

第一章 導論

當代環境噪音治理之核心難題，早已不再只是「噪音有沒有超標」這一個問題，而是如何在高度複雜、空間重疊、來源交錯且治理責任分散的都市環境中，準確回答「噪音來自何處、由誰主導、在何種條件下發生，以及應以何種方式被有效治理」。國際制度與研究均已顯示，交通噪音是現代城市最重要且最普遍的環境噪音來源之一。世界衛生組織指出，其《歐洲區域環境噪音指引》之目的，在於根據現有證據提出保護人類健康的建議，涵蓋的主要來源即包括道路交通、鐵路與航空噪音；歐洲環境署則指出，依最新通報資料，超過五分之一的歐洲人口長期暴露於有害的運輸噪音之下，若依較嚴格的健康建議值估計，比例還會更高。這些訊息共同說明，交通噪音並不是零星局部的生活不便，而是與公共健康、都市治理、土地使用、交通規劃與工程設計深度交纏的結構性議題。

然而，儘管國際間對交通噪音之健康風險與治理必要性已有充分共識，現行制度中的量測與判讀邏輯，仍有相當程度停留在以單點、全向、總量為核心的框架之中。ISO 1996-1 所定義的環境噪音評估程序，重視的是基本量之建立、評估程序之統一，以及長期暴露對社區反應的描述；ISO 1996-2 則進一步規範作為環境噪音評估基礎之聲壓位準，可由直接量測或配合計算之外推方式取得。這一制度架構極為重要，因為它奠定了全球環境噪音制度的可比較性與可追溯性，但同時也意味著其核心設計焦點偏向「受體端有多大聲」，而非「音場中有哪些來源、各自貢獻多少、如何在複合場景中加以區辨」。當都市中的道路、高架橋、匝道、鐵道、橋下空間與鄰近建築立面共同形成一個多重反射、多方向傳播的複合音場時，僅憑單點全向性量測，常已不足以支撐精細的治理判斷。

因此，本書所提出之「指向性噪音計」並非單純意指一項新的儀器名稱，而是對現行噪音量測與治理體系提出的一種方法論回應。它試圖處理的，不只是感測器或硬體規格問題，而是更根本的技術與制度問題：當噪音治理從單一來源時代進入複合來源時代，當環境管理從靜態評估進入動態監測，當民眾陳情從單純反映音量大小轉變為要求具體歸責與改善說明時，既有量測制度要如何升級，才能從「測得數值」進一步走向「理解場景、解析來源、支援治理」。這也正是第一章導論必須先行處理的根本問題意識。

1.1 研究背景與問題意識

若從環境治理史的角度來看，噪音一直是最早被納入都市環境管理的污染類型之一，但它與空氣污染或水污染不同之處，在於其高度情境性與感受性。噪音不是一種可被永久留存在某種介質中的污染物，而是一種發生於時間過程、經

由空間傳播並由人體感知所完成的環境現象。也因如此，噪音治理始終具有雙重特徵：一方面它必須建立在可量化、可標準化、可比對的物理量測之上，另一方面它又無可避免地與生活干擾、主觀煩擾、睡眠品質與公平感受密切相連。世界衛生組織明確指出，環境噪音暴露與不良健康結果之間具有相當證據基礎，交通噪音尤其與睡眠干擾、心血管風險及整體福祉下降有關；WHO 亦強調，環境噪音是重要的環境危害之一。這說明噪音問題從來不只是技術問題，而是公共衛生與社會治理問題。

但在交通噪音領域中，真正困難之處並不只在於證明噪音有害，而在於現實世界中的噪音來源往往不再單純。傳統環境噪音研究多半以單一道路、單一鐵道、單一工業源或單一設施為主要研究對象，在此架構下，無論是建立暴露—反應關係、發展噪音地圖，或進行設施設計與改善評估，都相對具有明確邊界。然而，當都市運輸系統日趨立體化、高架化與網絡化後，受體端所接收到的聲音往往來自多條道路、多種運具與多重傳播路徑的交互作用。歐盟《環境噪音指令》之核心任務，在於識別環境噪音暴露、對外公開資訊、預防與降低噪音、並保護原本安靜的區域；這一制度設計本身就隱含一項重要前提：噪音治理要有效，必須先有能力描述複雜的暴露狀態。

問題在於，現行多數法規與實務量測程序，雖然足以描述暴露結果，卻未必足以解析來源結構。美國聯邦公路總署關於交通噪音模型之最佳實務文件指出，TNM 是高速公路交通噪音預測的重要工具，其應用品質高度依賴輸入資料與模型操作正確性；聯邦運輸管理局則在《Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual》中說明，其技術指引旨在支援大眾運輸計畫在不同階段的噪音與振動評估。換句話說，歐美制度已相當成熟地建立了「量測—模型—審查」的基本架構，但這些架構在複合交通走廊、近場重疊暴露及爭議歸責案件中，仍需要更細緻的音源辨識工具來補強。這正是本書研究背景的第一層問題意識：不是否定現行制度，而是指出現行制度在複合性音源情境下的辨識力不足。

第二層問題意識，來自工程改善與行政說理之間的落差。噪音治理並非只在於量出一個超標值，後續還必須回答要改善什麼、由誰負責改善、改善後如何驗證，以及在行政程序中如何說明判斷依據。若某住宅同時受到高架道路、平面道路與鄰近軌道運輸影響，即便受體端量測數值清楚，改善責任與優先順序仍可能不清楚。此時，若仍完全依賴單一全向性測值，不僅難以支持精準工程診斷，也容易在民眾陳情、跨機關協調與政策審查過程中產生爭議。這便形成第三層問題意識：現代噪音治理需要的不只是法規量測值，還需要具有空間辨識力與來源說明力的輔助證據鏈。

1.2 指向性噪音計之定義、範圍與技術定位

在進入本書的技術與制度討論之前，必須先釐清「指向性噪音計」一詞的概念邊界。就嚴格的國際標準用語而言，傳統「聲級計」主要依 IEC 61672 系列規範界定，其目的在於量測人類聽覺範圍內之聲音，並依性能分為第 1 級與第 2 級，其中第 1 級的允收界限比第 2 級更嚴格。這種儀器的核心設計目標，是確保量測結果在頻率權重、時間權重、動態範圍與精度上的可追溯性與一致性。也就是說，傳統聲級計本質上是為「準確測得總體聲壓位準」而設計，而不是為了「解析聲音由何處而來」而設計。

相較之下，指向性量測設備的關鍵能力，在於其能透過多通道空間取樣與訊號處理，對聲音來向、空間分布或主要輻射區域進行推估。這類技術可包含麥克風陣列、波束形成、聲學照相、時頻域定位與各類反卷積演算法等。相關綜述研究指出，聲學波束形成已從基本概念逐步發展至多種進階方法，並廣泛應用於噪音源定位。換言之，若以學術與工程語言來說，「指向性」並不是一種單一儀器，而是一組使量測結果具備方向性與空間解析能力的方法集合。

本書因此採取較具操作性的界定：所謂「指向性噪音計」，並非僅指某特定商用產品，而是指一種能在環境噪音場景中，同時結合多通道感測、方向性分析、事件同步與必要之聲級整合程序，用以支援複合音源辨識、來源分離、治理診斷與行政說理的量測系統。這一定義的重點有三。第一，它不是要取代 IEC 61672 意義下之 Class 1 聲級計，而是與之形成互補。第二，它的價值不在於生成好看的熱圖，而在於建立一條可以把方向資訊、時間資訊、頻譜資訊與量值資訊串連起來的證據鏈。第三，它是一種面向治理的技術定位，而不只是研究展示工具。這種界定方式，既能與現有國際標準體系相容，也能為後續本土制度設計預留彈性。

在技術定位上，本書將指向性噪音計視為介於傳統全向性環境量測、聲學照相系統與智慧監測平台之間的橋梁。它一端要與傳統環境噪音制度銜接，因此不能脫離聲級量值的可比較性；另一端又要能處理複合音源場景，因此必須具備空間選擇性、事件辨識力與資料整合能力。這樣的定位，決定了本書不會把指向性設備神話為「可單獨完成一切判定」的萬能工具，而是把它理解成一項為補強現行制度盲區而出現的關鍵技術。

1.3 為何陸上運輸系統需要指向性量測

陸上運輸系統之所以特別需要指向性量測，首先是因為它與固定工業源或單一社區活動噪音不同，具有高度動態性、路徑延展性與來源重疊性。道路交通噪音不是來自單一點，而是由大量車輛在連續路段上移動所形成的統計性聲場；鐵道噪音雖具明顯事件性，但列車通過時的聲音又往往同時包括輪軌互制、動力設備、氣動效應與結構輻射等多重成分。ISO 3095 即明確指出，其標準旨在

為軌道車輛外部噪音之量測提供可重現且可比較的方法與條件。這說明在國際制度中，鐵道噪音本身就是一個需高度規範化處理的複雜對象。

其次，現代都市交通系統的空間結構愈來愈複雜。高架道路與平面道路並存、匝道與主線交疊、橋下空間形成反射腔體、鐵道與道路沿線並列、都市街谷產生立面反射與繞射，這些因素都會使受體端接收到的聲音成為多來源、多方向、多時間尺度疊合的結果。在此情境下，單一全向性量測雖然仍能提供總體暴露強度，但很難清楚回答哪一個來源佔主要貢獻、哪一段結構是改善重點、哪一個時段的哪一類事件最值得優先處理。若治理目的只是做整體趨勢監測，全向性量測已相當有用；但若治理目的還包括來源歸責、工程優先序排序與爭議說明，則指向性資訊便具有關鍵必要性。

第三，陸上運輸噪音同時具有平均暴露與事件干擾雙重特性。WHO 的健康導向指引強調平均暴露對健康的重要性，但實務陳情往往是由特定事件引發，例如夜間重型車高速通過、橋梁接縫衝擊、煞車尖銳噪音或特定列車時段干擾。這表示一個完整的交通噪音治理工具，不僅要能描述長期平均值，也要能捕捉具高顯著性的事件。指向性量測因為能配合時間同步與空間定位，較有可能在真實場景中辨識「何時、何向、何類」事件主導了干擾。這對於陳情回應、改善驗證與風險溝通都極為重要。

更重要的是，已有研究證實麥克風陣列與波束形成可用於車輛通過噪音源識別，並可從量測分布中辨識至少兩個潛在來源。另有研究顯示，以圓形麥克風陣列為基礎的自動化環境噪音監測系統，能自動識別與分類主要噪音源，並利用空間資訊計算入射方向分布。這些研究共同說明，指向性量測並不是抽象概念，而是已具有相當可行性的技術路徑。

1.4 複合性音源對現行噪音管理制度之挑戰

複合性音源對現行制度的最大挑戰，在於它打破了傳統「一個測點對應一個主要來源」的隱含前提。現行噪音管理制度之所以能建立，是因為在多數典型情境中，量測者至少能合理假設某一受體點主要受某一類來源支配，例如某一路段道路交通、某一工廠設備或某一單一鐵道系統。但當多個來源同時存在且彼此在頻譜、時間與空間上重疊時，總量數值便不再等同於單一來源的責任指標。此時，法規上仍可依總體暴露值進行某種判斷，但在行政實務與工程實務上，單一總量數值往往不足以支撐後續行動。

第二個挑戰是背景音與目標音之界線模糊化。在複合場景下，背景音不再是穩定而容易排除的底噪，而可能本身就是另一組交通來源。例如某受體點對鐵道來說，道路車流可能是背景；但對道路治理者來說，鐵道事件又可能成為背景。這種互為背景、互為干擾的情況，使得背景修正與來源判讀都變得更加困

難。也因此，複合性音源挑戰的不是單一量測程序，而是整個制度如何理解「來源」這件事。

第三個挑戰是跨機關治理與責任切分。道路、鐵道、高架快速道路、地方道路與周邊設施往往分屬不同主管機關或不同權責單位。當民眾面對的是一個整體音場，行政體系卻是分工式結構時，若缺乏較高辨識力的量測方法，極易出現「大家都承認有噪音，但無法確認誰應優先改善」的治理僵局。歐盟與美國之所以高度重視噪音模型、影響評估與路線規劃中的預測程序，正是為了在工程前、中、後期建立較清楚的責任與決策依據。對複合音源場景而言，指向性量測可望成為這種責任釐清的一項重要技術支撐。

1.5 本書研究目的、問題架構與章節安排

基於上述背景，本書之研究目的並非只是介紹一種新型設備，而是要建立一套針對陸上運輸系統複合性音源量測與治理應用的完整知識框架。這個框架至少包括四個層次。第一是概念層，亦即重新界定何謂複合性音源、何謂主音源、次音源與背景音，以及何謂真正具有治理意義的指向性量測。第二是理論層，亦即說明聲壓、聲能、方向性、到達時間差、相位差、空間解析度、近遠場差異與傳播效應如何共同構成指向性量測之物理基礎。第三是方法層，亦即討論麥克風陣列、波束形成、反卷積、近場聲學全像、時頻分析、AI 分類與模式校估如何組成完整的音源分離技術體系。第四是制度層，亦即探討這些方法如何在我國既有噪音管制與工程治理體系中找到合理定位。這樣的研究目的，使本書既具有聲學技術專書的性格，也具有制度改革與政策設計的意圖。

在問題架構上，本書聚焦於以下幾項核心提問：第一，陸上運輸噪音在複合場景中的聲學本質為何，為何傳統全向量測不足以充分說明？第二，指向性量測技術目前在國際上發展到何種程度，哪些成果具有可移植性？第三，如何把陣列量測、聲級計資料、場景建模與行政說理連結成一條可採信的證據鏈？第四，在哪些典型樣態下，指向性量測最能展現價值，又在哪些條件下需審慎看待其限制？第五，若要使指向性噪音計在我國制度內真正落地，需要哪些標準化、分工設計與政策路徑？這些問題彼此並非平行，而是循序推進，因此本書章節安排亦採由概念、理論、技術、案例到制度應用之遞進結構。

就章節安排而言，第一篇處理總論與研究定位，建立導論與核心概念；第二篇處理國際研究背景與理論基礎，說明國際發展歷程與物理原理；第三篇進入技術體系與音源分離方法，建立方法論主體；第四篇處理量測程序、儀器架構與資料處理，使方法具體可操作；第五篇以國外案例與典型應用樣態呈現實務對照；第六篇則進入創新技術、制度應用與未來發展藍圖，從而把整本書由量測

技術推進到治理工具。此一安排不是單純的內容編排，而是反映本書的研究邏輯：從「為什麼需要」走向「如何做到」，再走向「如何制度化」。

1.6 本書之創新價值與政策意義

本書的創新價值，首先在於它嘗試把原本分散在不同領域中的知識重新整合。過去有關交通噪音的研究，常分屬環境評估、聲學工程、車輛噪音、鐵道工程、智慧感測與行政法制等不同領域；有關麥克風陣列與波束形成的文獻，則多偏向機械、航空、產品聲學或訊號處理。相較之下，本書試圖把這些知識重新匯聚到「陸上運輸系統複合性音源量測」這一明確問題上，並將其轉化為治理導向的知識架構。這種跨領域整合本身，即是本書的重要創新。

第二項創新價值，在於本書並不把指向性量測當成實驗室炫技，而是把它明確放在法規、工程與監測三個治理場域中加以定位。這意味著本書不僅關注能不能「看見」音源，更關注能不能用於改善設計、能不能支援行政說理、能不能逐步形成制度性程序。這一點對我國尤其重要。因為在高度都市化與交通設施密集的情境中，噪音問題往往不是缺乏數據，而是缺乏足夠有說服力的來源解析與決策支援。若能建立一套兼顧計量嚴謹性與空間辨識力的制度框架，將有助於提升噪音治理的精準度與公信力。

第三項政策意義，在於它有機會促成噪音治理從「結果管理」邁向「結構管理」。傳統制度多半在受體端量得結果後，再思考是否設置隔音牆、改善鋪面或執行交通管制；但若缺乏來源解析，改善資源可能無法對準真正主因。指向性量測若能與交通流資料、設施設計資料、模型模擬與長期監測平台整合，便有可能使治理者更早理解哪一類來源最具支配性，從而在設計、審查與維護階段就進行更精準的介入。這不只是技術升級，更是治理模式升級。

總結而言，第一章導論所要建立的，不只是本書的閱讀入口，而是一個清楚的研究宣言：在複合性音源已成為都市交通噪音常態的今天，噪音治理若仍完全依賴單點、全向、總量式的量測與判讀，將愈來愈難滿足工程診斷、行政歸責、民眾溝通與政策設計的需求。指向性噪音計的提出，正是要回應這一歷史轉折。它不是要否定既有聲級量測制度，而是要讓既有制度在面對複合、重疊、爭議化的真實環境時，獲得更強的辨識力、說明力與治理力。這一點，正是本書全部後續章節得以成立的根本基礎。

文獻資料

[1] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 1996-1:2016 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1: Basic quantities and assessment procedures*. ISO.

- [2] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 1996-2:2017 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination of sound pressure levels*. ISO.
- [3] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO.
- [4] European Parliament & Council of the European Union. (2002). *Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise*. EUR-Lex.
- [5] European Commission. (n.d.). *Environmental Noise Directive*. European Commission.
- [6] European Environment Agency. (2025). *Environmental noise in Europe 2025*. EEA.
- [7] European Environment Agency. (2025). *Exposure of Europe’s population to environmental noise*. EEA.
- [8] World Health Organization. (2022). *Guidance on environmental noise*. WHO.
- [9] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-1:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications*. IEC.
- [10] International Organization for Standardization. (2013/2025). *ISO 3095 Railway applications—Acoustics—Measurement of noise emitted by railbound vehicles*. ISO.
- [11] Federal Highway Administration. (2015). *Recommended Best Practices for the Use of the FHWA Traffic Noise Model (TNM)*. U.S. Department of Transportation.
- [12] Federal Highway Administration. (2018). *Reviewing TNM model runs and associated noise modeling reports*. U.S. Department of Transportation.
- [13] Federal Transit Administration. (2020). *Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual* (Report No. 0123). U.S. Department of Transportation.
- [14] Ballesteros, J. A., Sarradj, E., Fernandez, M. D., & Ballesteros, M. J. (2015). Noise source identification with beamforming in the pass-by of a car. *Applied Acoustics*, 93, 106 – 119.
- [15] Murovec, J., Gerbec, M., & Jambrošić, K. (2018). Microphone array based automated environmental noise monitoring. *Applied Acoustics*, 140, 323 – 334.
- [16] Chiariotti, P., Martarelli, M., & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 422 – 448.
- [17] Okada, Y., Anai, K., Itiki, T., Yamauchi, K., Yasuda, Y., & Yokota, T. (2025). Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2023” : Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. *Acoustical Science and Technology*, 46(4), 365 – 429.