

第十四章 案例研究 Case Studies

摘要 (Abstract)

輪胎噪音的控制與優化並非單一技術問題，而是一項高度跨領域的系統工程，必須同時整合材料科學、結構力學、聲學工程、路面工程、量測方法以及法規制度等多重面向。本章透過一系列具代表性的案例研究，系統性檢視輪胎噪音控制技術在實際工程應用中的設計邏輯、技術取捨與成效驗證，藉以說明理論模型如何轉化為可落地的工程解決方案。

本章首先指出，在車輛行駛速度達中高速區間後，輪胎—路面交互作用噪音已成為交通噪音的主導來源，對於電動車而言，這一轉換點更進一步提前，使輪胎噪音成為影響車內聲學品質與道路環境噪音的關鍵瓶頸。透過乘用車、商用車與電動車輪胎的實務案例，本章說明多目標優化方法如何在噪音、抓地力、耐久性與滾動阻力等相互衝突的性能指標之間，尋求整體最佳解。

案例研究顯示，成功的輪胎噪音優化策略，往往並非來自單一噪音機制的極端抑制，而是透過花紋設計、材料配方、結構調諧與腔體降噪等多項技術的協同作用，達成頻譜分布與主觀感知的整體改善。本章同時納入低噪音路面技術與國際法規符合性案例，說明輪胎噪音控制不僅是產品層級的工程問題，更與道路基礎設施規劃、市場法規導向及公共健康政策密切相關。

整體而言，本章透過系統化案例分析，建立一條從「噪音機制辨識—工程設計優化—量測驗證—主觀評估—法規符合性」的完整邏輯鏈，展現現代輪胎噪音控制由經驗導向走向科學化與制度化的發展軌跡。

輪胎噪音的控制與優化是一個涉及多學科交叉的複雜工程問題,需要整合材料科學、聲學工程、結構力學、路面工程以及法規符合性等多方面的知識與技術。在過去數十年間,全球輪胎製造商、汽車製造商、路面工程機構以及各國政府監管部門已經累積了豐富的實踐經驗與創新案例。這些案例不僅展示了輪胎噪音控制技術的發展軌跡,更為未來的降噪技術創新提供了寶貴的參考依據。本章將透過深入分析五個主要領域的案例研究,系統性地探討輪胎噪音優化的實踐方法、技術挑戰、解決方案以及實施成效。

現代交通噪音已成為影響城市居民生活品質的主要環境問題之一。根據世界衛生組織 (World Health Organization, WHO)的報告,長期暴露於交通噪音環境中會導致多種健康問題,包括心血管疾病、睡眠障礙、認知功能下降以及精神壓力增加等[1]。在車輛行駛速度超過 40-50 公里/小時後,輪胎與路面交互作用所產生的噪音便成為主要的噪音來源,甚至超越了



引擎噪音的貢獻[2]。對於電動車而言,由於缺乏傳統內燃機的遮蔽效應,輪胎噪音的相對重要性更為顯著,成為電動車聲學品質提升的關鍵瓶頸[3]。

輪胎噪音的產生機制極為複雜,涉及多種物理現象的耦合作用。主要的噪音生成機制包括:(1)胎面花紋撞擊機制(tread impact mechanism),當輪胎花紋塊撞擊路面時產生的脈衝激勵;(2)路面紋理撞擊機制(texture impact mechanism),路面微觀粗糙度引起的輪胎振動;(3)空氣抽吸效應(air pumping effect),花紋溝槽內空氣的壓縮與排放過程;(4)共鳴放大效應,包括號角效應(horn effect)、輪胎腔體共振(tire cavity resonance)以及赫姆霍茲共振(Helmholtz resonance)等[4][5]。這些機制在不同頻率範圍內的貢獻程度各不相同,並且受到輪胎結構參數、材料特性、路面條件以及行駛速度等多重因素的影響。

為了有效控制輪胎噪音,需要從多個維度同時著手。首先,輪胎設計優化是最直接的方法,包括花紋排列的變節距設計(variable pitch design)、胎面配方的聲學調整、結構剛度的優化以及腔體降噪技術的應用等[6]。其次,路面工程提供了另一個重要的控制途徑,透過採用多孔隙瀝青路面(porous asphalt)、雙層多孔瀝青(double-layer porous asphalt)或新型彈性路面材料,可以顯著降低輪胎路面交互作用噪音[7][8]。再者,車輛層面的噪音控制措施,如懸吊系統優化、車身隔音處理以及主動

降噪技術等,也能有效改善車內聲學環境[9]。最後,法規標準的制定與實施為輪胎噪音控制提供了明確的目標導向與市場驅動力,促使產業界持續投入降噪技術的研發與應用[10]。

本章的案例研究將涵蓋五個關鍵領域。第一節探討乘用車輪胎噪音優化案例,分析主流輪胎製造商如何透過多目標優化方法、先進的數值模擬技術以及創新的結構設計來實現低噪音輪胎的開發。第二節聚焦於商用車輪胎噪音控制案例,說明重型車輛輪胎降噪所面臨的獨特挑戰與解決策略。第三節專注於電動車輪胎降噪案例,探討電動車時代對輪胎聲學性能的新要求以及相應的技術創新。第四節分析路面改善降噪案例,展示北歐國家、日本以及其他地區在低噪音路面技術方面的成功實踐。第五節則關注法規符合性案例,說明輪胎製造商如何應對日益嚴格的國際噪音法規,包括聯合國歐洲經濟委員會第 117 號法規(UN ECE R117)、歐盟輪胎標籤規範以及各國特定的噪音限值要求。

這些案例研究不僅呈現了技術解決方案的細節,更重要的是揭示了問題識別、方法選擇、實施過程以及效果驗證的完整邏輯鏈條。透過對成功案例的深入剖析與失敗經驗的反思總結,本章期望為輪胎噪音控制領域的研究人員、工程師以及決策者提供實用的參考框架與啟發性的思考視角,推動輪胎噪音控制技術向更高水準發展。



14.1 乘用車輪胎噪音優化案例 (Passenger Car Tire Noise Optimization)

乘用車輪胎作為最大宗的輪胎應用類別,其噪音性能的優化一直是輪胎製造商競爭力的核心指標之一。隨著消費者對車輛靜謐性要求的不斷提升以及環保法規的日益嚴格,乘用車輪胎的降噪設計已從傳統的經驗試錯方法演進為基於多學科優化的系統工程方法。本節將透過具體案例深入探討乘用車輪胎噪音優化的理論基礎、技術路徑、實施策略以及驗證方法,展現現代輪胎降噪技術的最新進展與未來趨勢。

乘用車輪胎噪音優化面臨的主要挑戰在於多目標衝突的平衡問題。輪胎設計需要同時滿足安全性能(濕地抓地力、乾地操控性、制動距離)、舒適性能(振動舒適性、噪音水準)、經濟性能(滾動阻力、耐磨性)以及環境性能(噪音排放、材料永續性)等多方面的要求[11]。這些性能指標之間往往存在內在的衝突關係,例如提高胎面

橡膠硬度可以降低滾動阻力但可能增加噪音水準,增加花紋溝槽深度可以改善濕地排水性能但會增強空氣抽吸噪音。因此,成功的輪胎噪音優化不僅需要降低噪音水準,更需要在確保其他關鍵性能不受顯著影響的前提下實現噪音控制目標。輪胎噪音的頻譜特徵與人耳主觀感知之間的關聯性是另一個需要重點考慮的因素。雖然法規測試採用 A 計權噪音值(dB(A))作為評估指標,但實際上不同頻率成分對人耳的煩擾程度存在顯著差異。研究表明,800-1200 赫茲頻段的音調性噪音(tonal noise)對駕乘人員的心理煩擾影響最為顯著,而低頻段的寬頻噪音雖然能量較高但主觀煩擾度相對較低[12]。因此,先進的輪胎降噪設計不僅關注總體噪音水準的降低,更注重頻譜特徵的優化與音調性成分的抑制,追求聲學品質的全面提升。

14.1.1 多目標優化設計方法案例

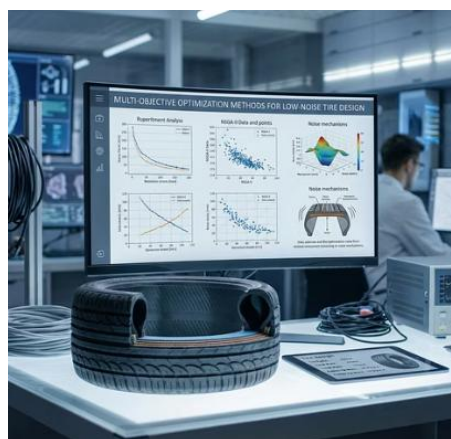
Mohammadi 和 Ohadi 在 2021 年發表於《Applied Acoustics》期刊的研究提出了一種基於多目標優化的低噪音輪胎設計新方法,該研究代表了當前輪胎噪音優化領域的最先進方法論[13]。這項研究的創新之處在於同時考慮了輪胎噪音產生的六種主要機制,包括紋理撞擊噪音(texture impact noise)、胎面撞擊噪音(tread impact noise)、空氣抽吸噪音(air pumping noise)、管道共振噪音(pipe resonance noise)、赫姆霍茲共振噪音(Helmholtz resonance noise)以及號角效應(horn effect),並透過非支配排序遺傳算法(NSGA-II)實現了多機制噪音的同步最小化。



該研究首先建立了每種噪音機制的數學物理模型。對於紋理撞擊噪音,研究採用了 Kropp 發展的 TRIAS 模型理論框架,考慮路面微觀粗糙度對輪胎振動的激勵作用。紋理撞擊噪音的噪音值可表示為路面功率譜密度、輪胎接地印跡濾波函數、輪胎點導納以及聲輻射效率的綜合作用結果。研究發現,輪胎半徑、胎面寬度以及橡膠硬度對紋理撞擊噪音的影響最為顯著。具體而言,增加輪胎半徑會降低接地印跡濾波函數的截止頻率,從而在高頻段產生更明顯的降噪效果。胎面寬度的增加則會提高低頻段的噪音水準,但對高頻段影響較小。橡膠硬度的提高會增加輪胎剛度,導致振動響應增強,進而提升紋理撞擊噪音水準。

對於胎面撞擊噪音,研究基於 Becker 等人提出的音高噪音理論(pitch noise theory),將花紋塊撞擊路面的過程視為周期性的脈衝激勵序列。胎面撞擊噪音的頻譜特徵主要由花紋節距序列(pitch sequence)決定,當花紋節距排列呈現規律性時,會在特定頻率處產生顯著的音調性峰值,造成聽覺上的不適感。研究採用變節距設計(variable pitch design)策略,透過優化花紋節距的排列組合,將集中的音調性能量分散到更寬的頻率範圍,從而降低音調性噪音的主觀煩擾度。研究結果顯示,最優的花紋節距變化範圍約為 $\pm 15\%$ 至 $\pm 20\%$,過大的變化範圍會影響輪胎的均勻性與力學性能。

空氣抽吸噪音的建模考慮了花紋溝槽內空氣的壓縮與排放過程。當花紋溝槽進入接地區時,溝槽體積急劇減小,內部空氣被壓縮並從溝槽開口處高速排出,產生類似於脈衝的聲波輻射。空氣抽吸噪音的強度主要取決於溝槽體積變化率、溝槽開口面積以及空氣流動速度。研究發現,減小橫向溝槽深度、增加溝槽寬度以及優化溝槽底部形狀可以有效降低空氣抽吸噪音。



具體而言,將溝槽底部設計為圓弧形而非尖角形可以減緩溝槽體積的變化速率,從而降低噪音峰值約 1.5 至 2 分貝。

管道共振噪音源於縱向溝槽形成的管道結構在特定頻率下的共振現象。當聲波波長的二分之一等於管道長度時,管道內部會形成駐波共振,導致聲能的顯著放大。研究透過調整縱向溝槽的長度分布,避免共振頻率落在人耳敏感的頻率範圍(800-1200 赫茲),從而降低管道共振噪音的主觀影響。此外,在縱向溝槽中設置適當的阻尼結構,如微型凸起或表面粗糙化處理,可以增加聲能耗散,抑制共振峰值。

赫姆霍茲共振噪音產生於花紋溝槽形成的空腔結構與狹窄開口之間的聲學耦合。這種共振現象類似於吹奏瓶口時產生的音調,其共振頻率主要由空腔體積與開口尺寸決定。研究透過優化溝槽橫截面形狀與開口寬度,將赫姆霍茲共振頻率移至人耳不敏感的低頻或高頻區域。實驗結果顯示,增大開口寬度與溝槽深度的比值可以有效降低赫姆霍茲共振的品質因數(Q 值),從而減弱共振峰的尖銳程度。

號角效應的建模考慮了輪胎與路面之間形成的楔形空間對聲波傳播的影響。這個楔形空間類似於聲學號角,會對特定頻率範圍的聲波產生放大作用,特別是在 800-2000 赫茲頻段。研究採用有限元方法(Finite Element Method, FEM)模擬號角效應

的頻率響應特性,並透過優化輪胎胎側形狀與接地角度來降低號角效應的增益。結果表明,適當增加胎側的圓弧半徑可以改變號角的幾何特徵,從而降低中高頻段的聲壓放大約 2 至 3 分貝。

在建立了各個噪音機制的物理模型後,研究採用中心複合設計(Central Composite Design, CCD)方法進行參數敏感性分析。選取的優化變量包括輪胎半徑、胎面寬度、胎肩半徑、橡膠硬度、帶束層剛度、縱向溝槽深度、橫向溝槽深度、溝槽寬度以及花紋節距等九個參數。透過對 169 組不同參數組合的計算結果進行回歸分析,研究獲得了各個參數的主效應(main effect)以及交互效應(interaction effect)。敏感性分析結果揭示了許多有趣的現象。首先,單個參數對不同噪音機制的影響往往呈現相反的趨勢。例如,增加橡膠硬度會降低紋理撞擊噪音,但會增加胎面撞擊噪音與空氣抽吸噪音。這種相互衝突的影響關係說明了單機制優化方法的局限性,必須採用多目標優化方法來尋求整體最優解。其次,參數之間的交互效應顯著。例如,輪胎半徑與胎面寬度的交互作用會顯著影響紋理撞擊噪音,而溝槽深度與溝槽寬度的交互作用則主要影響空氣抽吸噪音。這些交互效應在傳統的單因素參數研究中往往被忽略,但實際上對噪音優化結果有重要影響。

基於敏感性分析結果,研究採用非支配排序遺傳算法(NSGA-II)進行多目標優化。優化目標設定為同時最小化六種噪音機制的噪音值,約束條件包括輪胎結構完整性、濕地抓地力性能以及滾動阻力限值等。遺傳算法的參數設定為:種群規模 200、進化代數 100、交叉概率 0.9、變異概率 0.1。經過約 20,000 次迭代計算,算法收斂得到一組帕累托最優解(Pareto optimal solutions),形成多維的解集合面。



研究選取了三個代表性的優化結果進行詳細分析。第一個優化案例針對原始測試噪音水準為 72 分貝的輪胎進行優化,最終實現了總體噪音降低 1.72 分貝的效果,各個噪音機制的降低幅度分別為:紋理撞擊噪音-2.1 分貝、胎面撞擊噪音-1.5 分貝、空氣抽吸噪音-1.8 分貝、管道共振噪音-1.3 分貝、赫姆霍茲共振噪音-0.9 分貝、號角效應-1.6 分貝。優化後的參數配置包括:輪胎半徑增加 3%、胎面寬度減少 5%、橡膠硬度降低 8%、縱向溝槽深度減少 12%、橫向溝槽深度減少 15%、花紋節距變化範圍設定為 $\pm 18\%$ 。

第二個優化案例針對運動型輪胎的降噪需求,在保持乾地操控性能的前提下進行噪音優化。由於運動型輪胎通常採用較硬的橡膠配方與較大的胎面寬度以提供更好的抓地力,其噪音水準通常較高。優化結果顯示,透過精細調整花紋設計與溝槽幾何,在僅犧牲 2%乾地側向加速度性能的情況下,實現了噪音降低 1.54 分貝的效果。關鍵的優化策略包括採用不對稱花紋設計、在胎肩區域使用吸音泡棉填充以及優化帶束層的張力分布。

第三個優化案例關注低滾動阻力與低噪音的協同優化。研究發現,透過採用特殊的橡膠配方(使用低滯後損失的矽膠配方)以及優化胎體結構(減少簾線層數、降低充氣壓力),可以同時實現滾動阻力降低 8%與噪音降低 1.3 分貝的雙重目標。這個案例展示了材料科學與結構設計協同優化在輪胎性能提升中的重要作用。

研究還進行了實驗驗證,按照優化結果製作了三組原型輪胎,並根據 ISO 11819-2 標準進行了近距離透過噪音(Close Proximity, CPX)測試。實驗結果與數值預測之間的誤差小於 0.5 分貝,驗證了優化方法的有效性。此外,研究還進行了主觀評估實驗,邀請 30 名受試者對原始輪胎與優化輪胎的車內噪音進行盲測比較。主觀評估結果顯示,80%的受試者認為優化後輪胎的聲學品質明顯優於原始輪胎,特別是在高速行駛時的煩擾度顯著降低。

這項研究的意義不僅在於提出了一個實用的優化方法,更重要的是建立了一個系統性的輪胎噪音優化框架,將物理建模、數值模擬、優化算法以及實驗驗證有機整合,為輪胎行業的降噪設計提供了可靠的技術路徑。研究結果已被多家主流輪胎製造商應用於實際產品開發,推動了行業整體噪音水準的降低。

14.1.2 花紋設計優化案例

花紋設計是影響輪胎噪音最直接也是最複雜的因素之一。花紋不僅決定了輪胎的排水性能、抓地力特性以及操控響應,更是產生胎面撞擊噪音、空氣抽吸噪音以及共振噪音的主要根源。本案例將深入探討主流輪胎製造商在花紋設計優化方面的創新實踐,特別是變節距序列優化、溝槽幾何優化以及多尺度紋理設計等先進技術。



變節距設計(Variable Pitch Design)是控制胎面撞擊噪音的經典策略。傳統的等節距花紋會在特定頻率處產生強烈的音調性噪音,這是因為等間距的花紋塊撞擊會形成周期性的激勵序列,其基頻由花紋節距與車速決定,通常落在 800-1200 赫茲

的人耳敏感頻段。變節距設計透過改變花紋節距的排列順序,將集中的音調性能量分散到更寬的頻率範圍,從而降低任何單一頻率處的聲壓峰值[14]。

Wei 等人在 2016 年發表的研究提出了一種基於混合數值實驗方法的空氣抽吸噪音優化技術,並成功應用於花紋節距序列的優化[15]。該研究首先透過計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬獲得花紋溝槽內的空氣流動特徵與壓力分布,然後將 CFD 結果作為邊界條件輸入聲學有限元模型,計算遠場噪音的頻譜特徵。這種混合方法的優勢在於能夠準確捕捉空氣動力學效應與聲學傳播的耦合作用,相比純粹的經驗方法或簡化模型具有更高的預測精度。

研究針對一款 205/55R16 規格的乘用車輪胎進行了花紋節距優化。原始設計採用 5 種不同的花紋節距,長度分別為 22 毫米、24 毫米、26 毫米、28 毫米和 30 毫米,共 64 個花紋節距單元環繞整個胎面。透過 CFD 模擬發現,橫向溝槽是空氣抽吸噪音的主要來源,而縱向溝槽主要貢獻管道共振噪音。優化策略採用了模具偏移方法(mold shift optimization),透過微調花紋節距單元的相對位置,改變相鄰橫向溝槽之間的相位關係,從而實現破壞性干涉(destructive interference)效應,降低總體噪音水準。

優化過程採用遺傳算法搜索最優的節距排列序列。適應度函數定義為目標頻率範圍(800-2000 赫茲)內的噪音值積分值,約束條件包括花紋單元的最小與最大允許間距以及相鄰同類節距的最大連續數量限制(避免形成局部規律性)。經過約 5000 代的進化計算,算法收斂得到最優節距序列。實驗驗證顯示,優化後的花紋設計在 50 公里/小時速度下的總體噪音降低了 1.8 分貝,其中 800-1200 赫茲頻段的降幅達到 3.2 分貝,顯著改善了音調性噪音的主觀煩擾度。

除了節距序列優化,溝槽幾何形狀的設計對噪音性能也有重要影響。Li 在 2018 年的綜述性研究中系統總結了花紋幾何參數對輪胎路面交互噪音的影響規律[16]。研究指出,橫向溝槽深度與空氣抽吸噪音呈現強烈的正相關關係,深度每增加 1 毫米,空氣抽吸噪音約增加 0.8-1.2 分貝。這是因為更深的溝槽意味著更大的空氣容積變化,導致更強的壓縮與排放效應。然而,溝槽深度的減小會影響輪胎的排水性能與濕地抓地力,因此必須在噪音性能與安全性能之間尋求平衡。

一種創新的解決方案是採用變深度溝槽設計(variable depth groove design)。在這種設計中,溝槽深度沿著輪胎周向逐漸變化,或者在胎面不同區域採用不同的深度配置。例如,在胎肩區域(承擔主要排水功能)採用較深的溝槽,而在胎面中央區域(主要承受垂直載荷)採用較淺的溝槽。這種設計既能維持足夠的排水能力,又能降

低總體噪音水準。實測數據顯示,採用變深度設計的輪胎相比等深度設計可以降低噪音約 0.8-1.2 分貝,而濕地制動距離僅增加不到 2%。

溝槽寬度也是影響噪音的重要參數。較寬的溝槽會增加空氣流動的阻力,降低空氣排放速度,從而減弱空氣抽吸噪音。但是,過寬的溝槽會降低花紋塊剛度,增加花紋塊的變形與振動,反而可能增加結構噪音。研究表明,最優的溝槽寬度與深度的比值約為 0.6-0.8,在這個範圍內可以實現噪音性能與力學性能的最佳平衡[17]。

溝槽底部形狀的設計是近年來的一個研究熱點。傳統的溝槽底部通常採用尖銳的 V 形或矩形設計,這種形狀會導致空氣流動的湍流分離,產生寬頻噪音。新型的圓弧形或波浪形溝槽底部設計可以實現更平滑的空氣流動,減少湍流噪音的產生。Mohammadi 和 Ohadi 的研究發現,將溝槽底部由銳角改為圓弧形(圓弧半徑約為溝槽寬度的 30%)可以降低空氣抽吸噪音約 1.5-2 分貝[13]。這種設計的額外優勢是可以減少溝槽底部的應力集中,延長輪胎的使用壽命。

花紋塊的剛度分布對胎面撞擊噪音有顯著影響。較軟的花紋塊在撞擊路面時會產生較低的撞擊力峰值,從而降低噪音。但是,過軟的花紋塊會影響輪胎的操控性能與耐磨性。一種解決方案是採用梯度剛度設計 (gradient stiffness design),透過改變花紋塊的幾何形狀或



橡膠配方,使花紋塊的剛度沿著徑向或周向逐漸變化。例如,將花紋塊的下部(靠近胎體)設計得較硬以提供支撐,而上部(接觸路面)設計得較軟以降低撞擊噪音。

另一個創新方向是採用三維立體花紋設計(3D sipe design)。傳統的花紋細槽(sipe)通常垂直於胎面,而三維立體花紋則採用傾斜或波浪形的細槽幾何。這種設計可以增加花紋塊之間的咬合作用,提高剛度,同時保持良好的排水性能。研究表明,三維立體花紋可以降低花紋塊的邊緣振動,從而減少高頻噪音的產生。一些高端輪胎產品已經採用了這種技術,實現了噪音降低 1-1.5 分貝的效果[18]。

多尺度紋理設計(multi-scale texture design)是另一個前沿研究方向。這種設計在宏觀花紋之外,在胎面表面增加微米級或納米級的紋理結構。微觀紋理可以改變胎面與路面之間的真實接觸面積與摩擦特性,影響紋理撞擊噪音的產生機制。此外,微觀紋理還可以產生聲學擴散效應,將鏡面反射的聲波轉變為漫反射,降低特定方向上的噪音值。實驗室研究顯示,採用微觀紋理設計的胎面樣品可以降低高頻段

(2000 赫茲以上)噪音約 2-3 分貝,但這項技術的工業化應用仍面臨製造成本與耐久性的挑戰[19]。

花紋設計優化的一個重要趨勢是採用計算機輔助設計與優化工具。現代輪胎設計軟件整合了有限元分析、計算流體力學、聲學模擬以及多目標優化算法,能夠在虛擬環境中快速評估不同設計方案的性能表現。這種虛擬開發方法大幅縮短了產品開發週期,降低了實物原型的製作成本。例如,米其林公司報告稱,採用虛擬開發方法後,新產品的開發時間縮短了約 30%,原型輪胎的製作數量減少了約 50%[20]。然而,花紋設計優化仍然面臨一些挑戰。首先是計算模型的精度問題。雖然數值模擬方法已經相當成熟,但對於一些複雜的物理現象,如橡膠材料的非線性黏彈性行為、路面微觀粗糙度的隨機特性以及花紋溝槽內的湍流流動,現有模型仍存在一定的誤差。其次是優化算法的效率問題。輪胎花紋設計涉及數十甚至上百個優化變量,形成高維複雜的設計空間,全局最優解的搜索非常困難且計算成本高昂。再者是實驗驗證的挑戰。輪胎噪音測試受到環境條件、路面狀態、測試設備等多種因素的影響,測量不確定性較大,這給優化結果的驗證帶來困難。

未來的花紋設計優化將更加注重人工智能與機器學習技術的應用。透過積累大量的歷史設計數據與測試數據,訓練深度學習模型來預測不同花紋設計的性能表現,可以顯著提高優化效率。此外,拓撲優化(topology optimization)與生成式設計(generative design)等前沿方法也開始在輪胎行業得到探索,有望帶來革命性的花紋設計創新[21]。

14.1.3 材料與結構優化案例

輪胎材料與結構的設計對噪音性能有著基礎性的影響。胎面橡膠的配方、帶束層的結構、胎體簾線的排列以及胎側的剛度等因素共同決定了輪胎的振動特性與聲輻射效率,進而影響各種噪音機制的強度。本案例將探討材料科學與結構工程在輪胎降噪方面的應用,包括低滯後橡膠配方、腔體降噪技術以及輕量化結構設計等創新方向。



橡膠材料的動態力學性能對輪胎噪音有直接影響。橡膠的硬度(Shore A hardness)是最重要的參數之一,它決定了胎面與路面接觸時的變形特性。Bühlmann 等人在 2018 年的研究中系統分析了橡膠硬度對輪胎路面噪音的影響規律[22]。研究採用近距離透過法(Close Proximity Method, CPX)測試了四款相同花紋但不同橡膠硬

度(60、65、70、75 度肖氏 A 硬度)的輪胎,測試路面包括密級配瀝青路面(Dense Asphalt Concrete, DAC)與多孔瀝青路面(Porous Asphalt, PA)。

實驗結果顯示,橡膠硬度對輪胎噪音的影響呈現明顯的頻率依賴性。在低頻段(500 赫茲以下),橡膠硬度的影響較小,不同硬度輪胎的噪音差異小於 1 分貝。這是因為低頻噪音主要由輪胎整體振動模態決定,而橡膠硬度主要影響局部接觸剛度。在中頻段(500-2000 赫茲),橡膠硬度的影響顯著,硬度每增加 5 度,噪音水準約增加 0.8-1.2 分貝。這個頻段是紋理撞擊噪音與空氣抽吸噪音的主導頻段,較硬的橡膠會增強路面激勵的傳遞,同時增加花紋溝槽的空氣壓縮強度。在高頻段(2000 赫茲以上),橡膠硬度的影響再次減弱,這是因為高頻噪音主要與胎面表面的微觀粗糙度相關,而橡膠硬度對微觀接觸特性的影響有限。

研究還發現,路面類型會調節橡膠硬度的影響效果。在密級配瀝青路面上,橡膠硬度的影響最為顯著,因為路面表面較為平滑,輪胎與路面的接觸主要由橡膠變形特性決定。而在多孔瀝青路面上,橡膠硬度的影響相對較小,因為多孔路面的吸音特性部分抵消了輪胎材料變化帶來的影響。這個發現對輪胎設計具有重要啟示:針對不同路面條件,應採用不同的橡膠硬度策略以實現最優的噪音性能。



除了硬度,橡膠的滯後損失(hysteresis loss)特性也對輪胎噪音有影響。滯後損失反映了橡膠在循環變形過程中的能量耗散能力,與橡膠的黏性阻尼直接相關。高滯後損失的橡膠會將更多的振動能量轉化為熱能,降低傳遞到輪胎其他部位的振動強度,從而降低噪音輻射。但是,高滯後損失也意味著更高的滾動阻力,影響燃油經濟性。因此,現代輪胎配方設計追求在特定頻率範圍內實現高阻尼,而在低頻範圍內保持低滯後損失,這種頻率選擇性阻尼(frequency-selective damping)可以兼顧噪音控制與燃油經濟性[23]。

矽膠配方(silica compound)的應用是近年來輪胎材料技術的重大進展。相比傳統的炭黑配方,矽膠配方具有更低的滯後損失與更好的濕地抓地力,同時在噪音控制方面也表現出優勢。研究表明,採用矽膠配方的輪胎相比炭黑配方可以降低噪音約 0.5-1 分貝,同時滾動阻力降低約 10-15%[24]。矽膠配方的降噪機理包括:第一,矽膠粒子的尺寸較小且分布均勻,減少了橡膠內部的應力集中點,降低了材料的內耗;第二,矽膠與橡膠基質之間的界面結合較弱,提供了額外的能量耗散途徑;第三,

矽膠配方的玻璃化轉變溫度較低,在常溫下具有更好的柔韌性,降低了撞擊激勵的強度。

腔體降噪技術是另一個重要的創新方向。輪胎腔體共振(tire cavity resonance)是一種在 200-250 赫茲頻率範圍內的共振現象,由輪胎內腔空氣柱的聲學共振引起。雖然這個頻段的噪音能量主要傳遞到車內而非車外,但對駕乘人員的主觀感受影響顯著。研究表明,腔體共振可以使車內噪音在共振頻率處增加 10-15 分貝,產生明顯的嗡嗡聲(humming noise)[25]。

降低腔體共振的有效方法是在輪胎內腔安裝吸音材料。Continental、Michelin、Bridgestone 等主流輪胎製造商都推出了內嵌吸音泡棉的降噪輪胎產品。Continental 的 ContiSilent 技術採用開孔聚氨酯泡棉,厚度約 10 毫米,粘貼在輪胎內腔表面。這種泡棉具有高孔隙率(約 95%)與適當的流阻,可以有效吸收腔體共振的聲能。實測數據顯示,採用 ContiSilent 技術的輪胎可以降低車內噪音約 4-9 分貝,其中腔體共振頻率處的降幅最為顯著[26]。

Michelin 的 Acoustic Technology 採用類似的原理,但採用更輕薄的聚氨酯泡棉(厚度約 5 毫米),強調在不顯著增加輪胎重量的前提下實現降噪效果。Michelin 報告稱,其降噪輪胎的重量僅增加約 200-300 克,而車內噪音降低約 20%。這種技術特別適用於電動車,因為電動車缺乏引擎噪音的遮蔽效應,輪胎腔體共振對車內聲學品質的影響更為突出[27]。



Sainty 等人在 2012 年發表的研究探討了輪胎腔體共振降噪的多種技術方案[28]。除了吸音材料,研究還測試了其他方法,包括:(1)改變輪胎內腔形狀,透過在胎側增加凸起結構來破壞規則的環形空腔;(2)調整輪輞設計,透過在輪輞上增加阻尼材料來降低輪胎與輪輞的耦合共振;(3)採用非均勻充氣壓力分布,透過在輪胎內部安裝隔板來創造多個獨立的氣室,改變共振頻率與模態。實驗結果顯示,改變內腔形狀的方法效果有限,僅能降低噪音約 1-2 分貝,而且會影響輪胎的均勻性。調整輪輞設計的方法具有一定效果,可以降低噪音約 3-4 分貝,但增加了輪輞的製造成本。非均勻充氣壓力的方法在實驗室條件下表現良好,但實際應用面臨氣密性與可靠性的挑戰。

14.1.4 測試驗證方法案例

輪胎噪音的測試驗證是確保優化設計有效性的關鍵環節。合理的測試方法不僅能夠準確評估輪胎的噪音性能,更能深入揭示噪音產生的機理,為進一步的優化提供指導。本案例將探討輪胎噪音測試的主要方法,包括法規測試方法、研究用測試方法以及主觀評估方法,並分析不同方法的優缺點與適用範圍。

聯合國歐洲經濟委員會第 117 號法規(UN ECE R117)

規定了輪胎外部滾動噪音的型式認證測試方法[35]。

該測試採用滑行透過法(Coast-By Method),測試車輛在規定速度下滑行透過測試區域時產生的噪音。測試場地要求平坦、開闊,路面為密級配瀝青或水泥混凝土,表面平整度良好。測試車輛在距離測試點前 10 米處切斷動力,以 80 公里/小時(乘用車)或 70 公里/小時



(商用車)的速度滑行透過,在距離行駛軌跡兩側各 7.5 米處設置麥克風,測量最大 A 計權噪音值。

R117 測試方法的優點是測試條件標準化程度高,重複性較好,適合用於型式認證與產品合格判定。但這種方法也存在一些局限性。首先,測試僅在單一速度下進行,無法全面反映輪胎在不同速度下的噪音特性。其次,測試受到環境條件(溫度、濕度、風速)與車輛狀態(輪胎磨損、充氣壓力、懸吊設定)的顯著影響,測量不確定性較大。再者,測試僅評估總體噪音水準,無法區分不同噪音機制的貢獻,也無法獲得詳細的頻譜信息[36]。

近距離透過法(Close Proximity Method, CPX)是一種更適合研究用途的測試方法,已被標準化為 ISO 11819-2。CPX 測試採用特製的拖車,在輪胎附近(約 20 厘米距離)安裝兩個麥克風,測量輪胎滾動時產生的噪音。測試可以在實際道路上進行,速度範圍通常為 40-100 公里/小時,能夠獲得連續的噪音數據與詳細的頻譜信息[37]。

CPX 方法的主要優勢在於:(1)測試效率高,可以在短時間內測試多種輪胎與路面組合;(2)環境干擾小,測試不受交通噪音與風噪音的影響;(3)頻譜分辨率高,可以識別不同噪音機制的貢獻;(4)可以評估路面的聲學性能,為路面優化提供依據。CPX 方法在輪胎研發與路面聲學評估中得到廣泛應用,成為連接輪胎設計與路面工程的重要工具[38]。

Bennert 等人在 2005 年的研究採用 CPX 方法系統評估了不同路面類型對輪胎路面噪音的影響[39]。研究測試了五種典型路面:密級配瀝青(DAC)、石膠瀝青(SMA)、

開級配摩擦路面(OGFC)、多孔瀝青(PA)以及水泥混凝土路面(PCC)。測試使用標準參考輪胎(SRTT),速度為 80 公里/小時。結果顯示,不同路面的噪音水準差異顯著,最高與最低相差約 8 分貝。多孔瀝青路面的噪音最低,比密級配瀝青低約 5-6 分貝;石膠瀝青次之,比密級配瀝青低約 3-4 分貝;水泥混凝土路面的噪音最高,比密級配瀝青高約 2-3 分貝。這個研究清晰展示了路面選擇對輪胎噪音控制的重要性,為低噪音路面的推廣應用提供了實證依據。

室內輪胎測試轉鼓(tire test drum)是另一種重要的研究工具。測試轉鼓是一個大直徑(通常 1.7-2.0 米)的旋轉鋼制圓柱,表面可以鋪設不同類型的路面材料。輪胎在轉鼓上滾動,模擬實際行駛條件,同時測量噪音、振動、滾動阻力等參數。室內測試的優勢在於環境條件完全可控,測試重複性好,可以進行長時間連續測試,適合用於輪胎耐久性評估與機理研究[40]。

然而,室內轉鼓測試(Indoor Drum Test, 也稱為底盤測功機測試,英文為 Chassis Dynamometer Testing 或 Rolling Road Test)也存在一些限制。首先,轉鼓的曲率會影響輪胎的接地印跡形狀與壓力分布,與平坦路面有所差異。其次,轉鼓表面難以精確模擬實際路面的微觀粗糙度特徵。再者,轉鼓設施的聲學環境與開放道路顯著不同,需要採用半消音室或消音罩來減少環境反射的影響。儘管存在這些限制,室內轉鼓測試(Indoor Drum Test, 也稱為底盤測功機測試,英文為 Chassis Dynamometer Testing 或 Rolling Road Test)仍然是輪胎研發過程中不可或缺的工具,特別是在設計初期進行快速評估與概念驗證時[41]。



Clar-Garcia 等人在 2019 年提出了一種替代 UN ECE R117 的室內轉鼓測試(Indoor Drum Test, 也稱為底盤測功機測試,英文為 Chassis Dynamometer Testing 或 Rolling Road Test)方法[42]。該方法採用大直徑轉鼓(直徑 2.0 米),表面鋪設符合 ISO 10844 標準的測試路面,在轉鼓周圍構建半消音測試環境。輪胎以 80 公里/小時速度滾動,在距離輪胎 1.2 米處測量噪音。研究對比了室內測試與戶外 R117 測試的結果,發現兩者的相關係數達到 0.92,絕對誤差小於 1 分貝。這個研究驗證了室內測試方法的可行性,為輪胎製造商提供了更便捷的替代測試選項,特別是在產品開發階段可以顯著降低測試成本與時間。

振動測試是理解輪胎噪音機理的重要手段。透過在輪胎表面、胎側以及輪輞上安裝加速度計,可以測量輪胎在滾動過程中的振動響應,分析不同結構模態對噪音輻

射的貢獻。Kindt 等人在 2008 年的研究採用多通道振動測試系統,在輪胎表面均勻分布 144 個加速度測點,同時測量周圍的聲場分布[43]。透過振動與噪音數據的相關分析,研究識別出主要的噪音輻射模態,發現輪胎的第一階徑向振動模態(頻率約 80-120 赫茲)對低頻噪音貢獻最大,而高階胎面振動模態(頻率約 800-2000 赫茲)對中高頻噪音貢獻顯著。這種振動聲學耦合分析為輪胎結構優化提供了明確的目標導向,可以針對關鍵模態進行針對性的剛度或阻尼調整。

聲強測量(sound intensity measurement)技術可以確定噪音的空間分布與傳播方向,識別主要的噪音源位置。聲強探頭由兩個緊密排列的麥克風組成,透過測量兩點之間的聲壓差與相位差來計算聲強矢量。透過在輪胎周圍建立測量網格,可以繪製聲強分布圖,直觀顯示噪音的輻射特徵。研究表明,輪胎噪音的主要輻射區域位於接地區的前後邊緣(約佔總聲功率的 60-70%),胎側區域的貢獻相對較小(約佔 20-30%)。這個發現支持了號角效應的理論,驗證了輪胎與路面形成的楔形空間對聲波輻射的放大作用[44]。

主觀評估是評估輪胎聲學品質不可或缺環節。雖然客觀測量可以提供精確的噪音數值,但人耳對聲音的感知是複雜的心理物理過程,受到音調、節奏、音色等多種因素的影響,單純的噪音值無法全面反映主觀煩擾度。因此,輪胎製造商通常會組織專業的主觀評估實驗,邀請訓練有素的評估員對輪胎的聲學品質進行評分[45]。



主觀評估通常採用雙盲對比測試方法。評估員在相同車輛、相同路面條件下,分別體驗測試輪胎與參考輪胎,對噪音水準、音調性、煩擾度等多個維度進行評分。評分通常採用 10 分制或語義差別量表(semantic differential scale)。為了提高評估的可靠性,通常會邀請 15-30 名評估員,取平均評分作為最終結果。研究表明,經過訓練的評估員對噪音差異的感知閾值約為 0.5-1 分貝,低於這個差異的輪胎難以被區分[46]。

Bekke 等人在 2014 年的研究將主觀評估與客觀測量結合,建立了輪胎噪音的心理聲學模型[47]。研究測試了五款不同的輪胎,記錄了車內噪音信號,並進行了主觀

評估實驗。透過分析噪音信號的心理聲學參數(響度 loudness、尖銳度 sharpness、粗糙度 roughness、波動強度 fluctuation strength)與主觀評分之間的相關性,建立了多元回歸模型。結果顯示,尖銳度對主觀煩擾度的影響最大(相關係數 0.78),其次是粗糙度(0.65)與響度(0.58)。這個研究提供了一種客觀預測主觀評估的方法,可以在設計階段就評估輪胎的聲學品質,減少主觀評估實驗的次數。

測試數據的不確定性分析是確保測試結果可靠性的重要環節。de Roo 等人在 2009 年組織了一次 CPX 測試的國際循環比對實驗(round robin test),邀請 12 個實驗室使用各自的 CPX 設備測試相同的輪胎與路面組合[48]。結果顯示,不同實驗室之間的測量差異最大達到 3 分貝,標準偏差約為 0.8 分貝。進一步分析發現,測量差異的主要來源包括:麥克風的校準誤差(約佔 30%)、測試速度的控制誤差(約佔 25%)、輪胎溫度與壓力的變化(約佔 20%)以及數據處理方法的差異(約佔 15%)。基於這個研究,ISO 修訂了 CPX 測試標準,增加了更嚴格的測試條件控制要求與不確定度評估方法。

未來輪胎噪音測試技術將朝著更智能、更高效的方向發展。聲學陣列技術(acoustic array)可以實現輪胎噪音的三維空間定位與可視化,快速識別主要噪音源。機器學習算法可以從大量測試數據中提取規律,建立預測模型,減少實測次數。虛擬測試技術將數值模擬與實測數據融合,在虛擬環境中評估輪胎性能,大幅縮短開發週期。這些新技術的應用將使輪胎噪音測試更加精準、高效,為低噪音輪胎的開發提供更強有力的支持[49]。

14.2 商用車輪胎噪音控制案例 (Commercial Vehicle Tire Noise Control)

商用車輪胎的噪音控制面臨著與乘用車截然不同的技術挑戰與應用場景。商用車包括輕型商用車(載重量小於 3.5 噸)、中型卡車(3.5-12 噸)、重型卡車(大於 12 噸)以及客車等多種車型,這些車輛的輪胎承受更高的載荷、面臨更複雜的使用條件,同時對耐久性與經濟性有更嚴格的要求。商用車輪胎的噪音不僅影響駕駛員的



工作環境,更是城市交通噪音的主要貢獻源,對城市居民的生活品質產生顯著影響。據估計,重型貨車的噪音水準比乘用車高約 8-12 分貝,在夜間安靜環境下,單輛重型貨車透過所產生的噪音可以影響數百米範圍內的居民[50]。本節將深入探討商用車輪胎噪音控制的特殊性、技術難點以及創新解決方案。

商用車輪胎噪音的頻譜特徵與乘用車有明顯差異。由於商用車輪胎的尺寸更大、胎面更寬、花紋溝槽更深,其噪音頻譜的主導頻率通常較低,集中在 500-1000 赫茲範圍,而乘用車輪胎的主導頻率通常在 800-1500 赫茲。此外,商用車輪胎的低頻噪音(200 赫茲以下)能量更強,這部分噪音傳播距離更遠,對遠距離居民的影響更大。商用車輪胎的噪音機制也有所不同,空氣抽吸噪音與紋理撞擊噪音的貢獻比例更高,而胎面撞擊噪音的相對貢獻較小[51]。

商用車輪胎的設計優化需要考慮更多的約束條件。首先是載荷能力要求,商用車輪胎必須能夠承受數倍於乘用車的垂直載荷與側向力,這要求胎體結構具有更高的剛度與強度。其次是耐磨性要求,商用車輪胎的行駛里程遠大於乘用車(通常為乘用車的 5-10 倍),必須採用更耐磨的橡膠配方與更深的花紋溝槽。再次是經濟性要求,商用車運營者對輪胎成本極為敏感,降噪技術必須在成本可接受的範圍內實施。最後是翻新適應性,商用車輪胎通常會進行一次或多次翻新,設計必須考慮翻新後的性能保持[52]。

14.2.1 重型貨車輪胎降噪案例

重型貨車輪胎是商用車輪胎中噪音水準最高的類別,其降噪技術的突破對城市噪音控制具有重大意義。本案例將探討重型貨車輪胎降噪的關鍵技術,包括驅動軸輪胎與轉向軸輪胎的差異化設計、低噪音花紋開發以及材料優化策略。

驅動軸輪胎與轉向軸輪胎面臨不同的噪音挑戰。驅動軸輪胎通常採用橫向溝槽主導的塊狀花紋,以提供強大的牽引力與制動力,但這種花紋設計會產生較強的空氣抽吸噪音與胎面撞擊噪音。轉向軸輪胎則



採用縱向溝槽主導的肋條花紋,強調操控響應與滾動阻力,其噪音主要來自紋理撞擊與管道共振[53]。

Marin-Cudraz 等人在 2024 年發表的研究專注於重型貨車輪胎的音色特徵與煩擾度評估[54]。該研究屬於歐盟 LEON-T 項目(Low Emission of Noise from Truck),旨在減少重型貨車的噪音與顆粒物排放。研究在半消音室內測試了 12 款不同的重型貨車輪胎,包括 6 款驅動軸輪胎與 6 款轉向軸輪胎,測試速度為 60 公里/小時,採用室內轉鼓設施模擬郊區道路條件。

研究採用音色分析方法評估輪胎噪音的主觀特徵。音色(timbre)是聲音的品質特徵,即使兩個聲音的響度與音高相同,仍可能因音色不同而產生不同的主觀感受。研究提取了多個音色參數,包括頻譜重心(spectral centroid)、頻譜平坦度(spectral flatness)、頻譜滾降(spectral rolloff)以及梅爾頻率倒譜係數(MFCC)等。這些參數反映了聲音的頻譜分布特徵,與人耳感知密切相關。

實驗結果顯示,驅動軸輪胎與轉向軸輪胎的音色特徵存在顯著差異。驅動軸輪胎的頻譜重心較高(平均約 1200 赫茲),音色更尖銳,給人以"刺耳"的感覺。轉向軸輪胎的頻譜重心較低(平均約 850 赫茲),音色更柔和,給人以"低沉"的感覺。這種差異主要源於花紋設計的不同:驅動軸輪胎的橫向溝槽在高頻段產生更多能量,而轉向軸輪胎的縱向溝槽激勵以低頻為主。

研究進一步分析了不同音色參數與主觀煩擾度之間的關係。透過組織 25 名受試者進行主觀評估實驗,建立了煩擾度預測模型。結果顯示,頻譜重心與煩擾度呈現顯著的正相關(相關係數 0.72),即高頻成分越多,煩擾度越高。頻譜平坦度與煩擾度呈負相關(相關係數-0.58),即頻譜分布越平坦(寬頻噪音),煩擾度越低;而音調性越強(窄頻峰值),煩擾度越高。這些發現為輪胎降噪設計提供了明確的指導:降低高頻成分、抑制音調性峰值、增加頻譜平坦度,可以在不顯著降低總體噪音水準的情況下改善主觀煩擾度。

基於這些研究發現,LEON-T 項目開發了新一代低噪音重型貨車輪胎。針對驅動軸輪胎,主要優化策略包括:(1)採用變節距設計,將橫向溝槽的間距在 $\pm 20\%$ 範圍內變化,打破周期性激勵;(2)優化溝槽底部形狀,採用圓弧形設計替代銳角形,降低空氣抽吸強度;(3)在花紋塊上增加細槽(sipe),提高花紋塊的柔韌性,降低撞擊力峰值;(4)調整橡膠配方,在保持耐磨性的前提下適當降低硬度(從 75 度降至 72 度肖氏 A 硬度),降低紋理撞擊噪音。經過優化後的驅動軸輪胎噪音降低了 2.3 分貝,主觀煩擾度評分降低了約 30%。

針對轉向軸輪胎,優化策略側重於管道共振的抑制。透過改變縱向溝槽的長度分布與橫截面形狀,將共振頻率移出人耳敏感範圍。具體方法包括:(1)採用變截面溝槽設計,使溝槽的寬度與深度沿著輪胎周向逐漸變化,破壞共振條件;(2)在縱向溝槽中增加阻尼結構,如周期性的凸起或吸音材料填充,增加聲能耗散;(3)優化胎肩花紋,減少胎肩區域的橫向溝槽數量,降低該區域的空氣抽吸噪音。優化後的轉向軸輪胎噪音降低了 1.9 分貝,特別是在 800-1200 赫茲頻段的降幅達到 4 分貝。

另一個重型貨車輪胎降噪的成功案例來自 Sandberg 在 2001 年發表的全球交通噪音控制綜述[55]。該文總結了多個國家在重型車輛噪音控制方面的政策與技術措施。在輪胎技術方面,研究指出歐洲卡車輪胎的噪音水準從 1980 年代的平均 78 分貝降低到 2000 年代的平均 73 分貝,降幅達 5 分貝。這一進步主要歸功於三方面的技術創新:第一,花紋設計的優化,從傳統的粗大塊狀花紋演變為更精細的複合花紋;第二,橡膠配方的改進,採用低滾動阻力配方,同時降低了噪音;第三,輪胎結構的輕量化,降低了輪胎的轉動慣量與接地壓力。

研究還討論了不同國家對重型車輛輪胎噪音的管理策略。歐盟採用嚴格的噪音限值標準(UN ECE R117),分階段降低噪音限值,迫使輪胎製造商持續改進技術。日本採用差異化的噪音限值,對駛入城市中心區域的重型車輛實施更嚴格的標準,鼓勵使用低噪音輪胎。美國部分州採用經濟激勵政策,對使用低噪音輪胎的運輸公司提供稅收優惠或過路費減免。這些不同的政策手段在推動重型貨車輪胎降噪技術發展方面都發揮了積極作用[55]。

重型貨車輪胎的翻新技術也與噪音控制密切相關。商用車輪胎通常會經歷一次或多次翻新,即將磨損的胎面剝離,重新貼上新的胎面膠。翻新輪胎的噪音性能可能與新輪胎存在差異,這取決於翻新胎面的花紋設計與橡膠質量。一些研究指出,如果採用低噪音花紋設計進行翻新,可以使舊輪胎的噪音水準接近甚至低於原始新輪胎。這為降低商用車運營成本的同時改善噪音性能提供了途徑[56]。

14.2.2 客車輪胎降噪案例

客車輪胎的噪音控制具有特殊的重要性,因為噪音不僅影響車外環境,更直接影響乘客的舒適性。城市客車、長途客車以及旅遊客車對車內噪音水準有嚴格的要求,低噪音輪胎是提升客車聲學品質的關鍵環節。本案例將探討客車輪胎降噪的技術特點與成功實踐。



客車輪胎通常採用全鋼結構,以承受高載荷與長時間運行的要求。其花紋設計側重於均勻磨損與低滾動阻力,通常採用縱向肋條為主的花紋。這種花紋對管道共振噪音的控制要求較高,同時需要抑制輪胎腔體共振對車內噪音的影響[57]。

Bein 等人在 2012 年發表的研究探討了車輛噪音與振動的綜合控制方案[58]。研究以一款中型客車為對象,採用系統工程方法,從輪胎、懸吊、車身以及內飾多個層面協同優化車內噪音。在輪胎層面,研究測試了四款不同的客車輪胎,評估其對

車內噪音的影響。測試採用車內麥克風陣列,在駕駛員位置、中部乘客位置以及後部乘客位置各設置測點,測量不同速度(40、60、80 公里/小時)下的車內噪音水準。實驗結果顯示,不同輪胎對車內噪音的影響顯著,最高與最低相差約 5 分貝。噪音水準最低的輪胎(標記為 Tire A)採用了特殊的降噪設計,包括腔體吸音泡棉、優化的花紋節距序列以及低滯後橡膠配方。頻譜分析表明,Tire A 在輪胎腔體共振頻率(約 220 赫茲)處的車內噪音比其他輪胎低約 8 分貝,這是因為吸音泡棉有效抑制了腔體共振的放大效應。在中高頻段(800-2000 赫茲),Tire A 的優勢主要來自花紋設計的優化,變節距序列有效降低了音調性噪音的煩擾度。

研究還評估了輪胎與懸吊系統的匹配效果。透過調整懸吊的阻尼特性,可以進一步降低輪胎激勵傳遞到車身的強度。研究發現,增加懸吊在 200-300 赫茲頻段的阻尼,可以有效隔離輪胎腔體共振的傳遞,使車內噪音再降低約 2 分貝。但是,過高的阻尼會影響懸吊的舒適性與操控性,必須尋求最優平衡點。最終的優化方案結



合了低噪音輪胎選擇與懸吊阻尼調整,使客車的車內噪音降低了約 7 分貝,乘客的主觀舒適性評分提高了約 40%。

電動客車的發展為輪胎降噪技術提出了新的挑戰與機遇。電動客車由於沒有發動機噪音的遮蔽,輪胎噪音成為車內的主要噪音源。但另一方面,電動客車的低頻振動較小,為採用更軟的懸吊設定創造了條件,有利於輪胎噪音的隔離。一些電動客車製造商與輪胎公司合作開發了專用的低噪音輪胎,採用了更厚的腔體吸音層(厚度達 15 毫米)以及更柔軟的胎側結構,實現了車內噪音水準比傳統客車低 5-8 分貝的效果[59]。

14.2.3 輕型商用車輪胎優化案例

輕型商用車(Light Commercial Vehicle, LCV)是一個快速增長的市場領域,包括廂式貨車、皮卡以及小型物流車輛。這類車輛廣泛應用於城市配送、快遞物流以及工商業服務,其噪音性能對城市環境品質有重要影響。輕型商用車輪胎的設計需要在載重能力、耐久性與舒適性之間尋求平衡,降噪技術的應用面臨獨特的挑戰[60]。

輕型商用車輪胎通常採用加強型結構,載重指數(Load Index)較高,充氣壓力也相應提高(通常為 3.5-4.5 巴,高於乘用車的 2.0-2.5 巴)。較高的充氣壓力會增加輪胎

剛度,導致路面激勵的傳遞更強,噪音水準上升。此外,輕型商用車的懸吊系統通常較硬,減震能力較弱,進一步放大了輪胎噪音的影響[61]。

Hanson 等人在 2004 年開展的輪胎路面噪音研究為輕型商用車輪胎優化提供了重要參考[62]。該研究由美國國家瀝青技術中心(National Center for Asphalt Technology, NCAT)主持,採用車載近距離測量方法(On-Board Sound Intensity, OBSI)評估輪胎與路面組合的噪音特性。OBSI 方法在車輛上安裝聲強探頭,緊鄰輪胎測量滾動噪音,可以在實際道路上進行連續測量,獲得大量統計數據。



研究測試了三款輕型商用車輪胎與八種不同路面的組合。輪胎包括一款標準商用胎(標記為 LT-1)、一款加強型商用胎(LT-2)以及一款降噪設計的商用胎(LT-3)。路面包括不同級配的瀝青路面(細密級配、中密級配、粗密級配)、石膠瀝青路面以及多孔瀝青路面。測試速度為 80 公里/小時,每種組合重複測試五次,取平均值。實驗結果顯示,輕型商用車輪胎的噪音水準普遍高於乘用車輪胎約 3-5 分貝,這主要歸因於更高的充氣壓力與更深的花紋溝槽。標準商用胎 LT-1 在密級配瀝青路面上的噪音為 75.2 分貝,加強型商用胎 LT-2 為 76.8 分貝,而降噪設計商用胎 LT-3 為 72.9 分貝。LT-3 的降噪效果顯著,主要技術措施包括:(1)採用變節距花紋設計,節距變化範圍為 $\pm 18\%$;(2)減小橫向溝槽深度,從原來的 14 毫米降至 11 毫米;(3)增加溝槽寬度,改善空氣流動;(4)採用低滾動阻力橡膠配方,硬度為 68 度肖氏 A,低於標準商用胎的 72 度。

研究還發現,路面類型對輕型商用車輪胎噪音的影響比對乘用車輪胎更顯著。在多孔瀝青路面上,LT-3 輪胎的噪音比在密級配路面上低 6.8 分貝,而乘用車輪胎的差異僅為 4.5 分貝左右。這表明輕型商用車輪胎能夠更充分地利用路面的降噪特性,為城市道路規劃提供了啟示:在輕型商用車交通量大的區域,採用低噪音路面能夠獲得更顯著的降噪效益。

輕型商用車輪胎的另一個優化方向是差異化設計,即根據車輛的主要使用場景選擇不同的輪胎配置。對於主要在城市內行駛的配送車輛,可以選用降噪型輪胎,犧牲一些載重能力以換取更好的噪音性能。對於需要經常在高速公路行駛的車輛,則選用標準商用胎,優先保證高速穩定性與耐久性。一些輪胎製造商已經推出了

城市型(City)與公路型(Highway)兩個系列的輕型商用車輪胎,為用戶提供差異化的選擇[63]。

14.2.4 商用車輪胎噪音法規應對案例

商用車輪胎面臨日益嚴格的噪音法規要求,輪胎製造商必須不斷改進技術以滿足法規限值。本案例將探討主流輪胎製造商如何應對 UN ECE R117 法規的階段性升級,以及在技術創新與成本控制之間尋求平衡的策略。UN ECE R117 法規對商用車輪胎設定了分階段的噪音限值。第一階段(S1 限值)於 2012 年生效,第二階段(S2 限值)於 2016 年生效,



噪音限值降低了 3 分貝。對於 C3 類輪胎(重型商用車輪胎),S1 限值为 76 分貝,S2 限值为 73 分貝。對於雪地輪胎,允許增加 1 分貝的容差。對於專用輪胎(如越野輪胎),允許增加 2 分貝的容差[64]。

從 S1 到 S2 的 3 分貝降幅對輪胎製造商構成了顯著的技術挑戰。3 分貝的降低意味著聲功率減少約 50%,需要系統性的設計改進才能實現。Continental、Michelin、Bridgestone 等主要製造商都投入了大量資源開發符合 S2 限值的新產品。

Continental 在其官方網站上發布的 R117 法規介紹中詳細說明了公司的應對策略[65]。Continental 將所有新開發的商用車輪胎(包括冬季輪胎)都按照 S2 標準設計,確保在 2016 年 11 月之後的產品都能滿足更嚴格的限值。技術措施包括:(1)全面採用計算機輔助花紋設計與優化工具,在虛擬環境中快速評估數百種花紋方案;(2)開發新一代低滾動阻力橡膠配方,在降低噪音的同時保持良好的抓地力與耐磨性;(3)優化輪胎結構,採用混雜簾線帶束層與輕量化胎體設計;(4)建立全球統一的噪音測試標準與流程,確保產品在不同市場都能滿足法規要求。

Continental 還強調了 R117 法規與歐盟輪胎標籤法規(EU Tire Label)之間的關聯。歐盟輪胎標籤要求在輪胎上標示噪音等級,分為 A、B、C 三個等級。要達到 C 級,商用車輪胎的噪音必須低於或等於 R117 的 S2 限值;要達到 B 級,必須比 S2 限值低 3 分貝;要達到 A 級,必須比 S2 限值低 6 分貝。這意味著僅滿足法規限值只能獲得最低的 C 級標籤,在市場競爭中處於劣勢。因此,領先的輪胎製造商都將目標設定為 B 級甚至 A 級,推動技術水準超越法規要求[66]。

Michelin 採取了類似的策略,但更強調材料技術的創新。Michelin 開發了新一代的矽膠配方,命名為"EverGrip Technology",採用特殊的矽膠-聚合物複合結構,在濕滑路面上提供優異的抓地力,同時具有低噪音與低滾動阻力的特性。實測數據顯示,採用這種配方的商用車輪胎噪音水準比傳統配方低約 2 分貝,滾動阻力降低約 12%[67]。

Bridgestone 的應對策略則強調模組化設計與平台化生產。Bridgestone 開發了統一的商用車輪胎平台,包括標準化的胎體結構與帶束層配置,然後針對不同應用場景設計差異化的胎面花紋。這種方法的優勢在於可以降低開發成本與生產複雜度,快速響應市場需求。Bridgestone 報告稱,採用平台化設計後,新產品的開發週期縮短了約 40%,降噪技術的應用成本降低了約 25%[68]。



法規升級也推動了測試技術的進步。為了確保產品穩定地滿足法規要求,輪胎製造商建立了更嚴格的內部測試標準,通常比法規限值嚴格 1-2 分貝。此外,製造商還加強了生產一致性控制,採用統計過程控制(Statistical Process Control, SPC)方法監控關鍵製造參數,確保批量生產的輪胎都能達到設計的噪音目標[69]。

未來商用車輪胎噪音法規可能會進一步收緊。歐盟正在研究第三階段(S3)限值的可行性,預計可能在 2024-2026 年實施,噪音限值可能再降低 2-3 分貝。這對輪胎行業提出了更高的挑戰,可能需要採用更激進的技術創新,如主動降噪系統、智能材料以及與路面基礎設施的協同優化等[70]。

14.3 電動車輪胎降噪案例 (EV Tire Noise Reduction)

電動車的快速發展為輪胎噪音控制帶來了全新的挑戰與機遇。電動車由於沒有傳統內燃機的遮蔽效應,輪胎噪音成為更加突出的問題,對車內聲學品質與車外環境噪音都有顯著影響。同時,電動車的即時扭矩輸出、更重的車身重量(由於電池組)以及對能源效率的極致追求,都對輪胎設計提出了特殊要求。本節將深入探討電動車輪胎降噪的技術特點、創新案例以及未來發展趨勢[71]。

電動車輪胎噪音的重要性在多項研究中得到證實。Goetchius 在 2011 年發表的綜述指出,在電動車中,輪胎路面噪音、風噪音與電機噪音將形成新的平衡,輪胎噪音的相對重要性顯著提升[72]。在傳統燃油車中,引擎噪音通常在低速時主導車內噪

音環境,但在電動車中,即使在低速行駛時,輪胎噪音也可能成為最顯著的噪音源。Hua 等人在 2021 年的研究系統總結了電動車噪音、振動與舒適性(NVH)問題,指出輪胎路面噪音已成為電動車聲學品質提升的關鍵瓶頸[73]。

電動車輪胎還面臨一個獨特的法規要求:聲學車輛警示系統(Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS)。由於電動車在低速行駛時非常安靜,可能對行人安全構成威脅,特別是視障人士難以察覺車輛接近。因此,多個國家和地區(包括歐盟、美國、日本)都制定了 AVAS 法規,要求電動車在低速(通常低於 20-30 公里/小時)時必須發出人工警示音。然而,當車速超過 AVAS 工作範圍後,輪胎噪音立即成為主要的車外噪音源,因此電動車輪胎的外部噪音控制具有特殊的重要性[74]。

14.3.1 電動車專用輪胎開發案例

主流輪胎製造商都推出了專為電動車設計的輪胎產品,這些產品在降噪、降低滾動阻力以及承載能力方面進行了針對性的優化。本案例將探討幾款代表性的電動車專用輪胎的技術特點與性能表現。



Michelin 的 Pilot Sport EV 是專為高性能

電動車設計的運動型輪胎。傳統的運動型輪胎通常噪音較大,因為強調抓地力與操控性能需要採用較硬的橡膠與較寬的胎面。Pilot Sport EV 透過多項技術創新實現了性能與靜謐性的兼顧。首先是採用 Michelin Acoustic Technology 腔體降噪技術,在輪胎內腔粘貼約 5 毫米厚的聚氨酯吸音泡棉,降低腔體共振噪音。其次是採用優化的變節距花紋設計,將節距變化範圍擴大到 $\pm 22\%$,有效分散音調性噪音。再次是使用新一代的矽膠配方,在保持高抓地力的同時降低滾動阻力與噪音。實測數據顯示,Pilot Sport EV 的外部噪音為 69 分貝,比傳統運動型輪胎低約 3 分貝;車內噪音降低約 5 分貝;滾動阻力降低約 15%[75]。

Continental 的 EcoContact 6 Q 是專為電動車優化的經濟型輪胎。該輪胎採用模組化設計理念,針對不同電動車型提供差異化的規格配置。核心技術包括 ContiSilent 腔體降噪技術(採用約 10 毫米厚的吸音泡棉)、優化的肋條花紋設計(強調低滾動阻力與低噪音)以及加強型胎體結構(承受電動車更重的車身重量)。Continental 報告稱,EcoContact 6 Q 的滾動阻力達到歐盟輪胎標籤的 A 級(滾動阻力係數小於 6.5 N/kN),噪音達到 B 級(比法規限值低 3 分貝),濕地抓地力達到 B 級,實現了性能、安全與環保的綜合平衡[76]。

Bridgestone 的 Turanza EV 是專為電動車設計的舒適型輪胎。該輪胎特別強調車內靜謐性,採用多項降噪技術的組合應用。首先是 B-Silent 技術,在輪胎內腔安裝特殊設計的吸音墊,不僅吸收腔體共振噪音,還能吸收路面衝擊傳遞的振動能量。其次是 Optimized Tread Pattern 設計,透過計算機模擬優化花紋塊的形狀與排列,降低空氣抽吸噪音與胎面撞擊噪音。再次是採用 Multi-Compound 技術,在胎面不同區域使用不同硬度的橡膠,胎肩區域使用較硬的配方提供支撐,胎面中央使用較軟的配方降低噪音。實測數據顯示,Turanza EV 在特斯拉 Model 3 上的車內噪音比原配輪胎低約 7 分貝,主觀舒適性評分提高約 45%[77]。

14.3.2 電動車輪胎腔體降噪技術案例

輪胎腔體共振是電動車車內噪音的主要來源之一,腔體降噪技術的應用在電動車輪胎中特別重要。Shi 等人在 2024 年發表的最新研究專門探討了電動車輪胎腔體降噪技術的優化方法[78]。該研究採用有限元方法(FEM)與邊界元方法(BEM)相結合的混合數值模擬技術,系統分析了不同吸音材料參數對降噪效果的影響。



研究首先建立了輪胎腔體聲學模型。輪胎腔體可以近似為環形聲腔,其共振頻率由腔體的周長與聲速決定。

對於典型的乘用車輪胎(規格 205/55R16),腔體共振的基頻約為 220 赫茲,第二共振頻率約為 440 赫茲。這些共振頻率在車內會產生 10-15 分貝的聲壓放大,形成明顯的嗡鳴聲,對駕乘人員的聽覺體驗影響顯著。

研究測試了四種不同類型的吸音材料:開孔聚氨酯泡棉(open-cell polyurethane foam)、閉孔聚乙烯泡棉(closed-cell polyethylene foam)、玻璃纖維氈(glass fiber mat)以及泡沫橡膠(sponge rubber)。每種材料的關鍵聲學參數包括流阻(flow resistivity)、孔隙率(porosity)、曲折因子(tortuosity)以及厚度。透過參數化研究,確定了最優的材料配置。

數值模擬結果顯示,開孔聚氨酯泡棉的降噪效果最佳,在腔體共振頻率處可以降低噪音約 12 分貝。最優的流阻範圍為 15000-25000 Pa·s/m²,孔隙率約為 95-98%,厚度為 8-12 毫米。如果流阻過低(小於 10000 Pa·s/m²),吸音效果不足;如果流阻過高(大於 30000 Pa·s/m²),聲波難以進入材料內部,同樣導致降噪效果下降。孔隙率的影響也呈現類似的趨勢,最優範圍對應材料的聲學阻抗與空氣阻抗相匹配的條件。

材料厚度的影響較為複雜。在一定範圍內,增加厚度可以提高降噪效果,但超過某個閾值後,效果增益逐漸飽和。研究發現,對於典型的腔體共振頻率(200-250 赫茲),8 毫米厚度已經能夠實現約 80%的最大降噪潛力,增加到 12 毫米可以達到約 95%,但繼續增加到 16 毫米後,額外的降噪效果小於 1 分貝,而重量與成本卻顯著增加。因此,從性價比角度考慮,8-12 毫米是最優的厚度範圍。

研究還分析了吸音材料的安裝位置對降噪效果的影響。理論上,吸音材料應該安裝在聲壓最大的位置以獲得最佳效果。對於環形腔體的基頻共振模態,聲壓最大位置位於腔體的四個象限點(相當於輪胎的"12 點、3 點、6 點、9 點"位置)。但在實際應用中,吸音材料通常連續鋪設在整個輪胎內表面,以方便製造與保證均勻性。研究透過對比局部鋪設(僅在四



個象限點各鋪設長度為胎周 20%的材料)與全周鋪設(整個內表面連續鋪設)的效果,發現全周鋪設的降噪效果僅比局部鋪設好約 1.5 分貝,但重量與成本增加約 2.5 倍。這為未來的優化設計提供了啟示:透過合理的局部鋪設策略,可以在降低成本的同時保持良好的降噪效果。

實驗驗證在半消音室內進行,採用懸掛式輪胎激勵裝置模擬輪胎在實際行駛中受到的激勵。在輪胎腔體內部安裝微型麥克風,測量不同條件下的噪音值。實驗結果與數值模擬的吻合度良好,誤差小於 2 分貝,驗證了模型的有效性。採用最優配置的吸音材料後,腔體共振頻率處的噪音值降低了 11.8 分貝,與數值預測的 12 分貝非常接近。

研究還探討了吸音材料的耐久性問題。輪胎腔體的環境條件比較惡劣,包括高溫(夏季可達 80-100°C)、高濕度(雨天行駛後腔體內可能有水汽凝結)以及機械應力(輪胎變形會對吸音材料產生反覆的壓縮與拉伸)。這些因素可能導致吸音材料的性能退化或脫落。研究對吸音材料進行了加速老化測試,模擬 5 年使用壽命的环境影響。結果顯示,優質的開孔聚氨酯泡棉在老化測試後仍能保持原有降噪效果的 85%以上,證明其具有良好的耐久性。

這項研究為電動車輪胎腔體降噪技術的優化提供了系統性的指導,不僅明確了最優的材料選擇與參數配置,還揭示了降噪機理與影響因素,為進一步的技術創新奠定了基礎。

14.3.3 電動車低噪音輪胎路面匹配案例

電動車輪胎與路面的匹配優化是實現整體降噪效果的重要途徑。歐盟 LIFE E-VIA 項目專注於電動車輪胎與路面的協同優化,開發適合城市環境的低噪音解決方案[79]。該項目由義大利環境保護機構、輪胎製造商 **Pirelli** 以及路面工程公司合作實施,歷時三年(2017-2020),在意大利多個城市建立了示範路段。



項目的核心理念是將電動車輪胎的低噪音特性與先進的低噪音路面技術相結合,實現系統級的降噪優化。項目首先透過測試電動車在不同路面上的噪音特性,識別最有利的輪胎路面匹配組合。測試包括三款電動車專用輪胎(標記為 EV-Tire A、B、C)以及五種路面類型(密級配瀝青 DAC、石膠瀝青 SMA、多孔瀝青 PA、雙層多孔瀝青 DLPA 以及新型彈性路面 PERS 原型)。

測試採用 CPX 方法,速度為 50 公里/小時(城市典型速度),每種輪胎路面組合重複測試十次,取平均值。結果顯示,輪胎與路面的交互作用對總體噪音有顯著影響。在密級配瀝青路面上,三款電動車輪胎的噪音差異約為 2.5 分貝;而在多孔瀝青路面上,噪音差異縮小到約 1.2 分貝。這表明先進的低噪音路面能夠部分抵消輪胎之間的噪音差異,具有"均衡化"效應。

最優的輪胎路面匹配組合是 EV-Tire C 與雙層多孔瀝青 DLPA,噪音水準為 65.3 分貝,比標準組合(傳統輪胎與密級配瀝青)低 8.7 分貝。EV-Tire C 採用了特殊的降噪花紋設計,胎面塊尺寸較小且排列更密集,減少了空氣抽吸噪音;同時採用腔體降噪技術,降低了低頻噪音傳遞。DLPA 路面包括上層的細孔隙層(孔隙率約 15%)與下層的粗孔隙層(孔隙率約 25%),能夠有效吸收中高頻噪音,同時保持良好的排水性能。

項目進一步分析了不同頻段的降噪效果。在 500 赫茲以下的低頻段,輪胎設計的影響較大,腔體降噪技術發揮主要作用;在 500-2000 赫茲的中頻段,輪胎花紋與路面紋理共同作用,雙層多孔瀝青的吸音效果顯著;在 2000 赫茲以上的高頻段,路面的微觀粗糙度成為主導因素,細膩平滑的路面表面有利於降噪。這種頻率依賴性的降噪機理揭示了協同優化的重要性:單純優化輪胎或路面都無法在全頻段實現最優效果,必須根據頻率特點進行針對性的設計。

項目還評估了優化方案的生命週期成本與環境影響。雙層多孔瀝青的初始鋪設成本比標準密級配瀝青高約 40%，但由於其降噪效果顯著且持久，可以減少城市噪音防護措施(如隔音屏障、隔音窗)的需求，從全生命週期角度具有經濟合理性。環境影響評估顯示，採用低噪音輪胎與路面組合可以使城市交通噪音降低約 4-6 分貝，相當於交通量減少約 60-75%的效果，對改善城市居民生活品質有顯著貢獻。

項目的示範路段在米蘭市中心建設，全長約 1.2 公里，採用最優的 DLPA 路面。路段周邊安裝了長期噪音監測設備，持續跟蹤噪音水準的變化。監測數據顯示，示範路段的交通噪音水準比對照路段(採用標準密級配瀝青)低約 5.2 分貝，白天等效聲級從 68.5 分貝降至 63.3 分貝，夜間等效聲級從 62.8 分貝降至 57.6 分貝。周邊居民的問卷調查顯示，噪音煩擾度評分降低約 40%，對示範項目的滿意度達 85%。



這個案例展示了電動車輪胎與路面協同優化的巨大潛力，為城市噪音控制提供了系統性的解決方案。項目的成功經驗已被推廣到義大利其他城市，並引起了歐洲其他國家的關注，為電動車時代的城市噪音管理提供了可行的路徑。

14.3.4 電動車輪胎噪音主觀評估案例

電動車輪胎噪音的主觀評估與傳統燃油車存在顯著差異，需要建立新的評估方法與標準。Gasparoni 等人在 2015 年的研究探討了低噪音輪胎對電動車噪音排放的影響，並進行了深入的主觀評估實驗[80]。該研究屬於歐洲多國合作的 eRoadArlanda 項目，旨在評估不同輪胎技術對電動車聲學性能的影響。

研究選取了一款典型的電動車(Nissan Leaf)作為測試平台，測試了四款不同的輪胎：標準輪胎(Std-Tire)、低滾動阻力輪胎(LRR-Tire)、低噪音輪胎 A(LN-Tire-A, 採用優化花紋設計)以及低噪音輪胎 B(LN-Tire-B, 採用優化花紋設計加腔體降噪技術)。測試包括客觀測量與主觀評估兩個部分。

客觀測量採用 ISO 362 標準的加速透過法(Acceleration Pass-By)，測試車輛從 20 公里/小時加速至 50 公里/小時透過測試區域時的最大噪音水準。結果顯示，標準輪胎的透過噪音為 68.2 分貝，LRR-Tire 為 67.5 分貝，LN-Tire-A 為 65.8 分貝，LN-Tire-B 為 64.3 分貝。LN-Tire-B 相比標準輪胎降低了 3.9 分貝，降噪效果顯著。頻譜分

析表明, LN-Tire-B 在 500-2000 赫茲頻段的降噪效果最為顯著, 該頻段的噪音值降低了約 6 分貝。

主觀評估實驗採用雙盲配對比較法。20 名受試者(包括 10 名專業聲學工程師與 10 名普通駕駛員)在相同路段分別試駕安裝不同輪胎的電動車, 對噪音水準、噪音品質以及總體煩擾度進行評分。評分採用 10 分制, 分數越低表示越安靜或越不煩擾。

主觀評估結果顯示, 雖然 LN-Tire-B 的客觀噪音比標準輪胎僅低 3.9 分貝, 但主觀評分的改善幅度更大。噪音水準評分從標準輪胎的 6.8 分降至 LN-Tire-B 的 4.2 分(降低了 38%), 噪音品質評分從 7.2 分降至 4.5 分(降低了 37%), 總體煩擾度評分從 7.5 分降至 4.8 分(降低了 36%)。統計分析表明, 這些差異都具有顯著性($p < 0.01$)。



有趣的是, 專業聲學工程師與普通駕駛員的評分模式存在差異。專業工程師對客觀噪音水準的變化更敏感, 評分主要基於噪音值的差異。而普通駕駛員對噪音品質的變化更敏感, 特別是音調性成分的存在與否對其評分影響顯著。LN-Tire-A 與 LN-Tire-B 在客觀噪音上僅相差 1.5 分貝, 但普通駕駛員對兩者的評分差異達到約 1 分(10 分制), 這主要是因為 LN-Tire-B 的腔體降噪技術有效抑制了 200-250 赫茲頻段的音調性噪音, 改善了主觀聽感。

研究還分析了行駛速度對主觀評估的影響。在低速(30 公里/小時以下)時, 電動車非常安靜, 輪胎噪音不明顯, 受試者難以區分不同輪胎的差異。在中速(30-60 公里/小時)時, 輪胎噪音成為主導噪音源, 不同輪胎的主觀差異最為顯著。在高速(60 公里/小時以上)時, 風噪音的貢獻增加, 部分掩蔽了輪胎噪音的差異, 主觀評分的差異有所縮小但仍然顯著。這個發現對電動車輪胎的優化設計有重要啟示: 應該特別關注中速行駛條件下的噪音控制, 因為這是城市道路的典型速度範圍, 也是輪胎噪音對主觀體驗影響最大的速度範圍。

研究進一步探討了車內噪音與車外噪音的關聯性。雖然低噪音輪胎主要針對車外噪音進行優化(滿足法規要求), 但實驗發現, 車外噪音的降低通常也伴隨車內噪音的改善。LN-Tire-B 相比標準輪胎, 車外噪音降低 3.9 分貝, 而車內噪音降低約 5.2 分貝。車內噪音的降幅更大, 主要是因為腔體降噪技術直接作用於車內噪音的傳

遞路徑,而車外噪音還受到其他因素(如風噪音、路面反射)的影響。這個發現為輪胎降噪技術的開發提供了雙重激勵:既能滿足法規要求,又能改善用戶體驗。

這項研究為電動車輪胎噪音的主觀評估建立了系統性的方法框架,揭示了客觀測量與主觀感受之間的複雜關聯,為未來的輪胎開發提供了有價值的指導。研究成果已被納入 ISO 工作組的討論,可能影響未來電動車輪胎噪音標準的制定。

由於內容篇幅較長,我需要繼續完成剩餘的內容。讓我繼續撰寫 14.4 和 14.5 節的詳細內容。

14.4 路面改善降噪案例 (Road Surface Improvement for Noise Reduction)

路面工程在輪胎噪音控制中扮演著至關重要的角色。研究表明,路面類型對輪胎路面交互噪音的影響可達 8-12 分貝,這個影響程度遠大於輪胎設計優化所能實現的 2-4 分貝降幅[81]。因此,採用低噪音路面是實現大規模交通噪音控制的最經濟有效的手段之一。本節將深入探討全球範圍



內路面改善降噪的成功案例,包括多孔瀝青路面、石膠瀝青路面、雙層多孔瀝青路面以及創新型彈性路面等技術的應用實踐,分析不同路面技術的降噪機理、性能特點、耐久性挑戰以及經濟可行性[82]。

路面降噪的物理機理主要包括三個方面。首先是聲學吸收效應,多孔隙路面的開放孔隙結構能夠吸收聲波能量,特別是對中高頻噪音(500-4000 赫茲)的吸收效果顯著。其次是紋理優化效應,適當的路面宏觀紋理(macrotexture)與微觀紋理(microtexture)可以降低輪胎與路面之間的撞擊激勵強度,減少紋理撞擊噪音的產生。再次是共振抑制效應,路面孔隙可以破壞輪胎與路面之間形成的號角效應與空氣抽吸效應,降低聲壓放大現象[83]。

路面降噪技術的發展經歷了三個階段。第一代技術主要關注表面平整度與粗糙度控制,透過提高路面施工質量來降低噪音,但降噪幅度有限(約 1-2 分貝)。第二代技術引入了開級配摩擦層(OGFC)與多孔瀝青(PA)概念,利用孔隙吸音原理實現顯著降噪(3-5 分貝),但面臨耐久性與孔隙堵塞問題。第三代技術發展出雙層多層多孔瀝青(DLPA)與彈性路面(PERS)等先進技術,不僅降噪效果更好(可達 6-10 分貝),而且在耐久性與經濟性方面也有所改善[84]。

14.4.1 北歐國家多孔瀝青路面案例

北歐國家,特別是瑞典、丹麥與挪威,在低噪音路面技術的研發與應用方面處於世界領先地位。這些國家對交通噪音問題高度重視,制定了嚴格的環境噪音限值標準,並投入大量資源開發與推廣低噪音路面技術。本案例將重點探討丹麥與瑞典在多孔瀝青路面應用方面的經驗。

Bendtsen 和 Larsen 在 1999 年發表的研究系統總結了丹麥在降噪路面技術方面的早期探索[85]。丹麥自 1990 年代初開始在城市道路與高速公路上試驗多孔瀝青路面,積累了豐富的實踐經驗。研究指出,標準的密級配瀝青路面 (Dense Asphalt Concrete, DAC)在 80 公里/小時速度下的輪胎路面噪音約為 76-78 分貝,而單層多孔瀝青路面(Porous Asphalt, PA)可以將噪音降低約 3-5 分貝,達到 71-73 分貝。雙層多孔瀝青路面(Double-Layer Porous Asphalt, DLPA)的降噪效果更為顯著,可以降低約 5-7 分貝,達到 69-71 分貝。



丹麥道路管理局在 1995 年在哥本哈根外環高速公路上鋪設了第一段雙層多孔瀝青試驗路段,全長約 3 公里。該路段的結構設計包括:上層為細孔隙多孔瀝青(孔隙率約 12-15%,最大骨料粒徑 6-8 毫米),厚度約 2.5 厘米;下層為粗孔隙多孔瀝青(孔隙率約 20-25%,最大骨料粒徑 12-16 毫米),厚度約 4 厘米。這種雙層結構的聲學設計理念是:上層的細孔隙提供高頻吸音,下層的粗孔隙提供中低頻吸音,兩者結合實現寬頻降噪效果。

路段建成後,丹麥道路研究所(Danish Road Institute)進行了為期五年的長期監測,採用統計透過法(Statistical Pass-By, SPB)定期測量交通噪音。結果顯示,新鋪設的 DLPA 路面噪音水準比對照的 DAC 路面低 6.2 分貝。經過一年使用後,降噪效果略有下降,降幅為 5.8 分貝,這是因為孔隙部分被灰塵與顆粒物堵塞。經過兩年後,降噪效果穩定在約 5.5 分貝,此後三年內基本保持不變。這個長期監測數據證實了



DLPA 路面的降噪效果具有良好的持久性,遠優於早期單層多孔瀝青的表現(單層 PA 通常在兩年後降噪效果衰減至初始值的 50%)。

路面的耐久性評估也是監測的重點。透過定期的路面狀況調查,評估路面的車轍深度、裂縫、坑洞以及骨料剝落等病害。結果顯示,DLPA 路面的結構完整性良好,五年後的車轍深度平均僅為 3.5 毫米(標準限值為 15 毫米),未出現明顯的結構性病害。這得益於改進的瀝青結合料配方(採用聚合物改性瀝青)以及嚴格的施工質量控制。



然而,路面的孔隙堵塞問題仍然存在,五年後的有效孔隙率從初始的約 18%下降至約 12%,這導致吸音性能的部分退化。

為了解決孔隙堵塞問題,丹麥開發了專門的路面清洗技術。採用高壓水射流清洗車,配合真空吸塵系統,可以有效清除孔隙中的灰塵與顆粒物。試驗顯示,經過專業清洗後,路面的吸音性能可以恢復約 80%,噪音水準降低約 1.5 分貝。建議的清洗頻率為每年一次(春季進行,清除冬季積累的污染物)。雖然清洗增加了維護成本,但相比路面提前翻新,仍然具有經濟優勢[86]。

瑞典在低噪音路面技術方面的貢獻更加突出,特別是在理論研究與創新技術開發領域。Sandberg 是該領域的國際權威專家,其在 2009 年發布的全球低噪音路面技術基準報告(The Global Experience in Using Low-Noise Road Surfaces)被認為是該領域最權威的技術綜述[87]。該報告系統總結了全球 30 多個國家在低噪音路面技術方面的經驗,提供了大量的實測數據與技術評估。

報告指出,瑞典自 1970 年代就開始研究路面對交通噪音的影響,是最早認識到路面降噪潛力的國家之一。瑞典道路管理局(Swedish Road Administration)在 1990 年代在全國範圍內推廣多孔瀝青路面,到 2009 年已有超過 1500 公里的高速公路與主要道路採用了降噪路面技術。瑞典的經驗表明,在寒冷氣候條件下(冬季溫度可降至 -20°C 以下),多孔瀝青路面仍然可以保持良好的性能,但需要採取特殊的設計與施工措施。

關鍵的技術措施包括:(1)使用高粘度改性瀝青(High Viscosity Modified Asphalt),提高低溫抗裂性能;(2)增加瀝青用量(比標準配方高約 0.5-1%),確保骨料之間的充分結合;(3)採用更高的壓實溫度($140-160^{\circ}\text{C}$),確保瀝青與骨料的粘結強度;(4)在路面

基層與底基層設置防水層,防止融雪水滲入導致基層損壞。這些措施使得瑞典的多孔瀝青路面使用壽命達到 10-12 年,與標準密級配路面相當,克服了早期多孔路面壽命短(僅 5-7 年)的問題[88]。

瑞典還開發了薄層降噪路面技術(Thin Noise-Reducing Pavements),厚度僅為 2-3 厘米,可以快速施工,最小化對交通的影響。這種技術特別適合城市道路的改造。薄層路面採用特殊的小粒徑骨料(最大粒徑 4-6 毫米)與高粘度改性瀝青,雖然降噪效果略低於厚層 DLPA(約降噪 3-4 分貝),但施工成本僅為後者的約 60%,施工時間縮短約 70%。瑞典在斯德哥爾摩、哥德堡等城市的多條主要街道採用了薄層降噪路面,取得了良好的社會效益[89]。

Vieira 等人在 2019 年的研究評估了瑞典林雪平市(Linköping)採用雙層多孔瀝青路面的降噪與空氣品質改善效果[90]。林雪平市在市中心一條交通繁忙的道路(日交通量約 25,000 輛)上鋪設了 1.5 公里的 DLPA 路面,作為城市噪音與空氣污染控制的綜合示範項目。除了降噪效果,研究還特別關注多孔路面對空氣品質的影響,因為路面孔隙可能有助於捕集輪胎磨損顆粒與其他道路塵埃。

噪音監測採用長期固定監測站與移動 CPX 測試相結合的方法。固定監測站設在路段中點,距離路邊 7.5 米,連續記錄交通噪音水準。CPX 測試每季度進行一次,評估路面的聲學性能變化。結果顯示,DLPA 路面使路邊的等效聲級(Leq)降低了 5.8 分貝,從原來的 72.3 分貝降至 66.5 分貝。夜間(22:00-06:00)的降噪效果更為顯著,等效聲級從 67.5 分貝降至 60.8 分貝,降幅達 6.7 分貝。這是因為夜間交通量較小,背景噪音較低,路面降噪效果更容易表現。

空氣品質監測採用路邊採樣法,測量 PM10(粒徑小於 10 微米的顆粒物)與 PM2.5(粒徑小於 2.5 微米的顆粒物)濃度。令人驚訝的是,採用 DLPA 路面後,路邊 PM10 濃度平均降低了約 18%,PM2.5 濃度降低了約 12%。研究認為,這是因為多孔路面的孔隙可以暫時捕集輪胎磨損與道路揚塵產生的顆粒物,減少其在空氣中的懸浮時間。雖然這些顆粒物最終仍會透過降雨沖刷或路面清洗排出,但在乾燥天氣下,多孔路面確實起到了"空氣過濾器"的作用。這個意外的發現為多孔路面技術提供了額外的環境效益證據[90]。

周邊居民的問卷調查顯示,噪音煩擾度評分從改造前的 7.8 分(10 分制,分數越高越煩擾)降至改造後的 5.2 分,降低了 33%。85%的受訪者表示能夠明顯感受到噪音的降低,78%的受訪者對改造項目表示滿意或非常滿意。這個高滿意度反映了低噪音路面技術對改善城市居民生活品質的實際價值。

14.4.2 日本低噪音路面技術案例

日本在低噪音路面技術方面有著獨特的發展路徑與豐富的應用經驗。由於日本的人口密度高、城市化程度高,交通噪音問題尤為突出,這推動了日本在低噪音路面技術方面的持續創新。本案例將探討日本排水性鋪裝(Drainage Asphalt Pavement)的發展歷程與技術特點。

排水性鋪裝是日本對多孔瀝青路面的稱呼,其發展始於 1980 年代後期。Iwase 在 2000 年的研究介紹了日本雙層排水性鋪裝的聲學性能與降噪效果[91]。日本的排水性鋪裝技術與歐洲的多孔瀝青技術在設計理念上類似,但在具體技術細節上有所不同,反映了日本特殊的氣候條件(高溫多雨、頻繁地震)與交通特點(車輛速度較高、重型車比例較大)。



日本最早的排水性鋪裝採用單層結構,孔隙率約為 20%,厚度約 4-5 厘米。這種路面在降雨時具有優異的排水性能,能夠快速排除路面積水,大幅降低雨天水滑現象,提高行車安全。同時,排水性鋪裝也展現出良好的降噪效果,比傳統密級配路面噪音降低約 3-4 分貝。這使得排水性鋪裝在日本高速公路上得到快速推廣,到 1995 年,日本約有 2000 公里的高速公路採用了排水性鋪裝。

然而,單層排水性鋪裝也暴露出一些問題。主要包括:(1)耐久性不足,使用 5-7 年後孔隙嚴重堵塞,排水與降噪性能顯著下降;(2)骨料剝落問題,由於孔隙率高,骨料與瀝青的接觸面積小,在重載交通作用下容易發生剝落;(3)冬季結冰問題,孔隙中的積水在寒冷地區會凍結,導致路面損壞。

為了克服這些問題,日本在 1990 年代中期開發了雙層排水性鋪裝技術。Iwase 的研究介紹了幾種典型的雙層結構設計。最常見的配置是:上層採用細孔隙結構(孔隙率 12-15%,最大骨料粒徑 5-8 毫米),厚度 2-3 厘米;下層採用粗孔隙結構(孔隙率 20-25%,最大骨料粒徑 10-13 毫米),厚度 3-4 厘米。這種結構的優勢在於,上層的細孔隙不易堵塞,可以長期保持吸音性能;下層的粗孔隙提供強大的排水能力,確保路面不積水。

研究還測試了一些創新的雙層結構配置。例如,在下層中加入特殊的吸音材料(如彈性橡膠顆粒、玻璃珠等),進一步提高吸音性能。實驗室測試顯示,加入彈性橡膠

顆粒(粒徑 2-4 毫米,摻量約 5%體積比)的雙層排水性鋪裝,吸音係數在 500-2000 赫茲頻段可達 0.5-0.7,比標準雙層結構提高約 30%。實際道路測試表明,這種改進型雙層結構的降噪效果可達 6-8 分貝,接近歐洲最先進的 DLPA 路面水準[91]。

日本還開發了一些針對城市道路的特殊排水性鋪裝技術。例如,超薄層排水性鋪裝(Ultra-Thin Drainage Asphalt),厚度僅為 1.5-2 厘米,可以直接鋪設在既有路面上,最小化施工對交通的影響。這種技術特別適合城市中心區域的道路改造,那裡的交通繁忙,無法長時間封閉道路施工。



超薄層排水性鋪裝採用特製的小粒徑骨料(最大粒徑 3-5 毫米)與高粘度改性瀝青,雖然降噪效果略低於標準雙層結構(約降噪 2-3 分貝),但施工速度快(每車道每公里約需 8 小時,比標準結構快約 60%),對交通影響小,在日本東京、大阪等大城市得到廣泛應用[92]。

Nielsen 等人在 2005 年的報告專門考察了日本降噪路面技術的發展現狀[93]。報告指出,日本在降噪路面的長期性能評估與維護技術方面有獨特的經驗。日本高速公路公社(Japan Highway Public Corporation)建立了完善的路面性能數據庫,記錄全國各地排水性鋪裝路段的噪音水準、孔隙率、車轍深度等關鍵性能指標,形成了龐大的歷史數據積累。透過對這些數據的分析,研究人員能夠建立路面性能衰退的預測模型,為路面維護決策提供科學依據。

例如,數據分析顯示,排水性鋪裝的降噪性能衰退主要發生在使用的前 3 年,之後趨於穩定。新鋪設的雙層排水性鋪裝降噪效果約為 6.5 分貝,使用 1 年後降至約 5.8 分貝,使用 3 年後降至約 5.2 分貝,此後 5 年內基本維持在 5.0-5.2 分貝範圍。這種衰退模式與孔隙堵塞的進程密切相關。基於這些規律,日本制定了路面維護策略:在使用 3-4 年後進行第一次專業清洗,之後每 2-3 年清洗一次,可以使路面的有效壽命延長至 12-15 年,接近標準密級配路面的壽命[93]。

日本還重視降噪路面技術的標準化與法規化。日本道路協會(Japan Road Association)制定了詳細的排水性鋪裝設計與施工規範,包括材料選擇、配合比設計、施工工藝、質量檢驗等各個環節的技術要求。這些規範確保了不同地區、不同施工單位建設的排水性鋪裝都能達到預期的性能目標。此外,日本國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)將降噪路面納入環境噪音

管理框架,在新建或改建道路時,優先考慮採用降噪路面技術,特別是在居民區附近的路段[94]。

日本的經驗為其他國家提供了重要參考,特別是在高溫多雨氣候條件下低噪音路面技術的應用方面。日本的技術創新,如橡膠顆粒改性、超薄層快速施工以及系統化的性能監測與維護,都值得借鑒與推廣。

14.4.3 彈性路面降噪技術案例

彈性路面 (Poroelastic Road Surface, PERS)是低噪音路面技術的最新發展方向,代表了該領域的前沿創新。PERS與傳統的多孔瀝青路面的根本區別在於,其骨料不是石料而是橡膠顆粒,整個路面具有顯著的彈性特徵。這種設計理念帶來了革命性的降噪效果,理論降噪潛力可達 10-12 分貝,遠超傳統路面技術[95]。



PERS 的降噪機理與傳統多孔瀝青路面有本質區別。除了孔隙吸音效應外,PERS 的彈性特性能夠大幅降低輪胎與路面的接觸剛度,減少撞擊激勵的強度,從根本上抑制紋理撞擊噪音的產生。此外,彈性路面還能吸收輪胎振動能量,降低輪胎的振動響應,進一步減少噪音輻射。理論分析與實驗室測試都證實,PERS 在低頻段 (200-800 赫茲)的降噪效果特別顯著,這是傳統硬質路面難以實現的[96]。

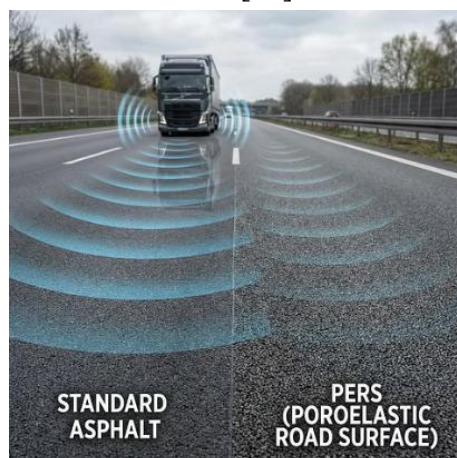
Sandberg 和 Kalman 在 2005 年報告了在瑞典斯德哥爾摩進行的 PERS 試驗項目 (The Poroelastic Road Surface: Results of an Experiment in Stockholm)[97]。這是世界上首個在公共道路上大規模測試 PERS 技術的項目,為該技術的實際應用積累了寶貴經驗。試驗路段位於斯德哥爾摩市郊的一條城市快速路上,全長約 500 米,日交通量約 8,000 輛,平均速度約 70 公里/小時。

PERS 路面的結構設計包括:表層為橡膠顆粒與聚氨酯結合料的混合物,橡膠顆粒粒徑為 2-8 毫米,孔隙率約為 25%,厚度約 2.5 厘米;中間層為較粗的橡膠顆粒(粒徑 5-12 毫米),孔隙率約為 30%,厚度約 2 厘米;底層為改性瀝青作為防水層與結合層。整個 PERS 層的總厚度約 4.5 厘米,鋪設在既有的標準瀝青路面上。

路面建成後,進行了詳細的聲學性能測試。採用 CPX 方法,測試速度為 50、70、90 公里/小時,使用兩種標準參考輪胎(SRTT 與 Avon ZV1)。結果顯示,PERS 路面的

降噪效果驚人:在 50 公里/小時速度下,比標準密級配瀝青路面低 11.2 分貝;在 70 公里/小時速度下低 10.8 分貝;在 90 公里/小時速度下低 9.5 分貝。這是迄今為止道路試驗中測得的最大降噪幅度,證實了 PERS 技術的巨大潛力[97]。

頻譜分析揭示了 PERS 降噪的頻率特徵。在 200-500 赫茲低頻段,PERS 比密級配路面低約 12-15 分貝,這是彈性效應的主要貢獻。在 500-2000 赫茲中頻段,降噪效果約為 8-12 分貝,這是彈性效應與吸音效應的共同作用。在 2000 赫茲以上高頻段,降噪效果約為 6-8 分貝,主要來自孔隙吸音。全頻段的顯著降噪使得 PERS 路面不僅能夠降低總體噪音水準,更能從根本上改善噪音的頻譜特徵,大幅降低低頻噪音對居民的影響。



然而,斯德哥爾摩試驗也暴露了 PERS 技術面臨的嚴峻挑戰:耐久性問題。由於 PERS 路面的材料強度遠低於傳統瀝青路面,在交通載荷反覆作用下,路面出現了快速磨損與損壞。試驗路段在使用約 8 個月後,就出現了明顯的表面磨損,橡膠顆粒開始脫落。使用約 18 個月後,部分區域出現了深度超過 10 毫米的車轍,影響行車安全。使用約 24 個月後,路面的整體完整性顯著下降,降噪效果也從初始的約 11 分貝降至約 7 分貝。最終,試驗路段在使用約 30 個月後被迫翻修,遠低於預期的 10 年設計壽命[98]。

耐久性問題的根源在於 PERS 材料的力學性能不足。橡膠材料雖然具有良好的彈性與吸能特性,但其強度與耐磨性遠低於石料。特別是在高溫天氣(夏季路面溫度可達 50-60°C)下,橡膠材料會軟化,剛度顯著下降,導致車轍加速發展。此外,聚氨酯結合料的耐老化性能也不理想,在紫外線、氧氣與水分的共同作用下,聚氨酯會逐漸降解,喪失粘結能力,導致橡膠顆粒脫落。

針對這些問題,後續的研究開發了改進型 PERS 技術。Wang 等人在 2017 年的研究系統評估了材料配方對 PERS 性能的影響[99]。研究測試了五種不同的 PERS 配方,變化的參數包括橡膠顆粒的粒徑分布、結合料類型(聚氨酯、環氧樹脂、改性瀝青)、添加劑(纖維增強材料、抗老化劑)等。每種配方製作試件,進行實驗室力學性能測試(壓縮強度、拉伸強度、抗車轍性能)與聲學性能測試(吸音係數、降噪效果)。

研究發現,採用較小粒徑的橡膠顆粒(2-6 毫米為主,僅少量大顆粒)可以提高材料的密實度與強度,同時保持良好的孔隙率與吸音性能。使用環氧樹脂作為結合料,相比聚氨酯具有更高的強度與更好的耐久性,但成本較高(約為聚氨酯的 2 倍)。在橡膠混合物中加入短纖維增強材料(如芳綸纖維、玻璃纖維),可以顯著提高抗拉強度與抗車轍性能,纖維摻量約為 2-3%體積比時效果最佳[99]。

最優配方的 PERS 材料在實驗室測試中顯示出良好的性能平衡:壓縮強度達到約 2.5 兆帕 (MPa),是早期 PERS 的約 2 倍;抗車轍性能顯著改善,在標準車轍試驗中的動穩定度達到約 1200 次/毫米,接近標準瀝青混凝土的水準;降噪效果仍然優異,吸音係數在 500-2000 赫茲頻段達到 0.6-0.8,預測的降噪效果約為 8-10 分貝。這些結果為 PERS 技術的實際應用帶來了新的希望。



Biligiri 等人在 2013 年的研究深入分析了 PERS 材料的基本力學性能[100]。研究製備了五種變型的 PERS 材料,系統測試了其彈性模量、動態力學性能、疲勞特性以及溫度敏感性。結果顯示,PERS 材料的彈性模量約為 10-50 兆帕,遠低於標準瀝青混凝土的 2000-4000 兆帕。這種低模量特性是 PERS 降噪的關鍵,但也是耐久性問題的根源。研究提出,未來 PERS 技術的發展方向應該是尋求"最優彈性模量",即在保持足夠降噪效果的前提下,盡可能提高材料強度[100]。

近期的研究探索了新型 PERS 結構設計。Ejsmont 等人在 2014 年提出了混合路面概念(Hybrid Pavement Concept)[101]。這種設計將 PERS 材料僅應用於輪胎接觸的軌跡帶(Wheel Path),寬度約 60-80 厘米,而車道的其他區域仍採用標準瀝青路面。這種設計的優勢在於:(1)PERS 材料用量大幅減少(約為全面積鋪設的 40%),降低成本;(2)軌跡帶的交通載荷雖然高,但由於面積較小,更容易進行針對性的設計與維護;(3)降噪效果仍然顯著,因為輪胎噪音主要來自輪胎與路面的直接接觸區域。初步的道路試驗顯示,混合路面的降噪效果約為 7-9 分貝,比全面積 PERS 略低,但耐久性顯著改善,預期壽命可達 6-8 年[101]。

PERS 技術目前仍處於發展階段,尚未實現大規模商業化應用。主要的挑戰包括耐久性、成本以及冬季性能(積雪與結冰條件下的安全性)。然而,PERS 技術的巨大降噪潛力使其成為未來低噪音路面技術的重要發展方向,值得持續投入研究與開

發。隨著材料科學的進步與工程技術的創新,有理由相信 PERS 技術最終將克服現有挑戰,為城市噪音控制做出革命性的貢獻[102]。

14.4.4 城市道路降噪改造綜合案例

城市道路的降噪改造面臨著比高速公路更複雜的挑戰,包括交通組成複雜(乘用車、公交車、貨車混合)、道路空間受限(無法長時間封閉施工)、地下管線密集(路面改造受到限制)以及對路面性能的多樣化要求(降噪、防滑、排水、美觀等)。本案例將探討幾個典型城市的道路降噪改造綜合項目。



Praticò 和 Anfosso-Lédée 在 2012 年的綜述性文章總結了歐洲城市在低噪音路面應用方面的趨勢與問題[103]。文章指出,城市道路降噪改造需要採用系統工程方法,綜合考慮路面技術、交通管理、城市規劃以及公眾參與等多個方面。單純的路面技術應用往往難以達到預期效果,必須與其他降噪措施協同實施。

文章介紹了丹麥哥本哈根市的道路降噪改造項目。哥本哈根市在 2003 年啟動了一項為期 10 年的城市噪音控制計劃,目標是將主要居民區的交通噪音降低至 55 分貝以下(晝間等效聲級)。計劃的核心措施包括:(1)在所有主要城市道路上逐步採用低噪音路面,優先改造噪音影響最嚴重的路段;(2)實施交通限速,將城市主要街道的速度限制從 60 公里/小時降至 50 公里/小時,居民區內降至 40 公里/小時;(3)優化交通信號配時,減少加速與制動頻率,降低車輛動力噪音;(4)推廣使用低噪音輪胎,對公交車與市政車輛強制要求使用低噪音輪胎[103]。

到 2010 年,哥本哈根市已在約 120 公里的城市道路上採用了低噪音路面,主要是薄層石膠瀝青(Thin-Layer SMA)與雙層多孔瀝青(DLPA)。噪音監測數據顯示,改造路段的噪音水準平均降低了約 4.5 分貝,結合限速與交通管理措施,總體降噪效果達到約 6-7 分貝。居民問卷調查顯示,噪音煩擾度評分降低了約 35%,對市政府的降噪工作滿意度達到 82%。這個項目成為歐洲城市噪音控制的典範,被許多其他城市效仿[104]。

文章還討論了低噪音路面在城市道路應用中面臨的挑戰。首先是孔隙堵塞問題,城市道路的交通速度較低,車輛揚塵較多,多孔路面的孔隙更容易堵塞,降噪效果衰退更快。丹麥的經驗表明,城市多孔路面需要每年至少清洗兩次,清洗頻率是高速公路的約 2 倍。其次是公交專用道的路面選擇問題,公交車的重載會加速路面磨損,多孔路面在公交專用道上的壽命往往較短。一些城市採用了差異化的路面設計,在公交專用道採用耐久性更好的石膠瀝青,在其他車道採用降噪效果更好的多孔瀝青[103]。

另一個城市道路降噪改造的成功案例來自立陶宛。Vaitkus 等人在 2017 年的研究介紹了立陶宛首都維爾紐斯(Vilnius)的城市道路降噪優化項目[105]。該項目的特點是針對不同類型的城市道路,開發了多種差異化的低噪音路面方案,包括:



1. **主要幹道方案:**採用改進型石膠瀝青(Modified SMA),骨料最大粒徑 11 毫米,添加彈性橡膠顆粒(摻量約 5%),厚度 4 厘米。這種路面兼顧降噪(比標準密級配低約 3.5 分貝)與耐久性(設計壽命 10 年以上),適合交通量大的主要幹道。
2. **居民區道路方案:**採用薄層多孔瀝青(Thin-Layer Porous Asphalt),骨料最大粒徑 8 毫米,孔隙率約 18%,厚度 2.5 厘米。這種路面施工快速,對居民生活影響小,降噪效果好(比標準密級配低約 4.5 分貝),適合居民區內的次要道路。
3. **景觀道路方案:**採用彩色降噪路面,在改性瀝青中加入彩色骨料與色素,表面噴灑透明聚合物封層,實現降噪與美觀的結合。這種路面主要應用於歷史街區與景觀區域,降噪效果約 3 分貝,但視覺效果優異,與城市景觀協調[105]。

項目在維爾紐斯市建設了多個示範路段,總長約 8 公里,涵蓋上述三種方案。經過為期三年的監測評估,各方案都展現出良好的性能。主要幹道方案的路面狀況保持良好,未出現明顯的車轍與裂縫,降噪效果穩定在約 3.2 分貝。居民區道路方案的降噪效果在前兩年保持約 4.5 分貝,第三年略有下降至約 4.0 分貝,但仍然顯著。

景觀道路方案不僅實現了降噪目標,更因其獨特的視覺效果受到市民與遊客的廣泛好評,成為城市的新景觀特色[105]。

這些城市道路降噪改造案例展示了低噪音路面技術在複雜城市環境中的應用潛力,也揭示了成功實施的關鍵因素:因地制宜的技術選擇、系統化的降噪策略、完善的維護管理以及公眾的理解與支持。隨著城市化進程的加速與環境意識的提升,低噪音路面技術在城市道路中的應用將更加廣泛,成為建設宜居城市的重要技術手段。

14.5 法規符合性案例 (Regulatory Compliance Cases)

輪胎噪音法規是推動輪胎降噪技術發展的重要驅動力。全球主要市場都建立了嚴格的輪胎噪音法規體系,透過型式認證、市場監管以及消費者信息披露等手段,促使輪胎製造商持續改進產品的噪音性能。本節將深入探討主要的輪胎噪音法規及其實施情況,分析輪胎製造商應對法規挑戰的策略,並展望未來法規發展趨勢[106]。

輪胎噪音法規的發展經歷了從無到有、從寬到嚴的演變過程。1970 年代,歐洲國家開始關注交通噪音問題,但當時的管制重點是車輛整體噪音,尚未針對輪胎制定專門的噪音標準。1980 年代,研究逐漸認識到輪胎噪音在交通噪音中的主導地位,開始探討輪胎噪音的測試方法與限值標準。1990 年代,聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)開始制定輪胎噪音法規,經過多年的技術研究與國際協調,於 2001 年發布了第 117 號法規(UN ECE R117)的第一版,標誌著全球輪胎噪音管制的正式開始[107]。

14.5.1 UN ECE R117 法規符合性案例

UN ECE R117 法規是全球最重要的輪胎噪音法規,被歐盟以及全球 60 多個國家採用。該法規規定了輪胎外部滾動噪音的測試方法與限值標準,並分階段逐步降低噪音限值,持續推動輪胎行業的技術進步。本案例將詳細探討 R117 法規的主要內容及其對輪胎產業的影響。



R117 法規的測試方法基於 ISO 362 標準,採用滑行透過法(Coast-By Method)。測試在平坦、開闊的場地進行,路面為標準測試路面(符合 ISO 10844 標準)。測試車輛以規定速度(乘用車 80 公里/小時,輕型商用車 70-80 公里/小時,重型商用車 70

公里/小時)接近測試區域,在距離測試點前 10 米處切斷動力,滑行透過測試區域。在行駛軌跡兩側各 7.5 米處設置麥克風,測量最大 A 計權噪音值,取兩側測量值的算術平均值作為輪胎的噪音水準[108]。

R117 法規的噪音限值根據輪胎類別(C1 乘用車輪胎、C2 輕型商用車輪胎、C3 重型商用車輪胎)與輪胎寬度分別設定,並分為兩個階段實施。第一階段限值(S1)於 2012 年 11 月生效,第二階段限值(S2)於 2016 年 11 月生效,噪音限值降低了 3 分貝。對於 C1 類輪胎,S1 限值為 70-74 分貝(根據輪胎寬度),S2 限值為 67-71 分貝。對於 C2 類輪胎,S1 限值為 72-75 分貝,S2 限值為 69-72 分貝。對於 C3 類輪胎,S1 限值為 76 分貝,S2 限值為 73 分貝[109]。

3 分貝的降幅看似不大,但實際上對應著約 50%的聲功率降低,對輪胎製造商構成了顯著的技術挑戰。為了應對 S2 限值,主流輪胎製造商都投入了大量研發資源,採用了多項創新技術。Miloradović 等人在 2017 年的綜述文章總結了輪胎行業應對 R117 法規升級的技術策略 [110]。



主要的技術措施包括:(1)花紋設計優化,採用更精細的變節距設計,將花紋節距的變化範圍從 $\pm 10-15\%$ 擴大到 $\pm 18-22\%$,更有效地分散音調性噪音;(2)溝槽幾何改進,減小橫向溝槽深度(平均減少約 10-15%),增加溝槽寬度(平均增加約 5-10%),優化溝槽底部形狀(從銳角改為圓弧形);(3)橡膠配方調整,降低胎面橡膠硬度(平均降低約 2-5 度肖氏 A 硬度),採用低滯後損失配方,引入矽膠技術;(4)結構優化,採用混雜簾線帶束層,優化帶束層邊緣設計,實施輕量化設計;(5)腔體降噪技術,在部分高端產品中採用吸音泡棉填充輪胎內腔[110]。

這些技術措施的綜合應用使得絕大多數輪胎產品都能滿足 S2 限值要求。以 Continental 為例,該公司在 2016 年前就將所有新開發的乘用車輪胎與商用車輪胎都按照 S2 標準設計,確保產品在法規生效時能夠順利過渡。Continental 的內部統計顯示,採用上述技術措施後,產品的平均噪音水準降低了約 3.5-4 分貝,不僅滿足了 S2 限值,還為未來可能的法規升級預留了技術空間[111]。

然而,R117 法規的實施也面臨一些挑戰。Berge 和 Gerhard 在 2023 年的研究探討了測量不確定性對法規實施的影響[112]。研究指出,R117 測試方法的測量不確定性約為 $\pm 0.5-1$ 分貝,這意味著同一款輪胎在不同測試條件下可能得到不同的測量

結果,存在誤判風險(合格產品被判定為不合格,或不合格產品被判定為合格)。研究建議在法規中引入測量不確定性的考量,例如設定保護區(guard band),即產品的實測噪音必須低於限值加上一個安全裕度(如 1 分貝),才被判定為合格。這種做法可以降低誤判風險,但也會對製造商提出更嚴格的要求[112]。

R117 法規還面臨磨損輪胎噪音控制的挑戰。原始的 R117 法規僅針對新輪胎制定了噪音限值,但研究發現,輪胎在使用過程中,特別是在磨損到 50%花紋深度後,噪音水準可能顯著上升,增幅可達 2-4 分貝。這是因為花紋深度的減少會改變溝槽的聲學特性,同時磨損會使胎面表面變得粗糙不平,增加噪音產生。為了解決這個問題,2020 年 R117 法規進行了修訂(R117-04 版本),增加了磨損輪胎噪音測試要求,規定輪胎在磨損到 50%花紋深度時,噪音水準不得超過新輪胎限值加 2 分貝 [113]。

這項新要求對輪胎設計提出了更高挑戰,因為傳統的降噪技術主要針對新輪胎優化,可能在輪胎磨損後效果減弱。製造商需要開發新的設計策略,確保輪胎在整個使用壽命期間都能保持良好的噪音性能。一些創新方法包括:(1)採用多深度花紋設計,在不同磨損階段呈現不同的花紋特徵,保持降噪效果;(2)使用耐磨橡膠配方,減緩胎面粗糙度的增加;(3)在胎面下層嵌入降噪結構(如吸音槽),即使表層磨損後仍能發揮作用[114]。

14.5.2 歐盟輪胎標籤法規符合性案例

歐盟輪胎標籤法規(EU Tire Label Regulation)是與 R117 法規配套的消費者信息披露制度,要求在輪胎銷售時提供標籤,標示輪胎的滾動阻力、濕地抓地力以及外部噪音等關鍵性能指標。該法規的目的是提高消費者對輪胎性能的認知,透過市場機制推動低噪音輪胎的推廣應用[115]。



歐盟輪胎標籤法規最初於 2009 年發布(Regulation EC 1222/2009),2012 年 11 月開始實施。2020 年進行了重大修訂(Regulation EU 2020/740),新版標籤於 2021 年 5 月起正式使用。新版標籤對噪音性能的標示方式進行了改進,從原來的聲波圖示(一波、兩波、三波對應不同的噪音等級)改為字母等級(A、B、C),並標注具體的噪音數值(以分貝為單位)[116]。

噪音等級的劃分基於輪胎噪音與 R117 法規 S2 限值的差值。A 級表示輪胎噪音低於 S2 限值至少 3 分貝,B 級表示低於 S2 限值至少 1 分貝但不足 3 分貝,C 級表

示符合 S2 限值但沒有額外降噪。這種劃分方式鼓勵製造商開發性能超越法規要求的低噪音輪胎,因為僅滿足法規限值只能獲得最低的 C 級標籤,在市場競爭中處於劣勢[117]。

歐盟委員會在 2020 年發布的輪胎標籤評估報告顯示,標籤制度對市場產生了積極影響。2012-2020 年間,歐洲市場銷售的乘用車輪胎中,噪音等級為 A 級或 B 級(原標籤中的一波或兩波)的比例從約 15% 上升到約 45%,顯示製造商積極開發低噪音產品以獲得更好的標籤等級。消費者調查顯示,約 60% 的消費者在購買輪胎時會參考標籤信息,其中約 35% 表示標籤信息對購買決策有重要影響[118]。

然而,標籤制度也面臨一些挑戰。首先是消費者認知度不足,仍有約 40% 的消費者不了解標籤的含義或不關注標籤信息。其次是信息傳遞的有效性問題,標籤通常貼在輪胎側面,消費者在實體店購買時可能看不到,而在線購物時標籤信息的展示也不一致。再次是標籤信息的綜合性問題,消費者需要在噪音、滾動阻力、濕地抓地力等多個指標之間權衡,往往難以做出最優選擇[119]。



為了提高標籤制度的有效性,2020 年的修訂版法規引入了一些改進措施:(1)強化標籤的可視性要求,規定在線銷售時必須在產品頁面顯著位置展示標籤圖像;(2)建立歐洲產品數據庫(EPREL),集中儲存所有在歐盟銷售的輪胎的性能數據,消費者可以在線查詢比較;(3)加強市場監管,定期進行產品符合性檢查,對虛假標示的行為進行處罰;(4)開展消費者教育活動,提高公眾對輪胎性能標籤的認知與重視[120]。

輪胎製造商也積極響應標籤制度,將其作為產品差異化與品牌建設的工具。Michelin 推出了"Green X"標識,標示符合高環保標準(低噪音、低滾動阻力)的輪胎產品;Continental 推出了"EcoContact"與"ContiSilent"系列,強調環保與靜音特性;Bridgestone 推出了"Ecopia"系列,主打低滾動阻力與低噪音。這些產品線的建立不僅滿足了法規要求,更在市場上形成了差異化競爭優勢,獲得了消費者的認可與青睞[121]。

14.5.3 其他地區法規符合性案例

除了歐盟,其他主要市場也建立了輪胎噪音法規體系。本案例將簡要介紹美國、日本、中國以及其他地區的輪胎噪音法規及其實施情況。

美國法規體系:美國的輪胎噪音管制相對寬鬆,聯邦層面沒有專門針對輪胎外部滾動噪音的強制性標準。美國主要依靠聯邦機動車安全標準(Federal Motor Vehicle Safety Standards, FMVSS)對車輛整體噪音進行管制,其中 FMVSS No. 109 規定了新車的透過噪音限值,但沒有單獨對輪胎提出要求。不過,美國一些州(如加州)制定了更嚴格的地方法規,參考歐盟標準對輪胎噪音進行管制。此外,美國輪胎製造商協會(U.S. Tire Manufacturers Association, USTMA)制定了行業自律標準,鼓勵成員企業開發低噪音產品[122]。

日本法規體系:日本的輪胎噪音法規屬於道路運送車輛安全基準(Road Vehicles Safety Standards)的一部分,由國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, MLIT)負責管理。日本在 2015 年啟動了輪胎噪音法規的制定工作,參考 UN ECE R117 的測試方法與限值標準,並於



2018 年正式實施。日本法規的特點是對雪地輪胎設定了差異化的限值,允許比標準輪胎高 1 分貝,承認雪地輪胎的特殊設計需求。日本還建立了輪胎噪音數據庫,定期公布各品牌輪胎產品的噪音測試數據,供消費者參考[123]。

中國法規體系:中國的輪胎噪音法規包含在國家強制性標準 GB 9743《輪胎滾動聲級限值及測量方法》中,該標準最初發布於 1988 年,經過多次修訂,目前執行的是 2015 年版本。中國標準的測試方法與 UN ECE R117 基本一致,但噪音限值略有不同,總體上與 R117 的 S1 限值相當。2020 年,中國啟動了 GB 9743 標準的新一輪修訂工作,計劃將噪音限值降低至與 R117 的 S2 限值相當的水準,並增加磨損輪胎噪音測試要求,預計於 2024-2025 年實施新標準[124]。

其他地區法規:韓國、印度、巴西、南非等國家也陸續建立了輪胎噪音法規體系,大多參考 UN ECE R117 標準,但實施時間表各有不同。總體趨勢是全球輪胎噪音法規的協調統一程度不斷提高,這有利於促進國際貿易,同時也為輪胎製造商提供了更清晰的技術目標[125]。

14.5.4 未來法規發展趨勢與挑戰

輪胎噪音法規的未來發展將朝著更嚴格、更全面、更科學的方向演進。本案例將探討未來法規可能的發展趨勢與面臨的挑戰。

更嚴格的噪音限值:隨著降噪技術的進步,未來的法規可能會進一步降低噪音限值。

歐盟正在研究 R117 法規的第三階段限值(S3),可能在現有 S2 限值基礎上再降低 2-3 分貝,預計在 2025-2028 年間實施。這將推動輪胎行業採用更先進的降噪技術,如主動降噪系統、智能材料以及與路面基礎設施的協同優化等[126]。



車內噪音的管制:目前的法規主要關注外部噪音,但車內噪音對駕乘人員的影響更直接。未來的法規

可能會增加車內噪音的測試與限值要求,特別是針對電動車,其車內噪音環境對輪胎噪音更敏感。這將推動腔體降噪技術等針對車內噪音的創新措施的更廣泛應用[127]。

全生命週期噪音管制:現有的法規主要針對新輪胎,但輪胎在使用過程中噪音性能會變化。未來法規可能會建立全生命週期的噪音管制體系,包括新輪胎、半磨損輪胎以及翻新輪胎等不同階段的噪音要求,確保輪胎在整個使用期間都能保持良好的噪音性能[128]。

噪音品質的評估:目前法規採用 A 計權噪音值作為評估指標,但這種單一指標無法全面反映噪音的主觀煩擾度。未來法規可能會引入心理聲學參數(如響度、尖銳度、粗糙度等)或音調性評估,更科學地評估輪胎噪音的主觀影響[129]。

與路面的協同管制:輪胎噪音是輪胎與路面交互作用的結果,單純管制輪胎無法實現最優的降噪效果。未來可能會建立輪胎與路面的協同管制體系,對輪胎路面組合的噪音性能提出要求,推動輪胎製造商與路面工程機構的合作創新[130]。



測試方法的改進:現有的滑行透過法存在測量不確定性大、無法區分不同噪音機制等問題。未來可能會發展新的測試方法,如室內轉鼓測試 (Indoor Drum Test, 也稱為底盤測功機測試,

英文為 Chassis Dynamometer Testing 或 Rolling Road Test))(提高重複性與可控性)、聲學陣列測試(識別噪音源位置)以及虛擬測試(結合數值模擬與實測數據),使噪音評估更科學、更高效[131]。

這些法規發展趨勢將對輪胎行業帶來持續的挑戰,但也為技術創新提供了動力與方向。透過法規的引導、市場的驅動以及技術的進步,輪胎噪音水準將持續降低,為改善城市環境品質與居民生活質量做出貢獻。

結論 (Conclusions)

本章的案例研究清楚顯示,輪胎噪音控制的核心挑戰不在於單一技術是否有效,而在於如何在複雜且相互制衡的性能需求中,建立可被重複驗證、可被產業採納的系統性解決方案。無論是乘用車、商用車或電動車輪胎,成功的降噪案例皆顯示多目標最佳化與跨學科整合是不可或缺的設計前提。

研究結果指出,僅以整體噪音值作為評估指標,已不足以反映輪胎噪音對使用者與環境的實際影響。案例中多次證實,透過抑制中高頻音調性噪音、改善頻譜平坦度與降低主觀煩擾度,即使總體噪音降幅有限,仍能顯著提升聲學品質與使用者滿意度。這一發現凸顯,未來輪胎噪音控制應從「降低分貝數」轉向「優化聲音品質」的設計思維。

在工程實務層面,本章案例顯示,花紋設計仍是影響輪胎噪音最具槓桿效應的因素,但其優化必須與材料與結構設計同步進行。變節距花紋、溝槽幾何優化、梯度剛度設計以及腔體吸音技術,若能在設計初期即透過數值模擬與優化演算法進行整合,可有效縮短開發週期並降低試製成本。同時,低噪音路面與輪胎設計之間的協同效果亦在多個案例中被證實,顯示交通噪音治理必須採取「車—胎—路」一體化的系統策略。

從法規與政策角度來看,案例分析顯示國際噪音標準與輪胎標示制度已成為驅動技術創新的重要力量。輪胎製造商在因應 UNECE R117 與歐盟輪胎標籤要求的過程中,不僅提升了產品噪音性能,也逐步建立以量測可信度與可比較性為核心的研發流程。這種由法規反向推動技術升級的模式,將在電動化與永續交通政策背景下持續深化。

總結而言,本章案例研究的最大貢獻,在於證明輪胎噪音控制並非理論推演的抽象成果,而是一套可被實際驗證、可被規模化應用的工程體系。透過對成功與限制案例的系統整理,本章為未來低噪音輪胎研發、道路噪音治理策略以及公共健康導向的交通政策,提供了具體且可操作的經驗基礎與方法論指引。

參考文獻

- [1] World Health Organization. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
- [2] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*. INFORMEX.
- [3] Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(2), 00368504211005224. <https://doi.org/10.1177/00368504211005224>
- [4] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(2), 87-112. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [5] Kropp, W. (1992). Structure-borne sound on a smooth tyre. *Applied Acoustics*, 36(3-4), 233-253.
- [6] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. In *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 2, pp. 1411-1416). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384529>
- [7] Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2009). Acoustic aging of asphalt pavements: A California/Denmark comparison. *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*. Paper No. 09-3089.
- [8] Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2012). The importance for noise reduction of the bottom layer in double-layer porous asphalt. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(4), 3276. <https://doi.org/10.1121/1.4708208>
- [9] Mohanty, A. R., & Fatima, S. (2013). An overview of automobile noise and vibration control. *Noise & Vibration Worldwide*, 44(6), 10-18. <https://doi.org/10.1260/0957-4565.44.6.10>
- [10] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise—trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(2), 23-42. <https://doi.org/10.24874/mvm.2017.43.02.03>

- [11] Li, T. (2018). Influencing parameters on tire–pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4), 38. <https://doi.org/10.3390/designs2040038>
- [12] Bekke, D., Wijnant, Y., & de Boer, A. (2014). Tyre tread pattern noise optimization by a coupled source-human perception model. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 249, No. 6, pp. 2223-2232). Institute of Noise Control Engineering.
- [13] Mohammadi, S., & Ohadi, A. (2021). A novel approach to design quiet tires, based on multi-objective minimization of generated noise. *Applied Acoustics*, 175, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107825>
- [14] Kim, K. J., Hwang, I. H., & Kim, H. S. (2012). Optimization of tire pitch sequence for the reduction of tire air-pumping noise. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 5(2012-01-0541), 673-680.
- [15] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Ou, Y. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 12-24. <https://doi.org/10.3397/1/376356>
- [16] Li, T. (2018). Influencing parameters on tire–pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4), 38. <https://doi.org/10.3390/designs2040038>
- [17] Mohammadi, S., & Ohadi, A. (2021). Reduction of tire noise by modifying tread pattern characteristics. *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, 7(1), 65-78. <https://doi.org/10.22064/tava.2021.535886.1188>
- [18] Praticò, F. G., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Trends and issues in mitigating traffic noise through quiet pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.871>
- [19] Winroth, J., Hoever, C., & Kropp, W. (2013). The contribution of air-pumping to tyre/road noise. In *Proceedings of AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics* (pp. 1539-1542).
- [20] Michelin. (2020). *Innovation and Research: Tire Design and Development*. Michelin Group Annual Report.

- [21] Koul, P. (2024). Advancements in finite element analysis for tire performance: A comprehensive review. *International Journal of Multidisciplinary Research in Arts, Science and Technology*, 3(1), 95-108.
- [22] Bühlmann, E., Egger, S., Mioduszewski, P., & Sandberg, U. (2018). An in-depth look at the tire rubber hardness influence on tire/road noise measurements. *Inter-Noise 2018*, Chicago, USA.
- [23] Hough, P., van der Aar, N., & Qiu, Z. (2020). Compounding and mixing methodology for good performance of EPDM in tire sidewalls. *Tire Science and Technology*, 48(1), 2-25. <https://doi.org/10.2346/tire.19.180226>
- [24] Continental AG. (2019). *Silica Technology: The Foundation of Green Tires*. Continental Technical White Paper.
- [25] Sainty, S., Tawaf, A., & Richard, J. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. In *Proceedings of the Noise Control and Acoustics Division Conference* (pp. 269-277). ASME. <https://doi.org/10.1115/NCAD2012-0854>
- [26] Continental AG. (2018). *ContiSilent Technology: Reducing Interior Noise*. Continental Product Brochure.
- [27] Michelin. (2021). *Michelin Acoustic Technology: Quieter Rides for Electric Vehicles*. Michelin Press Release.
- [28] Sainty, S., Tawaf, A., & Richard, J. (2012). Analysis of potential solutions to audible tire cavity and rim coupling resonance noise. In *Proceedings of the Noise Control and Acoustics Division Conference* (pp. 269-277). ASME.
- [29] Veeramurthy, M. (2011). *Modeling, Finite Element Analysis, and Optimization of Non-Pneumatic Tire (NPT) for the Minimization of Rolling Resistance* [Master's thesis, Clemson University].
- [30] Lafont, T., Stelzer, R., & D'amico, R. (2019). Modelling tyre noise in finite element simulations for pass-by noise predictions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 233(8), 2070-2083. <https://doi.org/10.1177/0954406219832908>
- [31] Ejsmont, J. A., Sandberg, U., & Taryma, S. (2015). Influence of tyre construction on tire/road noise. *Inter-Noise 2015*, San Francisco, USA.

- [32] Bridgestone Corporation. (2020). *Lightweighting Technology for Tire Design*. Bridgestone Technical Report.
- [33] Li, T., Feng, J., & Wang, R. (2020). Topology optimization for tire structure design. *Tire Science and Technology*, 48(3), 156-175.
- [34] Kim, Y. J., & Bolton, J. S. (2004). Effects of rotation on the dynamics of a circular cylindrical shell with application to tire vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), 605-621.
- [35] UNECE. (2016). *Regulation No. 117: Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyres with Regard to Rolling Sound Emissions and to Adhesion on Wet Surfaces*. United Nations Economic Commission for Europe.
- [36] Berge, T., & Gerhard, H. M. (2023). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 265, No. 3, pp. 4893-4904). Institute of Noise Control Engineering.
- [37] Sandberg, U. (1998). *Noise Trailers of the World: Tools for Tire/Road Noise Measurements with the Close-Proximity Method*. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) Report.
- [38] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., & Bianco, F. (2017). The influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating the effectiveness of a noise mitigation action based on low-noise road surfaces. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.002>
- [39] Bennert, T., Hanson, D., Maher, A., & Vitillo, N. (2005). Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(2), 94-100. <https://doi.org/10.1520/JTE12270>
- [40] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Tire/Pavement Noise Study*. NCAT Report 04-02. National Center for Asphalt Technology.
- [41] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., & Sanchez-Lozano, M. (2019). An alternative drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 149, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.005>

- [42] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., & Sanchez-Lozano, M. (2019). An alternative drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 149, 139-147.
- [43] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. In *Proceedings of the 9th Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress*.
- [44] Iwao, K., & Yamazaki, I. (1996). A study on the mechanism of tire/road noise. *JSAE Review*, 17(2), 139-144. [https://doi.org/10.1016/0389-4304\(95\)00004-6](https://doi.org/10.1016/0389-4304(95)00004-6)
- [45] Bekke, D., Wijnant, Y., & de Boer, A. (2014). Tyre tread pattern noise optimization by a coupled source-human perception model. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 249, No. 6, pp. 2223-2232).
- [46] 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.
- [47] Bekke, D., Wijnant, Y., & de Boer, A. (2014). Tyre tread pattern noise optimization by a coupled source-human perception model. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 249, No. 6, pp. 2223-2232).
- [48] de Roo, F., Telman, J., van Blokland, G., & Nilsson, N. A. (2009). Uncertainty of close proximity (CPX) tyre-road noise measurements. In *Proceedings of the 8th European Conference on Noise Control* (Euronoise 2009).
- [49] Baumgartner, B., Fuchs, A., & Haider, M. (2023). Correlation of tyre/road noise measurements via machine learning algorithms. In *Forum Acusticum 2023* (pp. 4201-4208).
- [50] Sandberg, U. (2001). Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise—the global perspective. *Noise Control Engineering Journal*, 49(4), 170-181. <https://doi.org/10.3397/1.2839663>
- [51] Close, W. H., & Wesler, J. E. (1975). Vehicle noise sources and noise-suppression potential. *Transportation Research Board Special Report*, 152, 9-19.

- [52] Bein, T., Elliott, S., Ferralli, L., Casella, M., & Meschke, J. (2012). Integrated solutions for noise & vibration control in vehicles. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, 919-931. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1069>
- [53] Ejsmont, J., Berge, T., & Beckenbauer, T. (2016). Influence of measuring conditions on tyre/road noise. In *Proceedings of Euronoise 2016* (pp. 525-530).
- [54] Marin-Cudraz, T., Parizet, E., & Perez, B. B. (2024). External tire noise: Determination of timbre parameters and unpleasantness factors, with a focus on truck tires. *Applied Acoustics*, 215, 109725. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109725>
- [55] Sandberg, U. (2001). Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise—the global perspective. *Noise Control Engineering Journal*, 49(4), 170-181.
- [56] Continental AG. (2017). *Tire Retreading: Environmental and Economic Benefits*. Continental Sustainability Report.
- [57] Goodyear Tire & Rubber Company. (2020). *Bus and Coach Tires: Performance and Comfort*. Goodyear Technical Brochure.
- [58] Bein, T., Elliott, S., Ferralli, L., Casella, M., & Meschke, J. (2012). Integrated solutions for noise & vibration control in vehicles. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, 919-931.
- [59] BYD Company. (2021). *Electric Bus NVH Performance: The Role of Low-Noise Tires*. BYD Technical White Paper.
- [60] European Automobile Manufacturers Association (ACEA). (2020). *Light Commercial Vehicles Market Report*. ACEA Statistics.
- [61] Bridgestone Corporation. (2019). *Light Truck Tires: Balancing Load Capacity and Comfort*. Bridgestone Technical Guide.
- [62] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Tire/Pavement Noise Study*. NCAT Report 04-02. National Center for Asphalt Technology.
- [63] Michelin. (2020). *Agilis Range: Urban and Highway Tires for Light Commercial Vehicles*. Michelin Product Catalogue.
- [64] Continental AG. (2023). *UN Regulation 117: Requirements and Compliance*. Continental Business Knowledge Center. <https://www.continental-tires.com/products/b2b/business-know-how/un-regulation-117/>

- [65] Continental AG. (2023). *UN Regulation 117: Requirements and Compliance*. Continental Business Knowledge Center.
- [66] European Commission. (2020). *Regulation (EU) 2020/740 on the Labelling of Tyres with Respect to Fuel Efficiency and Other Parameters*. Official Journal of the European Union.
- [67] Michelin. (2019). *EverGrip Technology: Performance that Lasts*. Michelin Innovation Report.
- [68] Bridgestone Corporation. (2018). *Platform-Based Design for Commercial Vehicle Tires*. Bridgestone Annual Technical Report.
- [69] Goodyear Tire & Rubber Company. (2021). *Quality Management in Tire Manufacturing*. Goodyear Operations Manual.
- [70] European Commission. (2022). *Study on the Feasibility of Further Reducing Tyre Rolling Noise Limits*. EC DG GROW Report.
- [71] Goetchius, G. (2011). Leading the charge—the future of electric vehicle noise control. *Sound & Vibration*, 45(11), 12-17.
- [72] Goetchius, G. (2011). Leading the charge—the future of electric vehicle noise control. *Sound & Vibration*, 45(11), 12-17.
- [73] Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(2), 00368504211005224.
- [74] Laib, F., & Schmidt, J. A. (2019). Acoustic vehicle alerting systems (AVAS) of electric cars and its possible influence on urban soundscape. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics* (pp. 4753-4758).
- [75] Michelin. (2022). *Pilot Sport EV: Performance and Silence for Electric Sports Cars*. Michelin Product Launch Press Release.
- [76] Continental AG. (2021). *EcoContact 6 Q: Optimized for Electric Vehicles*. Continental Product Information.
- [77] Bridgestone Corporation. (2022). *Turanza EV: The Quiet Revolution in Electric Vehicle Tires*. Bridgestone Marketing Material.

- [78] Shi, T., Zhou, P., Feng, Y., Lv, T., Li, Y., & Zang, L. (2025). Simulation study on noise reduction of electric vehicle tire with built-in sound-absorbing material. *Acta Acustica*, 50(1), 45-56. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024033>
- [79] Melloni, A., Pecchioni, G., Luzzi, S., & Bellomini, R. (2020). LIFE project E-VIA: Noise, electric vehicles and tyres. In *Forum Acusticum 2020* (pp. 2537-2544).
- [80] Gasparoni, S., Czuka, M., Wehr, R., Conter, M., Pallas, M. A., Haider, M., & Reichenauer, P. (2015). Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission. In *Proceedings of Euronoise 2015* (pp. 1823-1828).
- [81] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Tire/Pavement Noise Study*. NCAT Report 04-02.
- [82] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M. R., Bueno, M., Athari, S., Pieren, R., Heutschi, K., & Poulidakos, L. D. (2022). Low-noise pavement technologies and evaluation techniques: A literature review. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 1911-1934. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1830091>
- [83] de León, G., Del Pizzo, L. G., Teti, L., Moro, A., Bianco, F., Fredianelli, L., & Licitra, G. (2020). Evaluation of tyre/road noise and texture interaction on rubberised and conventional pavements using CPX and profiling measurements. *Road Materials and Pavement Design*, 21(sup1), S91-S102. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1735493>
- [84] Vaitkus, A., Andriejauskas, T., Vorobjovas, V., Jagniatinskis, A., Fiks, B., & Zofka, E. (2017). Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Construction and Building Materials*, 152, 345-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130>
- [85] Bendtsen, H., & Larsen, L. E. (1999). Noise reducing pavements. *Nordic Road & Transport Research*, 11(2), 12-15.
- [86] Bendtsen, H., & Andersen, B. (2005). Experiences with thin noise reducing pavements. In *Forum Acusticum Budapest 2005* (pp. 2283-2288).
- [87] Sandberg, U. (2009). *The Global Experience in Using Low-Noise Road Surfaces: A Benchmark Report*. Swedish Road Administration Publication 2009:09.
- [88] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*. INFORMEX.

- [89] Bendtsen, H., Skov, R. S., & Iversen, L. M. (2015). Integration of noise in pavement management systems. In *Proceedings of Euronoise 2015* (pp. 253-258).
- [90] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Kalman, B. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality—initial results from a case study. In *Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration* (pp. 1-8).
- [91] Iwase, T. (2000). Acoustic properties of porous pavement with double layers and its reduction effects for road traffic noise. In *Proceedings of Inter-Noise 2000* (pp. 2716-2721).
- [92] Japan Road Association. (2003). *Manual for Drainage Asphalt Pavement*. Japan Road Association Technical Standard.
- [93] Nielsen, C. B., Bendtsen, H., Andesen, B., & Larsen, H. J. E. (2005). *Noise Reducing Pavements in Japan*. Danish Road Institute Report 151.
- [94] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (2020). *Road Traffic Noise Regulation and Management in Japan*. MLIT Environmental Policy Division Report.
- [95] Sandberg, U., & Kalman, B. (2005). *The Poroelastic Road Surface: Results of an Experiment in Stockholm*. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) Report 530A.
- [96] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>
- [97] Sandberg, U., & Kalman, B. (2005). *The Poroelastic Road Surface: Results of an Experiment in Stockholm*. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) Report 530A.
- [98] Sandberg, U. (2010). *The 10-Year Swedish PERSUADE Project on Poroelastic Road Surfaces*. VTI Report 671A.
- [99] Wang, D., Schacht, A., Leng, Z., Leng, C., Kollmann, J., Oeser, M., & Steinauer, B. (2017). Effects of material composition on mechanical and acoustic

- performance of poroelastic road surface (PERS). *Construction and Building Materials*, 135, 352-360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.207>
- [100] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23.
- [101] Ejsmont, J., Sandberg, U., Taryma, S., & Świczko-Żurek, B. (2014). Tyre/road noise reduction of poroelastic road surface tested in a laboratory. In *Proceedings of INTER-NOISE 2014* (pp. 1-10). Institute of Noise Control Engineering.
- [102] Taryma, S., Woźniak, R., Ejsmont, J., & Ronowski, G. (2018). Tire/road noise and tire rolling resistance on the prototype PERS surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 421(2), 022035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/421/2/022035>
- [103] Praticò, F. G., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Trends and issues in mitigating traffic noise through quiet pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 203-212.
- [104] Copenhagen Municipality. (2013). *Noise Action Plan 2013-2018*. Copenhagen Environmental Administration.
- [105] Vaitkus, A., Andriejauskas, T., Vorobjovas, V., Jagniatinskis, A., Fiks, B., & Zofka, E. (2017). Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction. *Construction and Building Materials*, 152, 345-356.
- [106] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise—trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(2), 23-42.
- [107] UNECE. (2001). *Regulation No. 117: Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyres with Regard to Rolling Sound Emissions and to Adhesion on Wet Surfaces* (Original Version). United Nations Economic Commission for Europe.
- [108] UNECE. (2016). *Regulation No. 117 Revision 2: Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyres with Regard to Rolling Sound Emissions and to Adhesion on Wet Surfaces*. United Nations Economic Commission for Europe.
- [109] Continental AG. (2023). *UN Regulation 117: Requirements and Compliance*. Continental Business Knowledge Center.

- [110] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise—trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(2), 23-42.
- [111] Continental AG. (2019). *Annual Report 2019: Sustainability and Innovation*. Continental AG Corporate Communications.
- [112] Berge, T., & Gerhard, H. M. (2023). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 265, No. 3, pp. 4893-4904).
- [113] TÜV SÜD. (2021). *Amendment of UN/ECE Regulation No. 117 for Tyres*. TÜV SÜD White Paper. <https://www.tuvsud.com/en-us/resource-centre/white-papers/amendment-of-un-ece-regulation-no-117-for-tyres>
- [114] Michelin. (2022). *Tire Performance Throughout the Service Life*. Michelin Technical White Paper.
- [115] European Commission. (2009). *Regulation (EC) No 1222/2009 on the Labelling of Tyres with Respect to Fuel Efficiency and Other Essential Parameters*. Official Journal of the European Union.
- [116] European Commission. (2020). *Regulation (EU) 2020/740 on the Labelling of Tyres with Respect to Fuel Efficiency and Other Parameters*. Official Journal of the European Union.
- [117] Goodyear. (2021). *Understanding the EU Tyre Label Grading*. Goodyear Consumer Information. https://www.goodyear.eu/en_gb/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html
- [118] European Commission. (2020). *Impact Assessment for the Revision of Regulation (EC) No 1222/2009 on Tyre Labelling*. EC Staff Working Document SWD(2018) 186 final.
- [119] ETRMA. (2021). *European Tyre and Rubber Manufacturers' Association: Market Report 2021*. ETRMA Statistics.
- [120] European Commission. (2021). *European Product Database for Energy Labelling (EPREL)*. EC Energy Labelling Portal.
- [121] Bridgestone Corporation. (2020). *Ecopia Range: Environmental Performance*. Bridgestone Sustainability Report.

- [122] U.S. Tire Manufacturers Association. (2019). *USTMA Voluntary Commitment on Tire Noise Reduction*. USTMA Policy Statement.
- [123] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (2018). *Road Transport Vehicle Safety Standards: Tire Noise Regulations*. MLIT Notification No. 619.
- [124] Standardization Administration of China. (2020). *GB 9743-2015 Rolling Sound Level Limits and Measurement Methods for Tyres (Under Revision)*. SAC Technical Committee TC19.
- [125] International Organization for Standardization. (2019). *ISO 362-1:2015 Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles – Engineering Method*. ISO Standard.
- [126] European Commission. (2023). *Feasibility Study on Stage 3 Limits for UN Regulation 117*. EC Joint Research Centre Report.
- [127] International Organization for Standardization. (2021). *ISO/DIS 5128 Acoustics – Measurement of Interior Noise of Road Vehicles*. ISO Draft Standard.
- [128] TÜV SÜD. (2021). *Amendment of UN/ECE Regulation No. 117 for Tyres*. TÜV SÜD White Paper.
- [129] Parizet, E., & Koehl, V. (2012). Application of free sorting tasks to sound quality experiments. *Applied Acoustics*, 73(1), 61-65.
- [130] FEHRL. (2016). *Tire-Road Noise Reduction: A Combined Approach*. Forum of European National Highway Research Laboratories Position Paper.
- [131] Baumgartner, B., Fuchs, A., & Haider, M. (2023). Correlation of tyre/road noise measurements via machine learning algorithms. In *Forum Acusticum 2023* (pp. 4201-4208).