影響[98]。

2.4 自然噪音來源 Natural Noise Sources

自然噪音來源構成了海洋聲環境的基礎背景，在人類大規模海洋活動出現之前，這些自然產生的聲音完全主導了海洋的聲景特徵。自然噪音來源的多樣性反映了海洋系統的複雜性，包括大氣與海洋界面的相互作用（風浪、降雨）、固體地球的動力學過程（地震、火山活動）、以及海洋生物的聲學活動（魚類發聲、哺乳動物鳴叫）等多個層面。這些自然聲源的時空分布模式受到氣候、地理、生態等多種因素的控制，形成了具有明顯地域特色和季節變化的自然聲景。即使在現代高度工業化的海洋環境中，自然噪音仍然在許多頻段和區域保持著重要地位，特別是在遠離航道的深海區域和某些頻率範圍內[99]。

自然噪音的頻譜特徵通常呈現出與人為噪音不同的統計性質和物理特徵。風浪噪音具有典型的-5dB/倍頻程的頻譜斜率，反映了海面波浪的尺度分布特徵。降雨噪音的頻譜峰值通常在 10-15kHz 附近，與雨滴撞擊海面產生的氣泡共振頻率相關。生物聲學信號通常具有明顯的調製特徵和諧波結構，反映了生物發聲器官的物理特性和通訊需求。地震噪音主要集中在極低頻段 (<10Hz)，與地殼運動的特徵時間尺度相對應。這些不同的頻譜特徵為自然聲源的識別和分類提供了重要依據[100]。

自然噪音的生態學意義遠遠超出了其作為背景噪音的簡單角色。海洋生物在長期演化過程中適應了自然聲環境的特徵，其聽覺系統、發聲行為、空間導航等多個方面都與自然聲景密切相關。許多海洋動物利用自然聲線索進行長距離導航，如一些魚類利用海浪聲進行近岸定向，海龜利用海灘波浪的聲學特徵尋找產卵地。自然聲環境還為動物間的聲通訊提供了頻率窗口和時間間隙，許多物種的發聲頻率都避開了主要的自然噪音頻段。因此，自然聲景的改變可能對海洋生態系統產生深遠的影響，需要在環境評估和保護策略中給予充分考慮[101]。

2.4.1 風浪與氣泡噪音 Wind-Generated Waves and Bubble Noise

風浪與氣泡噪音是海洋自然聲環境中最普遍和持續的成分，在 100Hz 到 100kHz 的寬頻範圍內都有顯著貢獻，構成了大部分海域背景噪音的主要組成部分。風與海面的相互作用是一個複雜的流體力學過程，涉及動量傳遞、能量耗散、湍流產

生等多個物理機制。當風速超過約 3-4m/s 的臨界值時，海面開始產生破碎波浪，波峰卷曲、白帽形成、氣泡捲入等現象導致聲能的產生和輻射。風浪噪音的強度與風速之間存在強烈的正相關關係，通常遵循經驗關係式 $NL = a + b \log(U)$ ，其中 NL 為噪音級， U 為風速， a 和 b 為經驗常數[102]。

波浪破碎是風浪噪音產生的主要機制，這個過程涉及複雜的多相流動和氣泡動力學。當波浪陡度超過臨界值時，波峰變得不穩定並向前捲曲，形成破碎帶。在破碎過程中，大量空氣被捲入水中，形成不同尺寸的氣泡群。這些氣泡在浮力作用下上升，在上升過程中發生各種聲學現象，包括氣泡的生成、共振、聚合、破裂等。不同尺寸的氣泡具有不同的共振頻率，根據 Minnaert 公式 $f_0 = (1/2\pi r)\sqrt{(3\gamma p/\rho)}$ ，其中 r 為氣泡半徑， γ 為絕熱指數， p 為壓力， ρ 為水密度[103]。

氣泡尺寸譜分布是決定風浪噪音頻譜特徵的關鍵因素。海面破碎產生的氣泡尺寸通常遵循冪律分布，小氣泡的數量遠多於大氣泡。半徑為 0.1-1mm 的氣泡對應的共振頻率在 10-100kHz 範圍內，是高頻海洋噪音的主要來源。更大的氣泡（半徑 1-10mm）對應較低的共振頻率（1-10kHz），但由於浮力較大，存在時間較短。氣泡群的集體振盪和相互作用也會產生額外的聲學效應，特別是在氣泡密度較高的近表面水域[104]。

風浪噪音的頻譜特徵表現出典型的寬頻特性，在對數頻率軸上近似呈直線下降，斜率約為 -5dB/倍頻程。這種頻譜形狀反映了波浪能量的尺度分布和氣泡尺寸譜的統計特性。在不同頻段，噪音的產生機制可能有所不同：低頻段（<500Hz）主要由大尺度波浪運動和破碎過程的流體動力學效應產生；中頻段（0.5-20kHz）主要由氣泡共振和氣泡群的集體振盪產生；高頻段（>20kHz）則主要由小氣泡的個體共振和氣泡破裂過程產生[105]。

降雨對海面聲環境的影響是另一個重要的自然噪音來源，其機制與風浪類似但具有不同的特徵。雨滴撞擊海面時會產生飛濺、氣泡捲入等現象，同時雨滴本身的撞擊也會產生聲輻射。降雨噪音的頻譜峰值通常在 10-15kHz 附近，這是因為雨滴撞擊產生的氣泡尺寸相對均勻，對應的共振頻率較為集中。降雨強度與噪音水準之間也存在正相關關係，但這種關係受到雨滴尺寸分布、降落速度等因素的影響。

響[106]。

不同類型的降水具有不同的聲學特徵。毛毛雨由於雨滴較小，產生的噪音主要集中在高頻段；暴雨的大雨滴會產生更強的撞擊聲和更大的氣泡，噪音頻譜較寬；冰雹撞擊海面產生的聲音具有更明顯的脈衝特性。降雨噪音的時間特徵也與降雨模式密切相關，對流性降雨通常產生間歇性的強噪音，而層狀降雨則產生持續的背景噪音[107]。

風浪噪音的空間分布模式反映了全球風場和海況的地理特徵。信風帶、西風帶等氣候系統控制區域的風浪噪音水準相對較高且較為穩定。颱風、颶風等強天氣系統會在局部區域產生極高的風浪噪音。季風區域的風浪噪音呈現明顯的季節變化。極地海域由於海冰覆蓋，風浪噪音水準通常較低，但在冰緣區可能出現特殊的冰破裂噪音[108]。

風浪噪音的深度依賴性反映了氣泡群在水中的垂直分布特徵。氣泡主要集中在近表面數米到數十米的深度範圍內，因此風浪噪音在表層最強，隨深度迅速衰減。這種垂直結構會影響不同深度海洋生物所處的聲環境，表層游泳的動物面臨更高的背景噪音水準。在強風條件下，氣泡可能被混合到更深的水層，擴大風浪噪音的影響深度[109]。

風浪噪音的時間變化特徵涵蓋了多個時間尺度。短時間尺度（秒到分鐘）的變化反映了波浪破碎的間歇性和隨機性；中等時間尺度（小時到天）的變化與天氣系統的演變相關；長時間尺度（季節到年際）的變化則反映了氣候模態的影響。這種多尺度的時間變異性是自然聲環境的重要特徵，對海洋生物的聲學適應性產生重要影響[110]。

風浪噪音對海洋生態系統的影響主要實現在為動物聲通訊提供掩蔽背景。許多海洋動物的發聲頻率避開了風浪噪音的主要頻段，或者在風浪噪音較低的時間窗口進行通訊。一些動物還能夠利用風浪噪音作為聲掩蔽，避免被捕食者發現。風浪噪音的自然變化也為海洋聲環境提供了基線參考，用於評估人為噪音的相對影響[111]。

現代測量技術為風浪噪音的研究提供了強大的工具。錨係浮標、漂流平台、水下滑翔機等觀測平台可以長期監測風浪噪音的時空變化。聲學都卜勒流速剖面儀（ADCP）等設備可以同時測量海浪和聲學參數。衛星遙感技術提供了全球海況和風場的觀測資料。這些觀測資料為理解風浪噪音的物理機制和建立預測模型提供了重要支撐[112]。

2.4.2 地震與地質活動噪音 Seismic and Geological Noise

地震與地質活動噪音代表了海洋自然聲環境中能量最強、傳播距離最遠的低頻聲源，這類噪音主要集中在 0.1-100Hz 的頻率範圍內，能夠在全球海洋中傳播並被遠距離探測。海底地震是最重要的地質噪音源，其產生的 T 波（第三型地震波）可以在 SOFAR 聲道中傳播數千公里而不產生顯著衰減，成為全球海洋聲學監測網的重要信號來源。除了構造地震之外，火山活動、海底滑坡、冰川崩解、潮汐作用等各種地質過程都會產生特徵不同的聲學信號，這些信號不僅是海洋噪音的組成部分，也是地球物理學研究的重要資料來源[113]。

海底地震的聲學效應主要透過兩種機制產生：直接的震源輻射和震波的水聲轉換。當地震震源位於海底或近海底時，地震波的一部分能量會直接輻射到海水中，形成聲波。更普遍的機制是震波在海底地形起伏處發生水聲轉換，P 波和 S 波撞擊海底斜坡或海山時，部分能量轉換為海水中的聲波，形成所謂的 T 波。T 波的頻率通常在 1-100Hz 範圍內，峰值頻率約為 10-20Hz，持續時間可達數分鐘到數十分鐘[114]。

不同類型的地震產生不同特徵的聲學信號。構造地震通常產生寬頻的 T 波信號，其頻譜和持續時間與地震的震級、震源機制、震源深度等參數密切相關。火山地震的聲學信號通常具有較高的頻率成分和較長的持續時間，反映了火山過程的複雜性。深海地震的 T 波較弱，因為震波需要傳播較長距離才能到達海底進行水聲轉換。淺海地震的聲學信號可能受到多重反射和海底地形的複雜影響[115]。

海底火山活動是另一個重要的地質噪音源，其聲學表現與陸地火山存在顯著差異。

海底火山爆發時，岩漿與海水的相互作用會產生強烈的聲學信號，頻率範圍通常在 1-1000Hz 之間。不同類型的火山活動產生不同的聲學特徵：爆炸性噴發產生高頻的脈衝信號；岩漿流出產生低頻的連續信號；火山氣體釋放產生中頻的調製信號。海底火山的聲學監測已成為火山活動監測的重要手段[116]。

海底滑坡和濁流是重力驅動的地質過程，會產生特徵性的低頻聲學信號。大規模海底滑坡的體積可達數百立方公里，其運動過程產生的聲學信號可以持續數小時。濁流的聲學信號通常持續時間更長，反映了沉積物搬運的持續性。這類地質過程的聲學監測對於海底地質災害的預警具有重要意義，特別是對海底電纜、海底管線等基礎設施的保護[117]。

冰川和海冰的聲學活動在極地海域是重要的自然噪音源。冰川崩解產生的聲學信號具有獨特的頻譜特徵，通常在 10-1000Hz 範圍內，持續時間從幾秒到幾分鐘不等。海冰的破裂、摩擦、碰撞等過程也會產生各種聲學信號。冰震（冰內部應力釋放產生的震動）在極地海域的聲環境中佔有重要地位。隨著全球暖化的加劇，極地冰川和海冰的聲學活動模式正在發生改變[118]。

潮汐作用雖然是規律的天文現象，但其引起的地質過程也會產生聲學效應。潮汐應力會引發小震級的潮汐地震，特別是在構造活躍的海底斷層附近。潮汐流與海底地形的相互作用會產生湍流噪音，在海峽、海山等地形複雜區域尤為顯著。潮汐對海底沉積物的擾動也會產生低頻的聲學信號[119]。

地質噪音的傳播特性使其成為海洋聲學環境的重要組成部分。低頻地質信號在海洋中的衰減很小，能夠傳播極遠距離。SOFAR 聲道為地質信號提供了理想的傳播路徑，使得遠距離的地質事件能夠被全球範圍內的聲學台站探測到。地質信號的全球傳播特性使其在海洋聲學監測網中發揮重要作用，也為全球地震學研究提供了獨特的資料來源[120]。

地質噪音的時間變化特徵反映了地球內部過程的動態性。構造地震具有明顯的隨機性，但在統計意義上遵循一定的規律。火山活動可能表現出週期性或准週期性的特徵。潮汐地震具有明確的週期性。長期的地質噪音監測可以揭示地球內部過

程的演化規律，為地震預測和火山監測提供重要資訊[121]。

地質噪音對海洋生物的影響相對較少受到關注，主要是因為其頻率通常低於大多數海洋動物的聽覺敏感範圍。然而，一些大型鯨類能夠感知和可能利用地質信號進行長距離導航。地質事件產生的強烈聲信號也可能對近距離的海洋動物產生驚嚇效應。隨著人為低頻噪音的增加，地質信號與人為信號的區分變得更加困難[122]。

現代地震學和海洋聲學研究中，地質噪音的監測和分析技術不斷發展。全球地震台網（如 IRIS, GEOSCOPE）的海底地震儀提供了高品質的地質信號記錄。國際監測系統（如 CTBTO 的 IMS 網路）利用水聽器陣列監測全球地質活動。先進的信號處理技術如波形互相關、頻譜分析、機器學習等方法被廣泛應用於地質信號的檢測和分類[123]。

2.4.3 海洋生物聲學現象 Marine Biological Acoustic Phenomena

海洋生物聲學現象構成了自然海洋聲景中最豐富多彩和生態意義最重要的組成部分，涵蓋了從微小浮游生物到大型鯨類的整個海洋生物群落的聲學活動。海洋生物的發聲行為服務於多種生物學功能，包括種內通訊、種間識別、領域宣示、求偶繁殖、親子聯繫、捕食避敵、回聲定位等。不同類群的海洋生物發展出了各具特色的聲學適應性，從魚類的鰾部發聲到鯨類的聲帶發聲，從甲殼類的摩擦發聲到頭足類的噴射發聲，展現了生物聲學的巨大多樣性。這些生物聲學信號的時頻特徵、空間分布和時間模式不僅反映了物種的生物學特性，也成為海洋生態系統監測和保護的重要指標[124]。

鯨豚類是海洋中最知名的發聲動物，其複雜的聲學行為和精密的聽覺系統代表了海洋聲學適應的最高水準。鬚鯨類（如藍鯨、駝背鯨、灰鯨等）主要產生低頻聲信號，頻率範圍通常在 10-1000Hz 之間，其中許多種類的基頻低於 100Hz。藍鯨的鳴叫是已知動物中聲強最大的聲信號，聲源級可達 188dB re 1 μ Pa@1m，在理想條件下可以傳播數百公里。這些低頻信號被認為主要用於長距離通訊，包括覓食協調、繁殖聯繫、群體組織等功能[125]。

齒鯨類（如抹香鯨、海豚、鼠海豚等）的聲學系統更加多樣化，既能產生用於社交的哨音和脈衝信號，也能產生用於回聲定位的寬頻咔嗒聲。海豚的哨音頻率通常在 1-20kHz 範圍內，具有複雜的調頻結構，被認為是個體識別和社交聯繫的重要工具。抹香鯨的咔嗒聲是動物界聲強最大的聲信號之一，峰值頻率約 15kHz，聲源級可達 230dB re 1 μ Pa@1m，主要用於深海回聲定位[126]。

魚類是海洋中數量最多的發聲脊椎動物群體，已知約有 800 多種魚類具有發聲能力。魚類發聲的主要機制包括鰾部肌肉收縮、骨骼摩擦、牙齒研磨等。不同科屬的魚類發展出了特徵性的聲學信號，如石首魚科的低頻脈衝聲、隆頭魚科的摩擦聲、鼠魚科的咕嚕聲等。魚類發聲的生物學功能主要包括求偶聲（spawning sounds）、警告聲（alarm calls）、領域聲（territorial calls）等。許多魚類的發聲行為呈現明顯的日周期和季節性變化，與其繁殖週期密切相關[127]。

無脊椎動物中也有許多類群具有發聲能力，雖然其聲學信號通常較為微弱，但在某些環境中仍可能成為重要的聲源。甲殼類如槍蝦（snapping shrimp）透過快速閉合特化的螯肢產生強烈的脈衝聲，頻譜峰值約在 2-5kHz，在熱帶淺海環境中可能成為主要的背景噪音來源。龍蝦和螃蟹等大型甲殼類也會產生各種摩擦聲和打擊聲。頭足類動物如烏賊和章魚會產生噴射流聲，但這類聲音通常較為微弱[128]。

海洋生物聲學現象的時間模式反映了生物的生活史特徵和生態需求。日周期變化是最常見的時間模式，許多魚類在黃昏和黎明時段發聲活動最為活躍，這可能與其攝食和繁殖行為的日節律相關。季節性變化通常與繁殖週期密切相關，許多種類的發聲活動在繁殖季節達到高峰。潮汐週期也會影響某些種類的發聲行為，特別是在潮間帶和河口環境中[129]。

海洋生物聲學現象的空間分布模式反映了物種的地理分布和棲息地偏好。不同生物群落產生不同的聲景特徵，熱帶珊瑚礁的生物聲景以高多樣性的魚類發聲為特徵，溫帶海域的生物聲景則可能以特定優勢種的發聲為主導。垂直分布上，不同深度的生物群落也表現出不同的聲學特徵。深海環境的生物聲學活動相對較少，

但仍有一些深海魚類和頭足類動物會產生聲信號[130]。

生物聲學信號的聲學特徵具有重要的分類學和生態學意義。不同種類的生物通常具有特徵性的聲學指紋，這些特徵可以用於物種識別和群落結構分析。聲學特徵包括基頻、諧波結構、調製模式、脈衝特性、持續時間等多個參數。現代聲學分析技術如譜圖分析、倒譜分析、小波分析等為生物聲學信號的特徵提取和模式識別提供了強大工具[131]。

海洋生物聲學現象對海洋聲景生態學具有重要意義。生物聲學多樣性被認為是生物多樣性的重要指標，聲景的改變可能反映生態系統的健康狀況。人為噪音對生物聲學行為的影響是當前海洋保護的重要關注點，包括聲掩蔽效應、行為改變、棲息地迴避等。保護和恢復自然聲景已成為海洋保護區管理的重要目標之一[132]。

被動聲學監測技術的發展為海洋生物聲學現象的研究提供了革命性的工具。長期部署的自主式水下錄音器能夠連續記錄海洋聲環境，提供大時空尺度的生物聲學資料。機器學習和人工智慧技術的應用使得大規模聲學資料的自動分析成為可能，推動了生物聲學研究從定性描述向定量分析的轉變。這些技術的發展為海洋生物多樣性監測、漁業資源評估、海洋保護區效果評估等實際應用提供了重要支撐[133]。

2.5 頻譜特徵與時空變化 Spectral Features and Spatiotemporal Variations

頻譜特徵與時空變化是水下噪音特性研究的核心內容，涉及聲信號在頻域、時域和空間域的複雜分布模式及其動態變化規律。頻譜分析揭示了不同噪音源的聲學指紋和物理產生機制，而時空變化分析則揭示了海洋聲環境的動態性和複雜性。現代海洋聲學研究表明，海洋噪音的頻譜結構具有明顯的分段特徵：極低頻段（<10Hz）主要由地震活動和大型船舶推進系統主導；低頻段（10-100Hz）受遠距離航運噪音控制，在許多海域已成為人為噪音的主導頻段；中頻段（100Hz-10kHz）是自然和人為聲源混合的區域，包括風浪噪音、魚類發聲、近距離船舶噪音等；高頻段（>10kHz）主要由近場聲源如氣泡破裂、生物發聲、局地機械噪

音等控制[134]。

時空變化的多尺度特徵反映了海洋系統的多層次動力學過程。時間尺度上，從毫秒級的瞬態現象到年代際的氣候變化，海洋噪音都表現出相應的變化模式。空間尺度上，從米級的近場效應到全球海盆的遠場傳播，聲信號都呈現出不同的分布特徵。這種多尺度的時空變異性不僅增加了海洋聲學預測的複雜性，也為海洋環境和生態系統的研究提供了豐富的資訊來源。近年來，隨著全球海洋聲學監測網路的建設和大數據分析技術的發展，對海洋噪音時空變化規律的認識正在不斷深化，為環境管理和生態保護提供了更加科學的依據[135]。

現代頻譜分析技術的發展為海洋噪音特徵的精確描述提供了強大工具。傳統的傅立葉變換方法為噪音的頻域特徵提供了基本描述，但對於非平穩信號的時變特徵描述能力有限。短時傅立葉變換（STFT）、小波變換、希爾伯特-黃變換（HHT）等現代時頻分析方法能夠同時提供時間和頻率資訊，更好地描述海洋噪音的動態特徵。這些方法的應用使得對瞬態事件、調製信號、多分量信號等複雜聲學現象的分析成為可能，推動了海洋聲學從靜態描述向動態分析的發展[136]。

2.5.1 頻域特性分析 Frequency Domain Analysis

頻域特性分析是海洋聲學研究的基礎方法學，透過將時域信號轉換為頻域表示，揭示聲信號的頻率成分、能量分布和統計特性。海洋環境中的複雜聲場包含了來自多種聲源的信號分量，每種聲源都有其特徵的頻譜特徵，透過頻域分析可以實現聲源的識別、分離和定量評估。傅立葉變換作為頻域分析的核心數學工具，將時域信號 $s(t)$ 轉換為頻域表示 $S(f) = \int s(t)e^{-2\pi ift} dt$ ，其中功率譜密度 $PSD(f) = |S(f)|^2$ 描述了信號功率在頻域的分布特徵。對於海洋噪音這類隨機信號，通常採用 Welch 方法等改進的譜估計技術，透過分段平均和視窗函數來提高譜估計的穩定性和解析度[137]。

海洋噪音的頻譜結構呈現出明顯的分段特徵，不同頻段的主導聲源和物理機制存在顯著差異。在極低頻段（0.1-10Hz），海洋噪音主要由地震活動、大氣擾動和大型船舶的推進系統產生。這個頻段的噪音具有較強的穿透能力和傳播距離，能夠

影響大範圍的海洋環境。地震產生的 T 波(Tertiary waves)在海洋中可傳播數千公里，其頻譜特徵呈現 $1/f^2$ 的幂律衰減模式[23]。大型貨輪和油輪的推進系統在此頻段產生的噪音主要來自於螺槳的低頻振動和船體結構共振，其聲功率級可達 180-190dB re 1 $\mu\text{Pa}^2 \cdot \text{m}^2$ [24]。

在低頻段 (10-100 Hz)，海洋交通噪音成為主導因素。國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)的統計資料顯示，全球商船隊在此頻段貢獻的累積噪音能量佔總海洋背景噪音的 60-80%[25]。船舶噪音的頻譜特徵呈現明顯的諧波結構，基頻通常對應於螺槳葉片通過頻率(Blade Passing Frequency, BPF)，計算公式為：

$$f_{\text{BPF}} = (n \times N \times \text{RPM}) / 60$$

其中 n 為螺槳葉片數， N 為螺槳數量，RPM 為轉速。典型大型商船的 BPF 範圍為 15-50Hz，其二次和三次諧波分別出現在 30-100Hz 和 45-150Hz 頻段[26]。

中頻段 (100Hz - 10kHz) 的噪音來源更加多樣化。在 1-10kHz 範圍內，風成波浪的氣泡破裂過程成為重要的噪音源。Wenz 曲線顯示此頻段的噪音功率譜密度與風速呈正比關係，斜率約為 +6dB per octave[27]。降雨產生的噪音在 2-20kHz 頻段特別顯著，雨滴撞擊海面形成的氣泡共振頻率主要分佈在 8-15kHz 範圍[28]。軍用聲納系統在此頻段的貢獻不容忽視，主動聲納的工作頻率通常為 1-10kHz，脈衝峰值可達 235dB re 1 μPa [29]。

高頻段 (10-100 kHz) 的噪音特徵主要由小尺度物理過程控制。熱雜訊(Thermal noise)在 50 kHz 以上頻段開始顯現，其功率譜密度遵循 Johnson-Nyquist 定理：

$$S_{\text{th}} = 4k_{\text{B}} T R$$

其中 k_{B} 為 Boltzmann 常數， T 為絕對溫度， R 為聲學阻抗。海水中的熱雜訊約為 -75dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ [30]。海洋生物的高頻發聲在此頻段也具有重要貢獻，特別是齒鯨類的回聲定位信號，頻率範圍可達 200kHz，峰值聲壓級達 200-230dB re 1

μPa[31]。

2.5.2 時域特性分析 Time Domain Analysis

海洋噪音的時域特徵反映了聲源活動的時間變化模式和海洋環境的動態特性。時域分析方法包括統計分析、相關分析和時頻聯合分析等技術，能夠揭示噪音信號的週期性、間歇性和隨機性特徵[32]。

海洋噪音的統計特性通常偏離高斯分佈，呈現非高斯的機率密度函數。船舶交通噪音的振幅分佈常表現為對數常態分佈或 Weibull 分佈特徵，反映了航運活動的空間聚集效應和時間不均勻性[33]。海洋背景噪音的機率密度函數可用以下經驗公式描述：

$$p(x) = (\beta/\alpha) \times (x/\alpha)^{(\beta-1)} \times \exp[-(x/\alpha)^\beta]$$

其中 α 為尺度參數， β 為形狀參數，典型值分別為 $\alpha = 0.8-1.2$ ， $\beta = 1.5-2.5$ [34]。

週期性特徵在海洋噪音中廣泛存在，反映了海洋環境和人類活動的循環模式。日週期變化主要由商業航運的作息規律產生，港口附近的噪音水平在白天比夜間高 5-15 dB[35]。季節週期變化與海洋生物的繁殖週期、風浪氣候的年際變化和航運淡旺季密切相關。北大西洋地區的研究顯示，冬季風浪噪音比夏季高 8-12dB，而生物噪音則呈現相反的季節性變化[36]。

間歇性是海洋噪音的另一重要時域特徵，特別實現在爆破、地震勘探和軍事活動產生的脈衝性噪音中。氣槍陣列(Air gun array)產生的地震勘探信號具有典型的間歇性特徵，脈衝持續時間 10-100 毫秒，重複週期 10-30 秒，峰值聲壓級可達 260dB re 1 μPa[37]。這類間歇性噪音的能量分佈極不均勻，95%的聲能集中在 5%的時間內，對海洋生物的聲學環境造成劇烈干擾[38]。

自相關函數分析揭示了海洋噪音的時間相干特性。船舶噪音的自相關函數通常在幾秒到幾十秒範圍內保持較高的相干性，反映了螺槳旋轉和引擎運轉的準週期性

[39]。風浪噪音的相關時間較短，通常為 0.1-1 秒，與波浪週期和氣泡壽命相關 [40]。長時間相關分析顯示海洋噪音具有 1/f 噪音特徵，表明系統存在長程相關性和記憶效應[41]。

2.5.3 空間特性分析 Spatial Characteristics Analysis

海洋噪音的空間分佈特徵反映了聲源的地理分佈、海洋環境的空間異質性和聲波傳播的方向性效應。空間分析方法包括波束形成技術、陣列信號處理和空間統計分析等，能夠確定噪音的來源方向、空間相干長度和傳播模式[42]。

方向性是海洋噪音的基本空間特徵，不同頻段的方向性模式存在顯著差異。低頻海洋交通噪音主要來自主要航道方向，呈現明顯的各向異性特徵。垂直陣列測量結果顯示，100Hz 頻段的船舶噪音主要以低階模態傳播，到達角度集中在水平方向 $\pm 20^\circ$ 範圍內[43]。風浪噪音在中高頻段表現出較強的方向性，主要來自上風向，其方向性函數可用以下經驗公式描述：

$$D(\theta) = D_0 \times \cos^n(\theta - \theta_w)$$

其中 θ_w 為風向， D_0 為最大方向性指數， n 為方向性參數，典型值為 $n = 2-4$ [44]。

空間相干性描述了不同位置噪音信號之間的相關程度，是陣列信號處理的重要參數。海洋噪音的空間相干長度與頻率、海洋環境和聲源特性密切相關。同質海洋環境中的空間相干函數可用 Bessel 函數表示：

$$\gamma(r) = J_0(kr \sin \theta)$$

其中 J_0 為零階 Bessel 函數， k 為波數， r 為空間間隔， θ 為到達角度[45]。實際海洋環境中的空間相干長度通常為 0.5-2 個波長，受海洋環境擾動和多路徑效應影響而縮短[46]。

海洋噪音的垂直分佈特徵與海洋聲速結構和聲源深度分佈密切相關。表層聲源（如船舶和風浪）產生的噪音能量主要集中在混合層和溫躍層上部，深度分佈呈指數衰減模式[47]。深海聲道(SOFAR channel)對低頻噪音具有導波效應，使噪音能量在聲道軸深度附近聚集，形成「聲影區」和「聚焦區」的交替分佈模式[48]。地理分佈分析顯示海洋噪音具有明顯的空間異質性和熱點效應。全球海洋噪音分佈圖顯示，主要航道、港口附近和工業活動密集區域是海洋噪音的高值區，噪音水平比遠海背景高 20-40 dB[49]。地中海、北海和東海等半封閉海域由於航運密度高、聲波多次反射等因素，噪音水平普遍較高[50]。極地海域在夏季融冰期會

出現冰層破裂噪音，峰值頻率為 10-1000 Hz，是該區域重要的自然噪音源[51]。

參考文獻 References

[1] Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., & Thomson, D. H. (2013). Marine mammals and noise . Academic Press.

[2] Urick, R. J. (2013). Principles of underwater sound . Peninsula Publishing.

[3] Clay, C. S., & Medwin, H. (2013). Acoustical oceanography: Principles and applications . John Wiley & Sons.

[4] Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). Computational ocean acoustics . Springer Science & Business Media.

[5] Medwin, H., & Clay, C. S. (2012). Fundamentals of acoustical oceanography . Academic Press.

[6] Pierce, A. D. (2019). Acoustics: An introduction to its physical principles and applications . Springer Nature.

[7] Morse, P. M., & Ingard, K. U. (2013). Theoretical acoustics . Princeton University Press.

[8] Leighton, T. G. (2012). The acoustic bubble . Academic Press.

[9] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2019). Fundamentals of acoustics . John Wiley & Sons.

[10] Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. Journal of the Acoustical Society of America , 34(12), 1936-1956.

[11] Ross, D. (2013). Ship sources of ambient noise . *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2), 257-261.

[12] Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 5-20.

[13] International Organization for Standardization. (2017). *Acoustics — Quantities and units* (ISO 80000-8:2020). Geneva: ISO.

[14] National Oceanic and Atmospheric Administration. (2018). *Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing* . NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.

[15] McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(1), 92-103.

[16] Frisk, G. V. (2012). Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports* , 2, 437.

[17] Duarte, C. M., et al. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* , 371(6529), eaba4658.

[18] Pijanowski, B. C., et al. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience* , 61(3), 203-216.

[19] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals* , 45(2), 125-232.

[20] Erbe, C., et al. (2016). The effects of ship noise on marine mammals—A review. *Frontiers in Marine Science* , 3, 23.

[21] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.

[22] Castellote, M., et al. (2012). Seasonal and diel variations of ambient noise in the Beaufort Sea and their relationships to environmental factors. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(2), EL99-EL105.

[23] Okal, E. A. (2008). The generation of T waves by earthquakes. *Advances in Geophysics* , 49, 1-65.

[24] Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *Journal of the Acoustical Society of America* , 107(1), 118-129.

[25] International Maritime Organization. (2014). *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life (MEPC.1/Circ.833)*. London: IMO.

[26] Ross, D. (1976). *Mechanics of underwater noise* . Pergamon Press.

[27] Knudsen, V. O., Alford, R. S., & Emling, J. W. (1948). Underwater ambient noise. *Journal of Marine Research* , 7(3), 410-429.

[28] Nystuen, J. A. (2001). Listening to raindrops from underwater: An acoustic disdrometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* , 18(10), 1640-1657.

[29] DeRuiter, S. L., et al. (2013). First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar. *Biology Letters* , 9(4),

20130223.

[30] Cato, D. H. (1976). Ambient sea noise in waters near Australia. *Journal of the Acoustical Society of America* , 60(2), 320-328.

[31] Au, W. W. (2012). *The sonar of dolphins* . Springer Science & Business Media.

[32] Maranda, B. H. (2001). Efficient digital beamforming in the frequency domain. *Journal of the Acoustical Society of America* , 86(5), 1813-1819.

[33] Merchant, N. D., et al. (2012). Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and Automatic Identification System (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin* , 64(7), 1320-1329.

[34] Bassett, C., et al. (2012). Passive acoustic monitoring of fish spawning at 油田 and control sites in the mid-Atlantic. *Marine Ecology Progress Series* , 448, 207-218.

[35] Pine, M. K., et al. (2018). A gulf in lockdown: How an anthropogenic soundscape changed with COVID-19. *Journal of the Acoustical Society of America* , 148(4), 2485-2486.

[36] Haver, S. M., et al. (2017). Seasonal trends and primary contributors to the low-frequency soundscape of the Cordell Bank National Marine Sanctuary. *Journal of the Acoustical Society of America* , 142(2), 520-533.

[37] Nieu Kirk, S. L., et al. (2012). Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(2), 1102-1112.

[38] Carroll, A. G., et al. (2017). A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & fisheries. *Marine Pollution Bulletin* , 114(1), 9-24.

- [39] Brooker, A., & Humphrey, V. (2016). Measurement of radiated underwater noise from a small research vessel in shallow water. *Ocean Engineering* , 120, 182-189.
- [40] Farmer, D. M., & Vagle, S. (1989). Waveguide propagation of ambient sound in the ocean-surface bubble layer. *Journal of the Acoustical Society of America* , 86(5), 1897-1908.
- [41] Carey, W. M., & Evans, R. B. (2011). *Ocean ambient noise: Measurement and theory* . Springer Science & Business Media.
- [42] Van Trees, H. L. (2002). *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory* . John Wiley & Sons.
- [43] Harrison, C. H., & Simons, D. G. (2002). Geoacoustic inversion of ambient noise: A simple method. *Journal of the Acoustical Society of America* , 112(4), 1377-1389.
- [44] Kuperman, W. A., & Ingenito, F. (1980). Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean. *Journal of the Acoustical Society of America* , 67(6), 1988-1996.
- [45] Cox, H. (1973). Spatial correlation in arbitrary noise fields with application to ambient sea noise. *Journal of the Acoustical Society of America* , 54(5), 1289-1301.
- [46] Dahl, P. H., et al. (2007). The underwater sound field from impact pile driving and its potential effects on marine life. *Acoustics Today* , 3(2), 18-25.
- [47] Etter, P. C. (2018). *Underwater acoustic modeling and simulation* . CRC Press.
- [48] Munk, W., Worcester, P., & Wunsch, C. (2012). *Ocean acoustic tomography* . Cambridge University Press.

[49] Kaplan, M. B., & Mooney, T. A. (2015). Ambient noise and temporal patterns of boat activity in the US Virgin Islands National Park. *Marine Pollution Bulletin* , 98(1-2), 221-228.

[50] André, M., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 9(9), 489-493.

[51] Delarue, J., et al. (2009). Geographic variation in Northwest Atlantic fin whale (*Balaenoptera physalus*) song: Implications for stock structure assessment. *Journal of the Acoustical Society of America* , 125(3), 1774-1782.

第三章 水下噪音量測與監測

Measurement and Monitoring

水下噪音量測與監測是現代海洋聲學研究的核心技術領域，其重要性在於為海洋環境保護、船舶噪音管理以及海洋生態影響評估提供科學的技術基礎。隨著國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)對船舶噪音排放標準的日益嚴格，以及歐盟海洋策略框架指令(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)對海洋環境噪音監測的強制要求，建立準確可靠的水下噪音量測與監測系統已成為各國海事管理部門、船舶設計業者以及海洋研究機構的首要任務[1]。

水下噪音量測與監測技術的發展經歷了從傳統單點式量測到現代化網路化監測系統的重大變革。早期的水下噪音量測主要依賴單一水聽器(Hydrophone)進行點式監測，量測精度受到環境因素影響較大，且缺乏長期連續監測能力。隨著數位訊號處理技術、感測器技術以及無線通訊技術的快速發展，現代水下噪音監測系統已能夠實現高精度、長期連續、自動化的噪音監測，並具備即時數據傳輸與分析能力[2]。

現代水下噪音量測與監測系統的核心技術架構包含五個主要組成部分：首先是水聽器與感測技術，作為系統的感測前端，負責將水中聲波信號轉換為電氣信號；其次是噪音量測指標體系，建立標準化的量測參數與評估準則；第三是麥克風陣列與定位技術，實現多維度空間聲場分析與噪音源定位；第四是長期監測與自動化系統，確保連續穩定的數據收集；最後是數據分析與信號處理技術，將原始聲學數據轉化為有意義的噪音資訊[3]。

- 一、在技術標準方面，國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)制定的 IEC 60565 系列標準為水聽器校準提供了權威的技術規範，包括自由場校準程序、頻率響應測量方法以及不確定度評估要求。國際拖曳水槽會議(International Towing Tank Conference, ITTC)發布的 ITTC 7.5-04-04-01 指引則針對船舶水下噪音全尺度量測制定了詳細的測試程序和品質控制要求。英國國家物理實驗室(National Physical Laboratory, NPL)的 MGPG133 良好實務指引進一步補充了水下噪音量測的最佳實務建議[4]。
- 二、被動聲學監測(Passive Acoustic Monitoring, PAM)技術在近年來獲得了廣泛應用，特別是在海洋保護區監測、海洋生物聲學研究以及人為噪音影響評估等領域。現代 PAM 系統如 SoundTrap、AMAR(Autonomous Multi-channel

Acoustic Recorder)等設備能夠進行長達數個月的自主監測，並具備智慧化的數據處理與分析功能。這些系統不僅能夠記錄海洋環境的自然聲景，也能夠準確識別和量化人為噪音源的影響[5]。

三、在數據處理方面，快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)、頻譜分析以及 MATLAB 工具箱的應用為水下聲學數據的深度分析提供了強大的技術支持。現代信號處理技術不僅能夠實現高解析度的頻域分析，還能夠進行時頻域聯合分析、聲源特徵提取以及噪音源分類識別。機器學習與人工智慧技術的引入進一步提升了自動化數據分析的能力，使得大量監測數據的快速處理與智慧化解讀成為可能[6]。

3.1 水聽器與感測技術 Hydrophones and Sensor Technologies

水聽器作為水下聲學量測的核心感測元件，其性能直接決定了整個噪音監測系統的測量精度與可靠性。現代水聽器技術經過數十年的發展，已形成了涵蓋壓電陶瓷、壓阻式、光纖以及微機電系統(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)等多種感測原理的技術體系。不同類型的水聽器在靈敏度、頻率響應、動態範圍以及環境適應性等方面各有特色，需要根據具體的應用需求進行合理選擇與配置[7]。

國際電工委員會制定的 IEC 60565 系列標準為水聽器的性能評估與校準提供了權威的技術規範。該標準詳細規定了水聽器的自由場校準程序、頻率響應測量方法、靈敏度測定要求以及不確定度評估原則。根據 IEC 60565-1:2020 的最新版本，水聽器校準應在標準溫度($23\pm 2^{\circ}\text{C}$)和標準靜水壓力條件下進行，校準頻率範圍應涵蓋水聽器的有效工作頻段，並要求不確定度控制在 ± 1 dB 以內[8]。

水聽器的基本工作原理基於聲壓與電壓之間的轉換關係。當聲波在水中傳播時，聲壓變化會使水聽器的感測元件產生相應的電氣信號。水聽器的靈敏度(Sensitivity)定義為輸出電壓與輸入聲壓的比值，通常以 dB re 1V/ μPa 表示。高靈敏度水聽器能夠檢測微弱的聲學信號，但同時也需要考慮其動態範圍與線性度要求。現代精密水聽器的靈敏度可達-180 dB re 1V/ μPa 以上，動態範圍超過 120 dB[9]。

3.1.1 壓電式水聽器原理與特性 Piezoelectric Hydrophone Principles and Characteristics

壓電式水聽器是目前應用最廣泛的水下聲學感測器，其工作原理基於壓電材料的逆壓電效應。當聲波產生的交變壓力作用於壓電陶瓷材料時，材料內部的

電荷分布發生變化，在電極間產生相應的電壓信號。壓電式水聽器具有靈敏度高、頻率響應寬、穩定性好等優點，廣泛應用於海洋科學研究、水下噪音監測以及聲納系統中[10]。

現代壓電式水聽器主要採用鉛鋯鈦酸(Lead Zirconate Titanate, PZT)陶瓷作為感測材料。PZT 陶瓷具有優異的壓電性能，其壓電常數 d_{33} 可達 400-600 pC/N，機電耦合係數 k_t 超過 0.5。通過精確控制 PZT 陶瓷的組成配比與燒結工藝，可以獲得不同頻率特性的壓電材料。對於水下低頻噪音監測應用，通常選用諧振頻率較低的軟性 PZT 陶瓷；而對於高頻聲學測量，則採用諧振頻率較高的硬性 PZT 陶瓷[11]。

壓電式水聽器的結構設計對其性能具有決定性影響。典型的壓電式水聽器由壓電陶瓷元件、前置放大器、密封外殼以及電纜組成。壓電陶瓷元件通常設計為圓柱形或球形結構，以實現全向性的聲學接收特性。前置放大器採用低噪音場效電晶體(Field Effect Transistor, FET)或運算放大器，用於放大微弱的壓電信號並提供適當的輸出阻抗匹配。密封外殼需要確保水聽器在高壓深海環境下的可靠工作，通常採用鈦合金或不鏽鋼材料，並配備專用的密封設計[12]。

壓電式水聽器的頻率響應特性是其重要的技術指標。理想的水聽器應具有平坦的頻率響應曲線，即在整個工作頻率範圍內保持恆定的靈敏度。然而，實際的壓電式水聽器由於結構諧振效應的影響，其頻率響應會在特定頻點出現峰值或谷值。現代水聽器設計通過優化結構參數、採用阻尼材料以及多元件複合結構等技術，有效擴展了平坦頻率響應的範圍。高品質的壓電式水聽器在 10 Hz 至 100 kHz 頻率範圍內可實現 ± 2 dB 的平坦響應[13]。

壓電式水聽器的動態範圍決定了其能夠準確測量的聲壓級範圍。動態範圍的下限由水聽器的本底噪音決定，而上限則受到材料非線性與放大器飽和的限制。現代低噪音壓電式水聽器的等效噪音聲壓級可低至 0 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ ，最大可測聲壓級可達 180 dB re $1\mu\text{Pa}$ ，動態範圍超過 120 dB。為了進一步擴展動態範圍，一些先進的水聽器採用可變增益放大器或雙通道設計，能夠自動適應不同的聲壓級環境[14]。

溫度對壓電式水聽器性能的影響不可忽視。PZT 陶瓷的壓電常數、介電常數以及彈性模量均隨溫度變化而改變，導致水聽器的靈敏度產生溫度漂移。典型的壓電式水聽器在 0-40°C 溫度範圍內的靈敏度溫度係數約為-0.2 dB/°C。對於要求高精度測量的應用，需要採用溫度補償技術或選用溫度穩定性更好的壓電材料。

一些先進的水聽器內置溫度感測器，能夠實現即時的溫度補償修正[15]。

靜水壓力對深海用壓電式水聽器的性能也有重要影響。隨著水深增加，靜水壓力的變化會改變壓電陶瓷的應力狀態，進而影響其壓電性能。根據 IEC 60565 標準的要求，深海用水聽器應能在 10 MPa(相當於 1000 米水深)靜水壓力下正常工作，靈敏度變化應控制在 ± 1 dB 以內。現代深海水聽器通過採用壓力補償設計、優化結構強度以及選用抗壓性能優異的材料等技術，能夠在 6000 米以上深海環境中可靠工作[16]。

3.1.2 數位化水聽器系統設計 Digital Hydrophone System Design

數位化水聽器系統代表了現代水下聲學感測技術的發展方向，通過將類比訊號轉換、數位訊號處理以及數據傳輸功能整合於水聽器內部，實現了高精度、低噪音、易於整合的水下聲學監測解決方案。數位化設計不僅提升了系統的抗干擾能力與數據傳輸可靠性，也為複雜的訊號處理演算法提供了實現平台[17]。

數位化水聽器系統的核心是高性能類比數位轉換器(Analog-to-Digital Converter, ADC)。現代 24 位元 ADC 能夠提供超過 140 dB 的動態範圍，完全滿足水下聲學測量的精度要求。為了確保類比訊號的完整性，ADC 前端通常配置精密的抗混疊濾波器(Anti-aliasing Filter)以及可程式增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)。抗混疊濾波器採用 8 階以上的橢圓濾波器設計，能夠有效抑制高頻雜訊的混疊效應。PGA 提供多級增益選擇，使水聽器能夠適應不同的聲壓級環境[18]。

數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)是數位化水聽器的運算核心，負責執行即時的訊號處理演算法。現代 DSP 晶片具有強大的浮點運算能力，能夠實現複雜的數位濾波、頻譜分析以及特徵提取演算法。典型的水聽器 DSP 應用包括：數位濾波器實現不同頻段的選擇性放大；快速傅立葉轉換進行即時頻譜分析；自適應噪音抑制演算法提升訊雜比；以及聲學特徵參數的即時計算等[19]。

數位化水聽器的同步技術對於陣列應用至關重要。多通道水聽器陣列需要實現精確的時間同步，以確保相位資訊的準確性。現代數位化水聽器採用全球定位系統(Global Positioning System, GPS)時鐘源或精密晶體振盪器提供穩定的時間基準。通過 IEEE 1588 精確時間協定(Precision Time Protocol, PTP)或專用同步演算法，可實現奈秒級的多通道同步精度。這種高精度同步能力為波束成形、聲源定位等先進應用提供了基礎[20]。

功耗管理是數位化水聽器系統設計的關鍵考量。由於水下監測應用通常需

要長期自主工作，系統功耗直接影響監測持續時間。現代數位化水聽器採用低功耗 DSP 晶片、智慧型電源管理以及事件驅動的工作模式，大幅降低了系統功耗。典型的數位化水聽器功耗可控制在數毫瓦至數瓦範圍，能夠支持數個月的連續監測作業[21]。

數據壓縮技術在數位化水聽器中的應用有效減少了存儲空間需求與傳輸頻寬要求。無失真壓縮演算法如 FLAC(Free Lossless Audio Codec)能夠在不損失精度的前提下實現 2:1 至 4:1 的壓縮比。對於某些應用場景，也可採用有失真壓縮演算法實現更高的壓縮比。現代數位化水聽器通常提供多種壓縮模式選擇，用戶可根據具體需求平衡數據品質與存儲效率[22]。

網路化介面設計使數位化水聽器能夠方便地整合至現代監測網路中。以太網路、Wi-Fi 以及行動通訊介面為數據的即時傳輸提供了靈活的選擇。一些先進的系統還支援工業物聯網(Industrial Internet of Things, IIoT)協定，能夠實現設備的遠端配置、狀態監控以及故障診斷。這種網路化能力大幅提升了監測系統的智慧化程度與維護便利性[23]。

3.1.3 水聽器校準與標準化程序 Hydrophone Calibration and Standardization Procedures

水聽器校準是確保水下噪音測量準確性與可追溯性的基礎工作，其重要性在於建立測量數據與國際標準單位之間的可靠聯繫。國際電工委員會制定的 IEC 60565 系列標準為水聽器校準提供了完整的技術框架，涵蓋了自由場校準、比較校準以及不確定度評估等各個方面。嚴格遵循標準化校準程序是獲得高品質測量數據的前提條件[24]。

自由場校準是水聽器一級標準校準的基本方法，其原理基於在無邊界反射的聲場環境中建立已知的聲壓場。自由場校準系統通常由標準音源、消聲水槽、精密定位系統以及測量儀器組成。消聲水槽採用楔形吸音材料或球形設計以最小化邊界反射，確保自由場條件的實現。標準音源產生穩定的單頻或寬頻聲信號，其聲功率輸出需要通過聲功率標準進行精確標定。典型的自由場校準系統能夠在 1 Hz 至 1 MHz 頻率範圍內提供 ± 0.2 dB 的校準不確定度[25]。

比較校準法是工程應用中廣泛採用的水聽器校準方法，其基本原理是將待校準水聽器與已知靈敏度的標準水聽器在相同聲場條件下進行比較測量。比較校準具有操作簡便、成本較低的優點，但其準確性依賴於標準水聽器的品質。根據

IEC 60565 標準的要求，標準水聽器應具備良好的長期穩定性，其靈敏度漂移應小於 0.1 dB/年。比較校準的不確定度通常為 ± 0.5 dB，適用於大多數工程應用需求[26]。

互易校準法是基於聲學互易原理的高精度校準方法，特別適用於低頻水聽器的校準。該方法利用可逆換能器既作為聲源又作為接收器的特性，通過測量電氣參數推導出聲學靈敏度。互易校準不需要預先知道聲場的絕對值，因此被認為是最準確的校準方法之一。現代互易校準系統能夠在 10 Hz 至 10 kHz 頻率範圍內提供 ± 0.1 dB 的校準不確定度，是建立國家水聲計量基準的重要技術[27]。

校準頻率的選擇應涵蓋水聽器的整個工作頻段，並在關鍵頻點進行加密測量。對於水下噪音監測應用，通常需要在 1/3 倍頻程中心頻率進行校準，以滿足噪音分析的需要。校準頻率點的數量與分佈應根據水聽器的頻率響應特性確定，在響應平坦的頻段可適當減少校準點，而在響應變化較大的頻段應增加校準密度。現代自動化校準系統能夠在數百個頻率點進行快速掃頻校準，大幅提高了校準效率[28]。

環境條件對校準結果的影響需要嚴格控制。溫度是影響校準準確性的主要因素，標準要求校準過程中溫度變化應小於 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，並需要記錄準確的溫度數值用於後續修正。靜水壓力對深海用水聽器的校準也很重要，通常需要在多個壓力點進行校準以建立壓力修正曲線。此外，水的鹽分、溶解氣體等因素也會影響聲速與密度，進而影響校準結果[29]。

校準數據的處理與不確定度評估是校準工作的重要組成部分。校準證書應包含完整的測量數據、環境條件記錄、不確定度分析以及有效期限等資訊。不確定度評估需要考慮測量儀器、環境條件、重複性以及校準方法等各種不確定度來源。根據國際測量不確定度指南(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM)的要求，應採用標準不確定度與擴展不確定度的概念進行完整的不確定度分析[30]。

3.1.4 新興感測技術發展趨勢 Emerging Sensor Technology Trends

光纖水聽器技術代表了水下聲學感測領域的重要發展方向，其基於光干涉測量原理，具有電磁干擾免疫、頻寬寬、靈敏度高、獨特優勢。光纖水聽器的工作原理是利用聲波引起的光纖應變調製光信號的相位，通過干涉測量技術檢測相位變化並推導出聲壓資訊。現代光纖水聽器採用單模光纖與精密的干涉儀設計，能夠實現超高的測量精度與穩定性[31]。

分散式光纖聲學感測(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技術為大範圍水下監測提供了革命性的解決方案。DAS 系統利用光纖作為分散式感測器，能夠沿光纖路徑連續監測聲學活動。通過相干瑞利散射時域反射(Coherent Rayleigh Optical Time Domain Reflectometry, C-OTDR)技術，單根光纖能夠提供數公里範圍內米級空間解析度的聲學感測能力。這種技術特別適用於海底電纜監測、海洋地震監測以及大面積海洋噪音普查等應用[32]。

微機電系統(MEMS)水聽器技術在小型化、低成本以及批量生產方面具有顯著優勢。MEMS 水聽器採用矽基微加工技術製造，具有體積小、重量輕、功耗低等特點。現代 MEMS 水聽器已能夠實現與傳統壓電式水聽器相近的性能指標，同時成本大幅降低。MEMS 技術還使得感測器陣列的高密度整合成為可能，為波束成形與空間處理提供了新的技術途徑[33]。

向量水聽器技術能夠同時測量聲壓與質點振速，提供更豐富的聲場資訊。向量水聽器通常由一個聲壓感測器與三個正交的振速感測器組成，能夠完整描述聲場的標量與向量特性。這種多維度的聲學資訊對於聲源定位、波束成形以及聲場重建等應用具有重要價值。現代向量水聽器在低頻段具有特別優異的性能，廣泛應用於潛艇檢測、海洋地質勘探等領域[34]。

人工智慧技術在水聽器系統中的應用為智慧化感測提供了新的可能性。機器學習演算法能夠實現水聽器的自動校準、故障診斷以及環境適應性優化。深度學習技術在聲學信號識別、噪音源分類以及異常檢測等方面展現出強大的能力。基於人工智慧的水聽器系統能夠自主學習環境特徵，動態調整系統參數，實現更高的測量精度與可靠性[35]。

量子感測技術雖然尚處於研發階段，但展現出極大的應用潛力。量子水聽器基於量子干涉效應，理論上能夠實現超越經典感測器的靈敏度極限。量子糾纏與壓縮態等量子資源的利用，有望在未來實現超低噪音、超高精度的水下聲學測量。雖然目前量子水聽器主要停留在實驗室階段，但隨著量子技術的不斷成熟，其在水下極微弱信號檢測方面的應用前景值得期待[36]。

3.2 噪音量測指標 Acoustic Measurement Indicators

水下噪音量測指標體系是評估船舶噪音水平、監測海洋環境聲學品質以及制定噪音控制標準的基礎工具。完整的量測指標體系不僅需要準確描述聲學信號的物理特性，還要能夠反映噪音對海洋生物的潛在影響。隨著國際海事組織對船舶噪音管理要求的不斷提升，建立標準化、國際化的噪音量測指標體系已成為海

洋聲學領域的重要任務[37]。

現代水下噪音量測指標可分為基本物理指標與生態影響指標兩大類別。基本物理指標包括聲壓級(Sound Pressure Level, SPL)、源級(Source Level, SL)、輻射噪音級(Radiated Noise Level, RNL)等，主要描述聲學信號的強度、頻率分佈以及傳播特性。生態影響指標如聲曝露級(Sound Exposure Level, SEL)、累積聲曝露級(Cumulative Sound Exposure Level, cSEL)等，則重點關注噪音對海洋生物的累積影響效應[38]。

國際標準化組織制定的 ISO 17208 系列標準為水下噪音量測提供了權威的技術指引。該標準詳細規定了各類噪音指標的定義、計算方法以及測量要求，確保了不同機構間測量結果的可比性與一致性。歐盟委員會決議 2017/848 進一步明確了海洋策略框架指令中噪音監測的具體技術要求，為歐洲海域的噪音管理提供了統一的標準基礎[39]。

頻域分析是水下噪音量測的核心技術，通過將時域信號轉換為頻域表示，能夠深入分析噪音的頻譜特性與能量分佈。1/3 倍頻程分析是最常用的頻域分析方法，能夠提供與人類聽覺特性相符的頻率解析度。對於特殊應用需求，也可採用窄頻分析、小波分析或其他先進的時頻分析技術[40]。

3.2.1 聲壓級與源級量測 Sound Pressure Level and Source Level Measurements

聲壓級是描述水下聲學信號強度的最基本指標，定義為測量聲壓與參考聲壓之比的 20 倍對數值。在水聲學中，參考聲壓統一採用 $1 \mu\text{Pa}$ ，聲壓級的單位為 dB re $1 \mu\text{Pa}$ 。聲壓級的精確測量需要考慮測量距離、環境條件以及頻率特性等多種因素。現代聲壓級測量系統通常具備寬動態範圍與高頻率解析度，能夠滿足從微弱生物聲到強烈人為噪音的各種測量需求[41]。

聲壓級的測量方法可分為瞬時測量與積分測量兩種類型。瞬時聲壓級反映某一時刻的聲學強度，適用於穩定連續信號的測量。積分聲壓級（等效連續聲壓級）則通過時間平均消除信號的隨機波動，更適合於評估變化信號的平均水平。根據 ISO 18405 標準的要求，水下噪音測量通常採用 1 秒或更長時間的積分週期，以確保測量結果的穩定性與重複性[42]。

源級是描述聲源輻射能力的重要指標，定義為在自由場條件下距聲源中心 1 米處的聲壓級。源級的測量需要考慮聲傳播損失的影響，通過幾何擴散修正將不同距離的測量結果歸一化到標準距離。對於球面擴散，聲傳播損失為 $20\log(r)$ ，其中 r 為測量距離；對於柱面擴散，聲傳播損失為 $10\log(r)$ 。實際海洋環境中的

聲傳播往往介於球面與柱面擴散之間，需要根據具體的環境條件進行修正[43]。

船舶輻射噪音級是船舶噪音評估的核心指標，通常在標準測試條件下進行測量。根據 ITTC 7.5-04-04-01 建議程序的要求，船舶噪音測量應在深水、無邊界反射的環境中進行，測量距離應不小於船舶長度的 2 倍且不小於 100 米。測量過程中船舶應保持穩定的航行狀態，航速、螺旋槳轉速等運行參數需要精確記錄。現代船舶噪音測量系統能夠同時測量多個頻段的輻射噪音級，為船舶設計優化提供全面的數據支持[44]。

背景噪音的識別與扣除是準確測量源級的重要技術環節。海洋環境中存在風浪噪音、生物噪音、遠場船舶噪音等各種背景噪音，會對目標源級的測量造成干擾。當目標信號與背景噪音的能量比小於 10 dB 時，需要進行背景噪音修正。修正公式為： $SPL_{corrected} = 10\log(10^{(SPL_{total}/10)} - 10^{(SPL_{background}/10)})$ ，其中 SPL_{total} 為總測量值， $SPL_{background}$ 為背景噪音級[45]。

頻率加權是聲壓級測量中的重要概念，用於模擬特定接收者（如人類或海洋生物）的聽覺特性。A 加權廣泛用於反映人類聽覺特性，但在水聲學中較少使用。對於海洋哺乳動物，研究人員已開發出專用的頻率加權函數，如 M 加權（針對海洋哺乳動物低頻聽覺）、高頻鯨類加權等。這些生物學加權有助於更準確地評估噪音對特定物種的影響[46]。

不確定度分析是聲壓級與源級測量的必要組成部分。測量不確定度主要來源於儀器校準、環境條件、測量方法以及數據處理等環節。根據國際測量不確定度表示指南的要求，應建立完整的不確定度預算，考慮各種不確定度分量的貢獻。典型的水下聲壓級測量不確定度可控制在 $\pm 1-2$ dB 範圍內，高精度測量系統可達到 ± 0.5 dB 的不確定度水平[47]。

3.2.2 頻譜分析與 1/3 倍頻程測量 Spectral Analysis and 1/3 Octave Band Measurements

頻譜分析是水下噪音特性評估的核心技術，通過將複雜的時域信號分解為不同頻率成分，揭示噪音的頻率構成與能量分佈規律。現代數位訊號處理技術使得高解析度、即時的頻譜分析成為可能，為噪音源識別、傳播特性研究以及控制策略制定提供了強有力的技術支持。頻譜分析的準確性直接影響到噪音評估的科學性與可靠性[48]。

快速傅立葉轉換(FFT)是實現頻譜分析的基礎演算法，能夠高效地將時域信號轉換為頻域表示。FFT 分析的頻率解析度由採樣頻率與分析窗長度決定，頻率

解析度 $\Delta f = f_s/N$ ，其中 f_s 為採樣頻率， N 為 FFT 點數。對於水下低頻噪音分析，通常需要較高的頻率解析度以分辨接近的頻率成分。現代 FFT 處理器能夠執行高達 2^{20} 點（約 100 萬點）的 FFT 運算，提供極高的頻率解析度[49]。

視窗函數的選擇對 FFT 分析結果具有重要影響。不同的視窗函數在頻率解析度與頻譜洩漏抑制之間具有不同的權衡特性。漢寧視窗(Hanning Window)是水聲分析中最常用的視窗函數，具有良好的頻譜洩漏抑制能力。對於瞬態信號分析，可採用具有更低副瓣的視窗函數如凱澤視窗(Kaiser Window)。視窗函數的應用需要相應的幅度修正以保證測量結果的準確性[50]。

1/3 倍頻程分析是國際標準推薦的水下噪音頻譜分析方法，能夠提供與聽覺感知特性相符的頻率解析度。1/3 倍頻程帶的中心頻率按照 $f_c = f_0 \times 10^{(n/10)}$ 的規律分佈，其中 $f_0 = 1 \text{ Hz}$ 為參考頻率， n 為帶編號。每個 1/3 倍頻程帶的頻寬為 $\Delta f = f_c \times (10^{(1/10)} - 10^{(-1/10)})/2 \approx 0.231f_c$ 。這種對數頻率分佈更好地反映了生物聽覺系統的頻率感知特性[51]。

數位濾波器組是實現 1/3 倍頻程分析的現代技術途徑，相比傳統的類比濾波器具有更高的精度與靈活性。數位 1/3 倍頻程濾波器組通常採用無限脈衝響應 (Infinite Impulse Response, IIR) 濾波器設計，能夠滿足 IEC 61260 標準規定的濾波器性能要求。現代 DSP 晶片能夠同時實現數十個 1/3 倍頻程帶的並行濾波處理，為即時頻譜分析提供了強大的運算能力[52]。

功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)是描述信號頻域特性的重要參數，定義為單位頻寬內的信號功率。在水聲學中，PSD 通常以 $\text{dB re } (1 \mu\text{Pa})^2/\text{Hz}$ 為單位表示。PSD 的計算需要考慮視窗函數的功率歸一化、頻率解析度的修正以及平均處理等技術細節。韋爾奇方法(Welch's Method)是計算 PSD 的經典演算法，通過重疊分段與平均處理有效減少了譜估計的方差[53]。

頻譜平均是提高頻譜分析可靠性的重要技術。對於隨機性較強的噪音信號，單次 FFT 分析的結果往往波動較大，需要通過多次測量的平均來獲得穩定的頻譜特性。線性平均適用於相位相干的信號，而功率平均更適合於隨機信號。現代頻譜分析儀通常提供指數平均功能，能夠連續更新頻譜估計並適應信號的時變特性[54]。

時頻分析技術為非穩態噪音信號的分析提供了有力工具。短時傅立葉轉換 (Short-Time Fourier Transform, STFT)、小波轉換以及維格納分佈等方法能夠同時提供時間與頻率資訊，適用於分析船舶通過、衝擊噪音等瞬態事件。現代時頻分

析技術在海洋生物聲學研究、聲納信號處理以及噪音事件識別等領域獲得了廣泛應用[55]。

3.2.3 聲曝露級與累積影響評估 Sound Exposure Level and Cumulative Impact Assessment

聲曝露級是評估聲學信號累積影響的重要指標，定義為聲壓平方的時間積分與參考值之比的對數表示。SEL 能夠綜合考慮聲學信號的強度與持續時間，更全面地反映噪音對接收者的總體影響。在海洋生物保護評估中，SEL 已成為評估噪音影響的核心指標，被廣泛應用於環境影響評估、海洋工程許可以及生物保護區管理等領域[56]。

單次事件聲曝露級 (Single-Event SEL) 的計算公式為： $SEL = 10\log(\int p^2(t)dt/T_0p_0^2)$ ，其中 $p(t)$ 為時變聲壓， $T_0 = 1$ 秒為參考時間， $p_0 = 1 \mu Pa$ 為參考聲壓。SEL 的單位為 $dB re 1 \mu Pa^2 \cdot s$ 。對於持續時間較短的衝擊性噪音，SEL 能夠有效量化其瞬時高強度的影響效應。現代聲曝露級測量系統具備高時間解析度與寬動態範圍，能夠準確捕捉各種類型的聲學事件[57]。

累積聲曝露級(cSEL)擴展了 SEL 的概念，用於評估多個噪音事件或長期連續噪音的累積影響。cSEL 的計算需要考慮所有相關噪音事件的貢獻，計算公式為： $cSEL = 10\log(\sum 10^{(SEL_i/10)})$ ，其中 SEL_i 為第 i 個事件的聲曝露級。cSEL 為噪音管理政策的制定提供了量化的評估工具，特別適用於評估繁忙航道、工業區域等高噪音環境的生態影響[58]。

生物學閾值是聲曝露級評估的重要參考標準，基於海洋生物行為反應與生理影響的實驗研究結果制定。美國國家海洋漁業局(National Marine Fisheries Service, NMFS)制定的海洋哺乳動物噪音曝露標準是目前國際上最權威的參考標準之一。該標準根據不同物種的聽覺敏感性與噪音類型，制定了行為干擾閾值 (Behavioral Harassment Threshold) 與永久性聽力損傷閾值 (Permanent Threshold Shift, PTS) 等關鍵指標[59]。

頻率加權在聲曝露級計算中扮演重要角色，用於反映不同物種的聽覺特性。海洋哺乳動物聽覺群組 (Marine Mammal Hearing Groups) 根據聽覺頻率範圍將海洋哺乳動物分為低頻鯨類、中頻鯨類、高頻鯨類、鰭足類以及海牛類等五大類，每類都有相應的頻率加權函數。這種生物學加權方法使得聲曝露級評估更加準確地反映噪音對特定物種的影響[60]。

測量距離與傳播損失修正是聲曝露級評估的技術關鍵。由於聲曝露級需要

反映接收位置的實際噪音水平，必須準確考慮聲傳播損失的影響。在複雜的海洋環境中，聲傳播損失受到水深、海底地形、水文條件等多種因素影響。現代聲傳播模型如射線理論模型、拋物方程模型等為準確預測聲傳播損失提供了有效工具[61]。

統計學方法在累積影響評估中具有重要應用價值。由於海洋環境中噪音事件的隨機性與不確定性，需要採用統計學方法分析噪音曝露的機率分佈與風險水平。蒙地卡羅模擬、貝氏統計等方法被廣泛用於噪音影響的不確定性分析與風險評估。這些統計學工具為制定基於風險的噪音管理策略提供了科學基礎[62]。

3.2.4 生態影響量測指標 Ecological Impact Measurement Indicators

生態影響量測指標體系是現代海洋噪音管理的重要組成部分，旨在建立噪音物理特性與生物影響之間的定量關係。這些指標不僅考慮噪音的物理強度，更重要的是反映噪音對海洋生物行為、生理以及生存的實際影響。隨著海洋生物聲學研究的深入發展，基於生物學機制的噪音評估指標正逐漸取代傳統的純物理指標，為海洋環境保護提供更加科學的評估工具[63]。

行為反應閾值(Behavioral Response Threshold)是評估噪音對海洋生物行為影響的重要指標。不同強度的噪音會引起海洋生物的不同行為反應，從輕微的警覺反應到嚴重的逃避行為。根據反應強度，通常將行為反應分為 A 級（輕微反應）與 B 級（顯著反應）兩個等級。A 級反應包括短暫的方向改變、表面時間縮短等；B 級反應包括長距離遊離、覓食中斷、交配行為干擾等。現代行為反應研究採用先進的生物標記技術與遙測系統，能夠即時監測動物的行為變化[64]。

聽力損傷評估指標關注噪音對海洋生物聽覺系統的直接影響。聽力損傷可分為暫時性閾值偏移(Temporary Threshold Shift, TTS)與永久性閾值偏移(Permanent Threshold Shift, PTS)兩種類型。TTS 是可恢復的聽力下降，通常在噪音暴露停止後數小時至數天內恢復正常。PTS 則是不可恢復的聽力損失，會對動物的長期生存能力造成嚴重影響。現代聽力損傷評估採用聽覺誘發電位(Auditory Evoked Potential, AEP)等客觀測量技術[65]。

生理壓力指標反映噪音對海洋生物內分泌系統與免疫系統的影響。長期的噪音暴露會導致動物體內皮質醇(Cortisol)、腎上腺素等壓力激素水平升高，進而影響其免疫功能、繁殖能力以及生長發育。現代生理壓力評估技術包括激素水平測定、免疫功能評估、心率變異性分析等多種方法。這些生理指標為評估噪音的慢性影響提供了重要工具[66]。

棲息地品質指數(Habitat Quality Index)是從生態系統角度評估噪音影響的綜合指標。該指標考慮噪音對關鍵棲息地功能的影響，包括覓食區域、繁殖區域、遷徙通道等的聲學環境品質。棲息地品質指數的計算需要整合生物分佈數據、聲景特徵以及人為噪音資訊。地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)與遙感技術為大尺度棲息地品質評估提供了有效工具[67]。

通訊遮蔽效應(Communication Masking Effect)評估噪音對動物聲通訊的干擾程度。許多海洋動物依賴聲學信號進行社會交流、配偶選擇、親子識別等重要生活行為。人為噪音的頻率如果與動物通訊信號重疊，會產生遮蔽效應，降低通訊的有效距離與品質。通訊遮蔽的定量評估需要考慮動物發聲特性、聽覺敏感性以及環境噪音的頻譜特徵。現代聲景生態學研究為通訊遮蔽評估提供了理論基礎與技術方法[68]。

族群水平影響(Population-Level Impact)指標關注噪音對動物族群數量與分佈的長期影響。個體水平的影響（如行為干擾、聽力損傷）可能累積為族群水平的影響，包括繁殖成功率下降、幼體存活率降低、族群分佈改變等。族群動力學模型為評估這種累積影響提供了定量工具。現代族群影響評估整合了個體能量預算模型、族群矩陣模型以及空間分佈模型等多種方法[69]。

3.3 麥克風陣列與定位 Array Systems and Localization

水聽器陣列系統是現代水下聲學監測的核心技術，通過多個空間分佈的感測器協同工作，實現對聲場的多維度分析與聲源的精確定位。相較於單一水聽器系統，陣列系統具有更高的空間解析度、更強的抗干擾能力以及更豐富的信號處理功能。隨著數位訊號處理技術與多通道資料獲取系統的發展，水聽器陣列技術已成為船舶噪音測試、水下目標探測以及海洋環境監測等領域不可或缺的技术工具[70]。

現代水聽器陣列系統的設計需要綜合考慮陣列幾何構型、元件數量、陣元間距以及信號處理演算法等多個因素。線性陣列是最簡單也是應用最廣泛的陣列構型，適用於一維方位角估計與波束成形應用。平面陣列能夠提供二維空間資訊，實現方位角與俯仰角的同時估計。三維立體陣列雖然結構複雜，但能夠提供完整的三維空間定位能力。陣列設計的優化目標通常包括最大化陣列增益、最小化副瓣級以及提高角度解析度等[71]。

波束成形(Beamforming)是水聽器陣列的基本信號處理技術，通過對各陣元信號進行適當的延時與加權，實現特定方向的空間濾波。常規波束成形器基於延

遲求和原理，能夠有效抑制非期望方向的干擾與噪音。自適應波束成形技術進一步提升了陣列性能，能夠自動調整權重係數以優化輸出信雜比。現代數位波束成形系統具備即時處理能力，能夠同時形成多個指向不同方向的波束[72]。

3.3.1 線性與平面陣列設計 Linear and Planar Array Design

線性陣列是水聽器陣列系統中最基礎也是應用最廣泛的構型，其設計原理基於聲波在空間中的線性傳播特性。線性陣列由沿直線等間距或非等間距排列的多個水聽器組成，能夠實現一維空間的波束成形與方位估計。線性陣列的主要優勢包括結構簡單、易於佈放、處理演算法成熟等，廣泛應用於拖曳陣列聲納、海底觀測網以及船舶噪音測試等領域[73]。

線性陣列的基本參數包括陣元數量、陣元間距以及陣列孔徑等。陣元數量直接影響陣列增益與角度解析度，理論上陣元數量越多，性能越好，但同時也增加了系統複雜度與成本。陣元間距的選擇需要平衡角度解析度與空間混疊效應，根據空間採樣定理，陣元間距應小於半波長以避免空間混疊。對於寬頻信號，通常以最高工作頻率對應的波長作為設計基準。陣列孔徑決定了主瓣寬度與角度解析度，較大的孔徑能夠提供更高的角度解析度[74]。

等間距線性陣列是最常見的設計方案，具有規律的陣列響應特性與簡潔的數學表達式。等間距陣列的陣列因子為 $AF(\theta) = \frac{\sin(N\psi/2)}{N \cdot \sin(\psi/2)}$ ，其中 N 為陣元數量， $\psi = kd \cdot \cos\theta$ ， k 為波數， d 為陣元間距， θ 為入射角。該陣列因子的主瓣寬度為 $2.78\lambda/L$ ，其中 L 為陣列總長度。等間距陣列的副瓣級約為 -13.3 dB，對於某些高性能應用可能不夠理想[75]。

非等間距陣列設計通過優化陣元位置分佈來改善陣列的方向圖特性。常見的非等間距陣列包括泰勒陣列、切比雪夫陣列以及稀疏陣列等。泰勒陣列能夠在保持較窄主瓣的同時有效抑制副瓣級，適用於高精度方向估計應用。切比雪夫陣列具有等副瓣特性，能夠實現指定副瓣級的設計要求。稀疏陣列通過減少陣元數量來降低系統成本，但需要採用特殊的信號處理技術來解決模糊問題[76]。

平面陣列將水聽器分佈在二維平面上，能夠提供方位角與俯仰角的二維角度估計能力。常見的平面陣列構型包括矩形陣列、圓形陣列、十字形陣列以及 L 型陣列等。矩形陣列結構規整，易於分析與實現，但在對角線方向的性能較差。圓形陣列具有全向對稱的特性，適用於需要全方向覆蓋的應用。十字形陣列與 L 型陣列結構簡單，成本較低，但只能提供有限的二維資訊[77]。

平面陣列的波束成形可以分別在兩個維度進行，也可以採用二維聯合處理。

分離處理方法計算複雜度較低，但性能有所損失。二維聯合波束成形能夠充分利用陣列的空間資訊，獲得更好的性能，但計算複雜度較高。現代數位信號處理技術使得即時二維波束成形成為可能，為高性能平面陣列應用提供了技術基礎[78]。

陣列校準是確保陣列系統性能的關鍵技術環節。由於製造公差、安裝誤差以及環境因素的影響，實際陣列與理想設計之間往往存在差異。陣列校準的內容包括陣元位置校準、幅度校準以及相位校準等。現代陣列校準技術採用已知方向的校準信號源，通過最小化測量響應與理論響應之間的誤差來估計陣列參數。自校準技術則利用環境中的機會信號實現陣列校準，不需要專用的校準設備[79]。

3.3.2 波束成形與空間濾波 Beamforming and Spatial Filtering

波束成形技術是水聽器陣列信號處理的核心，通過對各陣元接收信號進行適當的延時與加權處理，實現空間選擇性接收與干擾抑制。波束成形的基本原理類似於光學中的透鏡聚焦，能夠將陣列的接收能力集中到特定的空間方向，同時抑制來自其他方向信號與噪音。現代數位波束成形技術具有靈活的波束控制能力與優異的性能指標，是先進聲納系統與聲學監測設備的關鍵技術[80]。

常規波束成形器(Conventional Beamformer)是最基本的波束成形演算法，也稱為延遲求和波束成形器。其基本原理是對各陣元信號進行適當延時以補償空間傳播時差，然後進行相位相干疊加。對於平面波入射，第 n 個陣元的延時為 $\tau_n = (\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{u}})/c$ ，其中 \mathbf{r}_n 為陣元位置向量， $\hat{\mathbf{u}}$ 為期望方向的單位向量， c 為聲速。常規波束成形器的輸出為所有陣元加權信號的總和，權重通常選擇為等權重或根據特定準則優化確定[81]。

常規波束成形器的性能可用陣列增益、主瓣寬度以及副瓣級等指標來衡量。陣列增益定義為陣列輸出信雜比與單個陣元信雜比的比值，理想情況下等於陣元數量。主瓣寬度決定了陣列的角度解析度，較窄的主瓣能夠提供更高的空間分辨能力。副瓣級影響陣列的干擾抑制能力，較低的副瓣級能夠更好地抑制來自非期望方向信號。這些性能指標之間往往存在矛盾關係，需要根據具體應用需求進行權衡[82]。

自適應波束成形技術通過自動調整陣元權重來優化陣列性能，能夠在複雜的干擾環境中獲得更好的信號增強效果。最小方差無失真響應(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)波束成形器是經典的自適應演算法，其目標是在保持期望方向增益不變的約束下，最小化輸出功率。MVDR 波束成形器能夠自動抑制干擾與噪音，顯著提升輸出信雜比[83]。

線性約束最小方差(Linearly Constrained Minimum Variance, LCMV)波束成形器進一步擴展了自適應波束成形的概念，允許施加多個線性約束條件。除了期望方向的增益約束外，還可以在已知干擾方向設置零陷約束，或在某些方向範圍內保持響應特性。LCMV 波束成形器提供了更大的設計靈活性，能夠適應更複雜的應用需求。現代自適應波束成形演算法還包括特徵空間方法、子空間投影方法等先進技術[84]。

寬頻波束成形是處理寬頻信號的專用技術，需要考慮不同頻率成分的空間特性差異。時域寬頻波束成形通過對每個陣元設計有限脈衝響應(Finite Impulse Response, FIR)濾波器來實現頻率相關的權重控制。頻域寬頻波束成形則在每個頻率點分別進行窄頻波束成形，然後進行頻域合成。現代寬頻波束成形技術能夠在寬頻範圍內保持穩定的波束特性，適用於聲納、語音增強等應用[85]。

空間濾波是波束成形技術的理論基礎，將陣列處理問題視為空間域的濾波過程。空間濾波器的設計目標是通過控制空間頻率響應來實現期望的空間選擇特性。空間頻率定義為 $k_x = (2\pi/\lambda)\sin\theta$ ，其中 θ 為入射角度。通過類比時域濾波器設計方法，可以設計各種類型的空間濾波器，如空間低通、高通、帶通濾波器等。這種理論框架為陣列處理提供了系統性的分析與設計方法[86]。

3.3.3 聲源定位演算法 Source Localization Algorithms

聲源定位是水聽器陣列系統的核心功能之一，通過分析多個空間分佈的感測器接收到的聲學信號，推導出聲源的空間位置資訊。現代聲源定位技術已發展出多種不同的演算法類別，包括基於到達時間差(Time Difference of Arrival, TDOA)的方法、基於到達方向(Direction of Arrival, DOA)的方法、以及基於聲場匹配的方法等。這些技術在海洋科學研究、水下目標探測以及噪音源識別等領域發揮著重要作用[87]。

到達時間差定位是最經典的聲源定位方法，基於聲波從源到不同接收器的傳播時間差異來推導源位置。對於二維定位，至少需要三個非共線的接收器；對於三維定位，至少需要四個非共面的接收器。TDOA 定位的數學模型為非線性方程組，通常採用最小平方法、牛頓迭代法或遺傳演算法等優化方法求解。定位精度主要受到時間測量精度、幾何配置以及聲速不確定性等因素影響[88]。

廣義互相關(Generalized Cross-Correlation, GCC)是實現高精度時差估計的重要技術。GCC 演算法通過對互相關函數進行頻域加權來提高時差估計的精度與可靠性。相位轉換(Phase Transform, PHAT)加權是最常用的 GCC 方法，能夠有

效抑制混響與噪音的影響。現代 GCC 演算法還包括最大似然(Maximum Likelihood)加權、平滑相干轉換(Smoothed Coherence Transform)加權等多種改進方案，進一步提升了複雜環境下的時差估計性能[89]。

到達方向估計技術通過分析陣列接收信號的空間特性來確定聲波的人射方向。經典的 DOA 估計方法包括波束掃描法、Capon 方法以及多信號分類(Multiple Signal Classification, MUSIC)演算法等。波束掃描法通過在不同方向形成波束並尋找功率峰值來估計 DOA，實現簡單但解析度有限。Capon 方法基於自適應波束成形原理，能夠提供更高的角度解析度。MUSIC 演算法利用信號子空間與噪音子空間的正交性，理論上能夠實現超解析度的 DOA 估計[90]。

子空間方法是現代高解析度 DOA 估計的重要技術類別。除 MUSIC 演算法外，還包括估計信號參數的旋轉不變性技術(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)、最小範數(Minimum Norm)演算法等。這些方法的共同特點是利用接收數據協方差矩陣的特徵分解，將觀測空間分解為信號子空間與噪音子空間，從而實現高精度的參數估計。子空間方法在理論上具有優異的性能，但對陣列校準誤差與模型失配比較敏感[91]。

最大似然估計(Maximum Likelihood Estimation, MLE)提供了統計最優的參數估計框架。MLE 方法通過建立觀測數據的似然函數並尋找使似然函數最大的參數值來實現參數估計。對於高斯噪音環境下的 DOA 估計，MLE 等效於加權最小平方準則。雖然 MLE 在理論上具有最優性，但其計算複雜度較高，需要進行多維非線性優化。現代 MLE 實現通常採用期望最大化(Expectation-Maximization)演算法或粒子群優化等智慧優化方法[92]。

貝氏估計方法將先驗知識納入參數估計過程，特別適用於存在先驗資訊的定位場景。貝氏方法通過先驗分佈描述參數的初始不確定性，利用觀測數據更新後驗分佈，從而獲得參數的貝氏估計。這種方法在數據量有限或信雜比較低的情況下往往能夠獲得更好的性能。馬可夫鏈蒙地卡羅(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)方法為複雜貝氏估計問題的求解提供了強有力的計算工具[93]。

匹配場處理(Matched Field Processing, MFP)是針對複雜海洋環境開發的先進定位技術。MFP 方法利用海洋聲學傳播模型預測不同位置聲源在接收陣列上產生的聲場特徵，通過匹配實測聲場與預測聲場來確定聲源位置。這種方法能夠充分利用海洋環境的多徑傳播特性，在某些條件下可以實現單個垂直陣列的三維定位。現代 MFP 技術包括自適應匹配場處理、寬頻匹配場處理等多種改進方案

[94]。

3.3.4 多目標追蹤與識別 Multi-Target Tracking and Identification

多目標追蹤技術是現代水下監測系統的高級功能，能夠在複雜的多目標環境中同時追蹤多個聲源的運動軌跡並進行目標分類識別。這項技術對於海上交通監控、海洋生物行為研究以及水下安全監測等應用具有重要價值。現代多目標追蹤系統整合了先進的信號處理、模式識別以及人工智慧技術，能夠在高噪音、多干擾的海洋環境中實現可靠的目標追蹤與識別[95]。

多目標追蹤的核心挑戰在於數據關聯問題，即如何將觀測到的目標檢測結果與已建立的目標軌跡進行正確匹配。在多目標環境中，檢測結果可能來自不同的目標，也可能包含虛警信息，需要通過智慧演算法解決這種不確定性。經典的數據關聯方法包括最近鄰(Nearest Neighbor)演算法、聯合概率數據關聯(Joint Probabilistic Data Association, JPDA)演算法以及多假設追蹤(Multiple Hypothesis Tracking, MHT)演算法等[96]。

卡爾曼濾波(Kalman Filter)及其擴展是多目標追蹤中廣泛應用的狀態估計技術。標準卡爾曼濾波適用於線性系統與高斯噪音環境，通過預測與修正兩個步驟實現目標狀態的最優估計。擴展卡爾曼濾波(Extended Kalman Filter, EKF)將線性化技術引入非線性系統，適用於複雜的目標運動模型。無跡卡爾曼濾波(Unscented Kalman Filter, UKF)通過確定性採樣技術更好地處理非線性問題，通常能夠獲得比 EKF 更高的估計精度[97]。

粒子濾波(Particle Filter)是處理非高斯、非線性追蹤問題的強大工具。粒子濾波採用蒙地卡羅方法，通過大量隨機樣本（粒子）來近似目標狀態的後驗概率分布。這種方法能夠處理任意形式的狀態方程與觀測方程，特別適用於複雜的海洋環境追蹤問題。現代粒子濾波演算法包括輔助粒子濾波、正則化粒子濾波等多種改進方案，有效解決了粒子退化與樣本貧化等問題[98]。

機率假設密度(Probability Hypothesis Density, PHD)濾波是專門針對未知且時變目標數量場景開發的追蹤技術。PHD 濾波器通過傳播目標的概率假設密度函數來實現多目標追蹤，避免了傳統方法中複雜的數據關聯問題。基於高斯混合(Gaussian Mixture)的 PHD 實現和基於粒子的 PHD 實現為不同類型的追蹤問題提供了有效解決方案。隨機有限集(Random Finite Set)理論為多目標追蹤提供了嚴格的數學框架[99]。

目標分類與識別技術通過分析目標的聲學特徵實現不同類型目標的自動識

別。船舶分類通常基於螺旋槳葉片數、轉速、機械噪音特徵等參數。海洋生物識別則依賴於生物聲學信號的頻率、時長、重複模式等特徵。現代目標識別技術廣泛採用機器學習方法，包括支持向量機(Support Vector Machine, SVM)、隨機森林(Random Forest)、神經網路等演算法[100]。

深度學習技術在水下目標識別領域展現出巨大潛力。卷積神經網路(Convolutional Neural Network, CNN)特別適用於處理頻譜圖等二維信號表示，能夠自動學習判別性特徵。循環神經網路(Recurrent Neural Network, RNN)及其變體如長短期記憶(Long Short-Term Memory, LSTM)網路擅長處理序列信息，適用於時間序列信號的分析。注意力機制與變換器(Transformer)架構的引入進一步提升了深度學習模型的性能[101]。

多感測器融合技術通過整合來自不同感測器的信息來提升追蹤與識別的可靠性。除了聲學信號外，現代監測系統還可能包含雷達、光電、磁力等多種感測器。信息融合可以在不同層次進行，包括數據級融合、特徵級融合以及決策級融合。貝氏網路、德姆斯特-謝弗理論(Dempster-Shafer Theory)等不確定性推理方法為多感測器融合提供了理論基礎[102]。

3.4 長期監測與自動化系統 Long-Term and Automated Monitoring

長期監測與自動化系統是現代海洋噪音管理的重要技術基礎，通過無人值守的連續監測設備實現對海洋聲學環境的長期觀測與數據收集。這些系統不僅能夠提供海洋環境噪音的基線數據，還能夠即時監測人為活動對海洋聲景的影響，為環境保護決策提供科學依據。隨著能源技術、通訊技術以及自動化控制技術的不斷發展，現代長期監測系統已具備數月甚至數年的自主工作能力[103]。

被動聲學監測(PAM)技術是長期海洋聲學監測的核心技術，通過部署在海洋環境中的自主聲學記錄設備實現對海洋聲景的連續監測。現代 PAM 系統具備高品質的聲學記錄能力、大容量的數據存儲功能以及智慧化的數據處理演算法。這些系統能夠在無人干預的情況下長期穩定工作，自動識別和記錄各種聲學事件，為海洋生物學研究、環境影響評估以及噪音管制執法提供寶貴的數據資源[104]。

現代長期監測系統的設計需要綜合考慮多個技術要素：感測器性能決定了系統的檢測能力與測量精度；能源管理系統決定了部署持續時間；數據存儲與處理能力決定了系統的信息容量；通訊系統決定了數據傳輸與遠端控制能力；機械設計決定了系統在海洋環境中的可靠性與穩定性。這些要素之間相互影響，需要進行系統性的優化設計[105]。

3.4.1 被動聲學監測設備 Passive Acoustic Monitoring Equipment

被動聲學監測設備是實現長期海洋聲學觀測的核心硬體平台，這些設備通過先進的聲學感測技術、低功耗電子設計以及堅固的機械結構，能夠在嚴苛的海洋環境中長期可靠工作。現代 PAM 設備已發展出多種不同的產品類型，從小型的近岸監測設備到大型的深海觀測平台，能夠滿足不同應用場景的監測需求。這些設備的技術發展趨勢是朝向更高的集成度、更低的功耗以及更強的智慧化處理能力[106]。

SoundTrap 系列是 Ocean Instruments 公司開發的廣泛應用的 PAM 設備，具有緊湊的體積與優異的性能。SoundTrap 設備採用全數位化設計，內建高性能 ADC、DSP 處理器以及大容量存儲器。不同型號的 SoundTrap 設備針對不同的應用需求進行了優化：ST300 系列適用於一般海洋監測應用，頻率範圍覆蓋 20 Hz 至 60 kHz；ST4300 系列專為高頻應用設計，頻率範圍可達 200 kHz 以上，適用於海豚、鼠海豚等高頻發聲動物的監測[107]。

AMAR(Autonomous Multi-channel Acoustic Recorder)系統由 JASCO Applied Sciences 開發，是專業級的多通道聲學記錄設備。AMAR 系統最多可支援 4 個獨立的聲學通道，每個通道都配備獨立的水聽器與信號調理電路。系統採用模組化設計，可根據具體需求配置不同類型的水聽器與前置放大器。AMAR 系統的工作頻率範圍從次聲頻(低於 1 Hz)到超音波頻段(高於 100 kHz)，能夠監測從地震波到海豚回聲定位信號的各種聲學現象[108]。

HARP(High-frequency Acoustic Recording Package)是美國斯克里普斯海洋研究所開發的專用高頻聲學監測設備。HARP 系統專門設計用於監測海洋哺乳動物的高頻發聲行為，採樣頻率可達 320 kHz，能夠記錄齒鯨類動物的回聲定位信號與社交聲音。系統採用低功耗設計，可連續工作數個月。HARP 系統還配備了專用的數據分析軟體，能夠自動檢測和分類海洋哺乳動物的聲音[109]。

HydroMoth 是 Open Acoustic Devices 開發的低成本 PAM 設備，基於開源硬體設計理念，為資源有限的研究機構提供了經濟實用的監測解決方案。HydroMoth 採用 ARM Cortex-M4 處理器，具備浮點運算能力，能夠執行即時的數位信號處理演算法。設備支援可編程的錄音排程，用戶可以根據研究需要定制錄音時間表。雖然成本較低，但 HydroMoth 的性能已能夠滿足多數海洋聲學研究的需求[110]。

現代 PAM 設備普遍採用智慧化的觸發錄音機制來優化存儲空間的利用效

率。傳統的連續錄音方式雖然能夠捕捉所有聲學事件，但會產生大量的數據，增加存儲與處理成本。智慧觸發系統通過即時分析聲學信號的特徵，只在檢測到感興趣的聲學事件時才開始錄音。觸發條件可以基於信號能量、頻率特徵、時間模式等多種參數設定。這種方式能夠將數據量減少 90%以上，大幅延長監測持續時間[111]。

抗生物附著技術是 PAM 設備在海洋環境長期部署的關鍵技術。海洋生物附著會影響水聽器的聲學性能，導致靈敏度下降與頻率響應變化。現代 PAM 設備採用多種抗附著策略：銅合金材料具有天然的抗菌性能；抗附著塗層如有機矽塗層能夠減少生物附著；主動清潔系統如超音波清潔、機械擦拭等能夠定期清除附著物。這些技術的綜合應用確保了設備在長期部署過程中保持穩定的性能[112]。

3.4.2 能源管理與部署策略 Power Management and Deployment Strategies

能源管理是決定 PAM 系統部署持續時間的關鍵因素，先進的能源管理技術能夠在保證系統性能的前提下最大化部署週期。現代 PAM 系統採用多層次的能源管理策略，從硬體層面的低功耗設計到軟體層面的智慧化電源管理，全面優化系統的能源效率。隨著電池技術、能量收集技術以及功率管理技術的不斷發展，現代 PAM 系統已能夠實現數年的自主工作能力[113]。

電池技術是 PAM 系統的核心能源解決方案。鋰電池因其高能量密度與良好的溫度特性而成為首選。不同類型的鋰電池適用於不同的應用場景：鋰金屬電池具有最高的能量密度，適用於長期部署應用；鋰離子電池支援重複充放電，適用於可回收的監測設備；鋰鐵磷酸電池具有優異的安全性能，適用於惡劣環境部署。現代 PAM 系統通常採用電池組設計，通過並聯或串聯組合來滿足不同的電壓與容量需求[114]。

動態功率管理是延長系統工作時間的重要技術。PAM 系統通常採用分級的工作模式：睡眠模式下系統功耗最低，只維持基本的時鐘與喚醒功能；監聽模式下系統進行低功耗的信號監測，檢測感興趣的聲學事件；錄音模式下系統全功率工作，進行高品質的聲學記錄與處理。通過智慧化的模式切換演算法，系統能夠根據環境狀況自動調整工作模式，在保證監測效果的前提下最小化功耗[115]。

時間排程是 PAM 系統常用的能源管理策略，通過設定間歇性的工作時間表來降低平均功耗。典型的排程模式包括固定週期錄音（如每小時錄音 10 分鐘）、隨機抽樣錄音以及基於環境條件的自適應排程。時間排程的設計需要考慮監測目標的行為模式、聲學活動的時變特性以及統計分析的需求。合理的排程設計能夠

在保證統計顯著性的前提下將功耗降低至連續監測的 10-20%[116]。

可再生能源技術為 PAM 系統提供了永續的能源解決方案。太陽能發電是最成熟的可再生能源技術，適用於水面或近水面部署的監測設備。現代太陽能板具有較高的光電轉換效率與良好的環境適應性。波浪能發電利用海洋波浪的機械能進行發電，特別適合海洋環境應用。溫差發電利用海水溫度梯度進行發電，雖然功率密度較低，但能夠連續工作。這些可再生能源技術的應用使得 PAM 系統能夠實現真正的長期自主監測[117]。

部署策略的選擇需要綜合考慮監測目標、環境條件以及技術約束等多種因素。表面浮標部署具有維護便利、通訊方便的優點，但容易受到海況影響，可能對船舶航行造成干擾。海底部署具有穩定性好、干擾少的優點，但維護困難，數據回收週期長。中層錨泊部署介於兩者之間，能夠避免表面波浪干擾，同時保持相對的穩定性。現代部署系統通常採用智慧化的回收機制，通過聲學指令或定時釋放裝置實現設備的自動回收[118]。

部署位置的選擇需要考慮代表性、可達性以及安全性等因素。代表性要求部署位置能夠反映目標區域的典型聲學環境特徵，避免局部異常現象的干擾。可達性涉及部署與回收的便利性，需要考慮海況、水深以及後勤支援條件。安全性包括設備安全與航行安全兩個方面，需要避免與漁業活動、航運活動的衝突。現代部署規劃通常利用海洋環境數據、歷史監測結果以及數值模擬方法來優化部署位置的選擇[119]。

3.4.3 即時數據傳輸與遠端控制 Real-time Data Transmission and Remote Control

即時數據傳輸技術使 PAM 系統能夠將監測數據即時傳送到陸基控制中心，實現對海洋聲學環境的即時監控與快速反應。這項技術對於海洋環境預警、生物保護區管理以及噪音污染監管等應用具有重要意義。現代即時傳輸系統整合了多種通訊技術，包括衛星通訊、行動通訊以及水下聲學通訊等，能夠在不同的部署場景下實現可靠的數據傳輸[120]。

衛星通訊是海洋環境中最可靠的遠距離通訊手段，不受地理限制，覆蓋範圍廣。現代衛星通訊系統包括地球靜止軌道(Geostationary Earth Orbit, GEO)衛星、中軌道(Medium Earth Orbit, MEO)衛星以及低軌道(Low Earth Orbit, LEO)衛星等不同類型。鉅星(Iridium)系統是 PAM 應用中廣泛使用的 LEO 衛星通訊系統，具有全球覆蓋能力與相對較低的通訊成本。新興的小衛星座如 Starlink 也為海洋

通訊提供了新的選擇[121]。

行動通訊技術在近岸海域 PAM 應用中具有成本優勢。4G LTE 網路已能夠提供可靠的數據傳輸服務，支援高速率的多媒體數據傳輸。5G 技術的引入進一步提升了傳輸速率與系統容量，為大數據量的聲學監測應用提供了更好的支援。然而，行動通訊的覆蓋範圍有限，通常只能在距離海岸數十公里的範圍內提供服務。未來的海上 5G 基站部署可能會擴展行動通訊在海洋應用中的覆蓋範圍[122]。

水下聲學通訊為完全沒入式 PAM 系統提供了數據傳輸能力。水聲通訊利用聲波在水中的良好傳播特性實現數據傳輸，不需要物理電纜連接。現代水聲通訊系統採用先進的調製解調技術與信道編碼技術，能夠在複雜的水聲信道中實現可靠的數據傳輸。雖然水聲通訊的傳輸速率相對較低，但對於傳輸壓縮的監測數據已經足夠。正交頻分多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技術的應用顯著提升了水聲通訊的性能[123]。

數據壓縮技術是即時傳輸系統的關鍵組成部分，通過減少數據量來降低傳輸成本與時間。無失真壓縮演算法如 FLAC、ALAC 等能夠在不損失精度的前提下實現 2-4 倍的壓縮比，適用於高品質的科學監測應用。有失真壓縮演算法如 MP3、AAC 等能夠實現 10 倍以上的壓縮比，適用於一般監測應用。智慧壓縮技術能夠根據信號特徵自適應選擇壓縮參數，在保證關鍵信息的前提下最大化壓縮效率[124]。

邊緣計算技術使 PAM 系統能夠在設備端進行智慧化的數據處理與特徵提取，只傳輸處理後的結果而非原始數據。這種方法能夠大幅減少傳輸數據量，降低通訊成本。現代邊緣計算系統採用 ARM 處理器、FPGA 或專用 AI 晶片，具備執行複雜機器學習演算法的能力。典型的邊緣處理功能包括事件檢測、物種識別、噪音級計算等。處理結果以結構化數據的形式傳輸，數據量通常只有原始音頻的千分之一[125]。

遠端控制功能使操作人員能夠通過通訊鏈路對 PAM 系統進行遠端配置與管理。現代 PAM 系統支援遠端參數設置、工作模式切換、韌體升級等功能。雙向通訊協定確保了指令的可靠傳送與執行確認。安全認證機制防止未授權的遠端存取。遠端診斷功能能夠監控設備狀態，包括電池電壓、存儲空間、系統溫度等關鍵參數，為維護決策提供依據[126]。

3.4.4 數據管理與品質控制 Data Management and Quality Control

數據管理與品質控制是 PAM 系統的重要技術環節，確保監測數據的完整

性、準確性與可追溯性。現代 PAM 系統產生的數據量龐大，需要建立系統化的數據管理流程來處理數據的存儲、組織、標註以及共享等各個環節。完善的品質控制體系能夠及時發現與糾正數據品質問題，確保監測結果的科學性與可靠性 [127]。

元數據(Metadata)管理是 PAM 數據管理的基礎工作，通過標準化的元數據記錄來描述每個數據檔案的基本資訊。元數據通常包括時間資訊(錄音開始時間、持續時間等)、空間資訊(部署位置、水深等)、設備資訊(設備型號、校準參數等)、環境資訊(海況、溫度等)以及處理資訊(處理演算法、參數設置等)。標準化的元數據格式如 Dublin Core、Darwin Core 等為不同系統間的數據交換提供了基礎[128]。

數據完整性檢查是品質控制的第一步，通過自動化的檢查程序識別數據檔案的完整性問題。常見的完整性問題包括檔案損壞、數據缺失、時間戳錯誤等。雜湊值校驗(如 MD5、SHA-256)能夠檢測檔案在傳輸或存儲過程中的損壞。時間連續性檢查能夠發現錄音時間的間斷與重疊。檔案格式驗證確保數據檔案符合預期的格式規範。這些自動化檢查程序能夠快速處理大量數據，提高品質控制的效率[129]。

信號品質評估技術通過分析聲學信號的特徵來評估錄音品質。常見的品質指標包括信雜比、動態範圍、頻率響應以及失真度等。自動化的品質評估演算法能夠檢測常見的品質問題，如削波失真、電氣干擾、機械噪音等。機器學習方法能夠學習高品質錄音的特徵模式，自動識別品質異常的錄音。品質評估結果作為元數據的一部分記錄，為後續的數據分析提供參考[130]。

數據標註與分類是 PAM 數據管理的重要環節，通過人工或自動化方法對聲學事件進行識別與分類。人工標註雖然準確性高，但效率有限，主要用於建立訓練數據集與品質檢查。自動化標註系統採用機器學習演算法，能夠快速處理大量數據。半自動化標註結合了人工與自動化的優勢，通過人機互動提高標註效率與準確性。標準化的標註格式如 Raven Selection Table、PAMGUARD Binary Format 等促進了不同系統間的數據共享[131]。

數據庫設計需要考慮 PAM 數據的特殊性質，包括數據量大、檔案格式多樣、查詢需求複雜等特點。關聯式數據庫適用於結構化的元數據管理，支援複雜的查詢與統計分析。檔案系統數據庫適用於大檔案的存儲與管理，提供高效的檔案存取性能。NoSQL 數據庫適用於處理非結構化的標註數據與分析結果。現代 PAM

數據管理系統通常採用混合架構，結合不同類型數據庫的優勢[132]。

數據標準化與互操作性是促進 PAM 數據共享與科學合作的重要技術基礎。國際標準如 ISO 18405、ANSI S12.64 等為 PAM 數據的格式與品質提供了統一規範。開放數據格式如 HDF5、NetCDF 等支援跨平台的數據交換。API(Application Programming Interface)設計使不同系統能夠自動存取與交換 PAM 數據。FAIR(Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)數據原則為 PAM 數據管理提供了指導框架[133]。

3.5 數據分析與信號處理 Data Analysis and Signal Processing

數據分析與信號處理是水下噪音監測系統的智慧核心，負責將原始聲學數據轉化為有意義的環境資訊與科學知識。現代 PAM 系統產生的數據量龐大且複雜，需要採用先進的數位訊號處理技術、統計分析方法以及機器學習演算法來實現高效準確的數據分析。這些技術不僅能夠自動識別與分類聲學事件，還能夠揭示海洋聲景的時空變化模式，為海洋環境管理與生物保護提供科學依據[134]。

現代聲學數據分析技術已發展出多個專業領域：時頻分析技術揭示信號的時變頻譜特性；模式識別技術實現聲學事件的自動分類；統計分析方法探索數據中的規律與趨勢；機器學習演算法提供智慧化的分析能力。這些技術的有機結合形成了完整的 PAM 數據分析工具鏈，能夠處理從短時衝擊事件到長期環境變化的各種分析需求[135]。

MATLAB、Python、R 等數值計算平台為 PAM 數據分析提供了強大的軟體支援。這些平台不僅提供豐富的內建函數庫，還支援用戶開發專用的分析工具。開源軟體如 PAMGuard、Raven Pro、CHORUS 等專門針對生物聲學分析進行了優化，提供友好的使用者介面與專業的分析功能。雲端計算平台的應用使得大規模數據的並行處理成為可能，顯著提升了分析效率[136]。

3.5.1 時頻分析與頻譜處理 Time-Frequency Analysis and Spectral Processing

時頻分析是水下聲學信號處理的基礎技術，通過同時分析信號在時間與頻率兩個維度的特徵，能夠揭示非穩態信號的動態頻譜變化規律。相較於傳統的時域分析或頻域分析，時頻分析提供了更加全面的信號特徵描述，特別適用於分析海洋生物發聲、船舶通過事件以及其他瞬態聲學現象。現代時頻分析技術已發展出多種不同的方法，每種方法都有其特定的優勢與適用場景[137]。

短時傅立葉轉換(STFT)是最經典的時頻分析方法，通過滑動視窗對信號進行分段 FFT 處理，獲得時間序列的頻譜演化資訊。STFT 的時頻解析度受到不確

定性原理的限制，視窗長度的選擇需要在時間解析度與頻率解析度之間進行權衡。短視窗提供高時間解析度但頻率解析度較差，適用於快變信號分析；長視窗提供高頻率解析度但時間解析度較差，適用於頻譜精細分析。現代 STFT 實現通常採用重疊視窗技術來提高時間取樣密度[138]。

小波轉換克服了 STFT 固定時頻解析度的限制，能夠根據信號特徵自適應調整時頻解析度。小波轉換在低頻段提供高頻率解析度，在高頻段提供高時間解析度，這種特性與許多自然信號的特徵相吻合。連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform, CWT)提供冗餘的時頻表示，適用於信號特徵分析；離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform, DWT)提供緊湊的表示，適用於信號壓縮與去噪。小波基函數的選擇對分析結果具有重要影響，需要根據信號特性進行優化選擇[139]。

維格納分佈(Wigner Distribution)是基於信號自相關函數的時頻分析方法，能夠提供高解析度的時頻表示。維格納分佈的主要優點是不受不確定性原理的限制，理論上能夠提供任意高的時頻解析度。然而，維格納分佈存在交叉項干擾問題，對於多分量信號會產生虛假的時頻特徵。偽維格納分佈、平滑偽維格納分佈等改進方法通過引入平滑視窗來抑制交叉項，在解析度與干擾抑制之間尋求平衡[140]。

現代時頻分析技術還包括自適應時頻分析方法，如經驗模態分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、希爾伯特-黃轉換(Hilbert-Huang Transform, HHT)等。EMD 能夠根據信號自身特徵自適應地分解出不同時間尺度的固有模態函數，避免了預設基函數的限制。HHT 結合 EMD 與希爾伯特轉換，能夠獲得瞬時頻率與瞬時振幅資訊。這些自適應方法特別適用於分析複雜的非線性、非穩態信號[141]。

頻譜估計技術為隨機信號的頻域分析提供了統計學基礎。週期圖法是最基本的功率譜估計方法，但對於有限長度的數據存在較大的方差。韋爾奇方法通過數據分段與重疊平均有效降低了譜估計的方差，但會犧牲頻率解析度。多視窗方法(Multi-taper Method)採用多組正交視窗進行譜估計，能夠在偏差與方差之間達到較好的平衡。自回歸(AR)模型等參數化方法能夠在短數據長度條件下提供較好的頻率解析度[142]。

頻譜特徵提取是將頻譜資訊轉化為可用於模式識別的特徵參數的重要技術。常用的頻譜特徵包括峰值頻率、頻譜中心、頻譜寬度、頻譜斜度等統計特徵。梅爾頻率倒譜係數(Mel-frequency Cepstral Coefficients, MFCC)是語音識別領域廣泛

使用的特徵參數，也被成功應用於海洋生物聲學識別。線性預測倒譜係數(Linear Predictive Cepstral Coefficients, LPCC)能夠描述頻譜的細部結構。這些特徵參數為後續的自動分類提供了有效的輸入[143]。

3.5.2 自動檢測與分類演算法 Automatic Detection and Classification Algorithms

自動檢測與分類演算法是 PAM 系統智慧化處理的核心技術，能夠從連續的聲學記錄中自動識別與分類各種聲學事件。這些演算法不僅能夠大幅提升數據處理效率，還能夠發現人工分析難以察覺的微弱信號與複雜模式。現代自動檢測與分類技術整合了數位信號處理、模式識別以及機器學習的最新成果，已在海洋生物監測、船舶噪音識別以及環境評估等領域獲得廣泛應用[144]。

能量檢測是最基本的自動檢測方法，通過監測信號能量的變化來識別聲學事件。簡單的能量檢測器通過設定門檻值來判斷信號的存在與否，當信號能量超過門檻值時觸發檢測。為了提高檢測性能，現代能量檢測器採用自適應門檻設定、背景噪音估計以及多頻段處理等技術。恆虛警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)檢測器能夠在變化的噪音環境中保持穩定的虛警率，廣泛應用於雷達與聲納系統中[145]。

匹配濾波器檢測基於已知信號模板的相關處理，能夠檢測特定模式的聲學事件。對於已知波形的信號（如某些海洋生物的典型叫聲），匹配濾波器能夠提供最優的檢測性能。然而，實際的生物聲學信號往往具有個體差異與環境變化，需要採用模板庫或自適應模板更新技術。歸一化相關、相位相關等改進方法能夠提高匹配濾波器對信號變化的魯棒性[146]。

特徵檢測方法通過提取信號的特徵參數進行事件檢測，相較於波形匹配具有更好的泛化能力。頻域特徵如峰值頻率、頻寬、頻譜形狀等能夠描述信號的頻率特性；時域特徵如持續時間、上升時間、包絡形狀等能夠描述信號的時間特性；時頻特徵如頻率調制率、谐波結構等能夠描述信號的動態特性。多特徵融合技術通過組合不同類型的特徵來提高檢測的準確性與魯棒性[147]。

機器學習方法為自動檢測與分類提供了強大的工具。支持向量機(SVM)通過尋找最優分離超平面來實現分類，具有良好的泛化能力與理論基礎。隨機森林(Random Forest)通過組合多個決策樹來提高分類準確性與魯棒性。k 近鄰(k-Nearest Neighbors, k-NN)方法基於相似性原理進行分類，實現簡單且對數據分佈假設較少。這些傳統機器學習方法在特徵工程完善的前提下能夠獲得良好的性能[148]。

深度學習技術在近年來展現出強大的自動特徵學習與模式識別能力。卷積神經網路(CNN)特別適用於處理頻譜圖等二維信號表示，能夠自動學習層次化的特徵表示。循環神經網路(RNN)及其變體如長短期記憶(LSTM)網路、門控循環單元(Gated Recurrent Unit, GRU)擅長處理序列資訊，適用於時間序列信號的分析。注意力機制能夠自動聚焦於信號中的關鍵部分，提高模型的解釋性與性能[149]。

集成學習方法通過組合多個基分類器來提高整體性能，特別適用於複雜的多類別分類問題。投票法、加權平均等簡單集成方法易於實現且通常能夠改善性能。Boosting 方法如 AdaBoost、Gradient Boosting 通過迭代訓練弱分類器並調整樣本權重來構建強分類器。堆疊(Stacking)方法通過訓練元學習器來組合基分類器的輸出。這些方法在處理不平衡數據、噪音數據等複雜情況下表現優異[150]。

不平衡數據處理是海洋聲學分類中的常見問題，因為某些物種的發聲事件相對稀少。數據層面的解決方案包括重採樣技術（如 SMOTE）、數據增強等；演算法層面的解決方案包括代價敏感學習、集成方法等；評估指標的改進包括使用 F1 分數、AUC 等平衡指標替代準確率。這些技術的綜合應用能夠有效改善不平衡數據環境下的分類性能[151]。

3.5.3 機器學習在聲學識別中的應用 **Machine Learning Applications in Acoustic Recognition**

機器學習技術在海洋聲學識別領域的應用已成為現代 PAM 系統的重要技術特徵，通過智慧化的演算法實現對複雜聲學模式的自動識別與分類。這些技術不僅能夠處理傳統方法難以應對的大規模數據，還能夠發現隱藏在數據中的複雜模式與規律。隨著深度學習技術的快速發展，機器學習在聲學識別中的應用正朝向更高準確性、更強魯棒性以及更好解釋性的方向發展[152]。

特徵工程是機器學習應用的基礎環節，涉及將原始聲學數據轉換為適合機器學習演算法處理的特徵向量。時域特徵包括零交叉率、能量包絡、自相關函數等，能夠描述信號的基本時間特性；頻域特徵包括功率譜、頻譜中心、頻寬等，能夠描述信號的頻率分佈；時頻特徵包括頻譜圖統計量、小波係數等，能夠描述信號的動態變化。特徵選擇與降維技術如主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、線性判別分析(Linear Discriminant Analysis, LDA)能夠去除冗餘資訊，提高學習效率[153]。

海洋生物聲學識別是機器學習在 PAM 中最重要的應用領域。不同海洋生物具有獨特的發聲特徵，如鯨魚的歌聲、海豚的回聲定位信號、魚類的求偶聲等。

機器學習演算法能夠學習這些聲學特徵的模式，實現自動的物種識別與行為分析。現代生物聲學識別系統已能夠識別數十種海洋哺乳動物，準確率超過 90%。個體識別技術甚至能夠區分同一物種內不同個體的發聲特徵[154]。

船舶噪音自動識別技術通過分析船舶的聲學特徵實現對不同類型船舶的自動分類。大型商船、小型漁船、軍艦等不同類型的船舶具有不同的聲學特徵，包括螺旋槳噪音、機械噪音以及水動力噪音等。機器學習演算法能夠從這些複雜的聲學特徵中提取判別性資訊，實現船舶類型的自動識別。這項技術在海上交通監控、漁業管理以及海域安全監測等領域具有重要應用價值[155]。

深度學習技術為聲學識別帶來了革命性的進展。卷積神經網路(CNN)通過多層卷積與池化操作能夠自動提取聲學信號的層次化特徵，避免了傳統方法中複雜的手工特徵設計。ResNet、DenseNet 等先進的 CNN 架構進一步提升了特徵提取能力。循環神經網路(RNN)能夠處理變長的時間序列數據，特別適用於分析動物複雜的發聲序列。注意力機制能夠自動定位信號中的關鍵時頻區域，提高模型的解釋性[156]。

轉換器(Transformer)架構在聲學識別中展現出巨大潛力。基於自注意力機制的 Transformer 能夠並行處理序列資訊，相較於 RNN 具有更高的訓練效率與更好的長距離依賴建模能力。預訓練模型如 BERT、GPT 等的成功為聲學領域提供了新的思路。通過在大規模無標注聲學數據上進行預訓練，然後在特定任務上進行微調，能夠顯著提升小樣本學習的效果[157]。

少樣本學習(Few-shot Learning)技術解決了稀有物種或事件識別中訓練數據不足的問題。元學習(Meta-learning)方法通過學習如何快速適應新任務，使模型能夠在僅有少量樣本的情況下實現有效學習。原型網路(Prototypical Networks)、匹配網路(Matching Networks)等方法在聲學識別中獲得了成功應用。數據增強技術通過對現有樣本進行變換生成新樣本，也是增加訓練數據的有效途徑[158]。

無監督學習與半監督學習技術利用大量未標注數據來改善識別性能。聚類演算法能夠發現聲學數據中的自然群組結構，為後續的監督學習提供初始標籤。自編碼器(Autoencoder)能夠學習數據的低維表示，提取有用的特徵。生成對抗網路(Generative Adversarial Networks, GANs)能夠生成逼真的聲學數據，用於數據增強或異常檢測。這些技術的應用大幅擴展了機器學習在聲學識別中的應用範圍[159]。

3.5.4 長期趨勢分析與環境評估 Long-term Trend Analysis and Environmental

Assessment

長期趨勢分析與環境評估是 PAM 系統的高級應用功能，通過對多年連續監測數據的統計分析，揭示海洋聲學環境的時空變化規律與長期演化趨勢。這類分析對於理解氣候變化、人類活動以及生態系統動態對海洋聲景的影響具有重要科學價值，為海洋環境管理政策的制定提供量化的科學依據。現代趨勢分析技術整合了統計學、時間序列分析以及機器學習等多種方法[160]。

時間序列分析是長期趨勢研究的核心技術，通過分析聲學參數隨時間的變化模式來識別趨勢、周期以及異常事件。趨勢分析方法包括線性回歸、非參數回歸以及變點檢測等。Mann-Kendall 檢驗是檢測單調趨勢的經典非參數方法，對數據分佈假設較少且對異常值魯棒。Sen 斜率估計能夠量化趨勢的大小。變點檢測方法如 CUSUM、PELT 等能夠識別時間序列中統計特性發生顯著變化的時間點[161]。

周期性分析揭示海洋聲景中的規律性變化模式。許多海洋生物具有明顯的日周期、季節周期或年周期活動模式，人類海事活動也表現出明顯的周期性特徵。傅立葉分析、小波分析以及經驗模態分解等方法能夠識別不同時間尺度的周期成分。譜分析方法如 Lomb-Scargle 週期圖適用於處理不等間隔的時間序列數據。這些周期性資訊對於預測聲學活動的時間模式具有重要意義[162]。

空間分析技術揭示海洋聲景的空間分佈模式與空間變化趨勢。地理資訊系統(GIS)為空間分析提供了強大的工具支援。空間插值方法如克里金(Kriging)、反距離權重法等能夠從離散的監測點數據推導出連續的空間分佈圖。空間自相關分析通過 Moran's I、Geary's C 等指標量化空間聚集模式。熱點分析識別聲學活動的集中區域。時空分析方法如時空克里金、時空聚類等能夠同時考慮時間與空間的相互作用[163]。

環境驅動因子分析探索環境變數與聲學參數之間的關係。海洋環境因子如水溫、鹽度、海流、初級生產力等都可能影響海洋生物的聲學行為。人為因子如航運密度、工業活動、漁業作業等直接影響海洋噪音水平。多元回歸分析、廣義線性模型(GLM)、廣義可加模型(GAM)等統計方法能夠量化這些關係。機器學習方法如隨機森林、梯度提升等能夠處理複雜的非線性關係與交互作用[164]。

氣候變化對海洋聲景的影響是當前研究的熱點問題。全球暖化導致海水溫度上升、海平面變化以及海洋酸化等都可能對海洋生物的聲學行為產生影響。海冰融化改變了極地海域的聲學環境。風暴模式的變化影響了自然環境噪音。通

過對比分析不同時期的聲學數據，可以量化氣候變化對海洋聲景的影響程度。這些研究為理解氣候變化的生態影響提供了新的視角[165]。

生物多樣性評估是 PAM 系統在生態學研究中的重要應用。聲學多樣性指標如聲學複雜度指數(Acoustic Complexity Index, ACI)、歸一化差異聲景指數(Normalized Difference Soundscape Index, NDSI)等能夠量化聲景的豐富程度。這些指標與傳統的生物多樣性指標（如物種豐富度、Shannon 多樣性指數等）具有良好的相關性，可作為生物多樣性的代理指標。長期的聲學多樣性監測能夠追蹤生態系統健康狀況的變化[166]。

人類活動影響評估通過量化分析人為噪音對海洋聲學環境的影響程度。船舶交通密度與海洋環境噪音水平之間存在顯著的正相關關係。海上工程活動（如打樁、爆破等）會產生高強度的脈衝噪音。軍事活動中的聲納使用也會對海洋聲學環境造成影響。通過建立人類活動資料庫與聲學監測數據的時空對應關係，可以定量評估不同人類活動的聲學影響範圍與強度[167]。

累積影響評估考慮多個人為噪音源的聯合效應。在繁忙的海域，往往同時存在多個噪音源，其累積效應可能超過單個噪音源影響的簡單加總。空間疊加分析、時間積分分析等方法能夠評估累積噪音暴露水平。風險評估框架將噪音暴露水平與生物影響閾值進行比較，評估生態風險的大小。不確定性分析考慮模型參數、測量誤差等不確定性因素對評估結果的影響[168]。

政策效果評估通過對比分析政策實施前後的聲學環境變化來評估噪音管制政策的有效性。國際海事組織的船舶噪音指導原則、各國的海洋保護區管理措施等都需要通過長期監測數據來驗證其效果。對照研究設計通過比較處理區域與對照區域的聲學環境差異來排除其他因素的干擾。時間序列干預分析方法能夠量化政策干預對聲學環境的影響大小與統計顯著性[169]。

預測模型開發基於歷史監測數據建立聲學環境的預測模型，為未來的環境管理提供科學支援。時間序列預測模型如 ARIMA、狀態空間模型等能夠預測聲學參數的短期變化。機器學習模型如支持向量回歸、神經網路等能夠處理複雜的非線性關係。集成模型通過組合多個預測模型來提高預測準確性。這些預測模型在環境影響評估、海洋空間規劃以及自適應管理等方面具有重要應用價值[170]。

數據視覺化技術為長期趨勢分析結果的展示與交流提供了有效工具。時間序列圖、空間分佈圖、熱力圖等基礎視覺化方法能夠直觀展示數據的時空模式。互動式視覺化工具允許用戶自由探索數據的不同方面。動畫視覺化能夠展示聲學

環境的時間演化過程。網頁式儀表板為決策者提供即時的环境監測資訊。這些視覺化工具大大提升了科學研究成果向政策制定者與公眾傳播的效果[171]。

機器學習在環境評估中的新應用包括異常檢測、模式挖掘以及因果推斷等。異常檢測演算法能夠自動識別聲學環境中的異常事件，如大規模生物死亡、工業事故等。模式挖掘技術能夠發現複雜的時空關聯模式。因果推斷方法通過觀測數據推斷變數間的因果關係，有助於理解環境變化的驅動機制。這些先進方法為海洋環境科學研究開闢了新的方向[172]。

水下噪音量測與監測技術的發展前景廣闊，隨著感測器技術、通訊技術、人工智慧等相關技術的不斷進步，未來的 PAM 系統將朝向更高精度、更大規模、更智慧化的方向發展。全球海洋觀測網路的建設將實現全球尺度的海洋聲學環境監測。人工智慧技術的深度應用將大幅提升自動分析能力。新興感測技術如量子感測器的成熟將帶來測量精度的革命性提升。這些技術發展將為海洋環境保護、可持續發展以及氣候變化研究提供更強有力的技術支撐。

綜合而言，第 3 章系統性地介紹了水下噪音量測與監測的核心技術體系，從基礎的感測器原理到先進的數據分析方法，為讀者提供了全面的技術知識架構。這些技術的發展與應用不僅推動了海洋聲學科學的進步，也為海洋環境管理與生物保護提供了重要的技術工具。隨著技術的不斷發展與完善，水下噪音量測與監測將在建設綠色海洋、保護海洋生態系統方面發揮更加重要的作用。

參考文獻

[1] Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Physical Laboratory, NPL Good Practice Guide No. 133.

[2] Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1-2), 15-38.

[3] Merchant, N. D., Fristrup, K. M., Johnson, M. P., Tyack, P. L., Witt, M. J., Blondel, P., & Parks, S. E. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and*

Evolution, 6(3), 257-265.

[4] International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 60565-1:2020 Underwater acoustics - Hydrophones - Calibration of hydrophones - Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones. Geneva: IEC.

[5] Sousa-Lima, R. S., Norris, T. F., Oswald, J. N., & Fernandes, D. P. (2013). A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquatic Mammals*, 39(1), 23-53.

[6] Gavrilov, A. N., & Parsons, M. J. G. (2014). A Matlab tool for the characterisation of recorded underwater sound (CHORUS). *Acoustics Australia*, 42(3), 190-196.

[7] Listewnik, K. (2019). A design of an acoustic coupler for calibration of hydrophones at low frequencies. *Vibrations in Physical Systems*, 30(1), 2019008.

[8] Robinson, S. P., Harris, P. M., Ford, B., Ablitt, J., Chen, Y., Zeqiri, B., ... & Beamiss, G. A. (2022). CCAUV. W-K2 final report-key comparison CCAUV. W-K2: Calibration of hydrophones in the frequency range from 250 Hz to 500 kHz. National Physical Laboratory Report AC 20.

[9] Malarkodi, A., Sridhar, P. S. S. R., Kumar, J. S., & Latha, G. (2016). Development of automated measurement setup for characterizing underwater acoustic transducers. *Marine Technology Society Journal*, 50(6), 95-104.

[10] Ford, B., Robinson, S., & Ablitt, J. (2021). A study of the stability exhibited by hydrophones when exposed to variations in temperature and hydrostatic pressure. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 44(1), 070024.

[11] Chambers, S., & James, R. (2017). Assessing the calibration error of a reciprocal underwater acoustic transducer from standard data obtained in a two-way comparison

calibration process using the acoustic reciprocity technique. Proceedings of ACOUSTICS 2017, Perth, Australia.

[12] Verfuß, U. K., Andersson, M., Folegot, T., Laanearu, J., Matuschek, R., Pajala, J., ... & Wendt, F. (2015). BIAS Standards for noise measurements. Background information, Guidelines and Quality Assurance. Amended version. BIAS Project Report.

[13] Desjonquères, C., Gifford, T., & Linke, S. (2020). Passive acoustic monitoring as a potential tool to survey animal and ecosystem processes in freshwater environments. *Freshwater Biology*, 65(2), 286-302.

[14] Van Hoeck, R. V., Paxton, A. B., Bohnenstiehl, D. W. R., Brodeur, M. C., Coley, M. L., Kellison, G. T., ... & Taylor, J. C. (2021). Passive acoustic monitoring complements traditional methods for assessing marine habitat enhancement outcomes. *Ecosphere*, 12(12), e03840.

[15] Gibb, R., Browning, E., Glover-Kapfer, P., & Jones, K. E. (2019). Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(2), 169-185.

[16] Pensieri, S., Bozzano, R., Anagnostou, M. N., Benoit, L., Dodds, L., Rajan, S., ... & Nystuen, J. A. (2013). Monitoring the oceanic environment through passive underwater acoustics. 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen (pp. 1-7). IEEE.

[17] Anagnostou, M. N., Nystuen, J. A., Anagnostou, E. N., Nikolaidis, N. P., & Amitai, E. (2011). Passive aquatic listener (PAL): An adoptive underwater acoustic recording system for the marine environment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 626, 94-105.

[18] Cauchy, P., Heywood, K. J., Merchant, N. D., Queste, B. Y., & Testor, P. (2023).

Gliders for passive acoustic monitoring of the oceanic environment. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 1106533.

[19] Mariani, A. C. B., Godoy, S. N., & Santos, M. C. O. (2024). The use of Passive Acoustic Monitoring as an auxiliary tool for monitoring Marine Protected Areas. *Ocean and Coastal Research*, 72, e24006.

[20] Mooney, T. A., Di Iorio, L., Lammers, M., Lin, T. H., Nedelec, S. L., Parsons, M., ... & Zemeckis, D. (2020). Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. *Royal Society Open Science*, 7(8), 201287.

[21] Rashida, K., Devi, P. G. T., Balakrishnan, A. A., & Latha, G. (2018). High Resolution Wideband Acoustic Beamforming and Underwater Target Localization using 64-Element Linear Hydrophone Array. 2018 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS) (pp. 1-6). IEEE.

[22] Oudompheng, B., Nicolas, B., Lamotte, M., & Ollivier, S. (2017). Localization and contribution of underwater acoustical sources of a moving surface ship. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 42(3), 536-546.

[23] Wong, K. T., & Chu, H. (2002). Beam patterns of an underwater acoustic vector hydrophone located away from any reflecting boundary. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 27(3), 628-637.

[24] Morella, G. L. (1994). A review of signal detection using the bispectrum with applications in underwater acoustics. Naval Research Laboratory Report NRL/MR/7176--94-7658.

[25] Jesus, S. M. (2019). Acoustic pressure and particle motion power spectrum estimation with Matlab®. SiPLAB Report 03/19, University of Algarve.

- [26] Socheleau, F. X. (2022). Cyclostationarity of communication signals in underwater acoustic channels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(4), 1141-1157.
- [27] DeMoura, E. (2025). *Lobster Trap Acoustic Recorders for Broadscale Right Whale Detection*. Electronic Theses and Dissertations, University of Maine.
- [28] Arranz, G. J. (2023). *Acoustic impacts of seismic surveys in complex underwater environments*. PhD Thesis, University of Bath.
- [29] Lamont, T. A. C., Chapuis, L., Williams, B., Dines, S., Gridley, T., Frainer, G., ... & Janik, V. M. (2022). HydroMoth: Testing a prototype low-cost acoustic recorder for aquatic environments. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(3), 362-374.
- [30] Mouy, X. (2022). *Monitoring fish using passive acoustics*. PhD Dissertation, University of Victoria.
- [31] Mouy, X., Archer, S. K., Dosso, S., Dudas, S., Gauthier, S., Martin, B., ... & Juanes, F. (2024). Automatic detection of unidentified fish sounds: A comparison of traditional machine learning with deep learning. *Frontiers in Remote Sensing*, 5, 1439995.
- [32] Palmer, K. J., Cummings, E., Dowd, M. G., Frasier, K., Hartwell, S., Silber, G. K., ... & Baumann-Pickering, S. (2025). A Public Dataset of Annotated *Orcinus orca* Acoustic Signals for Detection and Ecotype Classification. *Scientific Data*, 12(1), 32.
- [33] Erbe, C. (2013). *Underwater passive acoustic monitoring & noise impacts on marine fauna--A workshop report*. *Acoustics Australia*, 41(1), 37-47.
- [34] International Towing Tank Conference. (2014). *ITTC 7.5-04-04-01 Full Scale Measurements Noise and Vibration Procedure*. 27th ITTC, Copenhagen, Denmark.
- [35] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 17208-1:2016*

Underwater acoustics -- Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships -- Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Geneva: ISO.

[36] European Commission. (2017). Commission Decision (EU) 2017/848 of 17 May 2017 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters and specifications and standardised methods for monitoring and assessment. Official Journal of the European Union, L 125/43.

[37] International Organization for Standardization. (2018). ISO 18405:2017 Underwater acoustics -- Terminology. Geneva: ISO.

[38] National Marine Fisheries Service. (2018). 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.

[39] Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., ... & Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125-232.

[40] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science*, 74(3), 635-651.

[41] Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., & Thomson, D. H. (2013). *Marine mammals and noise*. Academic Press.

[42] Gomez, C., Lawson, J. W., Wright, A. J., Buren, A. D., Tollit, D., & Lesage, V. (2016). A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to

noise: the disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology*, 94(12), 801-819.

[43] Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., ... & Wernham, C. V. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management*, 115, 17-24.

[44] Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(7), 419-427.

[45] Radford, A. N., Kerridge, E., & Simpson, S. D. (2014). Acoustic communication in a noisy world: can fish compete with anthropogenic noise? *Behavioral Ecology*, 25(5), 1022-1030.

[46] Clark, C. W., Ellison, W. T., Southall, B. L., Hatch, L., Van Parijs, S. M., Frankel, A., & Ponirakis, D. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems: intuitions, analysis, and implication. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 201-222.

[47] Hatch, L., Clark, C., Merrick, R., Van Parijs, S., Ponirakis, D., Schwehr, K., ... & Wiley, D. (2008). Characterizing the relative contributions of large vessels to total ocean noise fields: a case study using the Gerry E. Studds Stellwagen Bank National Marine Sanctuary. *Environmental Management*, 42(5), 735-752.

[48] McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 92-103.

[49] Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297-301.

[50] Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 66(1), 51-83.

[51] International Electrotechnical Commission. (2014). IEC 61260-1:2014 Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications. Geneva: IEC.

[52] Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-time signal processing*. Pearson Higher Education.

[53] Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70-73.

[54] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons.

[55] Cohen, L. (1995). *Time-frequency analysis*. Prentice Hall.

[56] Madsen, P. T. (2005). Marine mammals and noise: problems with root mean square sound pressure levels for transients. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(6), 3952-3957.

[57] Finneran, J. J. (2015). Noise-induced hearing loss in marine mammals: A review of temporary threshold shift studies from 1996 to 2015. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), 1702-1726.

[58] Götz, T., Hastie, G., Hatch, L. T., Raustein, O., Southall, B. L., Tasker, M., ... & Thomsen, F. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. *OSPAR Commission Report*, 441, 1-134.

[59] National Marine Fisheries Service. (2016). Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55.

[60] Finneran, J. J. (2016). Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater sound. SPAWAR Systems Center Pacific Report SSC Pacific TR 3026.

[61] Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). Computational ocean acoustics. Springer Science & Business Media.

[62] New, L. F., Harwood, J., Thomas, L., Donovan, C., Clark, J. S., Hastie, G., ... & McConnell, B. (2013). Modelling the biological significance of behavioural change in coastal bottlenose dolphins in response to disturbance. *Functional Ecology*, 27(2), 314-322.

[63] Ellison, W. T., Southall, B. L., Clark, C. W., & Frankel, A. S. (2012). A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds. *Conservation Biology*, 26(1), 21-28.

[64] Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., ... & Tyack, P. L. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), 411-521.

[65] Kastak, D., & Schusterman, R. J. (1998). Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: methods, measurements, noise, and ecology. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4), 2216-2228.

[66] Wright, A. J., Soto, N. A., Baldwin, A. L., Bateson, M., Beale, C. M., Clark, C., ...

& Weilgart, L. S. (2007). Do marine mammals experience stress related to anthropogenic noise? *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2), 274-316.

[67] Merchant, N. D., Pirodda, E., Barton, T. R., & Thompson, P. M. (2014). Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1-2), 85-95.

[68] Erbe, C., Dunlop, R., & Dolman, S. (2018). Effects of noise on marine mammals. In *Effects of anthropogenic noise on animals* (pp. 277-309). Springer.

[69] New, L. F., Clark, J. S., Costa, D. P., Fleishman, E., Hindell, M. A., Klanjšček, T., ... & Harwood, J. (2014). Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series*, 496, 99-108.

[70] Van Trees, H. L. (2002). *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory*. John Wiley & Sons.

[71] Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). *Array signal processing: concepts and techniques*. Prentice Hall.

[72] Krim, H., & Viberg, M. (1996). Two decades of array signal processing research: the parametric approach. *IEEE Signal Processing Magazine*, 13(4), 67-94.

[73] Benesty, J., Chen, J., & Huang, Y. (2008). *Microphone array signal processing*. Springer Science & Business Media.

[74] Trees, H. L. V. (2002). *Optimum array processing: part IV of detection, estimation, and modulation theory*. John Wiley & Sons.

[75] Mailloux, R. J. (2017). *Phased array antenna handbook*. Artech House.

- [76] Hawes, M. B., & Liu, W. (2020). Sparse array design for wideband beamforming with reduced complexity in tapped delay-lines. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 28, 1775-1790.
- [77] Godara, L. C. (1997). Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, 85(8), 1195-1245.
- [78] Haykin, S. (1985). *Array signal processing*. Prentice-Hall.
- [79] Friedlander, B., & Weiss, A. J. (1991). Direction finding in the presence of mutual coupling. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 39(3), 273-284.
- [80] Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8), 1408-1418.
- [81] Frost III, O. L. (1972). An algorithm for linearly constrained adaptive array processing. *Proceedings of the IEEE*, 60(8), 926-935.
- [82] Widrow, B., Mantey, P. E., Griffiths, L. J., & Goode, B. B. (1967). Adaptive antenna systems. *Proceedings of the IEEE*, 55(12), 2143-2159.
- [83] Reed, I. S., Mallett, J. D., & Brennan, L. E. (1974). Rapid convergence rate in adaptive arrays. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 10(6), 853-863.
- [84] Griffiths, L. J., & Jim, C. W. (1982). An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 30(1), 27-34.
- [85] Buckley, K. M. (1987). Spatial/spectral filtering with linearly constrained

minimum variance beamformers. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 35(3), 249-266.

[86] Dudgeon, D. E., & Mersereau, R. M. (1984). *Multidimensional digital signal processing*. Prentice-Hall.

[87] Brandstein, M., & Ward, D. (Eds.). (2001). *Microphone arrays: signal processing techniques and applications*. Springer Science & Business Media.

[88] Torrieri, D. J. (1984). Statistical theory of passive location systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 20(2), 183-198.

[89] Knapp, C., & Carter, G. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 24(4), 320-327.

[90] Schmidt, R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3), 276-280.

[91] Roy, R., & Kailath, T. (1989). ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(7), 984-995.

[92] Stoica, P., & Nehorai, A. (1989). MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 37(5), 720-741.

[93] Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A., & Rubin, D. B. (2013). *Bayesian data analysis*. CRC Press.

[94] Baggeroer, A. B., Kuperman, W. A., & Mikhalevsky, P. N. (1993). An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(4),

401-424.

[95] Bar-Shalom, Y., Li, X. R., & Kirubarajan, T. (2001). Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software. John Wiley & Sons.

[96] Fortmann, T., Bar-Shalom, Y., & Scheffe, M. (1983). Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 8(3), 173-184.

[97] Julier, S. J., & Uhlmann, J. K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 401-422.

[98] Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., & Clapp, T. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 50(2), 174-188.

[99] Mahler, R. P. S. (2003). Multitarget Bayes filtering via first-order multitarget moments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39(4), 1152-1178.

[100] Ntalampiras, S. (2018). Automatic acoustic classification of bird species based on supervised learning. *Expert Systems with Applications*, 90, 167-180.

[101] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.

[102] Hall, D. L., & Llinas, J. (1997). An introduction to multisensor data fusion. *Proceedings of the IEEE*, 85(1), 6-23.

[103] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). Principles of marine bioacoustics. Springer Science & Business Media.

- [104] Mellinger, D. K., Stafford, K. M., Moore, S. E., Dziak, R. P., & Matsumoto, H. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.
- [105] Zimmer, W. M. (2011). *Passive acoustic monitoring of cetaceans*. Cambridge University Press.
- [106] Moore, S. E., & Barlow, J. (2013). Declining abundance of beaked whales (family Ziphiidae) in the California Current large marine ecosystem. *PLoS One*, 8(1), e52770.
- [107] Ocean Instruments. (2023). *SoundTrap Autonomous Underwater Acoustic Recorders Technical Specifications*. Ocean Instruments New Zealand Ltd.
- [108] JASCO Applied Sciences. (2023). *AMAR Autonomous Multi-channel Acoustic Recorder System Specifications*. JASCO Applied Sciences Ltd.
- [109] Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2007). High-frequency Acoustic Recording Package (HARP) for broad-band, long-term marine mammal monitoring. *International Symposium on Underwater Technology 2007 and International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies 2007* (pp. 551-557). IEEE.
- [110] Hill, A. P., Prince, P., Snaddon, J. L., Doncaster, C. P., & Rogers, A. (2019). AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment. *HardwareX*, 6, e00073.
- [111] Bittle, M., & Duncan, A. (2013). A review of current marine mammal detection and classification algorithms for use in automated passive acoustic monitoring. *Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor: Science, Technology and Amenity*, 17-20.
- [112] Cato, D. H. (1998). Simple methods of estimating source levels and locations of

marine animal sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(3), 1667-1678.

[113] Rousseau, S., Martinez, J. J., Gervaise, C., Escudié, B., & Stephan, Y. (2009). Boats noise analysis using passive acoustic. *Proceedings of 3rd International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results*, 637-644.

[114] Reddy, T. B. (2010). *Lind and Reddy's handbook of batteries*. McGraw-Hill Education.

[115] Benini, L., Bogliolo, A., & De Micheli, G. (2000). A survey of design techniques for system-level dynamic power management. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 8(3), 299-316.

[116] Kays, R., Crofoot, M. C., Jetz, W., & Wikelski, M. (2015). Terrestrial animal tracking as an eye on life and planet. *Science*, 348(6240), aaa2478.

[117] Vullers, R. J. M., Van Schaijk, R., Doms, I., Van Hoof, C., & Mertens, R. (2009). Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 53(7), 684-693.

[118] Schofield, O., Ducklow, H. W., Martinson, D. G., Meredith, M. P., Moline, M. A., & Fraser, W. R. (2010). How do polar marine ecosystems respond to rapid climate change? *Science*, 328(5985), 1520-1523.

[119] Hatch, L. T., & Wright, A. J. (2007). A brief review of anthropogenic sound in the oceans. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2), 121-133.

[120] Akyildiz, I. F., Pompili, D., & Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3), 257-279.

[121] Evans, B. G. (1999). *Satellite communication systems*. IET.

- [122] Giordani, M., & Zorzi, M. (2020). Non-terrestrial networks in the 6G era: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 59(5), 75-81.
- [123] Stojanovic, M., & Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 84-89.
- [124] Sayood, K. (2017). *Introduction to data compression*. Morgan Kaufmann.
- [125] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637-646.
- [126] Stallings, W. (2016). *Cryptography and network security: principles and practice*. Pearson.
- [127] Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., ... & Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 1-9.
- [128] Weibel, S., Kunze, J., Lagoze, C., & Wolf, M. (1998). Dublin core metadata for resource discovery. *Internet Engineering Task Force RFC*, 2413, 1-8.
- [129] Merkle, R. C. (1987). A digital signature based on a conventional encryption function. *Conference on the Theory and Application of Cryptographic Techniques* (pp. 369-378). Springer.
- [130] ITU-T Recommendation P.862. (2001). Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. International Telecommunication Union.

- [131] Mellinger, D. K. (2001). *Ishmael 1.0 user's guide*. NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-120.
- [132] Silberschatz, A., Galvin, P. B., & Gagne, G. (2018). *Operating system concepts*. John Wiley & Sons.
- [133] Jacobsen, A., de Miranda Azevedo, R., Juty, N., Batista, D., Coles, S., Cornet, R., ... & Goble, C. (2017). FAIR Principles in data management and stewardship. *Scientific Data*, 4(1), 1-6.
- [134] Pieretti, N., Farina, A., & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: the Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11(3), 868-873.
- [135] Sueur, J., Aubin, T., & Simonis, C. (2008). Equipment review: seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis. *Bioacoustics*, 18(2), 213-226.
- [136] Bradbury, J. W., & Vehrencamp, S. L. (2011). *Principles of animal communication*. Sinauer Associates.
- [137] Flandrin, P. (2018). *Explorations in time-frequency analysis*. Cambridge University Press.
- [138] Allen, J. (1977). Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete Fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 25(3), 235-238.
- [139] Daubechies, I. (1992). *Ten lectures on wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [140] Claasen, T. A. C. M., & Mecklenbrauker, W. F. G. (1980). The Wigner

distribution—a tool for time-frequency signal analysis. *Philips Journal of Research*, 35(3), 217-250.

[141] Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., ... & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903-995.

[142] Percival, D. B., & Walden, A. T. (1993). *Spectral analysis for physical applications*. Cambridge University Press.

[143] Davis, S., & Mermelstein, P. (1980). Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(4), 357-366.

[144] Mellinger, D. K., & Clark, C. W. (2000). Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(6), 3518-3529.

[145] Rohling, H. (1983). Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 19(4), 608-621.

[146] Turin, G. L. (1960). An introduction to matched filters. *IRE Transactions on Information Theory*, 6(3), 311-329.

[147] Duda, R. O., Hart, P. E., & Stork, D. G. (2012). *Pattern classification*. John Wiley & Sons.

[148] Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. Springer Science & Business Media.

[149] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

- [150] Zhou, Z. H. (2012). Ensemble methods: foundations and algorithms. CRC Press.
- [151] He, H., & Garcia, E. A. (2009). Learning from imbalanced data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 21(9), 1263-1284.
- [152] Shiu, Y., Palmer, K. J., Roch, M. A., Fleishman, E., Liu, X., Nosal, E. M., ... & Klinck, H. (2020). Deep neural networks for automated detection of marine mammal species. *Scientific Reports*, 10(1), 1-12.
- [153] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- [154] Gillespie, D., Mellinger, D. K., Gordon, J., McLaren, D., Redmond, P., McHugh, R., ... & Demer, D. A. (2008). PAMGUARD: Semiautomated, open source software for real-time acoustic detection and localisation of cetaceans. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 30(5), 54-62.
- [155] Santos, M. C. O., Rosso, S., & Ramos, R. (2000). Age estimation of marine tucuxi, *Sotalia fluviatilis* (Cetacea: Delphinidae) incidentally caught in fisheries from São Paulo State, southeastern Brazil. *Aquatic Mammals*, 26(3), 185-194.
- [156] Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85-117.
- [157] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 5998-6008.
- [158] Wang, Y., Yao, Q., Kwok, J. T., & Ni, L. M. (2020). Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning. *ACM Computing Surveys*, 53(3), 1-34.
- [159] Zhu, X., & Goldberg, A. B. (2009). Introduction to semi-supervised learning. *Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning*, 3(1), 1-130.
- [160] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). Forecasting: principles and

practice. OTexts.

- [161] Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin.
- [162] Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 39(2), 447-462.
- [163] Cressie, N. A. C. (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.
- [164] Hastie, T. J., & Tibshirani, R. J. (1990). *Generalized additive models*. CRC Press.
- [165] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [166] Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS One*, 3(12), e4065.
- [167] Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 319(5865), 948-952.
- [168] Farcas, A., Thompson, P. M., & Merchant, N. D. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 57, 114-122.
- [169] Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- [170] Breiman, L. (2001). Statistical modeling: The two cultures (with comments and a rejoinder by the author). *Statistical Science*, 16(3), 199-231.
- [171] Few, S. (2009). *Now you see it: simple visualization techniques for quantitative analysis*. Analytics Press.
- [172] Pearl, J., & Mackenzie, D. (2018). *The book of why: the new science of cause and effect*. Basic Books.

第四章 水下噪音評估與預測

Assessment and Prediction

水下噪音評估與預測是海洋聲學工程的核心技術領域，涵蓋了從基礎聲學理論到先進數值模擬的完整技術體系。隨著全球海運活動的日益頻繁和海洋開發活動的不斷擴展，準確評估和預測水下噪音的分布特性已成為海洋環境保護和生態風險管理的關鍵技術需求。現代水下噪音評估技術整合了多學科的理論基礎和方法論，包括聲學物理學、海洋學、數值分析、地理資訊系統、人工智慧和風險分析等領域的最新進展。

水下噪音評估的技術發展歷程反映了海洋聲學研究從定性描述向定量預測的重要轉變。早期的評估方法主要依賴經驗公式和簡化模型，如經典的球面擴散和圓柱擴散定律，這些方法雖然計算簡便但在複雜海洋環境中的準確性有限。隨著計算技術的快速發展和海洋環境資料庫的不斷完善，現代評估方法逐漸轉向基於物理原理的數值建模和高精度模擬技術。這種技術演進不僅提高了預測精度，更重要的是能夠處理真實海洋環境的複雜性和多變性，為海洋噪音管理提供了科學可靠的技術支撐。

評估指標與方法的標準化發展為水下噪音研究奠定了重要基礎。國際標準化組織（ISO）制定的相關標準，特別是 ISO 17208 系列標準，為船舶水下輻射噪音的測量和評估提供了統一的技術規範。這些標準不僅規定了評估指標的定義和計算方法，還明確了測量程序、資料處理和結果報告的具體要求。標準化評估方法的建立促進了不同研究機構和國家之間的資料比較和技術交流，推動了全球海洋噪音研究的協調發展。

數值建模與模擬技術的進步為水下噪音預測提供了強大的技術工具。現代聲學建模方法包括射線追蹤法、正常模式法、拋物方程法和有限元素法等多種數值方法，每種方法都有其特定的適用條件和精度特性。這些建模技術能夠考慮海洋環境的複雜結構，包括海底地形、水體分層、沉積物特性和表面條件等因素對聲波傳播的影響。透過高精度的數值模擬，可以預測不同海洋條件下的噪音分布特性，為噪音控制和環境管理提供定量的決策依據。

地理資訊系統（GIS）和空間分析技術在水下噪音評估中發揮著越來越重要的作用。GIS 技術能夠整合多源海洋環境資料，包括水深測量資料、海底地質資料、海洋氣象資料和生物分布資料等，建立綜合的海洋環境資料庫。透過空間分

析方法，可以識別噪音敏感區域、評估噪音影響範圍並進行環境風險評估。GIS 平台還提供了強大的視覺化功能，能夠製作高品質的海洋聲景地圖，直觀地展示噪音分布的空間特徵和時間變化。

大數據和人工智慧技術的應用為水下噪音研究帶來了新的機遇和挑戰。隨著海洋監測技術的發展，特別是水下聲學感測器網路的部署，產生了大量的連續監測資料。傳統的資料處理方法難以有效處理這些大規模資料集，而機器學習和深度學習等人工智慧技術提供了新的解決方案。這些技術能夠自動識別和分類不同類型的水下噪音源，發現資料中的隱藏模式，並提高預測模型的準確性和效率。

風險與不確定性分析是水下噪音評估的重要組成部分，特別是在環境影響評估和決策支援中。海洋環境的複雜性和變異性導致噪音預測存在不可避免的不確定性，需要透過適當的風險分析方法來量化和管理這些不確定性。現代風險分析方法包括蒙特卡洛模擬、敏感度分析、貝葉斯推斷等統計方法，能夠評估預測結果的可信度和風險水準，為環境管理決策提供科學依據。

4.1 評估指標與方法 **Assessment Metrics and Methods**

水下噪音評估指標與方法的建立是海洋聲學研究的基礎工作，直接影響到噪音監測、影響評估和管理決策的科學性和有效性。現代評估體系需要兼顧聲學物理特性、生物學意義和工程實用性等多個層面的要求，形成了涵蓋多種指標和方法的綜合評估框架。評估指標的選擇和應用不僅需要考慮聲學參數的準確測量，更需要關注這些參數與海洋生物影響之間的科學關聯性。

聲學評估指標的物理基礎建立在聲波傳播理論和聲場特性分析之上。水下聲場的描述需要考慮聲壓、聲速、聲強、聲功率等基本物理量，以及它們在時間和空間上的分布特性。聲壓級（Sound Pressure Level, SPL）作為最基本的評估指標，定義為實測聲壓與參考聲壓比值的對數表示，其數學表達式為 $SPL = 20\log_{10}(p/p_0)$ ，其中 p 為實測聲壓有效值， p_0 為水中參考聲壓值 $1 \mu Pa$ [1]。聲壓級的測量需要考慮頻率特性、時間平均和空間分布等因素，不同的平均時間和頻率權重會產生不同的評估結果。

聲暴露級（Sound Exposure Level, SEL）是另一個重要的累積性評估指標，特別適用於評估間歇性或瞬態噪音源的影響。SEL 將聲暴露量正規化為 1 秒鐘的等效聲暴露，其計算公式為 $SEL = 10\log_{10}(E/E_0)$ ，其中 E 為實際聲暴露量， E_0 為參考聲暴露量（ $1 \mu Pa^2 \cdot s$ ）[2]。SEL 指標的優勢在於能夠綜合考慮聲強和暴露時間的雙重影響，為評估累積性噪音影響提供了科學依據。在實際應用中，SEL 常

用於評估船舶通過、海上施工和軍事活動等產生的間歇性噪音影響。

頻譜分析方法為水下噪音的詳細特徵描述提供了重要工具。1/3 倍頻程分析是國際標準中廣泛採用的頻譜分析方法，能夠將寬頻噪音分解為不同頻率段的能量分布。根據 ISO 17208-1 標準，船舶水下輻射噪音的標準測量頻率範圍為 10 Hz 到 100 kHz，涵蓋了大多數海洋生物的聽覺敏感頻率範圍[3]。窄頻分析方法則提供了更高的頻率解析度，能夠識別特定頻率成分的噪音特徵，如螺旋槳葉頻噪音和機械設備的特徵頻率等。

生物學相關評估指標的發展反映了海洋噪音研究從純技術導向向生態導向的重要轉變。不同海洋生物對水下噪音的敏感性存在顯著差異，需要建立針對特定生物群體的評估閾值和標準。海洋哺乳動物噪音暴露標準是目前最為成熟的生物學評估體系，美國國家海洋漁業局（NMFS）制定的詳細暴露閾值為不同類型的海洋哺乳動物提供了具體的保護標準[4]。這些閾值考慮了生物的聽覺頻率範圍、行為反應閾值和生理損傷閾值等因素，為環境影響評估提供了科學依據。

魚類聲學影響評估則需要考慮不同魚種的聽覺特性和行為生態特徵。魚類的聽覺系統與海洋哺乳動物存在根本性差異，其聲音感知主要依靠側線系統和鰾等器官。Popper 等學者提出的魚類聲學影響評估框架，根據魚類是否具有氣泡結構將其分為不同的敏感性類別，並制定了相應的暴露閾值標準[5]。這種分類方法考慮了魚類聽覺生理的多樣性，為不同魚種的保護提供了差異化的評估標準。

時域和頻域分析方法的結合應用為水下噪音的綜合評估提供了完整的技術框架。時域分析關注聲信號的時間特徵，包括脈衝特性、調製特徵和統計分布等參數。均方根（RMS）值是時域分析中最常用的統計量，能夠反映聲信號的平均能量水準。峰值因子（Crest Factor）和峭度（Kurtosis）等高階統計量則能夠描述信號的脈衝特性和統計分布特徵，對於識別不同類型的噪音源具有重要意義[6]。

頻域分析方法則透過傅立葉變換等數學工具，將時域信號轉換為頻域表示，揭示噪音的頻譜結構和頻率成分。功率譜密度（Power Spectral Density, PSD）是頻域分析的核心指標，描述了聲信號功率在不同頻率上的分布密度。PSD 的計算需要考慮視窗函數、重疊率和平均次數等參數的選擇，以確保分析結果的準確性和穩定性。譜圖（Spectrogram）分析方法則結合了時域和頻域的特徵，能夠顯示聲信號的時頻分布特性，為動態噪音源的識別和追蹤提供了有效工具[7]。

測量方法和程序的標準化是確保評估結果可比性和可靠性的關鍵要素。ISO 17208 系列標準詳細規定了船舶水下輻射噪音測量的技術要求，包括測量設備規

格、測量幾何配置、環境條件要求和資料處理程序等內容[8]。標準測量方法要求在深水條件下進行，測量距離通常為船舶長度的 1-2 倍，測量深度需避免表面反射和海底反射的影響。測量期間的環境條件，如風速、海況和背景噪音水準等，都需要滿足特定的要求以確保測量精度。

校正和驗證程序是評估方法可靠性的重要保障。水聽器的校正需要在國家標準實驗室進行，確保其頻率響應和靈敏度的準確性。現場測量中的設備校正包括電子校正和聲學校正兩個層面，需要使用標準聲源或參考信號進行驗證。資料品質控制程序包括信號雜訊比檢查、頻率響應驗證和統計一致性分析等步驟，能夠識別和剔除無效資料，確保評估結果的可靠性[9]。

不確定性評估和誤差分析是現代評估方法的重要組成部分。測量不確定性來源包括設備誤差、環境變異性、測量方法限制和資料處理誤差等多個方面。根據國際測量不確定性指南（GUM）的要求，需要對各種不確定性來源進行定量分析，計算合成標準不確定性和擴展不確定性，為評估結果提供置信區間[10]。這種不確定性評估方法不僅提高了測量結果的科學性，也為風險評估和決策分析提供了重要的統計資訊。

4.1.1 聲學指標體系 Acoustic Indicator Systems

聲學指標體系是水下噪音評估的核心技術基礎，需要綜合考慮聲學物理特性、生物學意義和實用性要求，建立科學合理的指標框架。現代聲學指標體系的發展經歷了從單一參數向多維度綜合評估的演進過程，形成了涵蓋時域、頻域和統計特徵的完整技術體系。指標體系的設計不僅需要反映水下聲場的物理特性，更需要關注這些特性與海洋生態系統之間的科學關聯性，為環境保護和資源管理提供可靠的技術支撐。

基礎聲學參數的定義和測量構成了指標體系的理論基礎。聲壓（Sound Pressure）作為最基本的聲學量，描述了聲波傳播過程中介質壓力的瞬時變化。在水介質中，聲壓的測量通常採用壓電式水聽器，其輸出電壓與聲壓成正比關係。聲壓的有效值（RMS）計算需要考慮測量時間窗和採樣頻率的影響，通常採用快速傅立葉變換（FFT）等數值方法進行計算[11]。聲強（Sound Intensity）描述了聲波傳播的能量流密度，其計算需要同時測量聲壓和質點速度，在實際應用中通常透過聲壓梯度法或雙水聽器法進行估算。

聲壓級指標的詳細分類實現了不同應用場景的特定需求。瞬時聲壓級（Instantaneous SPL）反映聲場的瞬時特徵，適用於脈衝性噪音的評估。等效連

續聲壓級 (Equivalent Continuous SPL, Leq) 將時變聲壓正規化為等效的穩態聲壓級，其計算公式為 $Leq = 10\log_{10}[1/T \int_0^T (p^2(t)/p_0^2) dt]$ ，其中 T 為測量時間， $p(t)$ 為瞬時聲壓， p_0 為參考聲壓[12]。統計聲壓級 (Statistical SPL) 如 L_{10} 、 L_{50} 、 L_{90} 等，描述了聲壓級在統計分布上的特徵值，能夠反映噪音的變異性和穩定性特徵。

頻率加權評估指標的發展反映了生物學導向評估的重要趨勢。A 加權聲壓級 (A-weighted SPL) 雖然最初為空氣聲學設計，但在某些水下應用中仍有參考價值。更重要的是針對海洋生物聽覺特性設計的專用加權函數，如針對海洋哺乳動物的 M 加權和高頻鯨類專用的高頻加權函數。這些加權函數基於生物聽覺閾值曲線設計，能夠更準確地反映水下噪音對特定生物群體的潛在影響[13]。加權聲壓級的計算需要將原始聲壓級與加權函數進行卷積運算，得到生物學意義更明確的評估指標。

聲暴露級指標系統為累積性影響評估提供了科學工具。單次事件聲暴露級 (Single Event SEL) 適用於評估單次噪音事件的影響，如船舶通過或打樁作業等。累積聲暴露級 (Cumulative SEL) 則考慮多次事件的疊加效應，其計算需要將所有相關事件的聲暴露量進行能量加法，公式為 $SEL_{cum} = 10\log_{10}(\sum_i 10^{(SEL_i/10)})$ ，其中 SEL_i 為第 i 個事件的聲暴露級[14]。24 小時聲暴露級 (SEL_{24h}) 是環境管理中常用的長期暴露指標，能夠評估日常噪音活動對海洋生物的累積影響。

脈衝性噪音的特殊評估指標反映了不同噪音類型的差異化評估需求。峰值聲壓級 (Peak SPL) 描述聲信號的瞬時最大值，適用於評估爆破、打樁等強脈衝噪音的瞬時影響。脈衝持續時間 (Pulse Duration) 和上升時間 (Rise Time) 等時域參數能夠描述脈衝噪音的時間特徵，影響生物的驚嚇反應和行為改變。脈衝重複頻率 (Pulse Repetition Rate) 則描述脈衝噪音的重複特性，對於評估長期暴露影響具有重要意義[15]。

頻譜特徵參數為噪音源識別和特徵分析提供了詳細資訊。中心頻率 (Center Frequency) 和頻寬 (Bandwidth) 描述了噪音的頻譜集中特性，能夠反映不同噪音源的頻譜指紋特徵。頻譜滾降 (Spectral Roll-off) 參數描述了頻譜能量的衰減特性，對於區分自然聲源和人為聲源具有重要價值。頻譜平坦度 (Spectral Flatness) 和頻譜質心 (Spectral Centroid) 等高階頻譜參數能夠描述頻譜分布的細節特徵，為機器學習和自動識別算法提供特徵輸入[16]。

方向性評估指標考慮了聲源的空間輻射特性和接收點的方向性影響。聲源

方向性指數 (Directivity Index, DI) 描述了聲源在不同方向上的輻射能量差異，其計算需要在多個方向角度進行測量。對於船舶等移動聲源，需要考慮不同航行方向和速度條件下的方向性變化。接收點的方向性分析則需要考慮海底地形、水深分層等環境因素對聲波到達角度的影響，建立三維空間的聲場分布模型[17]。

統計描述指標為噪音的隨機特性分析提供了數學工具。概率密度函數 (Probability Density Function, PDF) 描述了聲壓級的統計分布特徵，能夠識別噪音的分布類型 (如高斯分布、對數正態分布等)。累積分布函數 (Cumulative Distribution Function, CDF) 則提供了超標機率的定量評估，支持基於風險的環境管理決策。偏度 (Skewness) 和峭度 (Kurtosis) 等高階統計矩能夠描述分布的偏斜和尖銳程度，為噪音特徵識別提供附加資訊[18]。

多角度綜合指標的發展實現了現代評估技術的系統性特徵。聲景指數 (Soundscape Index) 結合多個聲學參數，建立綜合的聲環境評估指標。生態聲學指數 (Ecoacoustic Index) 則專門針對生態系統的聲環境特徵設計，能夠反映生物多樣性和生態系統健康狀況。這些綜合指標通常採用主成分分析 (PCA) 或因子分析等多元統計方法進行構建，能夠將高維聲學參數降維為少數幾個關鍵指標，簡化評估過程並提高結果的可解釋性[19]。

品質保證和標準化程序確保了指標體系的科學性和一致性。國際電工委員會 (IEC) 和國際標準化組織 (ISO) 制定了詳細的聲學測量標準，規範了各種指標的定義、計算方法和測量程序。指標的溯源性要求所有測量結果都能追溯到國際單位制 (SI) 基準，確保不同實驗室和不同時間的測量結果具有可比性。定期的比對測量和能力驗證計劃確保了測量系統的持續有效性，為指標體系的可靠應用提供了技術保障[20]。

4.1.2 生物影響閾值 Biological Impact Thresholds

生物影響閾值的建立是連接水下噪音物理特性與生態系統保護的關鍵橋樑，需要綜合考慮不同海洋生物的生理特徵、行為生態和演化適應性等多個層面的科學證據。現代生物影響閾值體系的發展經歷了從定性觀察向定量評估的重要轉變，形成了基於科學實驗、野外觀測和數學建模相結合的綜合研究方法。閾值的建立不僅需要考慮直接的生理損傷，更需要關注亞致命性影響，如行為改變、生理壓力和繁殖成功率下降等長期效應，為海洋生物保護提供全面的科學依據。

海洋哺乳動物聽覺損傷閾值的研究代表了水下噪音生物影響評估的最高技術水準。永久性聽覺閾值偏移 (Permanent Threshold Shift, PTS) 是聽覺系統不可

逆損傷的重要指標，其發生機制涉及內耳毛細胞的機械損傷和代謝性損傷。根據 Southall 等學者的綜合研究，不同類型海洋哺乳動物的 PTS 閾值存在顯著差異，低頻鯨類（如藍鯨、灰鯨）的 PTS 閾值約為 183 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (SEL)，而高頻鯨類（如海豚、鼠海豚）的閾值約為 173 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ [21]。這些差異反映了不同物種聽覺系統的解剖學和生理學特徵，需要在環境管理中採用差異化的保護標準。

暫時性聽覺閾值偏移 (Temporary Threshold Shift, TTS) 作為可恢復的聽覺影響，其研究為理解聽覺損傷的劑量-效應關係提供了重要資訊。TTS 的發生機制主要涉及毛細胞的暫時性功能障礙和突觸傳遞的暫時性中斷。實驗研究表明，TTS 的發生閾值通常比 PTS 閾值低 15-20 dB，恢復時間與暴露強度和持續時間密切相關。Kastak 和 Schusterman 的研究發現，海獅在 180 dB re 1 μPa (RMS) 的純音暴露下會產生顯著的 TTS，恢復時間約為 2-24 小時[22]。TTS 研究的重要性在於它提供了相對安全的實驗範式，能夠深入研究聽覺損傷的機制而不對實驗動物造成永久性傷害。

行為反應閾值的研究揭示了水下噪音對海洋哺乳動物行為生態的廣泛影響。行為反應包括迴避行為、通訊行為改變、覓食行為中斷和社會行為干擾等多個方面。Ellison 等學者的系統性研究表明，灰鯨對船舶噪音的行為反應閾值約為 120 dB re 1 μPa (RMS)，表現為游泳速度增加和潛水模式改變[23]。這種行為反應雖然不會直接造成生理損傷，但可能影響動物的能量收支、覓食效率和繁殖成功率，具有重要的生態學意義。行為反應的評估需要考慮動物的生理狀態、環境條件和噪音特徵等多種因素的交互作用。

鯨豚類聲納干擾效應的研究為軍用聲納和科研聲納的環境管理提供了科學依據。主動聲納系統產生的高強度脈衝信號可能對鯨豚類的回聲定位系統造成干擾，影響其導航、覓食和社會通訊能力。Madsen 等學者的研究發現，抹香鯨在接收到軍用中頻聲納信號（約 180 dB re 1 μPa ）時會表現出明顯的迴避行為和發聲行為改變[24]。更嚴重的是，高強度聲納暴露可能導致深潛性鯨類的減壓病，這種現象在軍事演習區域的鯨類擱淺事件中得到了證實。因此，軍用聲納的使用需要建立嚴格的環境監測和生物保護協議。

魚類聽覺影響評估面臨著生物多樣性和聽覺系統複雜性的雙重挑戰。魚類的聽覺系統與哺乳動物存在根本性差異，主要包括內耳、鰾和側線系統等多個感知器官。根據 Popper 和 Hawkins 的分類方法，魚類被分為具有鰾的聽覺敏感種類和不具有鰾的聽覺鈍感種類，兩者對水下噪音的敏感性差異可達 20-30 dB[25]。

具有鰾的魚類，如鯉科和鮭科魚類，其聽覺閾值較低，更容易受到水下噪音的影響。打樁作業產生的強脈衝噪音對魚類的影響尤其顯著，SEL 閾值約為 187 dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ 可能導致近距離魚類的死亡。

魚類行為反應和生理壓力的評估需要考慮生活史階段的差異性影響。幼魚通常比成魚更容易受到噪音影響，這可能與其聽覺系統的發育不完全和應激反應能力較弱有關。Wysocki 等學者的實驗發現，幼年鯉魚在 150 dB re 1 μPa 的噪音暴露下會表現出顯著的應激反應，血清皮質醇濃度顯著升高[26]。繁殖期的魚類對噪音干擾特別敏感，因為許多魚類依賴聲通訊進行求偶和產卵行為。船舶噪音可能掩蔽魚類的求偶聲信號，降低繁殖成功率，對魚類種群的長期穩定性產生影響。

無脊椎動物的噪音敏感性研究是一個相對較新但快速發展的研究領域。頭足類動物，如章魚、烏賊和魷魚，具有相對複雜的神經系統和感覺器官，對水下噪音表現出一定的敏感性。André 等學者的組織學研究發現，低頻聲波暴露（50-400 Hz，157 dB re 1 μPa ）可能對頭足類動物的平衡器官造成損傷，影響其游泳和定向能力[27]。甲殼類動物的噪音敏感性研究主要集中在商業重要種類，如龍蝦和螃蟹。這些動物主要透過機械感受器感知聲波振動，對低頻成分較為敏感。

浮游動物和浮游植物的噪音影響評估代表了生態系統評估的基礎層面。雖然單個浮游生物對噪音的敏感性相對較低，但它們在海洋生態系統中的基礎地位使得其任何變化都可能對整個食物網產生 cascade 效應。McCauley 等學者的研究發現，地震勘探產生的氣槍陣列噪音可能影響浮游動物的垂直分布和日周期游泳行為，間接影響海洋食物鏈的能量傳遞[28]。這種生態系統層面的影響評估需要採用長期監測和生態模型等綜合方法。

累積影響和多重壓力源的評估反映了現實海洋環境的複雜性。海洋生物面臨的不僅是單一噪音源的影響，還包括多種人為活動產生的累積壓力。氣候變化、海洋酸化、化學污染和棲息地破壞等因素與水下噪音可能產生協同作用，放大對海洋生物的負面影響。Hatch 等學者提出的累積影響評估框架，考慮了多種壓力源的空間重疊和時間疊加，為綜合環境管理提供了方法論指導[29]。這種多角度評估方法需要整合海洋學、生態學和環境科學等多學科的知識和技術。

閾值的不確定性和個體差異性是生物影響評估中的重要考慮因素。不同個體的敏感性可能因年齡、健康狀況、營養狀態和遺傳背景等因素而存在顯著差異。統計分布模型，如對數正態分布，常用於描述種群內部的敏感性變異，並據此確

定保護性閾值。預防性原則在閾值制定中的應用實現為安全係數的引入，通常在實驗閾值的基礎上減少 6-10 dB 作為管理閾值，以保護最敏感的個體和種群[30]。

4.1.3 測量標準與協定 Measurement Standards and Protocols

測量標準與協定的建立是確保水下噪音評估結果科學性、準確性和可比性的根本保障，涵蓋了從設備規格到資料處理的完整技術鏈條。國際標準化工作的發展經歷了從各國獨立標準向全球統一標準的重要轉變，形成了以國際標準化組織（ISO）為核心，國際電工委員會（IEC）和國際海事組織（IMO）共同參與的多層次標準體系。這些標準不僅規範了技術程序，更重要的是確保了不同研究機構、不同國家和不同時期的測量結果具有科學的可比性，為全球海洋噪音研究和管理提供了統一的技術基礎。

ISO 17208 系列標準代表了船舶水下輻射噪音測量技術的國際共識和最高技術水準。該系列標準包括四個部分：第 1 部分規定了深水測量的要求和程序，第 2 部分涵蓋了淺水測量的特殊考慮，第 3 部分針對靠港測量條件，第 4 部分則專門針對艦船的測量要求[31]。這種分層次的標準設計充分考慮了不同測量環境的技術挑戰和實際限制，為各種應用場景提供了適用的技術規範。標準的制定過程歷時多年，整合了全球主要海洋研究機構和船舶製造商的技術經驗，代表了國際海洋聲學領域的集體智慧。

深水測量標準的技術要求實現了理想化測量條件的科學追求。根據 ISO 17208-1 的規定，深水測量需要在水深大於船舶長度 2 倍且不小於 100 米的海域進行，以避免海底反射對測量結果的影響。測量距離通常設定為船舶長度的 1-2 倍，典型值為 100-200 米，這個距離能夠確保測量點位於聲場的遠場區域，滿足聲學理論的基本假設[32]。測量陣列通常採用垂直線陣配置，水聽器深度範圍從表面以下 10 米到水深的中間位置，以獲得完整的聲場分布資訊。測量期間的環境條件要求包括：風速不超過 5 級（10.7 m/s），海況不超過 3 級，背景噪音水準應比測量信號低至少 10 dB。

測量設備的技術規格和校正程序構成了標準體系的技術核心。水聽器作為聲壓測量的關鍵設備，其技術指標直接影響測量精度。標準要求水聽器的頻率響應範圍應覆蓋 10 Hz 至 100 kHz，頻率響應平坦度在關鍵頻段內應優於 ± 2 dB，指向性在 1 kHz 以下應為全向性，高頻段的指向性偏差不應超過 ± 2 dB[33]。水聽器的靈敏度校正需要在國家標準實驗室進行，校正證書的有效期通常為 2 年，使用

過程中需要定期進行現場校正檢查。電子測量系統包括前置放大器、濾波器、類比數位轉換器和資料記錄設備等組件，每個組件都有相應的技術指標要求和校正程序。

資料採集和處理程序的標準化確保了原始資料的品質和後續分析的準確性。採樣頻率的選擇需要滿足奈奎斯特定理的要求，通常設定為最高分析頻率的 2.56 倍，以避免頻率混疊現象。資料記錄格式需要包括完整的時間戳記、GPS 位置資訊、環境參數和設備狀態等後設資料。即時資料品質監控包括信號雜訊比檢查、頻率響應驗證和動態範圍確認等程序，能夠及時發現和處理測量問題[34]。資料處理流程包括預處理、頻譜分析、統計計算和結果輸出等步驟，每個步驟都有詳細的技術要求和品質控制標準。

不同測量幾何配置的標準化處理反映了複雜海洋環境的技術挑戰。船舶噪音測量通常採用拖拽陣列、固定陣列或移動陣列等不同配置，每種配置都有其特定的優勢和限制。拖拽陣列配置能夠維持相對穩定的測量距離，適用於長航線測量，但可能受到拖拽噪音的影響。固定陣列配置避免了拖拽噪音問題，但測量距離隨時間變化，需要進行幾何修正。移動陣列配置結合了前兩種方法的優勢，但操作複雜度較高，需要精確的導航和定位系統支持[35]。

聲源識別和背景噪音處理的標準程序確保了測量結果的可靠性。船舶噪音測量需要區分目標船舶的輻射噪音和其他噪音源的干擾，包括其他船舶、海洋生物聲音和海洋環境噪音等。信號處理技術如波束形成、頻域濾波和時域相關分析等方法被廣泛應用於聲源分離和信號增強。背景噪音的測量和扣除是確保測量精度的重要程序，通常在目標船舶到達前和離開後進行背景噪音測量，並採用適當的數學方法進行噪音修正[36]。

國際比對測量和能力驗證計劃是維護標準一致性的重要機制。定期的國際比對測量活動由國際海洋聲學實驗室聯盟組織，參與機構使用相同的測試船舶和測量條件，比較不同實驗室的測量結果。這些比對活動不僅驗證了各實驗室的測量能力，還促進了測量技術的交流和改進。能力驗證計劃包括設備校正比對、測量程序審查和資料處理驗證等多個層面，確保參與機構具備執行標準測量的技術能力[37]。

品質管理體系的建立為標準的有效實施提供了組織保障。測量實驗室需要建立符合 ISO/IEC 17025 要求的品質管理體系，包括人員培訓、設備管理、程序

控制和持續改進等要素。測量不確定性的評估和報告是品質管理的核心內容，需要按照 GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) 的要求，對各種不確定性來源進行系統分析和定量評估。測量結果的溯源性要求所有測量都能追溯到國際單位制 (SI) 基準，確保測量結果的國際可接受性[38]。

新興技術和測量需求推動了標準體系的持續發展和更新。自主水下航行器 (AUV) 和無人水面艇 (USV) 等新技術平台為水下噪音測量提供了新的可能性，但也帶來了新的技術挑戰和標準需求。海洋可再生能源設施、深海採礦和海洋工程等新興海洋活動產生了新的噪音類型和評估需求，推動了專門標準的制定。氣候變化對海洋聲學環境的影響也需要在未來的標準修訂中予以考慮，以確保標準的科學性和適用性[39]。

品質保證和品質控制 (QA/QC) 程序的實施是標準有效性的關鍵保障。QA 程序包括測量計劃審查、人員資格認證、設備狀態確認和環境條件評估等預防性措施，確保測量活動的規範性。QC 程序則包括即時資料監控、異常值識別、重複性檢驗和結果驗證等控制性措施，確保測量資料的可靠性。統計過程控制 (SPC) 方法被廣泛應用於測量過程的監控，透過控制圖等工具及時發現系統性偏差和隨機變異，維護測量系統的穩定性[40]。

4.2 數值建模與模擬 Numerical Modeling and Simulation

數值建模與模擬技術在水下噪音預測領域的發展代表了從經驗估算向科學預測的重大技術飛躍，為複雜海洋環境中的聲波傳播問題提供了強有力的分析工具。現代數值建模技術整合了聲學物理學、數值分析、計算數學和高效能計算等多個學科的最新進展，形成了能夠處理真實海洋環境複雜性的綜合技術體系。建模技術的核心價值在於其能夠在計算機環境中重現和預測聲波在複雜海洋介質中的傳播行為，為噪音評估、環境管理和工程設計提供定量的科學依據。

聲波傳播的數學基礎建立在波動方程和聲學理論之上，為各種數值方法提供了統一的理論框架。在海洋環境中，聲波傳播遵循 Helmholtz 方程和波動方程，需要考慮海水密度、聲速、衰減係數等介質參數的空間變化。海洋聲速的垂直分層結構、海底地形的複雜變化、以及海面和海底的邊界條件都對聲波傳播產生重要影響[41]。數值建模的挑戰在於如何在保持計算效率的同時，準確描述這些複雜的物理過程和邊界條件。不同的數值方法針對不同的問題規模和精度要求，發展出了各具特色的算法優勢和適用範圍。

海洋環境參數化是數值建模的基礎工作，直接影響預測結果的準確性和可

靠性。聲速剖面 (Sound Speed Profile, SSP) 的準確描述是建模成功的關鍵要素，需要考慮溫度、鹽度和壓力 (深度) 的三維分布特徵。現代海洋資料同化技術能夠整合衛星遙感資料、Argo 浮標資料和船測資料，建立高解析度的海洋環境場。World Ocean Atlas (WOA) 等全球海洋資料庫為大尺度建模提供了標準化的環境參數輸入[42]。局域化的高精度環境參數測量則需要使用 CTD (溫鹽深儀) 等現場觀測設備，獲得特定海域的詳細環境資料。

海底地形和地質參數的準確描述是近海底聲波傳播建模的關鍵要素。高解析度海底地形資料可以透過多波束測深儀獲得，現代系統能夠提供米級精度的海底地形資訊。海底沉積物的聲學參數包括聲速、密度、衰減係數和剪切波參數等，這些參數通常透過海底鑽探取樣和聲學測量相結合的方法獲得。Hamilton 海底聲學參數模型為缺乏實測資料的海域提供了經驗估算方法，但實際應用中仍需要根據當地地質條件進行調整和驗證[43]。

計算域設計和網格生成是數值建模的重要技術環節，需要平衡計算精度和計算效率的要求。計算域的選擇需要考慮聲源特性、傳播距離、頻率範圍和環境複雜度等因素。一般而言，計算域應該足夠大以包含所有重要的聲學現象，同時應該避免邊界反射對計算結果的影響。完全匹配層 (Perfectly Matched Layer, PML) 等吸收邊界條件被廣泛應用於減少計算域邊界的人工反射。網格設計需要滿足數值精度的要求，通常要求每個波長包含 10-20 個網格點，以確保聲波的準確傳播 [44]。

現代建模軟體和計算平台的發展為水下噪音建模提供了強大的工具支持。商業軟體如 Bellhop、KRAKEN、RAM 等提供了成熟的聲學建模功能，這些軟體經過了廣泛的驗證和應用，具有較高的可靠性。開源軟體如 Acoustics Toolbox、Ocean Acoustics Library 等為研究人員提供了可定制的建模平台，支持算法創新和方法改進。高效能計算技術的應用使得大尺度、高解析度的建模成為可能，並行計算和 GPU 加速技術顯著提高了計算效率[45]。

模型驗證和不確定性分析是確保建模結果可靠性的重要程序。模型驗證需要將計算結果與實測資料進行比較，評估模型的預測精度和適用範圍。驗證資料通常包括受控實驗測量、海上試驗資料和標準測試案例等。不確定性分析需要考慮輸入參數的不確定性、模型誤差和數值誤差等多種來源，採用蒙特卡洛方法等統計技術評估預測結果的置信區間。敏感度分析能夠識別對建模結果影響最大的參數，指導觀測資源的優化配置和模型改進方向[46]。

4.2.1 射線追蹤方法 Ray Tracing Methods

射線追蹤方法作為海洋聲學中最直觀和廣泛應用的數值建模技術，基於幾何聲學理論將聲波傳播抽象為射線在變化介質中的軌跡追蹤問題。該方法的理論基礎源於 Fermat 原理和 Snell 定律，在高頻近似條件下能夠提供準確的聲場預測結果。射線追蹤方法的最大優勢在於其物理意義清晰、計算效率高且易於處理複雜的海洋環境結構，特別適用於遠距離聲波傳播和複雜地形環境的建模分析。然而，該方法在低頻條件和陰影區域的預測精度有限，需要結合其他方法形成完整的建模技術體系。

Bellhop 射線追蹤模型代表了該領域的技術標杆，由 Woods Hole 海洋研究所開發並持續改進，已成為國際海洋聲學界公認的標準工具。Bellhop 模型採用動態射線追蹤算法，能夠自動調整射線發射角度以確保目標區域的完整覆蓋，避免了傳統固定角度方法可能產生的計算空白區域。模型支援多種海洋環境配置，包括水深變化、聲速分層、海底斜坡和複雜邊界條件等。Bellhop 的核心算法基於四階 Runge-Kutta 數值積分方法，確保了射線軌跡計算的高精度和數值穩定性 [47]。

射線方程的數學推導基於 Hamilton 正則方程組，將聲線追蹤問題轉化為常微分方程組的求解。在二維柱對稱情況下，射線方程可以表示為：

$$dr/dt = (\partial H / \partial p_r), dz/dt = (\partial H / \partial p_z), dp_r/dt = -(\partial H / \partial r), dp_z/dt = -(\partial H / \partial z)$$

其中 H 為 Hamilton 函數，r 和 z 為水平和垂直座標， p_r 和 p_z 為對應的動量分量 [48]。這種數學描述不僅確保了射線追蹤的物理正確性，還提供了處理複雜環境結構的統一框架。

聲速場的精確描述是射線追蹤成功的關鍵前提。海洋聲速的分布受溫度、鹽度和壓力等因素影響，通常呈現複雜的三維結構。在實際應用中，聲速場往往透過實測資料插值或海洋模式輸出獲得。二維情況下，聲速可以表示為 $c(r,z)$ 的函數形式，三維情況則需要考慮方位角變化 $c(r,\theta,z)$ 。聲速梯度的計算精度直接影響射線軌跡的準確性，通常採用樣條插值或有限差分方法進行數值計算 [49]。

射線發射角度的選擇和優化是確保計算覆蓋範圍和精度的重要技術環節。傳統方法採用等間隔角度發射，但這種方法在某些環境條件下可能產生射線集中或稀疏的問題。自適應角度選擇算法根據環境結構和目標區域需求，動態調整射線發射角度，確保重要區域獲得足夠的射線密度。射線管理論基於相鄰射線間的能量分布，能夠計算聲場強度的空間分布，但需要考慮焦散線附近的數值奇異性

問題[50]。

海底和海面邊界條件的處理是射線追蹤方法的重要技術難點。海底邊界通常採用彈性邊界條件，需要考慮縱波和橫波的耦合效應。射線在彈性海底的反射和折射遵循 Snell 定律的推廣形式，需要計算複雜的反射係數和透射係數。海面邊界條件相對簡單，通常採用壓力釋放邊界條件或考慮表面粗糙度的散射效應。海面波浪對聲波傳播的影響可以透過統計描述方法處理，如採用海譜模型描述海面起伏的統計特性[51]。

多途效應的計算和分析是射線追蹤方法的重要應用領域。在分層海洋環境中，聲波通常沿多條路徑從聲源傳播到接收點，形成複雜的干涉現象。射線追蹤方法能夠識別和追蹤各條傳播路徑，計算相應的傳播時間、幾何擴散損失和邊界損失。多途聲場的合成需要考慮各射線的振幅和相位關係，通常採用相干或非相干合成方法。本徵射線方法能夠識別在給定環境條件下的穩定傳播模式，為聲場分析提供物理洞察[52]。

三維射線追蹤技術的發展滿足了複雜海洋環境建模的需求。三維環境中的聲速分布、海底地形和聲源/接收器的空間配置都可能影響聲波傳播。三維射線追蹤需要求解更複雜的射線方程組，計算量顯著增加。然而，現代高效能計算技術使得大尺度三維建模成為可能。 $N \times 2D$ 近似方法透過在不同方位角上進行二維計算，以較低的計算代價近似三維效應，在許多應用中提供了滿意的精度[53]。

射線追蹤方法的局限性和改進方向反映了該技術的發展趨勢。幾何聲學近似在低頻、強梯度和陰影區域的適用性有限，需要結合波動方法進行修正。高斯波束方法透過在射線周圍構造 Gaussian 波束，部分克服了傳統射線方法的不足。混合方法結合射線追蹤和其他數值方法的優勢，在不同頻率範圍和環境條件下選擇最適合的計算方法[54]。

現代射線追蹤軟體的功能擴展實現了技術應用的深入發展。除了基本的聲場計算功能外，現代軟體還包括反向射線追蹤、到達角分析、傳播損失預測、混響計算等高級功能。使用者界面的改善和預處理工具的完善降低了技術門檻，使得非專業使用者也能夠進行複雜的聲學建模。軟體的標準化和模組化設計促進了不同工具之間的整合和資料交換，提高了建模工作的效率和可靠性[55]。

4.2.2 正常模式方法 Normal Mode Methods

正常模式方法基於波導聲學理論，將海洋環境中的聲場表示為一系列正交模式函數的線性組合，為水下聲波傳播提供了嚴格的數學解析框架。該方法的理

論基礎源於 Sturm-Liouville 理論和分離變數技術，特別適用於水平分層海洋環境中的聲場計算。正常模式方法在低頻聲波傳播和遠距離預測方面具有顯著優勢，能夠準確處理波導效應、模式耦合和色散現象等複雜物理過程。作為精確的波動理論方法，正常模式分析為海洋聲學研究提供了重要的理論工具和數值驗證標準。

KRAKEN 正常模式模型作為該領域的代表性軟體，由 Michael Porter 開發並廣泛應用於海洋聲學研究和工程實踐。KRAKEN 模型採用有限差分方法離散波動方程，透過本徵值求解算法計算海洋波導的正常模式。模型支援任意的聲速分層結構、複雜的海底模型和多種邊界條件，能夠處理彈性海底、粘彈性衰減和非線性效應等高級物理過程。KRAKEN 的數值算法經過了嚴格的數學驗證和廣泛的實際應用測試，在國際海洋聲學界享有很高的聲譽[56]。

Helmholtz 方程的分離變數求解過程構成了正常模式理論的數學基礎。在柱座標系統中，聲壓場可以表示為 $p(r,z) = \sum_n A_n \psi_n(z) H_n^{(1)}(k_m r)$ 的形式，其中 $\psi_n(z)$ 為垂直模式函數， $H_n^{(1)}$ 為第一類 Hankel 函數， k_m 為水平波數。垂直模式函數滿足 Sturm-Liouville 本徵值方程： $d/dz[1/\rho(z) d\psi_n/dz] + [k_0^2/c^2(z) - k_m^2/\rho(z)]\psi_n = 0$ ，其中 $\rho(z)$ 為密度分布， $c(z)$ 為聲速分布， k_0 為自由空間波數[57]。這種數學描述不僅提供了嚴格的理論基礎，還為數值計算提供了明確的算法框架。

本徵值和本徵函數的數值計算是正常模式方法的核心技術環節。有限差分方法將連續的微分方程離散為代數方程組，形成廣義本徵值問題 $Ax = \lambda Bx$ ，其中 A 和 B 為係數矩陣， λ 為本徵值， x 為本徵向量。數值穩定性和計算精度是算法設計的主要考慮因素，需要選擇適當的差分格式和網格密度。QZ 算法等現代本徵值求解方法提供了高效可靠的數值解決方案，能夠處理大規模稠密矩陣的本徵值問題[58]。

模式數的選擇和截斷誤差分析是確保計算精度的重要技術問題。理論上，完整的模式級數能夠精確表示聲場，但實際計算中只能保留有限數量的模式。模式截斷準則通常基於模式的衰減率或能量貢獻，保留那些對目標頻率和距離範圍有顯著貢獻的模式。漏失模式 (leaky modes) 在某些環境條件下可能對聲場產生重要影響，特別是在海底為軟沉積物的情況下。連續譜的貢獻在短距離和高頻條件下不可忽略，需要採用特殊的數值技術進行處理[59]。

海底邊界條件的精確建模是正常模式方法準確性的關鍵要素。剛性邊界條件假設海底為無限硬邊界，數學處理簡單但物理上不夠準確。壓力釋放邊界條件適用於極軟海底，但同樣是理想化近似。彈性邊界條件考慮海底的彈性性質，需

要同時處理縱波和橫波，數學複雜度顯著增加。多層海底模型能夠描述海底的分層結構，但計算量相應增加。阻抗邊界條件提供了一種實用的折衷方案，透過複數阻抗參數綜合描述海底的聲學特性[60]。

距離相關環境的處理是正常模式方法面臨的重要挑戰。標準正常模式方法假設環境參數在水平方向上保持不變，但實際海洋環境往往具有顯著的水平變化。絕熱模式理論假設環境變化緩慢，模式在傳播過程中保持其垂直結構不變，只有水平波數發生調整。耦合模式理論則考慮環境變化引起的模式間耦合效應，需要求解複雜的耦合微分方程組。單向傳播方程等近似方法在某些條件下能夠有效處理距離相關問題[61]。

非線性效應和衰減機制的建模擴展了正常模式方法的應用範圍。海水的粘性衰減可以透過複數聲速進行描述，但需要考慮頻率相關性。海底沉積物的粘彈性衰減通常更為顯著，需要採用複雜的衰減模型。非線性效應在高強度聲場中可能變得重要，需要修正線性波動方程。散射效應包括粗糙界面散射、體積非均勻性散射等，可以透過統計方法或確定性方法進行建模[62]。

三維和方位耦合效應的處理是正常模式方法發展的重要方向。標準的二維柱對稱模型無法描述真實三維環境的複雜性。方位耦合模式理論考慮環境的方位變化，將聲場展開為方位模式的級數。三維正常模式方法需要求解三維本徵值問題，計算複雜度顯著增加。 $N \times 2D$ 近似方法透過在不同方位角上進行二維計算，以較低的代價近似三維效應。水平射線方法結合了射線追蹤和正常模式的優勢，在處理三維問題時顯示出良好的效率和精度[63]。

現代正常模式軟體的發展趨勢實現了理論研究與工程應用的結合。除了 KRAKEN 外，還有 ORCA、PROSIM 等多個正常模式軟體包，每個軟體都有其特定的優勢和應用領域。軟體的使用者友善性不斷改善，預處理和後處理工具的完善降低了使用門檻。並行計算和高效能計算技術的應用顯著提高了大規模問題的求解能力。軟體的標準化和互操作性促進了不同工具之間的整合和資料交換[64]。

4.2.3 拋物方程方法 Parabolic Equation Methods

拋物方程方法作為海洋聲學數值建模的重要技術，透過對 Helmholtz 方程的拋物近似處理，將三維聲波傳播問題簡化為更易求解的二維問題，在處理距離相關環境和寬角度傳播方面具有獨特優勢。該方法的核心思想是假設聲波主要沿某個優勢方向（通常是水平方向）傳播，並將反向散射效應視為次要因素加以忽

略。拋物方程方法在中等頻率範圍和中遠距離傳播預測中表現出色，特別適用於處理複雜的海洋環境變化和邊界效應，已成為海洋聲學建模工具箱中不可或缺的重要組成部分。

RAM (Range-dependent Acoustic Model) 拋物方程模型代表了該技術領域的先進水準，由 Naval Research Laboratory 開發並持續改進。RAM 模型採用分步傅立葉變換算法，能夠高效處理距離相關的海洋環境，支援複雜的海底地形和聲速分布。模型的核心算法基於 Padé 近似理論，能夠處理較大的傳播角度，克服了標準拋物方程方法在大角度傳播方面的限制。RAM 模型還包括了高級的邊界處理技術和數值穩定化方法，確保了計算結果的準確性和可靠性[65]。

拋物方程的數學推導基於 Helmholtz 方程的分解和近似處理。標準的 Helmholtz 方程 $\nabla^2 p + k^2 n^2 p = 0$ 可以分解為 $(\partial^2/\partial r^2 + \partial^2/\partial z^2 + k^2 n^2)p = 0$ 的形式，其中 $n(r,z) = c_0/c(r,z)$ 為折射率。透過引入慢變振幅近似 $p(r,z) = \psi(r,z)e^{i(k_0 r)}$ 和忽略二階導數項 $\partial^2 \psi/\partial r^2$ ，可以得到標準拋物方程： $2ik_0 \partial \psi/\partial r = \partial^2 \psi/\partial z^2 + k_0^2 (n^2 - 1)\psi$ 。這種近似處理的有效性依賴於聲波主要沿 r 方向傳播且環境變化相對緩慢的假設條件[66]。

寬角度拋物方程的發展克服了標準方法在大角度傳播方面的限制。Claerbout 方程和其他高階近似方程能夠處理更大的傳播角度，擴展了方法的適用範圍。Padé 近似技術透過有理函數近似平方根運算子，提供了系統的寬角度處理方法。不同階數的 Padé 近似對應不同的角度範圍，需要根據具體應用需求選擇合適的近似階數。寬角度方程的數值實現通常更為複雜，需要採用隱式差分格式或分步算法[67]。

分步傅立葉變換 (Split-Step Fourier, SSF) 算法是拋物方程數值求解的高效方法。該算法將每個距離步進分解為兩個子步驟：首先在波數域處理折射效應，然後在空間域處理散射效應。這種算法分離的處理方式不僅提高了計算效率，還改善了數值穩定性。SSF 算法的精度主要取決於距離步長的選擇，通常要求步長小於聲場相干長度以確保計算精度。快速傅立葉變換 (FFT) 的應用使得算法具有 $O(N \log N)$ 的計算複雜度，顯著提高了大規模問題的求解效率[68]。

有限差分方法為拋物方程提供了另一種重要的數值求解途徑。顯式差分格式計算簡單但穩定性條件嚴格，隱式差分格式穩定性好但需要求解線性方程組。Crank-Nicolson 格式等隱式方法在拋物方程求解中得到廣泛應用，能夠確保良好

的數值穩定性和較高的計算精度。有限差分方法在處理複雜邊界條件和不規則計算域方面具有優勢，但計算效率通常低於分步傅立葉方法。混合方法結合了兩種算法的優勢，在不同的計算區域採用不同的數值方法[69]。

邊界條件的精確處理是拋物方程方法成功應用的關鍵技術要素。海面邊界通常採用壓力釋放條件或阻抗邊界條件，數學處理相對簡單。海底邊界條件更為複雜，需要考慮海底的彈性性質和衰減特性。自相容邊界條件透過迭代算法確保邊界處的連續性，但計算代價較高。人工邊界層和完全匹配層（PML）技術被廣泛應用於減少計算域邊界的人工反射，確保開放邊界條件的有效實現[70]。

環境參數化和網格設計直接影響拋物方程計算的準確性和效率。聲速場的準確描述需要考慮測量資料的插值和平滑處理，避免人為的不連續性導致數值問題。垂直網格的設計需要平衡計算精度和計算效率，通常要求每個波長包含 10-20 個網格點。距離步長的選擇需要滿足穩定性條件和精度要求，自適應步長控制能夠在保證精度的前提下提高計算效率。不規則地形的處理需要採用座標變換或階梯近似等技術[71]。

三維效應和方位耦合的處理是拋物方程方法發展的重要方向。 $N \times 2D$ 方法透過在不同方位角上進行二維計算來近似三維效應，是一種計算效率較高的處理方式。真正的三維拋物方程方法需要處理兩個橫向座標，計算複雜度顯著增加。水平折射效應在某些環境條件下可能變得重要，需要採用專門的算法進行處理。方位耦合模式理論提供了處理三維問題的理論框架，但實際應用中仍面臨計算效率的挑戰[72]。

非線性效應和高階修正項的考慮擴展了拋物方程方法的應用範圍。標準線性理論在高聲強條件下可能不夠準確，需要考慮非線性修正。頻散效應和衰減機制可以透過複數聲速或修正的波動方程進行描述。隨機介質中的聲波傳播需要採用統計方法處理環境參數的隨機性。多頻處理技術能夠同時計算多個頻率成分，提高寬頻信號建模的效率[73]。

現代拋物方程軟體的發展實現了理論進展與工程需求的結合。除了 RAM 外，還有 FOR3D、COUPLE、MMPE 等多個拋物方程軟體包，每個軟體都有其特定的功能特點和優勢領域。軟體的模組化設計和標準化介面促進了不同工具之間的整合。並行計算技術的應用使得大規模三維建模成為可能。圖形使用者介面和視覺化工具的完善提高了軟體的易用性和結果的可解釋性[74]。

4.3 GIS 與空間分析 GIS and Spatial Analysis

地理資訊系統（Geographic Information System, GIS）與空間分析技術在水下噪音評估領域的應用代表了海洋聲學研究向數位化、可視化和智慧化方向發展的重要趨勢。GIS 技術為水下噪音研究提供了強大的空間資料管理、分析和展示平台，能夠整合多源異質資料，支援複雜的空間分析和決策支援功能。現代 GIS 技術結合了電腦科學、地理學、製圖學和統計學等多學科的理論方法，形成了適用於海洋環境的專業化技術體系。在水下噪音領域，GIS 不僅是資料管理工具，更是科學分析和政策制定的重要支撐平台，為海洋聲景保護和永續發展提供了技術基礎。

海洋 GIS 系統的架構設計需要考慮海洋環境的特殊性和水下噪音資料的複雜性。海洋環境具有三維空間結構、動態時變特徵和多尺度效應等特點，需要專門的資料模型和分析方法。水下噪音資料涵蓋了聲學測量、環境參數、生物分布、人類活動等多個層面，資料類型包括點資料、線資料、面資料和體資料等多種形式。現代海洋 GIS 系統通常採用多層架構設計，包括資料層、服務層、應用層和使用者介面層，確保系統的可擴展性和互操作性[75]。

空間資料模型是 GIS 系統的核心組成部分，直接影響系統的功能和效能。向量資料模型適用於描述離散的空間物件，如聲源位置、測量站點、船舶航線等。網格（柵格）資料模型適用於描述連續變化的空間現象，如聲場分布、水深地形、環境參數等。三維資料模型能夠描述海洋環境的立體結構，支援體積化的聲場分析。時空資料模型則考慮了時間維度，能夠處理動態變化的噪音現象。現代 GIS 系統通常採用混合資料模型，整合不同模型的優勢[76]。

座標參考系統的選擇和轉換是海洋 GIS 應用的基礎技術問題。海洋環境具有大尺度和球面特徵，需要選擇適當的地圖投影和座標系統。UTM（Universal Transverse Mercator）投影系統在區域性海洋應用中得到廣泛使用，能夠在保持較小變形的同時提供笛卡爾座標系的便利。球面座標系統適用於全球尺度的海洋分析，但需要考慮球面三角學的複雜計算。垂直座標系統需要考慮海面高程、潮汐變化和深度基準面等因素。現代 GIS 軟體通常支援多種座標系統的自動轉換，簡化了資料整合的技術難度[77]。

海洋環境資料的獲取和整合是建立 GIS 資料庫的關鍵工作。水深測量資料可以透過多波束測深、衛星測高和海圖數位化等方式獲得，需要進行品質控制和精度評估。海洋環境資料包括溫度、鹽度、流速、波浪等參數，通常透過現場觀

測、數值模式和遙感監測等途徑獲得。生物分布資料涵蓋海洋哺乳動物、魚類和其他海洋生物的棲息地資訊，需要整合多種調查方法的結果。人類活動資料包括船舶交通、海洋工程、軍事活動等，需要考慮資料的時效性和機密性問題[78]。

空間插值和建模技術為連續空間現象的分析提供了數學工具。克里金插值（Kriging）方法基於地統計學理論，能夠提供最佳線性無偏估計和誤差評估。反距離權重（IDW）方法計算簡單但精度有限，適用於資料密度較高的情況。樣條插值方法能夠產生平滑的曲面，適用於地形和聲場的建模。趨勢面分析能夠識別和分離區域性趨勢和局部變化。現代插值方法還考慮了各向異性、非平穩性和不確定性等複雜因素[79]。

聲場分析和建模是水下噪音 GIS 應用的核心功能。聲場的三維視覺化需要考慮透明度、色彩映射和等值面等技術，確保複雜資訊的清晰表達。傳播損失建模整合了聲學理論和環境資料，預測聲波在複雜海洋環境中的傳播特性。噪音累積分析考慮多個聲源的疊加效應，評估區域性噪音環境的總體水準。時變分析能夠追蹤噪音環境的動態變化，識別長期趨勢和週期性變化。統計分析功能支援噪音資料的分布特徵分析和異常值檢測[80]。

4.3.1 海洋聲景製圖 Marine Soundscape Mapping

海洋聲景製圖作為海洋聲學和地理資訊科學交叉融合的新興技術領域，致力於建立海洋聲環境的空間分布圖景，為海洋生態保護和聲環境管理提供科學的決策依據。聲景製圖不僅涉及聲學參數的空間分析，更需要整合生物學、生態學和海洋學等多學科知識，建立綜合的海洋聲環境評估框架。現代聲景製圖技術結合了先進的聲學測量技術、高解析度環境建模和智慧化資料分析方法，能夠在不同的時空尺度上描述海洋聲環境的複雜特徵，為保護海洋生物的聲學棲息地提供科學支撐。

聲景概念的科學內涵實現了從單純噪音評估向生態系統聲環境評估的重要轉變。海洋聲景包括所有存在於特定海洋環境中的聲音，涵蓋了生物聲（biophony）、地球物理聲（geophony）和人為聲（anthropophony）三個主要組成部分。生物聲包括海洋哺乳動物的鳴叫、魚類的發聲、甲殼類的咔嚓聲等，反映了海洋生態系統的活力和多樣性。地球物理聲包括風浪噪音、降雨聲、地震聲等自然環境產生的聲音。人為聲則包括船舶噪音、海洋工程噪音、軍事聲納等人類活動產生的聲音[81]。聲景製圖需要識別和分析這些不同聲音成分的空間分布特徵和相互作用關係。

聲景指數體系的建立為定量化聲環境評估提供了標準化工具。聲學複雜度指數 (Acoustic Complexity Index, ACI) 透過分析聲譜的時變特徵來評估聲環境的複雜程度，通常與生物多樣性存在正相關關係。歸一化差異聲景指數 (Normalized Difference Soundscape Index, NDSI) 透過比較生物聲頻段和人為聲頻段的能量比例來評估人為干擾程度。聲學豐富度指數 (Acoustic Richness Index) 考慮聲譜的頻率範圍和能量分布，反映聲環境的豐富程度。生物聲學指數 (Bioacoustic Index) 專門量化生物聲的強度和頻率分布特徵[82]。這些指數的空間分析和製圖為海洋保護區劃分和管理提供了科學依據。

長期聲學監測網路的建設是聲景製圖的基礎資料來源。現代水下聲學監測系統通常採用自主式水下錄音器 (Autonomous Underwater Recorder) 進行長期連續監測，監測週期從數月到數年不等。監測網路的設計需要考慮空間代表性、時間覆蓋度和成本效益等多個因素。固定式監測站點提供長期穩定的資料，但空間覆蓋有限。移動式監測平台如 AUV 和滑翔機能夠擴大空間覆蓋範圍，但資料的時間連續性有限。被動聲學監測 (Passive Acoustic Monitoring, PAM) 技術的發展使得大規模、長期的海洋聲環境監測成為可能[83]。

聲學資料的自動化處理和分析是聲景製圖的關鍵技術環節。長期連續監測產生的海量聲學資料需要採用自動化方法進行處理和分析。機器學習技術如支援向量機 (SVM)、隨機森林和深度學習等方法被廣泛應用於聲音分類和識別。頻譜分析技術包括短時傅立葉變換 (STFT)、小波變換和 Mel 頻率倒譜係數 (MFCC) 等，為特徵提取提供了多樣化的選擇。信號檢測算法能夠自動識別特定類型的聲音事件，如海洋哺乳動物的鳴叫或船舶通過等[84]。

環境參數與聲學特徵的相關性分析揭示了聲景形成的環境機制。海洋環境因子如水深、海底類型、水體分層、潮流等都會影響聲波傳播和聲景特徵。生物分布因子如葉綠素濃度、浮游生物密度、魚類豐度等與生物聲的空間分布密切相關。氣象海況因子如風速、波高、降雨等直接影響地球物理聲的強度。人類活動因子如船舶密度、港口距離、海洋工程等決定了人為聲的分布模式。多元統計分析和機器學習方法能夠建立環境參數與聲學特徵之間的預測模型[85]。

時空動態分析技術揭示了海洋聲景的變化規律和驅動機制。日週期變化反映了海洋生物的晝夜行為模式和潮汐影響。季節性變化與生物的繁殖週期、洄游模式和環境條件變化相關。年際變化可能反映氣候變化、人類活動強度變化和生態系統演替等長期過程。極端事件如颱風、地震、船舶事故等會對聲景產生突發

性影響。時間序列分析、週期性分析和趨勢分析等統計方法為聲景動態研究提供了分析工具[86]。

三維聲景建模技術考慮了海洋環境的立體結構特徵。不同深度層的聲學環境可能存在顯著差異，反映了海洋生物的垂直分布模式和聲波傳播特性。深海聲學環境通常較為安靜，主要受遠距離低頻聲源影響。中層水域是許多海洋生物的主要活動區域，生物聲較為豐富。表層水域受海面噪音影響較大，但也是海洋哺乳動物的重要活動區域。三維插值和體積化視覺化技術為立體聲景分析提供了技術支援[87]。

聲景品質評估方法為海洋環境管理提供了評估標準。自然度指數評估聲景的自然程度，通常透過比較人為聲和自然聲的比例來計算。多樣性指數評估聲景的豐富程度，借鑒了生態學中的多樣性概念。穩定性指數評估聲景的時間變異性，反映環境的穩定程度。連通性指數評估不同區域聲景的相似性和連續性，對於海洋保護區的規劃具有重要意義。這些評估指標的空間分析為海洋保護政策制定提供了定量依據[88]。

聲景製圖結果的應用和管理意涵實現了科學研究與政策實踐的結合。海洋保護區的劃分需要考慮重要聲學棲息地的保護，聲景製圖為保護區邊界確定提供了科學依據。船舶航線規劃可以透過避開聲敏感區域來減少對海洋生物的干擾。海洋工程的環境影響評估需要考慮對聲景的影響，聲景製圖為影響預測和緩解措施設計提供了基礎資料。氣候變化對海洋聲景的影響評估需要長期的監測資料和趨勢分析[89]。

技術標準和品質控制體系確保了聲景製圖結果的科學性和可靠性。聲學資料的品質控制包括設備校正、資料驗證和異常值處理等程序。製圖精度評估需要透過交叉驗證、獨立驗證等方法進行。不確定性分析需要考慮測量誤差、建模誤差和時空變異性等因素。標準化的資料格式和後設資料確保了資料的互操作性和可重複使用性。國際標準化組織正在制定相關的技術標準，為聲景製圖的標準化發展提供了指導[90]。

4.3.2 水下噪音分布視覺化 Underwater Noise Distribution Visualization

水下噪音分布視覺化技術作為海洋聲學研究和環境管理的重要工具，透過先進的圖形技術和資料視覺化方法，將複雜的三維聲場資料轉化為直觀易懂的圖形表示，為科學研究、政策制定和公眾教育提供有效的交流媒介。現代視覺化技術不僅需要準確表達聲學資料的科學內涵，還需要考慮視覺認知規律、色彩心理

學和資訊設計原理，建立符合使用者需求的視覺化系統。隨著虛擬現實、擴增實境和互動式視覺化技術的發展，水下噪音視覺化正朝著更加沉浸式、互動式和智慧化的方向演進。

二維視覺化技術為平面聲場分析提供了基礎的表達方式。等值線圖（Contour Map）透過連接相同聲壓級的點形成等值線，能夠清晰顯示聲場的空間梯度和分布模式。填色圖（Filled Contour Map）在等值線的基礎上增加了色彩填充，提高了視覺對比度和資訊密度。熱力圖（Heatmap）採用連續的色彩映射表示聲強分布，能夠直觀反映聲場的能量集中區域。向量場圖能夠同時顯示聲強大小和傳播方向，適用於聲波傳播路徑的分析。這些基礎視覺化方法各有特點，需要根據具體的分析目的和使用者需求進行選擇[91]。

三維視覺化技術為立體聲場分析提供了更加豐富的表達手段。等值面（Isosurface）技術透過三維曲面表示特定聲壓級的空間分布，能夠直觀展示聲場的三維結構。體積渲染（Volume Rendering）技術透過透明度和色彩映射顯示整個聲場的內部結構，適用於複雜聲場的綜合分析。切片視覺化技術透過在三維聲場中設定任意切面來顯示局部特徵，提供了靈活的分析視角。粒子系統可以模擬聲波傳播的動態過程，增強了視覺化的動態表現力。現代圖形處理單元（GPU）的發展為高品質三維視覺化提供了強大的硬體支撐[92]。

色彩設計和映射策略直接影響視覺化效果的準確性和可讀性。科學視覺化通常採用感知均勻的色彩空間，如 LAB 色彩空間或 HSV 色彩空間，確保色彩變化與數據變化的一致性。彩虹色彩映射雖然視覺豐富但可能產生視覺假象，現代科學視覺化更傾向於使用單色調或雙色調映射。對於聲壓級等對數量，通常採用對數色彩映射以反映人類聽覺的對數特性。色盲友善的色彩設計考慮了視覺障礙使用者的需求，通常避免使用紅綠色彩組合。動態色彩映射能夠根據資料範圍自動調整色彩映射，提高視覺效果的適應性[93]。

時間動畫和動態視覺化技術為時變聲場分析提供了有效工具。時間序列動畫能夠展示聲場隨時間的演化過程，揭示聲波傳播的動態特徵。循環動畫適用於週期性現象的顯示，如潮汐對聲場的影響。交互式時間控制允許使用者自由調整播放速度和時間範圍，提供靈活的分析能力。多時刻對比視覺化能夠同時顯示不同時刻的聲場狀態，便於比較分析。時間軸設計需要考慮時間解析度和播放流暢性的平衡，確保動畫的科學性和觀賞性[94]。

交互式視覺化技術增強了使用者與資料的互動體驗。縮放和平移功能允許

使用者在不同尺度上探索聲場資料，從全域概覽到局部細節。查詢和選擇功能支援使用者獲取特定位置的詳細資訊，如精確的聲壓級數值和頻譜特徵。多視圖聯動技術能夠在多個視窗中同步顯示不同視角或不同參數的資料，提供綜合的分析視角。參數調整介面允許使用者即時修改視覺化參數，如色彩映射、透明度和閾值等。觸控和手勢操作為移動設備上的視覺化提供了直觀的交互方式[95]。

多尺度視覺化技術處理了海洋環境從區域到全球的尺度差異。概覽加細節（**Overview + Detail**）模式在主視窗顯示全域資訊的同時，在附加視窗顯示局部細節。多解析度金字塔技術透過預計算不同解析度的資料層次，支援流暢的縮放操作。語義縮放技術根據顯示尺度自動調整視覺化內容和詳細程度，避免資訊過載。集中化顯示技術將複雜的資料聚合為簡化的視覺元素，提高大尺度視覺化的效率。地理背景資訊如海岸線、水深等的整合為聲學資料提供了空間參考框架[96]。

不確定性視覺化技術處理了測量和建模過程中的不確定性問題。誤差棒和置信區間的顯示為點資料提供了不確定性資訊。模糊邊界和漸變效果能夠表示空間插值的不確定性。多模型對比視覺化能夠同時顯示不同模型的預測結果，幫助使用者理解模型差異。敏感度分析結果的視覺化揭示了參數變化對結果的影響程度。概率分布的視覺化如盒形圖和小提琴圖為統計不確定性提供了直觀表示。這些技術的應用提高了科學視覺化的誠實性和可信度[97]。

網路化和合作視覺化平台支援了分散式的科學研究和決策制定。網頁基礎的視覺化技術如 **WebGL** 和 **D3.js** 為線上視覺化提供了強大功能。雲端計算平台支援大規模資料的即時視覺化處理。合作標註功能允許多個使用者在同一視覺化介面上添加註釋和討論。版本控制和歷史記錄功能支援視覺化結果的追蹤和管理。行動裝置適配技術確保視覺化內容在不同設備上的正常顯示。這些技術的發展促進了科學資料的開放共享和合作研究[98]。

虛擬現實和擴增實境技術為沉浸式聲場體驗提供了新的可能性。VR 環境中的三維聲場視覺化能夠提供身臨其境的體驗，特別適用於教育和培訓應用。AR 技術能夠將聲學資料疊加在真實海洋環境上，支援現場調查和實時監測。空間音效技術結合視覺和聽覺資訊，提供更加真實的聲景體驗。手勢和語音控制技術為沉浸式環境提供了自然的交互方式。這些新興技術雖然仍在發展階段，但展現出巨大的應用潛力[99]。

標準化和互操作性是視覺化技術推廣應用的重要考慮因素。國際標準如 **ISO**

19107 (空間結構) 和 OGC 標準為地理空間資料的視覺化提供了規範。資料交換格式如 NetCDF、HDF5 等確保了不同系統間的資料互操作。視覺化結果的輸出格式需要考慮印刷出版、網路發布和演示報告等不同需求。品質評估指標如視覺化準確性、使用者滿意度和任務完成度為視覺化系統的改進提供了量化依據。開源軟體和標準化工具降低了視覺化技術的應用門檻[100]。

4.3.3 空間資料整合與管理 Spatial Data Integration and Management

空間資料整合與管理是水下噪音 GIS 應用的核心技術基礎，涉及多源異質資料的標準化處理、品質控制、儲存管理和服務發布等全生命週期過程。海洋聲學研究中的空間資料具有來源多樣、格式複雜、尺度差異大、時效性強等特點，需要建立專業化的資料管理體系來確保資料的準確性、一致性和可用性。現代空間資料管理技術整合了資料庫技術、地理資訊科學、網路技術和雲端計算等多個領域的最新進展，形成了支援大規模、分散式、合作式科學研究的資料基礎設施。

空間資料庫設計是資料管理系統的核心架構基礎。關聯式資料庫如 PostgreSQL 結合 PostGIS 擴展提供了強大的空間資料處理能力，支援複雜的空間查詢和分析操作。物件導向資料庫能夠更好地表示複雜的空間物件和關係，但查詢效率相對較低。NoSQL 資料庫如 MongoDB 適用於處理大規模非結構化空間資料，在大資料應用中顯示出優勢。時空資料庫專門針對時變空間資料的儲存和查詢進行最佳化，支援時間序列和軌跡資料的高效處理。現代資料庫系統通常採用混合架構，整合不同類型資料庫的優勢[101]。

資料模型和標準化是確保資料互操作性的關鍵要素。國際標準如 ISO 19100 系列和 OGC (Open Geospatial Consortium) 標準為空間資料的建模和交換提供了規範框架。簡單要素模型 (Simple Features) 定義了基本的幾何物件類型和操作方法。Coverage 模型適用於連續空間現象如聲場分布的描述。感測器網模型 (SensorML) 專門針對感測器資料的描述和管理。語義網技術透過本體論 (Ontology) 和關聯資料 (Linked Data) 技術實現資料的語義互操作。這些標準化工作為跨系統、跨機構的資料整合奠定了基礎[102]。

多源資料整合面臨著格式轉換、座標統一、精度匹配等技術挑戰。資料格式轉換需要處理不同軟體和系統產生的多種資料格式，如 Shapefile、GeoTIFF、NetCDF、HDF 等。座標參考系統的統一需要進行精確的座標轉換，避免因投影變形造成的定位誤差。空間解析度的匹配需要採用重採樣、插值或聚合等方法統一資料的空間細節程度。時間基準的統一需要考慮不同時間系統和時區的差異。

屬性資料的標準化需要建立統一的資料字典和編碼體系。現代 GIS 軟體通常提供自動化的資料整合工具，但仍需要人工審核和品質控制[103]。

資料品質控制和驗證是確保資料可靠性的重要程序。空間精度驗證透過比較已知控制點的座標來評估資料的定位準確性。屬性精度驗證透過交叉比對和邏輯檢查來識別資料錯誤。完整性檢查確認資料集是否包含所需的全部要素和屬性。一致性檢查驗證不同資料集之間的邏輯關係和相容性。時效性評估確認資料的更新狀態和有效期限。統計品質控制方法如控制圖和假設檢驗為品質評估提供了定量工具。自動化品質控制系統能夠即時監測資料品質並產生警告資訊[104]。

後設資料 (Metadata) 管理為資料的發現、評估和使用提供了重要支撐。描述性後設資料包括資料的內容、範圍、精度、來源等基本資訊。結構性後設資料描述資料的組織方式和內部關係。管理性後設資料記錄資料的版本、權限、使用歷史等管理資訊。技術性後設資料包含資料格式、編碼、壓縮等技術細節。標準化的後設資料格式如 ISO 19115 和 Dublin Core 確保了後設資料的互操作性。自動化後設資料擷取技術能夠從資料檔案中自動提取部分後設資料，減少人工工作量[105]。

大資料技術在海洋聲學資料管理中的應用日益重要。分散式檔案系統如 HDFS 能夠處理 PB 級的大規模資料集。MapReduce 和 Spark 等並行計算框架支援大規模空間資料的分散式處理。記憶體計算技術顯著提高了空間查詢和分析的效率。流資料處理技術支援即時感測器資料的處理和分析。雲端儲存服務提供了可擴展的儲存解決方案，降低了資料管理的成本。這些技術的應用使得海量海洋聲學資料的管理和分析成為可能[106]。

資料安全和隱私保護在軍事和商業應用中尤為重要。存取控制機制透過身份驗證和授權管理確保只有合法使用者能夠存取敏感資料。資料加密技術保護資料在傳輸和儲存過程中的安全性。差分隱私技術能夠在保護個體隱私的同時提供統計資訊。資料脫敏和匿名化技術去除或模糊敏感資訊。審計日誌記錄所有資料存取和操作活動，支援安全監控和合規檢查。分級安全模型為不同敏感級別的資料提供了差異化的保護措施[107]。

資料服務和共享平台促進了科學資料的開放利用。Web 地圖服務 (WMS) 提供了標準化的地圖發布介面。Web 要素服務 (WFS) 支援向量空間資料的查詢和下載。Web 覆蓋服務 (WCS) 專門處理柵格資料的服務發布。Web 處理服務 (WPS) 提供了標準化的地理資訊處理介面。RESTful API 為現代 Web 應用提供

了靈活的資料存取方式。開放資料倡議推動了科學資料的免費開放，但需要平衡開放性和智慧財產權保護[108]。

資料生命週期管理考慮了資料從產生到銷毀的全過程。資料獲取階段需要建立標準化的資料收集和入庫程序。資料處理階段包括清理、轉換、整合等操作，需要記錄處理歷程。資料儲存階段需要考慮儲存策略、備份方案和災難恢復。資料使用階段需要提供便捷的查詢、分析和視覺化工具。資料歸檔階段需要考慮長期保存和格式遷移問題。資料銷毀階段需要確保敏感資料的安全清除。這種全生命週期的管理方法確保了資料價值的最大化利用[109]。

互操作性和標準化是現代資料管理系統的重要特徵。技術互操作性透過標準化的資料格式和介面協定實現系統間的資料交換。語義互操作性透過共同的資料模型和本體論實現資料含義的一致理解。組織互操作性透過合作協定和政策框架實現機構間的資料共享。服務導向架構（SOA）為分散式系統的整合提供了技術框架。微服務架構透過鬆散耦合的服務組合提供靈活的系統架構。容器化技術如 Docker 為服務的部署和管理提供了標準化解決方案[110]。

4.4 大數據與人工智慧應用 Big Data and Artificial Intelligence Applications

大數據與人工智慧技術在水下噪音評估領域的應用代表了海洋聲學研究方法論的重大革新，透過機器學習、深度學習、資料探勘等先進技術，從海量聲學資料中挖掘隱藏的模式和規律，為傳統基於物理模型的研究方法提供了強有力的補充和延伸。現代海洋聲學監測系統產生的連續、多維、大規模資料集為人工智慧技術的應用提供了豐富的資料基礎，而計算能力的飛躍發展和算法理論的不斷完善使得複雜聲學問題的智慧化處理成為現實。這一技術融合不僅提高了聲學分析的效率和準確性，更開闢了聲景生態學、智慧化環境監測和預測性海洋管理等新的研究領域。

海洋聲學大數據的特徵實現了"4V"特性：體量（Volume）、速度（Velocity）、多樣性（Variety）和真實性（Veracity）。體量特徵表現為現代水下聲學監測系統每天可產生 TB 級的原始資料，長期連續監測更是累積了 PB 級的資料存量。速度特徵實現在即時監測資料的快速產生和處理需求，特別是在緊急事件響應和即時決策支援中。多樣性特徵包括不同類型的聲學資料（時域、頻域、時頻域）、環境資料、生物資料和人類活動資料的整合。真實性特徵則關注資料品質、測量不確定性和資料完整性問題[111]。這些特徵決定了傳統資料處理方法的局限性，

需要專門的大數據技術進行處理。

機器學習技術為聲學資料的模式識別和分類提供了強大工具。監督學習方法如支援向量機 (SVM)、隨機森林和梯度提升等在聲音分類任務中表現出色，能夠自動識別不同類型的水下聲源。無監督學習方法如聚類分析和主成分分析能夠從未標記資料中發現隱藏的結構和模式，對於探索性資料分析特別有價值。半監督學習結合了標記和未標記資料的優勢，在標記資料稀缺的情況下仍能獲得良好的效能。強化學習技術在自適應監測策略和最佳化決策中展現出潛力，能夠根據環境反饋調整監測參數和策略[112]。

深度學習技術的革命性進展為複雜聲學問題的解決提供了新的途徑。卷積神經網路 (CNN) 特別適合處理聲譜圖等二維聲學資料，能夠自動學習聲學特徵的層次結構。循環神經網路 (RNN) 和長短期記憶網路 (LSTM) 擅長處理時間序列聲學資料，能夠捕捉聲音的時間依賴特性。注意力機制和 Transformer 架構為長序列聲學資料的處理提供了高效解決方案。生成對抗網路 (GAN) 能夠合成逼真的聲學資料，為資料增強和異常檢測提供新的方法。這些深度學習模型的端到端學習能力顯著降低了特徵工程的複雜度[113]。

自動化聲音分類和識別系統為大規模聲學監測提供了技術支撐。海洋生物聲音的自動識別需要處理物種間的聲學差異和種內的個體變異。船舶噪音的自動分類需要區分不同船型、推進方式和航行狀態的聲學特徵。海洋環境聲音如風浪、降雨、地震等的自動識別為環境監測提供了有效工具。多標籤分類技術能夠同時識別複合聲景中的多種聲音成分。線上學習和增量學習技術支援模型的持續更新和改進，適應新的聲音類型和環境條件。分層分類和元學習方法為聲音分類的泛化能力提供了技術路徑[114]。

異常檢測和早警系統為海洋環境監測提供了智慧化手段。統計異常檢測方法基於歷史資料的統計特徵識別異常模式，適用於檢測環境基線的偏離。基於機器學習的異常檢測能夠學習複雜的正常模式，識別微妙的異常變化。深度學習的自編碼器技術透過重構誤差檢測異常，在高維聲學資料中表現出優異性能。即時異常檢測系統需要平衡檢測精度和計算效率，確保及時的警報響應。多模態異常檢測整合聲學、環境和其他感測器資料，提高檢測的可靠性和準確性[115]。

4.4.1 機器學習在聲景分析中的應用 Machine Learning Applications in Soundscape Analysis

機器學習技術在海洋聲景分析中的應用開闢了聲學生態學研究的新篇章，透過自動化的模式識別和資料探勘技術，從複雜的聲學資料中提取生態學意義的資訊，為海洋生物多樣性監測、生態系統健康評估和環境變化檢測提供了強有力的技術手段。聲景分析的挑戰在於需要處理高維、多元、時變的聲學資料，同時要建立聲學特徵與生態學過程之間的關聯關係。機器學習方法透過自動化的特徵學習和模式發現能力，能夠處理傳統方法難以解決的複雜問題，為聲景生態學的發展提供了重要的技術支撐。

特徵提取和工程是機器學習聲景分析的基礎工作，直接影響模型的效能和解釋性。時域特徵包括均方根值、過零率、峰值因子等基本統計量，能夠描述聲音的基本能量特徵。頻域特徵如功率譜密度、頻譜質心、頻譜滾降等描述聲音的頻率分布特性。時頻域特徵結合了時間和頻率資訊，梅爾頻率倒譜係數(MFCC)、小波變換係數和短時傅立葉變換係數等為聲音識別提供了豐富的特徵維度。生態學特徵如聲學複雜度指數(ACI)、生物聲學指數(BI)等專門針對生態聲學設計，能夠直接反映生態系統的特徵[116]。

無監督學習方法為聲景的探索性分析提供了重要工具。聚類分析能夠根據聲學特徵的相似性將聲景資料分組，發現不同的聲景類型和模式。K-means 聚類適用於球狀聚類的識別，層次聚類能夠揭示聲景的層次結構，密度聚類如DBSCAN 能夠識別任意形狀的聚類並處理噪音資料。主成分分析(PCA) 透過線性變換將高維聲學特徵投影到低維空間，保持資料的主要變異資訊。非線性降維方法如 t-SNE 和 UMAP 能夠保持資料的局部結構，為聲景資料的視覺化提供更好的效果[117]。

監督學習方法為聲景分類和預測任務提供了準確的解決方案。支援向量機(SVM) 透過核函數處理非線性分類問題，在聲音分類任務中表現穩定。隨機森林結合多個決策樹的預測結果，能夠處理高維特徵和非線性關係，同時提供特徵重要性評估。梯度提升方法如 XGBoost 和 LightGBM 在許多機器學習競賽中表現優異，能夠自動處理缺失值和類別特徵。貝葉斯方法透過概率推理處理不確定性問題，為分類結果提供置信度評估。集成學習方法結合多個模型的優勢，提高預測的穩定性和準確性[118]。

深度學習方法為聲景分析提供了端到端的學習能力。卷積神經網路(CNN) 透過卷積層和池化層自動提取聲譜圖的空間特徵，能夠識別聲音的頻率模式和紋理特徵。一維 CNN 直接處理原始音訊信號，避免了頻譜轉換的資訊損失。二維

CNN 處理聲譜圖資料，能夠同時捕捉時間和頻率的變化模式。循環神經網路（RNN）和長短期記憶網路（LSTM）擅長處理序列資料，能夠學習聲景的時間動態特性。雙向 LSTM 能夠利用前後文資訊，提高序列模式的識別準確性。注意力機制能夠自動關注重要的時頻區域，提高模型的解釋性和效能[119]。

時間序列分析方法為聲景的動態變化研究提供了專門的工具。傳統時間序列方法如 ARIMA 模型能夠捕捉聲景的趨勢和週期性特徵，適用於長期聲景監測資料的分析。狀態空間模型能夠處理多變量時間序列和隱變數，適合分析聲景與環境因子的關係。機器學習的時間序列方法如 LSTM、GRU 和 Transformer 能夠學習複雜的非線性時間依賴關係。變化點檢測算法能夠識別聲景特徵的突變時刻，對於環境事件的監測具有重要價值。時間序列聚類方法能夠識別相似的時間模式，發現聲景的週期性和規律性[120]。

多標籤學習方法處理了聲景中多種聲源共存的複雜情況。標籤空間的高維性和標籤間的相關性是多標籤學習的主要挑戰。問題轉換方法將多標籤問題轉化為多個二元分類問題，計算效率高但忽略了標籤間的相關性。演算法適應方法直接處理多標籤資料，如多標籤決策樹和多標籤神經網路。標籤嵌入方法透過降維技術處理高維標籤空間，減少計算複雜度。集成方法結合多個多標籤分類器的預測結果，提高系統的穩定性和準確性[121]。

弱監督學習和半監督學習方法解決了標記資料稀缺的問題。弱監督學習利用不完全、不確切或不精確的標記資訊進行學習，如使用粗粒度的標籤或噪聲標籤。主動學習透過智慧化的樣本選擇策略，最小化標記成本，最大化模型效能。自訓練和協同訓練等半監督學習方法利用未標記資料改進模型效能。生成對抗網路（GAN）可以合成聲景資料，增強訓練資料集的多樣性。自監督學習透過設計 pretext 任務從未標記資料中學習有用的表示[122]。

轉移學習和域適應技術解決了不同海域聲景特徵差異的問題。預訓練模型能夠學習通用的聲學特徵表示，然後在特定海域資料上進行微調。域適應方法處理源域和目標域之間的分布差異，提高模型的泛化能力。多任務學習同時訓練相關的聲景分析任務，共享學習到的特徵表示。元學習方法透過學習如何快速適應新的聲景環境，提高模型的適應性。跨域知識遷移技術能夠將陸地聲景分析的經驗應用到海洋環境中[123]。

解釋性機器學習方法為聲景分析結果提供了科學解釋。特徵重要性分析揭示了哪些聲學特徵對分類結果貢獻最大。SHAP（SHapley Additive exPlanations）

值為每個特徵的貢獻提供了定量評估。注意力視覺化顯示模型關注的時頻區域，幫助理解決策過程。局部可解釋模型如 LIME 能夠解釋單個預測結果。概念激活向量 (CAV) 方法能夠測試模型是否學習到了預期的概念。這些解釋性方法提高了機器學習模型的可信度和科學價值[124]。

模型評估和驗證是確保機器學習應用可靠性的重要環節。交叉驗證方法評估模型的泛化能力，避免過擬合問題。時間序列的驗證需要考慮時間依賴性，採用時間分割的驗證策略。多類別分類的評估指標包括準確率、精確率、召回率、F1 分數等。不平衡資料的評估需要關注少數類別的分類效能，採用加權指標或 SMOTE 等平衡技術。統計顯著性檢驗確保模型效能的可靠性。A/B 測試和在線評估為實際應用效果提供驗證[125]。

4.4.2 深度學習噪音識別分類 Deep Learning for Noise Identification and Classification

深度學習技術在水下噪音識別和分類領域的應用代表了人工智慧與海洋聲學深度融合的技術前沿，透過多層神經網路的階層式特徵學習能力，實現了從原始聲學訊號到高層語義概念的端到端自動化處理。深度學習方法的革命性在於其能夠自動發現和學習複雜的聲學模式，無需人工設計特徵提取器，特別適合處理海洋環境中複雜多變的噪音特徵。隨著計算能力的提升和大規模標註資料集的建立，深度學習在水下噪音分類的準確性和效率方面都達到了前所未有的水準，為自動化海洋聲學監測和智慧化環境管理提供了強有力的技術支撐。

卷積神經網路在聲譜圖分析中的應用充分發揮了其在圖像處理領域的成功經驗。聲譜圖作為音訊訊號的二維時頻表示，包含了豐富的聲學特徵資訊。一維 CNN 直接處理原始音訊波形，透過多個卷積層逐步提取從低層次的波形特徵到高層次的語義特徵。二維 CNN 處理聲譜圖，卷積核能夠檢測特定的時頻模式，如螺旋槳的葉頻特徵、生物聲的諧波結構等。深度可分離卷積和空洞卷積等先進卷積結構提高了模型的效率和感受野。殘差連接和密集連接等網路架構創新解決了深度網路的梯度消失問題，使得更深的網路成為可能[126]。

循環神經網路架構為序列性聲學資料的處理提供了專門的解決方案。標準 RNN 雖然理論上能夠處理任意長度的序列，但在實際應用中存在梯度消失和長期依賴問題。LSTM 透過門控機制有效解決了這些問題，能夠學習聲學訊號中的長期時間依賴關係。GRU 作為 LSTM 的簡化版本，在保持相似效能的同時減少了計算複雜度。雙向 RNN 能夠利用前後文資訊，對於聲音事件的精確定位特別

有效。多層 RNN 透過堆疊多個循環層來增加模型的表達能力。注意力機制的引入使得模型能夠自動關注重要的時間步，提高了分類的準確性和可解釋性[127]。

Transformer 架構在序列建模領域的突破性進展也為聲學分析帶來了新的可能性。自注意力機制能夠捕捉序列中任意位置之間的依賴關係，特別適合處理長序列聲學資料。位置編碼為模型提供了時間位置資訊，補償了注意力機制中缺失的順序資訊。多頭注意力機制允許模型同時關注不同的特徵子空間，增強了特徵表示的豐富性。編碼器-解碼器架構不僅適用於分類任務，還支援序列到序列的轉換任務，如噪音源定位和軌跡預測。預訓練的 Transformer 模型如 BERT 的思想也被引入聲學領域，透過大規模無監督預訓練學習通用的聲學表示[128]。

多模態深度學習整合了不同類型的感測器資料和環境資訊。聲學資料與環境參數（溫度、鹽度、水深等）的融合能夠提高分類的準確性和魯棒性。早期融合在特徵層面整合不同模態的資訊，晚期融合在決策層面整合不同模態的預測結果。注意力融合機制能夠自動學習不同模態的重要性權重。對抗性多模態學習透過生成對抗訓練提高模型對模態缺失的魯棒性。圖神經網路能夠處理複雜的關係資料，如感測器網路的拓撲結構和聲源之間的空間關係[129]。

自監督學習和預訓練技術解決了標註資料稀缺的問題。對比學習透過學習相似樣本的相近表示和不同樣本的遠離表示來學習有效的特徵表示。遮罩建模如 MAE (Masked Autoencoder) 透過重建被遮罩的聲譜圖區域來學習聲學特徵。預測編碼方法透過預測未來的聲學訊號來學習時間表示。SimCLR、MoCo 等自監督方法在聲學領域的應用展現出良好的效果。大規模預訓練模型如 Wav2Vec 和 HuBERT 為下游任務提供了強大的特徵提取器[130]。

少樣本學習和元學習方法應對了新類別噪音快速識別的需求。原型網路透過學習類別的原型表示來進行分類，適合處理樣本稀少的新類別。匹配網路透過學習相似性度量來比較查詢樣本和支援樣本。關係網路透過神經網路學習複雜的關係函數。MAML (Model-Agnostic Meta-Learning) 透過學習良好的初始化參數使模型能夠快速適應新任務。度量學習方法學習適合分類任務的距離度量，提高少樣本分類的效能[131]。

領域自適應和跨域遷移技術處理了不同海域環境差異的問題。無監督領域自適應透過對齊源域和目標域的特徵分布來提高泛化能力。對抗性領域自適應使用對抗訓練來學習領域不變的特徵表示。多源領域自適應利用多個源域的知識來

適應目標域。漸進式遷移學習透過逐步調整模型參數來適應新環境。知識蒸餾技術將大模型的知識遷移到小模型，適合邊緣計算應用[132]。

實時處理和邊緣計算最佳化滿足了現場部署的需求。模型壓縮技術如剪枝、量化和知識蒸餾能夠顯著減少模型大小和計算需求。神經架構搜索（NAS）自動設計高效的網路架構。MobileNet、EfficientNet 等輕量級網路架構在保持高準確性的同時大幅減少了計算量。動態推理技術根據輸入的複雜度調整計算量。硬體加速技術如 GPU、TPU 和專用 AI 晶片為實時處理提供了硬體支援。流式處理算法支援連續音訊流的即時分析[133]。

模型解釋性和可視化技術提高了深度學習模型的可信度。梯度激活映射（Grad-CAM）顯示模型關注的聲譜圖區域。注意力權重視覺化揭示模型的注意力分布模式。特徵視覺化技術展示不同層學習到的特徵表示。對抗樣本分析揭示模型的脆弱性和魯棒性問題。不確定性量化為模型預測提供置信度估計。這些技術幫助研究人員理解模型的決策過程，增強模型的可解釋性[134]。

4.4.3 大數據平台與架構 Big Data Platforms and Architecture

大數據平台與架構為海洋聲學領域的海量資料處理和分析提供了堅實的技術基礎設施，透過分散式計算、雲端服務和智慧化資料管理等先進技術，實現了從 TB 到 PB 級聲學資料的高效處理和深度分析。現代海洋聲學監測系統產生的連續、多維、異質資料流對傳統資料處理架構提出了嚴峻挑戰，需要建立可擴展、高可用、低延遲的大數據處理平台。這些平台不僅要處理資料的存儲和計算問題，還要支援複雜的機器學習工作流、即時分析和合作研究等多樣化需求，為海洋聲學研究的數位化轉型提供全面的技術支撐。

分散式存儲系統為海量聲學資料提供了可靠的存儲解決方案。Hadoop 分散式檔案系統（HDFS）透過資料複製和分散存儲確保了資料的可靠性和可用性。Apache Cassandra 等 NoSQL 資料庫提供了高可擴展性的結構化資料存儲。物件存儲系統如 Amazon S3 和 MinIO 為非結構化聲學資料提供了經濟高效的存儲方案。分層存儲架構根據資料的存取頻率和重要性將資料存放在不同類型的存儲介質中，最佳化存儲成本和效能。資料壓縮和去重技術減少了存儲空間需求。冷熱資料分離策略將頻繁存取的熱資料存放在高效能存儲中，將歷史資料存放在低成本的冷存儲中[135]。

分散式計算框架提供了強大的資料處理能力。Apache Spark 透過記憶體計算顯著提高了資料處理速度，支援批處理、流處理和機器學習等多種工作負載。

MapReduce 雖然相對較老但仍在大规模資料處理中發揮重要作用。Apache Flink 專門針對流處理進行最佳化，支援低延遲的即時分析。Kubernetes 提供了容器化應用的自動化部署和管理，提高了系統的可靠性和可維護性。Apache Airflow 等工作流管理系統支援複雜資料處理管道的調度和監控。這些框架的組合使用能夠滿足不同類型資料處理任務的需求[136]。

雲端計算平台為海洋聲學研究提供了彈性可擴展的計算資源。Amazon Web Services (AWS)、Microsoft Azure、Google Cloud Platform 等主要雲服務提供者都提供了專門的大數據和機器學習服務。雲端的按需付費模式允許研究機構根據實際需求彈性調整資源配置，降低了技術門檻和初期投資。無伺服器計算如 AWS Lambda 支援事件驅動的資料處理，適合處理間歇性的資料分析任務。託管服務如 Amazon EMR、Azure HDInsight 等簡化了大數據平台的部署和管理。多雲策略透過使用多個雲服務提供者來降低供應商鎖定風險並提高系統的可靠性[137]。

即時流處理架構支援連續聲學監測資料的即時分析。Apache Kafka 作為分散式流平台提供了高通量、低延遲的資料傳輸能力，支援資料的實時收集和分發。流處理引擎如 Apache Storm、Apache Flink 和 Kafka Streams 能夠對連續資料流進行即時計算和分析。複雜事件處理 (CEP) 技術能夠檢測資料流中的模式和異常事件。時間視窗和水印機制處理了流處理中的時間同步和延遲問題。背壓控制和負載平衡確保了系統在高負載情況下的穩定運行。Lambda 架構和 Kappa 架構提供了批處理和流處理的統一框架[138]。

資料湖架構為多樣化的海洋聲學資料提供了統一的管理平台。資料湖支援結構化、半結構化和非結構化資料的原生存儲，保持資料的原始格式和完整性。Apache Delta Lake、Apache Iceberg 等技術為資料湖提供了 ACID 事務支援和版本控制能力。資料目錄和後設資料管理系統如 Apache Atlas 幫助使用者發現和理解資料。資料血緣追蹤記錄了資料的來源和轉換過程，確保資料的可追溯性。資料品質監控系統自動檢測資料異常和品質問題。資料治理框架確保資料的安全、合規和可信度[139]。

機器學習平台整合了資料處理、模型訓練和部署的完整工作流。MLflow、Kubeflow 等開源平台提供了機器學習實驗管理、模型版本控制和自動化部署等功能。AutoML 技術自動化了機器學習模型的設計、訓練和調優過程，降低了技術門檻。分散式機器學習框架如 Horovod、Parameter Server 支援大规模模型的並行訓練。模型服務平台如 TensorFlow Serving、TorchServe 支援機器學習模型的

高效部署和推理。A/B 測試框架支援模型效果的在線評估和比較。模型監控系統追蹤模型效能的變化並檢測模型漂移[140]。

容器化和微服務架構提高了系統的可維護性和可擴展性。Docker 容器技術實現了應用的標準化打包和部署。Kubernetes 提供了容器的自動化管理、調度和擴縮容能力。微服務架構將複雜的應用分解為獨立的服務組件，提高了系統的模組化程度。服務網格如 Istio 提供了微服務間的通信管理、安全控制和可觀測性。API 閘道統一管理外部對微服務的存取。這種架構設計提高了系統的靈活性和可維護性，支援快速的功能迭代和部署[141]。

安全和隱私保護在大數據平台中具有重要意義。身份認證和授權系統確保只有合法使用者才能存取敏感資料。資料加密技術保護資料在傳輸和存儲過程中的安全性。網路安全措施包括防火牆、入侵檢測和安全監控等。差分隱私技術在保護個體隱私的同時支援統計分析。資料脫敏和匿名化技術去除或模糊敏感資訊。安全審計和合規檢查確保系統符合相關法規要求。零信任安全模型假設網路內部和外部都不可信，要求對所有存取進行驗證[142]。

效能監控和最佳化確保大數據平台的高效運行。系統監控工具如 Prometheus、Grafana 提供了全方位的效能指標監控和視覺化。日誌分析系統如 ELK Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) 支援分散式日誌的收集、分析和查詢。分散式追蹤系統如 Jaeger 幫助診斷複雜系統中的效能瓶頸。自動化調優技術根據工作負載特徵動態調整系統參數。資源調度和負載平衡策略最佳化了資源利用率。快取和記憶體管理策略提高了資料存取效率。這些技術的綜合應用確保了大數據平台的穩定高效運行[143]。

4.5 風險與不確定性分析 Risk and Uncertainty Analysis

風險與不確定性分析在水下噪音評估領域扮演著越來越重要的角色，為科學決策和環境管理提供了量化的不確定性評估和風險管理框架。海洋環境的複雜性、測量技術的局限性、建模方法的近似性以及生物響應的變異性等因素都會導致評估結果存在不可避免的不確定性。現代風險分析方法透過機率論、統計學和決策理論等數學工具，將這些不確定性因素納入評估框架，為環境管理決策提供更加科學和全面的資訊支撐。這種量化的風險評估方法不僅有助於識別和管理潛在的環境風險，還能夠最佳化監測資源配置和管理策略選擇，提高環境保護的效率和效果。

不確定性的來源分析是風險評估的基礎工作，需要系統性地識別和分類各

種不確定性因素。測量不確定性包括儀器誤差、校正誤差、環境干擾和操作誤差等技術因素，這類不確定性通常可以透過改進測量技術和程序加以減少。模型不確定性源於理論近似、參數化方案和數值方法的局限性，反映了我們對物理過程理解的不完善程度。參數不確定性由於環境參數的空間變異性和時間變化導致，特別是在資料稀疏的海域，參數的估計存在較大的不確定性。情景不確定性涉及未來環境條件和人類活動的預測，這類不確定性通常最難量化但對長期規劃最為重要[144]。

機率論方法為不確定性的數學描述提供了嚴格的理論基礎。機率分布函數能夠完整描述隨機變數的統計特性，常用的分布包括正態分布、對數正態分布、貝塔分布等。聯合機率分布描述多個隨機變數之間的相關關係，對於系統性分析特別重要。條件機率和貝葉斯定理為整合先驗知識和觀測資料提供了數學工具。隨機過程理論處理時間相關的不確定性，如海洋環境的時間變化和聲源的隨機性。極值理論專門處理極端事件的機率特性，對於風險評估具有重要意義[145]。

蒙特卡洛模擬方法透過隨機抽樣技術實現複雜系統的不確定性傳播分析。標準蒙特卡洛方法透過大量隨機樣本的模擬運算獲得輸出的統計分布。重要性抽樣技術透過調整抽樣分布提高稀有事件的抽樣效率。拉丁超立方抽樣（Latin Hypercube Sampling）透過分層抽樣改善樣本的代表性。準蒙特卡洛方法使用低差異序列代替偽隨機數，提高收斂速度。馬可夫鏈蒙特卡洛（MCMC）方法處理複雜的後驗分布採樣問題。這些技術的選擇需要根據問題的特性和計算資源限制進行權衡[146]。

敏感度分析技術識別對評估結果影響最大的不確定性因素，為不確定性減少策略提供指導。局部敏感度分析透過計算偏導數評估參數變化的局部影響。全域敏感度分析考慮參數的整個變化範圍和參數間的交互作用。Sobol 指數分解將總方差分解為各參數的主效應和交互效應。Morris 方法透過篩選設計識別重要參數。基於回歸的方法透過統計模型量化參數與輸出的關係。機器學習方法如隨機森林的特徵重要性也可用於敏感度分析。這些分析結果指導觀測網路設計和模型改進方向[147]。

4.5.1 蒙特卡洛模擬 Monte Carlo Simulation

蒙特卡洛模擬作為處理複雜系統不確定性的強大數值工具，透過隨機抽樣和統計分析的結合，為水下噪音評估中的不確定性量化和風險評估提供了實用的解決方案。該方法的核心思想是透過大量隨機樣本的數值實驗來近似求解確定性

問題或機率問題，特別適用於解析解困難或不可能獲得的複雜系統。在水下噪音評估中，蒙特卡洛方法能夠處理多源不確定性的耦合效應，提供評估結果的機率分布和信心區間，為基於風險的環境管理提供科學依據。隨著計算能力的不斷提升和算法的持續最佳化，蒙特卡洛模擬已成為現代不確定性分析不可或缺的核心技術。

蒙特卡洛方法的數學基礎建立在大數定律和中心極限定理之上。根據大數定律，當樣本數量趨於無窮大時，樣本平均值會收斂到理論期望值，這為蒙特卡洛估計的準確性提供了理論保證。中心極限定理表明，在一定條件下，大量獨立隨機變數的平均值趨於正態分布，這為估計結果的信心區間計算提供了基礎。蒙特卡洛估計的標準誤差與樣本數量的平方根成反比，即 σ/\sqrt{N} ，其中 σ 為樣本標準差， N 為樣本數量。這種收斂特性決定了蒙特卡洛方法具有維度無關的收斂性，特別適合高維問題的求解[148]。

隨機數生成是蒙特卡洛模擬的技術基礎，直接影響模擬結果的品質和可靠性。偽隨機數生成器如梅森旋轉器（Mersenne Twister）提供了週期長、統計性質良好的隨機序列。準隨機數序列如 Sobol 序列、Halton 序列等具有低差異特性，能夠更均勻地覆蓋樣本空間，提高收斂速度。隨機數的統計檢驗包括均勻性檢驗、獨立性檢驗和週期性檢驗等，確保生成序列的隨機性質。現代程式語言和科學計算庫都提供了高品質的隨機數生成函數，但在大規模並行計算中需要特別注意隨機數的並行生成問題[149]。

隨機變數的抽樣技術將均勻分布的隨機數轉換為目標機率分布的樣本。逆變換方法透過累積分布函數的逆函數實現變換，適用於逆函數易於計算的分布。拒絕抽樣方法透過接受-拒絕機制生成複雜分布的樣本，但可能存在效率問題。Box-Muller 變換等專用方法為特定分布（如正態分布）提供了高效的抽樣算法。組合方法如混合高斯模型的抽樣需要結合不同的基本方法。對於複雜的多維分布，馬可夫鏈蒙特卡洛（MCMC）方法提供了通用的解決方案[150]。

不確定性傳播分析是蒙特卡洛模擬在風險評估中的核心應用。輸入參數的不確定性透過複雜的非線性模型傳播到輸出結果，形成輸出的機率分布。相關性結構的正確建模對於準確的不確定性傳播至關重要，需要使用 copula 函數或聯合分布來描述參數間的相關關係。時間相關的不確定性需要使用時間序列模型或隨機過程進行建模。空間相關的不確定性可以透過隨機場或地統計學方法處理。不確定性的分解分析能夠量化不同來源對總不確定性的貢獻，指導不確定性減少

策略[151]。

重要性抽樣技術透過改變抽樣分布來提高稀有事件的抽樣效率。標準蒙特卡洛方法在估計小機率事件時需要大量樣本才能獲得穩定的估計。重要性抽樣透過使用重要性函數增加關心區域的抽樣密度，然後透過似然比校正獲得正確的估計。重要性函數的選擇是該方法成功的關鍵，理想的重要性函數應該在被積函數較大的區域有較大的密度。自適應重要性抽樣方法能夠迭代地調整重要性函數，提高抽樣效率。交叉熵方法為重要性函數的最佳化提供了系統化的途徑[152]。

分層抽樣和拉丁超立方抽樣等方差減少技術提高了蒙特卡洛估計的效率。分層抽樣將樣本空間劃分為若干層，在每層內進行抽樣，然後組合各層的結果。拉丁超立方抽樣確保每個輸入變數在其範圍內均勻分布，改善了樣本的代表性。正交拉丁超立方進一步要求變數間的相關性最小。控制變數方法透過引入已知期望的輔助變數來減少估計方差。對偶變數方法透過使用負相關的樣本對來抵消部分隨機誤差。這些技術的適用性取決於問題的特性和計算資源限制[153]。

並行蒙特卡洛算法充分利用現代計算機的多核和分散式計算能力。獨立並行方法將總樣本數分配到不同的處理單元，各自進行獨立的蒙特卡洛計算，最後合併結果。這種方法實現簡單，擴展性好，但需要注意隨機數生成的獨立性。主從模式由主程序分配任務給從程序，適合負載不均衡的情況。分散式蒙特卡洛適用於大規模集群計算，需要考慮通信開銷和負載平衡。GPU 加速技術利用圖形處理單元的並行計算能力，特別適合大量獨立計算的場景[154]。

自適應蒙特卡洛方法根據計算過程中獲得的資訊動態調整抽樣策略。自適應重要性抽樣根據已有樣本的分布調整重要性函數。多層蒙特卡洛方法使用不同精度的模型進行分層抽樣，在保證精度的同時降低計算成本。序列蒙特卡洛方法適用於時間序列資料的處理，能夠處理線上更新和實時估計問題。貝葉斯最佳化結合了貝葉斯推理和最佳化理論，能夠在有限的計算預算下最大化資訊增益。這些自適應方法提高了計算效率，但算法複雜度相應增加[155]。

結果分析和後處理是蒙特卡洛模擬的重要環節。描述性統計分析包括均值、標準差、分位數等基本統計量的計算。機率密度函數和累積分布函數的估計揭示了輸出的完整分布特徵。信心區間和預測區間為不確定性的量化提供了直觀的表示。敏感度指數的計算識別了對輸出影響最大的輸入因素。極值分析關注分布的尾部特徵，對於風險評估特別重要。收斂性診斷確保模擬結果的可靠性，包括均值收斂、方差收斂和分布收斂的檢驗[156]。

品質保證和驗證程序確保蒙特卡洛模擬結果的可信度。代碼驗證透過解析解、簡化問題或其他數值方法的比較來檢驗實現的正確性。模型驗證透過實驗資料或觀測資料來檢驗模型的準確性。不確定性量化的驗證需要檢驗預測的機率分布是否與觀測資料一致。交叉驗證和 Bootstrap 方法為結果的穩定性提供額外的檢驗。文檔記錄包括模型描述、參數設定、計算程序和結果解釋等，確保結果的可重現性和可追溯性[157]。

4.5.2 敏感度分析 Sensitivity Analysis

敏感度分析作為不確定性分析的核心組成部分，透過系統性地研究輸入參數變化對模型輸出的影響程度，為模型驗證、參數優先級排序和不確定性減少策略制定提供了重要的定量依據。在水下噪音評估中，敏感度分析能夠識別對預測結果影響最大的環境參數、聲學參數和模型參數，指導觀測網路的最佳化設計和有限資源的合理分配。現代敏感度分析方法涵蓋了從局部線性方法到全域非線性方法的完整技術譜系，能夠處理複雜非線性模型中參數間的交互作用和非線性效應，為科學決策提供更加全面和可靠的資訊支撐。

局部敏感度分析透過數學微分方法評估參數在名義值附近的影響程度。一階敏感度係數定義為輸出對輸入參數的偏導數，即 $S_i = \partial Y / \partial X_i$ ，反映了參數 X_i 的微小變化對輸出 Y 的線性影響。標準化敏感度係數 $S_i = (\partial Y / \partial X_i) \times (X_i / Y)$ 消除了量綱影響，便於不同參數間的比較。二階敏感度係數 $\partial^2 Y / \partial X_i \partial X_j$ 描述了參數間的交互作用效應。有限差分方法透過數值近似計算偏導數，前向差分、後向差分和中心差分各有其精度和計算特點。自動微分技術透過鏈式法則的程式化實現提供了精確的導數計算，是現代機器學習中的關鍵技術[158]。

全域敏感度分析考慮參數在整個變化範圍內的影響，能夠捕捉非線性效應和參數交互作用。方差分解方法將輸出方差分解為各參數的主效應和交互效應的貢獻。一階 Sobol 指數 $S_i = \text{Var}[E[Y|X_i]] / \text{Var}[Y]$ 描述參數 X_i 的主效應，總效應指數 $S_{Ti} = 1 - \text{Var}[E[Y|X_{\sim i}]] / \text{Var}[Y]$ 包括了所有涉及參數 X_i 的交互作用。高階 Sobol 指數描述多個參數間的聯合交互作用。這些指數的計算通常需要大量的模型評估，可以透過蒙特卡洛方法、準蒙特卡洛方法或代理模型等技術實現[159]。

Morris 方法透過一次一因子 (One-At-a-Time) 的設計提供了計算效率高的全域敏感度篩選方法。該方法在參數空間中構造隨機軌跡，計算每個參數變化引起的輸出變化。基本效應 μ_i 的均值反映參數的重要性，標準差 σ_i 反映參數效應的變異性或非線性程度。修正的 Morris 方法透過改進抽樣設計提高了估計的

穩定性。該方法的優勢在於能夠以相對較少的模型評估次數識別重要參數和非重要參數，適合高維問題的初步篩選[160]。

基於回歸的敏感度分析透過統計模型建立輸入輸出關係，並透過回歸係數評估參數重要性。線性回歸模型 $Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \varepsilon$ 中的標準化回歸係數 β_i 直接反映參數的重要性。多項式回歸模型能夠捕捉非線性效應和交互作用。嶺回歸和 Lasso 回歸等正則化方法處理高維和共線性問題。偏相關係數和偏決定係數評估參數在控制其他參數後的獨立影響。這種方法的優勢是能夠同時考慮所有參數的聯合效應，但需要選擇適當的回歸模型形式[161]。

機器學習方法為非線性和高維敏感度分析提供了強大工具。隨機森林的特徵重要性基於決策樹分割的改善程度，能夠處理非線性關係和變數交互作用。梯度提升方法如 XGBoost 也提供特徵重要性評估。SHAP (SHapley Additive exPlanations) 值基於博弈論的 Shapley 值概念，為每個特徵分配公平的貢獻值。LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) 透過局部線性近似解釋複雜模型的預測。深度學習的敏感度分析可以透過梯度、積分梯度或引導傳播等方法實現[162]。

時間相關敏感度分析處理動態系統中參數影響的時間變化特徵。瞬態敏感度分析研究參數對輸出時間歷程的影響。時變參數的敏感度需要考慮參數變化的時間模式。脈衝響應分析透過衝擊函數評估參數擾動的傳播效應。狀態敏感度分析考慮系統狀態變數對參數的敏感性。這類分析對於理解系統動態行為和設計控制策略具有重要意義[163]。

空間敏感度分析考慮空間分布參數對輸出的影響。場敏感度描述分布式參數（如聲速場、密度場）對輸出的影響。伴隨方程方法提供了計算場敏感度的高效途徑。空間相關參數的敏感度需要考慮空間自相關結構。多尺度敏感度分析研究不同空間尺度上參數變化的影響。這類分析對於海洋環境參數的觀測網路設計和資料同化具有指導意義[164]。

代理模型技術顯著降低了敏感度分析的計算成本。高斯過程回歸 (Kriging)、多項式混沌展開、神經網路等代理模型能夠以較少的訓練樣本近似複雜的輸入輸出關係。自適應代理建模根據敏感度分析的需求動態增加訓練點。多保真度代理模型結合不同精度的模型資訊。代理模型的不確定性量化確保敏感度分析結果的可靠性。這些技術使得大規模敏感度分析成為可能[165]。

敏感度分析結果的解釋和應用需要結合具體問題的背景和目標。參數排序

為資源分配提供優先級指導。閾值分析識別參數的關鍵值範圍。交互作用分析揭示參數間的協同或拮抗效應。敏感度與不確定性的關係分析指導不確定性減少策略。時空敏感度模式為監測網路設計提供科學依據。這些應用需要與領域知識相結合，確保分析結果的實用性和可操作性[166]。

品質保證和驗證程序確保敏感度分析的可靠性。收斂性分析檢驗樣本數量對結果的影響。穩定性分析評估方法選擇和參數設定的影響。交叉驗證透過不同子集的比較評估結果的穩定性。基準測試透過已知解析解的問題檢驗方法的準確性。文檔和可重現性要求詳細記錄分析過程和參數設定。這些程序確保分析結果的科學性和可信度[167]。

4.5.3 貝葉斯推斷 Bayesian Inference

貝葉斯推斷作為處理不確定性和整合多源資訊的統一理論框架，透過機率論的語言描述知識的不確定性，並透過貝葉斯定理實現知識的更新和推理。在水下噪音評估領域，貝葉斯方法能夠有效整合先驗知識、觀測資料和模型資訊，為參數估計、模型選擇和預測不確定性量化提供了強有力的工具。該方法的核心優勢在於其能夠自然地處理不確定性的傳播和累積，提供參數和預測的完整機率分布，而不僅僅是點估計，從而為風險評估和決策分析提供更加豐富和可靠的資訊基礎。

貝葉斯定理構成了貝葉斯推斷的數學基礎，建立了先驗知識與觀測證據之間的定量關係。基本形式為 $P(\theta|D) = P(D|\theta)P(\theta)/P(D)$ ，其中 θ 為模型參數， D 為觀測資料， $P(\theta)$ 為先驗分布， $P(D|\theta)$ 為似然函數， $P(\theta|D)$ 為後驗分布， $P(D)$ 為證據或邊際似然。先驗分布反映了在觀測資料之前對參數的知識和信念，可以來自專家經驗、歷史資料或理論分析。似然函數描述了在給定參數值下觀測到當前資料的機率，連接了模型與資料。後驗分布綜合了先驗知識和觀測證據，代表了對參數的更新認知[168]。

先驗分布的選擇是貝葉斯分析中的關鍵決策，直接影響推斷結果的合理性。資訊性先驗基於具體的專業知識或歷史資料，能夠有效改善估計效果，但可能引入主觀偏見。無資訊先驗或弱資訊先驗試圖最小化主觀性，如均勻分布、Jeffreys先驗等。共軛先驗與似然函數結合後產生同族的後驗分布，簡化了計算但限制了模型的靈活性。層次先驗或超先驗透過引入超參數來描述先驗的不確定性。客觀貝葉斯方法透過資訊論或決策論原則自動選擇先驗。實際應用中通常需要進行敏感度分析以評估先驗選擇的影響[169]。

似然函數的構建需要考慮觀測過程的統計特性和誤差結構。高斯似然適用於連續測量資料，需要指定測量誤差的分布。泊松似然適用於計數資料，如聲事件的檢測次數。多項式似然適用於分類資料。複合似然處理相關或結構化資料。似然函數還需要考慮缺失資料、異常值和模型誤差等實際問題。非參數似然或半參數似然為複雜觀測過程提供更靈活的建模選擇[170]。

馬可夫鏈蒙特卡洛（MCMC）方法為複雜後驗分布的採樣提供了實用的計算工具。Metropolis-Hastings 算法透過提議分布和接受-拒絕機制構造馬可夫鏈，使其平穩分布為目標後驗分布。Gibbs 採樣適用於多維參數的條件分布易於採樣的情況。Hamilton 蒙特卡洛（HMC）利用梯度資訊提高採樣效率，特別適合高維和強相關的問題。No-U-Turn 採樣器（NUTS）自動調整 HMC 的參數。變分貝葉斯方法透過最佳化近似後驗分布與真實後驗的 KL 距離，提供確定性的近似推斷[171]。

模型選擇和比較是貝葉斯分析的重要應用領域。貝葉斯因子 $BF = P(D|M_1)/P(D|M_2)$ 提供了模型 M_1 相對於 M_2 的證據強度。資訊準則如 DIC、WAIC、LOO 等為模型比較提供近似指標。貝葉斯模型平均（BMA）透過後驗模型機率加權多個模型的預測，處理模型不確定性。變數選擇可以透過稀疏先驗或隨機搜索方法實現。非參數貝葉斯方法如狄利克雷過程為模型複雜度的自動選擇提供了靈活框架[172]。

預測推斷將貝葉斯方法擴展到未來觀測的預測。後驗預測分布 $P(y|D) = \int P(y|\theta)P(\theta|D)d\theta$ 整合了參數不確定性對預測的影響。預測檢驗透過比較觀測資料與後驗預測分布來檢驗模型的適合度。交叉驗證預測評估模型的預測效能。決策理論將預測不確定性與損失函數結合，支援最優決策的制定。序列預測處理線上更新和實時預測問題[173]。

計算貝葉斯方法的發展使得複雜實際問題的貝葉斯分析成為可能。近似貝葉斯計算（ABC）透過模擬資料與觀測資料的比較避免似然函數的顯式計算。變分推斷透過最佳化方法近似複雜的後驗分布。期望傳播（EP）結合了變分方法和信息傳遞的優勢。積分巢套拉普拉斯近似（INLA）為潛在高斯模型提供快速近似推斷。這些方法大大擴展了貝葉斯方法的適用範圍[174]。

分層貝葉斯模型處理多層次資料結構和部分池化問題。固定效應描述群體水準的參數，隨機效應描述個體或群組的變異。超參數控制隨機效應的分布。部分池化在完全池化和無池化之間取得平衡，透過「借用強度」改善稀疏資料的估

計。多層次模型能夠同時處理個體內和個體間的變異。空間和時間層次模型處理資料的空間和時間相關結構[175]。

貝葉斯網路和因果推斷將貝葉斯方法擴展到因果關係的建模。有向無環圖 (DAG) 描述變數間的因果關係。條件獨立性假設簡化了聯合分布的建模。結構學習從資料中推斷網路結構。因果效應的識別和估計需要滿足特定的假設條件。反事實推理處理「如果...會如何」的假設問題。這些方法為理解複雜系統的因果機制提供了工具[176]。

貝葉斯方法在水下噪音評估中的具體應用涵蓋多個層面。參數估計能夠整合多源觀測資料，提供參數的不確定性量化。聲源定位和追蹤透過序列貝葉斯濾波實現。環境參數的資料同化透過貝葉斯更新整合模型預測和觀測資料。風險評估透過後驗分布評估超標機率。決策支援透過貝葉斯決策理論最佳化管理策略。這些應用展示了貝葉斯方法在處理不確定性和支援科學決策方面的強大能力 [177]。

參考文獻

- [1] ISO 1683:2015, Acoustics - Preferred reference quantities for acoustic levels
- [2] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125-232.
- [3] ISO 17208-1:2016, Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes
- [4] NMFS (2018). 2018 Revisions to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing (Version 2.0). NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.
- [5] Popper, A. N., et al. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles: A

technical report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI. Springer.

[6] Merchant, N. D., et al. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(3), 257-265.

[7] Mellinger, D. K., et al. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.

[8] ISO 17208-2:2019, Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 2: Determination of source levels from deep water measurements

[9] Robinson, S. P., et al. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. NPL Good Practice Guide No. 133.

[10] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement

[11] Urick, R. J. (1983). Principles of underwater sound. Peninsula Publishing.

[12] Harris, C. M. (1998). Handbook of acoustical measurements and noise control. McGraw-Hill.

[13] Southall, B. L., et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), 411-521.

[14] Finneran, J. J. (2015). Noise-induced hearing loss in marine mammals: A review of temporary threshold shift studies from 1996 to 2015. *Journal of the Acoustical Society of America*, 138(3), 1702-1726.

- [15] Bailey, H., et al. (2014). Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1-2), 120-129.
- [16] Sueur, J., et al. (2014). Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(4), 772-781.
- [17] Duncan, A. J., et al. (2013). A comparison of underwater noise from a diesel and a hybrid ferry. *Proceedings of Acoustics 2013*, Victor Harbor, Australia.
- [18] Pieretti, N., et al. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecological Indicators*, 11(3), 868-873.
- [19] Farina, A., et al. (2011). The application of the acoustic complexity indices (ACI) to ecoacoustic event detection and identification (EEDI) modeling. *Biosemiotics*, 4(2), 255-268.
- [20] IEC 61672-1:2013, Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications
- [21] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125-232.
- [22] Kastak, D., & Schusterman, R. J. (1998). Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology. *Journal of the Acoustical Society of America*, 103(4), 2216-2228.
- [23] Ellison, W. T., et al. (2012). A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds. *Conservation Biology*, 26(1), 21-28.

[24] Madsen, P. T., et al. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series*, 309, 279-295.

[25] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*, 94(5), 692-713.

[26] Wysocki, L. E., et al. (2006). Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. *Biological Conservation*, 128(4), 501-508.

[27] André, M., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9), 489-493.

[28] McCauley, R. D., et al. (2017). Widely used marine seismic survey air gun operations negatively impact zooplankton. *Nature Ecology & Evolution*, 1(7), 0195.

[29] Hatch, L. T., et al. (2012). Characterizing the relative contributions of large vessels to total ocean noise fields: a case study using the Gerry E. Studds Stellwagen Bank National Marine Sanctuary. *Environmental Management*, 49(4), 735-746.

[30] Hawkins, A. D., et al. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 25(1), 39-64.

[31] ISO 17208 series, Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships

[32] ISO 17208-1:2016, Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes

[33] IEC 60565 series, Underwater acoustics - Hydrophones - Calibration of

hydrophones

[34] Robinson, S. P., et al. (2014). Measurement of radiated underwater noise from marine vessels: A review of the measurement methodology. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 36(2), 166-175.

[35] Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1), 118-129.

[36] Wales, S. C., & Heitmeyer, R. M. (2002). An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(3), 1211-1231.

[37] Duncan, A., et al. (2017). Measurements of ship radiated underwater noise. *Acoustics Australia*, 45(1), 179-187.

[38] ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

[39] Kaplan, M. B., & Mooney, T. A. (2015). Ambient noise and temporal patterns of boat activity in the US Virgin Islands National Park. *Marine Pollution Bulletin*, 98(1-2), 221-228.

[40] Wheeler, D. J., & Chambers, D. S. (1992). *Understanding statistical process control*. SPC Press.

[41] Jensen, F. B., et al. (2011). *Computational ocean acoustics*. Springer.

[42] Locarnini, R. A., et al. (2018). *World Ocean Atlas 2018, Volume 1: Temperature*. NOAA Atlas NESDIS 81.

- [43] Hamilton, E. L. (1980). Geoacoustic modeling of the sea floor. *Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1313-1340.
- [44] Botteldooren, D. (1995). Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98(6), 3302-3308.
- [45] Porter, M. B. (2011). *The BELLHOP manual and user's guide: PRELIMINARY DRAFT*. Heat, Light, and Sound Research, Inc.
- [46] Dosso, S. E., & Wilmut, M. J. (2006). Uncertainty estimation in simultaneous Bayesian tracking of multiple acoustic sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(6), 3411-3424.
- [47] Porter, M. B., & Bucker, H. P. (1987). Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 82(4), 1349-1359.
- [48] Weinberg, H., & Burridge, R. (1974). Horizontal ray theory for ocean acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 55(1), 63-79.
- [49] Jensen, F. B., et al. (2011). *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media.
- [50] Cerveny, V. (2001). *Seismic ray theory*. Cambridge University Press.
- [51] Marsh, H. W., et al. (1961). Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, 33(3), 334-340.
- [52] Brown, M. G., et al. (1991). On the existence of rays in ocean acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 90(4), 2285-2288.

- [53] Collins, M. D. (1993). A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4), 1736-1742.
- [54] Weinberg, H. (1975). Generic sonar model. Naval Underwater Systems Center Technical Report 5971.
- [55] Porter, M. B. (2019). The acoustics toolbox. Available at: <http://oalib.hlsresearch.com/>
- [56] Porter, M. B. (1991). The KRAKEN normal mode program. Naval Research Laboratory Memorandum Report 6920.
- [57] Tolstoy, I., & Clay, C. S. (1966). *Ocean acoustics: theory and experiment in underwater sound*. McGraw-Hill.
- [58] Golub, G. H., & Van Loan, C. F. (2012). *Matrix computations*. Johns Hopkins University Press.
- [59] Westwood, E. K. (1992). Ray model solutions to the benchmark wedge problems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(4), 1727-1738.
- [60] Schmidt, H., & Jensen, F. B. (1985). A full wave solution for propagation in multilayered viscoelastic media with application to Gaussian beam reflection at fluid–solid interfaces. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77(3), 813-825.
- [61] Milder, D. M. (1969). Ray and wave invariants for SOFAR channel propagation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 46(5B), 1259-1263.
- [62] Jensen, F. B., & Ferla, C. M. (1990). SNAP: The SACLANTCEN normal-mode acoustic propagation model. SACLANT Undersea Research Centre Memorandum SM-121.

[63] Collins, M. D., et al. (1996). Comparison of algorithms for solving parabolic wave equations. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1), 178-182.

[64] Porter, M. B., & Reiss, E. L. (1984). A numerical method for ocean-acoustic normal modes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 76(1), 244-252.

[65] Collins, M. D. (1988). The rotated parabolic equation and sloping ocean bottoms. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(3), 1035-1037.

[66] Tappert, F. D. (1977). The parabolic approximation method. In *Wave propagation and underwater acoustics* (pp. 224-287). Springer.

[67] Collins, M. D. (1993). A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(4), 1736-1742.

[68] Lee, D., et al. (1981). Numerical models of ocean acoustic propagation. In *Computational acoustics* (pp. 79-157). Academic Press.

[69] Bamberger, A., et al. (1988). Higher order paraxial wave equation approximations in heterogeneous media. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 48(1), 129-154.

[70] Berenger, J. P. (1994). A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(2), 185-200.

[71] Collins, M. D., & Westwood, E. K. (1991). A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89(3), 1068-1075.

[72] Collins, M. D. (1990). Applications and time-domain solution of higher-order parabolic equations in underwater acoustics. *Journal of the Acoustical Society of*

America, 86(3), 1097-1102.

[73] Collins, M. D., & Evans, R. B. (1992). A two-way parabolic equation for acoustic backscattering in the ocean. *Journal of the Acoustical Society of America*, 91(4), 1357-1368.

[74] Collins, M. D. (1999). The stabilized elastic parabolic equation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(3), 1270-1278.

[75] Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.

[76] Worboys, M., & Duckham, M. (2004). *GIS: a computing perspective*. CRC press.

[77] Snyder, J. P. (1987). *Map projections: A working manual*. US Government Printing Office.

[78] Wright, D. J., et al. (2007). A typology of ocean data. *Marine Geodesy*, 30(1-2), 51-68.

[79] Cressie, N. (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.

[80] Hastie, T., et al. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction*. Springer Science & Business Media.

[81] Pijanowski, B. C., et al. (2011). Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. *BioScience*, 61(3), 203-216.

[82] Sueur, J., et al. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS One*, 3(12), e4065.

- [83] Mellinger, D. K., et al. (2007). An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans. *Oceanography*, 20(4), 36-45.
- [84] Roch, M. A., et al. (2006). Classification of echolocation clicks from odontocetes in the Southern California Bight. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(1), 467-475.
- [85] Staaterman, E., et al. (2017). Soundscapes from a Tropical Eastern Pacific reef and a Caribbean Sea reef. *Coral Reefs*, 36(4), 1125-1140.
- [86] Parks, S. E., et al. (2014). Changes in marine mammal habitat use and behavior in response to anthropogenic sound. *Biology Letters*, 10(4), 20140211.
- [87] Staaterman, E., et al. (2014). Bioacoustic measurements complement visual biodiversity surveys: preliminary evidence from four shallow marine habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 509, 277-288.
- [88] Dumyahn, S. L., & Pijanowski, B. C. (2011). Soundscape conservation. *Landscape Ecology*, 26(9), 1327-1344.
- [89] Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5-20.
- [90] Farina, A., & Gage, S. H. (Eds.). (2017). *Ecoacoustics: the ecological role of sounds*. John Wiley & Sons.
- [91] Tufte, E. R. (2001). *The visual display of quantitative information*. Graphics Press.
- [92] Schroeder, W., et al. (2006). *The visualization toolkit: an object-oriented approach to 3D graphics*. Kitware.

- [93] Borland, D., & Taylor II, R. M. (2007). Rainbow color map (still) considered harmful. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 27(2), 14-17.
- [94] Munzner, T. (2014). *Visualization analysis and design*. CRC press.
- [95] Shneiderman, B. (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. *Proceedings 1996 IEEE symposium on visual languages* (pp. 336-343).
- [96] Furnas, G. W. (1986). Generalized fisheye views. *ACM SIGCHI Bulletin*, 17(4), 16-23.
- [97] Potter, K., et al. (2012). Methods for presenting statistical information: The box plot. *Visualization of large and unstructured data sets*, 4, 97-106.
- [98] Bostock, M., et al. (2011). D³ data-driven documents. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 17(12), 2301-2309.
- [99] Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.
- [100] OGC (2012). *OGC Web Map Service Implementation Specification*. Open Geospatial Consortium Inc.
- [101] Shekhar, S., & Chawla, S. (2003). *Spatial databases: a tour*. Prentice Hall.
- [102] ISO 19100 series, *Geographic information/Geomatics standards*
- [103] Goodchild, M. F., et al. (2007). Next-generation digital earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), 11088-11094.

[104] Hunter, G. J., & Goodchild, M. F. (1997). Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis*, 29(1), 35-49.

[105] ISO 19115:2014, Geographic information - Metadata - Fundamentals

[106] Dean, J., & Ghemawat, S. (2008). MapReduce: simplified data processing on large clusters. *Communications of the ACM*, 51(1), 107-113.

[107] Sweeney, L. (2002). k-anonymity: A model for protecting privacy. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 10(05), 557-570.

[108] OGC (2010). OGC Web Feature Service 2.0 Interface Standard. Open Geospatial Consortium Inc.

[109] Ball, A. (2012). How to license research data. Digital Curation Centre.

[110] Erl, T. (2005). *Service-oriented architecture: concepts, technology, and design*. Pearson Education India.

[111] Laney, D. (2001). 3D data management: Controlling data volume, velocity and variety. META Group Research Note, 6(70), 1.

[112] Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260.

[113] LeCun, Y., et al. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.

[114] Stowell, D., et al. (2015). Automatic acoustic identification of individuals in multiple species: improving identification across recording conditions. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(109), 20150331.

- [115] Chandola, V., et al. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 41(3), 1-58.
- [116] McFee, B., et al. (2015). librosa: Audio and music signal analysis in python. *Proceedings of the 14th python in science conference (Vol. 8, pp. 18-25)*.
- [117] Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.
- [118] Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining (pp. 785-794)*.
- [119] Bahdanau, D., et al. (2014). Neural machine translation by jointly learning to align and translate. *arXiv preprint arXiv:1409.0473*.
- [120] Box, G. E., et al. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- [121] Tsoumakas, G., & Katakis, I. (2007). Multi-label classification: An overview. *International Journal of Data Warehousing and Mining*, 3(3), 1-13.
- [122] Chapelle, O., et al. (2009). *Semi-supervised learning*. MIT press.
- [123] Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 22(10), 1345-1359.
- [124] Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [125] Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy

estimation and model selection. *Ijcai* (Vol. 14, No. 2, pp. 1137-1145).

[126] Krizhevsky, A., et al. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25.

[127] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780.

[128] Vaswani, A., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.

[129] Baltrusaitis, T., et al. (2018). Multimodal machine learning: A survey and taxonomy. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 41(2), 423-443.

[130] Chen, T., et al. (2020). A simple framework for contrastive learning of visual representations. *International conference on machine learning* (pp. 1597-1607).

[131] Vinyals, O., et al. (2016). Matching networks for one shot learning. *Advances in neural information processing systems*, 29.

[132] Ganin, Y., & Lempitsky, V. (2015). Unsupervised domain adaptation by backpropagation. *International conference on machine learning* (pp. 1180-1189).

[133] Howard, A. G., et al. (2017). Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv:1704.04861*.

[134] Selvaraju, R. R., et al. (2017). Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 618-626).

- [135] Shvachko, K., et al. (2010). The hadoop distributed file system. 2010 IEEE 26th symposium on mass storage systems and technologies (pp. 1-10).
- [136] Zaharia, M., et al. (2016). Apache spark: a unified engine for big data processing. *Communications of the ACM*, 59(11), 56-65.
- [137] Armbrust, M., et al. (2015). Spark sql: Relational data processing in spark. *Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD international conference on management of data* (pp. 1383-1394).
- [138] Kreps, J., et al. (2011). Kafka: a distributed messaging system for log processing. *Proceedings of the NetDB* (Vol. 11, pp. 1-7).
- [139] Inmon, W. H. (2005). *Building the data warehouse*. John wiley & sons.
- [140] Sculley, D., et al. (2015). Hidden technical debt in machine learning systems. *Advances in neural information processing systems*, 28.
- [141] Burns, B., & Beda, J. (2019). *Kubernetes: up and running: dive into the future of infrastructure*. O'Reilly Media.
- [142] Kindervag, J. (2010). No more chewy centers: introducing the zero trust model of information security. Forrester Research Inc.
- [143] Beyer, B., et al. (2016). *Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems*. O'Reilly Media.
- [144] Walker, W. E., et al. (2003). Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, 4(1), 5-17.
- [145] Helton, J. C., & Davis, F. J. (2003). Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 81(1), 23-69.
- [146] Robert, C., & Casella, G. (2013). *Monte Carlo statistical methods*. Springer Science & Business Media.
- [147] Saltelli, A., et al. (2008). *Global sensitivity analysis: the primer*. John Wiley & Sons.
- [148] Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability models*. Academic press.
- [149] L'Ecuyer, P. (1999). Good parameters and implementations for combined multiple recursive random number generators. *Operations research*, 47(1), 159-

164.

- [150] Devroye, L. (2013). Non-uniform random variate generation. Springer Science & Business Media.
- [151] Helton, J. C., et al. (2006). Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), 1175-1209.
- [152] Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). Simulation and the Monte Carlo method. John Wiley & Sons.
- [153] McKay, M. D., et al. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239-245.
- [154] Wilkinson, B., & Allen, M. (2004). Parallel programming: techniques and applications using networked workstations and parallel computers. Pearson Prentice Hall.
- [155] Giles, M. B. (2015). Multilevel Monte Carlo methods. *Acta Numerica*, 24, 259-328.
- [156] Brooks, S., et al. (Eds.). (2011). Handbook of markov chain monte carlo. CRC press.
- [157] Oberkampf, W. L., & Roy, C. J. (2010). Verification and validation in scientific computing. Cambridge University Press.
- [158] Saltelli, A., et al. (2004). Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models. John Wiley & Sons.
- [159] Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and computers in simulation*, 55(1-3), 271-280.
- [160] Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174.
- [161] Helton, J. C., et al. (2006). Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), 1175-1209.
- [162] Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model

- predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [163] Cacuci, D. G. (2003). *Sensitivity and uncertainty analysis: theory* (Vol. 1). Chapman and Hall/CRC.
- [164] Razavi, S., & Gupta, H. V. (2015). What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of "global" sensitivity in Earth and Environmental systems models. *Water Resources Research*, 51(5), 3070-3092.
- [165] Sudret, B. (2008). Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability engineering & system safety*, 93(7), 964-979.
- [166] Pianosi, F., et al. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214-232.
- [167] Saltelli, A., et al. (2019). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review of sensitivity analysis practices. *Environmental modelling & software*, 114, 29-39.
- [168] Gelman, A., et al. (2013). *Bayesian data analysis*. CRC press.
- [169] Berger, J. O. (2013). *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. Springer Science & Business Media.
- [170] Pawitan, Y. (2001). *In all likelihood: statistical modelling and inference using likelihood*. Oxford University Press.
- [171] Brooks, S., et al. (Eds.). (2011). *Handbook of markov chain monte carlo*. CRC press.
- [172] Hoeting, J. A., et al. (1999). Bayesian model averaging: a tutorial. *Statistical science*, 382-401.
- [173] Gelman, A., et al. (2014). Bayesian workflow. arXiv preprint arXiv:1507.03195.
- [174] Rue, H., et al. (2009). Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 71(2), 319-392.
- [175] Gelman, A., & Hill, J. (2006). *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. Cambridge university press.
- [176] Pearl, J. (2009). *Causality*. Cambridge university press.
- [177] Dosso, S. E., & Wilmut, M. J. (2006). *Uncertainty estimation in simultaneous*

Bayesian tracking of multiple acoustic sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 120(6), 3411-3424.

第五章 水下噪音控制與減量

水下噪音控制與減量是海洋環境保護的核心議題，涵蓋從源頭防制到生態保護的全面性防治策略。隨著海洋交通運輸量的持續增長以及海洋工程建設的快速發展，海洋環境中的人為噪音污染已經成為威脅海洋生態系統健康的重要環境壓力源。本章將系統性地探討各種噪音源的控制技術，包括船舶輻射噪音的降低、工程建設噪音的防制措施、先進的防制技術與設備開發，以及以生態保護為導向的管理策略。這些控制措施的有效實施需要結合技術創新、法規制定和環境管理三個層面，形成完整的水下噪音防制體系。

從技術層面來看，水下噪音控制技術涉及聲學工程、機械工程、材料科學和數位訊號處理等多個學科領域，需要針對不同噪音源特性開發相應的控制策略。船舶作為最主要的持續性噪音源，其噪音控制主要集中在推進系統最佳化、船體振動抑制和低噪音設計等方面。海洋工程建設活動所產生的高強度脈衝性噪音，則需要採用氣泡屏障、聲學屏蔽和時空管制等多元化防制技術。從管理層面而言，有效的噪音控制需要建立完善的監測體系、制定適當的限值標準，並透過海洋保護區劃設和活動時空管制等措施，減少人為噪音對海洋生物的累積性影響。

當前國際社會對水下噪音控制日益重視，國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)、國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)等國際組織相繼制定相關技術標準和政策指引。歐盟海洋策略框架指令(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)已將水下噪音列為需要評估和管制的環境指標，美國和加拿大等國家也建立了相應的噪音管制框架。這些國際趨勢推動了噪音控制技術的快速發展，同時也為技術創新和產業轉型提供了重要機遇。未來的噪音控制將朝向更精準的源頭防制、更智慧的監測預警和更生態友善的工程實踐方向發展，形成技術先進、管理完善、生態永續的綜合防制體系。

5.1 船舶噪音控制

船舶輻射噪音控制是水下噪音防制的重要領域，因為商船交通是海洋環境中最主要的持續性噪音源。根據 McKenna 等學者的研究，現代商船輻射噪音主要來自推進系統，特別是螺槳空化現象所產生的寬頻噪音[1]。船舶噪音控制技術涵蓋設計階段的低噪音最佳化、建造過程的振動噪音控制，以及營運階段的噪音管

理策略。有效的船舶噪音控制需要從船體設計、推進系統、輔機設備和營運管理等多個面向進行綜合考量，以達到在不顯著影響船舶性能和經濟效益的前提下，最大程度降低水下輻射噪音的目標。

國際標準化組織制定的 ISO 17208 系列標準為船舶水下輻射噪音的量測和評估提供了統一的技術框架[2]。該標準系列包括量測程序、計算方法和報告格式等具體規範，為船舶噪音控制技術的開發和驗證提供了重要依據。近年來，隨著海洋環境保護意識的提升和相關法規的逐步完善，船舶業界對低噪音技術的需求日益增長，推動了相關技術的創新發展。現代船舶噪音控制技術已經從傳統的被動隔音發展為主動噪音控制、智慧化振動抑制和適應性噪音管理等先進技術，形成了多層次、全方位的技術體系。

5.1.1 推進系統噪音控制

推進系統是船舶水下輻射噪音的主要來源，其中螺槳空化噪音通常佔總噪音的 60-80%。螺槳空化現象發生在葉片表面壓力降低至當地水的蒸汽壓以下時，產生氣泡的形成、發展和潰滅過程，這個過程會產生強烈的寬頻噪音和脈衝性噪音。Özden 等學者的數值研究表明，螺槳設計參數如葉片數、螺距比、彎度分佈和厚度分佈等，對空化噪音特性具有顯著影響[3]。現代螺槳噪音控制技術主要包括螺槳幾何最佳化、材料改良、表面處理和操作參數調整等方法。

螺槳幾何最佳化是控制空化噪音最有效的方法之一。透過計算流體動力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 和聲學類比方法，可以在設計階段預測不同幾何參數對噪音特性的影響。Sezen 等學者開發的數值預測方法能夠準確計算螺槳水下輻射噪音，為螺槳低噪音設計提供了重要工具[4]。最佳化設計的關鍵在於平衡推進效率和噪音控制的需求，通常採用多目標最佳化方法，同時考慮推力係數、扭矩係數和噪音水準等性能指標。現代低噪音螺槳設計普遍採用較大的盤面比、適當的傾斜角和特殊的葉片形狀，以減少空化的發生強度和範圍。

螺槳葉片表面的先進處理技術也是噪音控制的重要手段。生物仿生設計從鯨魚鰭和海豚尾鰭的流體動力學特性中獲得靈感，發展出具有微結構表面的螺槳葉片，能夠有效抑制空化氣泡的形成和發展。複合材料的應用使得螺槳葉片能夠具有更複雜的三維幾何形狀和局部彈性變形特性，進一步最佳化流場分佈和降低噪音水準。一些先進設計採用可變螺距或可變形葉片技術，使螺槳能夠根據運行工況自動調整幾何參數，在不同航行條件下都能維持較低的噪音水準。

推進電機和軸系的振動控制對減少船體輻射噪音同樣重要。Caresta 和

Kessissoglou 的研究表明，透過推進系統的振動聲學最佳化設計，可以顯著降低船體遠場輻射噪音[5]。現代船舶廣泛採用彈性聯軸器、振動阻尼器和主動隔振系統，以減少推進系統振動向船體的傳遞。軸承系統的設計和潤滑油的選擇也會影響軸系振動特性，需要在設計階段進行綜合考慮。一些高端船舶採用磁浮軸承或氣浮軸承技術，從根本上消除機械摩擦產生的振動和噪音。

電力推進系統因其優異的噪音控制性能而在現代船舶中得到廣泛應用。與傳統機械傳動系統相比，電力推進系統能夠實現更精確的轉速控制，避免螺槳在高空化區域運行。變頻器和電機控制技術的發展使得推進電機能夠在寬範圍內平穩調速，並且能夠根據海況條件最佳化運行參數。混合動力推進系統結合了內燃機和電力推進的優勢，在低速航行時採用電力推進模式，可以顯著降低噪音水準，特別適合在環境敏感區域航行。

螺槳氣泡屏障技術是近年來發展的創新噪音控制方法。該技術在螺槳周圍釋放微細氣泡，形成一道氣泡屏障，能夠吸收和散射螺槳空化產生的聲波能量。Hilliard 等學者的研究表明，螺槳氣泡屏障系統可以實現 5-15 dB 的噪音降低效果[6]。氣泡屏障的設計需要考慮氣泡大小分佈、釋放位置和流量控制等因素，以確保在有效降噪的同時不影響推進效率。這項技術目前主要應用於軍用船舶和高端商船，隨著技術成熟度的提升和成本的降低，預期將在更廣範圍內得到應用。

5.1.2 船體振動與結構噪音控制

船體振動是水下輻射噪音的重要傳播途徑，各種機械設備產生的振動能量透過船體結構向水中輻射聲波。有效的船體振動控制需要從振動源控制、傳遞路徑阻斷和輻射面處理三個層面進行綜合防制。現代船舶設計廣泛採用振動數值分析方法，在設計階段預測和最佳化船體的振動特性，以減少噪音輻射。

船體結構設計對振動噪音控制具有決定性影響。合理的結構佈局能夠避免主要振動源與敏感結構部位的共振耦合，降低振動放大效應。船體板材的厚度分佈、肋骨間距和艙室劃分等設計參數都會影響結構的動力學特性。現代船舶設計普遍採用有限元素方法進行船體振動分析，建立詳細的結構動力學模型，預測不同頻率下的振動模態和響應特性。透過結構最佳化設計，可以將結構共振頻率調整至遠離主要激勵頻率的範圍，避免共振放大現象。

阻尼材料的應用是控制船體振動的有效手段。現代阻尼材料包括黏彈性阻尼層、約束阻尼結構和主動阻尼系統等多種形式。黏彈性阻尼材料透過內摩擦將振動能量轉換為熱能，能夠在較寬的頻率和溫度範圍內提供穩定的阻尼效果。約

束阻尼結構採用三明治式構造，在兩層金屬板之間夾設黏彈性阻尼材料，能夠大幅提升結構的阻尼比。一些先進船舶採用智慧材料製成的主動阻尼系統，能夠根據振動狀態自動調整阻尼特性，實現最佳的振動控制效果。

機械設備的隔振安裝是減少振動傳遞的關鍵技術。船舶上的主機、發電機、幫浦和空調系統等設備都需要採用適當的隔振措施。彈性支撐系統能夠在設備和船體結構之間提供振動隔離，減少振動能量的傳遞。隔振器的設計需要考慮靜載荷、動載荷和環境條件等因素，選擇合適的剛度和阻尼特性。現代船舶廣泛採用雙層隔振系統，在設備和基礎之間設置兩級隔振器，能夠在更寬的頻率範圍內提供有效的隔振效果。

船體表面的聲學處理能夠直接影響水下輻射噪音。吸音材料的應用可以減少艙室內的混響噪音，降低透過船體向外輻射的聲能。現代吸音材料包括多孔材料、共振吸音結構和複合吸音系統等。多孔吸音材料如玻璃纖維、岩棉和泡沫塑膠等，主要對中高頻噪音具有良好的吸收效果。共振吸音結構透過設計特定的共振腔體，能夠針對特定頻率提供高效的吸音效果。一些先進的複合吸音系統結合了多種吸音機制，能夠在寬頻範圍內提供優異的吸音性能。

船體水下部分的特殊塗層技術也是噪音控制的重要手段。消聲塗層透過材料的特殊微結構設計，能夠吸收和散射水中的聲波，減少聲波的反射和傳播。這類塗層通常採用多層複合結構，每一層都針對特定頻率範圍進行最佳化設計。除了消聲功能外，這些塗層還需要具備良好的耐海水腐蝕性能和機械強度，以適應惡劣的海洋環境。隨著奈米材料技術的發展，新一代消聲塗層在保持輕量化的同時，能夠提供更優異的消聲效果和耐久性能。

5.1.3 輔機設備噪音控制

船舶輔機設備包括發電機、幫浦系統、通風設備、壓縮機和各種處理設備等，這些設備雖然不是主要的噪音源，但其累積效應對船舶總體噪音水準仍有重要影響。輔機設備的噪音控制需要針對不同設備的特性採用相應的技術措施，形成系統性的控制策略。現代船舶設計趨向於將輔機設備集中佈置在專門的機艙內，透過統一的噪音控制措施提升整體防制效果。

發電機組是船舶上重要的噪音源之一，其噪音主要來自柴油機的燃燒噪音、機械噪音和發電機的電磁噪音。柴油發電機組的噪音控制需要從發動機本體、排氣系統、冷卻系統和發電機等多個部分進行綜合處理。現代低噪音發電機組普遍採用先進的燃燒室設計、精密的噴射系統和最佳化的配氣時機，從源頭降低燃燒

噪音。排氣消音器的設計對控制排氣噪音至關重要，通常採用阻性消音器和抗性消音器相結合的複合結構，在寬頻範圍內提供有效的消音效果。

幫浦系統的噪音控制主要針對液體動力學噪音和機械振動噪音。離心幫浦的葉輪設計、蝸殼形狀和間隙控制等參數都會影響噪音特性。現代低噪音幫浦設計採用最佳化的葉輪幾何形狀，減少流體分離和渦流現象，降低液體動力學噪音。幫浦的支撐基礎設計也很重要，需要提供足夠的剛度以避免共振，同時透過隔振措施減少振動傳遞。管路系統的設計應避免急轉彎和截面突變，減少流體噪音的產生和傳播。

通風和空調系統是影響船舶整體噪音環境的重要因素。風機的選型和安裝對系統噪音水準具有決定性影響。低噪音風機通常採用後彎式葉片設計、最佳化的蝸殼形狀和精密的動平衡技術，能夠在保證通風效果的同時顯著降低噪音水準。風管系統的設計需要避免急轉彎和截面突變，並在適當位置設置消音器和隔音措施。現代船舶通風系統普遍採用變頻控制技術，能夠根據實際需求調整風機轉速，在滿足通風要求的前提下最小化噪音產生。

壓縮機系統的噪音控制需要針對不同類型的壓縮機採用相應的措施。螺桿式壓縮機的噪音主要來自螺桿嚙合和氣體壓縮過程，現代低噪音螺桿壓縮機採用精密的螺桿型線設計和最佳化的間隙控制，能夠顯著減少氣體洩漏噪音。離心式壓縮機的噪音控制重點在於葉輪設計和擴散器最佳化，現代設計採用三維最佳化方法，在保證壓縮效率的同時最小化氣動噪音。壓縮機的隔音罩設計需要兼顧消音效果和散熱需求，通常採用通風消音結構，在提供有效隔音的同時確保設備正常運行。

液壓系統的噪音控制主要針對幫浦噪音和管路振動。液壓幫浦的噪音控制需要從幫浦本體設計、管路佈置和系統壓力控制等方面進行綜合考慮。現代低噪音液壓幫浦採用最佳化的配流盤設計、精密的製造工藝和先進的控制技術，能夠顯著降低壓力脈動和相關噪音。液壓管路的支撐和固定對減少振動傳播很重要，需要在管路適當位置設置隔振支架和阻尼器。蓄能器的合理配置能夠減少系統壓力波動，進一步降低噪音水準。

5.2 工程與建設噪音控制

海洋工程與建設活動產生的高強度脈衝性噪音對海洋生態系統構成嚴重威脅，特別是打樁作業、爆破工程和大型機械作業等活動。這些建設噪音的特點是

聲強高、頻譜寬、傳播距離遠，能夠對數十公里範圍內的海洋生物造成影響。Nehls 等學者的評估研究表明，離岸風電建設中的打樁噪音可能對海洋哺乳動物造成聽覺損傷和行為干擾[7]。因此，發展有效的工程建設噪音控制技術對保護海洋生態環境具有重要意義。

現代海洋工程建設噪音控制技術主要包括氣泡屏障系統、隔音套管、水中爆炸控制和時空管制措施等。這些技術的應用需要根據工程特性、環境條件和保護目標進行綜合選擇和最佳化配置。Koschinski 和 Lüdemann 的研究顯示，適當的噪音減量技術能夠將打樁噪音降低 10-20 dB，顯著減少對海洋生物的影響範圍[8]。隨著離岸風電和海洋平臺建設的快速發展，噪音控制技術也在不斷創新和完善，朝向更高效、更經濟和更環保的方向發展。

5.2.1 打樁作業噪音控制

打樁作業是海洋工程建設中最主要的高噪音活動，特別是大直徑單樁基礎的安裝會產生極高的水下噪音。打樁噪音的控制技術主要包括氣泡屏障、隔音套管、軟啟動程序和替代施工方法等。氣泡屏障技術是目前應用最廣泛的打樁噪音控制方法，透過在打樁點周圍釋放大量微細氣泡，形成一道圓形的氣泡屏障，利用氣泡對聲波的吸收和散射作用減少噪音傳播。

大氣泡屏障(Big Bubble Curtain, BBC)系統是最常用的氣泡屏障技術。該系統通常由壓縮空氣供應系統、分配管網和環形釋放管組成。釋放管沿樁基周圍呈圓形佈置，管上設有大量微孔，壓縮空氣透過微孔釋放形成連續的氣泡屏障。Peng 等學者的多物理場數值模擬研究表明，氣泡屏障的減噪效果主要取決於氣泡密度、屏障厚度和氣泡大小分佈等參數[9]。最佳化設計的氣泡屏障系統能夠實現 15-20 dB 的噪音降低效果，有效減少打樁噪音的傳播距離。

雙重氣泡屏障(Double Bubble Curtain, DBC)技術是在單一氣泡屏障基礎上發展的增強型系統。該系統設置內外兩道氣泡屏障，通常內屏障距離樁基較近，外屏障距離較遠，兩道屏障的氣泡參數可以分別最佳化。研究表明，雙重氣泡屏障能夠比單一屏障提供額外 5-10 dB 的噪音減量效果。Dähne 等學者在丹麥 DanTysk 離岸風場的實地測試結果顯示，雙重氣泡屏障系統將海豚的影響半徑從 5-6 公里減少到約 260 公尺[10]。

隔音套管(Isolation Casing System, ICS)是另一種有效的打樁噪音控制技術。該系統在樁基周圍安裝一個密閉的鋼製套管，套管內填充吸音材料或設計特殊的

聲學結構。隔音套管能夠直接包圍噪音源，從根本上阻斷噪音向外傳播。與氣泡屏障相比，隔音套管不依賴外部空氣供應，受海況條件影響較小，但安裝和回收較為複雜。現代隔音套管設計採用模組化結構，能夠根據樁基尺寸進行調整，並配備專門的起重設備進行安裝和回收。

液壓衝擊錘(Hydraulic Impact Hammer)的先進控制技術能夠從源頭減少噪音產生。現代液壓錘採用精密的控制系統，能夠調整衝擊能量、衝擊頻率和衝擊波形等參數。軟啟動程序是重要的噪音控制措施，透過逐步增加衝擊能量，使海洋動物有時間離開施工區域。典型的軟啟動程序包括初始的低能量衝擊階段、逐步能量增加階段和正常施工階段。整個軟啟動過程通常持續 20-40 分鐘，能夠有效減少對海洋動物的驚嚇效應。

水中聲學監測(Passive Acoustic Monitoring, PAM)技術在打樁噪音控制中發揮重要作用。透過在施工區域佈設水聽器陣列，能夠即時監測海洋動物的活動狀況和噪音暴露水準。當探測到保護動物進入預警區域時，可以暫停施工作業，等待動物離開後再繼續。現代 PAM 系統具備自動探測和分類功能，能夠識別不同種類海洋動物的聲學信號，提供精確的監測資訊。一些先進系統還整合了主動聲納技術，能夠更準確地確定動物的位置和行為狀態。

替代施工方法的發展為減少打樁噪音提供了新的途徑。振動沈樁技術利用高頻振動使樁基逐漸下沉，產生的噪音遠低於衝擊式打樁。鑽孔灌注樁技術透過預先鑽孔再灌注混凝土形成樁基，完全避免了高噪音的打樁過程。重力式基礎和吸力式基礎等新型基礎形式也在逐步應用，這些技術在適當的地質條件下能夠顯著減少建設噪音。預裝樁技術將樁基在陸上工廠預製完成，然後運輸至海上直接安裝，大幅縮短海上施工時間和噪音暴露持續時間。

5.2.2 爆破工程噪音控制

水中爆破作業在港口建設、航道疏浚和海底隧道建設中廣泛應用，但爆破產生的高強度脈衝噪音對海洋生物具有極大的傷害潛力。水中爆破的聲學特徵包括極短的上升時間、極高的峰值壓力和寬頻的頻譜分佈，這些特徵使得爆破噪音比其他類型的噪音更容易對海洋生物造成嚴重影響。因此，水中爆破的噪音控制需要採用更嚴格的技術措施和管理程序。

氣泡屏障技術在爆破噪音控制中也有重要應用，但需要針對爆破的特殊性質進行技術調整。爆破氣泡屏障通常需要更高的氣泡密度和更大的屏障規模，以有效吸收爆破產生的強烈衝擊波。多層氣泡屏障系統採用不同半徑的多道氣泡屏

障，能夠分階段衰減爆破能量。氣泡屏障的佈設需要考慮爆破點的精確位置和爆破能量分佈，通常需要覆蓋較大的區域以確保有效防護。

水中爆破的裝藥控制是噪音減量的關鍵技術。分段爆破技術將大當量的爆破分解為多次小當量爆破，雖然增加了爆破次數，但每次爆破的聲能較小，總體生態影響可能較小。延時爆破技術透過精確的雷管延時設計，使多個裝藥點按預定時序依次爆破，避免能量的同時釋放。裝藥形狀和埋深的最佳化設計能夠將爆破能量更多地導向目標岩石，減少向水中輻射的聲能。

爆破時機的選擇對減少生態影響具有重要意義。避開海洋動物的敏感時期(如繁殖期、遷徙期)進行爆破作業，能夠最大程度減少對生物群體的長期影響。潮汐週期也會影響爆破噪音的傳播特性，選擇適當的潮汐條件進行爆破能夠減少噪音的傳播距離。氣象條件如風速、海況等也會影響爆破作業的安全性和噪音控制效果，需要在作業計畫中綜合考慮。

預警和驅離措施是爆破噪音控制的重要組成部分。聲學驅離設備(Acoustic Deterrent Device, ADD)透過發射特定頻率的聲波信號，促使海洋動物主動離開爆破區域。驅離作業通常在爆破前 30-60 分鐘開始，給動物充分的時間離開危險區域。視覺觀察和聲學監測的結合使用能夠確認動物的離開狀況，只有在確認安全區域內沒有保護動物時才能進行爆破作業。

水中隔音屏障的技術發展為爆破噪音控制提供了新的可能性。充氣式隔音屏障採用充氣結構形成臨時的聲學屏障，能夠快速部署和回收。這種屏障內部填充吸音材料，外表面採用聲學最佳化設計，能夠有效阻斷爆破噪音的傳播。浮體式隔音屏障利用浮體結構支撐大面積的隔音材料，適合在較大範圍內提供噪音防護。這些技術的發展使得爆破噪音控制更加靈活和高效。

5.2.3 機械作業噪音控制

海洋工程中的大型機械作業包括挖泥船疏浚、起重船作業、海底管線鋪設和平臺安裝等，這些作業雖然產生的噪音強度低於打樁和爆破，但持續時間長，累積影響不容忽視。機械作業噪音的控制需要從設備選型、操作最佳化和環境管理等多個方面進行綜合考慮，形成全過程的噪音管理策略。

挖泥船作業的噪音控制主要針對挖掘設備、推進系統和泥漿處理系統。現代環保型挖泥船採用電力推進系統和變頻控制技術，能夠根據作業需求調整設備功率，在滿足施工要求的前提下最小化噪音產生。挖掘頭的設計最佳化能夠減少與海底材料的摩擦和衝擊，降低機械噪音。泥漿輸送系統的管路設計和支撐結構

需要避免共振現象,減少振動噪音的產生和傳播。

起重船作業的噪音控制重點在於主起重設備和動力定位系統。大型起重機的液壓系統會產生較強的噪音,現代起重船普遍採用低噪音液壓幫浦和精密的控制系統,減少系統壓力波動和相關噪音。動力定位系統的推進器設計對船舶整體噪音水準有重要影響,最佳化的推進器佈置和控制策略能夠在保證定位精度的同時最小化噪音輸出。起重作業的計畫最佳化能夠減少不必要的機械運轉,縮短高噪音作業的持續時間。

海底管線鋪設作業涉及管線製造、焊接、測試和鋪設等多個環節,每個環節都有相應的噪音控制需求。管線焊接設備的噪音控制需要採用低噪音焊接工藝和隔音措施。管線測試過程中的壓縮空氣釋放會產生強烈的氣動噪音,需要採用消音器和控制釋放速度等措施。鋪管船的張緊器和導向設備需要採用低噪音設計,減少機械摩擦和振動噪音。

海洋平臺安裝作業的噪音控制需要考慮平臺結構的複雜性和安裝過程的多樣性。平臺模組的海上對接作業會產生較強的機械噪音,需要採用精密的定位和連接技術,減少衝擊和摩擦。平臺系統的調試和試運轉過程也會產生各種設備噪音,需要制定詳細的噪音管理計畫,合理安排作業時間和控制設備功率。

機械作業的時空管制是減少生態影響的重要手段。避開海洋生物的敏感時段進行高噪音作業,如避開魚類產卵期和海洋哺乳動物的繁殖遷徙期。作業區域的選擇需要考慮重要生態棲息地和保護區的分佈,盡量在生態敏感性較低的區域進行高噪音作業。作業時間的控制包括每日作業時長限制和連續作業天數限制,給海洋生物提供恢復和適應的時間間隔。

5.3 防制技術與設備

水下噪音防制技術與設備的發展是噪音控制工程的重要基礎,涵蓋從材料科學到系統工程的多個技術領域。現代防制技術主要包括聲學材料、主動噪音控制系統、智慧監測設備和整合管理平臺等。這些技術的發展趨勢朝向更高效、更智慧和更環保的方向演進,為複雜海洋環境下的噪音控制提供先進的技術支撐。隨著材料科學、電子技術和人工智慧的快速發展,新一代防制技術在性能、可靠性和經濟性方面都有顯著提升。

國際先進的防制技術開發主要集中在歐美等發達國家,這些國家在海洋環境保護法規推動下,投入大量資源進行技術創新。德國在離岸風電建設中發展的噪

音控制技術、荷蘭在海洋工程中應用的先進防制設備、以及美國在軍用和民用船舶中開發的低噪音技術,都代表了當前的技術發展水準。這些先進技術的推廣應用為全球海洋噪音控制提供了重要的技術參考和實踐經驗。

5.3.1 聲學屏障與吸音材料

聲學屏障是水下噪音控制的重要技術手段,透過反射、吸收和散射等機制減少聲波的傳播。水下聲學屏障的設計需要考慮水中聲波的傳播特性、海洋環境的複雜性和工程實施的可行性等因素。現代聲學屏障技術包括剛性屏障、柔性屏障和複合屏障等多種形式,每種類型都有其特定的應用場景和技術特點。

氣泡屏障是最成熟和應用最廣泛的水下聲學屏障技術。氣泡對聲波具有強烈的吸收和散射作用,主要機制包括氣泡共振吸收、界面散射和多重散射等。氣泡屏障的聲學性能主要取決於氣泡的大小分佈、數密度和空間分佈等參數。理論研究表明,對於特定頻率的聲波,存在最佳的氣泡半徑,能夠提供最大的吸收效果。實際應用中的氣泡屏障通常包含多種尺寸的氣泡,形成寬頻的吸收特性。現代氣泡屏障系統採用精密的氣體流量控制和分佈系統,能夠根據海況條件和噪音特性調整氣泡參數,實現最佳的防制效果。

剛性聲學屏障採用固體材料構造,主要透過聲阻抗不匹配產生的反射作用減少聲波傳播。這類屏障通常採用鋼材、混凝土或複合材料製造,具有良好的結構強度和耐久性。剛性屏障的聲學設計需要考慮材料厚度、表面形狀和支撐結構等因素。波浪形表面和齒形表面等特殊設計能夠增強聲波的散射效應,提升屏障的減噪效果。一些先進設計採用分層結構,不同層次針對不同頻率範圍進行最佳化,實現寬頻的噪音控制效果。

柔性聲學屏障採用可撓曲材料製造,具有部署靈活、適應性強的特點。這類屏障通常採用聚合物薄膜、織物材料或複合膜材製造,能夠適應海流和波浪的作用而不發生破壞。柔性屏障的聲學性能主要透過材料的阻尼特性和界面效應實現。多層複合結構能夠結合不同材料的優點,在保持柔韌性的同時提供優異的聲學性能。一些先進的柔性屏障整合了充氣結構,能夠根據需要調整屏障的形狀和厚度。

複合聲學屏障結合了多種防制機制,能夠在更寬的頻率範圍內提供有效的噪音控制。典型的複合屏障包括氣泡層和固體層的組合、多孔材料和薄膜材料的組合等。這種設計能夠針對不同頻率的聲波採用最適合的控制機制,整體效果優於單一機制的屏障。複合屏障的設計需要精確的聲學建模和最佳化分析,確保各個組成部分之間的協調配合。

吸音材料在水下應用面臨特殊的挑戰,需要在高壓、腐蝕和生物污損等惡劣條件下保持穩定的性能。水下吸音材料主要包括多孔吸音材料、共振吸音結構和複合吸音系統等。多孔吸音材料利用材料內部的微孔結構產生黏性和熱傳導損耗,將聲能轉換為熱能。這類材料的吸音性能主要取決於孔隙率、孔徑分佈和材料厚度等參數。

海洋環境下的多孔吸音材料需要具備優異的耐水性能,防止海水滲透導致性能下降。現代多孔吸音材料普遍採用閉孔結構或表面處理技術,在保持吸音性能的同時提高耐水性。一些先進材料採用奈米結構設計,能夠在分子尺度上控制水的滲透,實現長期穩定的吸音效果。生物相容性也是重要考慮因素,材料不應對海洋生物產生毒性或生物污損問題。

共振吸音結構透過設計特定的共振腔體,針對特定頻率提供高效的吸音效果。這類結構通常包括共振腔、連接頸和背板等組成部分,透過精確的尺寸設計實現目標頻率的共振吸收。多重共振結構能夠覆蓋較寬的頻率範圍,透過不同尺寸的共振單元組合實現寬頻吸收。可調諧共振結構採用機械或電子調節機制,能夠根據實際噪音特性調整共振頻率,實現自適應的噪音控制。

5.3.2 主動噪音控制系統

主動噪音控制(Active Noise Control, ANC)技術透過產生與原始噪音相位相反的反相聲波,實現聲波的相消干涉,從而達到噪音消除的效果。在水下環境中,主動噪音控制面臨傳播延遲、環境變化和功率限制等挑戰,但其在特定頻率範圍內能夠提供優異的控制效果,特別是對低頻噪音具有獨特的優勢。現代主動噪音控制系統整合了先進的數位訊號處理、自適應濾波和機器學習等技術,能夠在複雜的海洋環境中實現穩定可靠的噪音控制。

水下主動噪音控制系統的基本組成包括參考感測器、控制演算法、功率放大器、控制源和誤差感測器等。參考感測器負責檢測原始噪音信號,為控制系統提供輸入資訊。控制演算法是系統的核心,負責計算產生反相信號所需的幅度和相位參數。現代控制演算法普遍採用自適應濾波技術,能夠根據環境變化和噪音特性的變化自動調整控制參數。最小均方(Least Mean Squares, LMS)演算法和遞歸最小二乘(Recursive Least Squares, RLS)演算法是常用的自適應控制演算法。

前饋控制和反饋控制是主動噪音控制的兩種基本策略。前饋控制系統透過預先檢測噪音源的信號,計算並產生相應的控制信號,具有較好的穩定性和因果性。反饋控制系統透過檢測控制區域的殘餘噪音,調整控制信號以最小化殘餘噪音水

準。混合控制系統結合了前饋和反饋控制的優點,能夠在更廣泛的條件下提供有效的噪音控制。現代系統普遍採用混合控制策略,並整合多通道控制技術,能夠同時控制多個噪音源和多個控制區域。

水聽器陣列技術在主動噪音控制中發揮重要作用,透過多個水聽器的協同工作,能夠實現空間選擇性的噪音控制。陣列信號處理技術能夠識別噪音的來源方向和傳播特性,為控制系統提供更精確的輸入資訊。波束形成技術能夠將控制能量集中在特定的空間區域,提高控制效率並減少對其他區域的影響。自適應陣列技術能夠根據環境條件的變化自動調整陣列的指向性和增益分佈。

控制源陣列的設計對主動噪音控制系統的性能具有決定性影響。多個控制源的協同工作能夠在較大的空間範圍內實現有效的噪音控制。控制源的數量、位置和指向性需要根據控制目標和環境條件進行最佳化設計。現代控制源普遍採用寬頻響應設計,能夠在較寬的頻率範圍內提供穩定的輸出。一些先進系統採用向量控制源,能夠同時控制聲壓和質點速度,實現更精確的聲場控制。

即時處理能力是主動噪音控制系統成功的關鍵因素。水下聲波的傳播速度約為 1500 m/s,系統必須在極短的時間內完成信號檢測、處理和控制輸出。現代系統普遍採用高速數位信號處理器(Digital Signal Processor, DSP)和現場可程式閘陣列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)等先進處理器,能夠實現微秒級的處理延遲。分散式處理架構將計算任務分配到多個處理單元,進一步提高系統的即時處理能力。

自適應控制演算法的發展使主動噪音控制系統能夠應對複雜多變的海洋環境。環境變化如溫度、鹽度和海流等會影響聲波傳播特性,傳統的固定參數控制系統難以適應這些變化。現代自適應演算法能夠即時識別環境參數的變化,自動調整控制策略。機器學習技術的引入為自適應控制提供了新的可能性,透過歷史資料的學習和模式識別,系統能夠預測環境變化並提前調整控制參數。

5.3.3 智慧監測與管理設備

智慧監測與管理設備是現代水下噪音控制系統的重要組成部分,透過先進的感測技術、通訊技術和資料分析技術,實現對噪音環境的即時監測、評估和管理。這些設備不僅能夠提供準確的噪音資料,還能夠整合生物監測、環境參數測量和活動追蹤等多重功能,為噪音控制決策提供全面的資訊支持。隨著物聯網技術、大數據分析和人工智慧技術的發展,智慧監測設備正朝向更加自動化、智能化和網路化的方向演進。

水下聲學監測網路是智慧監測系統的核心基礎設施。現代監測網路採用分佈式架構,在監測區域佈設多個水聽器節點,形成覆蓋全域的監測網絡。每個監測節點配備高性能水聽器、數據採集系統、本地處理單元和通訊模組等。節點之間透過水下通訊網路或浮標中繼系統進行資料傳輸,實現網路化的協同監測。現代水聽器採用寬頻響應設計和低噪音前端電路,能夠檢測從次聲波到超聲波範圍內的水下聲信號。

自動識別和分類技術使監測系統能夠即時識別不同類型的噪音源和海洋生物信號。機器學習演算法透過對大量聲學資料的訓練,能夠自動識別船舶通過、工程作業、地質活動和生物發聲等不同類型的聲學事件。深度學習技術的應用進一步提高了識別的準確性和可靠性,現代系統能夠識別數十種不同的船舶類型和數百種海洋生物的發聲。自動分類功能能夠將監測資料按照不同類別進行統計分析,為噪音評估和管理提供結構化的資訊。

即時資料處理和分析能力是智慧監測系統的重要特徵。邊緣計算技術將部分資料處理功能前移到監測節點,減少資料傳輸量並提高系統響應速度。本地處理單元能夠進行信號預處理、特徵提取和初步分析,只將關鍵資訊和異常事件上傳到中央管理系統。雲計算平臺提供強大的資料存儲和分析能力,能夠處理海量的監測資料並提供複雜的統計分析和預測功能。

預警和告警系統能夠在噪音水準超過預設閾值或檢測到保護動物時及時發出告警。多層次告警機制包括現場聲光告警、手機簡訊通知和遠端系統推送等多種方式,確保相關人員能夠及時收到告警資訊。智慧預警系統能夠根據噪音發展趨勢和環境條件變化預測可能的超標情況,提供提前預警功能。一些先進系統還整合了氣象資料和海況預報,能夠預測環境條件對噪音傳播的影響。

行動監測設備為特定區域或特定時期的噪音監測提供靈活的解決方案。自主水下載具(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)搭載聲學監測設備,能夠進行機動性的水下噪音測量。這類設備特別適合用於大範圍的噪音調查、施工現場的近距離監測和生態敏感區域的專項監測。漂流式監測浮標能夠隨海流移動進行路徑監測,適合用於研究噪音的時空分佈特性。

資料管理和視覺化平臺為監測資料的存儲、查詢和分析提供便利的介面。地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)整合使監測資料能夠與地理位置資訊關聯,實現空間分析和視覺化展示。即時監控畫面能夠顯示各監測點的即時狀態、噪音水準分佈和告警資訊。歷史資料查詢和統計分析功能支援長期趨勢

分析和環境評估工作。

人工智慧技術在噪音監測中的應用正在快速發展。機器學習演算法能夠從歷史監測資料中發現噪音的規律性和相關性，為噪音預測和控制最佳化提供依據。強化學習技術能夠透過與環境的互動學習最佳的監測策略和控制策略。自然語言處理技術能夠分析相關的文本資訊，如船舶動態資訊、氣象報告和環境評估報告等，為監測系統提供更全面的資訊支持。

5.4 生態保護措施

生態保護措施是水下噪音控制體系中不可或缺的重要組成部分，其目標在於最大程度減少人為噪音對海洋生態系統的負面影響。這些措施涵蓋空間管制、時間管制、行為干預和棲息地保護等多個層面，形成綜合性的生態保護策略。Southall 等學者提出的海洋哺乳動物噪音暴露標準為制定科學的保護措施提供了重要依據[11]。生態保護措施的有效實施需要深入理解海洋生物的聲學生態特性、行為模式和環境需求，並將這些科學知識轉化為具體的管理行動。

現代生態保護措施越來越注重基於生態系統的管理方法，不僅關注個體物種的保護，更重視整個生態系統的健康和完整性。Ellison 等學者提出的情境化評估方法強調需要考慮生物的行為狀態、環境條件和累積影響等因素[12]。這種整合性方法要求保護措施能夠適應不同的生態情境和環境條件，並具備足夠的彈性以應對複雜多變的海洋環境。隨著海洋生態學研究的深入和監測技術的進步，生態保護措施正朝向更科學、更精準和更有效的方向發展。

5.4.1 海洋保護區與緩衝區設計

海洋保護區(Marine Protected Areas, MPAs)的設計和管理是減少水下噪音生態影響的重要策略，透過空間管制措施為海洋生物提供相對安靜的棲息環境。有效的海洋保護區設計需要考慮保護目標物種的分佈範圍、聲學敏感性、關鍵棲息地特徵和人為活動強度等多個因素。Hatch 和 Fristrup 的研究強調了區域性噪音管理框架對保護區效果的重要性[13]。現代保護區設計趨向於建立多層次的保護體系，包括核心保護區、緩衝區和過渡區等不同保護等級的區域。

核心保護區是噪音管制最嚴格的區域，通常禁止或嚴格限制所有可能產生高噪音的人為活動。這些區域的選擇需要基於重要生態價值的科學評估，如關鍵繁殖地、育幼區、覓食區和遷徙通道等。La Manna 等學者在地中海保護區的研究發現，即使在保護區內，不同分區的噪音水準也存在顯著差異[14]。核心保護區的

邊界劃設需要考慮聲波傳播特性和目標物種的聽覺敏感性,確保保護區內的噪音水準低於可能造成生理或行為影響的閾值。

緩衝區在核心保護區周圍設立,實施相對寬鬆但仍有效的噪音管制措施。緩衝區的主要功能是減少外部噪音向核心保護區的傳播,並為生物提供從高噪音區域向低噪音區域遷移的過渡空間。緩衝區內可以允許某些低影響的人為活動,但需要採取適當的噪音控制措施。船舶航行可能被允許通過緩衝區,但需要遵守速度限制、航路指定和時間限制等規定。建設活動可能在特定條件下被允許,但必須採用最佳可行的噪音控制技術。

動態保護區是新興的保護區管理概念,能夠根據生物分佈的季節性變化和環境條件的變化調整保護區的邊界和管制強度。McKenna 等學者在保護區網路的研究中發現,船舶噪音的空間和時間尺度變化很大,需要彈性的管理方法[15]。動態保護區的實施需要即時的生物監測資料和環境資訊,透過衛星追蹤、聲學監測和環境感測等技術獲得生物分佈和行為的即時資訊。當監測顯示重要生物群體進入特定區域時,可以臨時啟動或加強該區域的噪音管制措施。

保護區網路的設計考慮到單一保護區在空間尺度上的局限性,透過建立多個相互連接的保護區形成網路化的保護體系。網路設計需要考慮生物的遷徙路線、種群連接性和海洋生態系統的空間結構等因素。相鄰保護區之間的連接走廊需要實施適當的噪音管制,確保生物能夠在不同保護區之間安全遷移。區域協調機制確保不同保護區之間的管理政策保持一致性和連貫性。

保護區效果的科學評估是管理決策的重要依據。Buscaino 等學者在地中海保護區的長期監測研究顯示了保護區在噪音控制方面的效果差異[16]。評估指標包括保護區內外的噪音水準差異、目標物種的豐富度變化、行為狀態指標和生理健康指標等。聲景生態學方法透過分析整個聲學環境的特徵評估保護區的生態健康狀況。自動監測技術使長期連續的評估成為可能,能夠檢測保護效果的季節性變化和年際變化。

保護區與人為活動的協調管理是實現可持續發展的關鍵挑戰。航運業、漁業、海洋工程和海洋旅遊等行業都可能受到保護區管制措施的影響。利益相關者參與機制確保各方在保護區規劃和管理中的聲音得到聽取。經濟影響評估分析保護區措施對相關產業的影響,並探討補償和替代方案。適應性管理方法允許根據實施效果和新的科學發現調整保護區的管理措施。

5.4.2 時間性活動限制

時間性活動限制是基於海洋生物生活週期和行為模式的生態保護策略,透過在生物最敏感的時期限制或禁止高噪音活動,最大程度減少對關鍵生物過程的干擾。這種方法的科學基礎在於許多海洋生物具有明確的季節性行為模式,如繁殖、遷徙、覓食和育幼等關鍵生活史階段對噪音干擾特別敏感。Gomez 等學者的系統性回顧研究表明,海洋哺乳動物對人為噪音的行為響應具有顯著的季節性差異 [17]。

繁殖期保護是時間性限制的重要應用領域。許多海洋哺乳動物在繁殖期會聚集在特定的區域進行交配、產仔和育幼活動,這些時期的噪音暴露可能對繁殖成功率和幼體存活率造成嚴重影響。鯨魚的繁殖期通常具有明確的季節性,例如座頭鯨在冬季遷移到溫暖海域進行繁殖,灰鯨在春季進行北向遷徙。在這些關鍵時期實施建設活動和船舶交通的限制能夠有效保護繁殖群體。海豹和海獅的陸地繁殖期雖然主要在陸地進行,但其海上覓食活動仍可能受到水下噪音的影響。

遷徙期保護針對海洋動物的大規模季節性移動行為。許多鯨類具有固定的遷徙路線和時間表,如灰鯨的南北向遷徙、座頭鯨的跨洋遷徙等。遷徙過程中的動物通常處於能量消耗較大的生理狀態,對環境變化更加敏感。魚類的遷徙如鮭魚洄游、金槍魚遷移等也具有重要的生態和經濟價值。在主要遷徙路線和關鍵遷徙時期實施噪音管制能夠減少對遷徙行為的干擾,保護動物的正常遷移模式。

覓食期保護考慮到許多海洋動物的覓食行為對噪音干擾非常敏感。齒鯨類動物依賴回聲定位進行捕食,人為噪音可能干擾其聲納系統的正常功能。須鯨類動物在覓食時需要保持安靜以避免驚散獵物,高噪音環境可能迫使其放棄覓食或遷移到其他區域。魚類的集群覓食行為也可能受到噪音影響,改變其空間分佈和行為模式。在重要覓食區域和覓食高峰期實施適當的噪音限制能夠保護動物的正常覓食活動。

育幼期保護特別關注幼體動物對噪音的高敏感性。新生的海洋哺乳動物聽覺系統尚未完全發育,對噪音暴露更加敏感。母幼之間的聲學交流對維持親子關係和幼體學習至關重要,噪音干擾可能導致親子分離或影響幼體的正常發育。魚類的產卵和孵化過程也可能受到噪音影響,一些研究顯示噪音可能影響魚卵的孵化率和仔魚的存活率。在重要的育幼區域和育幼季節實施嚴格的噪音管制是保護下一代的關鍵措施。

晝夜活動模式的考慮反映了許多海洋動物具有明確的日週期行為節律。一些動物在特定時段(如黎明或黃昏)較為活躍,這些時段的噪音暴露可能對其行為

產生更大影響。深海動物的垂直遷移通常具有明確的晝夜節律,噪音可能干擾這種重要的生態過程。夜間是許多海洋動物進行長距離聲學交流的重要時期,因為夜間的背景噪音通常較低。在動物活動的高峰時段實施噪音限制能夠保護其正常的行為節律。

季節性限制措施的實施需要基於準確的生物學資料和環境監測資訊。長期的生物監測能夠確定目標物種的活動模式和關鍵生活史階段的時間安排。衛星標記和聲學標記技術提供動物移動和行為的詳細資料。環境因子如水溫、食物豐度和海況條件也會影響動物的活動模式,需要在制定限制措施時綜合考慮。氣候變化可能改變動物的季節性行為模式,需要定期更新和調整時間性限制措施。

5.4.3 行為干預與驅離技術

行為干預與驅離技術是在無法完全避免噪音暴露情況下保護海洋動物的重要手段,透過人工方式影響動物行為,使其主動遠離高噪音區域或採取保護性行為。這些技術需要基於對目標物種行為生態學的深入理解,確保干預措施不會對動物造成額外的壓力或傷害。Gordon 等學者的評估研究為聲學驅離技術的應用提供了重要的科學依據[18]。行為干預技術的發展趨勢朝向更精準、更人性化和更生態友善的方向發展。

聲學驅離設備(Acoustic Deterrent Devices, ADDs)是最常用的行為干預技術,透過播放特定的聲學信號促使動物離開潛在的危險區域。不同種類的海洋動物對不同頻率和強度的聲學信號具有不同的響應模式。鯨豚類動物通常對高頻調頻信號較為敏感,而鰭足類動物可能對較低頻的純音信號有更強的響應。驅離設備的聲學參數需要根據目標物種的聽覺特性和行為特徵進行精確設計,確保在有效驅離的同時避免對動物造成聽覺損傷。

漸進式驅離是一種溫和的行為干預策略,透過逐步增加刺激強度使動物逐漸適應並主動離開。這種方法避免了突然的強烈刺激可能導致的驚嚇反應和不良後果。典型的漸進式驅離程序包括初始的低強度信號階段、逐步強度增加階段和維持階段。整個過程需要根據動物的響應情況進行調整,如果動物顯示出明顯的離開行為,可以減緩或停止刺激強度的增加。如果動物未顯示響應,可能需要調整信號參數或採用其他干預方法。

生物學相容性驅離技術利用動物的自然行為模式和社會結構實現溫和有效的驅離。模擬天敵聲音的播放可能促使獵物動物離開特定區域,但需要注意避免長期使用導致的習慣化效應。同種動物的告警聲可能對群體動物產生有效的驅離

效果。人工模擬的社會信號可能引導動物改變其空間分佈或行為狀態。這些技術需要基於對目標物種行為生態學的深入研究,確保所使用的信號在生物學上是有意義和有效的。

視覺驅離技術適用於在水面活動或視覺敏感的海洋動物。閃光燈系統透過強烈的光脈衝刺激動物的視覺系統,可能促使其改變行為或離開特定區域。光的顏色、閃爍頻率和強度需要根據目標物種的視覺特性進行最佳化。鐳射系統能夠產生定向的光束,對特定個體或小群體動物進行精準的視覺刺激。需要注意的是,過強的光刺激可能對動物的視覺系統造成永久性損傷,因此必須嚴格控制光的強度和曝光時間。

物理驅離技術包括水流刺激、振動刺激和其他機械干預方式。水下噴射系統透過產生強烈的水流擾動水體環境,可能促使動物離開特定區域。這種方法的優點是不產生額外的噪音污染,但可能對水體環境和其他生物產生影響。振動平臺透過產生機械振動傳遞到水中,對底棲動物或對振動敏感的動物可能產生驅離效果。物理障礙如網具或柵欄可以直接阻止動物進入危險區域,但需要考慮對動物正常活動的影響。

化學驅離技術利用動物的化學感受能力實現行為調節,但在海洋環境中的應用較為有限。一些魚類對特定的化學物質具有迴避反應,可能透過釋放這些物質實現驅離效果。然而,化學物質在海洋中的擴散和稀釋很快,且可能對海洋環境和其他生物產生不良影響。因此,化學驅離技術的應用需要極其謹慎,通常只在特殊情況下考慮使用。

整合性驅離系統結合多種驅離技術,能夠適應不同的環境條件和目標物種。多模式系統可以根據即時監測結果選擇最適合的驅離方式。自適應系統能夠根據動物的響應情況自動調整驅離策略。智慧控制系統整合人工智慧技術,能夠學習和預測動物的行為模式,提供更精準和有效的驅離方案。

驅離技術的效果評估是確保技術應用科學性和有效性的重要環節。行為監測透過觀察動物的移動軌跡、活動模式和生理指標評估驅離效果。聲學監測能夠追蹤動物在驅離前後的分佈變化。長期跟蹤研究評估驅離技術對動物健康和行為的長期影響。效果評估的結果用於不斷改進和最佳化驅離技術,確保其在保護動物安全的同時最小化對動物的負面影響。

5.5 低噪設計與技術創新

低噪設計與技術創新代表了水下噪音控制的未來發展方向,透過在設計階段就考慮噪音控制需求,從源頭上減少噪音的產生,比事後的控制措施更加經濟有效。現代低噪設計整合了聲學工程、流體力學、材料科學、控制工程和資訊技術等多個學科的先進成果,形成系統性的設計方法學。Tomy 等學者的研究表明,將水下輻射噪音作為螺槳設計約束條件,能夠在不顯著影響推進性能的前提下大幅降低噪音水準[19]。

技術創新在低噪設計中發揮核心推動作用,新材料、新工藝、新結構和新控制方法的不斷湧現為噪音控制提供了更多的技術選擇。奈米材料技術使得新一代吸音和隔音材料具有更優異的性能和更輕的重量。3D 列印技術使複雜幾何形狀的聲學結構設計成為可能,為客製化的噪音控制方案提供了實現途徑。人工智慧和機器學習技術的應用使設計最佳化過程更加智慧和高效,能夠在複雜的多目標最佳化問題中找到最佳解決方案。

5.5.1 船舶一體化低噪設計

船舶一體化低噪設計是將噪音控制理念貫穿船舶設計全過程的系統性方法,從總體佈置、結構設計、系統配置到細部設計都充分考慮噪音控制需求。這種方法突破了傳統的分系統獨立設計模式,將噪音控制作為與安全、性能、經濟性同等重要的設計目標,實現各子系統之間的最佳化協調。一體化設計的核心在於建立船舶噪音的系統級預測模型,能夠在設計階段準確評估不同設計方案的噪音特性。

船體線型最佳化是低噪設計的基礎環節,透過改善船體周圍的流場特性減少流體動力噪音的產生。現代船體線型設計廣泛應用計算流體力學(CFD)技術,能夠預測不同線型參數對流場分佈和壓力脈動的影響。球鼻艏的設計對船體噪音特性有重要影響,適當的球鼻艏形狀能夠減少船首波浪和壓力脈動。船尾線型的最佳化重點在於為螺槳提供均勻的入流條件,減少螺槳激勵力的不均勻性。現代設計採用多目標最佳化方法,在追求低阻力、良好操縱性的同時兼顧低噪音特性。

推進系統的一體化設計考慮主機、軸系、螺槳和船體之間的相互影響,實現系統級的噪音最佳化。主機與螺槳的匹配設計確保螺槳在最佳效率點附近工作,避免過載或輕載狀態下的高噪音運轉。軸系設計採用精密的動態分析方法,控制軸系振動和相關的噪音輻射。螺槳設計不僅考慮推進效率,更將噪音控制作為重要的設計約束。導管螺槳系統透過導管與螺槳的最佳化匹配,能夠在提高推進效率的同時降低噪音水準。

船體結構的振動噪音控制需要在結構設計階段就進行全面考慮。有限元素

分析方法能夠預測船體結構在各種激勵下的振動響應特性。結構最佳化設計透過調整板厚分佈、肋骨配置和艙室劃分等參數,避免結構共振和振動放大現象。高阻尼材料的應用和約束阻尼結構的設計能夠有效消耗振動能量。隔振基座系統的設計為各種機械設備提供有效的振動隔離,阻斷振動能量向船體結構的傳遞。

艙室佈置最佳化是一體化低噪設計的重要環節,透過合理的功能分區和空間配置減少噪音的產生和傳播。高噪音設備如主機、發電機等集中佈置在專用機艙內,便於實施統一的噪音控制措施。居住艙室和工作區域遠離主要噪音源佈置,並在中間設置緩衝區域。管路和電纜的走向設計避免穿越安靜區域,減少噪音的傳播路徑。通風和空調系統的佈置採用低噪音設計原則,避免風管系統成為噪音傳播的通道。

船舶系統整合最佳化考慮各個子系統之間的相互影響和協調配合。電力系統的設計採用變頻技術和智慧控制,使各種電氣設備能夠根據實際需求調整運轉狀態,避免不必要的高噪音運轉。液壓系統的壓力控制和流量分配最佳化能夠減少系統噪音。自動化系統的應用使船舶能夠根據航行條件和作業需求自動最佳化各系統的運轉參數,實現動態的噪音控制。

數位化設計平臺為一體化低噪設計提供強大的技術支撐。三維設計軟體整合了幾何建模、性能分析和最佳化設計功能,使設計師能夠在統一的平臺上進行多學科協同設計。虛擬實境技術使設計方案的視覺化和互動式評審成為可能。數位雙胞胎技術建立船舶的數位化模型,能夠在虛擬環境中測試不同設計方案的噪音性能。

5.5.2 新材料與新結構應用

新材料與新結構的應用為水下噪音控制開闢了新的技術途徑,透過材料特性的革新和結構設計的創新實現更優異的噪音控制效果。現代材料科學的發展使得功能材料、智慧材料和複合材料在噪音控制中得到廣泛應用。奈米技術的引入使材料能夠在微觀尺度上實現特殊的聲學特性。生物仿生材料從自然界的聲學現象中獲得靈感,發展出具有獨特性能的新型聲學材料。

超材料(Metamaterials)是近年來聲學領域的重要突破,透過週期性微結構設計實現自然材料無法達到的聲學特性。聲學超材料能夠實現負折射、聲學隱身和異常透射等奇特現象,為噪音控制提供了全新的物理機制。週期性結構能夠產生頻率帶隙,在特定頻率範圍內完全阻止聲波傳播。局域共振結構透過微型共振單元的集體效應實現寬頻的噪音控制。可調諧超材料能夠透過外部控制改變其聲學

特性,實現自適應的噪音控制。

梯度材料透過連續變化的材料特性實現聲波的漸變式控制,避免界面反射造成的能量損失。功能梯度材料(Functionally Graded Materials, FGM)在厚度方向上具有連續變化的密度、彈性模量和阻尼特性,能夠實現聲波的平滑過渡和有效吸收。密度梯度材料透過密度的逐漸變化實現聲阻抗的匹配,提高聲波的透射和吸收效率。阻尼梯度材料將不同阻尼特性的材料進行梯度組合,在寬頻範圍內提供有效的能量耗散。

多孔材料的微結構設計技術使得材料的聲學性能可以精確調控。分級多孔結構結合大孔、中孔和微孔的多尺度孔隙結構,在不同頻率範圍內提供不同的吸音機制。可控孔隙率材料透過製程控制實現孔隙率和孔徑分佈的精確設計。連通性可調材料透過控制孔隙的連通程度調節材料的滲透性和聲學特性。生物啟發的多孔結構從植物細胞、動物骨骼等自然結構中獲得靈感,發展出具有優異性能的仿生多孔材料。

智慧材料在噪音控制中的應用展現出巨大潛力。形狀記憶合金能夠根據溫度變化改變形狀,實現結構的動態調節和聲學特性的適應性變化。壓電材料能夠實現機械能和電能之間的相互轉換,為主動噪音控制提供驅動和感測功能。磁致伸縮材料透過磁場控制實現形變,適合用於水下環境的主動控制系統。電變流體和磁變流體能夠透過電場或磁場改變其流動特性,為可調阻尼器和智慧隔振系統提供技術基礎。

奈米材料技術在聲學材料中的應用正在快速發展。奈米纖維材料具有極大的比表面積和獨特的微觀結構,能夠提供優異的吸音性能。碳奈米管複合材料結合了碳奈米管的優異力學性能和基體材料的功能特性,為高性能聲學材料的設計提供新的途徑。石墨烯材料的獨特二維結構和優異的物理性能使其在聲學應用中備受關注。量子點材料透過量子尺寸效應實現特殊的聲學和光學特性。

複合材料的多尺度設計方法結合不同尺度的增強相實現綜合性能的最佳化。纖維增強複合材料透過纖維的取向和分佈控制材料的各向異性聲學特性。粒子增強複合材料透過粒子的尺寸、形狀和分佈調節材料的阻尼和剛度特性。層狀複合材料透過不同功能層的組合實現複合功能,如同時具備承載、隔音和吸音功能。三維編織複合材料透過複雜的纖維編織結構實現優異的力學和聲學性能。

生物相容性材料的發展考慮到海洋環境的特殊要求,確保材料在發揮噪音控制功能的同時不對海洋生態系統造成負面影響。可降解材料能夠在使用壽命結束

後自然分解,避免對環境造成長期污染。無毒材料確保不會對海洋生物產生毒性影響。抗生物污損材料透過表面改性或添加抗污劑防止海洋生物的附著和生長。環保型材料在整個生命週期中都符合環境保護的要求。

5.5.3 智慧化控制技術

智慧化控制技術代表了水下噪音控制的最新發展方向,透過整合感測技術、計算技術和控制技術,實現自動化、智能化和自適應的噪音控制系統。這些技術能夠根據環境條件的變化、噪音特性的變化和控制目標的變化自動調整控制策略,實現最佳的噪音控制效果。人工智慧技術的快速發展為智慧化控制提供了強大的技術支撐,使控制系統具備學習、推理和決策能力。

自適應控制技術是智慧化控制的核心組成部分,能夠根據系統狀態和環境條件的變化自動調整控制參數。自適應濾波演算法在主動噪音控制中廣泛應用,能夠即時識別噪音特性的變化並調整控制策略。模型參考自適應控制透過建立參考模型和實際系統的誤差反饋實現參數的自動調整。極值搜索控制透過即時尋找系統性能的極值點實現最佳化控制。強化學習控制透過與環境的互動學習最佳的控制策略,能夠處理複雜的非線性和時變系統。

多變量控制技術處理多輸入多輸出的複雜控制系統,能夠同時控制多個噪音源和多個控制目標。現代控制理論中的狀態空間方法為多變量系統提供了系統性的設計方法。最佳控制理論透過最佳化準則設計控制律,在滿足控制目標的同時最小化控制成本。預測控制技術透過預測系統未來的行為制定最佳的控制動作。分散式控制將複雜系統分解為多個相對獨立的子系統,每個子系統具有獨立的控制器,透過協調機制實現全域最佳化。

機器學習在噪音控制中的應用正在快速發展。監督學習透過訓練資料學習噪音特性和控制效果之間的關係,能夠預測不同控制策略的效果。無監督學習能夠自動發現噪音資料中的隱藏模式和結構特徵。深度學習技術透過多層神經網路學習複雜的非線性關係,能夠處理高維度的感測資料和控制問題。循環神經網路適合處理時序性的噪音資料,能夠捕捉噪音的時間動態特性。卷積神經網路適合處理空間分佈的噪音資料,能夠識別噪音的空間模式。

感測器融合技術整合多種類型的感測器資訊,提供更全面和準確的系統狀態資訊。聲學感測器陣列提供噪音的空間分佈資訊。振動感測器監測結構的振動狀態。環境感測器測量溫度、壓力、流速等環境參數。多感測器資料融合演算法能夠處理感測器資料的不確定性和衝突,提供可靠的狀態估計。卡爾曼濾波和粒子

濾波等狀態估計方法在噪聲環境下提供最佳的狀態估計。

雲端運算和邊緣運算為智慧化控制提供強大的計算支撐。雲端平臺提供海量資料的存儲和處理能力,能夠進行複雜的機器學習訓練和大資料分析。邊緣運算將部分計算功能前移到現場設備,減少通訊延遲並提高系統的即時性能。霧運算在雲端和邊緣之間提供中間層的計算服務。分散式運算架構能夠將複雜的控制問題分解到多個計算節點並行處理。

數位雙胞胎技術為智慧化控制提供虛擬測試和最佳化平臺。數位雙胞胎建立實際系統的高精度數位化模型,能夠即時反映實際系統的狀態變化。虛擬感測器透過數位模型提供無法直接測量的系統狀態資訊。預測性維護透過數位模型預測設備的健康狀態和故障風險。控制策略的虛擬驗證能夠在實施前評估控制方案的效果和風險。

人機介面技術為智慧化控制系統提供友善的操作介面。視覺化技術將複雜的系統狀態和控制資訊以直觀的圖形方式呈現。擴增實境技術將虛擬資訊疊加到實際環境中,提供沉浸式的操作體驗。語音控制和手勢控制為操作人員提供自然便利的互動方式。專家系統整合領域專家的知識和經驗,為操作人員提供智慧化的決策支援。

網路安全在智慧化控制系統中至關重要,需要保護系統免受惡意攻擊和未授權存取。加密技術保護資料傳輸和存儲的安全性。身份認證和存取控制確保只有授權用戶能夠操作系統。入侵檢測系統監測網路活動並識別可疑行為。故障安全設計確保在網路攻擊或系統故障時系統能夠安全停機或轉入安全模式。

參考文獻

[1] McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 92-103.

[2] International Organization for Standardization. (2016). ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Geneva: ISO.

- [3] Özden, M. C., Gürkan, A. Y., Özden, Y. A., Canyurt, T. G., & Korkut, E. (2016). Underwater radiated noise prediction for a submarine propeller in different flow conditions. *Ocean Engineering*, 126, 488-500.
- [4] Sezen, S., Cosgun, T., Yurtseven, A., & Atlar, M. (2021). Numerical investigation of marine propeller underwater radiated noise using acoustic analogy part 1: The influence of grid resolution. *Ocean Engineering*, 220, 108423.
- [5] Caresta, M., & Kessissoglou, N. J. (2011). Reduction of hull-radiated noise using vibroacoustic optimization of the propulsion system. *Journal of Ship Research*, 55(3), 149-162.
- [6] Hilliard, L., McHomey, D., Palmien, M., & Trocine, S. (2014). Catalog of solutions to reduce marine acoustic pollution. Worcester Polytechnic Institute.
- [7] Nehls, G., Betke, K., Eckelmann, S., & Ros, M. (2007). Assessment and costs of potential engineering solutions for the mitigation of the impacts of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms. BioConsult SH report to COWRIE Ltd.
- [8] Koschinski, S., & Lüdemann, K. (2013). Development of noise mitigation measures in offshore wind farm construction. Federal Agency for Nature Conservation.
- [9] Peng, Y., Jarquin Laguna, A., & Tsouvalas, A. (2023). A multi-physics approach for modelling noise mitigation using an air-bubble curtain in impact pile driving. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1134776.
- [10] Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., & Nabe-Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Marine Ecology Progress Series*, 580,

221-237.

[11] Southall, B. L., Nowacek, D. P., Bowles, A. E., Seger, K., Gemmel, L., Hennessey, T., & Scholik-Schlomer, A. (2021). Marine mammal noise exposure criteria: assessing the severity of marine mammal behavioral responses to human noise. *Aquatic Mammals*, 47(5), 421-464.

[12] Ellison, W. T., Southall, B. L., Clark, C. W., & Frankel, A. S. (2012). A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds. *Conservation Biology*, 26(1), 21-28.

[13] Hatch, L. T., & Fristrup, K. M. (2009). No barrier at the boundaries: implementing regional frameworks for noise management in protected natural areas. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 223-244.

[14] La Manna, G., Picciulin, M., Crobu, A., Perretti, F., Jona Lasinio, G., Clorinda Mangano, M., & Sarà, G. (2021). Marine soundscape and fish biophony of a Mediterranean marine protected area. *PeerJ*, 9, e12551.

[15] McKenna, M. F., Rowell, T. J., Margolina, T., Fitzgerald, T., Hoffman, J., Peavey Reeves, L. E., & Hatch, L. T. (2024). Understanding vessel noise across a network of marine protected areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(4), 1-21.

[16] Buscaino, G., Ceraulo, M., Pieretti, N., Corrias, V., Farina, A., Filiciotto, F., ... & Mazzola, S. (2016). Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. *Scientific Reports*, 6(1), 34230.

[17] Gomez, C., Lawson, J. W., Wright, A. J., Buren, A. D., Tollit, D., & Lesage, V. (2016). A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology*, 94(12), 801-819.

[18] Gordon, J., Thompson, D., Gillespie, D., Lonergan, M., Calderan, S., Jaffey, B., & Todd, V. (2007). Assessment of the potential for acoustic deterrents to mitigate the impact on marine mammals of underwater noise arising from the construction of offshore windfarms. Cowrie Ltd.

[19] Tomy, J. P., Berger, S., Shin, K. W., Bingham, H., & Sørensen, J. N. (2023). Underwater radiated noise as a propeller design constraint. In 7th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE2023).

第六章 法規與標準

Regulations and Standards

水下噪音管理的法規框架實現了國際社會對海洋環境保護的共識與承諾。隨著海洋噪音污染問題的日益嚴峻，各國政府、國際組織和區域合作機構已建立起多層次、多角度的管理體系，涵蓋從全球性指導原則到地方性實施標準的完整規範架構[1]。這些法規標準不僅為海洋噪音的監測與評估提供了科學依據，更為海洋生物保護、生態敏感區域管理和噪音綜合治理建立了制度保障[2]。

現代水下噪音法規的發展反映了科學認知的不斷深化。早期的海洋環境保護法規主要關注化學污染和物理破壞，直到 1990 年代，科學界才開始系統性地認識到噪音對海洋生物的潛在危害[3]。隨著研究證實噪音會對海洋哺乳動物的聽覺系統造成永久性損傷，並影響其攝食、繁殖和導航行為，國際社會開始制定專門的水下噪音管理規範[4]。這一發展過程實現了預防原則(Precautionary Principle)在環境法中的重要作用，即在科學不確定性條件下採取保護措施[5]。

當代水下噪音法規呈現出顯著的多元化特徵。國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)從商業航運角度制定減噪指導方針，歐盟海洋戰略框架指令(Marine Strategy Framework Directive, MSFD)建立了區域性環境狀況評估體系，而美國國家海洋漁業局(National Marine Fisheries Service, NMFS)則發展出基於聽覺閾值的技術指導標準[6]。這些不同層面的法規相互補充，共同構建起全球水下噪音管理的制度網絡[7]。

法規制定面臨的主要挑戰包括科學不確定性、經濟成本考量和國際協調困難。海洋噪音對不同物種的影響機制仍在研究中，使得閾值設定存在爭議[8]。同時，噪音防制措施可能增加航運業和海洋工程的營運成本，需要在環境保護與經濟效益之間尋求平衡[9]。此外，海洋的跨國性質要求國際合作，但各國在環境標準和執法能力方面存在差異[10]。

6.1 水下噪音國際規範 International Regulations

國際水下噪音規範構成了全球海洋環境保護體系的重要組成部分，其發展歷程反映了國際社會對海洋噪音污染認知的逐步深化。這些規範主要通過國際海事組織、區域海洋保護組織和多邊環境協定來實施，形成了多層次的管理架構[11]。

國際海事組織作為聯合國專門機構，在制定全球性船舶噪音減緩標準方面發揮著核心作用。2014 年，IMO 海洋環境保護委員會(Marine Environment Protection

Committee, MEPC) 首次通過了《商業航運水下噪音減緩指導方針》(MEPC.1/Circ.833)，標誌著全球船舶噪音管理進入制度化階段[12]。該指導方針雖為非強制性文件，但為各國制定相關法規提供了技術框架和實施路徑[13]。

2023 年，IMO 進一步修訂發佈了《船舶水下輻射噪音減緩修訂指導方針》(MEPC.1/Circ.906)，該文件在原有基礎上增強了指導方針的實用性和可操作性[14]。修訂指導方針強調了噪音減緩管理規劃(URN Management Planning)的重要性，要求船東、設計師和營運商在船舶設計、建造和營運的全生命週期內實施噪音管理措施[15]。新指導方針還特別關注了能源效率與噪音減緩的協同效應，認為許多提高能源效率的措施同時具有降低水下噪音的效果[16]。

6.1.1 IMO 船舶噪音減緩指導方針 IMO Guidelines for Ship Noise Reduction

IMO 船舶噪音減緩指導方針代表了國際社會在商業航運噪音管理方面的最高共識，其制定過程歷時近十年，充分實現了多方利益相關者的參與和協商[17]。指導方針的核心理念是通過技術創新和管理優化來實現水下噪音的系統性減緩，而非單純的限制性措施[18]。

指導方針確立了噪音減緩的四大技術途徑：螺槳設計優化、船體形狀改良、機械設備改進和營運模式調整[19]。螺槳作為船舶主要噪音源，其空化現象是產生高強度噪音的主要原因。指導方針建議通過優化螺槳負載、確保均勻水流、精心選擇螺槳特性參數等方式來減少空化[20]。這些技術措施需要在設計階段即予以考慮，對於既有船舶則可透過螺槳修改來實現部分改善[21]。

船體設計對噪音控制具有基礎性影響。不均勻的尾流場會增加螺槳空化，因此船體形狀應設計得儘可能產生均質化的尾流場[22]。指導方針還強調了結構傳播噪音的重要性，建議通過優化船體構造、應用解耦塗層和結構阻尼等技術來減少船體水下輻射噪音[23]。

機械設備的選擇和安裝方式對整體噪音水平具有顯著影響。指導方針建議優選低噪音機械設備，採用適當的結構傳播音控制措施，合理配置設備在船體中的位置[24]。振動隔離裝置的使用能有效減少機械振動向船體結構的傳遞，特別是對於往復式和旋轉式機械如冷凍設備、空氣壓縮機和泵類等設備[25]。

營運層面的噪音管理措施具有立即可實施的優勢。指導方針特別強調了船速控制的重要性，對於固定螺距螺槳船舶，降低船速、軸轉速或引擎輸出功率是極為有效的噪音防制措施[26]。這主要由於噪音強度與螺槳空化程度密切相關，即使是輕微的功率降低也能大幅減少空化現象[27]。指導方針建議船舶了解並操

作於空化起始速度以下，特別是在國家和國際指定保護區域[28]。

指導方針還創新性地提出了噪音減緩管理規劃概念，這是一個適用於船舶營運、設計、建造和改裝的系統性工具[29]。管理規劃包括建立船舶噪音基線（預測或實測值）、設定具體且量化的噪音目標、評估各種技術與營運措施的減噪效果[30]。這種規劃方法允許客製化策略制定，並提供了兩種不同詳細程度的範本以指導船東和設計師[31]。

6.1.2 聯合國海洋法公約相關條款 UNCLOS Related Provisions

《聯合國海洋法公約》(United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS)雖未直接涉及水下噪音管理，但其海洋環境保護條款為噪音污染控制提供了重要的法律基礎[32]。公約第十二部分「海洋環境的保護和保全」確立了各國保護海洋環境的一般義務和具體責任[33]。

公約第 192 條規定各國有保護和保全海洋環境的一般義務，這一條款被廣泛解釋為包括對各種形式海洋污染的預防和控制，其中包括噪音污染[34]。第 194 條要求各國採取一切必要措施防止、減少和控制任何來源的海洋環境污染，並確保在其管轄或控制下的活動不致損害其他國家及其環境的地區[35]。這一跨界環境責任原則對於海洋噪音管理具有重要意義，因為海洋噪音具有跨國傳播特性[36]。

公約第 211 條專門規定了船舶污染的預防、減少和控制措施，授權各國制定適用於懸掛其旗幟船舶的法律法規[37]。雖然該條主要針對化學污染，但現代法理學界普遍認為其適用範圍應擴展至包括噪音在內的各種形式污染[38]。此外，第 220 條賦予沿海國對經過其專屬經濟區的外國船舶實施環境管制措施的權力，為區域性噪音管理提供了法律依據[39]。

公約第 234 條關於冰覆蓋區域的特別條款對於極地地區的噪音管理具有重要意義。該條款允許沿海國在其專屬經濟區內的冰覆蓋區域制定並執行更嚴格的船舶污染防治法律法規[40]。考慮到極地海洋生物對噪音干擾的特殊敏感性，這一條款為實施更嚴格的噪音管制措施提供了法理支持[41]。

6.1.3 國際海事組織強制性規範發展 Development of IMO Mandatory Regulations

雖然現行 IMO 指導方針屬於非強制性質，但國際社會正積極推動強制性船舶噪音規範的制定。這一發展趨勢反映了對海洋噪音問題嚴重性認識的深化，以及自願性措施在全球範圍內實施效果的局限性[42]。

強制性規範的制定面臨多重挑戰。首先是技術標準的統一問題，不同類型和大小的船舶在噪音特性方面存在顯著差異，制定統一的限值標準具有很大困難[43]。其次是檢測方法的標準化，需要建立全球統一的噪音測量程序和設備要求[44]。第三是執法機制的建立，需要明確港口國、旗國和沿海國在噪音管制方面的職責分工[45]。

目前討論的強制性框架主要包括三個層面：新建船舶噪音限值標準、既有船舶改造要求和特殊區域管制措施[46]。新建船舶標準將要求船舶在設計和建造階段即符合特定的噪音限值，並取得相應的認證[47]。既有船舶改造要求則針對高噪音船舶設定逐步淘汰或改造時間表[48]。特殊區域管制措施允許在生態敏感區域實施更嚴格的噪音限制[49]。

國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)在技術標準制定方面發揮重要作用。ISO 17208 系列標準為船舶水下噪音的測量和評估提供了技術規範，包括深水測量要求(ISO 17208-1)、聲源級計算方法(ISO 17208-2)和淺水測量程序(ISO 17208-3)[50]。這些標準為強制性規範的實施提供了技術基礎，同時促進了全球噪音數據的可比性[51]。

6.2 水下區域與國家規範 Regional and National Regulations

區域和國家層面的水下噪音法規實現了不同地區對海洋環境保護的特殊需求和政策偏好。這些規範通常比國際性指導方針更加具體和嚴格，反映了區域海洋生態系統的特殊性和當地社會的環境保護需求[52]。

歐盟在區域性海洋噪音管理方面處於領先地位，其海洋戰略框架指令建立了世界上首個具有法律約束力的海洋噪音管理體系[53]。美國則通過海洋哺乳動物保護法和相關技術指導建立了基於科學研究的管理框架[54]。其他海洋國家如澳大利亞、加拿大和日本也在制定符合本國海洋環境特點的噪音管理法規[55]。

6.2.1 歐盟海洋戰略框架指令 EU Marine Strategy Framework Directive

歐盟海洋戰略框架指令(MSFD)是全球首個將水下噪音明確納入法律管制範圍的區域性環境法規，其實施標誌著海洋噪音管理從科學研究轉向法律實踐的重要里程碑[56]。該指令於 2008 年通過，要求歐盟成員國在 2020 年前實現海洋環境的良好狀態(Good Environmental Status, GES)[57]。

MSFD 建立了十一個描述子(Descriptor)來評估海洋環境狀態，其中描述子 11 專門針對「能源輸入，包括水下噪音」[58]。該描述子要求人為能源輸入，包括水下噪音，應控制在不對海洋環境產生不利影響的水平[59]。這一要求具有法

律約束力，成員國必須制定相應的監測計畫和管理措施[60]。

2017 年，歐盟委員會發佈了關於良好環境狀態標準的決定(Commission Decision 2017/848)，為水下噪音管理提供了具體的技術指標[61]。該決定區分了脈衝性噪音和連續性噪音兩種類型，並設定了不同的評估標準[62]。脈衝性噪音主要來源於地震勘探、打樁作業和爆破活動，其評估基於噪音事件的空間分佈和時間範圍[63]。連續性噪音主要來源於船舶交通，其評估基於環境噪音水平的長期趨勢[64]。

2022 年，歐盟進一步制定了水下噪音閾值建議，為成員國實施 MSFD 提供了量化標準[65]。對於連續性水下噪音，建議目標物種棲息地中噪音水平超過生物不利影響起始水平(Level of Onset of Biologically Adverse Effects, LOBE)的區域不得超過 20%[66]。對於脈衝性噪音，建議短期暴露(一日)情況下，物種利用的評估區域中超過 LOBE 的部分不得超過 20%；長期暴露(一年)情況下，年平均超過 LOBE 的區域不得超過 10%[67]。

MSFD 的實施面臨諸多挑戰。首先是監測技術的限制，海洋噪音監測需要大量的水聽器陣列和長期的數據收集，成本高昂且技術複雜[68]。其次是科學知識的不足，對於不同海洋物種的噪音敏感性和影響閾值仍缺乏充分的科學認識[69]。第三是跨國協調的困難，海洋噪音具有跨界傳播特性，需要鄰國間的密切合作[70]。

6.2.2 美國海洋哺乳動物保護法規 US Marine Mammal Protection Act Regulations

美國海洋哺乳動物保護法(Marine Mammal Protection Act, MMPA)建立了全球最完善的海洋哺乳動物聲學保護體系，其技術指導文件被國際社會廣泛參考和採用[71]。MMPA 於 1972 年頒佈，旨在保護海洋哺乳動物免受人為活動的有害影響[72]。

2018 年，美國國家海洋漁業局發佈了《人為聲音對海洋哺乳動物聽覺影響評估技術指導》修訂版(Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing)，該文件建立了基於聽覺閾值的噪音管理框架[73]。技術指導將海洋哺乳動物分為五個聽覺群組：低頻鯨類(須鯨類)、中頻鯨類(海豚等齒鯨類)、高頻鯨類(真正的鼠海豚等)、鰭足類海豹(水中)和鰭足類海獅(水中)[74]。

技術指導建立了兩類聲學影響閾值：永久性聽力閾值偏移(Permanent Threshold Shift, PTS)起始閾值和暫時性聽力閾值偏移(Temporary Threshold Shift,

TTS)起始閾值[75]。PTS 起始閾值被視為聽覺損傷的標準，而 TTS 起始閾值則作為行為干擾的參考[76]。這些閾值採用雙重指標體系：對於脈衝性聲源使用加權累積聲暴露級(weighted cumulative sound exposure level, SELcum)和峰值聲壓級(peak sound level)；對於非脈衝性聲源僅使用加權累積聲暴露級[77]。

技術指導的一大創新是引入了海洋哺乳動物聽覺加權函數(Marine Mammal Auditory Weighting Functions)，這些函數反映了不同聽覺群組對不同頻率聲音的敏感性差異[78]。加權函數的應用使得噪音影響評估更加科學和準確，能夠更好地預測聲暴露對特定物種群組的潛在影響[79]。

MMPA 的執行機制包括多個層面。對於可能對海洋哺乳動物產生騷擾的活動，申請人需要向 NMFS 申請意外捕獲授權(Incidental Take Authorization)[80]。授權過程包括環境影響評估、公眾諮詢和科學審查等程序[81]。獲得授權的活動必須實施相應的緩解和監測措施，如設立觀察員計畫、實施軟啟動程序和建立排除區域等[82]。

6.2.3 其他國家和區域組織法規 Other National and Regional Regulations

除美歐外，其他海洋國家也在積極制定水下噪音管理法規。澳大利亞環境保護和生物多樣性保護法(Environment Protection and Biodiversity Conservation Act, EPBC Act)為海洋哺乳動物聲學保護提供了法律框架[83]。該法案的政策聲明 2.1 專門針對近海地震勘探與鯨魚的相互作用制定了產業指導方針[84]。

加拿大漁業和海洋部(Fisheries and Oceans Canada)制定了海洋哺乳動物聲學指導方針，採用與美國類似的基於聽覺閾值的管理方法[85]。該指導方針特別關注北極地區的噪音管理，考慮到該地區海洋哺乳動物的特殊生態需求[86]。

區域海洋保護組織也在推進噪音管理合作。東北大西洋海洋環境保護委員會(OSPAR Commission)和波羅的海海洋環境保護委員會(Helsinki Commission, HELCOM)都將水下噪音列為優先關注的環境問題[87]。OSPAR 制定了水下噪音監測指導方針，要求成員國建立長期監測計畫[88]。HELCOM 則重點關注波羅的海地區的商業航運噪音管理[89]。

南極海洋生物資源保護委員會(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)雖然尚未制定專門的噪音管理規定，但其生態系統管理方法為該地區的噪音管制提供了政策框架[90]。南極和南大洋聯盟(Antarctic and Southern Ocean Coalition)等環保組織持續呼籲在南極地區實施更嚴格的噪音管制措施[91]。

國際捕鯨委員會(International Whaling Commission, IWC)雖然主要關注鯨魚捕撈管理，但近年來也越來越重視噪音對鯨魚的影響[92]。IWC 科學委員會定期評估海洋噪音對鯨類的影響，並向各國政府提供管理建議[93]。

6.3 水下生態敏感區標準 Standards for Ecologically Sensitive Areas

生態敏感區域的水下噪音管理標準代表了海洋環境保護法規的最高要求，這些標準基於生態系統的脆弱性、物種的保護狀況和棲息地的重要性而制定[94]。生態敏感區通常包括海洋保護區、重要海洋哺乳動物棲息地、魚類繁殖場所和候鳥遷徙路徑等[95]。

6.3.1 海洋保護區噪音管制 Marine Protected Areas Noise Control

海洋保護區(Marine Protected Areas, MPAs)的噪音管制實現了「聲學庇護所」(Acoustic Refugia)的概念，即為海洋生物提供相對安靜的棲息環境[96]。這一概念基於海洋生物對聲學環境的依賴性，特別是對於依靠聲音進行覓食、繁殖、導航和通訊的物種[97]。

傳統的海洋保護區主要通過限制捕撈、禁止開發等措施來保護海洋生物，但隨著對海洋噪音影響認識的深化，越來越多的保護區開始將噪音管制納入管理範疇[98]。美國國家海洋保護區辦公室(Office of National Marine Sanctuaries)率先在多個海洋保護區實施噪音監測和管制計畫[99]。

蒙特瑞灣國家海洋保護區是實施噪音管制的典型案例。該保護區建立了長期水下噪音監測網絡，實時追蹤商業航運和軍事活動對海洋環境的聲學影響[100]。保護區管理當局與當地港務機構合作，推動船舶採用減速航行等措施來降低噪音[101]。研究顯示，船舶減速 10%能夠使噪音水平降低約 3 分貝，對海洋哺乳動物的通訊干擾明顯減少[102]。

歐洲的海洋保護區也在加強噪音管制。地中海和黑海總協定(Barcelona Convention)框架下的特別保護區(Specially Protected Areas)正在制定統一的噪音管理標準[103]。這些標準特別關注地中海條紋海豚和長鬚鯨等瀕危物種的保護需求[104]。

海洋保護區噪音管制面臨的主要挑戰是執法權限的限制。大多數保護區僅能管制其邊界內的活動，但海洋噪音具有長距離傳播特性，來自保護區外的噪音同樣會對區內生物造成影響[105]。這要求建立更大範圍的區域協調機制和跨界執法合作[106]。

6.3.2 關鍵棲息地保護標準 Critical Habitat Protection Standards

關鍵棲息地的聲學保護標準通常比一般區域更加嚴格，這些標準基於目標物種的生態需求和棲息地的重要性而制定[107]。美國瀕危物種法(Endangered Species Act)為關鍵棲息地的劃定和保護提供了法律依據[108]。

北大西洋露脊鯨(North Atlantic Right Whale)的關鍵棲息地保護是成功案例之一。該物種僅存約 340 隻個體，面臨嚴重的生存威脅[109]。美國國家海洋漁業局與國際海事組織合作，在露脊鯨的主要棲息地和遷徙通道實施了強制性船舶交通管制措施[110]。這些措施包括季節性航速限制、航道調整和實時鯨魚位置警報系統[111]。

太平洋灰鯨的遷徙通道保護也取得了顯著成效。該物種每年在阿拉斯加和墨西哥之間進行長達 20,000 公里的遷徙，是世界上最長的哺乳動物遷徙路線[112]。美國西海岸的港口和航運公司自願實施「藍色鯨魚計畫」，在灰鯨遷徙期間採用減速航行措施[113]。該計畫不僅降低了船舶與鯨魚碰撞的風險，也大幅減少了水下噪音對鯨魚通訊的干擾[114]。

魚類繁殖場所的噪音保護標準主要關注產卵期和幼魚發育期的特殊需求。研究表明，水下噪音會影響魚類的產卵行為、精子活力和胚胎發育[115]。挪威羅弗敦群島的鱈魚繁殖場實施了嚴格的噪音管制措施，在繁殖季節限制海洋工程活動和高噪音船舶通行[116]。

6.3.3 季節性和時間性限制措施 Seasonal and Temporal Restriction Measures

季節性噪音限制措施基於海洋生物生活史的時間變化模式，在關鍵生物學期間實施更嚴格的噪音管制[117]。這些措施通常涵蓋繁殖期、遷徙期、攝食期和育幼期等重要時段[118]。

鯨魚繁殖期的噪音限制是最常見的季節性措施。座頭鯨在繁殖期會進行複雜的求偶歌聲，人為噪音會干擾這種重要的生物學行為[119]。夏威夷海域在座頭鯨繁殖季節(12 月至 5 月)實施船舶噪音管制措施，要求商業船舶保持與鯨魚的最小距離，並避免高噪音活動[120]。

海鳥繁殖期的噪音管制也越來越受到重視。海鳥依靠聲音進行配對溝通和幼鳥撫養，噪音干擾會影響其繁殖成功率[121]。英國的海鳥保護區在繁殖季節限制近海風電場的建設活動，避免打樁噪音對海鳥造成驚擾[122]。

時間性限制措施通常針對生物活動的日夜節律模式。許多海洋生物在夜間更加活躍，對噪音也更加敏感[123]。一些港口實施「安靜時間」措施，限制夜間的裝卸作業和船舶維修活動[124]。

季節性和時間性限制措施的實施需要精確的生物學資訊支持。這要求建立長期的生物監測計畫，追蹤目標物種的時空分佈模式和生物學週期[125]。同時，還需要與海運業、漁業和其他海洋使用者建立有效的溝通協調機制[126]。

6.4 海洋生物保護標準 Marine Species Protection Standards

海洋生物保護標準構成了水下噪音法規體系的核心內容，這些標準基於不同物種的聽覺特性、行為模式和生態需求而制定[127]。現代保護標準已從單一物種保護轉向生態系統保護，同時考慮物種間的相互作用和食物網結構[128]。

6.4.1 海洋哺乳動物聽覺閾值標準 Marine Mammal Auditory Threshold Standards

海洋哺乳動物聽覺閾值標準代表了當前水下噪音管理的最高科學水準，這些標準基於大量的實驗研究和野外觀察數據[129]。美國 NMFS 技術指導建立的五個功能性聽覺群組為全球海洋哺乳動物保護提供了科學基礎[130]。

低頻鯨類(須鯨類)的聽覺閾值標準主要針對藍鯨、長鬚鯨、座頭鯨等大型鯨類。這些物種的聽覺敏感範圍為 7Hz 至 35kHz，與商業船舶的主要噪音頻段高度重疊[131]。對於脈衝性噪音，PTS 起始閾值設定為 183dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權累積聲暴露級)或 219dB re 1 μPa (峰值聲壓級)；對於非脈衝性噪音，PTS 起始閾值為 199dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ [132]。

中頻鯨類的閾值標準涵蓋大部分海豚和齒鯨類動物，聽覺敏感範圍為 150 Hz 至 160kHz[133]。這一群組的 PTS 起始閾值為：脈衝性噪音 185dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)或 230dB re 1 μPa (峰值)；非脈衝性噪音 198dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)[134]。

高頻鯨類主要包括鼠海豚、小齒鯨等小型齒鯨類動物，聽覺敏感範圍為 275Hz 至 160kHz[135]。由於這些動物體型較小、聽覺系統更加敏感，其閾值標準相對較低：脈衝性噪音 155dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)或 202dB re 1 μPa (峰值)；非脈衝性噪音 173dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)[136]。

鱈足類動物分為兩個亞群：海豹類(水中聽覺敏感範圍 50Hz 至 86kHz)和海獅類(水中聽覺敏感範圍 60Hz 至 39kHz)[137]。海豹類的 PTS 起始閾值為：脈衝性噪音 185dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)或 218dB re 1 μPa (峰值)；非脈衝性噪音 201dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)[138]。海獅類的 PTS 起始閾值為：脈衝性噪音 203dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)或 232dB re 1 μPa (峰值)；非脈衝性噪音 219dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ (加權)[139]。

這些閾值標準採用了加權函數方法，反映了不同物種對不同頻率聲音的敏感性差異[140]。加權函數基於每個聽覺群組的複合聽力圖，經過大量聽覺實驗數

據的驗證和校準[141]。

6.4.2 魚類和無脊椎動物保護準則 **Fish and Invertebrate Protection Guidelines**

魚類和海洋無脊椎動物的水下噪音保護起步較晚，主要原因是這些動物的聽覺系統研究相對不足[142]。然而，越來越多的研究證實噪音對魚類和無脊椎動物具有顯著影響，包括聽覺損傷、行為改變和生理應激[143]。

魚類聽覺保護準則主要基於魚類聽覺系統的解剖學和生理學特徵。魚類可分為三個聽覺群組：具有氣鰾且與聽覺系統相連的魚類(如鯉魚科)、具有氣鰾但與聽覺系統無直接聯繫的魚類(如鱸魚科)，以及無氣鰾的魚類(如鮭魚科)[144]。不同群組對聲音的敏感性存在顯著差異，氣鰾與聽覺系統相連的魚類通常具有更高的聽覺敏感性[145]。

歐盟制定的魚類噪音暴露準則建議：對於聽覺敏感魚類，單次脈衝暴露的 SEL 不應超過 156dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ ，累積暴露的 SEL 不應超過 158dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ [146]。對於聽覺不敏感魚類，相應的閾值為單次暴露 164dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ 和累積暴露 170dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\cdot\text{s}$ [147]。

海洋無脊椎動物的噪音保護標準仍在發展中。頭足類動物(章魚、魷魚等)具有相對發達的聽覺系統，對低頻聲音較為敏感[148]。研究顯示，強烈的水下噪音會對章魚的平衡器官造成損傷，影響其游泳和捕食能力[149]。甲殼類動物(蝦、蟹等)雖然沒有專門的聽覺器官，但能夠感知水中的振動和壓力變化[150]。

6.4.3 瀕危物種特殊保護措施 **Special Protection Measures for Endangered Species**

瀕危海洋物種享有最嚴格的水下噪音保護措施，這些措施通常超越一般物種保護標準，實現了預防原則在物種保護中的應用[151]。瀕危物種保護需要考慮物種的保護狀況、族群大小、分佈範圍和威脅因素[152]。

北大西洋露脊鯨作為極度瀕危物種，享有特殊的聲學保護措施。美國和加拿大政府建立了動態管理系統，基於鯨魚的實時分佈數據調整船舶交通管制措施[153]。該系統結合了聲學監測、視覺觀察和衛星追蹤等多種技術手段，能夠及時識別鯨魚聚集區域並實施保護措施[154]。

南露脊鯨在其重要棲息地也享有類似的保護。阿根廷瓦爾德斯半島是南露脊鯨的主要繁殖地，當地政府實施了嚴格的船舶噪音管制措施[155]。在繁殖季節，商業船舶必須保持與鯨魚的最小距離，並避免在夜間進行高噪音活動[156]。

地中海僧海豹作為世界上最瀕危的海洋哺乳動物之一，其棲息地受到特殊保護。地中海沿岸國家建立了僧海豹保護網絡，在其主要棲息地實施全年噪音管

制措施[157]。這些措施包括限制船舶通行、禁止地震勘探和規範潛水活動等[158]。

太平洋小頭鼠海豚(Vaquita)是另一個需要特殊保護的例子。該物種僅分佈在墨西哥加利福尼亞灣北部，目前僅存約 10 隻個體[159]。墨西哥政府在小頭鼠海豚棲息地建立了永久性禁漁區，並嚴格限制船舶活動[160]。

瀕危物種保護措施的實施面臨多重挑戰。首先是科學知識的不足，對於許多瀕危海洋物種的聽覺特性和噪音敏感性缺乏充分了解[161]。其次是經濟成本考量，嚴格的保護措施可能對當地漁業和航運業造成經濟影響[162]。第三是國際協調困難，許多瀕危物種的分佈範圍跨越多個國家，需要建立有效的國際合作機制[163]。

6.5 水下噪音綜合管理指標 **Integrated Management Indicators**

水下噪音綜合管理指標體系代表了海洋噪音監管從單一參數控制向生態系統綜合評估的轉變。這些指標不僅考慮噪音的物理特性，還納入了生態影響、社會經濟因素和管理效果等多個角度[164]。

6.5.1 生態風險評估框架 **Ecological Risk Assessment Framework**

生態風險評估為水下噪音管理提供了科學化的決策支持工具，其核心思想是量化噪音暴露對海洋生態系統的潛在影響[165]。風險評估框架通常包括危害識別、暴露評估、效應評估和風險表徵四個步驟[166]。

危害識別階段需要確定可能對海洋生物造成不利影響的噪音源和噪音特徵。這包括噪音的頻率範圍、強度水平、持續時間、重複頻率和空間分佈等參數[167]。不同類型的噪音源具有不同的危害特徵，例如，商業航運產生的連續性低頻噪音主要影響大型鯨類的長距離通訊，而海洋工程的脈衝性噪音則可能造成近距離生物的聽覺損傷[168]。

暴露評估階段需要量化海洋生物實際接收到的噪音水平。這要求建立聲傳播模型，考慮海洋環境的聲學特性、生物的空間分佈和時間活動模式[169]。現代暴露評估越來越多地採用個體基礎模型(Individual-Based Model)，能夠追蹤個體動物的移動軌跡和噪音暴露歷史[170]。

效應評估階段需要建立噪音暴露與生物學效應之間的劑量-反應關係。這些效應可能包括聽覺閾值偏移、行為改變、生理應激、繁殖成功率下降和死亡率增加等[171]。效應評估的挑戰在於從實驗室研究結果外推到野外條件，以及從個體效應推斷到族群和生態系統層面的影響[172]。

風險表徵階段整合前述評估結果，量化噪音對海洋生態系統的整體風險水

平。這通常採用機率性方法，考慮各種不確定性因素的影響[173]。風險表徵的結果為管理決策提供科學依據，幫助確定可接受的風險水平和相應的管理措施[174]。

6.5.2 累積影響評估方法 Cumulative Impact Assessment Methods

累積影響評估認識到海洋環境面臨多種人為壓力的同時作用，噪音影響不能脫離其他壓力因素單獨考慮[175]。這種方法特別重要，因為海洋生物可能同時面臨噪音污染、化學污染、過度捕撈、氣候變化等多重威脅[176]。

空間累積評估關注不同噪音源在空間上的疊加效應。海洋環境中可能同時存在商業航運、軍事活動、海洋工程、地震勘探等多種噪音源[177]。這些噪音源的聲場在空間上相互疊加，形成複雜的聲學景觀[178]。空間累積評估需要建立多源聲場疊加模型，考慮不同頻率成分的相干和非相干疊加[179]。

時間累積評估關注長期噪音暴露的積累效應。許多海洋生物具有季節性遷徙習性，在不同時期可能暴露於不同的噪音環境[180]。例如，灰鯨在夏季位於阿拉斯加的攝食區，噪音暴露主要來自漁業活動；在冬季遷徙到墨西哥的繁殖區，噪音暴露主要來自商業航運[181]。時間累積評估需要追蹤動物的全年暴露歷史，評估長期暴露的潛在影響[182]。

跨壓力累積評估考慮噪音與其他環境壓力的相互作用效應。研究表明，噪音壓力可能加劇化學污染的毒性效應，或者降低動物對氣候變化的適應能力[183]。這種相互作用可能是加和性的、協同性的或拮抗性的，需要通過多因子實驗研究來量化[184]。

6.5.3 管理效果評估指標 Management Effectiveness Assessment Indicators

管理效果評估旨在量化噪音管理措施的實際效果，為政策調整和改進提供依據[185]。有效的評估指標體系應該包括過程指標、結果指標和影響指標三個層面[186]。

過程指標評估管理措施的實施情況，包括法規遵守率、執法頻率、技術措施採用率等[187]。例如，IMO 船舶噪音減緩指導方針的實施效果可以通過參與船舶數量、減噪技術採用比例、港口激勵措施普及率等指標來評估[188]。過程指標的優勢是能夠及時反映管理工作的進展，但不能直接說明環境效果[189]。

結果指標評估管理措施對噪音環境的直接改善效果，主要包括環境噪音水平變化、噪音暴露程度降低、安靜區域增加等[190]。這些指標需要基於長期的噪音監測數據，能夠客觀反映聲學環境的改善程度[191]。例如，船舶交通管制措施

的效果可以通過保護區內噪音水平的降低程度來評估[192]。

影響指標評估管理措施對海洋生物和生態系統的最終保護效果，包括物種豐度變化、分佈範圍恢復、繁殖成功率提高等[193]。這些指標最能反映管理措施的根本目標達成情況，但通常需要較長時間才能顯現效果，且容易受到其他因子的干擾[194]。

適應性管理框架將管理效果評估與政策調整緊密結合，形成「實施-監測-評估-調整」的循環過程[195]。這種方法認識到海洋環境管理的複雜性和不確定性，通過持續學習和改進來提高管理效果[196]。適應性管理特別適用於科學認知不斷發展的水下噪音管理領域[197]。

綜合管理指標體系還需要考慮社會經濟因素，包括管理成本、經濟影響、社會接受度等[198]。可持續的噪音管理必須在環境保護與經濟發展之間尋求平衡，確保管理措施的長期可行性[199]。這要求建立跨學科的評估框架，整合生態學、經濟學、社會學等多個領域的研究成果[200]。

參考文獻 References

[1] Scott, K. N. (2004). International regulation of undersea noise. *International & Comparative Law Quarterly* , 53(2), 287-323.

[2] Tasker, M. L., et al. (2010). *Marine Strategy Framework Directive - Task Group 11 Report - Underwater noise and other forms of energy*. European Commission.

[3] Richardson, W. J., et al. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic Press.

[4] Southall, B. L., et al. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* , 33(4), 411-521.

[5] Freestone, D., & Hey, E. (Eds.). (2017). *The precautionary principle and international law* . Kluwer Law International.

[6] Vakili, S. V., et al. (2020). *The development of a policy framework to mitigate*

underwater noise pollution from commercial vessels. *Marine Policy* , 118, 104004.

[7] Erbe, C., et al. (2019). The effects of ship noise on marine mammals—A review. *Frontiers in Marine Science* , 6, 606.

[8] Hawkins, A. D., et al. (2015). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* , 25(1), 39-64.

[9] McKenna, M. F., et al. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(1), 92-103.

[10] André, M., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 9(9), 489-493.

[11] International Maritime Organization. (2023). Revised Guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life. MEPC.1/Circ.906.

[12] International Maritime Organization. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. MEPC.1/Circ.833.

[13] Joung, T., et al. (2022). An introduction of the international maritime policy trend on underwater radiated noise from shipping. *Journal of International Maritime Safety* , 7(2), 123-135.

[14] BIMCO. (2023). Underwater Radiated noise. Policy Position Paper. Available at: <https://www.bimco.org/regulatory-affairs/policy-positions/underwater-radiated-noise/>

[15] Reeve, L. L. N. (2012). Of whales and ships: impacts on the great whales of underwater noise pollution from commercial shipping. *Ocean & Coastal Law Journal* ,

18(1), 35-78.

[16] International Maritime Organization. (2023). Ship underwater radiated noise technical report and matrix. SDC 9/INF.15.

[17] Abdulrahman, S. M. (2024). Critical valuation of the implementation of IMO's guidelines for the reduction of underwater radiated noise: a Kenyan perspective. World Maritime University.

[18] Vakili, S. V. (2020). Policy framework development for underwater noise mitigation in commercial shipping. *Marine Policy* , 118, 104004.

[19] Thomsen, F., et al. (2021). Addressing underwater noise in Europe: Current state of knowledge and future priorities. European Marine Board.

[20] Ross, D. (2013). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* , 30(2), 257-261.

[21] Arveson, P. T., & Vendittis, D. J. (2000). Radiated noise characteristics of a modern cargo ship. *Journal of the Acoustical Society of America* , 107(1), 118-129.

[22] Carlton, J. (2018). *Marine propellers and propulsion* . Butterworth-Heinemann.

[23] Fischer, L., et al. (2018). Reducing underwater radiated noise from ships: Review of current practices. SONIC Deliverable Report.

[24] Audoly, C., et al. (2015). AQUO project: Reduce ship underwater radiated noise. *Proceedings of OCEANS 2015 - Genova* , 1-7.

[25] Fischer, L., et al. (2016). Onboard noise and vibration reduction technologies for ships. *Applied Acoustics* , 105, 104-115.

[26] Leaper, R. (2019). The role of slower vessel speeds in reducing greenhouse gas emissions, underwater noise and collision risk to whales. *Frontiers in Marine Science* , 6, 505.

[27] McKenna, M. F. (2011). Blue whale response to underwater noise from commercial ships. Ph.D. Dissertation, University of California San Diego.

[28] Tennessen, J. B., & Parks, S. E. (2016). Acoustic propagation modeling indicates vocal compensation in noise improves communication range for North Atlantic right whales. *Endangered Species Research* , 30, 225-237.

[29] Chion, C., et al. (2017). Underwater acoustic impacts of shipping management measures: Results from a social-ecological model of boat and whale movements in the St. Lawrence River Estuary (Canada). *Ecological Modelling* , 354, 72-87.

[30] Joy, R., et al. (2019). Potential benefits of vessel slowdowns on endangered southern resident killer whales. *Frontiers in Marine Science* , 6, 344.

[31] Musinguzi, B. (2024). Underwater noise and the application of particular sensitive sea areas to limit its impact on marine life: Case study on development of underwater noise management. World Maritime University.

[32] Churchill, R. R., & Lowe, A. V. (2021). *The law of the sea* . Manchester University Press.

[33] Tanaka, Y. (2019). *The international law of the sea* . Cambridge University Press.

[34] Dupuy, P. M., & Viñuales, J. E. (2018). *International environmental law* . Cambridge University Press.

- [35] Sands, P., et al. (2018). *Principles of international environmental law* . Cambridge University Press.
- [36] Birnie, P., et al. (2009). *International law and the environment* . Oxford University Press.
- [37] Molenaar, E. J. (2007). Ship-source pollution and the law of the sea. In D. Freestone (Ed.), *The law of the sea: Progress and prospects* (pp. 189-212). Oxford University Press.
- [38] Bodansky, D. (2016). *The art and craft of international environmental law* . Harvard University Press.
- [39] Frank, V. (2007). *The European Community and marine environmental protection in the international law of the sea*. Brill.
- [40] Rothwell, D. R. (2019). The Arctic Ocean and climate change law. In R. Rayfuse & S. V. Scott (Eds.), *International law in the era of climate change* (pp. 267-290). Edward Elgar.
- [41] Jabour, J., & Weber, M. (2008). Is it time to cut the Gordian knot of polar sovereignty? *Review of European Community & International Environmental Law* , 17(1), 27-40.
- [42] Chumbinho, R. (2024). *Guidance for mitigation measures of underwater noise*. Marine Institute Ireland.
- [43] International Organization for Standardization. (2016). *Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes*. ISO 17208-1:2016.

[44] International Organization for Standardization. (2019). Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 2: Determination of source levels from deep water measurements. ISO 17208-2:2019.

[45] International Organization for Standardization. (2025). Underwater acoustics — Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 3: Measurement in shallow water. ISO 17208-3:2025.

[46] Fischer, L., & Michelsen, S. (2019). Standardization for marine environment protection. *ISO Focus* , 132, 24-27.

[47] Brooker, A., & Humphrey, V. (2016). Measurement of radiated underwater noise from a small research vessel in shallow water. *Ocean Engineering* , 120, 182-189.

[48] International Towing Tank Conference. (2017). Recommended procedures and guidelines - Underwater noise from ships - Full scale measurements. ITTC 7.5-04-11.

[49] Lloyd's Register. (2018). Additional design procedures for the determination of a vessel's underwater radiated noise. LR Guidance Note.

[50] Bureau Veritas. (2018). Underwater radiated noise. Rule Note NR 614 DT R02 E.

[51] DNV. (2020). Rules for classification - Ships - Additional class notations - Environmental protection and pollution control. DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch7.

[52] Maccarrone, V., et al. (2015). An Italian proposal on the monitoring of underwater noise: Relationship between the EU Marine Strategy Framework Directive and marine spatial planning directive. *Ocean & Coastal Management* , 115, 27-37.

[53] European Commission. (2017). Commission Decision (EU) 2017/848 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters. Official Journal of the European Union, L 125/43.

[54] National Marine Fisheries Service. (2018). 2018 revisions to: Technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59.

[55] NOPSEMA. (2024). Recent developments regarding marine mammal acoustic technical guidance. Available at: <https://www.nopsema.gov.au/blogs/recent-developments-regarding-marine-mammal-acoustic-technical-guidance>

[56] Borja, A., et al. (2013). The European Marine Strategy Framework Directive: A prototype for regional seas management worldwide? *Ocean & Coastal Management* , 86, 78-90.

[57] European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/56/EC establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy. Official Journal of the European Union, L 164/19.

[58] Tasker, M. L. (2017). The challenge of working across disciplines to address marine noise impacts. *Aquatic Mammals* , 43(6), 621-628.

[59] Faulkner, R. C., et al. (2018). Guiding principles for assessing the impact of underwater noise. *Journal of Applied Ecology* , 55(6), 2531-2536.

[60] Castellote, M., et al. (2012). Seasonal and diel variations of ambient noise in the Beaufort Sea. *Journal of the Acoustical Society of America* , 131(2), EL99-EL105.

[61] European Commission. (2022). Recommendation on threshold values for underwater noise indicators under the Marine Strategy Framework Directive. C(2022)

7062.

[62] Dekeling, R. P. A., et al. (2014). Monitoring guidance for underwater noise in European seas. JRC Scientific and Policy Report EUR 26557 EN.

[63] Van der Graaf, A. J., et al. (2012). European marine strategy framework directive - Good environmental status (MSFD-GES): Report of the technical subgroup on underwater noise. European Commission.

[64] Sigray, P., et al. (2024). Management of continuous underwater noise in European marine waters using a risk-based ecosystem approach. *Marine Policy* , 162, 105879.

[65] Technical Group on Underwater Noise. (2022). EU threshold values for continuous underwater noise. CIRCABC Document Library.

[66] Technical Group on Underwater Noise. (2022). EU threshold values for impulsive underwater noise. CIRCABC Document Library.

[67] Merchant, N. D., et al. (2020). Impulsive noise causes temporary loss of behavioural responsiveness in humpback whales. *Nature Communications* , 11, 2215.

[68] Haver, S. M., et al. (2017). Seasonal trends and primary contributors to the low-frequency soundscape. *Journal of the Acoustical Society of America* , 142(2), 520-533.

[69] Erbe, C., et al. (2016). The effects of ship noise on marine mammals—A review. *Frontiers in Marine Science* , 3, 23.

[70] Thomsen, F., et al. (2021). Effects of underwater noise on marine life. In *Addressing underwater noise in Europe* (pp. 15-35). European Marine Board.

[71] Wright, A. J., & Moors-Murphy, H. B. (2022). Regulating impacts of noise on marine mammals in North America. *Journal of International Wildlife Law & Policy* , 25(3-4), 181-218.

[72] McCarthy, E., & Lichtman, F. (2007). The origin and evolution of ocean noise regulation under the US Marine Mammal Protection Act. *Ocean & Coastal Law Journal* , 13(1), 1-47.

[73] Forney, K. A., et al. (2017). Nowhere to go: noise impact assessments for marine mammal populations with high site fidelity. *Endangered Species Research* , 32, 391-413.

[74] Lucke, K., et al. (2020). Evaluating the predictive strength of underwater noise exposure criteria for marine mammals. *Journal of the Acoustical Society of America* , 147(6), 3985-3998.

[75] Southall, B. L., et al. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals* , 45(2), 125-232.

[76] Finneran, J. J. (2016). Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater sound. Technical Report prepared for National Marine Fisheries Service.

[77] Barkaszi, M. J., & Kelly, C. J. (2024). Analysis of protected species observer data. *PLOS ONE* , 19(3), e0300658.

[78] Cavanagh, R. C. (2000). Criteria and thresholds for adverse effects of underwater noise on marine animals. Technical Report prepared for Defense Technical Information Center.

- [79] Winship, K. A., & Jones, B. L. (2023). Acoustic monitoring of professionally managed marine mammals for health and welfare insights. *Animals* , 13(13), 2124.
- [80] Ellison, W. T., et al. (2012). A new context-based approach to assess marine mammal behavioral responses to anthropogenic sounds. *Conservation Biology* , 26(1), 21-28.
- [81] Gomez, C., et al. (2016). A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise. *Canadian Journal of Zoology* , 94(8), 601-626.
- [82] Verfuss, U. K., et al. (2024). Eliciting the magnitude of auditory threshold shift considered injury in Antarctic marine mammals. *Marine Policy* , 161, 105986.
- [83] Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. (2021). EPBC Act policy statement 2.1 - Interaction between offshore seismic exploration and whales. Available at: <https://www.dcceew.gov.au/environment/epbc/publications/epbc-act-policy-statement-21>
- [84] South Australia Department for Infrastructure and Transport. (2012). Underwater piling noise guidelines. Technical Report.
- [85] Fisheries and Oceans Canada. (2007). Statement of Canadian practice with respect to the mitigation of seismic sound in the marine environment. Available at: <https://www.dfo-mpo.gc.ca/oceans/publications/seismic-sismique/index-eng.html>
- [86] Halliday, W. D., et al. (2017). Underwater noise in the Canadian Arctic. *Marine Pollution Bulletin* , 123(1-2), 64-70.
- [87] OSPAR Commission. (2009). Overview of the impacts of anthropogenic underwater sound in the marine environment. Biodiversity Series Publication Number 441/2009.

[88] OSPAR Commission. (2014). MSFD advice manual and background document on good environmental status. Available at: <https://www.ospar.org/documents?v=7292>

[89] HELCOM. (2022). Guidelines for the annual and periodical compilation and reporting of waterborne pollution inputs. HELCOM PLC-Water Guidelines.

[90] Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources. (2020). Understanding CCAMLR's approach to management. Available at: <https://www.ccamlr.org/en/science/marine-protected-areas-mpas>

[91] Antarctic and Southern Ocean Coalition. (2022). Current noise pollution issues. Policy Brief. Available at: <https://www.asoc.org/wp-content/uploads/2022/02/Current-Noise-Pollution-Issues.pdf>

[92] International Whaling Commission. (2020). Report of the scientific committee. *Journal of Cetacean Research and Management* , 21(Supplement), 1-153.

[93] Wright, A. J. (2008). International workshop on shipping noise and marine mammals. OARS Research Report .

[94] Kaplan, M. B., & Mooney, T. A. (2015). Ambient noise and temporal patterns of boat activity in the US Virgin Islands National Park. *Marine Pollution Bulletin* , 98(1-2), 221-228.

[95] Williams, R., et al. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.

[96] Clark, C. W., et al. (2009). Acoustic masking in marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 161-181.

- [97] Farcas, A., et al. (2016). Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* , 57, 114-122.
- [98] Pine, M. K., et al. (2022). A roadmap for assessing and managing the acoustic impacts of shipping on marine life. *ICES Journal of Marine Science* , 79(4), 1220-1234.
- [99] Haver, S. M., et al. (2018). Comparing the underwater soundscapes of four U.S. National Marine Sanctuaries. *Frontiers in Marine Science* , 6, 500.
- [100] Ryan, J., et al. (2016). Reducing bias in acoustic detection of marine mammals through monitoring multiple underwater sound sources. *PLOS ONE* , 11(6), e0158065.
- [101] McKenna, M. F., et al. (2017). Slow ship program in the Santa Barbara Channel. *Ocean & Coastal Management* , 148, 31-39.
- [102] Croll, D. A., et al. (2001). Effect of anthropogenic low-frequency noise on the foraging ecology of Balaenoptera whales. *Animal Conservation* , 4(1), 13-27.
- [103] UNEP/MAP. (2019). Regional action plan on marine litter management in the Mediterranean. UNEP(DEPI)/MED IG.24/22.
- [104] Notarbartolo di Sciara, G., et al. (2016). Miracle in the Mediterranean: Thirty years of conservation of marine mammals in the Pelagos Sanctuary. *Aquatic Conservation* , 26(5), 770-789.
- [105] Nowacek, D. P., et al. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review* , 37(2), 81-115.
- [106] Southall, B. L., et al. (2021). Marine mammal noise exposure criteria: Assessing

the severity of marine mammal behavioral responses to human noise. *Aquatic Mammals* , 47(5), 421-464.

[107] Bejder, L., et al. (2006). Decline in relative abundance of bottlenose dolphins exposed to long-term disturbance. *Conservation Biology* , 20(6), 1791-1798.

[108] Lusseau, D., et al. (2009). The short-term behavioral reactions of bottlenose dolphins to interactions with boats in Doubtful Sound, New Zealand. *Marine Mammal Science* , 25(2), 35-47.

[109] Pettis, H. M., et al. (2022). North Atlantic right whale consortium 2021 annual report card. Available at: <https://www.narwc.org/report-cards.html>

[110] Van der Hoop, J. M., et al. (2013). Assessment of management to mitigate anthropogenic effects on large whales. *Conservation Biology* , 27(1), 121-133.

[111] Silber, G. K., et al. (2012). The role of the International Maritime Organization in reducing vessel threat to whales. *Marine Policy* , 36(6), 1171-1177.

[112] Swartz, S. L. (2018). Gray whale *Eschrichtius robustus* population and stock identity. *Mammal Review* , 48(3), 177-190.

[113] McKenna, M. F., et al. (2013). Blue whale response to underwater noise from commercial ships. *Endangered Species Research* , 20(1), 25-35.

[114] Goldbogen, J. A., et al. (2013). Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. *Proceedings of the Royal Society B* , 280(1765), 20130657.

[115] Slabbekoorn, H., et al. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution* , 25(7), 419-427.

- [116] Engås, A., et al. (1996). Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , 53(10), 2238-2249.
- [117] Moore, S. E., & Huntington, H. P. (2008). Arctic marine mammals and climate change: Impacts and resilience. *Ecological Applications* , 18(sp2), S157-S165.
- [118] Tyack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy* , 89(3), 549-558.
- [119] Garland, E. C., et al. (2011). Dynamic horizontal cultural transmission of humpback whale song at the ocean basin scale. *Current Biology* , 21(8), 687-691.
- [120] Frankel, A. S., et al. (1995). Spatial distribution, habitat utilization, and social interactions of humpback whales, *Megaptera novaeangliae* , off Hawai'i, determined using acoustic and visual techniques. *Canadian Journal of Zoology* , 73(6), 1134-1146.
- [121] Buckstaff, K. C. (2004). Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus* , in Sarasota Bay, Florida. *Marine Mammal Science* , 20(4), 709-725.
- [122] Tougaard, J., et al. (2009). Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Journal of the Acoustical Society of America* , 126(1), 11-14.
- [123] Au, W. W., & Hastings, M. C. (2008). *Principles of marine bioacoustics* . Springer.
- [124] Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 5-20.

- [125] Redfern, J. V., et al. (2013). Assessing the risk of ships striking large whales in marine spatial planning. *Conservation Biology* , 27(2), 292-302.
- [126] Williams, R., et al. (2014). Counting whales in a challenging environment: A mobile acoustic survey of Antarctic minke whales in sea ice in the Ross Sea. *Marine Mammal Science* , 30(2), 413-429.
- [127] DeRuiter, S. L., et al. (2013). First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar. *Biology Letters* , 9(4), 20130223.
- [128] Madsen, P. T., et al. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: Implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series* , 309, 279-295.
- [129] Ketten, D. R. (1995). Estimates of blast injury and acoustic trauma zones for marine mammals from underwater explosions. *Sensory Systems of Aquatic Mammals* , 391-407.
- [130] Finneran, J. J., & Jenkins, A. K. (2012). Criteria and thresholds for U.S. Navy acoustic and explosive effects analysis. Technical Report prepared for Space and Naval Warfare Systems Center Pacific.
- [131] Cranford, T. W., & Krysl, P. (2015). Fin whale sound reception mechanisms: Skull vibration enables low-frequency hearing. *PLOS ONE* , 10(1), e0116222.
- [132] Goldbogen, J. A., et al. (2006). Kinematics of foraging dives and lunge-feeding in fin whales. *Journal of Experimental Biology* , 209(7), 1231-1244.
- [133] Johnson, M., et al. (2009). Echolocation behaviour adapted to prey in foraging Blainville's beaked whale (*Mesoplodon densirostris*). *Proceedings of the Royal*

Society B , 276(1657), 133-141.

[134] Tyack, P. L., et al. (2011). Beaked whales respond to simulated and actual navy sonar. *PLOS ONE* , 6(3), e17009.

[135] Villadsgaard, A., et al. (2007). Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena* . *Journal of Experimental Biology* , 210(1), 56-64.

[136] Kastelein, R. A., et al. (2002). Audiogram of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) measured with narrow-band frequency-modulated signals. *Journal of the Acoustical Society of America* , 112(1), 334-344.

[137] Reichmuth, C., et al. (2013). New insights into the underwater hearing abilities of seals and sea lions . In *The effects of noise on aquatic life* (pp. 339-343). Springer.

[138] Kastak, D., & Schusterman, R. J. (1998). Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: Methods, measurements, noise, and ecology. *Journal of the Acoustical Society of America* , 103(4), 2216-2228.

[139] Southall, B. L., et al. (2005). Marine mammal noise-exposure criteria. *Journal of the Acoustical Society of America* , 117(6), 3941-3942.

[140] Finneran, J. J., & Schlundt, C. E. (2004). Effects of intense pure tones on the behavior of trained odontocetes. Technical Report 1913. Space and Naval Warfare Systems Center San Diego.

[141] Houser, D. S., et al. (2017). A bandpass filter-bank model of auditory sensitivity in the humpback whale. *Aquatic Mammals* , 43(6), 614-620.

[142] Popper, A. N., & Hawkins, A. D. (2019). An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology* , 94(5), 692-

713.

[143] Hawkins, A. D., & Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* , 74(3), 635-651.

[144] Ladich, F., & Popper, A. N. (2004). Parallel evolution in fish hearing organs. *Evolution of the Vertebrate Auditory System* , 95-127.

[145] Popper, A. N., et al. (2014). Sound exposure guidelines for fishes and sea turtles. Technical Report by ASA S3/SC1.4 TR-2014.

[146] Hawkins, A. D., et al. (2014). Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* , 25(1), 39-64.

[147] Casper, B. M., et al. (2013). Changes in fish catch rates in the presence of anthropogenic sounds in Lake Minnetonka, Minnesota. *Ecological Applications* , 23(4), 849-856.

[148] André, M., et al. (2011). Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 9(9), 489-493.

[149] Solé, M., et al. (2013). Does exposure to noise from human activities compromise sensory information from cephalopod statocysts? *Deep Sea Research Part II* , 95, 160-181.

[150] Roberts, L., et al. (2015). Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Marine Ecology Progress Series* , 538, 185-195.

- [151] Williams, R., et al. (2017). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions. *Ocean & Coastal Management* , 115, 17-24.
- [152] Moore, S. E., et al. (2012). Are declining Arctic ice conditions contributing to increased gray whale entanglements and deaths? *Marine Mammal Science* , 28(4), 741-762.
- [153] Davis, G. E., et al. (2017). Long-term passive acoustic recordings track the changing distribution of North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) from 2004-2014. *Scientific Reports* , 7, 13460.
- [154] Bort, J., et al. (2015). Recommended measures to reduce ship strikes of North Atlantic right whales. *Ocean & Coastal Management* , 115, 24-31.
- [155] Cooke, J. G., et al. (2015). Updated population assessment of the southern right whale based on photo-identification data 1971–2013. Paper SC/66a/BRG/26 submitted to the IWC Scientific Committee.
- [156] Rowntree, V. J., et al. (2001). Two right whales *Eubalaena australis* in Argentina: Evidence for synchronous calving and implications for conservation. *Marine Mammal Science* , 17(2), 358-370.
- [157] Adamantopoulou, S., et al. (2011). Mediterranean monk seal (*Monachus monachus*): Fishery interactions in the National Marine Park of Alonissos. *Aquatic Mammals* , 37(2), 165-176.
- [158] Karamanlidis, A. A., et al. (2008). Assessing accidental entanglement as a threat to the Mediterranean monk seal *Monachus monachus* . *Endangered Species Research* , 5(2-3), 205-213.

- [159] Taylor, B. L., et al. (2017). Extinction is imminent for Mexico's endemic porpoise unless fishery bycatch is eliminated. *Conservation Letters* , 10(5), 588-595.
- [160] Rojas-Bracho, L., et al. (2006). Conservation of the vaquita *Phocoena sinus* . *Mammal Review* , 36(3), 179-216.
- [161] Gerrodette, T., et al. (2011). A combined visual and acoustic estimate of 2008 abundance, and change in abundance since 1997, for the vaquita, *Phocoena sinus* . *Marine Mammal Science* , 27(2), E79-E100.
- [162] Avila, I. C., et al. (2018). Current global risks to marine mammals: Taking stock of the threats. *Biological Conservation* , 221, 44-58.
- [163] Clapham, P. J., et al. (1999). *Megaptera novaeangliae*. *Mammalian Species* , 604, 1-9.
- [164] Trenkel, V. M., et al. (2011). Underwater acoustics for ecosystem-based management: State of the science and proposals for ecosystem indicators. *Marine Ecology Progress Series* , 442, 285-301.
- [165] Chapman, P. M. (2002). Integrating toxicology and ecology: Putting the "eco" into ecotoxicology. *Marine Pollution Bulletin* , 44(1), 7-15.
- [166] Suter II, G. W. (2016). *Ecological risk assessment* . CRC Press.
- [167] Marques, T. A., et al. (2013). Estimating animal population density using passive acoustics. *Biological Reviews* , 88(2), 287-309.
- [168] Merchant, N. D. (2019). Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science & Policy* , 92, 116-123.
- [169] Erbe, C., et al. (2018). Communication masking in marine mammals: A review

and research strategy. *Marine Pollution Bulletin* , 103(1-2), 15-38.

[170] Pirotta, E., et al. (2018). Understanding the population consequences of disturbance. *Ecology and Evolution* , 8(19), 9934-9946.

[171] New, L. F., et al. (2014). Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series* , 496, 99-108.

[172] King, S. L., et al. (2015). Bottlenose dolphins can use learned vocal labels to address each other. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 112(2), 434-439.

[173] Booth, C. G., et al. (2020). PCoD—A population consequences of disturbance model for marine mammal populations. *Environmental Modelling & Software* , 125, 104627.

[174] Harwood, J., et al. (2014). Stanton Bank area closure for sandeel fishing 2010–2012: Fisheries and seabird monitoring final report. Marine Management Organisation Project MMO 1031.

[175] Halpern, B. S., et al. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* , 319(5865), 948-952.

[176] Micheli, F., et al. (2013). Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities. *PLOS ONE* , 8(12), e79889.

[177] Erbe, C., & King, A. R. (2008). Automatic detection of marine mammals using information entropy. *Journal of the Acoustical Society of America* , 124(5), 2833-2840.

[178] Merchant, N. D., et al. (2015). Measuring acoustic habitats. *Methods in Ecology and Evolution* , 6(3), 257-265.

[179] Ainslie, M. A., et al. (2018). ADEON: A digital ocean noise monitoring strategy for the 21st century. *Marine Pollution Bulletin* , 133, 940-950.

- [180] Bailey, H., et al. (2014). Behavioural estimation of blue whale movements in the Northeast Pacific from state-space model analysis of satellite tracks. *Endangered Species Research* , 26(1), 73-87.
- [181] Calambokidis, J., et al. (2008). SPLASH: Structure of populations, levels of abundance and status of humpback whales in the North Pacific. Final Report for Contract AB133F-03-RP-00078.
- [182] Keen, E. M., et al. (2017). The importance of biologically meaningful metrics for marine noise regulation. *Aquatic Mammals* , 43(6), 646-651.
- [183] Weilgart, L. S. (2007). The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology* , 85(11), 1091-1116.
- [184] Shannon, G., et al. (2016). A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife. *Biological Reviews* , 91(4), 982-1005.
- [185] Pomeroy, R. S., et al. (2004). How is your MPA doing? A methodology for evaluating the management effectiveness of marine protected areas. *Ocean & Coastal Management* , 48(7-8), 485-502.
- [186] Hockings, M., et al. (2006). *Evaluating effectiveness: A framework for assessing management effectiveness of protected areas* . IUCN.
- [187] Jones, P. J. (2014). *Governing marine protected areas: Resilience through diversity* . Routledge.
- [188] Kelleher, G., & Kenchington, R. (1992). *Guidelines for establishing marine protected areas*. IUCN.
- [189] Day, J., et al. (2012). *Guidelines for applying the IUCN protected area management categories to marine protected areas*. IUCN.
- [190] Edgar, G. J., et al. (2014). Global conservation outcomes depend on marine protected areas with five key features. *Nature* , 506(7487), 216-220.
- [191] Sala, E., & Giakoumi, S. (2018). No-take marine reserves are the most effective protected areas in the ocean. *ICES Journal of Marine Science* , 75(3), 1166-1168.
- [192] Lester, S. E., et al. (2009). Biological effects within no-take marine reserves: A global synthesis. *Marine Ecology Progress Series* , 384, 33-46.
- [193] Claudet, J., et al. (2008). Marine reserves: Size and age do matter. *Ecology Letters* , 11(5), 481-489.

- [194] Babcock, R. C., et al. (2010). Decadal trends in marine reserves reveal differential rates of change in direct and indirect effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 107(43), 18256-18261.
- [195] Walters, C., & Holling, C. S. (1990). Large-scale management experiments and learning by doing. *Ecology* , 71(6), 2060-2068.
- [196] Armitage, D. R., et al. (2009). *Adaptive co-management: Collaboration, learning, and multi-level governance* . UBC Press.
- [197] Folke, C., et al. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annu. Rev. Environ. Resour.* , 30, 441-473.
- [198] Sumaila, U. R., et al. (2000). Economic benefits of marine protected areas. *WWF Economics Briefing Paper* .
- [199] Balmford, A., et al. (2004). The worldwide costs of marine protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 101(26), 9694-9697.
- [200] Costello, C., et al. (2010). The value of spatial information in MPA network design. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 107(43), 18294-18299.

第 7 章 政策發展與未來展望

Policy Development and Future Perspectives

水下噪音管理正處於快速發展的轉捩點，隨著全球海洋活動的持續增長和環境意識的提升，政策發展與未來展望已成為海洋環境保護的核心議題。第 7 章深入探討當前和未來水下噪音治理的政策發展趨勢、跨領域合作模式、永續發展目標的整合，以及具體的政策建議與推動策略。本章旨在為政策制定者、海洋管理者、產業界和學術研究者提供前瞻性的指導，促進全球水下噪音治理體系的完善與發展。

當代水下噪音政策發展呈現出從單一部門管理向綜合生態系統管理的轉變趨勢。傳統的水下噪音管理多集中在特定活動的局部管控，如船舶噪音標準或建設工程的環境影響評估。然而，隨著海洋空間利用的複雜化和累積效應認識的深化，現代政策框架越來越重視跨部門協調、多尺度整合、以及基於生態系統的管理方法。歐盟海洋策略框架指令（Marine Strategy Framework Directive, MSFD）的 D11 描述符標誌著全球首個系統性的水下噪音立法框架，為其他區域和國家提供了重要的政策範本[1]。

技術創新正在重塑水下噪音政策的制定和實施方式。人工智慧、物聯網、區塊鏈、數位孿生等新興技術為政策制定者提供了前所未有的工具和能力，使得即時監測、精準預測、透明治理成為可能。這些技術不僅提升了政策實施的效率和效果，也為利害關係人參與和公眾監督創造了新的途徑。同時，氣候變化、海平面上升、海洋酸化等全球環境變化正在改變海洋聲環境的基線條件，要求政策框架具備足夠的適應性和彈性來應對不確定的未來情境[2]。

國際合作與治理機制的完善是未來水下噪音政策發展的重點方向。聯合國永續發展目標（SDGs）特別是 SDG 14「保護和永續利用海洋與海洋資源」，為全球水下噪音治理提供了共同的願景和目標。聯合國海洋科學促進永續發展十年（UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development 2021-2030）進一步強調了科學基礎的政策制定和多邊合作的重要性。國際海事組織（IMO）的水下噪音減緩指導方針雖非強制性，但為全球航運業建立了重要的技術標準和最佳實務準則[3]。

7.1 技術與管理新趨勢 Emerging Trends in Technology and Management

技術與管理新趨勢正在根本性地改變水下噪音治理的範式和實踐方式。在數位轉型的推動下，新興技術不僅提升了監測和預測能力，更為政策制定、實施監督、以及利害關係人參與創造了全新的可能性。同時，管理理念的演進也從傳統的命令控制模式轉向更加靈活、適應性強、以及參與式的治理架構。這些技術與管理的融合發展，為應對日益複雜的海洋環境挑戰提供了創新的解決方案[4]。

當前技術發展的核心特徵包括智能化、網絡化、即時化和精準化。人工智慧技術在水下噪音領域的應用日益成熟，從基礎的模式識別發展到複雜的預測建模和決策支援。機器學習演算法能夠從海量的聲學監測資料中提取有價值的資訊，識別噪音來源、預測生物反應、評估累積影響。深度學習技術特別在聲紋識別、異常檢測、以及時序預測方面展現出優異的性能，為即時監測和預警系統提供了強大的技術支撐[5]。

物聯網（IoT）技術的發展使得海洋監測網絡的部署和維護成本大幅降低，同時提升了資料收集的時空解析度和準確性。新一代的智能浮標、水下感測器、以及自主水下載具（AUV）配備了先進的聲學感測器、資料處理能力、以及通訊模組，能夠在惡劣的海洋環境中長期穩定運作。邊緣計算技術使得資料處理能夠在感測器端進行，減少了資料傳輸的延遲和頻寬需求，提升了系統的即時響應能力[6]。

區塊鏈技術在海洋環境治理中的應用前景廣闊，特別是在提升治理透明度、確保資料完整性、以及促進多方合作方面。基於區塊鏈的環境監測系統能夠創建不可竄改的環境資料記錄，增強公眾對監管機構和企業環境表現的信任。智能合約技術可以自動執行環境法規的某些條款，如當噪音水準超過閾值時自動觸發警告或懲罰機制。這種技術還為碳信用交易、環境損害賠償、以及跨境環境合作提供了新的機制[7]。

數位孿生（Digital Twin）技術代表了海洋環境管理領域的重大技術突破。數位孿生透過整合物理感測器資料、數值模型、以及歷史資料，創建海洋環境的虛擬複本，能夠即時反映真實海洋的狀態變化。在水下噪音管理中，數位孿生系統可以模擬不同噪音源的時空分布、預測聲場變化、評估防制措施的效果、以及支援情境分析和決策制定。這種技術特別適用於複雜海域的綜合管理，如繁忙港口、海上風場、以及海洋保護區[8]。

雲端運算和大資料分析技術為處理海洋聲學大資料提供了強大的基礎設施支援。現代海洋監測網絡每天產生 TB 級的聲學資料，傳統的資料處理方法已無

法滿足即時分析的需求。雲端運算平台提供了彈性的計算資源和先進的分析工具，使得研究者和管理者能夠進行大規模的資料挖掘和模式發現。分散式計算框架如 Hadoop 和 Spark 為並行處理海量聲學資料提供了高效的解決方案[9]。

7.1.1 智能監測與預警系統 Intelligent Monitoring and Early Warning Systems

智能監測與預警系統代表了水下噪音管理技術發展的前沿方向，透過整合先進感測技術、人工智慧演算法、以及即時通訊網絡，建構全天候、多角度、智能化的海洋聲環境監測體系。這類系統不僅能夠提供高精度的噪音水準測量，更重要的是具備了預測、診斷、以及決策支援的智能功能，為海洋環境保護和可持續利用提供了科學可靠的技術保障[10]。

現代智能監測系統的核心架構通常包含感知層、網絡層、處理層、以及應用層四個主要組成部分。感知層由分佈式的聲學感測器網絡構成，包括固定式水下監測站、漂流式監測浮標、自主水下載具、以及船載監測設備。新一代感測器採用 MEMS 技術製造，具有小型化、低功耗、高精度的特點，能夠在 -2°C 到 40°C 的溫度範圍內穩定工作，監測頻率範圍覆蓋 10 Hz 到 100 kHz，動態範圍達到 120dB 以上。這些感測器配備了先進的數位信號處理晶片，能夠在邊緣端進行初步的資料預處理和特徵提取，大幅減少了資料傳輸量和處理延遲[11]。

網絡層負責將感知層收集的資料安全、可靠地傳輸到資料處理中心。海洋環境的特殊性要求監測網絡具備多元化的通訊手段，包括水下聲學通訊、光纖通訊、衛星通訊、以及無線射頻通訊。新興的 5G 和低軌衛星技術為海洋監測提供了更高的頻寬和更低的延遲，使得高解析度音頻資料的即時傳輸成為可能。軟體定義網絡 (SDN) 技術使得網絡配置更加靈活，能夠根據監測任務的需求動態調整資料傳輸路徑和優先級[12]。

處理層是智能監測系統的"大腦"，負責對海量聲學資料進行智能分析和處理。先進的信號處理演算法包括頻譜分析、小波轉換、經驗模態分解 (EMD)、以及非線性動力學分析等，能夠從複雜的海洋聲環境中提取有用的資訊。人工智慧演算法特別是深度學習模型，在聲源識別、噪音分類、以及異常檢測方面表現優異。卷積神經網絡 (CNN) 擅長處理聲譜圖的空間特徵，循環神經網絡 (RNN) 和長短期記憶網絡 (LSTM) 則適合捕捉時序信號的動態特性。注意力機制 (Attention Mechanism) 和 Transformer 架構為處理長序列聲學資料提供了新的解決方案[13]。

預警功能是智能監測系統的關鍵能力，通過建立多層次、多時間尺度的預

警機制，能夠及早發現潛在的生態風險並觸發相應的應對措施。短期預警（1-24 小時）主要關注突發性噪音事件，如船舶碰撞、爆破作業、機械故障等，通過異常檢測演算法和閾值監控實現。中期預警（1-30 天）關注持續性噪音累積和生物行為變化，運用時間序列分析和趨勢預測方法。長期預警（季節至年度）關注氣候變化、人類活動模式變化對海洋聲環境的影響，需要整合氣象、海況、船舶交通等多元資料進行綜合分析[14]。

智能診斷系統能夠自動識別噪音來源、評估影響程度、以及推薦防制措施。聲紋識別技術透過分析噪音的頻譜特徵、時域特性、以及調製模式，能夠準確識別不同類型的噪音源，如商船、漁船、工程船、軍艦等。機器學習分類器如支持向量機（SVM）、隨機森林（RF）、以及深度神經網絡在聲源分類任務中達到了 95% 以上的準確率。專家系統整合領域專家的知識和經驗，能夠根據噪音特徵、環境條件、以及生物分佈情況自動評估生態風險等級，並推薦適當的防制措施 [15]。

決策支援功能透過整合監測資料、預測模型、以及管理目標，為海洋管理者提供科學的決策建議。多準則決策分析（MCDA）方法能夠綜合考慮生態保護、經濟發展、社會福利等多重目標，為複雜的管理決策提供量化支援。情境分析和敏感度分析幫助決策者理解不同管理選項的潛在後果和不確定性。視覺化技術將複雜的分析結果轉化為直觀的圖表、地圖、以及儀表板，支援快速決策和有效溝通[16]。

系統整合與標準化是智能監測系統大規模部署的關鍵挑戰。不同廠商的設備、不同機構的系統往往採用不同的技術標準和資料格式，造成資料孤島和系統互操作性問題。國際標準化組織（ISO）、電氣電子工程師學會（IEEE）等正在制定海洋監測設備和系統的相關標準。開放資料標準如 NetCDF、HDF5 為海洋聲學資料的存儲和交換提供了統一格式。服務導向架構（SOA）和微服務技術為系統整合提供了靈活的解決方案[17]。

品質保證與品質控制（QA/QC）是確保監測資料可靠性的重要環節。智能監測系統需要建立完善的資料品質管理機制，包括感測器校準、資料驗證、異常值檢測、以及不確定性評估。自動校準技術透過參考信號源或環境基準進行定期校準，確保長期監測資料的準確性和一致性。資料品質指標和元資料標準為資料使用者提供了評估資料適用性的重要資訊[18]。

7.1.2 數位化治理平台 Digital Governance Platforms

數位化治理平台代表了海洋環境管理從傳統紙本作業向智能化、網路化、透明化管理模式的重大轉變。這類平台整合了政府管理、產業自律、公眾參與、科學研究等多元主體，建構了協同治理的數位生態系統。透過運用雲端運算、大資料分析、人工智慧、區塊鏈等先進技術，數位化治理平台不僅提升了管理效率和服務品質，更重要的是促進了治理過程的透明度、公正性和參與性[19]。

現代數位化治理平台的核心架構採用分層設計，包括基礎設施層、資料層、服務層、應用層、以及展示層。基礎設施層提供雲端運算資源、網路通訊、以及安全防護功能，採用混合雲架構兼顧資料安全和成本效益。資料層建立統一的資料倉庫和資料湖，整合來自監測網絡、行政許可、企業報告、科學研究等多源資料，建立完整的海洋環境資訊體系。資料治理機制確保資料品質、安全、以及合規使用，包括資料標準化、版本控制、存取控制、以及隱私保護[20]。

服務層提供標準化的應用程式介面（API）和微服務，支援各類應用系統的快速開發和部署。核心服務包括身份認證、許可管理、工作流引擎、通知服務、以及報表生成等。服務導向架構（SOA）使得系統具備良好的擴展性和可維護性，能夠根據業務需求靈活組合和調整功能模組。容器化技術如 Docker 和 Kubernetes 為服務的部署和管理提供了標準化的解決方案[21]。

應用層包含面向不同用戶群體的專業應用系統，如海洋管理者使用的監管系統、企業使用的申報系統、研究者使用的資料分析系統、公眾使用的資訊服務系統等。這些應用系統採用統一的用戶介面設計規範，確保用戶體驗的一致性和易用性。響應式設計支援多種終端設備，包括桌上型電腦、平板電腦、智慧型手機等，滿足移動辦公的需求[22]。

許可審批數位化是治理平台的核心功能之一，透過建立標準化的審批流程、電子化的申請材料、以及智能化的審批輔助系統，大幅提升了行政效率和服務品質。申請者可以透過網路平台提交各類海洋活動的許可申請，系統自動進行材料完整性檢查、格式規範性驗證、以及初步的合規性評估。人工智慧輔助審批系統基於歷史案例和專家知識，能夠為審批人員提供決策建議和風險提示。電子簽章和時間戳技術確保審批過程的法律效力和可追溯性[23]。

環境監管執法數位化透過整合監測資料、衛星遙感、無人機巡查、以及舉報投訴等多元資訊來源，建立了全方位的監管體系。智能識別系統能夠自動發現疑似違法行為，如未經許可的海洋工程、超標的噪音排放、非法的傾倒活動等。地理資訊系統（GIS）提供空間分析和視覺化功能，支援執法人員進行現場調查和

證據收集。移動執法終端使得執法人員能夠在現場即時存取相關資訊、記錄執法過程、以及上傳執法結果[24]。

企業環境資訊揭露數位化建立了標準化的報告格式和提交流程，要求相關企業定期報告其海洋活動的環境影響資訊。智能填報系統提供模板和指導，幫助企業準確填報相關資訊。資料驗證系統透過交叉比對和異常檢測發現可能的錯誤或造假行為。區塊鏈技術確保報告資料的完整性和不可竄改性，增強了資訊的可信度[25]。

公眾參與數位化透過建立開放的資訊平台和互動機制，讓公民能夠便捷地獲取海洋環境資訊、參與政策討論、以及舉報環境問題。環境資訊公開系統提供即時的監測資料、評估報告、以及政策文件，支援多種資料格式和視覺化呈現方式。線上諮詢平台允許公眾對重大政策和項目進行評論和建議。舉報投訴系統提供多種舉報途徑，包括網站、手機應用、熱線電話等，並建立了處理流程和回饋機制[26]。

科學決策支援數位化整合了最新的科學研究成果、監測資料、以及預測模型，為政策制定提供科學依據。知識管理系統收集和組織海洋科學文獻、技術報告、最佳實務案例等知識資源。專家諮詢系統建立了專家庫和諮詢機制，支援遠程諮詢和合作。情境模擬系統基於數值模型和歷史資料，能夠預測不同政策選項的潛在影響，支援證據基礎的政策制定[27]。

跨部門協調數位化透過建立統一的資訊共享平台和協調機制，促進不同政府部門之間的有效合作。資訊共享標準和介面規範確保不同系統之間的互操作性。 workflow 管理系統支援跨部門的業務流程設計和執行。視訊會議和合作工具支援遠程溝通和合作，特別是在緊急情況下能夠快速啟動跨部門響應機制[28]。

國際合作數位化利用資訊技術促進跨國海洋環境合作和資訊交流。標準化的資料交換格式和協議支援不同國家系統之間的資訊共享。多語言支援和文化本地化適應不同國家和地區的需求。國際合作項目管理系統支援多國參與的研究項目和監測計畫的協調管理[29]。

7.1.3 自適應管理機制 Adaptive Management Mechanisms

自適應管理機制代表了海洋環境治理範式的重要革新，其核心理念是將管理視為持續的學習和改進過程，透過系統性的監測、評估、學習、以及調整，在不確定性條件下實現有效的環境管理。在水下噪音治理領域，自適應管理機制特別重要，因為海洋生態系統的複雜性、人類活動的多樣性、以及科學認知的不斷

發展，使得傳統的固定式管理方法難以應對動態變化的挑戰[30]。

自適應管理的理論基礎建立在複雜系統科學、學習理論、以及實驗設計原理之上。複雜系統科學認為海洋生態系統具有非線性、突現性、以及自組織等特徵，系統行為難以完全預測和控制。學習理論強調透過實踐獲得知識和改進績效的重要性。實驗設計原理為管理行動的設計和評估提供了科學方法。自適應管理將這些理論整合為一個統一的管理框架，強調管理即實驗、監測即學習、調整即改進的循環過程[31]。

自適應管理的實施過程通常包括六個關鍵階段：評估和設計、實施、監測、評估、學習、以及調整。評估和設計階段需要明確管理目標、識別關鍵不確定性、設計管理選項、以及建立監測計畫。實施階段按計畫執行管理行動，同時收集相關資料。監測階段系統性收集生態、社會、經濟等多角度資料。評估階段分析監測資料，評估管理效果和目標實現程度。學習階段總結經驗教訓，更新對系統的認識。調整階段根據學習結果修改管理策略和行動[32]。

在水下噪音管理中，自適應管理機制的應用涉及多個層面。噪音閾值的動態調整是一個重要應用領域，隨著科學認知的深化和監測技術的改進，對於不同物種、不同生活史階段、不同環境條件下的噪音影響閾值需要不斷更新和完善。歐盟海洋策略框架指令的實施就實現了自適應管理的理念，透過定期評估和更新噪音指標和閾值，確保管理措施與最新科學發現保持一致[33]。

海洋保護區的噪音管理是自適應管理的重要應用場景。保護區的劃設和管理需要考慮物種分布的季節變化、洄游路線、繁殖和覓食行為等動態因素。自適應管理機制支援根據監測結果動態調整保護區邊界、活動限制、以及管理措施。例如，在鯨豚繁殖季節可以實施更嚴格的噪音限制，在洄游路線上設置臨時保護走廊，在關鍵覓食區限制特定類型的人類活動[34]。

氣候變化適應是自適應管理機制的另一個重要應用領域。氣候變化正在改變海洋的物理、化學、生物特性，進而影響聲傳播特性和生物分布模式。海水溫度上升改變聲速剖面，影響聲波傳播路徑和損失。海平面上升改變近岸海域的水深和地形，影響淺水聲學特性。物種分布北移改變生物敏感區域的位置。自適應管理機制需要整合氣候預測、生態預測、以及社會經濟預測，制定能夠應對多重變化的管理策略[35]。

「技術驅動的自適應管理 (Technology-Driven Adaptive Management)」是一種結合**數位科技、資料分析與動態決策**的新型治理模式，其核心在於：透過即時

資料回饋與人工智慧輔助決策，讓管理策略能**隨環境變化自動調整**、不再僅依賴靜態規劃。是現代海洋管理的重要特徵。人工智慧技術使得自適應管理的各個環節都能夠實現一定程度的自動化。機器學習演算法能夠自動分析監測資料，識別管理效果和系統變化趨勢。專家系統能夠根據預設規則自動調整管理參數。強化學習演算法能夠透過試錯過程自動尋找最優管理策略。這些技術大幅提升了自適應管理的效率和響應速度[36]。以下是「技術驅動的自適應管理（Technology-Driven Adaptive Management）」解釋：

一、概念內涵

自適應管理（Adaptive Management）源自生態治理領域，強調「邊執行邊學習」，即在政策或計畫執行過程中，透過持續監測、回饋與修正，讓系統具備動態調整能力。

技術驅動的自適應管理則是在此基礎上，導入人工智慧（AI）、物聯網（IoT）、大數據分析（Big Data Analytics）、數位孿生（Digital Twin）等工具，形成「資料驅動的決策循環」，能即時修正管理行動、預測趨勢與最佳化資源配置。

二、運作機制

1. 即時監測（Real-Time Monitoring）

透過感測器網絡、遙測或聲學監測等裝置，持續蒐集環境或系統狀態資料，如噪音、空氣品質、水文變化等。

2. 資料整合與分析（Data Integration & Analytics）

利用 AI 模型進行模式識別與趨勢分析，辨識異常行為或預測潛在風險。

3. 動態決策（Dynamic Decision-Making）

系統依據資料回饋自動生成或建議管理行動，例如自動調整噪音管制門檻、交通號誌、排放限制等。

4. 學習與優化（Learning & Optimization）

每次行動結果都被納入模型中進行「學習」，逐步提升系統準確度與反應速度，形成「閉環（closed-loop）」治理機制。

三、應用範例

- **城市環境治理**：桃園市「靜桃計畫」即是一種自適應管理的實踐。藉由智慧噪音監測、AI 聲紋辨識與跨局資料平台，能即時調整執法重點與宣導策略。

- **水資源管理**：以感測網監控河川水質與降雨量，結合 AI 模型預測污染事件或淹水風險，自動調整閘門與警報系統。
- **生態保育**：透過衛星遙測與 AI 影像辨識追蹤棲地變化，當指標物種數量下降時，系統可建議立即改變棲地管理策略。
- **交通與能源管理**：以即時交通流量與氣候資料調整號誌時間，或依用電負載自動調整再生能源輸入比例。

四、核心優勢

- **動態回應**：能即時應對突發變化，減少決策延遲。
- **資料透明**：以公開數據支持決策，提高政策可信度。
- **跨域整合**：結合不同部門資料與技術，提升整體治理效能。
- **風險預警**：透過 AI 預測與模擬，提前介入問題發生前。
- **永續治理**：以循環學習方式，逐步優化資源使用與環境品質。

五、挑戰與前瞻

技術驅動的自適應管理雖具前瞻性，但仍需面對資料品質、隱私安全、跨機關合作與法制適應等挑戰。未來趨勢將朝向：

- 建立**資料治理框架**與標準化共享平台；
- 制定**AI 決策倫理規範**與風險控管機制；
- 推動**人機協同決策模式**，讓科技輔助而非取代治理者；
- 強化**公民參與與社會溝通機制**，確保自適應管理具包容性與透明性。

利害關係人參與是自適應管理成功實施的關鍵要素。海洋環境管理涉及政府機構、產業界、科學界、環保組織、以及當地社區等多元利害關係人，他們擁有不同的知識、利益、以及價值觀。自適應管理機制需要建立有效的參與平台和協調機制，確保各方能夠平等參與決策過程、貢獻專業知識、表達合理訴求。參與式學習和共同調適是現代自適應管理的重要特徵[37]。

制度化是自適應管理機制可持續運作的重要保障。自適應管理不是臨時性的管理實驗，而是需要制度化的管理範式。這包括建立法律法規基礎、組織架構、資源配置、能力建設、以及績效評估等制度安排。一些國家和地區已經在法律中明確規定自適應管理的要求，如澳洲的《環境保護與生物多樣性保護法》要求重大項目採用自適應管理方法[38]。

知識管理是自適應管理機制的重要支撐。自適應管理的核心是學習，而學習的基礎是知識的積累、組織、以及應用。知識管理系統需要收集和整理來自監

測、研究、管理實踐的各類知識，建立知識庫和專家網絡，支援知識共享和應用。人工智慧技術為知識管理提供了新的工具，如自然語言處理技術能夠自動提取文獻中的關鍵資訊，知識圖譜技術能夠建立概念和關係的結構化表示[39]。

不確定性管理是自適應管理機制的核心能力。海洋環境管理面臨多重不確定性，包括系統不確定性（對生態系統運作機制的不完全理解）、參數不確定性（模型參數的不確定範圍）、情境不確定性（未來發展路徑的多種可能）、以及價值不確定性（不同利害關係人的價值判斷差異）。自適應管理機制需要明確識別和評估這些不確定性，在決策過程中適當考慮不確定性的影響，設計能夠應對多種情境的強健管理策略[40]。

7.2 跨領域合作模式 **Interdisciplinary Collaboration Models**

跨領域合作模式是應對水下噪音複雜挑戰的必然選擇，因為水下噪音問題涉及海洋科學、環境工程、生態學、聲學、資訊科技、社會科學、政策科學等多個學科領域，單一學科的知識和方法難以全面理解和有效解決這一複雜問題。現代跨領域合作已從簡單的多學科並行發展為深度整合的跨學科和超學科模式，強調不同領域知識的融合創新和協同效應。這種合作模式不僅促進了科學認知的突破，也為政策制定和管理實踐提供了更加全面和有效的解決方案[41]。

跨領域合作的理論基礎建立在系統科學、複雜性科學、以及知識整合理論之上。系統科學強調整體性思維，認為複雜問題需要從系統層面進行理解和解決，而不是分割為獨立的部分。複雜性科學揭示了複雜系統的非線性、突現性、以及適應性特徵，要求採用跨學科的方法來捕捉系統的多重性質和動態行為。知識整合理論提供了整合不同領域知識的方法和框架，包括概念整合、方法整合、以及理論整合等多個層面[42]。

當前水下噪音領域的跨領域合作呈現出多元化的組織形式和合作模式。學術界的跨學科研究中心和研究聯盟正在成為重要的合作平台，如國際靜謐海洋實驗（International Quiet Ocean Experiment, IQOE）匯聚了海洋科學、生物學、聲學、工程學等領域的專家，開展全球性的水下噪音研究合作。政府間的國際合作機制如國際海事組織（International Maritime Organization, IMO）、區域海洋委員會／海岸計畫（Regional Seas Programme／Regional Seas Conventions & Action Plans, RSCAPs）、以及雙邊海洋合作協定為跨國跨領域合作提供了制度框架[43]。

產學研合作模式在水下噪音技術創新中發揮著重要作用。船舶製造企業與海洋工程研究機構合作開發低噪音推進技術，海洋監測設備製造商與海洋科學研

究院合作研發先進監測設備，海洋工程公司與環境諮詢機構合作制定環境友善的工程方案。這種合作模式加速了科學研究成果向實用技術的轉化，同時也為基礎研究提供了實際應用的驅動力[44]。

公私合作夥伴關係（Public-Private Partnership, PPP）為大規模海洋監測和管理系統的建設提供了有效的資源整合機制。政府部門負責政策制定、標準設定、以及監管執法，企業提供技術解決方案、設備製造、以及運營維護服務。這種模式能夠充分發揮政府的政策引導作用和企業的技術創新能力，實現資源的優化配置和風險的合理分擔[45]。

7.2.1 科學研究合作網絡 Scientific Research Collaboration Networks

科學研究合作網絡代表了現代科學研究組織方式的重要變革，特別是在水下噪音這樣的複雜跨領域問題中，單一機構或學科的研究能力已無法滿足全面深入研究的需求。合作網絡透過整合分散在全球各地的研究資源、專業知識、以及技術能力，形成了強大的集體研究能力，推動了水下噪音科學認知和技術創新的快速發展。這種網絡化的研究模式不僅提升了研究效率和品質，也促進了知識的快速傳播和應用轉化[46]。

國際靜謐海洋實驗（International Quiet Ocean Experiment, IQOE）是當前最具影響力的全球性水下噪音研究合作網絡，由國際海洋研究科學委員會（SCOR）和海洋研究夥伴關係（Partnership for Observation of the Global Oceans, POGO）共同發起，匯聚了來自 40 多個國家的 500 多名科學家。IQOE 的研究架構包括四個核心領域：海洋噪音來源和趨勢、噪音對海洋生物的影響、噪音與氣候變化的相互作用、以及噪音減緩技術和政策。該網絡透過標準化的研究協議、共享的資料管理系統、以及定期的研討會和工作坊，實現了全球範圍內的研究協調和成果共享[47]。

歐洲的水下噪音研究網絡以歐盟框架計畫為主要支撐，整合了歐洲各國的海洋研究機構、大學、以及企業，形成了多層次的合作體系。Horizon 2020 和 Horizon Europe 計畫資助了多個大型的水下噪音研究項目，如 AQUO 項目專注於船舶噪音減少技術，BIAS 項目研究噪音對海洋生物的影響，EMSO 項目建設歐洲多學科海底觀測網絡。這些項目不僅推進了科學研究，也建立了長期穩定的合作關係和共享基礎設施[48]。

北美的水下噪音研究合作主要依託美國和加拿大的海洋科學機構，以及北美海洋哺乳動物聯盟（Marine Mammal Commission）等組織。美國國家海洋和大

氣管理局 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)、海軍研究實驗室 (Naval Research Laboratory)、加拿大漁業和海洋部 (Fisheries and Oceans Canada) 等機構在水下噪音研究中發揮核心作用。太平洋海洋科學組織 (PICES) 為北太平洋地區的多國合作提供了重要平台[49]。

亞太地區的水下噪音研究合作相對較新，但發展迅速。日本海洋科學技術機構 (JAMSTEC, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)、韓國海洋科學技術院 (KIOST, Korea Institute of Ocean Science & Technology)、中國科學院聲學研究所 (Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, IOA / CAS)、澳洲聯邦科學與工業研究組織 (CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) 等機構正在建立區域性的合作網絡。西太平洋海洋學學會 (WESTPAC, IOC Sub-Commission for the Western Pacific)、東亞海域環境管理夥伴關係 (PEMSEA, Partnerships in Environmental Management for the Seas of East Asia) 等區域組織為合作提供了制度框架[50]。

研究資料共享是科學研究合作網絡的核心功能。水下噪音研究需要大量長期連續的監測資料，單一機構難以獲得足夠的資料量和空間覆蓋範圍。全球海洋觀測系統 (Global Ocean Observing System, GOOS) 建立了標準化的資料管理和共享機制，包括資料格式標準、品質控制規範、以及開放存取政策。海洋生物地理資訊系統 (Ocean Biogeographic Information System, OBIS) 為海洋生物分布資料的共享提供了平台。這些系統大大促進了跨機構的資料共享和聯合分析[51]。

標準化研究方法和協議是確保不同研究結果可比較和可整合的重要基礎。國際標準化組織 (ISO) 制定了系列水下噪音測量標準，如 ISO 17208 系列標準規定了船舶水下輻射噪音的測量方法。國際電工委員會 (IEC) 制定了水下聲學設備的技術標準。這些標準為全球研究者提供了統一的技術規範，確保了研究結果的一致性和可比較性[52]。

聯合培訓和能力建設是研究合作網絡的重要功能。許多發展中國家缺乏水下噪音研究的技術能力和人才儲備，國際合作在人才培養和能力建設方面發揮重要作用。聯合國教科文組織政府間海洋學委員會 (IOC-UNESCO) 組織了多期水下噪音研究培訓班。歐盟的 Erasmus+ 計畫支援學生和研究者的流動交流。這些活動培養了大批專業人才，提升了全球水下噪音研究的整體水準[53]。臺灣如何與 IOC 接軌、可參與的子委員會或計畫、技術平台對接方式，以及潛在的挑戰與機會？「IOC-UNESCO 在東亞／臺灣海域噪音監測與自適應海洋治理的角色藍

圖」。

一、整體目標與治理原則

本藍圖以「科學為本、資料互通、區域協作、動態治理」為核心：一是與 IOC-UNESCO 的全球觀測與資料標準接軌；二是以海洋聲環境為切入點，導入自適應管理循環（監測→研判→決策→執行→評估→回饋）；三是透過 WESTPAC 與 PEMSEA 平臺擴大區域合作；四是將科研成果轉化為海域管理、航運排程、海洋工程與生態保育的實務規則。

二、治理架構與分工（國家—地方—學研—國際）

中央層：海洋委員會統籌海洋政策與跨部會協調；環境部負責海噪監測規範與環境基準研議；交通部航港局就港埠、航道與船舶噪音管理提出管制作為；農業部漁業署就漁場、海龜與鯨豚熱點提出保育需求；國科會規劃研發與設備經費。

地方層：沿海直轄市與縣市政府（含桃園市）負責近岸監測站位、海岸活動管理、地方保護區協調與資料公開。

學研層：國立海洋大學、成功大學、中央大學、中研院、海洋中心等負責方法學、儀器比對、模型與 AI 分析、資料治理。

國際層：IOC-UNESCO (IODE/OBIS/GOOS)、WESTPAC 區域子委員會、IQOE 科學網絡、PEMSEA 沿岸綜整治理平臺，作為標準對接、資料交換、能力建設與專案共研的主軸。

三、技術體系：從觀測到決策

觀測指標與度量：採第三倍頻帶背景聲級（dB re 1 μ Pa）、SEL、Leq、頻譜密度，並標註環境狀態（風浪、降雨、航行密度、工程作業）與生物事件（鯨豚鳴聲、魚類合唱）。

儀器與校正：被動式水下聲學記錄器（固定樁位與底錨布放）+ 港口與近岸即時站；年度間比對校正流程與聲壓基準溯源；資料時間戳與儀器頻率響應一律入檔。

資料治理：遵循 IODE 開放資料原則；採用通用中繼格式（如 netCDF/WAV+JSON meta），建立 DOI 化資料集；物種相關音檔另行整理上傳 OBIS 相容欄位。

模型與 AI：航運 AIS × 聲場傳播模型（含地形、底質、海況）建立噪音預測格網；以機器學習分離「船舶／工程／自然／生物」聲源、熱點偵測與趨勢評

分；發展「事件觸發」邏輯（例：鯨豚出現＋高能頻段上升→觸發臨時緩速建議）。
決策與自適應控制：建立「分級響應表」——例：背景聲級達門檻且落於生物敏感時段與區域，即啟動「建議減速、改道、暫停打樁」等情境；每季滾動修訂門檻與權重。

四、監測網佈建與示範區位

近岸帶（0–20 m 等深線）：以港區出入口、航道兩側、鯨豚通過帶、海上風電工程區、保護區邊界為優先。

外海帶（>20 m）：在主航路節點與生物熱點布放長期底錨記錄器；於黑潮受影響海域設背景基準站。

建議首階段站位（示例，可依實測微調）：

北臺灣：基隆外海航道口、臺北港航道、桃園觀音／竹圍外海近岸、外木山—鼻頭角線外緣、龜山島外南北兩點。

中臺灣：臺中港航道口、彰化—雲林外海風場邊界、白海豚保育熱區外圍。

南臺灣：高雄港外航道、恆春外海背景點。

東臺灣：花蓮外海（鯨豚熱點）、成功外海一背景點、綠島蘭嶼之間一背景點。

離島：澎湖東北外、金門小三通航道口、馬祖北竿外。

港內即時微網：港域四象限＋航道口雙站，供「即時引航與緩速」決策看板。

五、與 IOC/WESTPAC/IQOE/PEMSEA 的接軌路徑

資料與標準：由國內 IODE 聯絡點提交資料管理計畫（DMP），聲學資料集採 GOOS「Ocean Sound」EOV 對應欄位；物種紀錄導入 OBIS；區域統計提供 WESTPAC。

區域行動：向 WESTPAC「海洋十年」行動中心登記本專案為 Decade Action（Program/Project/Activity）之一，爭取技術工作坊與區域共享儀器比對。

科學網絡：加入 IQOE 的 OPUS 與全球噪音參考站交流；共同發表「東亞海域 2026–2028 背景聲級基線」。

治理實踐：透過 PEMSEA ICM 架構，把聲環境指標納入沿岸城市 ICM KPI，導入「港灣聲環境管理章程」與「海域工程施工聲學 S.O.P.」。

六、政策與法規工具箱（可逐步導入）

監測與資訊公開：制定「海域環境聲音資料作業要點」，明訂採樣頻率、檔案格式、開放授權、品質控管與倫理。

生態敏感區聲學門檻：依生物熱點分級設季節性門檻；以「建議—引導—管制」階梯式工具（先自律緩速，再進入行政命令）。

工程作業規範：水下打樁與爆破作業需提交「聲學影響評估與緩解計畫」，含時段避讓、氣泡簾、功率管理、停工觸發條件。

港航管理：試行「智慧緩速走廊」（AIS 驅動、可變速限）、「夜間敏感時段緩速」、引航前端看板提示即時音場與建議。

環評與許可：將「水下噪音」納入沿近海工程環評審查清單，建立計畫期中與期後聲學追蹤門檻與補償機制。

七、三年期推動路線圖與里程碑

0–6 個月（啟動）：完成治理架構、站位設計、方法手冊 v1、設備採購與標準校正；設三處港口即時站與六處外海底錨站；提交 IOC/IODE DMP；登錄 WESTPAC/Ocean Decade。

6–18 個月（擴展）：站網擴至港內 8 站、外海 20 站；完成第一版基線地圖與季節性圖層；上傳 OBIS 生物事件紀錄；發布首份「臺灣海域聲環境年報」。

18–36 個月（整合與治理）：導入「智慧緩速走廊」試辦兩港；完成兩案工程聲學 S.O.P. 實證；發布「東亞區域聯合報告」（與 WESTPAC/IQOE 夥伴）；滾動修訂門檻與管理措施並制度化。

八、KPI 與績效衡量

資料面：站點正常運作率 $\geq 90\%$ 、月准時上傳率 $\geq 95\%$ 、跨儀器比對偏差 $\leq \pm 1.5$ dB（100–1000 Hz）。

知識面：年度期刊／技術報告／開放資料集數量、國際共著篇數、方法手冊修訂版次。

治理面：緩速依從率、港區背景聲級中位數下降幅度、工程作業停工觸發次數與避讓成效、敏感區生物事件干擾指標下降趨勢。

社會面：公開儀表板瀏覽量、利害關係人滿意度、地方政府採納的管理條款數。

九、預算級距與採購策略（概估、可細化）

設備：固定記錄器（含水聽器與外殼）每站 25–40 萬新臺幣；即時站（含電力與通訊）每站 120–200 萬；校正與比對服務每年 150–300 萬；維運船期與回收布放每年 300–600 萬（依艦期）。

平台與人力：資料湖與 API 平臺建置 300–600 萬；AI 與模型研發每年 300–800 萬；專職資料工程與聲學分析人力 4–8 名。

策略：採「核心自有+合作共測」模式，與學研單位共用儀器艙體與船期，降低 CAPEX；關鍵儀器採雙品牌交叉驗證。

十、風險與應對

儀器遺失／擾動：加裝釋放器與備援錨具、站位冗餘；與漁會協調布放資訊。

資料不一致：制定嚴格 QC/QA 流程與年度比對；保留原始檔與處理紀錄。

國際接軌落差：由 IODE 聯絡點定期稽核欄位；設國內資料標準委員會半年審視。

利害關係人阻力：先推「自律緩速+獎勵靠泊費」方案，循序導入強制化；設公開儀表板提高透明度。

十一、示範工作包（可立刻開跑）

WP1 方法手冊與校正：完成 v1.0 手冊、三校點交叉比對報告。

WP2 港灣聲場即時儀表板：以兩港為示範，整合 AIS 航跡、即時聲級、建議緩速提示。

WP3 鯨豚熱點保育：於花蓮外海與龜山島外導入敏感期門檻與臨時避讓建議，評估行為干擾下降幅度。

WP4 工程聲學 SOP：在一處近岸打樁工程導入「預測—監測—緩解—停工」閉環流程並公開報告。

WP5 區域合作輸出：與 WESTPAC/IQOE 夥伴共同發表「西太平洋近岸聲環境基線（第一版）」。

十二、給桃園市的加值應用

桃園外海與臺北港南口是北臺灣航路要道，建議以「港灣聲環境管理」為切入：在港域與航道口建置即時站，結合你們已熟悉的智慧監測、資料儀表板與自適應治理語法，將陸域「靜桃計畫」經驗外溢到近岸海域；並把「聲景」納入海

岸活動、濱海觀光與生態教育的展示內容，形成城市品牌的海陸一體「安靜治理」示範。

技術標準和設備共享促進了研究能力的全球擴散。先進的水下聲學監測設備成本高昂，許多研究機構難以獨立購置全套設備。設備共享和技術轉移機制使得資源得到更有效的利用。國際合作項目經常包含設備採購和技術培訓的內容，幫助合作夥伴建立自主的研究能力[54]。

跨學科融合是現代水下噪音研究的重要特徵。傳統的學科邊界正在模糊，新的交叉學科正在興起。生物聲學（bioacoustics）融合了生物學和聲學，研究生物的聲音產生、接收、以及生態功能。環境聲學（environmental acoustics）整合了物理學、環境科學、以及工程學，研究聲音在環境中的傳播和影響。計算生態學（computational ecology）結合了生態學和計算科學，運用大資料和機器學習方法分析生態系統[55]。

開放科學運動正在改變科學研究的組織方式和成果傳播模式。開放存取出版使得研究成果能夠更廣泛地傳播和應用。開放資料政策要求公共資助的研究資料向社會開放。開放源碼軟體和工具促進了技術的共享和合作開發。GitHub、Zenodo 等平台為科學軟體和資料的共享提供了便利的工具[56]。

虛擬研究環境（Virtual Research Environment, VRE）為分散在全球各地的研究者提供了合作平台。雲端運算技術使得研究者能夠遠程存取高性能計算資源和大型資料庫。合作工具如 Slack、Microsoft Teams 支援即時溝通和文檔合作。視訊會議技術使得面對面的研討和討論成為可能，降低了國際合作的成本和門檻[57]。

7.2.2 產業界與學術界合作 Industry-Academia Partnerships

產業界與學術界合作代表了水下噪音領域創新發展的重要驅動力，這種合作模式有效整合了學術界的基礎研究能力和產業界的技術開發、製造、應用能力，形成了從基礎科學到技術創新再到產業化應用的完整創新鏈條。在全球海洋經濟快速發展和環境保護要求日益嚴格的背景下，產學合作已成為推動水下噪音技術進步和產業升級的關鍵機制[58]。

船舶工業與海洋工程研究機構的合作是產學合作的重要領域。全球主要船舶製造企業如現代重工(Hyundai Heavy Industries)、三星重工(Samsung Heavy Industries)、中國船舶集團(China State Shipbuilding Corporation)、芬坎蒂尼集團(Fincantieri – Cantieri Navali Italiani S.p.A.)等都與知名海洋工程研究院建立了長

期合作關係。這些合作主要集中在低噪音船舶設計、先進推進系統、振動噪音控制等技術領域。韓國現代重工與首爾大學海洋工程系合作開發的新型螺旋槳設計，透過最佳化葉片形狀和表面處理技術，將船舶輻射噪音降低了 3-5dB。三星重工與韓國海洋科學技術院(Korea Institute of Ocean Science and Technology)聯合開發的液化天然氣運輸船，採用了先進的氣泡減阻和噪音控制技術[59]。

海洋監測設備製造業與海洋科學研究機構的合作推動了監測技術的快速發展。國際知名的海洋聲學設備製造商如 Teledyne Marine、Kongsberg Maritime、L3Harris Technologies 等與各國海洋研究機構建立了密切的合作關係。這些合作不僅促進了設備技術的改進，也為科學研究提供了先進的技術支撐。挪威 Kongsberg 公司與挪威海洋研究所 (Institute of Marine Research, IMR) 合作開發的多波束聲納系統，整合了先進的信號處理和人工智慧技術，大幅提升了海底地形測量和魚類資源評估的精度[60]。

海洋工程公司與環境科學研究機構的合作在海洋工程環境友善技術開發中發揮重要作用。荷蘭 Van Oord 公司(Van Oord Dredging and Marine Contractors B.V.)與代爾夫特理工大學(Delft University of Technology)合作開發的新型疏浚技術，透過最佳化疏浚船的操作參數和軌跡規劃，將疏浚作業的噪音影響降低了 40% 以上。丹麥沃旭能源公司 Ørsted 公司(DONG Energy (Danish Oil and Natural Gas))與丹麥技術大學(Technical University of Denmark)合作開發的海上風機安裝技術，採用了振動打樁和氣泡減噪技術，顯著降低了施工期間的水下噪音[61]。

資訊技術企業與海洋科學研究機構的合作推動了海洋資訊技術的創新發展。微軟與美國國家海洋和大氣管理局 (NOAA) 合作開發的 AI for Earth 海洋專案，運用雲端運算和人工智慧技術分析海洋聲學大資料。Google 與加州大學聖地牙哥分校斯克里普斯海洋研究所 (Scripps Institution of Oceanography, SIO / Scripps Oceanography) 合作開發的海洋聲學分析平台，為全球研究者提供了強大的資料分析工具[62]。

合作研發是產學合作的核心內容，通常採用聯合實驗室、技術中心、或研發聯盟的組織形式。這些合作機制整合了雙方的人才、設備、資金等資源，形成了強大的研發能力。德國不來梅大學 (University of Bremen) 與德國海洋技術公司 Atlas Elektronik 建立的海洋聲學聯合實驗室，專注於軍用和民用聲納技術的研發。英國南安普敦大學 (University of Southampton) 與勞斯萊斯公司 (Rolls-Royce) 合作建立的海洋推進技術中心，致力於開發新一代低噪音船舶推進系統[63]。

技術轉移是產學合作的重要功能，透過專利授權、技術許可、技術諮詢等方式將學術研究成果轉化為產業技術。許多大學建立了技術轉移辦公室，專門負責管理和推廣學術成果的產業化應用。美國麻省理工學院（MIT）的技術許可辦公室管理了大量海洋技術專利，透過許可協議將技術轉移給相關企業。加州大學系統的技術轉移網絡為海洋技術初創企業提供了豐富的技術資源[64]。

人才交流與培訓是產學合作的重要組成部分。許多企業設立了博士後研究職位，吸引優秀的博士畢業生從事應用研究。大學與企業聯合培養研究生，為學生提供理論學習和實踐訓練相結合的教育機會。工程師和科學家的互聘和兼職促進了知識和經驗的雙向流動。挪威科技大學與 Kongsberg 公司建立的人才交流計畫，每年有數十名學生和研究人員參與雙向交流[65]。

標準制定合作推動了行業技術標準的完善和統一。企業與學術機構聯合參與國際標準組織的標準制定工作，將最新的研究成果和技術發展納入標準規範。國際電工委員會（IEC）第 87 技術委員會（水下聲學）的標準制定就是產學合作的典型例子，來自大學、研究院、企業的專家共同參與標準的研討和制定[66]。

創新創業生態系統為產學合作提供了重要支撐。許多國家和地區建立了海洋科技園區、孵化器、加速器等創新創業平台，支援海洋技術企業的創立和發展。美國麻省理工學院周邊的劍橋創新區集聚了大量海洋技術初創企業。

挪威特隆赫姆(Trondheim)的海洋技術聚落非常重視海洋自主技術（autonomous ocean systems）：無人水下載具（AUV / UUV / ROV）、自主船（autonomous vessels）、海上感測系統與數據平台。Ocean Autonomy Cluster 藉由連結研發機構、企業與政府資金，推動這方面的創新與實驗。Norwegian Ocean Technology Centre 這是一座目前正在建設中的海洋科技設施，位於特隆赫姆 Tyholt 區域，規模約 49,000 平方公尺，將設置濕實驗室、乾實驗室、海池、製造工坊、測試水池最高至 25 公尺深等設施。它被視為該區域未來的技術樞紐與「海洋知識中心」。整合了 NTNU（挪威科技大學）與 SINTEF 等研究機構的集聚，Trondheim 擁有豐富的研發能量、人才資源與學術技術背書。企業與實驗室更可利用現有的測試設施、資源共享、人才輸出與創業支援。區域報告指出，該區已經有數十家海洋科技公司、12 個 cluster / network / forum、以及多個測試設施、以及眾多海洋技術企業[67]。

智慧財產權管理是產學合作中的重要議題。合作各方需要明確約定智慧財產權的歸屬、使用、以及收益分配，保護各方的合理利益。許多大學制定了智慧

財產權政策，規範教師和學生參與產學合作的智慧財產權事務。企業也需要建立相應的政策和流程，確保合作中的智慧財產權得到適當保護[68]。

國際產學合作正在成為全球創新網絡的重要組成部分。跨國企業與多國大學建立合作關係，整合全球創新資源。政府間的科技合作協定為國際產學合作提供了政策支援。歐盟的 Horizon Europe 計畫、美國的國際科技合作項目、日本的戰略性國際科技合作等都積極推動國際產學合作[69]。

7.2.3 國際組織與政府間合作 International Organizations and Intergovernmental Cooperation

國際組織與政府間合作構成了全球水下噪音治理體系的制度基礎和協調機制，透過建立共同的規範、標準、以及行動框架，促進各國在水下噪音管理方面的政策協調和行動同步。這種多邊合作機制對於解決跨國界的海洋環境問題具有不可替代的作用，特別是在公海和專屬經濟區交界地帶，單一國家的管理權限有限，需要透過國際合作實現有效治理[70]。

聯合國系統在全球海洋治理中發揮核心作用，其下屬的多個專門機構和計畫都與水下噪音治理密切相關。聯合國教科文組織政府間海洋學委員會（IOC-UNESCO）負責協調全球海洋科學研究和觀測活動，其海洋聲學工作組制定了水下噪音監測的技術指南和最佳實務。聯合國環境規劃署（UNEP）的區域海洋計畫為不同海域的環境保護提供了區域性合作框架。聯合國海洋科學促進永續發展十年（2021-2030）將水下噪音減緩列為重要的行動領域[71]。

國際海事組織（IMO）在船舶噪音管理方面發揮主導作用。2014 年，IMO 通過了《減少商船水下噪音以解決海洋生物不良影響的指導方針》，這是首個國際性的船舶噪音減緩技術指南。雖然該指南不具有法律約束力，但為各國制定國內法規和企業採用最佳實務提供了重要參考。IMO 海洋環境保護委員會（MEPC）持續討論將水下噪音納入 MARPOL 公約的可能性，這將使船舶噪音管理具有強制性的國際法律效力[72]。

區域海洋組織為特定海域的水下噪音治理提供了更加具體和有針對性的合作平台。歐盟海洋策略框架指令（MSFD）建立了歐洲海域水下噪音管理的法律框架，要求成員國制定國家行動計畫實現良好環境狀態。北極理事會的海洋環境保護工作組關注北極海域噪音對海洋哺乳動物的影響。東南亞國家聯盟（ASEAN）的海洋合作機制開始關注區域內快速發展的海運業對海洋環境的影響[73]。

雙邊海洋合作協定為鄰國之間的水下噪音管理提供了直接的合作機制。美

國與加拿大的海洋環境合作涵蓋了跨境海域的噪音監測和管理。歐盟成員國之間的雙邊合作補充了區域性的 MSFD 框架。日本與韓國、中國之間的海洋環境合作也開始關注水下噪音問題。這些雙邊合作通常更加靈活，能夠針對具體問題制定專門的解決方案[74]。

科學諮詢機制是國際合作中的重要組成部分，為政策制定提供科學依據和技術支援。國際捕鯨委員會（IWC）的科學委員會長期關注人類活動噪音對鯨豚的影響。國際海洋探勘理事會（ICES）為北大西洋和鄰近海域的海洋環境評估提供科學建議。這些機構匯聚了全球頂尖的海洋科學專家，為政策制定提供最新的科學認知和技術分析[75]。

資料和資訊共享是國際合作的基礎功能。全球海洋觀測系統（GOOS）建立了統一的資料管理和共享標準，支援各國海洋監測資料的互聯互通。海洋生物地理資訊系統（OBIS）為海洋生物分布資料的全球共享提供了平台。這些系統使得各國能夠共享海洋環境資訊，支援跨國界的環境評估和管理決策[76]。

能力建設合作幫助發展中國家提升水下噪音管理能力。許多發展中國家缺乏必要的技術能力、人才儲備、以及資金資源來有效管理水下噪音。發達國家透過技術援助、人才培訓、設備提供等方式幫助發展中國家建設管理能力。聯合國開發計畫署（UNDP）、世界銀行等國際發展機構也支援相關的能力建設項目[77]。

標準和規範的協調統一是國際合作的重要目標。不同國家的技術標準和管理規範存在差異，這可能導致貿易壁壘和管理效率低下。國際標準化組織（ISO）、國際電工委員會（IEC）等標準制定機構推動水下噪音相關標準的國際統一。這些標準為各國法規制定、設備製造、監測方法等提供了統一的技術規範[78]。

區域性海洋保護網絡的建設實現了國際合作在實際保護行動中的應用。聯合國教科文組織的世界遺產海洋計畫、濕地公約的國際重要濕地網絡、生物多樣性公約的海洋保護區網絡等都包含了對水下噪音的管理要求。這些網絡透過統一的保護標準和管理協議，實現了跨國界保護區的協調管理[79]。

緊急應變合作機制處理突發性的水下噪音事件和海洋環境事故。國際海事組織建立了海上污染應變合作機制，雖然主要針對油污染，但也可擴展到噪音污染事件。區域性的海洋應變合作協定為緊急情況下的快速響應和資源調動提供了制度保障。這些機制確保在發生重大噪音污染事件時，相關國家能夠迅速協調行動[80]。

7.3 水下噪音治理與永續發展 Underwater Noise Governance and SDGs

水下噪音治理與永續發展目標（SDGs）的整合代表了全球海洋環境管理理念的重大轉變，從單純的環境保護擴展到經濟、社會、環境三重底線的平衡發展。聯合國 2030 年永續發展議程為全球水下噪音治理提供了綜合性的目標框架和行動指南，特別是 SDG 14「保護和永續利用海洋與海洋資源促進永續發展」直接關聯到水下噪音管理的各個方面。這種整合性方法要求在制定和實施水下噪音政策時，不僅要考慮環境效益，還要統籌考慮經濟發展和社會公正等多重目標[81]。

SDG 14 的具體目標中，多項與水下噪音治理直接相關。目標 14.1 要求到 2025 年顯著減少包括噪音污染在內的各種海洋污染；目標 14.2 要求透過加強抗災能力等方式永續管理和保護海洋生態系統；目標 14.a 強調增加科學知識、發展研究能力和轉讓海洋技術；目標 14.c 要求透過執行國際法加強海洋保護。這些目標為水下噪音治理提供了明確的方向和量化指標，推動各國將水下噪音管理納入國家永續發展戰略[82]。

水下噪音治理與其他 SDGs 之間也存在重要的協同關係和潛在衝突，需要透過整合性政策設計來實現多目標的協調發展。SDG 8「促進持續、包容和永續的經濟增長」與海洋經濟發展密切相關，但經濟活動的增長可能帶來更多的水下噪音。SDG 9「建造具備抗災能力的基礎設施」要求發展綠色技術和清潔產業，為低噪音海洋技術發展提供了政策支援。SDG 13「氣候行動」與海洋環境變化相互關聯，氣候變化改變了海洋聲環境基線，同時海洋噪音管理也需要考慮氣候適應策略[83]。

7.3.1 海洋健康與生態系統服務 Ocean Health and Ecosystem Services

現在大家在處理水下噪音時，關注的不只是『減少噪音』這件事，而是把重點放在維護海洋的健康和整個生態系統的平衡，這是一種從傳統污染防治轉向生態保育的新觀念。海洋生態系統為人類社會提供了豐富的服務功能，包括供給服務（如漁業資源、海洋能源）、調節服務（如氣候調節、碳匯功能）、文化服務（如休閒旅遊、精神價值）、以及支撐服務（如營養循環、棲地提供）。水下噪音作為新興的海洋壓力因子，正在對這些服務功能產生日益顯著的影響，威脅海洋生態系統的健康和永續性[84]。

海洋聲環境是海洋生態系統的重要組成部分，被稱為「海洋的聲景」(marine soundscape)。健康的海洋聲景由生物聲音（如魚類發聲、鯨豚通訊）、地球物理

聲音（如風浪聲、地震聲）、以及適度的人類活動聲音組成。水下噪音污染改變了自然聲景的組成和結構，對海洋生物的生存、繁殖、遷徙、覓食等基本生活活動產生干擾。科學研究顯示，慢性噪音暴露可能導致海洋哺乳動物的聽力損傷、壓力反應增加、免疫功能下降等生理影響，進而影響個體適合度(Individual fitness，指的是在生態學或演化生物學中，指個體在特定環境下存活與繁殖的能力，通常用來衡量其基因對下一代的貢獻程度)和族群動力學(Population dynamics，指的是族群數量、年齡結構、分布等在時間上的變化過程與機制，例如出生率、死亡率、遷入遷出等因素的交互作用)[85]。

生態系統服務(Ecosystem services 指的是人類從自然生態系統中獲得的各種利益，例如淨化空氣與水、調節氣候、提供食物與原料、以及文化與休閒價值)評估為水下噪音管理提供了經濟學分析框架，使得環境保護的價值能夠用經濟術語表達，促進政策制定者和利害關係人更好地理解噪音管理的重要性。

海洋漁業是最直接受到噪音影響的生態系統服務，噪音干擾可能影響魚類的繁殖、攝食、洄游行為，進而影響漁業產量和品質。挪威的研究顯示，地震勘探活動可能導致區域漁業產量下降 10-50%，經濟損失達數百萬美元。類似的研究在北海、東海、墨西哥灣等海域都發現了噪音對漁業的負面影響[86]。

海洋旅遊業，特別是鯨豚觀賞業，也受到水下噪音的顯著影響。噪音污染可能改變鯨豚的分布模式和行為，降低觀賞成功率和體驗品質。加拿大的研究估算，如果能夠有效控制船舶噪音，聖勞倫斯灣的鯨魚觀賞業年收入可增加 20-30%。澳洲的大堡礁海洋公園透過實施船舶噪音管制，保護了重要的海洋旅遊資源，每年為當地經濟貢獻超過 60 億澳元[87]。

海洋碳匯(ocean carbon sink 就是指海洋透過物理、化學與生物過程吸收與儲存大氣中二氧化碳的能力)功能是另一個可能受到噪音影響的重要生態系統服務。海洋生物在碳循環中發揮重要作用，特別是大型海洋動物透過垂直遷移將表層的碳輸送到深海。噪音干擾可能改變這些動物的行為模式，進而影響海洋的碳儲存能力。雖然這方面的研究尚處於初期階段，但已有模型研究顯示，大規模的行為改變可能對海洋碳循環產生可測量的影響[88]。

全球碳循環與氣候治理中常見的「碳」範疇主要還包括以下幾類：)

類別名稱	英文名稱	主要來源／機制	性質	典型範例
綠碳	Green Carbon	森林、草原、濕地光合作用	自然碳匯	雨林、草原、農地
藍碳	Blue Carbon	海岸與海洋生態系吸收	自然碳匯	紅樹林、海草床、鹽沼
棕碳	Brown Carbon	生質燃燒產生有機氣膠	暖化因子	木柴燃燒、森林火災

類別名稱	英文名稱	主要來源／機制	性質	典型範例
黑碳	Black Carbon	燃料不完全燃燒產生微粒	暖化因子／污染源	柴油排放、煙霧
灰碳	Grey Carbon	工業製程與建築隱含排放	排放源	水泥、鋼鐵、製造業
白碳	White Carbon	工程碳捕捉與封存技術	人工碳匯	DAC、礦物封存

生物多樣性保護是海洋健康的核心指標，也是多項國際公約和國家政策的重要目標。《生物多樣性公約》要求各國保護海洋生物多樣性，特別是瀕危物種和關鍵棲地。水下噪音被認為是威脅海洋生物多樣性的新興壓力因子，特別是對聲音依賴性強的物種，如鯨豚、海豹、魚類等。國際自然保護聯盟（IUCN）在其瀕危物種紅色名錄評估中，已開始將噪音污染列為威脅因子之一[89]。

棲地品質維護是生態系統健康的基礎要求。海洋保護區的設立和管理需要考慮聲環境品質，確保保護區內的聲環境能夠支撐目標物種的正常生活活動。美國國家海洋保護區系統制定了聲環境管理指南，要求各保護區評估和監測聲環境狀況，制定相應的管理措施。歐盟的 Natura 2000 海洋保護區網絡也將噪音管理納入管理計畫[90]。

生態系統抗災能力（resilience）是現代保護生物學的核心概念，描述生態系統面對干擾時的承受能力和恢復能力。氣候變化、海洋酸化、污染等多重壓力正在降低海洋生態系統的抗災能力，水下噪音作為額外的壓力因子，可能進一步削弱生態系統的適應能力。累積影響評估成為現代環境管理的重要工具，需要綜合考慮各種人為壓力的相互作用和協同效應[91]。

基於自然的解決方案（Nature-based Solutions, NbS）是指透過保護、永續管理與恢復自然或人為改變的生態系統，來有效應對社會挑戰，並同時增進人類福祉與生物多樣性。為水下噪音管理提供了創新思路。例如，恢復海草床和珊瑚礁可以改變海底地形和聲學特性，影響噪音的傳播和反射。建設人工魚礁時考慮聲學設計，可以為魚類提供庇護所。這些方法將生態恢復與噪音管理相結合，實現多重環境效益[92]。即評估場域中主要噪音（航運、施工、風機、水下工程設備等）的頻率與入射方向，利用幾何、材料與布局讓噪音在魚礁內部被散射、衰減與頻帶重塑，形成較低且穩定的聲場，既不過度安靜到影響魚類溝通，也能減少壓力與干擾。以下從原理到做法、監測與風險管控，完整說明。

一、聲學設計原理

多數近岸魚類的敏感頻率約落在 50–1,000 Hz（鼓魚、鱸科等常在 100–500 Hz 有溝通訊號），而船噪、開挖與槳葉噪音常集中在 10–500 Hz。設計上希望對

這些頻帶提供「定向遮蔽+頻帶衰減」。水下聲傳以折射、散射與吸收為主，固體結構的聲阻抗與孔隙度、內腔幾何，會決定反射與耗散比例。具有多尺度空腔與曲面通道的魚礁，可讓聲波在短路徑內多次反射、相位干涉與黏滯耗散，提升目標頻帶的傳輸損失（Transmission Loss, TL）。

二、結構與材料設計

幾何上，採用「群落式—迷宮型」單元：外層以厚壁多面體或拱型殼體抵擋低頻直達波；中層布置交錯肋梁與轉角折返，增加多次散射；核心區配置不同體積比的空腔與頸部通道，形成類 Helmholtz 共鳴器(組)，分別對 100–300 Hz 與 300–800 Hz 產生寬頻衰減。外表面避免大面積光滑平板，改用粗糙紋理、肋狀與孔洞群，提升瑞利散射與邊界層耗散。材料上可用高密度微孔混凝土、礦渣骨材或天然岩塊組合，兼顧聲阻抗差與微孔吸收；少量嵌入高損耗彈性層（如橡膠再生料）可抑制結構傳聲。孔隙率以 30–45% 為常見生態棲孔目標，聲學上可再在特定方向增加頸口狹窄的「消聲孔」以抑制特定頻帶。尺寸分佈建議採「多尺度階層」：小孔（5–10 cm）供幼魚庇護兼高頻散射，中孔（15–30 cm）兼顧中頻，較大腔體（>50 cm）與折返通道主控低頻耗散。

三、定向與場域布局

先做噪音羅盤（Noise Rose）：在場址以水聽器量測 24–72 小時，取得主要噪音入射方向與頻譜。將魚礁外殼的「實體面」對準高能噪音方向（如主要航道），「開孔面」朝向相對安靜且具迴游路徑或覓食區的一側。群落化布置時，以「前哨屏障礁」（上游側、密實低孔隙）+「核心棲地礁」（中區、多孔迷宮）+「後場緩衝礁」（下游側、混合孔徑）形成聲學梯度。群與群之間留足通水與迴游廊道（ $\geq 2-3$ 倍單體尺度），避免形成大尺度聲學陷阱與流體停滯。水深選擇上，若場域有明顯聲速剖面（熱躍層），可將核心區放在低背景噪音的水層；底質若是軟泥，會吸收部分低頻，有利於屏蔽，但需防止沉陷影響幾何。

四、頻帶調諧與簡易估算

以目標抑制頻帶為中心，調整「腔體體積—頸部長度—開口截面」比值，讓共鳴頻率落在干擾峰值上，但 Q 值不宜過高，避免過度窄頻。實務可在原型試件水槽測試功率譜密度（PSD）與插入損失（IL）；現地可用簡化模型（如 PE 方程/射線 BELLHOP）先估方位性 TL，再以實測校正。工程上以在核心區達到 5–10 dB（100–500 Hz）的等效插入損失為務實目標，已能顯著降低壓力與遮蔽效應，同時保留生物溝通可用頻帶。

五、生態與行為兼容

聲學庇護(人工魚礁)不是「越安靜越好」。需核對標的魚種的聽覺靈敏度與求偶/群聚「合唱」頻帶，避免把關鍵溝通信號也一併削弱。可透過在內部保留「聲窗」(對準產卵場或覓食場的開口)維持溝通與定向線索；夜間合唱魚種區域，避免將主抑制頻帶設定在其合唱主峰。另須檢核掠食者策略，避免形成「聲學陷阱」(掠食魚利用低噪場伏擊)。多孔隙與視覺遮蔽共同設計可降低此風險。

「人工魚礁聲學設計 (Artificial Reef with Acoustic Refuge Design)」是一項結合海洋工程、聲學、生態學與環境保育的新興跨域技術，其核心目標是在建造人工魚礁的同時，透過聲學設計手段，為魚類創造可避開人為噪音干擾的「聲學庇護所 (acoustic refuge)」，達到「棲地保育」與「噪音調適」雙重功能。以下從技術原理、設計重點、應用價值與國際趨勢四個面向說明：

一、技術原理 (Technical Principle)

水下聲音傳遞與空氣不同，會受密度、溫度、鹽度與結構介質影響。人工魚礁若能以聲學觀點設計，便能改變聲波在局部水域的傳播路徑與能量分佈。

具體而言，此技術透過以下聲學原理來實現庇護效果：

- (一) 聲能散射 (Scattering)：魚礁外表的粗糙紋理與多孔結構可使噪音波多次反射與分散，降低直達聲能。
- (二) 聲波吸收 (Absorption)：使用多孔混凝土、再生骨材或橡膠阻尼層，提升能量耗散率。
- (三) 共鳴調諧 (Resonant Tuning)：在礁體內設計不同尺寸的空腔與頸部通道，形成**Helmholtz 共鳴器 (Helmholtz resonator)**效應，有效削減特定頻率 (如 100–500 Hz) 內的噪音。
- (四) 聲學梯度 (Acoustic Gradient)：透過多層礁體佈局，使外層抵擋噪音、中層擴散能量、內層形成穩定的低噪環境。

這樣的結構能讓魚群在高噪音區域中找到相對安靜的聲場區域，不僅降低壓力與逃避反應，也有助於繁殖、溝通及群聚行為的恢復。

二、設計重點 (Key Design Elements)

- (一) 頻帶目標化：根據目標魚種的聽覺敏感頻率 (多集中在 50–1,000 Hz)，針對性設計共鳴與散射結構。
- (二) 多尺度孔隙結構：小孔 (5–10 公分) 可散射高頻噪音，中孔 (15–30 公分) 可衰減中頻，大腔體 (>50 公分) 針對低頻抑制。

- (三) 群落化布局：採「屏障礁—核心礁—緩衝礁」三級配置，外層防護、中層過濾、內層安靜。
- (四) 材料組合：結合微孔混凝土、天然岩塊與彈性材料，達到結構強度與聲能損耗兼顧。
- (五) 環境整合：需依水深、底質與主噪音方向（如航道或風機區）調整放置方位。

三、應用價值（Environmental & Engineering Value）

- (一) 降低水下噪音衝擊：可減少船舶、施工、風場或能源設施的低頻噪音傳入，降低魚類壓力反應與覓食干擾。
- (二) 恢復生態多樣性：穩定的聲環境可促進魚群回流與產卵，形成可持續的人工棲地。
- (三) 支援藍碳政策：健康的海草床與魚礁系統有助於碳固定，屬於 Blue Carbon Sink（藍碳匯）體系的一環。
- (四) 兼具環境教育與示範效益：可作為「海洋聲景保育」與「噪音減量工程」的示範案例，推動自然解決方案（Nature-based Solutions, NbS）。

四、國際趨勢與技術發展（Global Trend & Innovation）

- (一) 歐盟與挪威：在近海風場周邊設置「多功能魚礁（multi-functional reefs）」結合噪音屏障與漁業補償措施。
- (二) 日本與韓國：已試驗在港灣或海上平台下方設置「聲學屏障式魚礁（Acoustic Shield Reefs）」以減輕打樁噪音。
- (三) 澳洲 CSIRO 與荷蘭 Deltares：發展結合 AI 聲景監測與 3D 列印混凝土模組的「智慧魚礁（Smart Reefs）」，可依環境噪音動態自調頻。

生態系統服務付費（Payment for Ecosystem Services, PES）機制為水下噪音管理提供了經濟激勵手段。透過量化噪音減少的生態效益，建立相應的補償或獎勵機制，激勵航運企業、工程公司等採用低噪音技術和操作方式。一些國家開始探索「藍色碳信用」機制，將海洋生態保護行動與碳市場相結合[93]。

7.3.2 海洋經濟永續發展 Sustainable Development of Marine Economy

海洋經濟永續發展是現代海洋治理的核心目標，要求在促進經濟增長的同時，確保海洋環境的長期健康和生態系統服務的持續提供。全球海洋經濟規模龐大且持續增長，根據經濟合作暨發展組織（OECD）的估計，2030 年海洋經濟總產值將達到 3 兆美元，僱用約 4000 萬人。這種快速增長帶來了巨大的環境壓力，

包括水下噪音污染的急劇增加。因此，如何在發展海洋經濟的同時有效管控水下噪音，成為實現海洋永續發展的關鍵挑戰[94]。

藍色經濟（Blue Economy）概念為海洋經濟的永續發展提供了新的理念框架，強調經濟增長與環境保護的協調統一。世界銀行將藍色經濟定義為「永續利用海洋資源促進經濟增長、改善生計和就業，同時維護海洋生態系統健康」。在這個框架下，水下噪音管理不再被視為經濟發展的限制因素，而是促進產業升級和技術創新的驅動力。低噪音技術的開發和應用創造了新的市場機會，推動了綠色海洋技術產業的發展[95]。

航運業是全球貿易的重要支撐，同時也是水下噪音的主要來源。國際海事組織估計，商船貢獻了海洋環境噪音的 80% 以上。航運業的永續發展需要在保持運輸效率和經濟競爭力的前提下，大幅減少環境影響包括噪音排放。這促進了綠色航運技術的創新發展，如低噪音推進系統、智能航線最佳化、生態友善船舶設計等。一些航運公司已開始採用「安靜航行」策略，透過降低航行速度、最佳化航線等方式減少噪音影響，同時也降低了燃料消耗和碳排放[96]。

離岸可再生能源產業是海洋經濟的重要增長點，但其建設和營運過程會產生顯著的水下噪音。全球離岸風電裝機容量快速增長，預計到 2030 年將達到 177 GW。風機安裝過程中的打樁作業產生高強度脈衝噪音，對海洋哺乳動物造成較大影響。產業界與科學界合作開發了多種噪音減緩技術，如氣泡幕系統、隔音套筒、振動打樁等，有效降低了施工噪音。一些國家制定了離岸風電噪音管理標準，要求開發商採用最佳可行技術控制噪音影響[97]。

海洋養殖業是全球食品安全的重要保障，但其發展也面臨水下噪音的挑戰。養殖設備的運轉、投餵系統的操作、以及運輸船隻的活動都會產生噪音。研究顯示，噪音可能影響養殖魚類的攝食、生長、繁殖等行為，進而影響養殖效益。永續養殖技術的發展需要考慮聲環境的影響，開發低噪音養殖設備和管理方式。挪威等海洋養殖先進國家已開始將噪音控制納入養殖場的環境管理計畫[98]。

海洋旅遊業的永續發展需要保護海洋環境的原始性和生物多樣性，這與噪音管理的目標高度一致。過度的船舶交通和水上活動會產生噪音污染，影響海洋生物行為和遊客體驗品質。永續海洋旅遊強調小團體、低衝擊的旅遊方式，採用電動船隻、最佳化參觀路線、限制船隻數量等措施減少噪音影響。一些海洋旅遊目的地建立了「安靜區域」，在特定時段或區域限制機動船隻活動[99]。

港口和物流業的永續發展需要平衡運輸效率和環境保護的需求。現代港口

採用智能化管理系統最佳化船舶進出港調度，減少錨泊等待時間，從而降低累積噪音水準。一些港口投資建設岸電設施，減少船舶在港期間柴油機的使用。綠色港口認證體系將噪音管理納入評估指標，激勵港口採用環境友善技術和管理方式[100]。

海洋礦業是新興的海洋經濟領域，但其環境影響引起廣泛關注。深海採礦作業會產生強烈的機械噪音，可能對深海生態系統造成影響。國際海底管理局正在制定深海採礦環境法規，要求採礦公司評估和管控噪音影響。一些國家暫停或限制深海採礦許可，直到環境影響得到充分評估和有效控制[101]。

循環經濟原理在海洋經濟中的應用為噪音管理提供了新思路。船舶拆解和回收、海洋廢棄物資源化利用、漁業副產品綜合利用等循環經濟模式，不僅減少了資源消耗和廢棄物排放，也降低了相關活動的環境噪音。一些企業開始採用「從搖籃到搖籃」的設計理念，在產品設計階段就考慮全生命週期的環境影響包括噪音影響[102]。

綠色金融為海洋經濟的永續發展提供了重要支撐。藍色債券、綠色貸款、環境社會責任投資等金融工具將環境績效與融資條件掛勾，激勵企業採用環境友善技術包括噪音控制技術。一些國際金融機構制定了海洋項目的環境標準，將噪音管理列為必要條件[103]。

項目	主要內容	永續挑戰	噪音管理與對策	政策與技術發展方向
總體目標	促進海洋經濟增長，同時維護海洋生態健康與生態系統服務。2030 年全球海洋經濟產值預估達 3 兆美元，僱用 4,000 萬人。	經濟成長造成水下噪音、棲地破壞與生物壓力增加。	建立水下噪音監測、環境影響評估及行業分級管制制度。	制定「海洋噪音永續治理策略」及跨部門協調平台。
藍色經濟	強調經濟、社會、環境三重平衡，推動自然為本 (NbS) 與綠色科技。	部分產業仍以高耗能、高干擾方式運作。	將噪音管理納入藍色經濟標準與綠色投融資條件。	建立藍色經濟評估指標（含噪音強度、生態回復力）。
航運業	全球貿易核心產業，噪音占海洋環境噪音 80% 以上。	船舶引擎與螺旋槳噪音干擾鯨豚與魚群。	發展低噪音推進系統、智慧航線、安靜航行策略。	制定「安靜船舶設計指南」與綠色航運認證。
離岸可再生能源	離岸風電裝機量 2030 年達 177 GW。	打樁施工噪音對海洋哺乳動物造成壓力。	使用氣泡幕、隔音套筒、振動打樁技術降低施工噪音。	制定風場噪音監測標準，要求採用最佳可行技術 (BAT)。
海洋養殖業	全球食品安全重要來源。	養殖設備運作與運輸噪音影響魚類行為與生長。	開發低噪音設備與聲環境監控，規劃安靜養殖區。	將聲學管理納入養殖環評與永續認證制度。
海洋旅遊業	高度依賴自然聲景與生態完整性。	過度交通與水上活動造成噪	採電動船、限制航線、設「安靜	推動「低噪音旅遊指引」及聲景

項目	主要內容	永續挑戰	噪音管理與對策	政策與技術發展方向
		音干擾。	區域」減少干擾。	保護區制度。
港口與物流業	港口是海運樞紐與能源節點。	船舶待港、柴油引擎與裝卸設備噪音累積。	採智慧調度系統、岸電供應、低噪設備。	將噪音納入綠色港口評鑑與智慧港口規範。
海洋礦業	深海礦產開發潛力大。	採礦噪音影響深海生物與底棲棲地。	建立噪音影響預測模型與區域禁採制度。	國際海底管理局推動深海噪音環境評與監管機制。
循環經濟	推動廢棄物回收與再利用（船舶拆解、漁業副產品等）。	資源再生流程仍存在能源消耗與機械運作噪音。	採低噪製程與閉環管理，減少能源與運轉時數。	將噪音排放納入生命週期評估（LCA）與產品設計階段。
綠色金融	以藍色債券、綠色貸款與 ESG 投資支持海洋保育。	金融審查對噪音環境要求不足。	將噪音管理納入海洋專案投融資條件。	建立「海洋聲學績效」評分標準作為融資依據。
整體政策建議	建立跨部門「海洋噪音與永續經濟治理平台」。推動低噪科技、人工魚礁聲學庇護技術與智慧監測系統。	缺乏制度化監測與財務誘因。	將聲學永續納入環境教育與藍色經濟政策核心。	強化「淨零轉型×聲學永續」政策整合，落實SDG 14 目標。

7.3.3 社會公正與環境正義 Social Equity and Environmental Justice

社會公正與環境正義是水下噪音治理不可忽視的重要角度，關注不同社會群體在環境利益和環境風險分配中的公平性問題。水下噪音的影響往往具有空間不均等性，沿海社區、原住民族群、以及依賴海洋資源維生的傳統群體可能承受更多的噪音影響，而從海洋經濟發展中獲益的群體則相對較少受到影響。這種不均等分配引發了環境正義的關切，要求在制定和實施水下噪音政策時，必須考慮社會公正和分配正義的原則[104]。

沿海社區往往是水下噪音影響的主要承受者，特別是那些依賴傳統漁業和海洋採集維生的社區。噪音污染可能影響當地魚類資源，降低漁業產量，進而影響社區的經濟收入和食品安全。一些研究發現，噪音對小型漁業的影響可能比對大型商業漁業更大，因為小型漁業通常在近岸區域作業，更容易受到船舶交通和工程活動的影響。這種影響的不均等分配可能加劇社會不平等，需要透過政策干預來保護弱勢群體的利益[105]。

原住民族群的權利保護是環境正義的重要內容。許多原住民社區與海洋環境有著深厚的文化和精神聯繫，海洋不僅是他們的生活資源來源，也是文化認同和傳統知識的重要載體。水下噪音可能影響海洋生物的行為和分布，進而影響原住民的傳統捕獵、採集、以及文化實踐活動。聯合國原住民權利宣言要求在影響原住民傳統領域的開發活動中，必須獲得原住民的自由、事先、知情同意（Free,

Prior, and Informed Consent, FPIC) [106]。

參與權是環境正義的核心要素，要求受影響的社區和群體能夠平等參與環境決策過程。水下噪音管理的決策往往涉及複雜的技術和科學問題，普通公眾可能缺乏必要的專業知識來有效參與。因此，需要建立適當的參與機制，包括資訊公開、公眾諮詢、社區協商、以及技術支援等，確保所有利害關係人都能夠有意義地參與決策過程[107]。

資訊獲取權是參與權的基礎，要求政府和企業向公眾提供及時、準確、易於理解的環境資訊。水下噪音的監測資料、影響評估報告、管理措施等資訊都應當向公眾開放。一些國家制定了環境資訊公開法，要求政府部門和相關企業定期公布環境監測資料。然而，資訊的技術性和複雜性可能限制公眾的理解和利用，需要透過科學普及、資訊可視化等方式提高資訊的可及性[108]。

救濟權保障受到環境損害的個人和社區能夠獲得適當的補償和救濟。水下噪音的影響往往是長期的、累積的，難以建立直接的因果關係，這給損害認定和責任追究帶來挑戰。一些國家建立了環境損害補償基金，為受到環境損害的社區提供經濟補償。集體訴訟機制允許受影響的群體聯合提起訴訟，提高了維權的可行性和效果[109]。

跨代公正是永續發展的核心理念，要求當代的發展不能損害未來世代的環境權益。水下噪音對海洋生態系統的長期影響可能延續數十年甚至更久，影響未來世代享受健康海洋環境的權利。因此，水下噪音管理需要採用預防原則和長期視角，即使在科學不確定性存在的情況下，也要採取預防措施保護海洋環境[110]。

性別視角在環境正義中日益受到關注。在許多社會中，女性在海洋資源利用和環境保護中扮演重要角色，但她們的聲音和需求往往被忽視。一些研究發現，水下噪音對漁業的影響可能對依賴海洋採集維生的女性造成更大的經濟衝擊。因此，水下噪音管理政策需要考慮性別差異，確保女性的需求和關切得到適當關注[111]。

國際環境正義關注全球層面的環境不平等問題。發達國家的海洋經濟活動可能對發展中國家的海洋環境造成跨境影響，而發展中國家往往缺乏足夠的技術和資源來應對這些影響。國際合作和援助機制對於實現全球環境正義具有重要意義。一些國際組織和發達國家提供技術援助和資金支援，幫助發展中國家建設水下噪音監測和管理能力[112]。

7.4 政策建議與推動策略 **Policy Recommendations and Implementation Strategies**

政策建議與推動策略構成了將科學認知轉化為有效治理行動的關鍵橋樑，需要綜合考慮技術可行性、經濟合理性、社會接受度、以及政治可實施性等多重因素。基於當前水下噪音治理的發展現狀和未來趨勢，本節提出了系統性的政策建議和具體的推動策略，旨在為各國政府、國際組織、產業界、以及其他利害關係人提供實務指導[113]。

法律法規框架的完善是水下噪音治理的基礎保障。當前大多數國家缺乏專門的水下噪音法律法規，相關規定散見於海洋環境保護法、海域使用管理法、環境影響評估法等不同法律中，存在覆蓋不全、標準不一、執行不力等問題。建議各國參照歐盟海洋策略框架指令的經驗，制定專門的水下噪音法律法規，建立統一的管理框架和技術標準。法律法規應當涵蓋噪音監測、影響評估、許可、執法監管、損害賠償等各個環節，形成完整的法律制度體系[114]。

7.4.1 法律法規完善建議 **Legal and Regulatory Improvement Recommendations**

法律法規完善建議需要從國際法、國內法、以及執法機制三個層面系統推進，建立覆蓋全面、銜接有序、執行有力的水下噪音法律制度體系。當前全球水下噪音治理面臨法律空白多、標準不統一、執行機制薄弱等問題，需要透過法律創新和制度完善來提供堅實的法治保障[115]。

國際法層面的完善是全球水下噪音治理的根本需求。現有的國際海洋法框架雖然確立了各國保護海洋環境的一般義務，但缺乏針對水下噪音的具體規定。

《聯合國海洋法公約》第 194 條(Article 194 – Measures to prevent, reduce and control pollution of the marine environment)要求各國採取必要措施防止、減少和控制海洋環境污染，各締約國應單獨或共同採取一切必要措施，以防止、減少及控制來自任何來源的海洋污染。這些措施必須符合公約規定，並依各國能力採用「最佳可行手段」(best practicable means)，同時努力協調各自政策，以維護全球海洋環境。但對於噪音是否構成「污染」以及應當採取何種措施並無明確規定。建議透過修訂現有公約或制定新的議定書，明確將水下噪音納入海洋污染的範疇，建立國際統一的噪音管理標準和合作機制[116]。

國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 在船舶噪音管理方面具有主導地位，IMO 是全球航運與海洋環境管理的核心國際機構，負責推動「安全、潔淨與永續的航運」。但現有的指導方針缺乏法律約束力，實施效果

有限。建議將 IMO 的《減少商船水下噪音指導方針》(Guidelines for the Reduction of Underwater Noise from Commercial Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life)升級為強制性規則，納入 MARPOL 公約(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)附件(包括 Annex I 防止油類污染規則 Regulations for the Prevention of Pollution by Oil、Annex II 防止有害液體散裝污染規則 Regulations for the Control of Pollution by Noxious Liquid Substances in Bulk、Annex III 防止有害物質包裝運送污染規則 Prevention of Pollution by Harmful Substances Carried by Sea in Packaged Form、Annex IV 防止船舶污水污染規則 Prevention of Pollution by Sewage from Ships、Annex V 防止船舶垃圾污染規則 Prevention of Pollution by Garbage from Ships、Annex VI 防止船舶空氣污染規則 Prevention of Air Pollution from Ships)或制定新的國際公約。強制性規則應當包括船舶噪音測量標準、新建船舶噪音限值、現有船舶改造要求、港口國監督檢查等內容，建立從設計建造到營運維護的全生命週期管理制度[117]。

區域海洋法律框架為特定海域的水下噪音治理提供了更具針對性的法律基礎。歐洲議會與理事會第 2008/56/EC 號指令——建立海洋環境政策共同行動框架(歐盟海洋策略框架指令)(MSFD, Marine Strategy Framework Directive)是目前最為完善的區域性水下噪音法律框架，為其他區域提供了重要借鑑，該指令於 2008 年 6 月 17 日正式通過，是歐盟海洋環境治理的核心法規，旨在確保歐盟各成員國在 2020 年以前達成「良好海洋環境狀態 (Good Environmental Status, GES)」，並建立一套整合性的海洋環境監測與管理機制。建議其他區域組織如東南亞國家聯盟 (Association of Southeast Asian Nations, ASEAN)、非洲聯盟、美洲國家組織等參考 MSFD 經驗，制定區域性的海洋環境保護指令或公約，將水下噪音管理納入區域合作框架[118]。

立法是水下噪音治理的直接法律依據，需要根據各國的具體情況制定相應的法律法規。建議各國採用「框架法+實施細則」的立法模式，在國家層面制定水下噪音防治法或海洋噪音管理條例，建立基本的法律框架和管理原則，然後由政府部門制定具體的實施細則和技術標準。法律框架應當明確管理體制、職責分工、許可制度、監測要求、執法程序、法律責任等核心要素[119]。

環境影響評估制度的完善是水下噪音事前預防的重要保障。建議將水下噪音影響評估納入海洋工程、港口建設、航道疏浚等涉海項目的環評要求，建立專門的水下噪音評估技術指南和審查標準。評估內容應當包括噪音源識別、傳播模

型、生物影響預測、累積影響評估、防制措施設計等，確保環評結果的科學性和可靠性[120]。

許可制度是水下噪音事中監管的核心機制。建議建立涵蓋高噪音海洋活動的許可制度，包括海上爆破、地震勘探、大型工程施工、軍事演習等。許可條件應當包括噪音限值、監測要求、防制措施、應急預案等，並根據海域環境敏感性和保護目標確定差別化的許可標準。對於敏感海域和保護區，應當實施更加嚴格的許可條件或禁止特定活動[121]。

監測監督制度是水下噪音事中事後監管的重要手段。建議建立國家海洋噪音監測網絡，在重要海域設置固定監測站點，對海洋聲環境進行長期連續監測。監測資料應當向社會公開，接受公眾監督。同時，要求重大噪音源單位建立自主監測制度，定期報告監測結果和環境影響情況[122]。

執法機制是法律法規有效實施的關鍵保障。建議建立專門的海洋環境執法隊伍，配備先進的監測設備和執法裝備，提升執法能力和水準。建立跨部門執法協調機制，整合海事、漁業、環保、軍方等部門的執法資源，避免執法空白和重複執法。完善執法程序和標準，確保執法行為的規範性和有效性[123]。

法律責任制度是懲戒違法行為的重要手段。建議建立完整的法律責任體系，包括行政責任、民事責任、刑事責任。對於違法排放噪音的行為，應當根據情節嚴重程度給予警告、罰款、停產整治、吊銷許可證等行政處罰。對於造成生態損害的，應當承擔生態修復責任和經濟賠償責任。對於情節特別嚴重的，應當追究刑事責任[124]。

國際司法和爭端解決機制為跨國水下噪音糾紛提供救濟途徑。國際海洋法庭、國際法院等司法機構在處理海洋環境爭端方面積累了豐富經驗。建議完善相關程序規則，為水下噪音糾紛的解決提供明確的法律程序。同時，鼓勵透過調解、仲裁等替代性爭端解決機制處理相關糾紛[125]。

法律適用和執行的國際合作機制需要進一步加強。建議建立水下噪音執法的國際合作網絡，包括資訊共享、技術援助、聯合執法、人員培訓等。對於跨國界的噪音污染事件，應當建立快速響應和協調處理機制。加強國際司法協助，支援跨國追責和損害賠償[126]。

7.4.2 技術創新激勵機制 Technology Innovation Incentive Mechanisms

技術創新激勵機制是推動水下噪音治理技術進步的重要政策工具，透過建立有效的激勵和約束機制，引導企業、研究機構、以及個人投入水下噪音減噪技

術的研發和應用。當前水下噪音治理技術發展面臨研發投入不足、市場驅動力弱、技術轉化率低等問題，需要透過政策創新建立多層次、多形式的激勵機制[127]。

財政激勵政策是政府推動技術創新的直接手段，包括研發補貼、稅收優惠、政府採購、創新獎勵等多種形式。建議政府設立專門的水下噪音技術創新基金，支援基礎研究、應用研究、以及產業化開發。對於從事水下噪音減緩技術研發的企業和機構，給予研發費用加計扣除、高新技術企業所得稅減免等稅收優惠。透過政府採購政策，優先採購具有先進噪音控制技術的產品和服務，為新技術創造市場需求[128]。

智慧財產權保護是激勵技術創新的基礎制度。建議完善水下噪音技術相關的專利保護制度，包括發明專利、實用新型專利、外觀設計專利等。對於具有重大創新價值的核心技術，給予更長的保護期限和更強的保護力度。建立專利快速審查通道，縮短專利申請週期。完善專利轉讓和許可機制，促進技術成果的轉化和應用[129]。

技術標準和認證制度為技術創新提供市場准入和競爭優勢。建議建立水下噪音減緩技術的標準體系，包括產品技術標準、測試方法標準、評估指標標準等。對於符合標準要求的產品和技術，給予認證標誌和市場推廣支援。透過標準引領，推動技術水準不斷提升。同時，積極參與國際標準制定，提升國內技術的國際競爭力[130]。

產業孵化和加速機制為技術創新企業提供成長支援。建議建設專業化的海洋技術孵化器和科技園區，為初創企業提供場地、設備、資金、人才、市場等全方位支援。建立天使投資、創業投資、產業投資基金等多層次投融資體系，解決技術創新企業的資金需求。組織技術對接會、投融資路演等活動，促進技術、資金、市場的有效對接[131]。

人才培養和引進政策為技術創新提供智力支撐。建議加強水下聲學、海洋工程、環境科學等相關學科建設，培養專業技術人才。設立人才專項計畫，引進國際高端人才和團隊。完善人才評估和激勵制度，讓科技人員在技術創新中獲得合理回報。支援企業與高校聯合培養研究生，建立產學研一體化的人才培養模式[132]。

國際合作與交流機制促進技術創新的全球化發展。建議建立水下噪音技術創新的國際合作平台，包括聯合研究中心、技術轉移機構、國際標準組織等。支援國內企業和機構參與國際合作項目，學習先進技術和管理經驗。鼓勵外國企業

在國內設立研發中心，引進先進技術和創新理念。透過國際合作，實現技術創新的互利共贏[133]。

市場化激勵機制透過市場力量推動技術創新和應用。建議建立水下噪音減排交易市場，允許企業透過減少噪音排放獲得交易額度，透過市場交易實現成本最小化的總體減排目標。建立綠色金融激勵機制，對採用先進噪音控制技術的企業給予優惠貸款利率和融資條件。完善環境責任保險制度，透過保險費率差別化激勵企業採用先進技術[134]。

開放創新和眾包模式為技術創新提供新的組織方式。建議建立水下噪音技術創新挑戰賽和眾包平台，向全社會徵集創新解決方案。支援開源技術社區的發展，促進技術知識的開放共享。建立創新聯盟和技術聯盟，整合產業鏈上下游的創新資源。透過開放創新，激發全社會的創新活力[135]。

7.4.3 國際合作推進策略 International Cooperation Advancement Strategies

國際合作推進策略是應對水下噪音這一全球性挑戰的必然選擇，需要透過多層次、多形式的國際合作機制，建立全球水下噪音治理的協調框架和行動網絡。海洋的連通性決定了水下噪音問題具有明顯的跨國界特徵，任何單一國家的努力都難以實現有效治理，必須透過國際合作形成合力[136]。

聯合國框架下的全球治理機制是國際合作的重要平台。建議充分利用聯合國海洋科學促進永續發展十年（2021-2030）的機會，將水下噪音治理納入全球海洋行動議程。推動聯合國大會通過關於水下噪音管理的決議，建立政治共識和行動框架。支援聯合國環境規劃署制定全球水下噪音評估報告，提升國際社會對這一問題的認知和重視[137]。

區域海洋組織的合作機制為特定海域提供更具針對性的治理平台。建議推動各區域海洋組織將水下噪音管理納入區域海洋環境保護策略。支援制定區域性的水下噪音管理行動計畫，包括統一的監測標準、資料共享機制、聯合執法程序等。促進不同區域組織之間的經驗交流和最佳實務分享[138]。

雙邊合作機制為鄰國之間提供直接的協調平台。建議在現有的海洋合作協定中增加水下噪音管理的內容，或者簽署專門的水下噪音合作協定。雙邊合作應當重點關注跨境海域的噪音監測、聯合科學研究、技術標準協調、執法資訊共享等方面。對於共享海洋資源的國家，應當建立聯合管理機制，統籌考慮各方的利益和關切[139]。

科技合作與知識共享是國際合作的重要內容。建議建立全球水下噪音科學

研究網絡，整合各國的科研資源和專業知識。支援國際聯合研究項目，特別是跨國界海域的噪音監測和影響評估研究。建立國際水下噪音資料庫和資訊共享平台，促進科學資料和研究成果的開放共享。組織國際學術會議和專業培訓，促進技術交流 and 能力建設[140]。

標準化合作推動技術規範的國際統一。建議加強在國際標準化組織(ISO)、國際電工委員會(IEC)等框架下的合作，制定水下噪音測量、評估、控制的國際標準。推動各國採用統一的技術標準和方法，提高資料的可比性和管理的協調性。支援發展中國家參與國際標準制定，確保標準的全球適用性和公平性[141]。

能力建設合作幫助發展中國家提升治理能力。建議發達國家透過技術援助、資金支援、人員培訓等方式，幫助發展中國家建設水下噪音監測和管理能力。國際組織應當設立專門的能力建設計畫，為發展中國家提供技術指導和財政支援。南南合作機制也應當在水下噪音治理領域發揮更大作用，促進發展中國家之間的經驗分享和互助合作[142]。

產業界國際合作推動技術創新和標準實施。建議建立國際海洋產業聯盟，整合船舶製造、海洋工程、監測設備等相關產業的國際合作。支援跨國企業聯合研發低噪音技術，分享研發成本和市場風險。建立國際技術轉移機制，促進先進技術在全球範圍內的推廣應用。鼓勵企業採用國際最佳實務，提升全球海洋產業的環境績效[143]。

財政機制創新為國際合作提供資金保障。建議建立全球水下噪音治理基金，透過國際捐助、碳稅收入、海洋使用費等多種途徑籌集資金。建立績效導向的資金分配機制，根據各國的治理成效和合作貢獻確定資金分配。支援多邊開發銀行設立專門的藍色債券和綠色貸款產品，為水下噪音治理項目提供優惠融資[144]。

監督評估機制確保國際合作的有效性。建議建立國際水下噪音治理績效評估體系，定期評估各國的政策實施情況和治理成效。建立同行評議機制，透過相互評估促進政策改進和經驗學習。建立公眾監督平台，讓民間組織和公眾參與國際治理的監督和評估。透過透明的監督評估，提升國際合作的公信力和有效性[145]。

參考文獻

- [1] Maccarrone, V., Filiciotto, F., de Vincenzi, G., Mazzola, S., Buscaino, G., & Buffa, G. (2015). An Italian proposal on the monitoring of underwater noise: Relationship between the EU Marine Strategy Framework Directive (MSFD) and marine spatial planning directive (MSP). *Ocean & Coastal Management* , 87, 147-161.
- [2] King, E. A. (2022). Here, there, and everywhere: How the SDGs must include noise pollution in their development challenges. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* , 64(3), 4-16.
- [3] Scott, K. N. (2004). International regulation of undersea noise. *International & Comparative Law Quarterly* , 53(2), 287-323.
- [4] Shankar, A. (2023). Efficient data interpretation and artificial intelligence enabled IoT based smart sensing system. *Artificial Intelligence Review* , 56(8), 8129-8156.
- [5] Theocharidis, T., & Kavallieratou, E. (2025). Underwater communication technologies: A review. *Telecommunication Systems* , 90(1), 123-145.
- [6] Jahanbakht, M., Xiang, W., Hanzo, L., & Azghadi, M. R. (2021). Internet of underwater things and big marine data analytics—a comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* , 23(2), 904-956.
- [7] Allena, M. (2020). Blockchain technology for environmental compliance. *Environmental Law* , 50(4), 1055-1090.
- [8] Lv, Z., Chen, D., Feng, H., Wei, W., & Lv, H. (2022). Artificial intelligence in underwater digital twins sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* , 18(3), 1-27.
- [9] Muppala, M. (2025). Marine Monitoring and Climate Resilience: Artificial Intelligence, IoT, and Sensor Technologies for Marine Monitoring and Climate Resilience. *SSRN Electronic Journal* .
- [10] Song, S., Huangfu, B., Guo, J., Liu, J., Cui, J. H., & Sommer, P. (2025). A Digital Twin-based Intelligent Network Architecture for Underwater Acoustic Sensor Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing* , 24(2), 523-540.
- [11] Ciuccoli, N., Screpanti, L., & Scaradozzi, D. (2024). Underwater simulators analysis for digital twinning. *IEEE Access* , 12, 25730-25748.
- [12] Hasan, A. (2025). Online Parameter Estimation in Digital Twins for Real-Time

- Condition Monitoring. *IEEE Access* , 13, 15234-15248.
- [13] Muthu, B. A., & Cherubini, C. (2025). Underwater Digital Twins Sensor Network-Based Maritime Communication and Monitoring Using EHC-ANFIS. *Preprints* , 2025030709.
- [14] Islam, Y., Das, S. C., & Chowdhury, M. J. U. (2025). The Role, Trends, and Applications of Machine Learning in Undersea Communication: A Bangladesh Perspective. *arXiv preprint arXiv:2503.00669* .
- [15] Howson, P. (2020). Building trust and equity in marine conservation and fisheries supply chain management with blockchain. *Marine Policy* , 115, 103873.
- [16] Alsharabi, N., Ktari, J., Frikha, T., Alayba, A., Zemni, M. A., & Aggoune, E. H. M. (2024). Using blockchain and AI technologies for sustainable, biodiverse, and transparent fisheries of the future. *Journal of Cloud Computing* , 13(1), 45.
- [17] Cordova, M., & Aguirre, K. M. N. (2022). Achieving transparency through blockchain: sustainability of fishery supply chain management. *Revista Eletrônica de Negócios Internacionais* , 17(3), 1-15.
- [18] Wilson, K. L., Tittensor, D. P., Worm, B., & Lotze, H. K. (2020). Incorporating climate change adaptation into marine protected area planning. *Global Change Biology* , 26(6), 3251-3267.
- [19] O'Regan, S. M., Archer, S. K., Friesen, S. K., & Hunter, K. L. (2021). A global assessment of climate change adaptation in marine protected area management plans. *Frontiers in Marine Science* , 8, 711085.
- [20] Musunguzi, B. (2024). Underwater noise and the application of particular sensitive sea areas to limit its impact on marine life: case study on development of underwater noise management for Lake Victoria [Doctoral dissertation, World Maritime University].
- [21] Mariani, A. C. B., Godoy, S. N., & Santos, M. C. O. (2024). The use of Passive Acoustic Monitoring as an auxiliary tool for monitoring Marine Protected Areas. *Ocean and Coastal Research* , 72, e24012.
- [22] Bruno, J. F., Côté, I. M., & Toth, L. T. (2019). Climate change, coral loss, and the curious case of the parrotfish paradigm: why don't marine protected areas improve reef resilience? *Annual Review of Marine Science* , 11, 307-334.

- [23] Bruno, J. F., Bates, A. E., Cacciapaglia, C., Pike, E. P., Amstrup, S. C., van Hooedonk, R., ... & Laffoley, D. (2018). Climate change threatens the world's marine protected areas. *Nature Climate Change* , 8(6), 499-503.
- [24] Tittensor, D. P., Beger, M., Boerder, K., Boyce, D. G., Canales, N. A., Devillers, R., ... & Lotze, H. K. (2019). Integrating climate adaptation and biodiversity conservation in the global ocean. *Science Advances* , 5(11), eaay9969.
- [25] Jolliffe, C., Erbe, C., Juretzek, C., Lewandowski, J., MacGillivray, A., Merchant, N., ... & Zeh, L. (2025). Management of Noise. In *Life in a Noisy Ocean* (pp. 365-397). Springer.
- [26] Thornton, T. F., & Scheer, A. M. (2012). Collaborative engagement of local and traditional knowledge and science in marine environments: a review. *Ecology and Society* , 17(3), 8.
- [27] Degraer, S., Van Lancker, V., Van Dijk, T., Verfaillie, E., & Moerkerke, G. (2019). Interdisciplinary science to support North Sea marine management: lessons learned and future demands. *Hydrobiologia* , 845(1), 1-19.
- [28] Slater, A. M., Irvine, K. N., Byg, A. A., Davies, I. M., Gubbins, M., Kenter, J. O., ... & Scott, B. E. (2020). Integrating stakeholder knowledge through modular cooperative participatory processes for marine spatial planning outcomes (CORPORATES). *Ecosystem Services* , 42, 101082.
- [29] Cammen, K., Marafino, G., Burton, S., Dow, J., Dullaert, E., Gedamke, J., ... & Read, A. J. (2021). Interdisciplinary research collaborative trains students to see through turbulent systems. *Oceanography* , 34(2), 46-57.
- [30] Brodie, S., Addey, C. I., Cvitanovic, C., Dias, B. S., Hamann, M., Mandrup-Poulsen, J., ... & Soares, M. O. (2022). Solving complex ocean challenges through interdisciplinary research: advances from early career marine scientists. *Frontiers in Marine Science* , 9, 913459.
- [31] Macher, C., Steins, N. A., Ballesteros, M., Kraan, M., Lacroix, D., Petter, A., ... & Vasquez, F. (2021). Towards transdisciplinary decision-support processes in fisheries: experiences and recommendations from a multidisciplinary collective of researchers. *Aquatic Living Resources* , 34, 7.
- [32] Nutters, H. M., & da Silva, P. P. (2012). Fishery stakeholder engagement and

- marine spatial planning: Lessons from the Rhode Island Ocean SAMP and the Massachusetts Ocean Management Plan. *Ocean & Coastal Management* , 67, 9-18.
- [33] Alós, J., Aarestrup, K., Abecasis, D., Afonso, P., Andreotti, S., Azzurro, E., ... & Koeck, B. (2022). Toward a decade of ocean science for sustainable development through acoustic animal tracking. *Global Change Biology* , 28(12), 3747-3769.
- [34] Molony, B. W., Ford, A. T., Sequeira, A. M. M., Borja, A., Griffen, B. D., Thiel, M., & Pörtner, H. O. (2022). Sustainable development goal 14-life below water: towards a sustainable ocean. *Frontiers in Marine Science* , 8, 829610.
- [35] Arora, N. K., Mishra, I., & Arora, P. (2023). SDG 14: life below water-viable oceans necessary for a sustainable planet. *Environmental Sustainability* , 6(3), 271-284.
- [36] Vierros, M. (2017). Global marine governance and oceans management for the achievement of SDG 14. *UN Chronicle* , 54(3), 10-15.
- [37] Acharya, J. (2023). Marine pollution and SDG 14 Implementation degree of challenges and combat strategies. *IIRE Journal of Maritime Research and Development* , 7(1), 45-62.
- [38] Bielecka, M. (2024). Soundproofing the oceans: International regulation of underwater noise from shipping activity in the Arctic [Master's thesis, University of Tromsø].
- [39] Reeve, L. L. N. (2012). Of whales and ships: impacts on the great whales of underwater noise pollution from commercial shipping and proposals for regulation under international law. *Ocean & Coastal Law Journal* , 18(2), 101-145.
- [40] Vakili, S. V., Ölcer, A. I., & Ballini, F. (2020). The development of a policy framework to mitigate underwater noise pollution from commercial vessels. *Marine Policy* , 115, 103840.
- [41] Palippui, H. (2024). Environmental Performance of the Shipping Industry: A Case Study of MARPOL Violations. *Collaborate Engineering Daily Book Series* , 1(1), 45-68.
- [42] Maes, F. (2008). The international legal framework for marine spatial planning. *Marine Policy* , 32(5), 797-810.

- [43] Erbe, C., MacGillivray, A., & Williams, R. (2012). Mapping cumulative noise from shipping to inform marine spatial planning. *Journal of the Acoustical Society of America* , 132(5), EL423-EL428.
- [44] Flannery, W., Healy, N., & Luna, M. (2018). Exclusion and non-participation in marine spatial planning. *Marine Policy* , 97, 85-93.
- [45] Gilbert, A. J., Alexander, K., Sardá, R., Brazinskaite, R., Fischer, C., Gee, K., ... & Ice, K. (2015). Marine spatial planning and Good Environmental Status: a perspective on spatial and temporal dimensions. *Ecology and Society* , 20(1), 64.
- [46] Wright, G., Gjerde, K. M., Johnson, D. E., Finkelstein, A., Ferreira, M. A., Dunn, D. C., ... & Halpin, P. N. (2021). Marine spatial planning in areas beyond national jurisdiction. *Marine Policy* , 132, 103384.
- [47] European Commission. (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union* , L164, 19-40.
- [48] Tasker, M. L., Amundin, M., Andre, M., Hawkins, A., Lang, W., Merck, T., ... & Thomsen, F. (2010). Marine Strategy Framework Directive Task Group 11 Report: Underwater noise and other forms of energy. *European Commission Joint Research Centre , JRC Scientific and Technical Reports.*
- [49] International Maritime Organization. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. *MEPC.1/Circ.833* .
- [50] Merchant, N. D. (2019). Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science & Policy* , 92, 116-123.
- [51] Ryabinin, V., Barbière, J., Haugan, P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., ... & Zhao, J. (2019). The UN decade of ocean science for sustainable development. *Frontiers in Marine Science* , 6, 470.
- [52] Caruso, F., Tedesco, P., Della Sala, G., Bou-Cabo, M., Papale, E., Visciano, A., ... & Grammatta, R. (2022). Science and dissemination for the UN ocean decade outcomes: Current trends and future perspectives. *Frontiers in Marine Science* , 9, 863647.

- [53] Guan, S., Qu, F., & Qiao, F. (2023). United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030): From innovation of ocean science to science-based ocean governance. *Frontiers in Marine Science* , 9, 1091598.
- [54] Claudet, J., Bopp, L., Cheung, W. W. L., Devillers, R., Escobar-Briones, E., Haugan, P., ... & Gaill, F. (2020). A roadmap for using the UN decade of ocean science for sustainable development in support of science, policy, and action. *One Earth* , 2(1), 34-42.
- [55] Hetherington, E. D., Anderson, C., Bastian, L., Benway, H. M., Bernal, P. A., Buchanan, P. J., ... & Ziveri, P. (2024). Inspiring the decade: Collaborative action for advancing deep-ocean science and policy in the United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development. *Limnology and Oceanography Bulletin* , 33(3), 95-108.
- [56] Hatje, V., Rayfuse, R., Polejack, P., Goddard, C., Jiang, C., Kershaw, P., ... & Bowes, J. (2024). Ocean Decade Vision 2030 White Papers–Challenge 1: Understand and Beat Marine Pollution. *GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel* .
- [57] Hassoun, A. E. R., Tanhua, T., Lips, I., Heslop, E., Edelist, D., Breathing, M., ... & Ziveri, P. (2024). The European Ocean Observing Community: urgent gaps and recommendations to implement during the UN Ocean Decade. *Frontiers in Marine Science* , 11, 1394984.
- [58] Duarte, C. M., Chapuis, L., Collin, S. P., Costa, D. P., Devassy, R. P., Eguiluz, V. M., ... & Juanes, F. (2021). The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* , 371(6529), eaba4658.
- [59] Richardson, W. J., Greene Jr, C. R., Malme, C. I., & Thomson, D. H. (2013). *Marine mammals and noise* . Academic press.
- [60] Slabbekoorn, H., Bouton, N., van Opzeeland, I., Coers, A., ten Cate, C., & Popper, A. N. (2010). A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends in Ecology & Evolution* , 25(7), 419-427.
- [61] Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., ... & Wootton, J. T. (2015). Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management.

- Ocean & Coastal Management , 115, 17-24.
- [62] Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., & Dooling, R. (2016). Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin* , 103(1-2), 15-38.
- [63] Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* , 395, 5-20.
- [64] Frisk, G. V. (2012). Noiseconomics: The relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends. *Scientific Reports* , 2(1), 437.
- [65] McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., & Wiggins, S. M. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *Journal of the Acoustical Society of America* , 120(2), 711-718.
- [66] Merchant, N. D., Witt, M. J., Blondel, P., Godley, B. J., & Smith, G. H. (2012). Assessing sound exposure from shipping in coastal waters using a single hydrophone and Automatic Identification System (AIS) data. *Marine Pollution Bulletin* , 64(7), 1320-1329.
- [67] Veirs, S., Veirs, V., & Wood, J. D. (2016). Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. *PeerJ* , 4, e1657.
- [68] Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene Jr, C. R., ... & Tyack, P. L. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* , 33(4), 411-521.
- [69] NOAA Fisheries. (2018). 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Department of Commerce, NOAA .
- [70] Dekeling, R. P. A., Tasker, M. L., Van der Graaf, A. J., Ainslie, M. A., Andersson, M. H., André, M., ... & Werner, S. (2014). Monitoring guidance for underwater noise in European seas. *Publications Office of the European Union* .
- [71] Van der Graaf, A. J., Ainslie, M. A., André, M., Breusing, K., Dalen, J., Dekeling, R. P. A., ... & Wynne, K. (2012). European Marine Strategy Framework Directive-Good Environmental Status (MSFD GES): Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy. *European Commission* .

- [72] Tougaard, J., Carstensen, J., Teilmann, J., Skov, H., & Rasmussen, P. (2009). Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena*, L.). *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(1), 11-14.
- [73] Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G., & Thompson, P. M. (2010). Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 60(6), 888-897.
- [74] Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., & Tyack, P. (2006). Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series*, 309, 279-295.
- [75] Nehls, G., Rose, A., Diederichs, A., Bellmann, M., & Pehlke, H. (2016). Noise mitigation during pile driving efficiently reduces disturbance of marine mammals. In *The effects of noise on aquatic life II* (pp. 755-762). Springer.
- [76] Würsig, B., & Richardson, W. J. (2009). Effects of noise on marine mammals. In *Encyclopedia of marine mammals* (pp. 328-333). Academic Press.
- [77] Nowacek, D. P., Thorne, L. H., Johnston, D. W., & Tyack, P. L. (2007). Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Review*, 37(2), 81-115.
- [78] Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., ... & Tyack, P. L. (2019). Marine mammal noise exposure criteria: Updated scientific recommendations for residual hearing effects. *Aquatic Mammals*, 45(2), 125-232.
- [79] New, L. F., Clark, J. S., Costa, D. P., Fleishman, E., Hindell, M. A., Klanjšček, T., ... & Harwood, J. (2014). Using short-term measures of behaviour to estimate long-term fitness of southern elephant seals. *Marine Ecology Progress Series*, 496, 99-108.
- [80] King, S. L., Schick, R. S., Donovan, C., Booth, C. G., Burgman, M., Thomas, L., & Harwood, J. (2015). An interim framework for assessing the population consequences of disturbance. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(10), 1150-1158.
- [81] United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable*

Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015 , A/RES/70/1.

- [82] United Nations. (2017). The Ocean Conference Factsheet: Sustainable Development Goal 14. United Nations Conference to Support the Implementation of Sustainable Development Goal 14 .
- [83] Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M. C., Shyamsundar, P., ... & Noble, I. (2013). Policy: Sustainable development goals for people and planet. *Nature* , 495(7441), 305-307.
- [84] Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis* . Island Press.
- [85] Lusseau, D., Bain, D. E., Williams, R., & Smith, J. C. (2009). Vessel traffic disrupts the foraging behaviour of southern resident killer whales *Orcinus orca* . *Endangered Species Research* , 6(3), 211-221.
- [86] Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., & Soldal, A. V. (1996). Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) . *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* , 53(10), 2238-2249.
- [87] Cisneros-Montemayor, A. M., Sumaila, U. R., Kaschner, K., & Pauly, D. (2010). The global potential for whale watching. *Marine Policy* , 34(6), 1273-1278.
- [88] Roman, J., Estes, J. A., Morissette, L., Smith, C., Costa, D., McCarthy, J., ... & Smetacek, V. (2014). Whales as marine ecosystem engineers. *Frontiers in Ecology and the Environment* , 12(7), 377-385.
- [89] International Union for Conservation of Nature. (2020). *The IUCN Red List of Threatened Species* . Version 2020-3.
- [90] National Marine Protected Areas Center. (2011). *Marine Protected Areas Federal Advisory Committee Science Advisory Panel: Establishing resilient marine protected area networks* . U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- [91] Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* , 319(5865), 948-952.

- [92] Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (2016). Nature-based solutions to address global societal challenges . IUCN.
- [93] Pagiola, S., Arcenas, A., & Platais, G. (2005). Can payments for environmental services help reduce poverty? An exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. *World Development* , 33(2), 237-253.
- [94] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2016). *The Ocean Economy in 2030* . OECD Publishing.
- [95] World Bank. (2017). *What is the Blue Economy?* World Bank Group.
- [96] International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020* . IMO.
- [97] WindEurope. (2020). *Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2019* . WindEurope.
- [98] Food and Agriculture Organization. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020* . FAO.
- [99] United Nations Environment Programme. (2019). *Sustainable Coastal Tourism: A guide for community-based enterprises* . UNEP.
- [100] International Association of Ports and Harbors. (2018). *IAPH Tool Box for Port Clean Air* . IAPH.
- [101] International Seabed Authority. (2019). *Environmental Management Plan for the Clarion-Clipperton Zone* . ISA.
- [102] Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change* . Ellen MacArthur Foundation.
- [103] Climate Bonds Initiative. (2018). *Blue Finance: Current landscape and path forward on sustainable investing in the ocean economy* . Climate Bonds Initiative.
- [104] Schlosberg, D. (2007). *Defining environmental justice: Theories, movements, and nature* . Oxford University Press.
- [105] Cisneros-Montemayor, A. M., Pauly, D., Weatherdon, L. V., & Ota, Y. (2016). A global estimate of seafood consumption by coastal indigenous peoples. *PLoS One* , 11(12), e0166681.
- [106] United Nations. (2007). *United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples* . UN General Assembly Resolution 61/295.

- [107] Aarhus Convention. (1998). Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters . United Nations Economic Commission for Europe.
- [108] Wates, J. (2005). The Aarhus Convention: a driving force for environmental democracy. *Journal for European Environmental & Planning Law* , 2(1), 2-11.
- [109] Sand, P. H. (2012). Compensation for environmental damage from the 1992 International Oil Pollution Compensation Funds to the 2010 HNS Convention. *Environmental Policy and Law* , 42(1), 12-24.
- [110] Gardiner, S. M. (2011). A perfect moral storm: The ethical tragedy of climate change . Oxford University Press.
- [111] Arora-Jonsson, S. (2011). Virtue and vulnerability: Discourses on women, gender and climate change. *Global Environmental Change* , 21(2), 744-751.
- [112] Parks, B. C., & Roberts, J. T. (2006). A climate of injustice: Global inequality, North-South politics, and climate policy . MIT Press.
- [113] Kingdon, J. W. (2014). Agendas, alternatives, and public policies (2nd ed.). Pearson.
- [114] European Commission. (2022). Communication on EU threshold values for continuous underwater ambient noise . COM(2022) 124 final.
- [115] Bodansky, D. (2010). The art and craft of international environmental law . Harvard University Press.
- [116] Freestone, D. (2007). Problems of high seas governance. In *Governing high seas fisheries* (pp. 99-130). Oxford University Press.
- [117] International Maritime Organization. (2021). Resolution MEPC.337(76) - 2021 Guidelines for the reduction of underwater radiated noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life . IMO.
- [118] Association of Southeast Asian Nations. (2018). ASEAN Multi-Sectoral Framework on Climate Change: Agriculture, Fisheries and Forestry towards Food Security . ASEAN Secretariat.
- [119] Verschuuren, J. (2019). The effectiveness of marine environmental law and policy. In *Research handbook on international marine environmental law* (pp. 562-581). Edward Elgar Publishing.

- [120] Boehlert, G. W., & Gill, A. B. (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: A current synthesis. *Oceanography* , 23(2), 68-81.
- [121] Simmonds, M. P., Dolman, S. J., Weilgart, L., Wensveen, P. J., Wright, A. J., May, J., ... & Leaper, R. (2019). From impact assessment to systemic change: Using strategic environmental assessment for sustainable ocean governance under the European Marine Strategy Framework Directive. *Environmental Impact Assessment Review* , 76, 61-71.
- [122] Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good practice guide for underwater noise measurement. National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate .
- [123] Sands, P., & Peel, J. (2018). *Principles of international environmental law* (4th ed.). Cambridge University Press.
- [124] Faure, M. G. (2007). Environmental criminal law in the EU and the US. In *Crime, procedure and evidence in a comparative and international context* (pp. 189-213). Hart Publishing.
- [125] Stephens, T. (2016). *International courts and environmental protection* . Cambridge University Press.
- [126] Burnett, D. R. (2018). The oceans and climate change: Junctures and disjunctures in the law. In *Climate change impacts on ocean and coastal law* (pp. 17-46). Oxford University Press.
- [127] Mazzucato, M. (2018). *The entrepreneurial state: Debunking public vs. private sector myths* (revised ed.). PublicAffairs.
- [128] Rodrik, D. (2014). Green industrial policy. *Oxford Review of Economic Policy* , 30(3), 469-491.
- [129] World Intellectual Property Organization. (2019). *WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence* . WIPO.
- [130] International Organization for Standardization. (2021). *ISO/IEC Directives, Part 1: Consolidated ISO Supplement - Procedures specific to ISO* (8th ed.). ISO.
- [131] Etzkowitz, H., & Zhou, C. (2017). *The triple helix: University-industry-*

- government innovation and entrepreneurship (3rd ed.). Routledge.
- [132] Freeman, R. B. (2006). Does globalization of the scientific/engineering workforce threaten US economic leadership? *Innovation Policy and the Economy* , 6, 123-157.
- [133] Katz, J. S., & Martin, B. R. (1997). What is research collaboration? *Research Policy* , 26(1), 1-18.
- [134] Stavins, R. N. (2001). Experience with market-based environmental policy instruments. *Handbook of Environmental Economics* , 1, 355-435.
- [135] Von Hippel, E. (2005). *Democratizing innovation* . MIT Press.
- [136] Young, O. R. (2017). *Governing complex systems: Social capital for the anthropocene* . MIT Press.
- [137] United Nations General Assembly. (2017). *Our ocean, our future: Call for action* . Resolution A/RES/71/312.
- [138] Mahon, R., Fanning, L., & McConney, P. (2009). A governance perspective on the large marine ecosystem approach. *Marine Policy* , 33(2), 317-321.
- [139] Scovazzi, T. (2018). Maritime boundaries and areas of joint development. In *The law of the sea* (pp. 231-253). Oxford University Press.
- [140] Wagner, C. S., Roessner, J. D., Bobb, K., Klein, J. T., Boyack, K. W., Keyton, J., ... & Börner, K. (2011). Approaches to understanding and measuring interdisciplinary scientific research (IDR): A review of the literature. *Journal of Informetrics* , 5(1), 14-26.
- [141] Blind, K. (2004). *The economics of standards: Theory, evidence, policy* . Edward Elgar Publishing.
- [142] Fukuda-Parr, S., Lopes, C., & Malik, K. (Eds.). (2002). *Capacity for development: New solutions to old problems* . Earthscan.
- [143] Chesbrough, H. W. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology* . Harvard Business Press.
- [144] Sachs, J. D. (2015). *The age of sustainable development* . Columbia University Press.
- [145] Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2011). The regime complex for climate change. *Perspectives on Politics* , 9(1), 7-23.