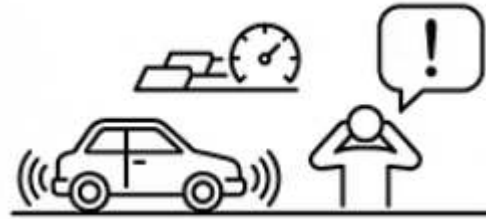


第一章 緒論

Introduction

摘要 (Abstract)

本章以輪胎噪音作為現代道路交通噪音之核心議題，系統性建構其物理機制、聲學特性與環境意涵之整體認知架構。隨著全球汽車保有量持續攀升，以及電動車快速普及所帶來之動力系統靜音化趨勢，輪胎與路面交互作用所產生之噪音已在中高速行駛條件下成為主導性噪音源，



直接決定道路交通噪音的環境暴露水準與人類感知品質。

本章首先從聲學與車輛工程觀點，界定輪胎噪音之定義與基本特性，指出其本質為一種涵蓋低頻結構振動、中頻花紋撞擊與空氣泵浦效應，以及高頻湍流與摩擦噪音之寬頻、非穩態聲學現象。透過頻域、時域與空間指向性等多層次分析，說明輪胎噪音如何在人耳最敏感之頻率範圍內形成高度煩擾性的聲音特徵，並解釋其為何即使在噪音值差異有限的情況下，仍可能產生顯著不同的主觀感受。

進一步地，本章整合輪胎噪音之主要分類體系，從產生機制、傳播路徑、頻率分佈、時間特性與心理聲學表現等面向，建構一套可同時服務於基礎研究、工程設計與法規應用的分析框架。透過此一分類架構，輪胎噪音不再被視為單一指標問題，而是一個涉及結構動力學、流體聲學、材料黏彈性與人因感知的複合性系統問題。

在影響因素分析方面，本章深入探討輪胎結構設計、胎面花紋幾何、橡膠材料特性、負載與充氣壓力、路面紋理與材料、行駛速度及環境條件等關鍵變數，並強調各因素之間高度非線性且具交互作用的關係。透過整合既有實驗與理論研究成果，本章說明輪胎噪音控制本質上是一項多目標最佳化問題，需在噪音、安全性、耐久性、滾動阻力與永續性能之間取得精細平衡。

最後，本章從公共健康、都市環境品質、產業競爭力與法規治理等層面，闡述輪胎噪音研究的重要性與迫切性，並指出在電動車與永續城市發展趨勢下，輪胎噪音已由單純的工程性能議題，轉化為結合環境正義、健康風險管理與永續治理的關鍵課題。本章之內容為後續各章深入探討輪胎噪音生成機制、量測技術、模擬方法與降噪策略奠定完整且嚴謹的理論基礎。

輪胎噪音作為現代交通系統中不可忽視的環境問題，已經成為車輛工程、聲學研究、環境科學以及公共衛生等多個領域共同關注的焦點。隨著全球汽車保有量的持續增長，特別是在都市化程度較高的地區，交通噪音對居民生活品質的影響日益顯著。研究顯示，在都市環境中，輪胎與路面接觸所產生的噪音在車速超過每小時 50-55 公里後，便成為車輛噪音的主要來源，甚至超越了傳統認知中的引擎噪音[1]。這一現象在電動車逐漸普及的今日更為明顯，因為電動馬達運轉時產生的噪音遠低於內燃機，使得輪胎噪音的相對貢獻更加突出[2]。

輪胎噪音的產生涉及複雜的物理機制，包括輪胎結構的振動、空氣在胎面花紋溝槽中的流動、輪胎與路面之間的摩擦以及路面紋理的激發等多重因素的交互作用。這些機制在不同的頻率範圍內表現出不同的特性，從低頻的結構振動到高頻的空氣動力學噪音，形成了輪胎噪音獨特的頻譜特徵[3]。理解這些基本原理不僅對於開發低噪音輪胎具有重要意義，也為道路設計、都市規劃以及噪音管制政策的制定提供了科學依據。

本章將系統性地介紹輪胎噪音的基本概念、研究背景以及本書的整體架構。首先概述輪胎噪音的定義、特性與分類，接著闡述其在環境保護、公共健康以及車輛性能等方面的重要性。隨後回顧輪胎噪音研究的歷史發展脈絡，從早期的現象觀察到當代的精密量測與模擬技術。最後說明本書各章節的組織方式與主要內容，為讀者提供清晰的閱讀指引。

1.1 輪胎噪音概述 (Overview of Tire Noise)

輪胎噪音係指輪胎在路面上滾動時所產生的聲音，這種聲音主要源於輪胎與路面之間複雜的動態交互作用。從聲學的角度來看，輪胎噪音可以被定義為由輪胎滾動過程中產生的、能夠被人耳感知或測量儀器檢測到的聲波能量[4]。這種噪音並非單一的聲音源，而是多種物理機制共同作用的結果，包括機械振動、空氣動力學效應以及表面摩擦等過程。



輪胎噪音的產生過程始於輪胎與路面的接觸。當輪胎在路面上滾動時，接觸區域內的橡膠材料會因為受到壓縮和釋放而產生週期性的變形。這種變形不僅會在輪胎結構中激發振動波，也會在接觸區域周圍的空氣中產生壓力波動。同時，胎面花紋中的溝槽會捕獲空氣，當這些空氣在接觸區域被壓縮和釋放時，會產生所謂的空氣泵浦效應(Air Pumping)，這是輪胎噪音的重要組成部分[5]。此外，輪胎與

路面之間的黏著與滑動過程也會產生摩擦噪音，特別是在路面紋理較為粗糙的情況下，這種效應更為顯著。

從頻率特性來看，輪胎噪音涵蓋了相當寬廣的頻率範圍，從幾十赫茲的低頻結構振動到數千赫茲的高頻空氣動力學噪音。不同頻率範圍的噪音對應著不同的產生機制，也對人耳的感知產生不同的影響。低頻噪音主要與輪胎的整體振動模態有關，通常表現為轟鳴聲



(Rumbling)，這種聲音雖然音壓級不一定很高，但因為其穿透力強，常常成為車內噪音的主要來源[6]。中頻噪音則主要來自胎面花紋塊的撞擊和空氣泵浦效應，頻率大約在 500 至 1500 赫茲之間，這個頻率範圍正好是人耳最敏感的區域，因此對主觀噪音感受影響最大。高頻噪音則與空氣在花紋溝槽中的湍流以及輪胎表面的微小粗糙度有關，雖然這部分噪音的噪音值通常較低，但會產生嘶嘶聲 (Hissing)，影響噪音的品質感受。

輪胎噪音的幅度大小受到多種因素的影響。車速是最重要的影響因素之一，研究表明輪胎噪音的噪音值與車速之間存在明確的對數關係，通常車速每增加一倍，噪音值會增加約 9 至 12 分貝[7]。這種速度依賴性使得高速公路上的交通噪音問題特別嚴重。輪胎的結構設計也對噪音有顯著影響，包括胎面花紋的形狀、節距排列、溝槽深度以及橡膠配方等參數都會改變噪音的產生和傳播特性。路面特性同樣扮演關鍵角色，不同類型的路面材料和紋理會與輪胎產生不同的交互作用，從而影響噪音水準。例如，多孔隙瀝青路面(Porous Asphalt)由於其開放的孔隙結構可以吸收部分聲能，相較於密級配瀝青路面可以降低 3 至 5 分貝的噪音 [8]。

輪胎負載和充氣壓力也是重要的影響參數。當輪胎承受較大的負載時，接觸面積增大，接觸壓力分布改變，這會影響輪胎的振動特性以及與路面的交互作用強度。充氣壓力則主要影響輪胎的剛度，較高的充氣壓力會使輪胎變硬，可能增加某些頻率範圍的噪音，但也可能因為接觸面積減小而降低其他頻率的噪音[9]。溫度條件同樣不可忽視，輪胎橡膠的黏彈性質隨溫度變化，這會影響材料的阻尼特性以及與路面的摩擦係數，進而改變噪音的產生機制。

輪胎噪音可以從不同的角度進行分類。根據噪音的傳播路徑，可以分為外部噪音和內部噪音。外部噪音是指傳播到車輛外部環境中的噪音，這是環境噪音管制的主要對象，也是輪胎噪音法規所規範的內容。內部噪音則是透過車輛結構傳遞到

車室內的噪音，這主要影響駕駛和乘客的舒適性，是車輛製造商在產品開發時需要重點考慮的因素[10]。根據產生機制的不同，輪胎噪音可以分為振動噪音、空氣動力學噪音以及撞擊噪音等類型。振動噪音源於輪胎結構本身的振動，這些振動可以透過輻射直接產生聲音，也可以透過懸吊系統傳遞到車體，再由車體表面輻射成為噪音。空氣動力學噪音則與空氣在胎面花紋中的流動有關，包括空氣泵浦、空氣共鳴以及湍流噪音等現象。撞擊噪音主要來自胎面花紋塊撞擊路面的瞬間衝擊，這種噪音通常呈現脈衝特性，在時域上表現為週期性的峰值。

從主觀感受的角度，輪胎噪音也可以根據其聲音品質特徵進行分類。轟鳴聲通常是低頻的、連續的聲音，給人以沉悶的感覺。呼嘯聲(Howling)則是中頻的、音調清晰的聲音，常常讓人感到刺耳和不適。嘶嘶聲是高頻的、類似白噪音的聲音，雖然不一定很響亮，但會影響車內的安靜感。拍打聲(Slapping)則是一種週



期性的、脈衝狀的聲音，通常與特定的花紋設計缺陷有關[11]。這些不同類型的聲音特徵不僅反映了不同的物理機制，也對人的主觀煩擾程度有不同的影響，因此在輪胎降噪設計中需要綜合考慮。

輪胎噪音的量測方法也是理解其特性的重要途徑。根據量測位置和方法的不同，主要有車外透過噪音(Pass-by Noise)、近場噪音(Close Proximity Noise)以及車內噪音(Interior Noise)等不同的量測方式。車外透過噪音量測是法規認證的標準方法，透過在固定位置架設麥克風，量測車輛以特定速度透過時的最大噪音值[12]。這種方法反映的是車輛對周圍環境的噪音影響，是環境保護的主要關注點。近場噪音量測則將麥克風放置在非常靠近輪胎的位置，有些方法甚至將麥克風固定在車輛上，隨著車輛一起移動。這種方法可以更準確地捕捉輪胎本身產生的噪音，排除了其他噪音源的干擾，對於研究輪胎噪音的產生機制和評估不同輪胎設計的降噪效果非常有用[13]。車內噪音量測則關注駕駛和乘客實際感受到的噪音，這需要考慮噪音透過不同路徑傳遞到車室內的過程，以及車室聲學特性對噪音的影響。

輪胎噪音問題的複雜性還表現在其與其他車輛性能參數之間的權衡關係。降低輪胎噪音往往需要調整輪胎的設計參數，而這些調整可能會影響輪胎的其他性能。例如，採用較淺的花紋溝槽深度可以減少空氣泵浦效應，從而降低噪音，但這會犧牲輪胎的排水性能和濕地抓地力[14]。使用較軟的橡膠配方可以提高阻尼，減

少振動噪音，但可能會增加滾動阻力，影響燃油經濟性。因此，輪胎設計是一個多目標優化的過程，需要在噪音、安全性、耐久性、經濟性等多個方面尋求平衡。這種複雜的權衡關係使得輪胎噪音問題不僅是一個技術挑戰，也是一個系統工程的課題，需要從整體的角度來考慮和解決。

1.1.1 輪胎噪音的定義與特性 (Definition and Characteristics of Tire Noise)

輪胎噪音在聲學上可以被精確定義為輪胎在路面上滾動時，由輪胎與路面交互作用所產生的、能夠在空氣中傳播的聲波。這種聲波的產生涉及多種能量轉換過程，包括機械能轉換為聲能、動能轉換為熱能和聲能等。從物理學的角度來看，輪胎噪音本質上是一種非穩態的、寬頻的聲學現象，其特性受到輪胎結構、路面特性、行駛條件以及環境因素等多重因素的共同影響。



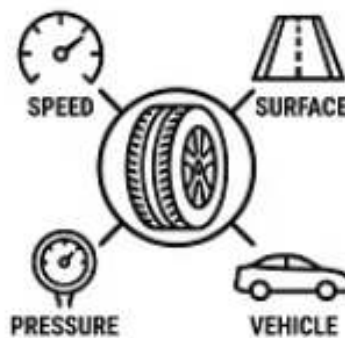
輪胎噪音的聲學特性首先表現在其頻率分布上。完整的輪胎噪音頻譜通常涵蓋 20 赫茲到 5,000 赫茲的範圍，某些情況下甚至可以延伸到更高的頻率。這個頻率範圍幾乎完全落在人耳的聽覺範圍內(20 赫茲至 20,000 赫茲)，而且其主要能量集中在人耳最敏感的 500 赫茲到 4,000 赫茲頻段，這也是為什麼輪胎噪音對人的主觀感受影響如此顯著的原因[15]。在低頻段(20 至 200 赫茲)，輪胎噪音主要來自輪胎整體的振動模態，包括輪胎的徑向和切向振動。這些振動模態的頻率與輪胎的幾何尺寸、質量分布以及結構剛度密切相關。研究顯示，第一階徑向振動模態的頻率通常在 40 至 80 赫茲之間，而高階模態則分布在更高的頻率範圍[16]。

中頻段(200 至 1500 赫茲)的噪音是輪胎噪音的主要組成部分，這個頻段的噪音主要來自胎面花紋塊與路面的撞擊以及空氣泵浦效應。當輪胎滾動時，胎面花紋塊在進入和離開接觸區域時會產生週期性的撞擊，這些撞擊的頻率與花紋節距和車速有關。對於典型的乘用車輪胎，花紋節距通常在 20 至 50 毫米之間，當車速為每小時 100 公里時(約 27.8 公尺/秒)，對應的撞擊頻率約為 556 至 1,390 赫茲[17]。空氣泵浦效應產生的噪音頻率則取決於溝槽的幾何尺寸和空氣被壓縮釋放的速率。理論分析和實驗研究都表明，溝槽寬度和深度對空氣泵浦噪音的頻率有決定性影響。寬度為 5 至 10 毫米、深度為 8 至 12 毫米的典型花紋溝槽會在 600 至 1,200 赫茲產生顯著的噪音峰值[18]。

高頻段(1500 赫茲以上)的噪音則主要與空氣在花紋溝槽中的湍流、輪胎表面的微小粗糙度以及接觸區域邊緣的空氣分離有關。這個頻段的噪音通常呈現寬頻特性，

沒有明顯的離散峰值，在頻譜上表現為相對平坦的背景噪音。雖然高頻噪音的噪音值通常低於中頻噪音，但由於人耳對高頻聲音的敏感度較高，這部分噪音對主觀煩擾程度仍有顯著貢獻[19]。此外，高頻噪音還會影響噪音的品質特徵，特別是尖銳度(Sharpness)這一心理聲學參數，過多的高頻成分會使噪音聽起來更加刺耳和令人不適。

輪胎噪音的時域特性同樣值得關注。與穩態的機械噪音不同，輪胎噪音在時間上表現出週期性和隨機性的混合特徵。週期性成分主要來自胎面花紋的規律排列，當輪胎以恆定速度滾動時，相同的花紋塊會以固定的時間間隔撞擊路面，產生週期性的聲壓脈衝。這種週期性在頻域上表現為離散的諧波峰值，其基頻對應於輪胎的轉速，高次諧波則對應於花紋塊的撞擊頻率[20]。隨機性成



分則來自路面紋理的不規則性、輪胎與路面接觸狀態的隨機變化以及空氣動力學過程的湍流特性。這種隨機性使得輪胎噪音即使在理想的實驗室條件下也會表現出一定的變異性，給噪音的準確預測和控制帶來挑戰。

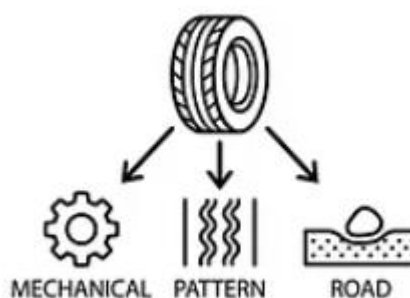
輪胎噪音的指向性(Directivity)是其空間分布特性的重要表現。不同頻率的噪音在空間中的輻射模式是不同的。低頻噪音通常表現出較弱的指向性，可以向各個方向均勻輻射，這是因為低頻聲波的波長較長(例如 100 赫茲的聲波在空氣中的波長約為 3.4 公尺)，與輪胎的尺寸相當或更大，因此輪胎作為聲源可以近似為點聲源或偶極子聲源[21]。中高頻噪音則表現出明顯的指向性，主要的輻射方向是輪胎的側向和後向。這種指向性與聲波的繞射特性有關，高頻聲波的波長較短，更容易被輪胎本身以及車體結構遮擋，因此在不同的觀測位置會測得不同的噪音值。研究表明，在輪胎側向 7.5 公尺、高度 1.2 公尺的標準量測位置，測得的噪音值通常比輪胎後方同一距離的位置高 2 至 3 分貝[22]。

輪胎噪音的噪音值特性是其量化描述的基礎。噪音值是用對數標度表示的聲壓相對值，單位為分貝(dB)。對於輪胎噪音的量測，通常採用 A 加權噪音值(A-weighted Sound Pressure Level)，記為 dB(A)，這種加權方式考慮了人耳對不同頻率聲音的敏感度差異，能夠更好地反映噪音對人的主觀影響。典型的乘用車輪胎在車速每小時 80 公里時的透過噪音噪音值約為 68 至 72 dB(A)，而商用車輪胎由於尺寸較大、負載較重，透過噪音噪音值通常在 72 至 76 dB(A)之間[23]。這些數值看

似差異不大，但由於分貝是對數單位，3 分貝的差異對應的是聲能量增加一倍，6 分貝則對應聲壓增加一倍，因此即使是幾個分貝的改善也具有實質意義。

輪胎噪音值與車速之間的關係可以用經驗公式來描述： $L_p = A + B \log(V)$ ，其中 L_p 是噪音值， V 是車速， A 和 B 是與輪胎和路面特性有關的常數[24]。對於大多數乘用車輪胎， B 值約在 30 至 35 之間，這意味著車速每增加一倍，噪音值增加約 9 至 10.5 分貝。這種強烈的速度依賴性使得高速行駛時的輪胎噪音成為主要問題。有趣的是，不同頻率範圍的噪音對速度的依賴程度是不同的。低頻振動噪音的速度指數通常較小，約為 20 至 25，而高頻空氣動力學噪音的速度指數可能達到 40 以上[25]。這意味著隨著車速增加，高頻噪音的增長速度更快，噪音的頻譜特性會發生改變，高速時噪音會變得更加尖銳。

輪胎噪音的另一個重要特性是其對路面狀況的敏感性。即使是同一條輪胎，在不同的路面上滾動時產生的噪音可能相差 5 至 8 分貝[26]。路面的影響可以從宏觀紋理(Macrotexture)和微觀紋理(Microtexture)兩個層面來理解。宏觀紋理指的是路面上毫米級的粗糙度變化，這主要影響輪胎與路

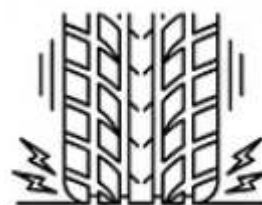


面接觸區域的空氣流動以及輪胎的整體激發。具有較深宏觀紋理的路面會增加空氣泵浦效應，但也可能提供更多的空氣逃逸通道，對噪音的實際影響取決於紋理的具體形態[27]。微觀紋理則是微米級的表面粗糙度，這主要影響輪胎與路面之間的摩擦特性和黏著-滑動過程。較粗糙的微觀紋理會增加摩擦噪音，但也會提供更好的抓地力。

路面材料的聲學特性也對輪胎噪音有重要影響。傳統的密級配瀝青路面(Dense Graded Asphalt)表面相對光滑堅硬，聲阻抗較高，當聲波撞擊到路面時會被幾乎完全反射，無法吸收聲能。相比之下，多孔隙瀝青路面(Porous Asphalt)含有 15% 至 25% 的空隙率，這些相互連通的孔隙可以吸收聲波能量，特別是對中高頻噪音有顯著的衰減效果[28]。實測數據顯示，多孔隙瀝青路面相較於密級配瀝青路面可以降低 3 至 6 分貝的輪胎噪音，這種降噪效果在新鋪設時最為明顯，但會隨著孔隙的堵塞而逐漸減弱，通常在使用 5 至 8 年後效果會大幅衰減[29]。混凝土路面由於其高剛度和特殊的施工紋理(如橫向拉槽)，通常比瀝青路面產生更高的輪胎噪音，差異可達 2 至 4 分貝。

輪胎噪音的變異性是實際應用中必須面對的問題。即使是相同型號的輪胎，由於製造公差、使用磨損程度以及量測條件的微小差異，產生的噪音也會有所不同。統計研究表明，同一型號輪胎在標準測試條件下的噪音值標準差約為 0.5 至 1.0 分貝[30]。這種變異性對法規認證和市場監督提出了挑戰，需要在測試方法和合格判定標準中考慮適當的容差範圍。輪胎的磨耗狀態對噪音也有顯著影響。一般來說，新輪胎由於花紋深度較大，空氣泵浦效應較強，噪音相對較高。隨著使用磨損，花紋深度減小，空氣泵浦效應減弱，噪音可能會降低 1 至 2 分貝[31]。但這種趨勢並非絕對，某些輪胎設計在磨損後可能因為花紋剛度變化或不均勻磨損而導致噪音增加。

輪胎噪音的季節性變化也是一個值得注意的現象。溫度對輪胎橡膠的黏彈性質有顯著影響，低溫下橡膠變硬，阻尼減小，振動噪音可能增加；高溫下橡膠變軟，阻尼增大，振動噪音可能減小。實驗數據顯示，溫度從 0 攝氏度升高到 30 攝氏度，輪胎噪音可能變化約 1 至 2 分貝[32]。降雨對輪



胎噪音也有複雜的影響。薄水膜可能起到潤滑作用，減少摩擦噪音，但較厚的水膜會產生飛濺噪音(Splash Noise)，這是水被輪胎甩出時產生的聲音。在濕滑路面上，輪胎的排水過程也會產生額外的噪音，使得總噪音水準可能比乾燥路面高出 2 至 5 分貝[33]。

從心理聲學的角度來看，輪胎噪音不僅僅是一個噪音值的問題，其聲音品質特徵對人的主觀感受有重要影響。響度(Loudness)是最基本的心理聲學參數，它反映了人對聲音大小的主觀感知。響度與噪音值相關但不完全相同，因為人耳對不同頻率聲音的敏感度不同。研究表明，即使兩個噪音的 A 加權噪音值相同，如果頻譜分布不同，人感受到的響度也可能不同[34]。尖銳度是另一個重要參數，它量化了聲音中高頻成分的比例。尖銳度高的噪音聽起來更加刺耳和令人不適。粗糙度(Roughness)則描述了聲音的時間變化特性，特別是 15 至 300 赫茲範圍內的調變。粗糙度高的噪音會給人以粗糙、不平滑的感覺。波動強度(Fluctuation Strength)類似於粗糙度，但關注的是較慢的調變(0.5 至 20 赫茲)，這與聲音的節奏感有關[35]。輪胎噪音的優化不應僅僅追求降低噪音值，還需要改善這些心理聲學參數，以實現更好的主觀品質。

輪胎噪音的傳播特性也是其整體特性的重要組成部分。噪音從輪胎輻射出來後，會在空氣中傳播，傳播過程中會受到幾何擴散、空氣吸收、地面反射以及障礙物

遮擋等因素的影響。幾何擴散是最基本的衰減機制，對於點聲源，噪音值隨距離的增加而降低，距離每增加一倍，噪音值降低 6 分貝[36]。空氣吸收主要影響高頻噪音，空氣中的分子振動會吸收聲能並轉化為熱能，這種吸收在高頻段和長距離傳播時變得顯著。地面反射會產生干涉效應，可能在某些頻率和位置形成增強或減弱。車體本身也會對輪胎噪音的傳播產生影響，起到遮擋和反射的作用，改變噪音的指向性和頻譜特性[37]。

1.1.2 輪胎噪音的分類 (Classification of Tire Noise)

輪胎噪音的分類方式多樣，不同的分類標準反映了對這一複雜現象的不同理解角度。從聲學研究到工程應用，建立清晰的分類體系對於準確描述問題、選擇合適的量測方法以及制定有效的降噪策略都具有重要意義。根據噪音的產生機制、傳播路徑、頻率特性以及主觀感受等不同維度，可以建立多層次的輪胎噪音分類系統。



從產生機制的角度來看，輪胎噪音可以分為振動噪音、空氣動力學噪音和撞擊噪音三大類別。振動噪音源於輪胎結構本身的機械振動。當輪胎在不平整的路面上滾動時，路面不規則性會激發輪胎的各種振動模態。這些振動模態包括徑向振動、切向振動、扭轉振動以及橫向振動等。徑向振動是指輪胎沿半徑方向的伸縮運動，這是最主要的振動形式，會直接導致輪胎表面的空氣壓縮和膨脹，產生聲波輻射[38]。切向振動則是指輪胎沿圓周方向的運動，這會產生類似於駐波的振動模式，在特定頻率形成共振。輪胎振動產生的噪音頻率範圍主要在 20 至 500 赫茲，但高階振動模態可以延伸到更高的頻率。振動噪音的特點是其頻率與輪胎的結構參數密切相關，可以透過有限元素分析等數值方法進行預測和優化。

空氣動力學噪音是輪胎噪音的另一個重要組成部分，這類噪音與空氣在胎面花紋中的流動有關。當輪胎滾動時，花紋溝槽中的空氣會經歷複雜的壓縮、膨脹和流動過程。在接觸區域的前緣，花紋溝槽進入接觸區，空氣被快速壓縮，產生脈衝狀的聲壓波動。在接觸區域的後緣，溝槽離開接觸區，壓縮的空氣突然釋放，再次產生聲波[39]。這種空氣泵浦效應是中頻輪胎噪音的主要來源，頻率通常在 500 至 1500 赫茲範圍。除了泵浦效應，花紋溝槽還可能形成空氣共鳴腔。當溝槽的幾何尺寸與聲波波長形成特定關係時，會在溝槽內產生駐波共振，這種共振會放大特定頻率的噪音，在頻譜上形成尖銳的峰值[40]。空氣共鳴的頻率可以用亥姆霍茲共振器(Helmholtz Resonator)的理論來近似計算，主要取決於溝槽的體積和

開口面積。此外，空氣在溝槽中的高速流動會產生湍流，湍流引起的壓力波動是高頻噪音的來源之一。

撞擊噪音主要來自胎面花紋塊與路面的撞擊過程。當花紋塊進入接觸區域時，會以一定的速度撞擊路面，這個撞擊過程會在輪胎結構中激發振動波，也會在空氣中產生脈衝聲波。撞擊的強度取決於花紋塊的剛度、撞擊速度以及路面的硬度。較硬的花紋塊和路面會產生更強的撞擊噪音。撞擊噪音在時域上表現為週期性的脈衝，其重複頻率與花紋節距和車速有關[41]。在頻域上，脈衝信號的頻譜是寬頻的，包含基頻和多個高次諧波。撞擊噪音對中高頻噪音都有貢獻，特別是在某些具有大塊狀花紋的輪胎上，撞擊噪音可能成為主導因素。

從傳播路徑的角度，輪胎噪音可以分為空氣傳播噪音(Airborne Noise)和結構傳播噪音(Structure-borne Noise)。空氣傳播噪音是指直接從輪胎表面輻射到周圍空氣中的噪音，這類噪音透過空氣傳播到接收位置，是外部環境噪音的主要組成部分。結構傳播噪音則是透過輪胎與車輛懸吊系統的連接傳遞到車體結構，然後由車體表面再輻射成為空氣中的聲音。結構傳播噪音是車內噪音的重要來源[42]。這兩種傳播路徑的相對重要性取決於頻率和量測位置。一般來說，低頻噪音更容易透過結構傳播，因為低頻振動在固體結構中的傳播效率較高。高頻噪音則主要透過空氣傳播，因為高頻振動在結構連接處更容易被阻隔。在車外環境中，空氣傳播噪音佔主導地位，而在車室內，結構傳播噪音的貢獻可能達到 50%以上，特別是在低頻段[43]。

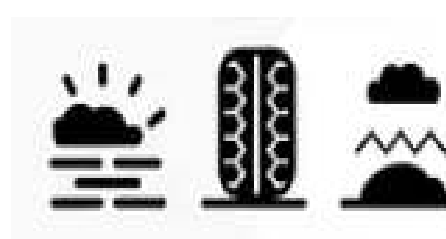
根據噪音對車輛內外環境的影響，輪胎噪音可以分為外部噪音和內部噪音。外部噪音是指傳播到車輛外部、影響周圍環境的噪音。這是環境保護和公共健康關注的主要對象，也是各國噪音法規管制的重點。外部噪音的量測通常採用透過噪音(Pass-by Noise)方法，在車輛側方固定距離處架設麥克風，量



測車輛以特定速度透過時的最大噪音值。這種量測方式反映了輪胎噪音對道路沿線居民的實際影響[44]。內部噪音則是指傳入車室內、影響駕駛和乘客舒適性的噪音。內部噪音不僅包括透過空氣進入車室的噪音，還包括透過車體結構傳遞的振動噪音。車室的聲學特性，如共鳴頻率、吸音材料的分布等，都會影響內部噪音的特性。內部噪音的控制需要綜合考慮輪胎降噪、懸吊系統隔振以及車體隔音等多個方面[45]。

從頻率特性來看，輪胎噪音可以分為低頻噪音、中頻噪音和高頻噪音。低頻噪音通常指 200 赫茲以下的噪音，主要與輪胎的整體振動和車體的結構共振有關。這部分噪音聽起來像轟鳴聲，雖然 A 加權噪音值不一定很高(因為 A 加權對低頻有較大的衰減)，但因為其穿透力強，常常是車內噪音的主要煩擾源。中頻噪音(200 至 1500 赫茲)是輪胎噪音的主體，包含了花紋撞擊、空氣泵浦等多種機制產生的噪音。這個頻段正好是人耳最敏感的範圍，對主觀噪音感受影響最大[46]。高頻噪音(1500 赫茲以上)主要來自空氣湍流和表面摩擦，雖然噪音值較低，但會影響噪音的品質特徵，過多的高頻成分會使噪音聽起來更加尖銳刺耳。

根據噪音的時間特性，可以分為穩態噪音和非穩態噪音。穩態噪音是指在恆定行駛條件下產生的相對穩定的噪音，其噪音值和頻譜特性在較長時間內保持基本不變。這是輪胎噪音的主要形態，適合用常規的頻譜分析方法進行研究。



非穩態噪音則是指由於行駛條件變化(如加速、制動、轉彎)或路面突變(如經過坑洞、接縫)而產生的短時噪音事件[47]。非穩態噪音雖然持續時間短，但往往噪音值較高，對主觀煩擾有顯著貢獻。研究非穩態噪音需要使用時頻分析等先進的信號處理技術。

從主觀感受的角度，輪胎噪音可以根據聲音品質特徵分為轟鳴聲、呼嘯聲、嘶嘶聲、拍打聲等類型。轟鳴聲(Rumbling)是低頻的、連續的聲音，通常在 50 至 200 赫茲範圍，給人以沉悶的感覺。這種聲音主要來自輪胎的低階振動模態以及路面的宏觀不平整度。轟鳴聲在車內特別明顯，因為車體結構對低頻振動的隔離效果較差[48]。呼嘯聲(Howling 或 Whining)是具有明確音調的、中高頻的聲音，通常在 500 至 2000 赫茲範圍。這種聲音常常與花紋設計不當有關，特別是當花紋節距排列過於規則時，會產生強烈的基頻和諧波成分。呼嘯聲是最令人煩躁的噪音類型之一，即使噪音值不是很高，也會讓人感到非常不適[49]。

嘶嘶聲(Hissing)是高頻的、類似白噪音的聲音，通常在 2000 赫茲以上。這種聲音主要來自空氣湍流和表面摩擦，沒有明顯的音調特徵。嘶嘶聲雖然不一定很響，但會影響車內的安靜感，特別是在高速行駛時。拍打聲(Slapping 或 Thumping)是週期性的、脈衝狀的聲音，通常與輪胎的不平衡、花紋塊的不均勻磨損或特定的花紋設計缺陷有關。這種聲音在時域上表現為明顯的週期性峰值，頻率通常與輪

胎的轉速相關[50]。拍打聲不僅煩人，還可能指示輪胎存在某種問題，需要檢查和維修。

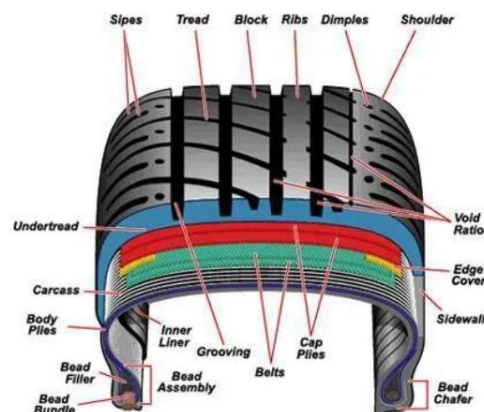
從應用場景來看，輪胎噪音還可以分為乘用車輪胎噪音、商用車輪胎噪音、特殊車輛輪胎噪音等。乘用車輪胎相對較小，負載較輕，花紋設計注重平衡性能和舒適性，其噪音特性通常在中頻段比較突出。商用車輪胎尺寸大、負載重，花紋較粗獷，通常產生更高的噪音，而且低頻成分更為顯著[51]。特殊車輛如越野車、競賽車、冬季車輛等使用的輪胎，由於其特殊的使用需求，花紋設計和橡膠配方都有很大差異，噪音特性也各具特色。例如，越野輪胎通常有大塊狀花紋和深溝槽，會產生較高的空氣泵浦噪音和撞擊噪音。冬季輪胎為了在冰雪路面提供抓地力，表面有大量細小的刀槽花紋，這會增加高頻噪音成分[52]。

從法規認證的角度，輪胎噪音可以分為型式認證噪音和使用中噪音。型式認證噪音是指新輪胎在標準測試條件下的噪音性能，這是輪胎進入市場前必須透過的認證項目。各國的輪胎噪音法規都規定了標準的測試方法、測試條件以及噪音限值，輪胎製造商必須確保其產品符合這些要求才能銷售[53]。使用中噪音則是指輪胎在實際使用過程中產生的噪音，這會受到磨損、老化、使用條件等多種因素的影響。雖然大多數法規只對新輪胎的噪音進行限制，但一些研究也開始關注輪胎噪音在使用壽命期間的變化，以確保輪胎在整個使用過程中都能維持可接受的噪音水準[54]。

1.1.3 輪胎噪音的影響因素 (Factors Affecting Tire Noise)

輪胎噪音的產生是多種因素綜合作用的結果，這些因素可以大致分為輪胎本身的特性、路面特性、行駛條件以及環境因素四大類。深入理解這些影響因素及其交互作用機制，對於有效控制輪胎噪音、優化輪胎設計以及制定合理的噪音管理策略都至關重要。輪胎的結構設計是影響噪音的最基本因素。輪胎的整體結構包括胎體(Carcass)、帶束層(Belt)、胎面(Tread)以及胎側(Sidewall)等部分，每個部分的設計都會對噪音產生影響。

胎體：主要由簾布層 (cord plies) 構成,其材料(尼龍、聚酯、鋼絲等)和編織方式決定了輪胎的基本剛度和振動特性。較硬的胎體可以減少低頻振動，但可能增加高頻傳遞。其主要功能在於承受內部氣壓、外部



載重與動態變形，同時決定輪胎的整體結構剛性與彈性行為。

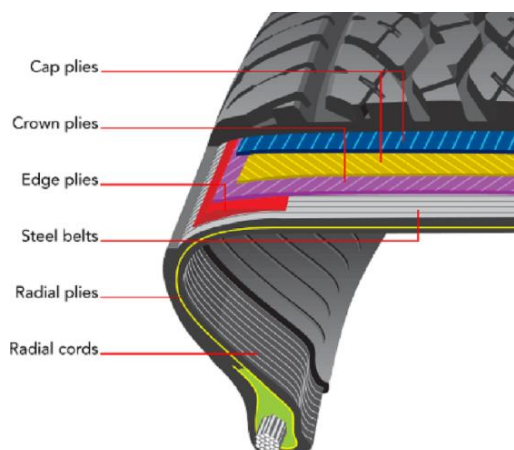
- 胎體在噪音與振動中的角色：

在輪胎噪音機制中，胎體扮演「結構振動載體」的角色，其影響包括：胎體的彎曲與拉伸模態會決定輪胎在特定頻率下的共振行為，特別是在 100 至 400 赫茲範圍內，與行駛噪音高度相關。胎體剛性會影響接觸斑（Contact Patch）的壓力分布，進而改變胎面與路面互動所產生的激振能量。胎體材料的內部阻尼特性，會左右振動能量向空氣聲輻射或被結構吸收的比例。

- 胎體設計與噪音控制的關聯：

在先進輪胎設計中，常透過以下方式優化胎體以降低噪音：調整簾布角度與層數，以避開特定結構共振頻率。選用高阻尼橡膠配方，抑制結構傳振。在胎體與胎面之間引入功能性中介層，降低振動傳遞效率。

帶束層：是由一層或多層高強度簾線（通常為鋼絲）與橡膠複合而成的結構層，其簾線以接近輪胎周向的角度配置，形成一種環狀加勁結構。帶束層的存在使胎面在高速行駛與高負載下仍能維持穩定形狀，避免過度隆起或不均勻變形。通常由鋼絲簾線構成，其角度和層數對輪胎的周向剛度有重要影響[55]。



- 帶束層在噪音與振動中的功能：

在輪胎噪音機制中，帶束層可視為「結構激振調制層」，其影響主要表現在：帶束層剛性直接影響胎面區域的彎曲模態與徑向振動頻率，是決定輪胎主要結構共振峰值位置的重要因素。帶束層可抑制胎面塊狀（Tread blocks）在通過接觸斑時的非同步振動，降低結構噪音與空氣激發噪音。帶束層與胎體之間的耦合行為，會影響振動能量是否轉化為空氣聲輻射。

- 帶束層設計對噪音控制的關鍵影響：

先進低噪音輪胎常透過以下方式優化帶束層設計：調整帶束層角度與層數，避開胎面主頻激振。引入零度帶束（Zero-degree belt / Cap ply）以抑制高速周向振動。改善帶束層與胎面橡膠的界面阻尼，降低振動傳遞效率。

輪胎之結構行為主要由胎體（Carcass）與帶束層（Belt）所共同決定，兩者形成一個高度耦合之複合結構系統，主導輪胎在承載、滾動與激振條件下的動態響應

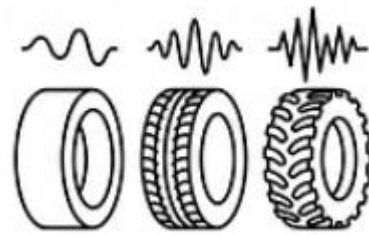
特性。胎體作為輪胎的基本承載骨架，通常由一層或多層簾布與橡膠複合材料構成，自胎唇延伸至胎唇，其主要功能在於承受內部充氣壓力與車輛垂直載重，同時提供必要的徑向柔順性與結構阻尼。胎體的材料性質與幾何配置直接影響輪胎在中低頻範圍內的彎曲與拉伸模態，並決定接觸斑區域的變形行為與壓力分布特性，進而影響胎面與路面激振能量的輸入機制。

位於胎體之上的帶束層則主要負責控制胎面區域的結構穩定性與周向剛性，其通常由兩層或以上近周向配置的高強度鋼絲簾線所組成。帶束層能有效限制胎面在高速滾動與高負載條件下的過度變形，使接觸斑形狀趨於穩定，並抑制胎面塊狀結構在通過接觸區時所產生的非同步振動。由於帶束層具有較高的彈性模數，其結構特性在中高頻範圍內對輪胎整體振動模態與共振頻率具有主導影響，亦是輪胎結構噪音輻射行為的重要控制因子。

在輪胎噪音生成機制中，胎體與帶束層之間的耦合效應尤為關鍵。胎體所提供的柔順性決定了路面激振能量的傳遞效率，而帶束層則進一步調制該激振能量在胎面區域的分布與放大行為。兩者共同形塑輪胎在滾動過程中的結構振動響應，並透過結構-聲學耦合機制將振動能量轉換為可輻射至周圍環境的空氣聲。因此，在低噪音輪胎之結構設計與數值模擬中，必須同時考量胎體與帶束層的材料參數、幾何配置與阻尼特性，方能準確預測輪胎之動態行為與噪音輻射特性。

胎面花紋：

胎面花紋設計對輪胎噪音的影響最為直接和顯著。花紋的基本功能是提供抓地力和排水能力，但花紋的幾何形狀、溝槽配置以及排列方式都會強烈影響噪音的產生。花紋節距(Pitch)是花紋塊



沿圓周方向的重複單元長度，這是決定撞擊噪音頻率的關鍵參數。如果所有花紋塊的節距都相同，那麼它們撞擊路面產生的聲波會在相同的頻率疊加，形成強烈的純音成分，這種噪音非常刺耳和令人不適[56]。為了避免這種情況，現代輪胎普遍採用變節距設計(Variable Pitch Design)，即沿圓周方向使用多種不同長度的節距，通常有 3 至 5 種不同的節距。變節距設計的核心思想是將撞擊能量分散到更寬的頻率範圍，避免在特定頻率形成峰值。節距序列的優化是一個複雜的組合優化問題，需要同時考慮噪音頻譜的平坦度、相位關係以及花紋性能的均勻性[57]。

花紋溝槽的形狀和尺寸對空氣動力學噪音有決定性影響。縱向溝槽(Longitudinal Groove)沿圓周方向延伸，主要功能是排水和提供抓地力，但這些溝槽也是空氣泵浦效應的主要場所。溝槽的寬度和深度決定了其中空氣的體積以及壓縮釋放的強度。研究表明，溝槽寬度從 5 毫米增加到 10 毫米，空氣泵浦噪音可能增加 2 至 3 分貝[58]。然而，過窄的溝槽又會影響排水性能，因此需要在噪音和性能之間尋求平衡。橫向溝槽(Lateral Groove)垂直於圓周方向，主要提供橫向抓地力，但這些溝槽的邊緣是撞擊噪音的主要來源。橫向溝槽的數量、角度以及邊緣形狀都會影響撞擊的強度和頻率特性。一些先進的花紋設計採用斜向或曲線形的橫向溝槽，以減少撞擊的突然性，降低噪音[59]。

花紋塊的剛度分布也是重要因素。花紋塊的剛度取決於其大小、形狀以及周圍溝槽的配置。剛度較高的花紋塊撞擊路面時會產生更強的脈衝，但振動衰減也更快。剛度較低的花紋塊撞擊較軟，但可能產生較長時間的振動。花紋塊的剛度還會影響接觸壓力的分布，進而影響摩擦噪音。為了優化噪音性能，現代輪胎設計通常在胎面的不同區域使用不同剛度的花紋塊，例如胎肩區域的花紋塊可能較硬以提供轉向性能，而中央區域的花紋塊可能較軟以降低噪音[60]。花紋塊上的細小切口，稱為刀槽花紋(Sipes)，主要用於提高濕地和雪地的抓地力，但這些細小結構也會影響花紋塊的整體剛度和振動特性，從而影響噪音。

橡膠配方：

橡膠配方是影響輪胎噪音的另一個關鍵因素。輪胎橡膠是一種複雜的複合材料，主要由橡膠聚合物、填充劑(如炭黑、白炭黑)、硫化劑、促進劑、防老劑等多種成分組成。橡膠的黏彈性質對噪音有重要影響。較軟的橡膠有較高的阻尼，能夠更有效地吸收振動能量，減少振動噪音，但也可能增加滾動阻力[61]。橡膠的玻璃化轉變溫度(Glass Transition Temperature)決定了其在不同溫度下的硬度變化，這會影響輪胎在不同季節和氣候條件下的噪音表現。填充劑的類型和含量也會影響橡膠的剛度和阻尼特性。白炭黑相較於傳統炭黑可以提供較低的滾動阻力和較好的濕地性能，但對噪音的影響則取決於具體的配方設計[62]。

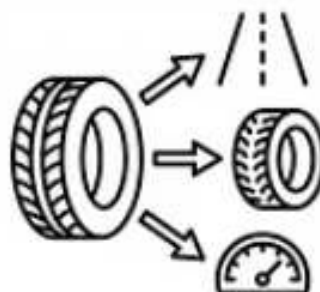
胎壓：

輪胎的負載和充氣壓力是使用條件中的重要因素。當輪胎承受較大的負載時，接觸面積增大，接觸區域內的壓力分布也會改變。較大的接觸面積意味著更多的花紋塊同時與路面接觸，這可能增加撞擊噪音的幅度。同時，較高的負載會使輪胎變形更大，可能激發更多的振動模態[63]。充氣壓力對噪音的影響則更為複雜。

較高的充氣壓力會使輪胎變硬，接觸面積減小，這可能減少某些空氣動力學噪音，但也可能增加振動噪音，因為較硬的輪胎對路面激發的響應可能更強。實驗研究顯示，充氣壓力從標準值增加 20%，輪胎噪音可能變化 1 至 2 分貝，但變化的方向取決於具體的輪胎設計和路面條件[64]。

路面特性：

對輪胎噪音的影響不亞於輪胎本身。路面的紋理可以在多個尺度上影響噪音的產生。微觀紋理 (Microtexture) 是指微米級的表面粗糙度，這主要影響輪胎與路面之間的真實接觸面積和摩擦係數。較粗糙的微觀紋理提供較高的摩擦力，這對



安全性有利，但也可能增加摩擦噪音。宏觀紋理 (Macrotexture) 是指毫米級的粗糙度變化，這主要影響排水能力和空氣流動。具有適當宏觀紋理的路面可以提供排水通道，但過於粗糙的紋理會增加輪胎的激發強度，導致更高的噪音[65]。巨觀不平整度 (Unevenness) 則是指厘米到米級的路面波動，這會激發輪胎的整體振動和車體的共振，是低頻噪音的主要來源。

路面材料的聲學特性對噪音也有重要影響。傳統的密級配瀝青路面表面堅硬光滑，聲阻抗高，幾乎不能吸收聲能。當聲波撞擊這種路面時，會被幾乎完全反射，使得噪音的傳播距離更遠。多孔瀝青路面則因為其開放的孔隙結構，可以吸收聲能，特別是對高頻噪音有顯著的吸收效果[66]。孔隙率通常在 15% 至 25% 之間，孔隙尺寸在 2 至 8 毫米範圍。當聲波進入這些孔隙時，會因為黏滯摩擦和熱傳導而損失能量，轉化為熱能。多孔路面的降噪效果在新鋪設時最為顯著，可以降低 3 至 6 分貝，但隨著使用時間增加，孔隙會被灰塵、泥沙等物質堵塞，降噪效果會逐漸衰減[67]。定期的清洗維護可以在一定程度上恢復其性能。

路面溫度和濕度：

路面溫度和濕度條件也會影響輪胎噪音。較高的路面溫度會使路面材料變軟，改變其剛度和阻尼特性，同時也會影響輪胎橡膠的特性。實驗數據顯示，路面溫度從 10 攝氏度升高到 30 攝氏度，輪胎噪音可能變化約 1 分貝[68]。濕滑路面對噪音的影響更為複雜。薄水膜可能起到潤滑作用，減少輪胎與路面之間的直接接觸和摩擦，可能降低某些摩擦噪音成分。但較厚的水膜會產生飛濺噪音，這是水被輪胎甩出時產生的聲音，可能使總噪音水準比乾燥路面高出 2 至 5 分貝[69]。此

外，積水還會影響輪胎的排水過程，產生額外的水力噪音。路面的排水性能對濕地噪音有重要影響，排水良好的路面可以減少積水，降低飛濺噪音。

車速：

車速是影響輪胎噪音最直接和顯著的因素之一。

如前所述，輪胎噪音與車速之間存在強烈的依賴關係，通常用對數函數來描述。不同類型的噪音對速度的依賴程度不同。空氣動力學噪音對速度最為敏感，其噪音值與車速的 3 至 4 次方成正比，

這意味著速度指數(對數關係中的斜率)可達 30 至 40[70]。振動噪音對速度的依賴性較弱，速度指數約為 20 至 25。這種差異導致噪音的頻譜特性隨速度而變化，高速時高頻成分的比例增加，噪音變得更加尖銳。此外，車速還會影響輪胎的動態特性，如離心力導致的輪胎變形、駐波現象等，這些都會改變輪胎的振動模態和噪音特性。

加速和減速等非穩態行駛條件也會影響輪胎噪音。在加速時，輪胎與路面之間的切向力增大，可能產生更強的摩擦噪音和花紋塊變形噪音。制動時的情況類似，而且在緊急制動時可能出現輪胎滑移，產生尖銳的摩擦噪音[71]。轉彎時，輪胎承受側向力，接觸區域的壓力分布發生變化，側向滑移也可能增加，這些都會改變噪音的產生機制和特性。

環境氣溫、濕度和大氣壓力：

環境因素如氣溫、濕度和大氣壓力也會對輪胎噪音產生影響。氣溫主要透過改變輪胎橡膠和路面材料的特性來影響噪音。低溫下橡膠變硬，阻尼減小，可能增加振動噪音。高溫下橡膠變軟，阻尼增大，可能減少振動噪音。大氣濕度主要影響聲波在空氣中的傳播，濕度較高時空氣對高頻聲波的吸收增加，可能使遠距離測量的高頻噪音略有減少[72]。大氣壓力影響空氣密度，進而影響聲速和聲波傳播特性，但這種影響通常較小。風速和風向對噪音測量有顯著影響，特別是在戶外測量時。順風會使噪音傳播得更遠，噪音值略有增加，逆風則相反。強風還會產生背景噪音，干擾測量。因此，輪胎噪音的標準測試通常要求在風速小於每秒 5 公尺的條件下進行[73]。

1.2 輪胎噪音的重要性 (Importance of Tire Noise)

輪胎噪音的重要性表現在多個層面，從公共健康到環境保護，從產品競爭力到法規合規，輪胎噪音問題已經成為現代社會必須嚴肅面對的挑戰。隨著都市化進程



的加速和汽車保有量的持續增長，交通噪音已經成為都市環境中最普遍和最嚴重的污染源之一。世界衛生組織(World Health Organization, WHO)在其《環境噪音指南》中明確指出，道路交通噪音是歐洲第二大環境健康風險因素，僅次於空氣污染[74]。在這些交通噪音中，輪胎噪音在中高速行駛時佔據主導地位，因此控制輪胎噪音對改善都市聲環境具有關鍵作用。

從公共健康的角度來看，長期暴露於交通噪音環境中會對人體健康產生多方面的不良影響。最直接的影響是聽力損傷，雖然正常交通噪音的噪音值通常不足以直接造成永久性聽力損失，但長期暴露仍可能導致聽力閾值的



輕微提升。更為普遍和嚴重的是噪音引起的非聽覺健康效應，包括睡眠障礙、心血管疾病、認知功能損害以及心理健康問題等[75]。睡眠障礙是噪音影響健康的主要途徑之一。夜間交通噪音會打斷睡眠，減少深度睡眠時間，降低睡眠品質。研究表明，夜間噪音每增加 10 分貝，睡眠障礙的風險增加約 50%[76]。長期的睡眠障礙會導致白天疲勞、注意力不集中、工作效率下降，甚至增加罹患代謝疾病的風險。

噪音對心血管系統的影響近年來受到越來越多的關注。大量流行病學研究發現，長期暴露於交通噪音環境中的人群，罹患高血壓、心肌梗塞和中風的風險顯著增加。一項涵蓋歐洲多個國家的大型研究顯示，道路交通噪音每增加 10 分貝，冠心病的相對風險增加約 8%[77]。噪音引起心血管疾病的機制可能包括：噪音作為應激源激發神經內分泌系統，導致壓力荷爾蒙(如皮質醇、腎上腺素)的釋放，長期的應激反應會損害血管功能，促進動脈粥樣硬化的發展；噪音干擾睡眠，影響身體的恢復和修復過程，間接增加心血管疾病風險；噪音引起的煩躁和不適可能導致行為改變，如減少戶外活動，影響健康的生活方式[78]。

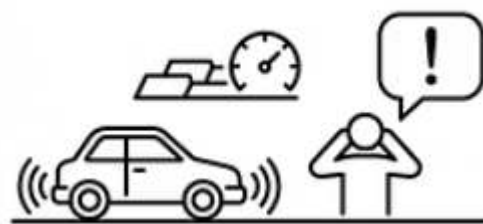
兒童是特別容易受到噪音影響的群體。研究表明，學校和住家附近的交通噪音會影響兒童的認知發展，特別是閱讀理解和記憶能力。一項針對倫敦地區兒童的研究發現，學校附近交通噪音每增加 5 分貝，學生的閱讀年齡會落後約兩個月[79]。這可能是因為噪音干擾了學習過程中的注意力集中和資訊處理，長期影響累積會導致認知發展遲緩。此外，噪音環境還可能增加兒童的壓力水準，影響情緒和社交發展。

從環境保護的角度來看，輪胎噪音是都市聲環境品質的關鍵決定因素。在許多都市地區，特別是主要道路沿線，交通噪音是主導性的噪音源。噪音地圖研究顯示，

在歐洲主要城市中，約有 30%至 40%的人口暴露於超過 55 分貝的道路交通噪音環境中，這超過了 WHO 推薦的限值[80]。高噪音水準不僅影響居民的生活品質，也會降低房地產價值，影響都市的宜居性和競爭力。研究表明，交通噪音每增加 1 分貝，住宅價格會下降約 0.5%至 1%[81]。這種經濟影響凸顯了噪音問題的社會成本，也為噪音控制提供了經濟激勵。

輪胎噪音控制是實現都市聲環境改善最具成本效益的途徑之一。相較於其他噪音控制措施，如隔音牆、低噪音路面等基礎設施改造，輪胎降噪的成本較低，而且可以產生廣泛的效益。一項歐洲的研究估計，將所有輪胎的噪音降低 3 分貝，相當於減少 50%的交通流量所產生的降噪效果[82]。考慮到減少交通流量在實際中極難實現，輪胎降噪的價值就更加凸顯。此外，輪胎降噪是一種源頭控制措施，不需要額外的基礎設施，其效益可以在所有道路上實現，包括那些無法安裝隔音牆的城區道路和住宅區道路。

從產業和市場的角度來看，輪胎噪音性能已經成為輪胎產品競爭力的重要組成部分。隨著消費者對車輛舒適性要求的提高，輪胎的噪音性能越來越受到重視。在歐盟、日本等市場，輪胎標籤法規要求輪胎產品必須標示其噪音等級，使消費者在購買時能夠直接比較不同產品的噪音性能[83]。這種資訊透明度推動輪胎製造商持續改進產品的噪音性能，以獲得市場競爭優勢。一些高階輪胎品牌將低噪音作為主要的行銷賣點，開發專門的靜音技術，並透過廣告宣傳來吸引注重舒適性的消費者。



輪胎噪音性能的改進也表現了技術進步和創新能力。開發低噪音輪胎需要深入理解噪音產生的物理機制，掌握先進的設計和模擬技術，以及具備精密的製造能力。這涉及材料科學、結構力學、聲學、計算流體力學等多個學科的知識整合。能夠持續推出性能優異的低噪音產品的企業，通常也在其他技術領域具有領先優勢，這反映了整體的研發實力和創新文化[84]。因此，輪胎噪音技術不僅是產品性能的一個方面，也是企業技術能力的重要指標。

從法規合規的角度來看，滿足日益嚴格的輪胎噪音法規是輪胎製造商進入和維持市場地位的基本要求。全球主要汽車市場都建立了輪胎噪音的法規體系，規定了噪音限值和測試方法。這些法規通常會定期更新，逐步降低噪音限值，以推動技

術進步。例如，歐盟的輪胎噪音法規(EU Regulation 2020/740)規定了不同類型輪胎的噪音限值，並計劃在未來進一步收緊[85]。不合法規要求的輪胎產品將無法在市場上銷售，這對企業的經營和市場佔有率會產生直接影響。因此，輪胎製造商必須持續投入資源進行噪音性能的研發和改進，以確保產品符合現行和未來的法規要求。

輪胎噪音問題在電動車時代變得更加突出。傳統內燃機車輛在低速時引擎噪音較為顯著，在一定程度上掩蓋了輪胎噪音。但電動車的電動馬達運轉非常安靜，使得輪胎噪音成為主要的噪音源，即使在較低速度下也很明顯[86]。這種變化對輪胎噪音控制提出了更高的要求。研究



顯示，電動車在速度低於每小時 30 公里時，輪胎噪音已經成為主要噪音源，而傳統車輛要到每小時 50 至 60 公里時輪胎噪音才成為主導[87]。隨著電動車的快速普及，如果不能有效控制輪胎噪音，都市交通噪音問題可能不會因為電動車的引入而得到預期的改善。

輪胎噪音控制也與永續發展目標密切相關。聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)中的第 11 項"永續城市和社區"明確提出要提供安全、包容、可及和永續的人類住區，其中改善環境品質包括降低噪音污染是重要內容[88]。輪胎噪音控制有助於實現這一目標，創造更加宜居的都市環境。此外，輪胎噪音性能與其他永續性指標如滾動阻力(影響燃油效率和碳排放)、耐久性(影響資源消耗)之間存在複雜的權衡關係。如何在降低噪音的同時保持或改進其他永續性能，是輪胎設計面臨的重要挑戰，也是實現整體永續性的關鍵[89]。

從社會公平的角度來看，交通噪音往往不成比例地影響社會經濟地位較低的群體。研究表明，低收入社區通常位於交通繁忙的主要道路附近，居民暴露於較高的交通噪音水準。這些社區的住宅通常隔音性能較差，居民缺乏遷移到更安靜環境的經濟能力[90]。這種不平等的噪音暴露加劇了健康不平等，因為已經面臨其他健康風險因素(如空氣污染、經濟壓力)的人群，還要承受噪音的額外健康負擔。透過輪胎噪音控制等源頭措施來降低整體交通噪音水準，可以更公平地惠及所有社區，包括那些缺乏資源實施其他噪音緩解措施的地區，這對於實現環境正義具有重要意義[91]。

1.3 輪胎噪音研究發展史 (History of Tire Noise Research)

輪胎噪音研究的歷史與汽車工業的發展密切相關，經歷了從現象觀察到科學研究，從經驗設計到精密模擬的演變過程。回顧這段歷史不僅有助於理解當前研究的脈絡，也能為未來的發展方向提供啟示。



輪胎噪音最初被認識是在 20 世紀初汽車開始普及的時期。早期的輪胎是光面輪胎(Smooth Tire)，主要關注的是耐久性和基本性能，噪音問題尚未受到重視。隨著車速的提高和汽車數量的增加，輪胎噪音開始引起注意。1920 年代，一些研究者開始注意到胎面花紋對噪音的影響，這主要是因為為了提高濕地抓地力而引入的花紋設計產生了明顯的噪音[92]。然而，這一時期的研究主要是基於經驗觀察，缺乏系統的科學方法。

1930 至 1940 年代，隨著聲學理論的發展和測量技術的進步，輪胎噪音研究開始進入科學階段。這一時期的研究主要關注噪音的量測方法和基本特性。研究者開始使用麥克風和初步的頻譜分析儀器來量測輪胎噪音，並嘗試建立標準化的測試程序[93]。然而，由於當時的技術限制，量測結果的可重複性和準確性仍然不理想。這一時期對輪胎噪音產生機制的理解還非常有限，主要停留在定性的描述層面。

1950 至 1960 年代是輪胎噪音研究取得重要進展的時期。這一時期最重要的貢獻是對輪胎噪音產生機制的深入研究。

Hayden 等研究者在 1960 年代初期的工作中，首次系統地區分了輪胎噪音的不同產生機制，包括空氣泵浦、振動輻射和撞擊噪音等[94]。這些早期的機制分析為後續的研究奠定了理論基礎。同時，變節距設計的概念在這一時期被提出。研究者認識到規則的花紋排列會產生強烈的純音成分，透過使用不同長度的花紋節距可以將噪音能量分散到更寬的頻率範圍，從而降低主觀煩擾[95]。這一概念的提出對輪胎設計產生了深遠影響，至今仍是低噪音輪胎設計的基本原則之一。



1970 年代是輪胎噪音研究快速發展的時期，這主要得益於環境保護意識的提升和相關法規的建立。1970 年代初期，美國、歐洲和日本等主要汽車市場開始關注交通噪音問題，並著手制定車輛和輪胎的噪音法規。美國在 1976 年發布了首個

輪胎噪音法規，歐洲也在 1970 年代後期建立了類似的法規體系[96]。這些法規的建立極大地推動了輪胎噪音研究的發展，因為輪胎製造商需要科學的方法來理解和控制噪音，以滿足法規要求。這一時期的研究重點包括標準化測試方法的制定、噪音限值的確定以及降噪技術的開發。

1970 年代也是測量技術大幅進步的時期。噪音計(Sound Level Meter)的標準化和普及使得噪音測量更加準確和一致。頻譜分析儀的發展使研究者能夠詳細分析噪音的頻率組成，這對理解不同的噪音產生機制至關重要[97]。此外，這一時期開始使用近場測量方法，將麥克風放置在非常靠近輪胎的位置，以更準確地捕捉輪胎本身產生的噪音，排除其他噪音源的干擾。這種方法對於研究輪胎噪音的產生機制和評估不同設計的降噪效果非常有用。

1980 年代的研究重點轉向更深入的機制分析和數值模擬方法的應用。這一時期，有限元素法(Finite Element Method, FEM)開始被應用於輪胎結構的分析。雖然早期的計算能力有限，只能處理相對簡化的模型，但這標誌著輪胎噪音研究從純粹的實驗科學向理論預測和數值模擬方向的轉變[98]。研究者開始嘗試建立輪胎振動和噪音輻射的數學模型，這些模型雖然簡化，但幫助建立了對基本物理過程的定量理解。這一時期也開始重視路面特性對輪胎噪音的影響，研究者認識到即使是相同的輪胎，在不同的路面上產生的噪音也可能有顯著差異。

1990 年代是計算機技術快速發展的時期，這對輪胎噪音研究產生了革命性的影響。計算能力的大幅提升使得複雜的有限元素模型成為可能，研究者可以模擬包含詳細花紋和結構的完整輪胎模型[99]。這一時期也開始應用邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)來模擬聲場，結合有限元素法的結構分析，可以實現從振動到聲輻射的完整模擬。這種多物理場耦合模擬的能力使得輪胎噪音的預測精度大幅提高，也為優化設計提供了強有力的工具。

1990 年代也是輪胎噪音法規進一步收緊的時期。歐盟在 1990 年代中期修訂了輪胎噪音法規，將噪音限值降低了約 1 至 2 分貝[100]。這看似微小的改進實際上需要顯著的技術進步，因為輪胎噪音的降低往往伴隨著其他性能的權衡。這一時期輪胎製造商開始更系統地應用噪音優化技術，包括先進的變節距設計、優化的花紋溝槽形狀、以及特殊的橡膠配方等。這一時期也開始關注輪胎噪音的主觀品質，不僅僅關注噪音值的降低，也關注聲音特徵的改善。心理聲學參數如響度、尖銳度等開始被用於評估輪胎噪音[101]。

2000 年代初期，輪胎噪音研究繼續在測量技術、模擬方法和降噪技術等多個方面取得進展。這一時期一個重要的發展是近場噪音測量方法的標準化。ISO 11819-2 標準在 2000 年發布，規定了使用近場測量方法(也稱為 CPX 方法, Close Proximity Method)來評估路面的聲學性能[102]。雖然這個標準主要針對路面，但也推動了近場測量技術在輪胎噪音研究中的應用。近場測量相較於傳統的透過噪音測量，可以更準確地反映輪胎與路面交互作用產生的噪音，減少其他因素的干擾。

這一時期另一個重要進展是計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)在輪胎噪音研究中的應用。CFD 可以模擬空氣在花紋溝槽中的流動過程，幫助理解空氣泵浦和空氣共鳴等空氣動力學噪音機制[103]。雖然 CFD 模擬計算量巨大，但隨著計算能力的提升，這種方法在研究機構和領先企業中逐漸得到應用。CFD 與 FEM 的耦合模擬可以實現對輪胎噪音多種產生機制的綜合分析，為設計優化提供更全面的指導。

2000 年代中後期，歐盟推動了一系列重要的輪胎噪音法規改革。2005 年，歐盟發布了新的輪胎噪音限值，相較於 1990 年代的標準進一步降低了 2 至 3 分貝[104]。更重要的是，歐盟在 2012



年實施了輪胎標籤法規(EU Regulation No 1222/2009)，要求輪胎必須標示其噪音等級，以及滾動阻力和濕地抓地力等級。這一法規的實施使得消費者可以直接比較不同輪胎的性能，對市場產生了重要影響[105]。為了獲得較好的標籤等級，輪胎製造商加大了對降噪技術的投入，推動了整個產業的技術進步。

2010 年代是輪胎噪音研究在多個方面取得突破的時期。在測量技術方面，聲源定位技術(如麥克風陣列和聲學全息)得到廣泛應用。這些技術可以精確識別輪胎不同部位對噪音的貢獻，例如可以區分胎面中央、胎肩以及胎側等不同區域的噪音輻射[106]。這種精細的噪音源識別能力對於針對性的降噪設計非常有價值。在模擬技術方面，多尺度、多物理場的耦合模擬成為可能。研究者可以在同一個模擬框架中處理從微觀的材料特性到宏觀的結構振動和聲輻射的多個層次[107]。這一時期對路面噪音的研究也取得重要進展。研究者認識到，輪胎噪音控制不能僅僅關注輪胎本身，路面特性同樣重要。多孔隙瀝青路面的降噪機制得到深入研究，研究者透過理論分析和實驗測量，揭示了孔隙結構的尺寸、分布以及連通性

如何影響聲吸收效果[108]。這些研究推動了低噪音路面技術的發展，也促進了輪胎與路面協同優化的思路。一些研究開始探討如何設計輪胎和路面的匹配，以實現最佳的整體降噪效果。

2010 年代後期，機器學習和人工智慧技術開始被引入輪胎噪音研究。這些技術可以處理大量的實驗數據，識別複雜的模式和關係，為噪音預測和優化設計提供新的工具[109]。例如，神經網絡可以學習輪胎設計參數與噪音性能之間的非線性關係，在給定設計約束條件下快速預測噪音水準。遺傳算法等優化方法可以在龐大的設計空間中搜索最優解，例如尋找最佳的花紋節距序列。雖然這些技術還處於應用的早期階段，但已經顯示出巨大的潛力。

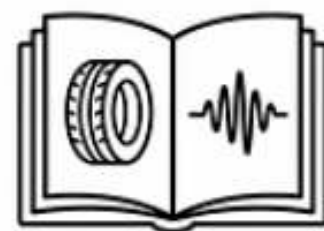
進入 2020 年代，輪胎噪音研究面臨新的挑戰和機遇。電動車的快速普及使得輪胎噪音問題變得更加突出，因為電動馬達的安靜運轉使輪胎噪音成為主要噪音源，即使在較低速度下也很明顯。這對輪胎降噪技術提出了更高的要求，也推動了針對電動車的專用輪胎開發[110]。此外，自動駕駛技術的發展可能改變車輛的使用模式和對舒適性的要求，這也會影響輪胎噪音的重要性和研究方向。

永續發展目標對輪胎噪音研究也產生了重要影響。輪胎性能的多目標優化變得更加複雜，需要同時考慮噪音、滾動阻力、耐久性、安全性等多個方面。這要求研究方法更加系統和全面，不能單純追求某一個性能指標的極致優化[111]。循環經濟的理念也開始影響輪胎設計，如何在輪胎的整個生命週期內維持良好的噪音性能，包括在磨損後期，成為新的研究課題。此外，輪胎材料的永續性，如使用可再生原料、減少有害物質等，也需要在不損害噪音性能的前提下實現[112]。

當代的輪胎噪音研究已經形成了一個多學科交叉、理論與實驗並重、模擬與測試互補的完整體系。從基礎科學研究到工程應用，從材料開發到結構設計，從測試評估到法規制定，輪胎噪音領域的知識體系不斷完善和深化。然而，仍然有許多挑戰有待解決，如更準確的噪音預測模型、更有效的降噪技術、噪音與其他性能的更好平衡等。這些挑戰也是未來研究的方向和機遇。

1.4 本書架構與內容 (Structure and Content of This Book)

本書旨在為讀者提供關於輪胎噪音的全面、系統和深入的知識體系，涵蓋從基本原理到前沿技術，從量測方法到法規標準，從降噪策略到未來趨勢的各個方面。本書的編排遵循從基礎到應用、從理論到施行



的邏輯順序，使讀者能夠循序漸進地建立對輪胎噪音問題的完整理解。

第二章「輪胎噪音產生原理」深入探討輪胎噪音產生的物理機制。本章首先介紹輪胎噪音的基本概念，包括聲學基礎理論和輪胎結構基礎。接著詳細分析各種噪音產生機制，包括振動噪音、空氣泵浦效應、空氣共鳴、黏著-滑動效應以及衝擊噪音等。每種機制的物理原理、數學描述以及影響因素都將得到系統闡述。本章還探討輪胎結構與噪音的關係，分析胎面花紋、胎體結構、材料特性等如何影響噪音的產生。此外，路面特性對噪音的影響也是本章的重點內容，包括路面紋理、路面材料以及路面狀況等因素的作用機制[113]。透過本章的學習，讀者將建立對輪胎噪音產生過程的深入理解，為後續章節的學習奠定堅實的理論基礎。

第三章「輪胎摩擦噪音」專門聚焦於輪胎與路面摩擦產生的噪音。本章首先介紹摩擦噪音的基本理論，包括摩擦學基礎和聲學理論。接著詳細分析輪胎與路面接觸特性，包括接觸面積與壓力分布、接觸剛度以及滑移特性等。摩擦力與噪音的關係是本章的核心內容，將探討不同摩擦模式下的噪音產生機制。本章還分析不同路面條件下的摩擦噪音特性，包括乾燥路面、濕滑路面以及粗糙路面等。速度對摩擦噪音的影響也將得到詳細討論。本章的內容對於理解輪胎噪音的一個重要組成部分具有關鍵意義。

第四章「輪胎噪音量測方法」全面介紹輪胎噪音的各種量測技術。本章首先概述量測方法的分類和特點，然後詳細介紹透過噪音量測、滾動噪音量測、近場噪音量測等標準方法。每種方法的量測原理、設置程序、測試條件以及數據處理都將得到詳細說明。本章還介紹先進的量測技術，如聲強量測和聲源定位技術，包括麥克風陣列、聲學全息以及波束成形技術等。量測不確定性與誤差分析也是本章的重要內容，幫助讀者正確理解和評估量測結果[114]。透過本章的學習，讀者將掌握輪胎噪音量測的實用技能。

第五章「輪胎噪音量測標準」系統介紹國際和各國的輪胎噪音量測標準。本章首先概述國際標準體系的結構和發展。接著詳細介紹 ISO 標準，包括 ISO 362 系列、ISO 13325 標準以及 ISO 10844 測試路面標準等。歐盟法規是本章的重點內容之一，包括 ECE R117 法規、輪胎標



籤法規以及噪音限值要求等。本章還介紹美國標準和亞洲主要國家的標準，包括日本標準和其他亞洲國家標準。標準的發展趨勢分析將幫助讀者理解未來的法規

方向[115]。本章的內容對於從事輪胎認證測試和法規合規工作的讀者具有重要的參考價值。

第六章「輪胎噪音法規與限值」深入探討全球輪胎噪音法規體系和限值要求。本章首先提供全球噪音法規的概覽，然後詳細介紹輪胎噪音的分類與等級系統。不同車型的噪音限值是本章的重點，包括乘用車、商用車以及特殊車輛的具體要求。本章還回顧噪音限值的時程演變，幫助讀者理解法規收緊的歷史脈絡。認證與符合性評估程序也將得到詳細說明。違規處罰與市場監督機制的介紹將幫助讀者理解法規的執行和影響。

第七章「輪胎噪音頻譜分析」介紹輪胎噪音的信號處理和分析方法。本章首先回顧聲學基礎理論，包括聲壓、噪音值、頻率以及加權等概念。接著介紹時域分析、頻域分析以及時頻分析方法。FFT 分析、倍頻程分析、窄頻分析等技術的原理和應用將得到詳細說明。短時傅立葉變換、小波分析、階次追蹤等先進的時頻分析方法也將被介紹[116]。本章還探討輪胎噪音的特徵頻率及其物理意義。噪音品質評估是本章的重要內容，包括響度、尖銳度、粗糙度、波動強度等心理聲學參數的計算和應用。

第八章「輪胎噪音模擬與預測」介紹輪胎噪音的數值模擬方法。本章首先概述各種模擬方法的特點和適用範圍。有限元素法是本章的重點內容之一，包括結構振動分析、聲學有限元以及流固耦合分析等。邊界元素法用於聲場模擬的原理和應用也將得到詳細介紹。統計能量分析作為一種適用於高頻的方法也將被討論。本章還介紹經驗與半經驗模型，以及新興的機器學習預測方法[117]。模擬結果驗證的重要性的方法也將得到強調。本章的內容對於從事輪胎設計和研發的讀者具有重要指導意義。

第九章「輪胎噪音降低技術」全面介紹各種降噪技術和策略。本章首先概述降噪技術的分類和發展趨勢。胎面花紋設計優化是本章的核心內容，包括變節距設計、花紋溝槽優化以及胎肩設計等。輪胎結構改進的各種方法，如胎體層設計、帶束層優化以及胎側設計等也將得到詳細討論。材料選擇與配方對噪音的影響將被深入分析，包括橡膠配方、阻尼材料以及填充材料等[118]。本章還介紹各種降噪裝置，如胎內吸音材料、輪圈共鳴器等。路面降噪技術作為系統降噪策略的一部分也將被討論，包括多孔隙路面、低噪音路面以及路面維護等。

第十章「輪胎噪音與環境影響」從更廣闊的視角探討輪胎噪音的社會和環境意義。本章首先討論交通噪音與公共健康的關係，包括噪音對聽力、睡眠、心血管系統以及認知功能的影響。噪音污染評估方法將得到詳細介紹，包括噪音地圖、暴露評估以及影響評估等。本章還探討噪音控制策略，從技術、管理和政策等多個層面分析如何有效降低噪音污染[119]。法規與政策的作用以及經濟與社會成本的分析將幫助讀者理解輪胎噪音問題的複雜性和重要性。未來發展趨勢的討論將為讀者提供前瞻性的視角。



第十一章「電動車輪胎噪音特性」專門探討電動車時代輪胎噪音面臨的新挑戰。本章首先分析電動車的噪音特徵，說明為什麼輪胎噪音在電動車上變得更加突出。電動車輪胎噪音的重要性以及電動車輪胎設計的特殊考量將得到詳細討論，包括低滾動阻力、承載能力以及降噪需求等多重目標的平衡[120]。本章還介紹電動車輪胎噪音的量測方法和標準，以及針對電動車的降噪技術。

第十二章「特殊應用輪胎噪音」介紹各種特殊應用場景下的輪胎噪音特性。本章涵蓋競賽輪胎、越野輪胎、冬季輪胎、重載輪胎、航空輪胎以及特種車輛輪胎等。每種輪胎類型的特殊設計要求、噪音特性以及控制方法都將得到討論。本章的內容拓寬了讀者對輪胎噪音問題的認識，展示了不同應用場景下的獨特挑戰和解決方案。

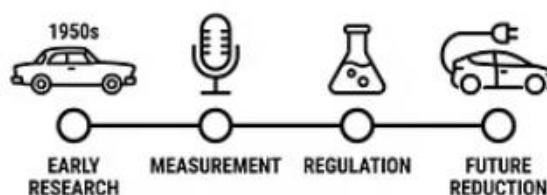
第十三章「輪胎噪音測試設備與儀器」提供測試設備的實用指南。本章詳細介紹各種麥克風與傳感器的類型、規格和選擇標準。數據採集系統的組成和配置也將得到說明。分析軟體的功能和使用方法將被介紹。本章還討論測試場地與設施的要求，包括室外測試場、半消音室以及滾筒測試台等。校準與維護的程序和重要性也將得到強調[121]。本章的內容對於建立和運營輪胎噪音測試實驗室的讀者具有重要的參考價值。

第十四章「案例研究」透過實際案例展示輪胎噪音問題的解決過程。本章包含乘用車輪胎噪音優化案例、商用車輪胎噪音控制案例、電動車輪胎降噪案例、路面改善降噪案例以及法規符合性案例等。每個案例都詳細描述問題背景、分析過程、解決方案以及結果評估，為讀者提供從理論到施行的完整示範。這些案例來自產業經驗和研究項目，具有重要的參考價值。

第十五章「未來發展與展望」展望輪胎噪音研究和技術的未來方向。本章討論當前的研究趨勢，包括新的理論方法、測試技術以及模擬工具等。新技術與創新是本章的重點，包括智慧輪胎、主動降噪技術以及新材料應用等。法規發展方向的分析將幫助讀者預見未來的市場要求。永續發展考量在輪胎噪音技術中的重要性也將得到討論[122]。本章為讀者提供前瞻性的視角，啟發未來的研究和創新。

結論 (Conclusions)

綜合本章之系統性論述，可以明確指出：輪胎噪音並非附屬於車輛噪音系統的次要問題，而是現代道路交通噪音中最具決定性、同時也是最具挑戰性的核心聲源之一。其複雜性源自於



輪胎、路面與行駛條件之間高度動態且多尺度的交互作用，使得任何單一因素的調整，往往會在其他性能面向引發連鎖影響。

本章所建構之輪胎噪音知識體系顯示，輪胎噪音是一種同時具備結構振動噪音與空氣動力學噪音特性的複合型聲學現象，其頻譜分佈橫跨低頻至高頻，並在中頻區段與人耳感知高度重疊，因而在主觀煩擾程度上具有放大效應。這也說明了為何僅以單一 A 加權噪音值作為評估指標，往往不足以完整反映輪胎噪音對人類感受與環境品質的實際影響。

從工程觀點而言，本章進一步確認，輪胎噪音控制無法透過單一設計手段達成，而必須採取整合式策略，涵蓋胎面花紋節距最佳化、溝槽空氣動力行為控制、結構振動模態調校、材料阻尼特性設計，以及與路面聲學特性之協同考量。此一多目標設計問題的本質，正是現代輪胎噪音研究逐步由經驗導向轉向數值模擬、資料分析與系統最佳化的根本原因。

在環境與政策層面，本章亦清楚揭示輪胎噪音在公共健康與都市治理中的關鍵角色。隨著電動車降低動力系統噪音遮蔽效果，輪胎噪音將在更低速域即顯著暴露，若缺乏前瞻性的技術與法規回應，未來都市交通噪音問題不僅不會自然改善，反而可能因交通量持續成長而惡化。因此，輪胎噪音控制應被視為源頭治理策略中最具成本效益與長期影響力的手段之一。

總體而言，本章的結論在於確立一個核心認知：輪胎噪音是一項跨越聲學、材料、結構、交通與公共健康領域的系統性問題，其有效解決仰賴科學理解、工程創新與政策治理三者的同步推進。此一認知不



僅為後續章節的深入技術分析提供方向，也為未來在低噪音輪胎設計、道路聲學優化與永續交通政策制定上，奠定不可或缺的理论與實務基礎。

參考文獻

- [1] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. INFORMEX.
- [2] Pallas, M. A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conti, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101.
- [3] Kropp, W., Bécot, F. X., & Barrelet, S. (2000). On the sound radiation from tyres. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(5), 769-779.
- [4] International Organization for Standardization. (2017). ISO 362-1:2015 Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 1: M and N categories. ISO.
- [5] Hayden, R. E. (1971). Roadside noise from the interaction of a rolling tire with the road surface. *Proceedings of the Purdue Noise Control Conference*, 59-64.
- [6] Nilsson, N. A. (1980). Air-related mechanisms in tire noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 70(1), 1-12.
- [7] Sandberg, U. (2001). Tyre/road noise—Myths and realities. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [8] Bendtsen, H., Andersen, B., & Kalman, B. (2009). Noise reducing pavements in Europe—State of the art in 2009. *Road Directorate, Danish Road Institute*.
- [9] Iwao, K., & Yamazaki, I. (1996). A study on the mechanism of tire/road noise. *JSAE Review*, 17(2), 139-144.
- [10] Bravo, T., & Gonzalez, A. (2014). Interior noise prediction in vehicles: A state of the art review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 228(6), 709-728.
- [11] Biermann, J. W., & Herr, P. L. (1995). Tire noise reduction techniques. *SAE Technical Paper* 951354.
- [12] European Commission. (2020). Commission Regulation (EU) 2020/740 of 25 May 2020 on the type-approval of motor vehicles with regard to the sound level of their tyres and amending Regulation (EU) 2019/2144. *Official Journal of the European Union*, L 177/15.

- [13] Sandberg, U., & Glaeser, K. P. (2008). The close-proximity method for characterization of tyre/road noise. *Inter-Noise 2008*, Shanghai, China.
- [14] Kuijpers, A., & van Blokland, G. (2001). Tyre/road noise models in the last two decades: A critical evaluation. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [15] Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models* (2nd ed.). Springer.
- [16] Saemann, E. U. (2003). Tire noise generation: Mechanisms, modeling, and reduction. *Tire Technology International Annual Review*, 42-47.
- [17] Kim, G. J., & Holland, K. R. (2001). Analysis of tire surface vibrations using scanning laser vibrometry. *SAE Technical Paper 2001-01-1531*.
- [18] Wullens, F., & Kropp, W. (2004). A three-dimensional contact model for tyre/road interaction in rolling conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(4), 702-711.
- [19] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(6), 952-958.
- [20] Nilsson, N. A., Söderqvist, S., & Bennerhult, O. (1979). Noise characteristics and noise reduction of car tyres. *VTI Report 172A*.
- [21] Hamet, J. F., & Klein, P. (2000). Road texture and tire noise. *Proceedings of Inter-Noise 2000*, Nice, France.
- [22] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *Proceedings of Euronoise 2003*, Naples, Italy.
- [23] European Tyre and Rim Technical Organisation. (2021). *Standards manual*. ETRTO.
- [24] Descoriet, J. L. (1981). A model for tyre/road noise generation. *Proceedings of Inter-Noise 1981*, Amsterdam, Netherlands.
- [25] Beckenbauer, T. (2000). Influence of texture on noise. In *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies* (pp. 333-344). ASTM International.
- [26] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2000). Texturing of cement concrete pavements to reduce traffic noise. *Noise Control Engineering Journal*, 48(6), 155-161.

- [27] Dare, T., Nejad, F. M., & Tighe, S. L. (2015). Sound absorption capacity of asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(4), 244-251.
- [28] Morgan, P. A. (2006). *Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces*. Transport Research Laboratory.
- [29] Teti, L., de León, G., del Pizzo, A., Moro, A., Bianco, F., Fredianelli, L., & Licitra, G. (2020). Modelling the acoustic performance of newly laid low-noise pavements. *Construction and Building Materials*, 247, 118509.
- [30] Mioduszewski, P., Ejsmont, J. A., Grabowski, J., & Karpinski, D. (2014). Noise map validation by continuous noise monitoring. *Applied Acoustics*, 72(8), 582-589.
- [31] Biesse, F., Gauthier, A., & Gerges, Y. (2016). Tire-pavement noise: Assessment of the influence of tire wear on tire-pavement noise level. *Transportation Research Record*, 2571(1), 71-77.
- [32] Sandberg, U., Goubert, L., & Bendtsen, H. (2018). The influence of environmental factors on tire/road noise. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 257, 5547-5558.
- [33] Oshino, Y., Mikami, T., Tachibana, H., & Yano, H. (2001). A study on reduction of wet road noise. *JSAE Review*, 22(2), 207-212.
- [34] Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1), 113-123.
- [35] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer.
- [36] Bies, D. A., & Hansen, C. H. (2009). *Engineering noise control: Theory and practice* (4th ed.). CRC Press.
- [37] Li, T., Feng, J., & Burdisso, R. (2018). An analytical model for tire-pavement noise prediction based on statistical energy analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 143(5), 2796-2806.
- [38] Lopez, I., Blom, R., Roozen, N. B., & Nijmeijer, H. (2011). Modelling vibrations on deformed rolling tyres—a modal approach. *Journal of Sound and Vibration*, 307(3-5), 481-494.
- [39] Nilsson, N. A. (1979). Air-related mechanisms of tyre noise generation. *Journal of Sound and Vibration*, 70(1), 1-12.

- [40] Kindt, P., Sas, P., & Desmet, W. (2009). Development and validation of a three-dimensional ring-based structural tyre model. *Journal of Sound and Vibration*, 326(3-5), 852-869.
- [41] Gagen, M. J. (1999). Novel acoustic sources from squealing and skidding tyres. *Applied Acoustics*, 58(4), 405-426.
- [42] Kim, S., Lee, S., Sung, J., Hong, S., & Kim, B. (2006). Structure-borne noise caused by the vibrational modes of automotive wheels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(11), 1527-1537.
- [43] Zhang, X., Jonasson, H., Kropp, W., & Squicciarini, G. (2015). Separation of contribution of tyre vibration and acoustic radiation to interior vehicle noise. *Applied Acoustics*, 88, 78-84.
- [44] European Parliament. (2001). Directive 2001/43/EC of the European Parliament and of the Council amending Council Directive 92/23/EEC relating to tyres for motor vehicles and their trailers. *Official Journal of the European Communities*, L 211/25.
- [45] Reiter, W., & Eichberger, A. (2020). Structure-borne tire noise: Simulation approach and transfer path analysis for different road conditions. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 4(2), 133-146.
- [46] Otto, N., Amman, S., Eaton, C., & Lake, S. (2001). Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *SAE Technical Paper 2001-01-1441*.
- [47] Taryma, S., & Blume, R. (2013). A study on transient tire noise. *SAE Technical Paper 2013-01-1974*.
- [48] Brinkmeier, M., Nackenhorst, U., Petersen, S., & von Estorff, O. (2008). A finite element approach for the simulation of tire rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 309(1-2), 20-39.
- [49] Phillips, A. W., & Kindt, P. (2013). Structural modifications to reduce tire whine noise. *Tire Science and Technology*, 41(4), 242-256.
- [50] Moon, S. I., Cho, J. R., & Jeong, W. B. (2011). Prediction and improvement of vibration and noise of a tire. *International Journal of Automotive Technology*, 12(5), 725-732.

- [51] Sandberg, U. (1998). Noise emissions of road vehicles—Effect of regulations. *OECD Working Group on Transport*, ENV/EPOC/PPC/T(98)3/FINAL.
- [52] Bergmann, A., Büter, A., & Gauterin, F. (2012). Influencing parameters on tire-road noise and possibilities for noise reduction. *ATZ worldwide*, 114(11), 14-18.
- [53] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). UN Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance. *E/ECE/324/Add.116/Rev.2*.
- [54] Paje, S. E., Luong, J., Vázquez, V. F., Bueno, M., & Miró, R. (2017). Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction. *Construction and Building Materials*, 47, 789-798.
- [55] Korunović, N., Trajanović, M., & Stojković, M. (2007). Finite element model for steady-state rolling tire analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 1(1), 63-79.
- [56] Lippmann, S. A., & Oblizajek, K. L. (1978). Optimization of tread pattern noise by sequence variation. *Tire Science and Technology*, 6(3), 128-142.
- [57] Hegmon, R. R. (1985). Computer-aided pitch sequence optimization. *Tire Science and Technology*, 13(3), 168-188.
- [58] Cao, Z., Bécot, F. X., & Kropp, W. (2014). An experimental study on the role of the air-pumping effect in the tire/road interaction noise. *Applied Acoustics*, 79, 28-35.
- [59] Gauterin, F., Wiese, K., Wies, B., & Kneissler, M. (2007). Influence of tire design and vehicle properties on the rolling noise emission of automobiles. *Tire Science and Technology*, 35(4), 223-239.
- [60] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2019). A survey on modeling and simulation approaches for tire dynamics. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 12(2), 131-159.
- [61] Molisani, L. R., Burdisso, R. A., & Tsihlias, D. (2003). A coupled tire structure/acoustic cavity model. *International Journal of Solids and Structures*, 40(19), 5125-5138.

- [62] Kim, J. H., Jeong, H. Y., & Song, S. H. (2015). The effects of silica and carbon black in tire tread compounds on tire rolling resistance. *Rubber Chemistry and Technology*, 88(4), 568-576.
- [63] Samuels, S. E. (1982). On the effect of load on tyre noise. *Journal of Sound and Vibration*, 84(3), 389-402.
- [64] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Influence of inflation pressure on tire/road noise emission. In *Tyre/Road Noise Reference Book* (pp. 243-248). INFORMEX.
- [65] Rasmussen, R. O., Garber, S. I., Fick, G. J., Ferragut, T. R., & Wiegand, P. D. (2008). *How to reduce tire-pavement noise: Better practices for constructing and texturing concrete pavement surfaces* (Report No. TPF-5(127)). National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.
- [66] Anfosso-Lédée, F., & Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tyre-road noise. *Applied Acoustics*, 68(1), 1-16.
- [67] Sandberg, U., & Goubert, L. (2011). PERSUADE—A European project for exceptional noise reduction by means of poroelastic road surfaces. *Proceedings of Inter-Noise 2011*, Osaka, Japan.
- [68] Bühlmann, E., Ziegler, T., & Heutschi, K. (2014). Temperature effects on tyre/road noise—Validation of a temperature correction for swiss road traffic noise calculations. *Applied Acoustics*, 64(2), 127-137.
- [69] Ongel, A., Harvey, J., & Kohler, E. (2008). Investigation of noise, vibration, and harshness behavior of rubber modified asphalt concrete mixtures. *Transportation Research Record*, 2058(1), 27-34.
- [70] Ejsmont, J. A., Sandberg, U., & Taryma, S. (2014). Influence of tread pattern on tire/road noise. *Tire Science and Technology*, 42(3), 184-200.
- [71] Tanaka, S., Abe, K., Sakamoto, H., & Sakai, H. (2010). Mechanism of squeal noise generation from tires. *Tire Science and Technology*, 38(2), 180-196.
- [72] Piercy, J. E., Embleton, T. F., & Sutherland, L. C. (1977). Review of noise propagation in the atmosphere. *Journal of the Acoustical Society of America*, 61(6), 1403-1418.

- [73] International Organization for Standardization. (2015). ISO 362-1:2015 Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 1: M and N categories. ISO.
- [74] World Health Organization. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.
- [75] Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332.
- [76] Münzel, T., Schmidt, F. P., Steven, S., Herzog, J., Daiber, A., & Sørensen, M. (2018). Environmental noise and the cardiovascular system. *Journal of the American College of Cardiology*, 71(6), 688-697.
- [77] Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N., & Ising, H. (2005). Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology*, 16(1), 33-40.
- [78] Recio, A., Linares, C., Banegas, J. R., & Díaz, J. (2016). Road traffic noise effects on cardiovascular, respiratory, and metabolic health: An integrative model of biological mechanisms. *Environmental Research*, 146, 359-370.
- [79] Clark, C., Crombie, R., Head, J., van Kamp, I., van Kempen, E., & Stansfeld, S. A. (2012). Does traffic-related air pollution explain associations of aircraft and road traffic noise exposure on children's health and cognition? A secondary analysis of the United Kingdom sample from the RANCH project. *American Journal of Epidemiology*, 176(4), 327-337.
- [80] European Environment Agency. (2020). *Environmental noise in Europe — 2020*. EEA Report No 22/2019. Publications Office of the European Union.
- [81] Navrud, S. (2002). The state-of-the-art on economic valuation of noise. Final report to European Commission DG Environment. *Department of Economics and Social Sciences, Agricultural University of Norway*, 14(24), 1-42.
- [82] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Potential for lowering of noise from tyres. In *Tyre/Road Noise Reference Book* (pp. 411-438). INFORMEX.
- [83] European Commission. (2009). Regulation (EC) No 1222/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the labelling of tyres with

respect to fuel efficiency and other essential parameters. *Official Journal of the European Union*, L 342/46.

- [84] van Blokland, G., & Peeters, B. (2013). The noise emission model for European road traffic. *Deliverable D11, IMAGINE project*.
- [85] European Commission. (2020). Commission Regulation (EU) 2020/740 of 25 May 2020 on the type-approval of motor vehicles with regard to the sound level of their tyres and amending Regulation (EU) 2019/2144. *Official Journal of the European Union*, L 177/15.
- [86] Pallas, M. A., Lelong, J., & Chatagnon, R. (2016). Characterisation of tyre/road noise emission and assessment of the associated uncertainty as a function of the operating conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 123-135.
- [87] Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59-64.
- [88] 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.
- [89] Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Ascari, E., & Fredianelli, L. (2017). Durability and variability of the acoustical performance of rubberized road surfaces. *Applied Acoustics*, 120, 74-89.
- [90] Casey, J. A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D. J., Fristrup, K., Ogburn, E. L., & James, P. (2017). Race/ethnicity, socioeconomic status, residential segregation, and spatial variation in noise exposure in the contiguous United States. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 077017.
- [91] Brink, M., Schäffer, B., Vienneau, D., Foraster, M., Pieren, R., Eze, I. C., ... & Probst-Hensch, N. (2019). A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise. *Environment International*, 125, 277-290.
- [92] Gerhardt, R., & Kraus, P. (1926). Über die Geräuschbildung bei Kraftfahrzeugreifen. *Kautschuk*, 2, 33-38.

- [93] Nixon, C. W., & von Gierke, H. E. (1959). Experiments on the bone-conduction threshold in a free sound field. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31(8), 1121-1125.
- [94] Hayden, R. E. (1971). Roadside noise from the interaction of a rolling tire with the road surface. *Proceedings of the Purdue Noise Control Conference*, West Lafayette, Indiana, 59-64.
- [95] Lippmann, S. A., & Oblizajek, K. L. (1974). The pitch sequence optimization process. *Tire Science and Technology*, 2(4), 229-241.
- [96] United States Environmental Protection Agency. (1976). *Noise emission standards for transportation equipment; interstate rail carriers* (40 CFR Part 201). Federal Register 41:2184.
- [97] Nilsson, N. A. (1976). Differences between tyre measurements in laboratories and on the road. *Proceedings of Inter-Noise 1976*, Washington, DC.
- [98] Saigal, S., Iwama, T., Chaplin, G. C., & Chanda, G. (1986). Tyre cavity resonance with acoustic absorbers. *SAE Technical Paper* 861410.
- [99] Larsson, K., & Kropp, W. (2002). A high-frequency three-dimensional tyre model based on two coupled elastic layers. *Journal of Sound and Vibration*, 253(4), 889-908.
- [100] European Parliament and Council. (1995). Directive 95/54/EC adapting to technical progress Council Directive 92/23/EEC relating to tyres for motor vehicles and their trailers. *Official Journal of the European Communities*, L 265/2.
- [101] Parizet, E., Hamzaoui, N., & Sabatié, G. (2005). Comparison of some listening test methods: A case study. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2), 356-364.
- [102] International Organization for Standardization. (2017). ISO 11819-2:2017 Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. ISO.
- [103] Chiu, Y. J., & Huang, Y. K. (2010). Simulation of tyre cavity resonance using 3-D linear finite element analysis. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 6(2-4), 288-300.

- [104] European Parliament and Council. (2001). Directive 2001/43/EC amending Council Directive 92/23/EEC relating to tyres for motor vehicles and their trailers. *Official Journal of the European Communities*, L 211/25.
- [105] European Tyre and Rubber Manufacturers' Association. (2013). *EU Tyre Labelling: An introduction*. ETRMA Position Paper.
- [106] Feng, K., Liu, Y., Yang, X., & Lu, Y. (2018). Acoustic source localization in strong reverberant environment by parametric Bayesian dictionary learning. *Signal Processing*, 143, 232-240.
- [107] Hoever, C., & Kropp, W. (2015). A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 351, 161-176.
- [108] Goubert, L., & Sandberg, U. (2010). The acoustic performance of semi-dense and dense pavements. *Proceedings of the 11th International Conference on Asphalt Pavements*, Nagoya, Japan.
- [109] Künzel, M., Lau, C., & Roth, M. (2019). Machine learning based tire development process. *ATZ worldwide*, 121(5), 40-45.
- [110] Qatu, M. S., Abdelhamid, M. K., Pang, J., & Sheng, G. (2009). Overview of vehicle noise and vibration. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 5(1-2), 1-35.
- [111] Sandberg, U. (2011). Low noise road surfaces—A state-of-the-art review. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 32(4), 201-218.
- [112] European Tyre and Rubber Manufacturers' Association. (2020). *End-of-Life Tyres Management: Europe leading the way in the circular economy*. ETRMA Annual Report 2020.
- [113] Kropp, W., Larsson, K., Wullens, F., Andersson, P., & Becot, F. X. (2007). Reduction of exterior tire/road noise—Some new research directions. *Tire Technology International Annual Review*, 14-17.
- [114] International Organization for Standardization. (2015). ISO 13325:2003 Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. ISO.
- [115] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). *UN Regulation No. 117 Rev. 3: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to*

rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance. E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.116.

- [116] Ren, H., Wang, W., Chen, M., Li, Y., & Yang, J. (2018). Time-frequency analysis of tire noise based on wavelet transform. *Shock and Vibration*, 2018, Article ID 9237458.
- [117] Bolton, J. S., Kim, Y. J., Kwon, Y. P., & Lee, T. H. (2006). Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube. *Brüel & Kjær Technical Review*, 1, 1-44.
- [118] Sohaney, R. C., Uu, K. J., & Pinnington, R. J. (2013). Tyre cavity noise and its mitigation: A fundamental study. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(2), 1041-1050.
- [119] Murphy, E., & King, E. A. (2014). *Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy*. Elsevier.
- [120] Dittrich, M. G., & Janssens, M. H. (2000). Improved measurement methods for railway rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 595-609.
- [121] International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 61672-1:2013 Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications. IEC.
- [122] Gent, A. N., & Walter, J. D. (2006). *The pneumatic tire*. National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation.