

第十三章 輪胎噪音測試設備與儀器

Tire Noise Testing Equipment and Instruments

摘要 (Abstract)

輪胎噪音測試設備與儀器是整個輪胎噪音研究、產品開發與法規管理體系中最關鍵的基礎支柱，其量測精度與方法一致性，直接決定了噪音評估結果的可信度與可比較性。本章系統性整理當前國際主流的輪胎噪音測試設備與量測技術，涵蓋基礎聲學量測儀器、專用測試設施、輔助監測設備，以及近年快速發展的先進聲學成像與智慧化測試系統，完整呈現現代輪胎噪音測試技術的全貌。

本章首先指出，輪胎噪音屬於多源、多機制且高度依賴量測條件的聲學現象，從麥克風、噪音計、數據採集系統等基礎設備開始，即需符合嚴格的國際標準要求，才能在複雜的室外道路環境與室內實驗室條件下，獲得具可重複性與溯源性的量測結果。章節進一步說明不同測試方法對設備配置的特殊需求，包括遠場透過噪音測試、近場 CPX 與 OBSI 方法、轉鼓測試與半消聲室測試等，並解析各類設備在頻率響應、動態範圍、相位一致性與環境耐受性上的關鍵技術指標。

在專用測試設施方面，本章深入探討半消聲室、道路轉鼓測試台與 CPX 拖車系統的設計原理與應用限制，說明如何透過受控聲學環境、標準化路面條件與近場量測配置，提高輪胎噪音測試的效率與準確性。同時，本章亦強調輔助測試儀器的重要性，包括路面紋理與吸音特性量測、輪胎物理性質監控以及氣象與環境參數監測，這些因素對噪音結果的影響往往與輪胎設計本身同等重要。

最後，本章綜述聲學攝影機、陣列量測、模態分析、自動化測試與數位孿生等先進技術的最新發展，說明輪胎噪音測試正由傳統的單點噪音值量測，邁向多通道、多物理量、智慧化與資料驅動的整合分析階段，為輪胎噪音機制研究與低噪音設計提供前所未有的工具基礎。



輪胎噪音測試是整個噪音控制體系中不可或缺的環節,其重要性在於為產品開發、法規符合性驗證、品質管控以及學術研究提供準確可靠的量化數據基礎。作為一位在輪胎聲學領域深耕數十年的專業人士,我深刻體會到精密的測試設備與標準化的測量方法對於推動產業技術進步的關鍵作用。本章將系統性地介紹當前國際上廣泛應用的輪胎噪音測試設備與儀器,涵蓋從基礎的聲學測量設備到先進的專用測試設施,並詳細闡述各類設備的工作原理、技術規範、應用場景及其在輪胎噪音研究與開發中的實際應用價值。隨著環境噪音法規日益嚴格以及消費者對車輛舒適性要求不斷提高,輪胎噪音測試技術也在持續演進,從傳統的單點噪音值測量發展到多通道陣列測試、從室外道路測試延伸至室內實驗室模擬,測試手段愈加豐富多樣,測試精度不斷提升。本章將結合國際標準組織(ISO)、聯合國歐洲經濟委員會(UN ECE)等權威機構發布的技術標準,以及國際頂尖研究機構的最新研究成果,為讀者呈現當代輪胎噪音測試技術的全貌。

13.1 基礎聲學測量設備 (Basic Acoustic Measurement Equipment)

基礎聲學測量設備構成了輪胎噪音測試的核心工具鏈,其性能直接決定了測試結果的準確性與可重複性。這些設備不僅需要滿足國際標準對測量精度、頻率響應、動態範圍等技術指標的嚴格要求,還必須能夠適應複雜多變的測試環境,包括室外道路測試的氣候條件變化、室內實驗室的聲學環境控制,以及高速行駛狀態下的動態信號捕捉等挑戰。本節將深入探討構成輪胎噪音測試系統的核心聲學測量設備,包括麥克風系統、噪音計、數據採集系統等關鍵組件。

13.1.1 麥克風與傳感器系統 (Microphones and Sensor Systems)

麥克風系統作為聲學信號鏈的第一環節,其選型與配置直接影響整個測試系統的性能。在輪胎噪音測試領域,根據不同的測試方法與應用場景,需要採用不同類型與規格的麥克風系統。國際電工委員會標準 IEC 61672 對測量麥克風的性能提出了明確要求,包括頻率響應平坦度、方向性特性、動態範圍等關鍵指標 [1]。測量級麥克風通常採用電容式原理,具有優異的頻率響應特性與低失真特性,能夠準確捕捉輪胎噪音的複雜頻譜結構。



在標準化的透過噪音測試(Pass-By Noise Test)中,按照 ISO 13325 標準規定,測量麥克風應放置於距離車輛行駛軌跡中心線 7.5 米、離地高度 1.2 米的位置 [2]。麥

克風必須配備適當尺寸的防風罩,以減少風噪音對測量的干擾。當風速低於 5 米/秒時,標準 100 毫米泡沫防風罩能夠有效抑制風致噪音,確保在 50 公里/小時以上車速及 200 赫茲以上頻率範圍內獲得可靠測量結果 [3]。麥克風的頻率響應範圍應覆蓋 20 赫茲至 20 千赫茲的全音頻範圍,在輪胎噪音的主要頻段(400 赫茲至 5000 赫茲)內,頻率響應偏差應控制在 ± 1 分貝以內 [4]。

對於近場測量方法,如接近透過法(Close-Proximity Method, CPX)與拖車法(Trailer Method),麥克風的配置與傳統遠場測量有顯著差異。CPX 方法依據 ISO 11819-2 標準,將兩支測量麥克風安裝於距離測試輪胎極近的位置,通常距離輪胎側壁外緣 0.2 米(乘用車輪胎)或 0.4 米(商用車輪胎),離地高度 0.1 米,分別位於輪軸平面前後 0.2 米處,形成前後雙麥克風配置 [5]。這種極近距離測量配置能夠顯著提高信噪比,降低背景噪音與其他交通噪音的干擾,但也對麥克風的動態範圍與高噪音值承受能力提出了更高要求,因為近場噪音值通常比遠場高出 10 至 15 分貝 [6]。

聲強探頭(Sound Intensity Probes)在輪胎噪音源識別與定位中發揮著獨特作用。聲強測量基於雙麥克風原理,透過測量兩個緊密相鄰麥克風之間的聲壓差與相位差,計算出特定方向的聲能流密度,從而實現對噪音源的定向測量與背景噪音的抑制 [7]。在車載聲強法(On-Board Sound Intensity, OBSI)測試中,聲強探頭被安裝在車輛上,緊鄰輪胎接觸斑的前緣與後緣位置,能夠在車輛行駛過程中直接測量輪胎路面噪音,有效隔離來自發動機、排氣系統及風噪音的干擾 [8]。OBSI 方法已被美國各州公路與運輸官員協會(AASHTO)標準化為 TP-76 測試程序,成為評估路面聲學性能的重要工具 [2]。



近年來,基於微機電系統(MEMS)技術的新型聲學傳感器逐漸在輪胎噪音測試領域嶄露頭角。MEMS 麥克風具有體積小巧、成本低廉、一致性好、抗振動能力強等優勢,特別適合於多通道陣列測試系統的構建。雖然在絕對測量精度與低頻響應方面仍略遜於傳統電容式麥克風,但其在相對測量、頻譜分析、噪音源定位等應用中已能滿足大部分測試需求 [9]。振動傳感器在輪胎噪音測試中同樣扮演重要角色,特別是在研究結構傳遞噪音(Structure-Borne Noise)機制時。加速度計通常安裝在輪胎內側、輪輞表面或懸掛系統關鍵點,測量輪胎振動向車身的傳遞路徑,結

合聲學測量可實現對空氣傳播噪音與結構傳播噪音的綜合分析 [10]。三軸加速度計能夠同時捕捉徑向、周向與軸向振動,其頻率響應範圍應覆蓋 10 赫茲至 10 千赫茲,靈敏度範圍根據測點位置選擇 10 至 100 毫伏/(米/秒²) [11]。

麥克風校準是確保測量準確性的關鍵環節。測量級麥克風應在測試前後使用標準聲級校準器進行校準,校準器產生的標準噪音值通常為 94 分貝或 114 分貝(在 1000 赫茲),精度等級應達到 1 級或更高 [12]。對於長期測試或關鍵測試項目,還應定期(通常每年一次)將麥克風送至經認可的校準實驗室進行全頻段校準,獲得麥克風的頻率響應修正曲線,以補償長期使用導致的靈敏度漂移 [13]。在拖車法與轉鼓法等使用雙麥克風配置的測試中,兩支麥克風之間的相對校準同樣至關重要。按照 ISO 13472-2 標準要求,在進行路面聲吸收測量前,必須執行麥克風交換程序,測定兩支麥克風的相對幅度與相位特性,確保測量系統的整體一致性 [2]。

13.1.2 噪音計與分析儀 (Sound Level Meters and Analyzers)

噪音計是聲學測量中最基礎也是最重要的儀器之一,其功能是將麥克風捕獲的聲壓信號轉換為符合人耳聽覺特性的聲級讀數。在輪胎噪音測試中,噪音計不僅用於實時監測噪音水平,還承擔著信號調理、頻率加權、時間加權、統計分析等多重任務。國際標準 IEC 61672 詳細規定了噪音計的技術要求,



將其分為 1 級(精密級)與 2 級(通用級)兩個等級,在輪胎噪音的標準測試中,通常要求使用 1 級精密噪音計,以確保 ± 1 分貝的測量不確定度 [14]。

現代噪音計通常具備多種頻率加權曲線,其中 A 加權(A-weighting)模擬人耳對不同頻率聲音的主觀感受,對低頻與極高頻成分進行衰減,是輪胎噪音測試中最常用的評估指標。C 加權(C-weighting)則對全頻段信號衰減較少,常用於評估信號的峰值特性與低頻成分。線性加權(Linear 或 Z-weighting)不進行任何頻率補償,適用於需要保持信號原始頻譜特性的科學測量 [15]。時間加權特性包括快速(Fast, 125 毫秒)、慢速(Slow, 1 秒)與脈衝(Impulse, 35 毫秒),在輪胎噪音的透過測試中,標準通常要求使用快速時間加權,以捕捉車輛透過時的最高聲級 [2]。

頻譜分析儀是深入理解輪胎噪音頻率特性的關鍵工具。透過快速傅里葉變換(FFT)算法,頻譜分析儀能夠將時域聲壓信號轉換為頻域表示,揭示噪音能量在不同頻率

成分上的分佈規律。在輪胎噪音研究中,常用的頻譜分析方式包括窄帶頻譜分析(頻率解析度通常為 1 至 10 赫茲)、三分之一倍頻程分析與倍頻程分析 [16]。三分之一倍頻程分析將 20 赫茲至 20 千赫茲的音頻範圍劃分為 33 個標準頻帶,每個頻帶的中心頻率與帶寬遵循國際標準 ISO 266 的規定,這種分析方式與人耳的頻率解析特性較為接近,是輪胎噪音測試標準中廣泛採用的頻譜表示方法 [4]。例如,在路面聲吸收測量(ISO 13472-2)中,要求報告 315 赫茲至 1600 赫茲範圍內各三分之一倍頻程頻帶的吸音係數 [2]。

階次分析(Order Analysis)是針對旋轉機械噪音的專用分析技術,在輪胎噪音測試中主要用於識別與輪胎轉速相關的噪音成分。透過將頻率軸從赫茲轉換為階次(轉速的倍數),可以清晰地分離出胎面花紋衝擊噪音、輪胎不圓度引起的噪音等與轉速同步的成分,與非同步的隨機噪音(如空氣泵浦噪音)區分開來 [17]。這對於診斷輪胎設計缺陷、優化花紋節距排列具有重要價值。現代數字信號處理技術的發展,使得即時頻譜分析與階次追蹤成為可能,測試系統能夠在車輛加速或減速過程中持續監測噪音頻譜的演變,生成噪音值-速度-頻率的三維瀑布圖(Waterfall Plot),為全面理解輪胎噪音的速度依賴性提供直觀的視覺化工具 [18]。

噪音計與分析儀的動態範圍是另一個關鍵技術指標,指設備能夠準確測量的最大噪音值與最小噪音值之間的差值。在輪胎噪音測試中,由於測量場景從安靜的半消聲室(背景噪音可能低於 30 分貝)到高速行駛的室外道路(峰值聲級可能超過 100 分貝),要求測量系統具有至少 70 分貝的動態範圍,高端測試設備的動態範圍可達 100 分貝以上 [19]。此外,測量系統的本底噪音應足夠低,以確保在測量低噪音輪胎或低噪音路面時不會因儀器自身噪音而限制測量靈敏度。

13.1.3 數據採集與信號處理系統 (Data Acquisition and Signal Processing Systems)

現代輪胎噪音測試系統通常需要同步採集多個通道的聲學信號與輔助信號(如車速、輪胎溫度、氣壓等),並進行實時或離線的複雜信號處理與分析。數據採集系統(Data Acquisition System, DAS)是連接傳感器與計算分析平台的橋樑,其性能直接影響測試系統的整體能力。高性能數據採集系統通常具備以



下關鍵特性:多通道同步採樣,採樣率可達 192 千赫茲或更高,解析度為 24 位元,動態範圍超過 100 分貝,通道間相位匹配精度小於 0.1 度,以滿足聲強測量與波束成形等對相位精度要求極高的應用 [20]。

信號調理是數據採集過程中的重要環節,包括放大、濾波、阻抗匹配等處理。對於來自電容式麥克風的高阻抗微弱信號,需要使用前置放大器(Preamplifier)進行阻抗變換與低噪音放大,前置放大器應具有極低的本底噪音(通常小於 1 微伏)與寬廣的頻率響應(5 赫茲至 100 千赫茲) [21]。抗混疊濾波器(Anti-Aliasing Filter)是另一個關鍵組件,用於在模數轉換(ADC)之前濾除高於奈奎斯特頻率(採樣率的一半)的信號成分,防止頻率折疊現象導致的測量誤差。高品質的抗混疊濾波器應具有陡峭的截止特性與平坦的通帶響應,在通帶內引入的相位失真應盡可能小 [22]。在拖車法與轉鼓法測試中,由於麥克風處於近場且可能受到風噪音干擾,信號處理中常採用高通濾波技術。例如,在技術大學格但斯克(Technical University of Gdańsk)的拖車測試系統中,使用 80 赫茲的高通濾波器來抑制低頻風噪音,這對於確保信噪比至關重要,特別是在高速行駛時 [3]。然而,高通濾波也會損失一部分低頻輪胎噪音信息,因此濾波器的截止頻率設置需要在信噪比改善與信息保全之間權衡。對於需要保留完整頻譜信息的科學研究,可採用更複雜的自適應濾波或譜減法等先進信號處理技術,在不損失有用信號的前提下抑制背景噪音 [23]。

時域與頻域的聯合分析是理解輪胎噪音動態特性的有效手段。短時傅里葉變換 (STFT) 與小波變換 (Wavelet Transform) 等時頻分析方法,



能夠揭示噪音頻譜隨時間的演化規律,識別瞬態噪音事件(如花紋塊衝擊、路面缺陷激勵等) [24]。在透過噪音測試中,透過分析車輛透過麥克風前後一定時間窗內的噪音值曲線,可以研究輪胎噪音的方向性特性、與車速的關係,以及不同噪音源(發動機、輪胎、風噪音等)的相對貢獻 [3]。統計分析方法如能量等效聲級(L_{eq})、統計聲級(L_{10} , L_{50} , L_{90} 等)在評估長時間測試或大樣本測試的結果時非常有用,能夠提供比單次最大聲級更穩健的評估指標 [25]。

數據管理與可追溯性在標準化測試中同樣重要。測試數據應包含完整的元數據(測試日期時間、測試地點、環境條件、設備信息、操作人員等),採用標準化的數據格式存儲,以便於長期歸檔、數據共享與結果再現 [26]。現代測試系統通常集成了數據庫管理功能,能夠自動記錄測試條件、生成測試報告、進行結果對比分

析,大大提高了測試效率與數據可靠性。雲端數據平台的興起,更使得遠程測試、多地協作測試、大數據分析成為可能,為輪胎噪音研究開闢了新的技術路徑 [27]。

13.2 專用測試設施 (Specialized Testing Facilities)

除了基礎聲學測量設備外,輪胎噪音的全面評估還需要依託專門設計的測試設施。這些設施根據不同的測試目的與方法學,在聲學環境、機械結構、操作流程等方面有針對性的設計,以實現對輪胎噪音特性的精確測量與深入分析。本節將介紹輪胎噪音測試中常用的專用設施,包括半消聲室、轉鼓測試台、CPX 拖車系統等。

13.2.1 半消聲室與消聲室 (Semi-Anechoic and Anechoic Chambers)

半消聲室(Semi-Anechoic Chamber)

是在室內環境中模擬自由聲場條件的專用聲學實驗室,廣泛應用於輪胎噪音的室內測試。與完全消聲室不同,半消聲室的地面保持剛性反射特性,模擬真實道路環境,而牆面與頂面則覆蓋吸音楔形體,最大限度地吸收聲波反射,在測試頻率範圍內(通常為 100 赫茲至 10 千赫茲)實現準自由場條件,使得聲源輻射的聲波能夠不受房間邊界影響地傳播至測量點 [28]。



按照 ISO 3745 與 ISO 26101 等標準要求,用於車輛噪音測試的半消聲室應滿足嚴格的聲學性能指標。室內背景噪音應低於 30 分貝(A 計權),以確保對低噪音輪胎與電動車輛的測試不受干擾 [29]。自由場條件的驗證透過逆平方律測試與環境修正量測量來實現,在指定的測試區域內(通常為直徑 7.5 米的圓形區域),噪音值隨距離的衰減應符合逆平方律(距離加倍,噪音值下降 6 分貝),偏差應小於 ± 1 分貝;環境修正量(由房間反射引起的噪音值增加)應小於 2 分貝 [30]。吸音楔的設計與佈置是實現這些性能的關鍵,楔形體的深度通常為其最低工作頻率波長的四分之一,例如對於 100 赫茲的下限頻率(波長約 3.4 米),楔形體深度應達到 0.85 米以上 [28]。

在半消聲室內進行輪胎噪音測試時,常見的配置包括將測試車輛置於室內中央,輪胎與路面模擬器(如轉鼓或平板)接觸,麥克風按標準位置佈置 [31]。這種配置的優

勢在於能夠在完全受控的環境條件下(恆定溫度、濕度、無風、無其他交通噪音干擾)進行測試,大大提高了測試的可重複性。室內測試還便於使用聲學攝影機(Acoustic Camera)、聲強探頭陣列等先進測試設備,對輪胎表面的噪音分佈進行精細測繪,識別主要噪音源位置 [32]。然而,半消聲室測試也存在局限性,主要包括:室內空間限制導致難以進行真實車速下的長距離行駛測試;地面反射特性與真實路面存在差異;轉鼓測試時輪胎接觸幾何與平面道路不完全相同,可能引入系統誤差 [3]。

針對上述局限,一些先進的測試設施採用了創新設計。例如,將半消聲室與底盤測功機(Chassis Dynamometer)或四輪轉鼓系統相結合,使車輛能夠在室內以實際行駛速度運行,同時透過精心設計的排氣系統與隔音罩降低非輪胎噪音源的干擾 [33]。另一種方法是使用移動式半消聲室,將吸音結構做成可拆卸的模組化設計,在室外測試場地臨時搭建,兼具室內測試的聲學控制與室外測試的真實性 [34]。此外,為了更準確地模擬真實路面的聲學特性,一些設施在半消聲室的地面上鋪設具有代表性紋理與吸音特性的道路試樣,這種混合式設計在車輛透過噪音測試標準 ISO 362 的修訂中得到認可與應用 [35]。

13.2.2 道路轉鼓測試台 (Road Drum Test Rig)

道路轉鼓測試台(Road Drum Test Rig)是在實驗室條件下模擬輪胎路面相互作用的重要設施,其核心是一個直徑通常為 1.5 米至 3.0 米的大型圓柱形轉鼓,轉鼓外表面覆蓋有模擬真實路面紋理的材料或路面複製品,輪胎在一定載荷下壓靠在轉鼓表面並隨轉鼓旋轉而滾動,同時透過近場麥克風測量產生的噪音 [3]。



這種測試方法的最大優勢在於完全不受氣候條件限制,能夠在嚴格控制的環境中進行長時間、多輪胎、多參數的系統性測試,對於輪胎研發中的快速迭代優化特別有價值。

轉鼓測試台的設計面臨多項技術挑戰,其中最關鍵的是轉鼓曲率效應。相比於平面道路,輪胎在圓柱形轉鼓表面滾動時,接觸斑的形狀與壓力分佈會發生改變,胎體變形模式也不完全相同,這可能導致噪音頻譜與幅度的系統性偏差 [36]。研究表明,轉鼓直徑越大,這種偏差越小。對於乘用車輪胎,至少需要 1.5 米直徑的轉鼓

才能使測試結果與道路測試具有可比性;對於商用車輪胎,則需要 2.0 米甚至更大的直徑 [37]。一些高端轉鼓設施採用"外轉鼓"配置,即輪胎在轉鼓外圓面滾動,這是最常見的形式;另有"內轉鼓"配置,輪胎在類似大碗狀的內表面滾動,這種設計可以使用更大的曲率半徑而不需要過大的設備體積,但機械結構更加複雜 [38]。轉鼓表面的路面模擬是另一個技術關鍵。最初的轉鼓測試使用光滑鋼表面或簡單的砂紙貼面,但研究發現這與真實路面的噪音特性相差甚遠,測試結果難以預測輪胎在道路上的實際性能 [3]。現代轉鼓測試強調使用路面複製品(Road Surface Replica),即透過樹脂澆注或其他技術手段,將真實路面的紋理與聲學特性複製到可安裝於轉鼓表面的弧形板材上 [39]。例如,瑞典道路與交通研究所(VTI)開發的 NE-1 複製表面,成功再現了典型瀝青路面的宏觀紋理與聲學特性,使得轉鼓測試結果與道路測試的相關性顯著提高 [3]。聯合國歐洲經濟委員會法規 R117 的修訂草案中,提出了在轉鼓設施上進行輪胎噪音型式認證測試的可能性,前提是轉鼓表面必須符合嚴格的紋理與吸音特性要求 [40]。

轉鼓測試的麥克風配置與拖車法類似,通常採用近場測量,麥克風位於距離輪胎側壁 0.2 米(乘用車)或 0.4 米(商用車)、離轉鼓表面 0.1 米、輪軸平面後方 0.2 米的位置 [3]。一些轉鼓設施還配備可移動的麥克風陣列,能夠測量輪胎噪音的方向性特性,這對於理解噪音輻射機制、驗證計算模型非常有價值 [41]。轉鼓測試的另一個重要考慮是背景噪音控制,主要包括驅動電機噪音、軸承噪音、轉鼓與支撐結構的振動噪音等。透過將轉鼓放置在半消聲室內、使用低噪音電機與精密軸承、在傳動系統中採用隔振措施等手段,可以將背景噪音降低至不影響測試結果的水平(信噪比大於 10 分貝) [42]。驗證背景噪音的標準方法是將測試輪胎從轉鼓表面抬起,此時測量到的聲級即為背景噪音上限 [3]。

13.2.3 CPX 拖車測試系統 (CPX Trailer Testing System)

接近透過法(Close-Proximity Method, CPX)拖車測試系統是一種專門設計用於測量輪胎路面噪音的移動測試裝置,它將測試輪胎安裝在由牽引車拖曳的拖車上,麥克風固定在緊鄰輪胎的位置,隨拖車一起移動,在行駛過程中連續測量噪音 [43]。CPX 方法已被國際標準化組織標準 ISO 11819-2 採納,作為評估路面聲學性能的參考方法之一 [44]。相比於傳統的車輛透過噪音測試,CPX 方法具有顯著優勢:能夠直接測量輪胎路面接觸區域產生的噪音,排除了車輛動力總成、排氣系統等其他噪音源的干擾;測試輪胎與測量條件標準化,不同路面或不同時間的測試結果具

有高度可比性;測試效率高,可以連續測量較長路段,獲得路面噪音的空間分佈信息 [45]。

CPX 拖車系統的核心組件包括:拖車底盤與測試輪安裝機構、聲學防護罩、麥克風與數據採集系統、輔助測量傳感器(速度、溫度、大氣壓力等) [46]。測試輪通常為單輪配置,以簡化測試並聚焦於單個輪胎的噪音特性,但也有雙輪或多輪配置用於特定研究目的。拖車設計的關鍵要求是盡可能降低來自牽引車、拖車自身支撐



輪、拖車結構振動等的背景噪音。為此,測試輪通常安裝在遠離支撐輪的位置,牽引桿設計為柔性連接以隔離來自牽引車的振動與噪音傳遞 [47]。

聲學防護罩(Acoustic Enclosure)是 CPX 拖車的重要特徵,它將測試輪與麥克風包圍在一個相對封閉的空間內,主要目的是降低風噪音與側向來音(如對向車輛噪音)的干擾,提高信噪比 [48]。然而,防護罩也引入了新的聲學問題,即罩內聲反射可能改變測量結果。



研究表明,防護罩對 200 赫茲以上頻率的測量影響可以控制在可接受範圍內(小於 1 分貝),但對低頻有一定影響 [3]。防護罩的內表面通常覆蓋吸音材料以減少反射,同時保持足夠的開口度以維持空氣流通、防止輪胎溫度過度升高 [49]。先進的 CPX 拖車還配備了環境控制系統,能夠在防護罩內保持相對恆定的溫度,因為輪胎橡膠溫度對噪音有顯著影響 [50]。

麥克風位置按照 ISO 11819-2 標準嚴格規定,對於乘用車測試輪胎,兩支麥克風分別位於輪軸平面前方 0.20 米與後方 0.20 米,距離輪胎側壁外緣 0.20 米,離路面高度 0.10 米;對於商用車測試輪胎,橫向與縱向距離均增加至 0.40 米 [5]。這種前後雙麥克風配置能夠同時捕捉輪胎前緣與後緣產生的噪音,兩者的能量平均被認為能夠較好地代表輪胎的總體噪音輻射 [51]。CPX 測試的標準速度為 80 公里/小時,但也可根據需要選擇 50 公里/小時或其他速度,測試結果需要進行溫度修正,因為輪胎溫度每變化 10 攝氏度,噪音約變化 0.5 至 1 分貝 [52]。

CPX 方法的一個獨特優勢是能夠提供路面噪音的連續空間分佈信息。透過縮短數據平均時間(如 0.5 秒或 1 秒),可以獲得噪音隨行駛距離的變化曲線,識別路面噪音的均勻性、檢測局部缺陷或異常 [2]。這對於道路管理部門評估養護效果、對比不同路段的聲學性能非常有價值。統計透過法(Statistical



Pass-By, SPB, ISO 11819-1 標準)與 CPX 法形成互補,前者測量實際交通流產生的總體噪音,後者則提供標準化條件下的路面聲學性能基準,兩者結合可以全面評估道路的噪音影響 [53]。

13.3 輔助測試儀器 (Auxiliary Testing Instruments)

輪胎噪音的產生與傳播受到多種因素影響,包括輪胎本身的物理特性、路面特性、環境條件等。為了全面理解噪音機制、確保測試結果的準確性與可重複性,需要使用各種輔助測試儀器對這些影響因素進行測量與監控。本節將介紹輪胎噪音測試中常用的輔助儀器,包括路面紋理測量設備、輪胎硬度計、環境監測儀器等。

13.3.1 路面紋理與特性測量設備 (Pavement Texture and Property Measurement Equipment)

路面紋理(Pavement Texture)是影響輪胎噪音產生的最重要路面特性之一。路面紋理根據其波長範圍可分為微觀紋理(Microtexture, <0.5 毫米)、宏觀紋理(Macrotexture, 0.5-50 毫米)、超宏觀紋理(Megatexture, 50-500 毫米)與不平整度(Roughness/Unevenness, >500 毫米) [54]。其中宏觀紋理對輪胎噪音的影響最為顯著,粗糙的宏觀紋理傾向於激發低頻噪音(主要透過花紋塊衝擊機制),而光滑的宏觀紋理則主要產生高頻噪音(空氣泵浦機制) [55]。

國際標準 ISO 13473 系列規範了路面紋理的測量方法與評估指標。傳統的體積法(Volumetric Method,也稱砂鋪法 Sand Patch Method)透過將已知體積的標準砂在路面上攤平成圓形,測量圓形直徑來反推平均紋理深度(Mean Texture Depth, MTD),這種方法簡單直觀但操作繁瑣、主觀性強、可重複性差,且只能提供單點測量值 [2]。現代路面紋理測量普遍採用輪廓法(Profile Method),使用激光或光學傳

感器非接觸式掃描路面輪廓,獲得高解析度的紋理曲線數據,進而計算各種紋理指標 [56]。

按照 ISO 13473-3 標準,用於路面噪音測試的輪廓儀應達到 DE 級(Class DE)要求,即能夠測量 2.5 至 200 毫米波長範圍的紋理,採樣間隔不大於 1 毫米 [4]。典型的車載激光輪廓儀使用線激光器(Line Laser)或點激光器(Spot Laser)掃描路面,測量車以一定速度(通常 10-20 公里/小時)行駛,連續



記錄輪廓數據,縱向空間解析度可達 0.5 毫米、高度解析度達 0.01 毫米 [2]。從輪廓數據中提取的最常用指標是平均輪廓深度(Mean Profile Depth, MPD),定義為在 100 毫米基準長度內,將輪廓分為兩段,分別求每段的最高點,兩個最高點高程的平均值與整段輪廓平均高程之差,MPD 能夠反映路面宏觀紋理的粗糙程度 [57]。

ISO 10844 標準規定的噪音測試場地表面紋理要求,光滑路面的 MPD 應為 0.5 ± 0.2 毫米,粗糙路面的 MPD 標準尚未最終確定但通常要求更高的 MPD 值 [2]。此外,ISO 10844:2011 還引入了基於頻譜分析的紋理表徵方法,定義了不同波長倍頻程帶的紋理水平(Texture Level),如 L80(80 毫米波長帶的紋理水平)與 L5(5 毫米波長帶的紋理水平),這種表徵方式能更精細地捕捉紋理的頻譜特性,與輪胎噪音的不同產生機制建立更直接的對應關係 [2]。當測試路面的紋理偏離標準要求時,測試標準允許透過數學修正公式對測得的噪音值進行校正,校正公式基於大量實驗數據統計得出,對於粗糙路面,噪音與長波長紋理(L80)呈正相關、與短波長紋理(L5)呈負相關;對於光滑路面,關係則相反 [3]。

路面吸音特性(Sound Absorption)是另一個重要的聲學參數,特別是對於多孔瀝青等低噪音路面。路面的聲吸收能夠減少輪胎下方"喇叭效應"放大,降低路面反射聲,從而整體降低噪音輻射 [58]。ISO 13472-2 標準規定了使用雙麥克風阻抗管法進行路面原位吸音係數測量的程序 [59]。測量裝置包括一個直徑 100 毫米的硬質圓管,管內安裝兩支麥克風,管的一端配備揚聲器產生寬頻噪音信號,另一端透過特製夾具密封地貼合在路面上,透過測量管內聲壓的駐波模式,運用傳遞函數法計算出路面的複聲阻抗與吸音係數 [60]。ISO 10844 要求測試場地的路面吸音係數

在 315 至 1600 赫茲的各三分之一倍頻程頻帶內應小於 8%(行駛車道)或 10%(傳播區域),以確保路面基本為聲反射表面 [2]。

路面不平整度(Unevenness)在長波長範圍(超過 500 毫米)的變化,會影響輪胎與路面的接觸幾何,改變輪胎振動模式,從而間接影響噪音。ISO 10844:2011 新增了對路面平整度的量化要求,採用 3 米直尺與楔形塞規進行測量(歐洲標準 EN 13036-7),要求縱向不平整度小於 2 毫米(行駛車道)或 3 毫米(傳播區域),橫向不平整度小於 20 毫米 [2]。對於長距離的路面評估,則使用慣性輪廓儀(Inertial Profiler)等高速路面平整度測量設備,計算國際平整度指數(International Roughness Index, IRI)等指標 [61]。

13.3.2 輪胎物理特性測量設備 (Tire Physical Property Measurement Equipment)

輪胎的物理特性,如橡膠硬度、胎壓、溫度、負載等,對噪音產生有直接影響。在標準化測試中,這些參數需要嚴格控制並記錄。橡膠硬度(Rubber Hardness)通常使用邵氏硬度計(Shore Durometer)測量,對於輪胎胎面橡膠,通常採用邵氏 A 型硬度標尺,測量值範圍為 0 至 100 度 [62]。橡膠硬度與溫度密切相關,溫度每升高 10 攝氏度,硬度約降低 2 至 3 度;硬度對輪胎噪音有顯著影響,較硬的胎面橡膠傾向於產生更高的噪音,特別是在高頻段 [63]。



研究表明,輪胎橡膠硬度每變化 1 度邵氏 A,噪音約變化 0.1 至 0.2 分貝,因此在 CPX 等近場測試中,必須對輪胎硬度進行監測與修正 [64]。ISO/TS 11819-3 標準推薦的 CPX 參考輪胎,其胎面硬度應控制在特定範圍內(例如 P1 輪胎為 65 ± 2 度邵氏 A),以確保不同測試之間的可比性 [65]。硬度測量應在輪胎達到熱平衡後進行,測量位置通常選擇胎面中央溝槽底部,避開花紋塊邊緣與胎肩區域,每條輪胎測量多個點並取平均值 [64]。

輪胎溫度的測量與監控同樣重要。輪胎表面溫度可使用紅外測溫儀(Infrared Thermometer)或紅外熱像儀(Thermal Camera)非接觸測量,測量點應選擇在胎面中央區域,避開剛離開接觸斑的高溫區與輪胎側壁 [50]。對於持續監測,可在拖車或測試車輛上安裝固定的紅外傳感器,連續記錄輪胎溫度,當溫度偏離參考值時進行

數學修正 [66]。一些先進的測試系統還在輪胎內部埋入溫度傳感器,直接測量內襯層溫度,這對於理解輪胎熱力學行為與腔體共鳴特性很有價值 [67]。

輪胎氣壓與負載是兩個基本但至關重要的測試參數。所有輪胎噪音測試標準都明確規定了測試氣壓(通常為製造商推薦的標準氣壓或特定的參考氣壓)與負載(通常為輪胎最大負載的 70-80%或車輛實際軸重) [68]。氣壓測量使用精密胎壓計,精度應達到 ± 0.01 巴(1 千帕),測量應在輪胎冷態或熱平衡狀態下進行,並記錄測量時的溫度,因為氣壓隨溫度變化(約每 10 攝氏度變化 5%) [69]。負載測量在靜態測試中可使用地秤或輪重儀,在動態測試中則透過懸掛系統的力傳感器或壓電輪力傳感器測量 [70]。

輪胎胎面磨耗(Tread Wear)也會影響噪音特性。全新輪胎與磨損輪胎的噪音可能相差數分貝,一般來說輕微磨損後噪音略有降低(因為尖銳邊緣被磨圓),但過度磨損會導致噪音增加 [71]。UN ECE R117 法規在最新修訂中增加了對磨損輪胎噪音的要求,要求輪胎在 50%胎面磨耗後仍應滿足噪音限值 [72]。胎面花紋深度使用花紋深度計測量,這是一種帶有探針的測量尺,插入胎面溝槽測量剩餘深度,測量精度為 0.1 毫米 [73]。

13.3.3 環境與氣象監測設備 (Environmental and Meteorological Monitoring Equipment)

環境條件,特別是氣象參數,對室外輪胎噪音測試有顯著影響。溫度、濕度、大氣壓力、風速風向等參數需要在測試期間持續監測與記錄。標準氣象站 (Meteorological Station) 通常包括溫度計、濕度計、氣壓計、風速風向儀等傳感器,測量數據透過數據記錄儀自動記錄,時間解析度為 1 分鐘或更短 [74]。



環境溫度對輪胎噪音的影響主要透過改變路面溫度與輪胎溫度實現。ISO 11819-2 標準要求記錄空氣溫度與路面溫度,並規定了溫度修正公式,將測試結果歸一化到參考溫度(通常為 20 攝氏度) [5]。路面溫度測量可使用紅外測溫儀掃描測試區域路面,或使用埋入式溫度傳感器測量路面內部溫度 [75]。相對濕度的影響相對較小,但在極端情況下(非常乾燥或非常潮濕)也需考慮。研究表明,路面潮濕時輪

胎噪音會顯著增加(2-10 分貝,取決於水膜厚度),因此標準測試要求路面必須乾燥,不得有可見水膜或積水 [76]。

風速風向是影響室外聲學測試的重要因素。強風不僅直接引入風噪音干擾,還會改變聲波傳播路徑(折射效應),影響測量準確性 [77]。ISO 10844 與 ISO 13325 標準都對測試期間的氣象條件有嚴格限制,通常要求風速小於 5 米/秒,測量位置與聲源連線方向的橫風分量小於 3 米/秒 [2]。風速風向儀應安裝在接近麥克風高度(1.2 米)的位置,記錄測試期間的實時風況,當風速超標時測試結果應予以排除 [78]。

大氣壓力影響聲速與聲傳播特性,雖然影響相對較小,但在高精度測試中仍需記錄。標準大氣壓力為 101.325 千帕,實際氣壓的變化會導致聲速約 0.1%的變化,對於低頻長波長聲波的傳播有一定影響 [79]。現代氣象站通常集成了所有這些傳感器,並透過無線通訊與測試系統主機連接,實現氣象數據與聲學數據的時間同步記錄 [80]。一些先進的測試系統還配備了聲速儀(Sonic Anemometer),透過測量聲波在空氣中的傳播時間直接測定聲速,這對於精確的聲定位與聲源識別應用很有價值 [81]。

速度測量是輪胎噪音測試中的關鍵輔助參數,因為噪音與車速密切相關。在透過噪音測試中,通常使用光電式速度測量裝置,在測試道路上設置兩個紅外發射接收器對,間隔精確距離(如 20 米),測量車輛透過兩個斷面的時間,計算平均速度,精度可達 ± 0.1 公里/小時 [3]。在拖車法與轉鼓法測試中,速度透過車輛速度計或轉鼓轉速計讀取,需要定期校準以確保準確性 [82]。全球定位系統(GPS)也可用於車速測量,特別是在動態道路測試中,現代高精度 GPS(如差分 GPS 或 RTK GPS)能提供厘米級定位精度與 0.1 公里/小時的速度精度 [83]。

13.4 先進測試技術與設備 (Advanced Testing Technologies and Equipment)

隨著計算技術、傳感器技術與信號處理算法的快速發展,輪胎噪音測試領域也不斷湧現出創新的測試技術與設備。這些先進技術不僅提高了測試的精度與效率,更重要的是為深入理解輪胎噪音的產生機制、傳播特性與控制方法提供了強有力的研究工具。本節將介紹當前國際前沿的輪胎噪音測試技術,包括聲學成像、陣列測試、虛擬測試等。

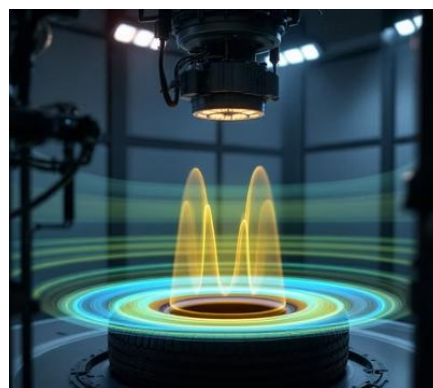
13.4.1 聲學攝影機與波束成形技術 (Acoustic Camera and Beamforming Technology)

聲學攝影機(Acoustic Camera)是一種基於麥克風陣列與波束成形算法的聲源可視化設備,能夠生成聲場的"照片"或"視頻",直觀地顯示噪音源的空間分佈與強度 [84]。在輪胎噪音研究中,聲學攝影機可以精確定位輪胎表面不同區域(胎肩、中央溝槽、花紋塊等)對總體噪音的貢獻,識別主導噪音源,為輪胎設計優化提供具體指導 [85]。

典型的聲學攝影機系統由數十至數百個麥克風按特定幾何形態排列成陣列(如平面螺旋陣列、圓環陣列、星形陣列等),同步採集聲壓數據,透過波束成形(Beamforming)算法進行空間濾波,計算出不同空間位置的聲壓分佈 [86]。波束成形的基本原理是利用聲波從不同空間點傳播至各麥克風的時間差,透過延遲求和(Delay-and-Sum)或更先進的自適應算法,增強來自特定方向的信號、抑制其他方向的噪音,實現聲源的空間定位與分離 [87]。

在輪胎噪音測試中,聲學攝影機有多種應用配置。對於靜止或低速測試,可將陣列安裝在固定支架上,對準行駛中的測試車輛,捕捉透過瞬間的聲場分佈 [88]。對於高速測試,則需要採用移動式配置或使用去多普勒(De-Dopplerization)算法校正相對運動引起的頻率偏移與相位誤差 [89]。專門設計的"輪陣列"(Wheel Array)將麥克風排列成與輪胎接近的形狀,環繞或半環繞輪胎,能夠在輪胎旋轉時捕捉 360 度範圍的噪音輻射模式 [90]。

聲學攝影機的空間解析度(即能夠分辨的最小聲源尺寸)取決於陣列孔徑(陣列最大尺寸)與工作頻率,根據瑞利準則,空間解析度約為 $\lambda/2$,其中 λ 為聲波波長 [91]。對於 1000 赫茲的聲波(波長約 0.34 米),使用 1 米直徑的陣列,理論解析度約為 0.17 米,足以分辨輪胎上的主要噪音區域。實際應用中,解析度還受到信噪比、測量距離、算法類型等因素影響。現代聲學攝影機常採用反卷積波束成形(Deconvolution Beamforming)、CLEAN 算法、MUSIC 算法等先進技術,能夠顯著提高解析度與動態範圍,揭示更細節的聲源結構 [92]。



聲學攝影機在輪胎研發中的應用案例包括:對比不同花紋設計的噪音源分佈,驗證設計改進的效果;研究不同行駛工況(加速、制動、轉向)對噪音源的影響;結合有限元分析與邊界元法的數值模擬,驗證輪胎噪音計算模型的準確性 [93]。聲學攝影機測試通常在半消聲室或室外開闊場地進行,以減少環境反射對測量的影響。近

年來,人工智能與機器學習技術開始被應用於聲學攝影機數據的後處理,透過訓練深度神經網絡自動識別噪音源類型、預測設計改變對噪音的影響,展現出巨大的應用潛力 [94]。

13.4.2 結構振動與模態測試設備 (Structural Vibration and Modal Testing Equipment)

輪胎噪音的產生本質上源於輪胎結構的振動,因此對輪胎振動特性的測試與分析是理解噪音機制的重要途徑。結構振動測試主要使用加速度計、激光測振儀等設備測量輪胎各部位的振動響應,結合模態分析技術識別輪胎的固有頻率、振型與阻尼特性 [95]。這些信息對於輪胎結構優化設計、噪音預測建模至關重要。



接觸式振動測量使用壓電加速度計,透過螺釘、膠粘或磁吸等方式固定在輪胎表面或輪轆上,測量局部振動加速度 [96]。對於輪胎胎側與胎面等橡膠表面,由於柔軟且曲率變化大,加速度計的安裝是一個技術挑戰,需要使用輕質小型加速度計(質量小於 5 克)並採用專用膠水固定,以盡量減少對輪胎動態特性的影響 [97]。三軸加速度計能夠同時測量徑向、切向與軸向三個方向的振動,提供完整的振動矢量信息 [98]。對於旋轉輪胎的振動測試,信號傳輸可採用滑環(Slip Ring)或無線遙測系統,前者透過機械接觸傳輸信號,可靠但有磨損與噪音問題;後者使用無線發射器將信號發送至接收器,避免了機械連接但需注意電池壽命與信號干擾 [99]。

非接觸式振動測量使用激光多普勒測振儀(Laser Doppler Vibrometer, LDV),透過測量激光束從振動表面反射回來的多普勒頻移,計算表面的振動速度 [100]。LDV 的優勢在於完全非接觸、空間解析度高(光斑直徑可小於 1 毫米)、頻率響應寬(直流至數十千赫茲),特別適合於輕質柔軟結構的振動測量,不會因傳感器質量而改變結構動態特性 [101]。掃描式 LDV 配備可程控的鏡面掃描系統,能夠自動測量結構表面數百至數千個點的振動,重構出完整的振動模態形狀 [102]。三維 LDV 使用多個激光束從不同角度照射測點,測量三維振動矢量,這對於理解輪胎的複雜振動模式(如彎曲、扭轉、徑向呼吸等模態的耦合)非常有價值 [103]。

模態測試(Modal Testing)透過在輪胎上施加已知的激勵力(通常使用力錘敲擊或激振器施加掃頻激勵),同時測量多個位置的振動響應,透過頻響函數(Frequency Response Function, FRF)分析提取出輪胎的模態參數(固有頻率、振型、阻尼比) [104]。這些模態參數是輪胎有限元模型驗證與修正的重要依據,也是預測輪胎噪音輻射的基礎。對於充氣輪胎,其模態特性包括胎體結構模態(如輪帶彎曲模態、側壁振動模態)與腔體聲學模態(空氣柱共振),兩者之間存在複雜的耦合關係 [105]。實驗模態分析通常在自由邊界條件下進行(輪胎懸掛於柔軟彈簧上模擬自由狀態),也可在實際工作條件下進行(輪胎安裝在車輛或測試台上,施加载荷與氣壓),後者更能反映真實使用時的動態特性 [106]。

13.4.3 智能測試系統與自動化設備 (Intelligent Testing Systems and Automated Equipment)

測試自動化與智能化是提高測試效率、降低人為誤差、實現大規模測試的重要趨勢。現代輪胎噪音測試設施越來越多地採用自動化技術,從樣品裝卸、測試執行、數據採集到結果分析與報告生成實現全流程自動化或半自動化 [107]。智能測試系統不僅執行預定的測試程序,還能根據實時數據進行自適應調整,診斷異常情況,優化測試參數,甚至透過機器學習預測測試結果與產品性能 [108]。



自動化轉鼓測試台是工業實驗室中廣泛應用的自動化設備。系統配備機械手或自動導引車(AGV)完成輪胎的自動上下料,氣壓與負載透過電控閥門與伺服加載機構自動調節至設定值,轉鼓速度按預定程序自動變化,測試過程全程無需人工干預 [109]。測試數據實時採集並自動進行頻譜分析、質量判定(與標準或規格對比),合格/不合格判定結果自動記錄到數據庫,必要時觸發報警或停機 [110]。一些先進的系統還集成了機器視覺,自動識別輪胎規格、檢查安裝位置、監測測試過程中的異常(如輪胎打滑、過度發熱等),進一步提高測試的可靠性與安全性 [111]。

自動化測試的另一個重要應用是室外道路測試的自動化。無人駕駛測試車輛能夠在測試場地按預定路線與速度自主行駛,執行透過噪音測試、CPX 測試等,測試過程的一致性與可重複性遠優於人工駕駛 [112]。車載測試系統自動記錄聲學數據、車速、GPS 位置、環境條件等多源數據,時間同步精度達到毫秒級,數據透過無線網絡實時上傳至雲端服務器進行處理與分析 [113]。基於雲計算的測試數據管理

平台能夠存儲與管理海量測試數據,提供強大的數據檢索、對比分析、統計報表、趨勢追蹤等功能,支持多實驗室協同測試與數據共享 [114]。

人工智能與機器學習在輪胎噪音測試中的應用正處於快速發展階段。監督學習算法(如支持向量機、隨機森林、深度神經網絡)可以訓練從輪胎參數(花紋幾何、橡膠配方、結構參數等)預測噪音性能的模式,預測精度在某些情況下已能與實際測試相媲美,大大加快了設計開發速度 [115]。非監督學習算法(如聚類分析、主成分分析)用於從大量測試數據中發現隱藏模式,識別影響噪音的關鍵因素,為設計優化提供洞察 [116]。異常檢測算法自動識別測試數據中的異常值,可能指示設備故障、樣品缺陷或測試條件異常,提高測試質量控制水平 [117]。強化學習算法被探索用於測試參數的自適應優化,系統透過與測試環境的交互學習最優測試策略,在保證測試精度的前提下最小化測試時間與成本 [118]。

數字孿生(Digital Twin)技術為輪胎噪音測試提供了一個全新的維度。數字孿生是物理測試設施或測試對象的虛擬副本,透過傳感器數據的實時同步,保持與物理實體的一致性 [119]。輪胎噪音測試的數字孿生系統可以模擬測試過程,預測測試結果,優化測試方案,還能進行虛擬實驗(改變輪胎設計或測試條件,觀察對結果的影響),而無需實際製造樣品或運行物理測試 [120]。當物理測試遇到異常時,數字孿生可以幫助診斷原因,例如透過模擬排除設備故障、環境干擾等可能因素,快速定位問題根源 [121]。數字孿生還是實現預測性維護的基礎,透過監測測試設備的運行狀態數據,預測設備磨損與故障,在實際故障發生前進行維護,避免停機損失 [122]。

13.5 測試標準與校準程序 (Testing Standards and Calibration Procedures)

測試設備的準確性與測試方法的標準化是確保輪胎噪音測試結果可靠性、可比性與可重複性的基礎。國際標準化組織(ISO)、國際電工委員會(IEC)、聯合國歐洲經濟委員會(UN ECE)等國際機構,以及各國國家標準組織,制定了一系列涵蓋測試設備性能要求、測試方法程序、校準驗證規範的標準體系。嚴格遵循這些標準,並建立完善的設備校準與質量控制程序,是任何從事輪胎噪音測試工作的實驗室必須達到的基本要求。本節將介紹主要的測試標準體系,以及關鍵測試設備的校準程序與質量保證措施。

13.5.1 國際測試標準體系 (International Testing Standards System)

輪胎噪音測試的標準體系可分為幾個層次:最頂層是聲學測量的基礎標準,規範聲學測量儀器的性能要求與校準方法;中間層是通用測試方法標準,規範車輛與輪胎

噪音測試的基本程序與條件;最底層是針對特定應用的專用標準,如法規符合性測試、路面聲學評估、產品開發測試等。

在基礎聲學測量層面,IEC 61672 系列標準《噪音計》是最核心的文獻,分為三部分:第一部分規範了噪音計的技術要求(頻率加權特性、時間加權特性、線性度、環境影響等),將噪音計分為 1 級(精密級)與 2 級(通用級);第二部分規範了型式評估試驗程序(由認證機構對噪音計設計進行的全面測試);第三部分規範了定期檢驗程序(使用者應定期進行的簡化測試,驗證噪音計是否保持在規格範圍內) [14]。



與 IEC 61672 配套的還有 IEC 60942 《聲校準器》標準,規範了用於校準噪音計的聲校準器的性能要求,將其分為 LS 級(實驗室標準級)、1 級與 2 級,不同等級對應不同的準確度要求 [123]。

在測試方法層面,ISO 362 系列標準《道路車輛加速行駛噪音測量》是車輛型式認證的國際基準,雖然主要針對整車噪音,但其規範的測試場地(ISO 10844 標準測試跑道)、測量設備、環境條件等要求同樣適用於輪胎噪音測試 [124]。ISO 13325 標準《輪胎與車輛交通噪音測量方法》則專門針對輪胎噪音的滑行透過測試,詳細規定了測試程序、麥克風位置、數據處理方法等 [2]。ISO 11819 系列標準《聲學-道路表面對交通噪音影響的測量》包含三個部分:第一部分規範統計透過法(SPB),透過測量實際交通流產生的噪音評估路面聲學性能;第二部分規範接近透過法(CPX),使用標準測試輪胎測量路面噪音;第三部分規範參考輪胎的技術要求 [44]。ISO 13473 系列標準《利用表面輪廓表徵路面紋理》是路面聲學表徵的重要標準,第一部分規範平均輪廓深度(MPD)的計算方法,第二部分(已撤銷)曾規範功率譜密度的計算,第三部分規範輪廓儀的分類與性能要求,第四部分規範路面紋理的頻譜分析方法 [57]。ISO 13472 系列標準《聲學-道路表面聲吸收特性的現場測量》規範了路面吸音係數的測量,第一部分為擴展表面法(適用於吸音路面),第二部分為點測量法(適用於反射路面) [59]。

在法規層面,聯合國歐洲經濟委員會法規 UN ECE R117 《輪胎滾動阻力、滾動噪音與濕抓地性能型式認證》是全球輪胎噪音法規的基石,規定了輪胎噪音的限值、測試方法(基於 ISO 13325 滑行透過法)、型式認證程序等,該法規已被歐盟、日本、韓國、澳大利亞等眾多國家與地區採納或參考 [125]。歐盟法規(EU) 2020/740《輪

胎標籤法規》要求在輪胎上標註噪音等級(A/B/C),推動消費者選擇低噪音輪胎,間接促進輪胎噪音技術進步 [126]。

各標準之間相互引用、相互支撐,形成了一個邏輯嚴密的標準體系。例如,UN ECE R117 引用 ISO 13325 作為測試方法標準,ISO 13325 引用 ISO 10844 作為測試場地標準,ISO 10844 引用 ISO 13473 作為路面紋理表徵標準,ISO 13473 引用 ISO 13472 作為路面吸音測量標準,層層關聯,確保了整個測試鏈的一致性 [2][44][57][125]。遵循這些標準不僅是法規符合性測試的強制要求,更是保證測試數據科學價值與工程應用價值的最佳實踐。

13.5.2 測量系統校準與驗證 (Measurement System Calibration and Verification)

校準(Calibration)是透過與已知準確度的參考標準對比,確定測量儀器的測量特性,必要時進行調整或記錄修正值的過程。驗證(Verification)是確認測量儀器或測試系統是否滿足規定性能要求的過程。系統的校準與驗證是測量質量保證的核心環節,對於輪胎噪音測試這樣對精度要求較高的應用尤為重要。



聲學測量系統的校準涵蓋多個環節。麥克風校準是最基礎的環節,主要包括靈敏度校準與頻率響應校準。靈敏度校準使用聲校準器(Pistonphone 或 Sound Calibrator),在測試前後將校準器耦合至麥克風,產生精確已知的噪音值(通常為 94 分貝或 114 分貝,頻率 1000 赫茲),測量系統讀數應與校準器標稱值一致,允差根據校準器等級而定,1 級校準器為 ± 0.3 分貝,2 級為 ± 0.5 分貝 [127]。如果偏差超出允差,需要在測量系統中輸入修正值或調整增益設置。靈敏度校準應在每次測試前後進行,以監測測量系統的穩定性,前後兩次校準的偏差應小於 0.5 分貝,否則該組測試數據可能無效 [128]。

頻率響應校準更加複雜,需要使用靜電激勵器(Electrostatic Actuator)或活塞發生器(Pistonphone),在麥克風上施加不同頻率的已知聲壓,測量麥克風在各頻率的靈敏度,繪製頻率響應曲線 [129]。這種校準通常由製造商或認可的校準實驗室進行,校準證書會給出各三分之一倍頻程中心頻率或離散頻率點的修正值,測量數據後處理時可應用這些修正值以提高精度。測量麥克風應定期(通常每年一次)送校準實驗室進行全頻段校準,確保其性能保持在規格範圍內 [130]。麥克風的使用壽命

與環境條件密切相關,潮濕、極端溫度、機械衝擊、灰塵污染等都可能導致性能退化,因此需要妥善保管與使用。

對於雙麥克風系統(如聲強探頭、CPX 測量系統),兩支麥克風之間的相位匹配至關重要。相位校準透過麥克風交換法實現:將兩支麥克風暴露於同一聲場(通常使用阻抗管與揚聲器產生平面波),同時測量兩支麥克風的信號,計算幅度比與相位差;然後交換兩支麥克風的位置,再次測量;透過數學處理兩次測量結果,可以提取出麥克風自身的特性差異,在後續測量中進行補償 [131]。ISO 13472-2 標準對阻抗管測量系統規定了嚴格的校準程序,包括基準吸音測試(在已知剛性表面上測量,驗證系統本底吸音小於 3%)與麥克風相位校準(在吸音材料上進行麥克風交換測試) [59]。

噪音計的校準除了麥克風校準外,還包括對整個信號鏈(前置放大器、濾波器、加權網絡、ADC、顯示器等)的綜合校準。IEC 61672-3 標準規定了噪音計的定期檢驗項目,包括參考電平檢查、頻率加權特性檢查、時間加權特性檢查、線性度檢查等 [14]。這些檢驗可以由使用者使用聲校準器、信號發生器、標準電容器等設備進行,也可以委託認可的計量機構進行。噪音計應每 1-2 年進行一次全面的定期檢驗,確保符合標準要求 [132]。

測試設施的校準與驗證同樣重要。半消聲室應定期(通常每 2-3 年)進行聲學性能驗證,包括背景噪音測量、自由場條件驗證(逆平方律測試、環境修正量測量)、混響時間測量等,驗證方法遵循 ISO 3745 或 ISO 26101 標準 [133]。轉鼓測試台應校準轉速測量系統、負載測量系統,驗證轉鼓表面的均勻性(紋理、吸音特性沿圓周的一致性),評估背景噪音水平 [134]。CPX 拖車系統應校準速度測量、溫度測量、硬度測量設備,驗證麥克風位置精度,評估拖車自身產生的背景噪音 [135]。ISO 10844 標準測試跑道應定期進行符合性檢查,包括表面紋理測量(MPD、紋理譜)、聲吸收測量、平整度測量、坡度測量等,驗證周期為:新建時進行驗收測試,此後每 2 年檢查紋理與吸音,每 4 年進行全面檢查 [2]。

13.5.3 測量不確定度評估 (Measurement Uncertainty Evaluation)

測量不確定度(Measurement Uncertainty)是表徵測量結果分散性的參數,反映了由於測量過程中各種因素的影響,測量值與真值之間可能存在的偏差範圍。準確評估測量不確定度是科學測量的基本要求,也是判斷測試結果可信度、對比不同測試結果、制定測試規範的重要依據 [136]。國際標準 ISO/IEC Guide 98-3《測量不

確定度表示指南》(GUM)提供了通用的不確定度評估框架,已被廣泛應用於聲學測量領域 [137]。

輪胎噪音測量的不確定度來源眾多,可大致分為以下幾類:儀器不確定度,包括麥克風靈敏度偏差、噪音計精度、數據採集系統解析度等;方法不確定度,包括麥克風位置偏差、測試速度偏差、溫度測量偏差、修正公式誤差等;環境不確定度,包括背景噪音波動、風速影響、溫度波動、氣壓變化等;樣品不確定度,包括輪



胎樣品的一致性、磨損狀態、氣壓偏差、負載偏差等 [138]。每一個不確定度分量都需要透過 A 類評定(統計分析)或 B 類評定(基於經驗、規格、文獻等)進行量化,然後按照不確定度傳播定律合成為總不確定度 [139]。

以 ISO 13325 滑行透過噪音測試為例,典型的不確定度預算包括:麥克風校準不確定度(約 0.3 分貝),測量重複性(約 0.5 分貝,基於多次測試的標準偏差),測試速度偏差引入的不確定度(約 0.2 分貝,基於噪音隨速度變化的敏感性),溫度偏差引入的不確定度(約 0.3 分貝),背景噪音修正不確定度(約 0.2 分貝),麥克風位置偏差引入的不確定度(約 0.2 分貝) [140]。這些分量按平方和根法合成,得到擴展不確定度($k=2$,置信度約 95%)約為 1.0 分貝。這意味著,在典型測試條件下,如果測得輪胎噪音為 72 分貝,則真值有 95%的概率位於 71 至 73 分貝之間 [141]。

不同測試方法的不確定度水平不同。一般而言,室內測試(如轉鼓法)由於環境條件更可控,不確定度較小(約 0.5-1.0 分貝);室外測試(如透過噪音法)受環境因素影響更大,不確定度較大(約 1.0-1.5 分貝);近場測試(如 CPX 法)信噪比高、重複性好,不確定度居中(約 0.8-1.2 分貝) [142]。降低測量不確定度的途徑包括:使用更高精度的儀器,嚴格執行校準程序,增加測試重複次數取平均值,嚴格控制測試條件(速度、溫度、氣壓等),選擇背景噪音低的測試時段與地點,使用數學修正方法補償已知的系統誤差 [143]。

實驗室間比對試驗(Inter-Laboratory Comparison, ILC)或能力驗證計劃(Proficiency Testing, PT)是評估測試系統整體性能與不確定度的有效手段。在這類活動中,多個實驗室使用各自的設備與程序測試同一組樣品,統計分析所有實驗室結果的一致性,評估各實驗室的測試能力 [144]。ISO 5725 系列標準《測量方法與結果的準確度-第 2 部分:確定標準測量方法重複性與再現性的基本方法》為此類分析提供

了統計框架,定義了重複性(同一實驗室內部測試結果的離散度)與再現性(不同實驗室間測試結果的離散度)等指標 [145]。UN ECE R117 法規的開發過程中,進行了多次大規模實驗室間比對試驗,結果顯示不同實驗室測試同一輪胎的噪音,標準偏差約為 0.8 分貝,這成為法規中不確定度與判定規則制定的重要依據 [146]。

小結

本章系統性地介紹了輪胎噪音測試所需的各類設備與儀器,從基礎的聲學測量設備到專用測試設施,從常規測試技術到先進的聲學成像與智能測試系統,涵蓋了當前國際上廣泛應用的主要測試技術與設備類型。輪胎噪音測試是一個多學科交叉的複雜技術領域,需要綜合運用聲學、振動、信號處理、自動化控制等多方面知識,依託精密的測量儀器與標準化的測試程序,才能獲得準確可靠的測試結果。

基礎聲學測量設備是整個測試系統的核心,包括麥克風與傳感器系統、噪音計與頻譜分析儀、數據採集與信號處理系統。這些設備必須滿足國際標準(如 IEC 61672)的嚴格性能要求,並透過定期校準保持測量準確性。麥克風的選型與配置需根據測試方法(遠場透過噪音測試、近場 CPX 測試、車載 OBSI 測試等)進行針對性設計,以實現最佳的信噪比與測量精度 [1] [2] [5] [8]。

專用測試設施為輪胎噪音的系統評估提供了必要的實驗平台。半消聲室透過模擬自由聲場條件,實現了在完全受控環境中的精密測試,是研究輪胎噪音機制、驗證計算模型的理想場所 [28] [29]。道路轉鼓測試台克服了室外測試受氣候條件限制的問題,能夠高效進行多輪胎、多參數的系統對比測試,但需要特別注意轉鼓曲率效應與路面複製品的準確性 [3] [36] [37]。CPX



拖車測試系統結合了近場測量的高信噪比與道路測試的真實性,已成為路面聲學評估的國際標準方法,其關鍵技術挑戰在於背景噪音控制與測試輪胎的標準化 [43] [44] [45]。

輔助測試儀器為全面理解輪胎噪音提供了必要的補充信息。路面紋理測量設備揭示了路面對輪胎噪音產生的影響機制,現代激光輪廓儀與頻譜分析方法能夠精確量化路面紋理的聲學相關特性 [54] [55] [56]。輪胎物理特性測量設備(硬度計、溫度計、氣壓計等)確保了測試條件的嚴格控制,這對於獲得可重複的測試結果至關重要 [62] [63] [64]。環境與氣象監測設備保證了室外測試數據的有效性,透過

監測與記錄溫度、濕度、風速等參數,可以判斷測試條件是否滿足標準要求,必要時進行數學修正 [74] [75] [76]。

先進測試技術與設備代表了輪胎噪音測試領域的前沿發展方向。聲學攝影機與波束成形技術實現了噪音源的可視化,為輪胎設計優化提供了直觀的指導 [84] [85] [86]。結構振動與模態測試設備揭示了輪胎噪音產生的振動機制,為噪音預測建模提供了實驗依據 [95] [96] [100]。智能測試系統與自動化設備大幅提高了測試效率,降低了人為誤差,而人工智能與機器學習技術的應用正在開啟輪胎噪音測試的智能化新時代 [107] [108] [115]。

測試標準與校準程序是確保測試結果科學性與公信力的制度保障。國際標準體系 (ISO、IEC、UN ECE 等)為輪胎噪音測試提供了統一的技術語言與評估基準,使得不同時間、不同地點、不同實驗室的測試結果具有可比性 [14] [44] [125]。系統的測量系統校準與驗證程序保證了測試設備的準確性與可靠性,而測量不確定度評估則提供了對測試結果信心水平的定量描述 [136] [137] [138]。

展望未來,輪胎噪音測試技術將繼續向著更高精度、更高效率、更智能化的方向發展。感測器微型化與低成本化將使得大規模陣列測試成為常態,提供前所未有的空間與頻率解析能力。虛擬測試與數字孿生技術將與物理測試深度融合,實現測試成本的大幅降低與測試周期的顯著縮短。人工智能將從數據處理工具演變為測試決策助手,甚至測試系統的自主運行者。隨著電動車時代的到來,輪胎噪音作為主導車輛噪音源的地位愈發凸顯,對測試技術的要求也將更加嚴格,推動整個測試技術體系的持續創新與完善。

結論 (Conclusions)

本章的整體分析清楚顯示,輪胎噪音測試設備與儀器並非單純的輔助工具,而是支撐輪胎噪音科學、工程實務與法規制度的核心基石。任何輪胎噪音控制策略、產品性能比較或法規限值制定,若缺乏高品質且標準化的量測系統,其科學意義與政策正當性都將大幅削弱。

研究與實務經驗表明,輪胎噪音量測的不確定性往往來自多個層面,包括感測器本身的精度與校準、量測幾何配置、環境條件變動以及數據處理方法差異。本章所整理的國際標準與設備配置原則,凸顯唯有透過完整的校準程序、嚴格的環境控制與一致的方法學,才能確保不同實驗室、不同時間與不同地點之測試結果具備可比性,進而支撐長期技術發展與政策評估。

從測試方法的演進來看，輪胎噪音測試正逐步由傳統的遠場透過噪音測試，轉向更能反映輪胎—路面互動本質的近場與室內測試方法。CPX、OBSI 與轉鼓測試等技術，雖各有其系統性誤差與適用範圍，但在控制變因、提高效率與支援研發迭代方面，已成為不可或缺的關鍵工具。如何在不同測試方法之間建立可靠的轉換關係，仍是未來輪胎噪音測試科學的重要研究課題。

本章亦顯示，先進聲學量測技術正在重塑輪胎噪音研究的深度與廣度。聲學攝影機與陣列量測技術，使輪胎噪音源得以被精確定位與可視化，突破了過去僅能依賴整體聲級評估的限制；模態分析與振動量測，則將噪音問題回溯至結構動力學層次，強化模型預測與設計最佳化的理論基礎。隨著自動化、人工智慧與數位孿生技術的導入，輪胎噪音測試正逐步從「事後驗證」轉向「前期預測與即時決策支援」。

總結而言，輪胎噪音測試設備與儀器的發展，直接反映了輪胎噪音研究由經驗導向走向科學化、由局部量測走向系統整合的成熟歷程。在未來電動化、智慧化與永續交通的背景下，輪胎噪音測試不僅需要更高的精度與效率，更必須能夠支援跨尺度、跨學科的整合分析。本章所建構的測試技術全貌與方法論框架，為後續輪胎噪音模型驗證、低噪音技術研發以及政策法規制定，提供了堅實且不可或缺的科學基礎。

參考文獻

- [1] Celestina, M., Hrovat, J., & Kardous, C. A. (2018). Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. *Applied Acoustics*, 139, 119-128.
- [2] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 9-14.
- [3] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (1986). Development of three methods for measurement of tire/road noise emission: Coast-by, trailer and laboratory drum. *Noise Control Engineering Journal*, 27(3), 68-84.
- [4] ISO 13473-3:2002. (2002). *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 3: Specification and classification of profilometers*. International Organization for Standardization.
- [5] ISO 11819-2:2017. (2017). *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method*. International Organization for Standardization.
- [6] Adams, G., Kamst, F., Pugh, S., & Marshall, S. (2006). Dynamic measurement of tyre/road noise. *Proceedings of Acoustics*, Australian Acoustical Society.
- [7] Oshino, Y., & Tachibana, H. (1991). Noise source identification on rolling tires by sound intensity measurement. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 12(2), 87-94.
- [8] Donovan, P., & Lodico, D. (2009). *Measuring tire-pavement noise at the source* (NCHRP Report 630). Transportation Research Board.
- [9] Halkon, B., Zhu, Q., Zhao, S., & Parnell, J. (2025). A review of road traffic noise camera technologies. *Proceedings of ACOUSTICS 2025*, Australian Acoustical Society.
- [10] Achanta, Y. (2023). *Structure-borne vehicle interior noise estimation using accelerometer based intelligent tires in passenger vehicles* (Doctoral dissertation). Virginia Tech.
- [11] Soares, L., Dumont, M., & Petzsche, T. (2016). Sensing structural borne noise in solid state materials and related applications. *Proceedings of Euronoise 2016*.

- [12] Younis, M., & El-Basheer, T. M. (2023). Calibration and uncertainty evaluation for sound level meter utilizing calibrator. *Journal of Measurement Science and Applications*, 3(1), 1-8.
- [13] Narang, P., & Bell, T. (2008). New IEC standards and periodic testing of sound level meters. *Proceedings of INTERNOISE 2008*, Shanghai.
- [14] IEC 61672-1:2013. (2013). *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*. International Electrotechnical Commission.
- [15] Barański, R., & Wszolek, G. (2013). Educational implementation of a sound level meter in the LabVIEW environment. *Archives of Acoustics*, 38(1), 111-116.
- [16] Staneva, G., Ivanov, R., & Kadikyanov, G. (2023). Octave band analysis of car noise emissions at different speeds and on different pavements. *Transport Problems*, 18(3), 15-24.
- [17] Abouel-Seoud, S. (2019). Tire and engine sources contribution to vehicle interior noise and vibration exposure levels. *Archives of Acoustics*, 44(1), 153-163.
- [18] Donovan, P., & Janello, C. (2014). Vehicle noise functional performance indicators using tire sound intensity. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 249(4), 3641-3652.
- [19] Rasmussen, P., & Gade, S. (1996). *Tyre noise measurement on a moving vehicle* (Brüel & Kjær Application Note BO0452). Brüel & Kjær.
- [20] Batel, M., Marroquin, M., Hald, J., Christensen, J. J., & Schuhmacher, A. (2003). Noise source location techniques-simple to advanced applications. *Sound and Vibration*, 37(1), 24-31.
- [21] Zhao, H., Allanson, D., & Ren, X. J. (2015). Use of shore hardness tests for in-process properties estimation/monitoring of silicone rubbers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(6), 3867-3875.
- [22] Saponara, S., & Neri, B. (2017). Radar sensor signal acquisition and multidimensional FFT processing for surveillance applications in transport systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(4), 604-615.

- [23] Crocker, M. J., Li, Z., & Arenas, J. P. (2005). Measurements of tyre/road noise and of acoustical properties of porous road surfaces. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 10(4), 155-164.
- [24] Kindt, P., De Coninck, F., & Sas, P. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. *Proceedings of ISMA 2008*.
- [25] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Bueno, M., Athari, S., Pieren, R., ... & Poulidakos, L. D. (2022). Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1911-1934.
- [26] Copeland, T. J., & Wilhoit, R. S. (2012). Tire noise pass-by testing system meets latest standards. *Sound & Vibration*, 46(5), 12-17.
- [27] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [28] Corradi, R., Ripamonti, F., & Squicciarini, G. (2019). Test methodologies for mapping tyre exterior noise in semi-anechoic chamber. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 259(4), 4882-4893.
- [29] Arslan, E. (2010). *A new method to measure vehicle pass-by noise in a finite dimensioned semi-anechoic room* (Master's thesis). Middle East Technical University.
- [30] ISO 3745:2012. (2012). *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms*. International Organization for Standardization.
- [31] Azizi, Y. (2020). Measurement methods of tire/road noise. In *Automotive Tire Noise and Vibrations* (pp. 85-110). Elsevier.
- [32] Nowak, J. J. (2023). *Sound source identification for tire-pavement interaction* (Master's thesis). TU Wien.
- [33] Hughes, A. (2016). *Acoustic source localisation and tracking using microphone arrays* (Doctoral dissertation). University of Edinburgh.
- [34] Slama, J. (2012). *Evaluation of a new measurement method for tire/road noise* (Master's thesis). Chalmers University of Technology.

- [35] ISO 362-1:2015. (2015). *Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method – Part 1: M and N categories*. International Organization for Standardization.
- [36] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., Gonzalez-Zamorano, M., & Campillo-Davo, N. (2019). An alternative Drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 152, 158-167.
- [37] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Peral-Orts, R. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities. *Applied Acoustics*, 113, 23-38.
- [38] Ejsmont, J. A. (1982). *Tire/road noise: Comparison of road and laboratory measurements and influence of some tire parameters on generation of sound* (Doctoral dissertation). Chalmers University of Technology.
- [39] Cao, R. (2017). *Investigation of noise and vibration in tires through analytical modeling, tests and simulations* (Doctoral dissertation). Purdue University.
- [40] Bühlmann, E., Egger, S., Mioduszewski, P., & Sandberg, U. (2018). An in-depth look at the tire rubber hardness influence on tire/road noise measurements. *Proceedings of INTERNOISE 2018*, Chicago.
- [41] Meng, F. (2018). *Modeling of moving sound sources based on array measurements* (Doctoral dissertation). KU Leuven.
- [42] Gade, S., Hald, J., Gomes, J., Dirks, G., & Ginn, B. (2015). Recent advances in moving-source beamforming. *Sound & Vibration*, 49(4), 8-13.
- [43] Sandberg, U. (1998). *Noise trailers of the world: Tools for tire/road noise measurements with the close-proximity method* (VTI Report 382A). Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [44] ISO 11819-1:1997. (1997). *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical pass-by method*. International Organization for Standardization.

- [45] Kozak, P., Matuszkova, R., & Radimsky, M. (2017). Measuring tyre rolling noise at the contact patch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 216(1), 012047.
- [46] Lelong, J., & Lédée, F. A. (2020). Can CPX method evaluate truck tyre noise? A first approach using standardized light truck test tyre. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 261(3), 5186-5197.
- [47] Lam, Y. K. (2015). *Contributions to close-proximity method for tyre/road noise measurement in highly urbanized environment* (Doctoral dissertation). Hong Kong Polytechnic University.
- [48] Bühlmann, E., Schlatter, F., Egger, S., Schlatter, M., & Lieb, T. (2021). Temperature influence on tire/road noise measurements: Recently collected data and discussion of various issues related to standard testing procedures. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(5), 825-836.
- [49] Mak, K. L. (2015). *Statistical modelling of tyre/road noise for urban driving conditions* (Doctoral dissertation). Hong Kong Polytechnic University.
- [50] Bühlmann, E., Egger, S., Mioduszewski, P., & Sandberg, U. (2018). An in-depth look at the tire rubber hardness influence on tire/road noise measurements. *Proceedings of INTERNOISE 2018*, Chicago.
- [51] Raitanen, N. (2005). *Measuring of noise and wearing of quiet surfaces* (Master's thesis). Helsinki University of Technology.
- [52] Siebert, D. (2017). *How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise* (Doctoral dissertation). Norwegian University of Science and Technology.
- [53] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Bueno, M., Athari, S., Pieren, R., ... & Poulidakos, L. D. (2022). Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1911-1934.
- [54] Loprencipe, G., & Cantisani, G. (2013). Unified analysis of road pavement profiles for evaluation of surface characteristics. *Modern Applied Science*, 7(8), 1-14.
- [55] Iwao, K., & Yamazaki, I. (1996). A study on the mechanism of tire/road noise. *JSAE Review*, 17(2), 139-144.

- [56] Čelko, J., Kováč, M., & Kotek, P. (2016). Analysis of the pavement surface texture by 3D scanner. *Transportation Research Procedia*, 14, 2994-3003.
- [57] ISO 13473-1:1997. (1997). *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of mean profile depth*. International Organization for Standardization.
- [58] Castro-Fresno, D., Andrés-Valeri, V. C., Rodriguez-Hernandez, J., & Vega-Zamanillo, A. (2024). Developing two-layer porous asphalt to decrease noise emissions. *Transport Problems*, 19(1), 15-28.
- [59] ISO 13472-2:2010. (2010). *Acoustics – Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ – Part 2: Spot method for reflective surfaces*. International Organization for Standardization.
- [60] Kumar, A., Mondal, P., Vijay, P., Bhangale, U. D., & Tyagi, D. (2011). Comparative study of sound absorption coefficients on different types of road surfaces using non-destructive method as per ISO 13472-2:2010. *Physical Review & Research International*, 1(2), 45-56.
- [61] Bahia, H. U., Rajaei, M., & Sefidmazgi, N. R. (2013). *Characterizing rider safety in terms of asphalt pavement surface texture* (Report No. FHWA-WI-13-006). Wisconsin Department of Transportation.
- [62] Dimulescu, S. C., Nioață, A., & Wetternek, M. (2024). Analysis of the determination of the hardness of composite materials with rubber matrices with additions of FA and PVC. *Fiability & Durability*, 1(1), 264-269.
- [63] Arguello, J. M., & Santos, A. (2016). Hardness and compression resistance of natural rubber and synthetic rubber mixtures. *Journal of Physics: Conference Series*, 687(1), 012088.
- [64] Bühlmann, E., Egger, S., Mioduszewski, P., & Sandberg, U. (2018). An in-depth look at the tire rubber hardness influence on tire/road noise measurements. *Proceedings of INTERNOISE 2018*, Chicago.
- [65] ISO/TS 11819-3:2017. (2017). *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres*. International Organization for Standardization.

- [66] Bühlmann, E., Schlatter, F., Egger, S., Schlatter, M., & Lieb, T. (2021). Temperature influence on tire/road noise measurements: Recently collected data and discussion of various issues related to standard testing procedures. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(5), 825-836.
- [67] Saputra, D. A., Husin, S., & Gumelar, M. D. (2020). Preparation and characterization of hard rubber and soft rubber for marine rubber fender. *Macromolecular Symposia*, 391(1), 1900189.
- [68] Copeland, T. J., & Wilhoit, R. S. (2012). Tire noise pass-by testing system meets latest standards. *Sound & Vibration*, 46(5), 12-17.
- [69] Continental Tires. (n.d.). *UN Regulation 117: Tire rolling resistance, sound and wet grip*. Retrieved from <https://www.continental-tires.com/products/b2b/business-know-how/un-regulation-117/>
- [70] Zafeiropoulos, N., Ballatore, M., Moorhouse, A., & Hu, J. (2015). Active control of structure-borne road noise based on the separation of front and rear structural road noise related dynamics. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 8(2), 502-510.
- [71] Siebert, D. (2017). *How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise* (Doctoral dissertation). Norwegian University of Science and Technology.
- [72] UN ECE R117. (2020). *Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance* (Revision 4). United Nations Economic Commission for Europe.
- [73] Siebert, D. (2017). *How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise* (Doctoral dissertation). Norwegian University of Science and Technology.
- [74] Celestina, M., Hrovat, J., & Kardous, C. A. (2018). Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. *Applied Acoustics*, 139, 119-128.
- [75] Bühlmann, E., Schlatter, F., Egger, S., Schlatter, M., & Lieb, T. (2021). Temperature influence on tire/road noise measurements: Recently collected data

- and discussion of various issues related to standard testing procedures. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(5), 825-836.
- [76] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. Informex, Handelsbolag.
- [77] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 9-14.
- [78] ISO 10844:2021. (2021). *Acoustics – Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres*. International Organization for Standardization.
- [79] Dwisetyo, B., & Hermawanto, D. (2020). Evaluation and analysis of uncertainty measurement of the sound level meter calibration by coupler method. *Journal of Physics and Its Applications*, 2(2), 41-50.
- [80] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [81] Hughes, A. (2016). *Acoustic source localisation and tracking using microphone arrays* (Doctoral dissertation). University of Edinburgh.
- [82] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (1986). Development of three methods for measurement of tire/road noise emission: Coast-by, trailer and laboratory drum. *Noise Control Engineering Journal*, 27(3), 68-84.
- [83] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [84] Halkon, B., Zhu, Q., Zhao, S., & Parnell, J. (2025). A review of road traffic noise camera technologies. *Proceedings of ACOUSTICS 2025*, Australian Acoustical Society.
- [85] Nowak, J. J. (2023). *Sound source identification for tire-pavement interaction* (Master's thesis). TU Wien.
- [86] Batel, M., Marroquin, M., Hald, J., Christensen, J. J., & Schuhmacher, A. (2003). Noise source location techniques-simple to advanced applications. *Sound and Vibration*, 37(1), 24-31.

- [87] Gade, S., Hald, J., Gomes, J., Dirks, G., & Ginn, B. (2015). Recent advances in moving-source beamforming. *Sound & Vibration*, 49(4), 8-13.
- [88] Chakravarthula, P., D'Souza, J. A., & Fuchs, H. (2023). Seeing with sound: Long-range acoustic beamforming for multimodal scene understanding. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 18884-18894.
- [89] Meng, F. (2018). *Modeling of moving sound sources based on array measurements* (Doctoral dissertation). KU Leuven.
- [90] Gade, S., Hald, J., Gomes, J., Dirks, G., & Ginn, B. (2015). Recent advances in moving-source beamforming. *Sound & Vibration*, 49(4), 8-13.
- [91] Hughes, A. (2016). *Acoustic source localisation and tracking using microphone arrays* (Doctoral dissertation). University of Edinburgh.
- [92] Nowak, J. J. (2023). *Sound source identification for tire-pavement interaction* (Master's thesis). TU Wien.
- [93] Batel, M., Marroquin, M., Hald, J., Christensen, J. J., & Schuhmacher, A. (2003). Noise source location techniques-simple to advanced applications. *Sound and Vibration*, 37(1), 24-31.
- [94] Chakravarthula, P., D'Souza, J. A., & Fuchs, H. (2023). Seeing with sound: Long-range acoustic beamforming for multimodal scene understanding. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 18884-18894.
- [95] Achanta, Y. (2023). *Structure-borne vehicle interior noise estimation using accelerometer based intelligent tires in passenger vehicles* (Doctoral dissertation). Virginia Tech.
- [96] Zafeiropoulos, N., Ballatore, M., Moorhouse, A., & Hu, J. (2015). Active control of structure-borne road noise based on the separation of front and rear structural road noise related dynamics. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 8(2), 502-510.
- [97] Soares, L., Dumont, M., & Petzsche, T. (2016). Sensing structural borne noise in solid state materials and related applications. *Proceedings of Euronoise 2016*.

- [98] Ricci, A. (2022). *Optimization of the structure-borne noise analysis methods with the help of virtual sensing with numerical and experimental results integration* (Doctoral dissertation). University of Trieste.
- [99] Achanta, Y. (2023). *Structure-borne vehicle interior noise estimation using accelerometer based intelligent tires in passenger vehicles* (Doctoral dissertation). Virginia Tech.
- [100] Walton, R. J. (2018). *Characterization of road surfaces using high resolution 3D surface scans to develop parameters for predicting tire-surface friction* (Doctoral dissertation). The Ohio State University.
- [101] Dunford, A. (2013). *Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course* (Doctoral dissertation). University of Nottingham.
- [102] Kindt, P., De Coninck, F., & Sas, P. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. *Proceedings of ISMA 2008*.
- [103] Cao, R. (2017). *Investigation of noise and vibration in tires through analytical modeling, tests and simulations* (Doctoral dissertation). Purdue University.
- [104] Durlinger, M. P. M. (n.d.). *Vibration behavior of a structure-borne sound demonstrator and reduction of vibration transmission through isolators* (Final report). Eindhoven University of Technology.
- [105] Cao, R. (2017). *Investigation of noise and vibration in tires through analytical modeling, tests and simulations* (Doctoral dissertation). Purdue University.
- [106] Kindt, P., De Coninck, F., & Sas, P. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. *Proceedings of ISMA 2008*.
- [107] Corradi, R., Ripamonti, F., & Squicciarini, G. (2019). Test methodologies for mapping tyre exterior noise in semi-anechoic chamber. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 259(4), 4882-4893.
- [108] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [109] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Peral-Orts, R. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities. *Applied Acoustics*, 113, 23-38.

- [110] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., Gonzalez-Zamorano, M., & Campillo-Davo, N. (2019). An alternative Drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 152, 158-167.
- [111] Azizi, Y. (2020). Measurement methods of tire/road noise. In *Automotive Tire Noise and Vibrations* (pp. 85-110). Elsevier.
- [112] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [113] Copeland, T. J., & Wilhoit, R. S. (2012). Tire noise pass-by testing system meets latest standards. *Sound & Vibration*, 46(5), 12-17.
- [114] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Bueno, M., Athari, S., Pieren, R., ... & Poulidakos, L. D. (2022). Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1911-1934.
- [115] Chakravarthula, P., D'Souza, J. A., & Fuchs, H. (2023). Seeing with sound: Long-range acoustic beamforming for multimodal scene understanding. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 18884-18894.
- [116] Nowak, J. J. (2023). *Sound source identification for tire-pavement interaction* (Master's thesis). TU Wien.
- [117] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, 109835.
- [118] Chakravarthula, P., D'Souza, J. A., & Fuchs, H. (2023). Seeing with sound: Long-range acoustic beamforming for multimodal scene understanding. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 18884-18894.
- [119] Ricci, A. (2022). *Optimization of the structure-borne noise analysis methods with the help of virtual sensing with numerical and experimental results integration* (Doctoral dissertation). University of Trieste.
- [120] Cao, R. (2017). *Investigation of noise and vibration in tires through analytical modeling, tests and simulations* (Doctoral dissertation). Purdue University.

- [121] Azizi, Y. (2020). Measurement methods of tire/road noise. In *Automotive Tire Noise and Vibrations* (pp. 85-110). Elsevier.
- [122] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Peral-Orts, R. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities. *Applied Acoustics*, 113, 23-38.
- [123] IEC 60942:2017. (2017). *Electroacoustics – Sound calibrators*. International Electrotechnical Commission.
- [124] ISO 362-1:2015. (2015). *Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method – Part 1: M and N categories*. International Organization for Standardization.
- [125] UN ECE R117. (2020). *Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance* (Revision 4). United Nations Economic Commission for Europe.
- [126] European Union. (2020). *Regulation (EU) 2020/740 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters*. Official Journal of the European Union.
- [127] Dwisetyo, B., Hermawanto, D., Utomo, F. B., & Prasasti, N. R. (2024). Performance validation of the acoustic comparison coupler for the sound level meter calibration. *MAPAN-Journal of Metrology Society of India*, 39(1), 157-165.
- [128] Younis, M., & El-Basheer, T. M. (2023). Calibration and uncertainty evaluation for sound level meter utilizing calibrator. *Journal of Measurement Science and Applications*, 3(1), 1-8.
- [129] Setyaningsih, E., Meikaharto, R. B. R., & Hakim, A. R. (2020). Design and realization of microcontroller-based sound level meter calibration devices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1007(1), 012181.
- [130] Narang, P., & Bell, T. (2008). New IEC standards and periodic testing of sound level meters. *Proceedings of INTERNOISE 2008*, Shanghai.

- [131] ISO 10534-2:1998. (1998). *Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method*. International Organization for Standardization.
- [132] IEC 61672-3:2013. (2013). *Electroacoustics – Sound level meters – Part 3: Periodic tests*. International Electrotechnical Commission.
- [133] ISO 26101:2017. (2017). *Acoustics – Test methods for the qualification of the acoustic environment – Specifications for anechoic and hemi-anechoic rooms*. International Organization for Standardization.
- [134] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., Gonzalez-Zamorano, M., & Campillo-Davo, N. (2019). An alternative Drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 152, 158-167.
- [135] Lam, Y. K. (2015). *Contributions to close-proximity method for tyre/road noise measurement in highly urbanized environment* (Doctoral dissertation). Hong Kong Polytechnic University.
- [136] ISO/IEC Guide 98-3:2008. (2008). *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. International Organization for Standardization.
- [137] Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*. Bureau International des Poids et Mesures.
- [138] Berge, H. M., & Gerhard, M. (n.d.). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 31(Pt.1).
- [139] Dwisetyo, B., & Hermawanto, D. (2020). Evaluation and analysis of uncertainty measurement of the sound level meter calibration by coupler method. *Journal of Physics and Its Applications*, 2(2), 41-50.
- [140] Copeland, T. J., & Wilhoit, R. S. (2012). Tire noise pass-by testing system meets latest standards. *Sound & Vibration*, 46(5), 12-17.

- [141] Berge, T., & Mioduszewski, P. (n.d.). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UN ECE Regulation 117. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 39(Pt.1).
- [142] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (1986). Development of three methods for measurement of tire/road noise emission: Coast-by, trailer and laboratory drum. *Noise Control Engineering Journal*, 27(3), 68-84.
- [143] Bühlmann, E., Schlatter, F., Egger, S., Schlatter, M., & Lieb, T. (2021). Temperature influence on tire/road noise measurements: Recently collected data and discussion of various issues related to standard testing procedures. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(5), 825-836.
- [144] ISO 5725-2:2019. (2019). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*. International Organization for Standardization.
- [145] ISO 5725-1:2023. (2023). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions*. International Organization for Standardization.
- [146] Berge, H. M., & Gerhard, M. (n.d.). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 31(Pt.1).