

第十一章 電動車輪胎噪音特性

Electric Vehicle Tire Noise Characteristics

摘要 (Abstract)

電動車的快速普及正引發車輛聲學工程領域的結構性轉變，其中最關鍵的變化在於輪胎噪音由過去的次要聲源，轉變為主導整體車輛噪音與環境噪音暴露的核心因素。由於電動馬達在低速運轉時幾近無聲，傳統內燃機所提供的噪音遮蔽效應大幅消失，使輪胎與路面交互作用所產生的滾動噪音在更低車速下即成為主要聲源。本章系統性解析電動車輪胎噪音的物理特性、頻譜結構、主觀感知差異及其在法規、安全與產品設計層面的重要性，說明電動車時代下輪胎噪音控制所面臨的全新挑戰。

本章首先指出，電動車在約三十至四十公里每小時的行駛速度範圍內，即已完全由輪胎噪音主導，而傳統內燃機車輛則需達五十至六十公



里每小時才出現相同的噪音主導轉換點。這一速度門檻的提前，使輪胎噪音在城市交通情境中具有更高的暴露頻率與環境影響。章節進一步分析電動車輪胎噪音的頻譜特性，顯示其能量高度集中於一千至一千六百赫茲的人耳敏感頻段，且因缺乏引擎噪音遮蔽，即使整體噪音值較低，仍可能產生較高的主觀煩擾感。

在工程與設計層面，本章說明電動車輪胎需同時承受較高車重、瞬時高扭力輸出與低滾動阻力需求，使降噪設計與能效、耐久性及抓地力之間的衝突更加尖銳。此外，輪胎空腔共振、結構傳遞噪音與花紋氣動噪音在電動車中皆更為顯著，促使胎內吸音材料、花紋節距最佳化與結構阻尼調諧成為重要的技術手段。章節同時整合法規發展趨勢，說明 UNECE R117、歐盟輪胎標籤法規及 AVAS 最低噪音要求，如何共同形塑電動車輪胎噪音的設計邊界與測試方法。整體而言，本章將電動車輪胎噪音由單一工程問題，提升為結合安全、環境與產品競爭力的跨領域關鍵議題。

電動車輪胎噪音特性代表著車輛聲學工程領域的重大典範轉移,這個轉變根本性地改變了車輛噪音控制的優先順序與設計哲學。隨著全球電動車市場的快速增長,從 2020 年的約 300 萬輛增長至 2024 年的超過 1400 萬輛年銷售量,輪胎噪音議題從次要的噪音源轉變為主導性的聲學挑戰,這種轉變要求對輪胎設計、材料選擇、測試方法與法規標準進行全面性的重新思考與創新。傳統內燃機車輛在城市行駛條件下,引擎噪音通常在 50 至 60 公里/小時以下仍然主導著整體車輛噪音特徵,有效地遮蔽了輪胎滾動噪音的貢獻。然而在電動車中,由於電動馬達在低速運轉時幾乎無聲,輪胎與路面的交互作用噪音在極低速度下即成為主要聲源,使得輪胎噪音的相對重要性大幅提升[1][2]。

根據 Hua 等人在 *Science Progress* 期刊發表的權威性綜述研究,電動車在 30 至 40 公里/小時的速度下已經完全由輪胎噪音主導,而傳統內燃機車輛要到 50 至 60 公里/小時才出現類似的噪音特徵轉換點[1]。這個 15 至 20 公里/小時的速度差異看似微小,但在實際的城市交通環境中具有深遠的影響,因為大多數城市行駛場景的平均速度正好落在這個關鍵範圍內。更重要的是,Cesbron 等人在 *Noise Mapping* 期刊的研究指出,電動車輪胎噪音的頻譜特徵在 1000 至 1600 赫茲的頻率範圍內特別顯著,這個頻段在傳統車輛中通常被引擎諧波所遮蔽,但在電動車中卻完全暴露,導致雖然整體噪音值可能較低 3 至 5 分貝,但主觀上的噪音煩擾感卻可能更強[3][4]。這種現象與人耳聽覺特性密切相關,因為人耳對於 1000 至 4000 赫茲頻段的聲音最為敏感,而輪胎噪音正好在此頻段具有顯著的能量集中。



電動車輪胎設計所面臨的多重約束條件使得工程挑戰更加複雜。首先,電動車通常比同級別的內燃機車輛重約 10%至 30%,主要由於鋰離子電池組的重量通常在 300 至 600 公斤之間,某些長續航車型甚至超過 800 公斤[5]。這種額外重量對輪胎承載能力、結構強度與耐久性提出了更高要求。其次,電動馬達的瞬時扭力特性遠超傳統引擎,使得輪胎在加速與煞車時承受更大的切向力,導致胎面磨損速度可能加快 20%至 30%[6]。第三,續航里程焦慮驅使輪胎設計必須優先考慮滾動阻力最小化,因為輪胎滾動阻力對於電動車能耗的影響比傳統車輛更為顯著,研究顯示滾動阻力係數降低 10%可以使電動車續航里程增加約 2%至 4%[7]。然而這些設計目標往往與降噪需求產生矛盾,因為降低滾動阻力通常需要較硬的膠料配方與較少的胎面花紋深度,這些特徵卻可能增加噪音產生。

電動車輪胎噪音的測量方法學也必須因應這些特殊需求而發展。傳統的 ISO 362 車輛透過噪音測試方法主要針對引擎噪音設計,在電動車應用時需要進行重大調整[8]。ISO 362-3:2022 標準引入了半消音室與動態測功機的室內測試方法,專門用於精確測量輪胎噪音而不受環境噪音與氣象條件的影響[9]。同時,UNECE R117 法規規定了輪胎滾動聲音發射的測試方法與限值,這些標準在電動車時代變得更加關鍵[10]。此外,近接測量法(Close Proximity Method, CPX)使用裝有麥克風的拖車,將麥克風置於輪胎周圍極近的位置,能夠在實際道路條件下精確測量輪胎路面交互作用噪音,這種方法在電動車輪胎開發中的應用日益增加[11][12]。

輪胎空腔共振現象在電動車中也變得更加突出。輪胎內部的空氣腔在 200 至 250 赫茲頻段會產生共振,這種共振透過輪胎結構傳遞至車體,在車室內產生可聽見的嗡嗡聲[13]。在傳統車輛中,這種低頻噪音通常被引擎振動所掩蓋,但在安靜的電動車中卻成為主要的 NVH(噪音、振動與聲振粗糙度)議題。研究顯示,在輪胎內部填充聚氨酯泡棉可以有效抑制空腔共振,在共振頻率處降低噪音達 6 至 9 分貝[1][14]。然而這種解決方案會增加輪胎重量約 300 至 500 克,並



可能影響輪胎的散熱性能與耐久性,需要在設計時仔細權衡。Shi 等人在 2025 年 *Acta Acustica* 期刊發表的最新模擬研究進一步探討了內建吸音材料的最佳化配置,顯示適當的材料密度與厚度選擇可以在最小重量增加的前提下達到最大降噪效果[15]。

法規環境的演變也反映了電動車輪胎噪音的重要性提升。歐盟輪胎標籤法規(EU 2020/740)自 2021 年 5 月起實施新版本,將噪音等級分類從三級(以聲波符號表示)改為 A、B、C 三個字母等級,並且收緊了噪音限值,特別針對電動車專用輪胎設定了更嚴格的要求[16]。UNECE R138 法規則規定了電動車與混合動力車的最低噪音要求,要求車輛在 20 公里/小時以下與倒車時必須啟動聲學車輛警示系統(Acoustic Vehicle Alerting System, AVAS),產生 56 至 75 分貝的警示音以保護行人安全,這與 UNECE R51 的最大噪音限值之間必須取得平衡[17][18]。這種最低與最高噪音要求的雙重限制,為輪胎設計師創造了前所未有的設計空間約束。

從材料科學的角度來看,輪胎膠料配方的選擇在電動車應用中面臨新的挑戰。矽膠填充配方自 1990 年代由米其林首次商業化應用以來,已經成為綠色輪胎技術的

核心,相較於傳統的碳黑填充配方,矽膠配方可以在保持濕地抓地力的同時降低滾動阻力約 20%至 25%[19][20]。然而矽膠配方的聲學特性更為複雜,其較低的結構阻尼可能在某些頻段增加噪音輻射。最新的研究方向包括納米結構矽膠、表面改性技術與混合填料系統,目標是在滾動阻力、抓地力與噪音三者之間找到最佳平衡點[21]。此外,胎面花紋的幾何設計對噪音產生機制有直接影響,包括空氣泵浦噪音、花紋塊撞擊噪音與黏滑振動噪音等多種機制,這些機制的相對重要性隨著行駛速度而變化,需要透過多目標最佳化方法來設計花紋序列[22][23]。

電動車輪胎噪音研究的未來方向包括主動噪音控制技術的整合、智慧輪胎感測系統的應用、以及數位孿生模擬技術在設計階段的應用。主動噪音控制系統可以透過在車室內產生反相聲波來抵消輪胎噪音,但這需要精確的噪音預測模型與快速的訊號處理能力[24]。智慧輪胎內建的壓力、溫度與加速度感測器可以即時監測輪胎狀態並預測噪音表現,為主動控制系統提供輸入[25]。數位孿生技術則允許在虛擬環境中測試數千種設計變體,大幅縮短開發週期並降低原型製作成本[26]。這些先進技術的整合將定義下一代電動車輪胎的設計典範,創造更安靜、更高效且更安全的出行體驗。

11.1 電動車噪音特徵 (EV Noise Characteristics)

電動車的噪音特徵與傳統內燃機車輛存在根本性的差異,這種差異不僅是噪音來源的轉變,更涉及噪音頻譜結構、時間特性、空間分布與主觀感知的



的全面性改變。理解這些特徵對於輪胎噪音控制策略的制定至關重要,因為它決定了哪些噪音成分會成為主導性的煩擾源,以及應該在哪些頻段與速度範圍內集中降噪努力。電動車噪音的複雜性來自於多個噪音源在不同操作條件下的相對貢獻變化,包括電動馬達的電磁噪音、變速箱的機械噪音、冷卻系統的風扇噪音、輪胎與路面的交互作用噪音,以及空氣動力學噪音等,這些噪音源隨著車速、加速度、負載與環境條件而動態變化,創造出獨特的聲學特徵[1][27]。

電動馬達噪音是電動車特有的聲源,其特徵與傳統內燃機引擎截然不同。電動馬達的噪音主要來自電磁力波動引起的定子振動,這種振動透過馬達外殼與安裝支架傳遞至車體結構,最終在車室內外輻射聲音。電磁噪音的頻譜特徵高度依賴於

馬達的設計參數,包括極數、槽數、繞組配置與控制策略。永磁同步馬達(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)通常在 800 至 1000 赫茲頻段產生主要的噪音峰值,這是由於徑向電磁力波的共振頻率落在此範圍[28]。感應馬達(Induction Motor)的噪音頻譜則更為複雜,包含多個諧波成分與調變側帶。Hazra 與 Reddy 在 SAE 期刊的研究指出,電動馬達噪音的階次特性與轉速直接相關,在加速過程中會產生掃頻效應,這種時變特性使得主觀煩擾感增加[29]。



更重要的是,馬達噪音的調變特性(包括幅度調變與頻率調變)會產生類似警笛的聲音質感,即使總體噪音值不高,也可能引起顯著的主觀不適。

電動車在低速行駛時的噪音特徵與傳統車輛形成鮮明對比。在 0 至 30 公里/小時的速度範圍內,傳統內燃機車輛的引擎怠速與低速運轉噪音通常主導整體噪音,頻譜能量集中在 50 至 500 赫茲的低頻段,噪音值通常在 60 至 70 分貝之間[3]。相比之下,電動車在相同速度下的整體噪音值可能降至 50 至 60 分貝,但噪音的頻譜組成完全不同。Praticò 與 Fedele 在 Noise Mapping 期刊的田野實驗研究顯示,電動車在 20 公里/小時速度下的噪音已經明顯地由輪胎路面交互作用主導,而同速度下的柴油車輛仍然是引擎噪音占優勢[30]。這種低速下的輪胎噪音顯著性導致了 AVAS 系統的法規要求,因為過度安靜的電動車對行人特別是視覺障礙者構成安全風險。研究發現,電動車與傳統車輛在低速時的可聽見距離差異可達 50%至 70%,意味著行人可能直到車輛非常接近才能察覺其存在[31]。

中速範圍(30 至 70 公里/小時)是電動車噪音特徵最顯著的速度段,也是大多數城市與郊區行駛場景的典型速度範圍。在這個速度範圍內,輪胎噪音成為絕對主導的聲源,其頻譜特徵呈現出複雜的多峰結構。根據 Kropp 等人的經典輪胎噪音機制研究,輪胎噪音的頻譜可以分為幾個特徵區域:低於 200 赫茲的結構共振區域,主要由輪胎的模態振動與空腔共振所貢獻;200 至 800 赫茲的結構輻射區域,由輪胎側壁與胎面的彎曲振動所輻射;800 至 1600 赫茲的空氣泵浦與花紋噪音區域,這是最顯著的噪音峰值所在;以及 1600 赫茲以上的高頻嘯音區域,主要由胎面與路面的黏滑振動所產生[32][33]。在電動車中,由於缺乏引擎噪音的遮蔽,這些頻譜特徵全部清晰可見,使得輪胎噪音的頻譜豐富度與複雜度成為主觀音質評估的關鍵因素。Forssén 等人開發的電動車輪胎噪音聽覺化工具能夠合成不同輪胎與路面組

合的聲音,用於主觀評估與設計最佳化,這種工具在輪胎選擇與路面設計中日益重要[34]。

高速行駛(超過 70 公里/小時)時,風噪音開始在電動車的整體噪音中占據重要地位,但輪胎噪音仍然是重要的貢獻者。空氣動力學噪音主要來自車身周圍的湍流邊界層、A 柱與後視鏡的渦流脫落、以及車底氣流的擾動,其噪音值與車速的六次方成正比,因此在高速時增長迅速[35]。然而輪胎噪音也隨速度增加而增長,其噪音值大致與速度的對數成正比,在高速公路速度(100 至 120 公里/小時)下仍然是顯著的噪音源。風噪音與輪胎噪音的頻譜特徵有所重疊但也有差異,風噪音通常在 500 至 2000 赫茲範圍內具有寬頻特性,而輪胎噪音則保持其特徵性的峰值結構。Hua 等人的研究指出,在 120 公里/小時速度下,輪胎噪音與風噪音對車室內總噪音的貢獻大致相當,各約占 40%至 45%,其餘為結構傳遞的振動噪音[1]。這種高速下的噪音組成使得車輛的氣動設計與輪胎選擇必須同時最佳化,才能達到最佳的整體靜音性能。

電動車噪音的頻譜遮蔽效應與傳統車輛顯著不同,這對主觀音質感知有深遠影響。在傳統車輛中,引擎噪音在幾個主要頻率(基頻及其諧波)上產生強烈的窄帶成分,這些窄帶成分會遮蔽鄰近頻段的其他噪音,根據心理聲學的遮蔽原理,一個強烈的純音可以遮蔽頻率接近的較弱聲音達 15



至 20 分貝[36]。然而在電動車中,由於缺乏這些強烈的窄帶遮蔽者,所有頻段的噪音都變得可聽見,即使其絕對噪音值較低。這解釋了為何電動車乘客經常報告能聽見各種細微的噪音,如電子設備的高頻嗡鳴、冷卻風扇的調變噪音、以及路面接縫的撞擊聲,這些在傳統車輛中通常被引擎噪音所掩蓋。Mohamed 等人對輪胎空腔共振的綜述研究指出,這種共振在 200 至 250 赫茲產生的峰值在傳統車輛中通常不是主要問題,但在電動車中卻可能成為最顯著的車室內噪音源,需要特殊的抑制措施[37]。

電動車噪音的時間特性也展現出獨特的模式,特別是在加速與減速過程中。電動馬達的瞬時扭力特性允許極快的加速,這導致輪胎噪音在短時間內快速增長,創造出與傳統車輛不同的動態聲學體驗。在再生煞車過程中,馬達轉為發電機模式,其噪音特徵也隨之改變,同時輪胎噪音由於車速降低而減少,但煞車系統的噪音可能增加。這種複雜的時變特性要求採用時頻分析方法來完整描述電動車的噪音特徵,傳統的穩態測量方法已不足以捕捉其動態行為[38]。短時傅立葉變換(Short-Time

Fourier Transform, STFT)與小波變換(Wavelet Transform)等先進訊號處理技術被廣泛應用於電動車噪音分析,以揭示其時變頻譜結構與瞬態事件[39]。

電動車外部噪音的空間分布模式與傳統車輛也有所不同,這對行人的聲學感知與安全有重要影響。傳統車輛的引擎通常位於前部,因此前向輻射的噪音較強,形成明顯的指向性模式。電動車的馬達位置更為多樣,可能是前置、後置或四輪獨立驅動,這導致噪音的空間分布更為均勻或呈現不同的指向性[40]。輪胎噪音本身具有全向性的輻射特性,但路面的聲學反射會修改實際的空間分布,特別是在城市峽谷環境中,建築物的多重反射會創造複雜的聲場[41]。Bianco 等人使用麥克風陣列技術研究電動車透過時的聲源定位,發現在 20 公里/小時時,輪胎位置是最主要的等效聲源,而在 60 公里/小時時,輪胎與車身下方的聲源貢獻大致相當[42]。這種空間特性對於城市噪音地圖的建立與噪音控制策略的制定具有實用價值。

主觀音質評估在電動車噪音研究中扮演日益重要的角色,因為客觀的噪音值測量往往無法完全預測主觀的煩擾感或舒適度。心理聲學參數如響度(Loudness)、尖銳度(Sharpness)、粗糙度(Roughness)與波動強度(Fluctuation Strength)被用來量化聲音的主觀屬性[43]。研究顯示,電動車噪音通常具有較高的尖銳度,因為其能量集中在中高頻



段,這可能導致較高的主觀煩擾感,即使整體響度較低[44]。粗糙度與波動強度與聲音的調變特性相關,電動馬達在某些操作條件下產生的調變噪音可能具有較高的粗糙度,增加不適感。品牌塑造的角度來看,一些電動車製造商開始將安靜視為豪華的標誌,並在此基礎上進行差異化,而另一些則認為完全的安靜可能令人不安,因此刻意設計某種「電動車聲音特徵」來創造品牌識別[45]。這種聲音設計(Sound Design)的趨勢反映了噪音控制從純粹的降噪轉向音質塑造的範式轉變。

電動車噪音特徵的車型差異也值得注意,不同類別與價位的電動車在噪音表現上可能有顯著差異。豪華電動車通常採用更全面的 NVH 控制措施,包括高級的隔音材料、主動降噪系統、以及精心調校的懸吊系統,其車室內噪音可以低至 40 分貝以下(在 50 公里/小時勻速行駛時)[46]。經濟型電動車則可能在 NVH 控制上投入較少,導致較高的噪音水平與較差的音質。電動商用車如巴士與卡車面臨更大的挑戰,因為其重量更大、輪胎更粗糙,且通常運行在更繁忙的路線上,Doran 等人對紐西蘭電動巴士的研究顯示,即使在低速下,巴士的輪胎噪音也可能超過 AVAS 的

警示音,使得警示效果受到質疑[47]。這些車型差異反映了成本、性能與法規遵循之間的權衡,也為輪胎製造商創造了不同的市場區隔與產品定位機會。

電動車噪音特徵的季節性與環境依賴性也是實務中的重要考量。輪胎噪音高度依賴路面溫度、濕度與路面狀態,冬季與夏季、乾燥與潮濕條件下的噪音可能相差 5 至 10 分貝[48]。電動車由於缺乏引擎廢熱,其暖車時間較長,在低溫環境下電池加熱系統的噪音可能成為額外的聲源。此外,電動車的空調系統由於不能依賴引擎餘熱,必須使用熱泵或電加熱器,這些系統在運轉時會產生噪音,在車室內可能成為顯著的背景噪音源[49]。這些環境因素要求在輪胎設計與車輛標定時考慮多種操作場景,確保在各種條件下都能維持可接受的聲學舒適性。充電過程中的噪音也是電動車特有的議題,快速充電時電池冷卻系統的風扇噪音可能影響充電站周圍的聲學環境,這在住宅區充電時尤其重要[50]。

11.2 電動車輪胎噪音的重要性 (Importance of EV Tire Noise)

電動車輪胎噪音的重要性從技術、法規、市場與社會等多個維度表現出來,形成了一個複雜的多層次議題網絡。從根本上說,輪胎噪音在電動車中的重要性提升是動力系統革命的直接後果,但其影響遠超出單純的噪音水平變化,涉及到行人安全、環境品質、產品競爭力、法規遵循成本,以及永續發展目標的實現等廣泛領域。



理解這種重要性的多面向本質對於制定有效的輪胎設計策略、政策框架與商業決策至關重要,因為它揭示了看似純技術的噪音問題實際上牽涉到社會技術系統的深層次轉型[1][51]。

從行人安全的角度來看,電動車輪胎噪音的重要性首先表現在過度安靜可能造成的危險上。傳統車輛的引擎噪音在低速時提供了重要的聽覺線索,幫助行人特別是視覺障礙者、兒童與老年人察覺接近的車輛並採取適當的回避行動。美國國家公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)的研究發現,在低速行駛時,混合動力車與電動車的行人碰撞事故率比傳統車輛高出約 37%,在停車場等低速環境中這個數字甚至更高[52]。視覺障礙者的碰撞風險增加尤為顯著,一項針對視障人士的調查顯示,超過 80%的受訪者表示對安靜的電動車感到擔憂,認為難以及時察覺其接近[53]。這些安全數據直接導致了 AVAS 系

統的法規強制要求,歐盟(UN Regulation No. 138)、美國(FMVSS 141)與日本都已經實施相關法規,要求電動車在低速行駛與倒車時必須發出人工聲響[54][55]。

然而 AVAS 系統的引入創造了一個新的聲學設計挑戰,即如何在保證行人安全的警示功能與避免增加環境噪音污染之間取得平衡。UNECE R138 規定 AVAS 必須在車速 0 至 20 公里/小時範圍內發出連續聲音,最低噪音值為 56 分貝(在車輛前方與側方 2 米處測量),最高不超過 75 分貝,同時倒車時也必須啟動[18]。這個要求創造了一個窄窗的設計空間,輪胎噪音在其中扮演重要角色。Laib 與 Schmidt 的研究指出,如果輪胎噪音本身已經達到 55 至 60 分貝,AVAS 的警示效果可能被減弱,因為其聲音會與輪胎噪音混合而難以區分[56]。相反地,如果輪胎噪音過低,AVAS 聲音會顯得突兀且可能造成噪音污染。



Fiebig 在 *Acoustics Today* 的評論文章中討論了 AVAS 系統的利弊權衡,指出理想的解決方案應該是設計出「自然」的輪胎噪音特徵,使其在低速時能夠提供足夠的可聽見性,而不需要過度依賴人工聲響[57]。這種觀點推動了所謂「聲學最佳化輪胎」(Acoustically Optimized Tire)的概念,即輪胎設計應該主動考慮其在行人警示中的作用,而不僅僅追求最低噪音。

從環境噪音控制的角度來看,電動車輪胎噪音的重要性表現在其對城市聲景的潛在影響上。交通噪音是都市環境噪音的主要來源,影響數億人的生活品質與健康。世界衛生組織(World Health Organization, WHO)的報告指出,長期暴露於超過 55 分貝的交通噪音會增加心血管疾病、睡眠障礙與認知損傷的風險[58]。電動車的普及被視為降低城市交通噪音的重要機會,歐盟的研究預測,到 2040 年如果電動車市場占有率達到 50%,城市交通噪音的平均等效噪音值可能降低 2 至 3 分貝,這在人群暴露水平上代表著顯著的健康效益[59]。然而這種降噪效益的實現高度依賴於輪胎噪音的控制,因為在電動車主導的未來交通情境中,輪胎噪音將成為交通噪音的主要成分。如果輪胎噪音沒有相應地降低,電動車化帶來的整體噪音減少可能遠低於預期[60]。

輪胎噪音對於電動車市場競爭力的影響也不容忽視,因為靜音性已經成為電動車的關鍵賣點與差異化因素之一。消費者調查顯示,安靜的車室環境是選擇電動車的重要動機之一,僅次於環保考量與使用成本,排在性能與充電便利性之前[61]。豪華電動車品牌如特斯拉(Tesla)、奧迪 e-tron(Audi e-tron)與賓士 EQ 系列都在行

銷中強調其靜音性,將其定位為高級舒適性的象徵。然而實際的車主體驗顯示,輪胎噪音經常是電動車車主抱怨的主要 NVH 問題,在車主論壇與滿意度調查中頻繁被提及[62]。這種期望與現實之間的落差可能影響品牌聲譽與客戶滿意度,特別是當消費者發現他們期待的「安靜電動車」實際上在高速公路上與傳統車輛一樣吵時。輪胎選擇與規格對這種主觀體驗有顯著影響,原廠配備的輪胎通常針對 NVH 性能進行最佳化,但更換輪胎時如果選擇不當,可能導致噪音水平顯著增加[63]。

從成本效益的角度來看,輪胎噪音控制代表著相對低成本的噪音減少途徑,相較於車身隔音或主動降噪系統。車身隔音材料如阻尼層、隔音棉與密封條可以有效降低車室內噪音,但會顯著增加車重與成本,每公斤隔音材料的成本可能在 5 至 20 美元之間,而一輛車可能需要 20 至 50 公斤的隔音材料[64]。主動降噪(Active Noise Cancellation, ANC)系統使用揚聲器產生反相聲波來抵消噪音,技術上可以達到 10 至 15 分貝的降噪效果,但系統成本高達數百美元,且主要對低頻噪音有效[65]。相比之下,選擇低噪音輪胎的額外成本相對較小,每條輪胎可能僅增加 10 至 30 美元,但可以帶來 3 至 5 分貝的噪音降低,這在成本效益上是相當有吸引力的[66]。然而低噪音輪胎往往在滾動阻力、耐磨性或濕地性能上有所妥協,這種多維度的性能權衡使得輪胎選擇成為複雜的最佳化問題,需要根據車輛定位與目標市場來決定優先順序。

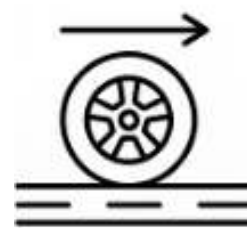


輪胎噪音對電動車能量效率與續航里程的間接影響也構成其重要性的一個維度。雖然噪音本身不直接消耗能量,但降低噪音的輪胎設計措施可能影響滾動阻力,而滾動阻力是電動車能耗的主要成分之一。在城市行駛條件下,輪胎滾動阻力約占總能耗的 20%至 30%,在高速公路行駛時這個比例可能降至 10%至 15%(因為空氣阻力變得更重要)[67]。降低滾動阻力係數從 0.010 降至 0.008(即 20%的降低)可以使電動車續航里程增加約 4%至 6%,這對於緩解續航焦慮具有實際意義[68]。然而許多降噪設計如增加胎面厚度、使用較軟的膠料或在輪胎內填充泡棉,都可能增加滾動阻力與重量,導致能耗上升。Ejsmont 等人對電動車專用輪胎的研究發現,某些號稱的「電動車輪胎」雖然噪音較低,但其滾動阻力反而高於傳統輪胎,導致整體能效下降[69]。這種潛在的負面權衡要求

輪胎設計師採用更精細的最佳化方法,在噪音、滾動阻力、抓地力與耐久性之間找到最佳平衡點。

法規遵循成本與認證複雜性是輪胎噪音重要性的另一個實務面向。輪胎必須符合多個法規的噪音限值要求才能在市場上銷售,包括 UNECE R117(輪胎滾動噪音)、歐盟輪胎標籤法規(EU 2020/740)以及各國的型式認證要求[10][16]。這些法規的限值逐年收緊,例如歐盟計劃在 2024 年後進一步降低輪胎噪音限值 2 至 3 分貝,這對輪胎製造商構成持續的技術挑戰[70]。不符合噪音限值的輪胎無法獲得型式認證,也無法在歐盟市場銷售,這意味著輪胎設計必須從一開始就將噪音控制納入關鍵性能指標。認證測試的成本也不容忽視,每個輪胎型號需要在符合 ISO 10844 標準的測試跑道上進行多次測試,包括不同尺寸、速度與負載條件,單一型號的完整認證成本可能達到數萬美元[71]。對於小型輪胎製造商,這種法規遵循成本可能構成市場進入障礙,有利於大型跨國輪胎公司。

輪胎噪音在車輛整體 NVH 性能中的系統性角色也凸顯其重要性。NVH 是一個高度耦合的系統,輪胎、懸吊、車身結構、座椅與內裝材料共同決定了乘員感受到的振動與噪音。輪胎不僅是噪音源,也是從路面傳遞至車身的振動的主要路徑,其剛性、阻尼與模態特性影響整個車輛的振動行為[72]。Daniel



的研究顯示,透過在輪圈內整合被動共振器可以抑制輪胎空腔共振,同時也會改變輪圈的模態特性,從而影響結構傳遞的振動[73]。這種系統性的交互作用意味著輪胎選擇不能孤立地進行,必須在車輛層次進行整合最佳化。先進的電動車開發流程採用虛擬原型與數位孿生技術,在設計階段就模擬不同輪胎規格對整車 NVH 的影響,從而在實體原型製作前就完成大部分的最佳化工作[74]。這種方法論的轉變要求輪胎製造商提供詳細的輪胎模型參數,包括動態剛性、阻尼特性、模態頻率與噪音輻射函數,這些參數在過去通常被視為專有信息而不對外公開,現在越來越成為供應鏈合作的必要條件[75]。

社會公平與環境正義的視角為輪胎噪音的重要性增添了倫理維度。交通噪音的暴露在社會群體中分布不均,低收入社區與少數族裔社區往往靠近高交通流量的道路,承受更高的噪音暴露[76]。電動車普及帶來的噪音減少可能主要惠及能負擔電動車的較富裕群體居住的地區,而低收入社區可能繼續依賴傳統車輛,導致噪音暴露差距擴大。此外,如果低噪音輪胎因為較高的成本而主要應用於高端車型,噪音減少的社會分配可能進一步不公平[77]。政策制定者需要考慮這些公平性議題,例

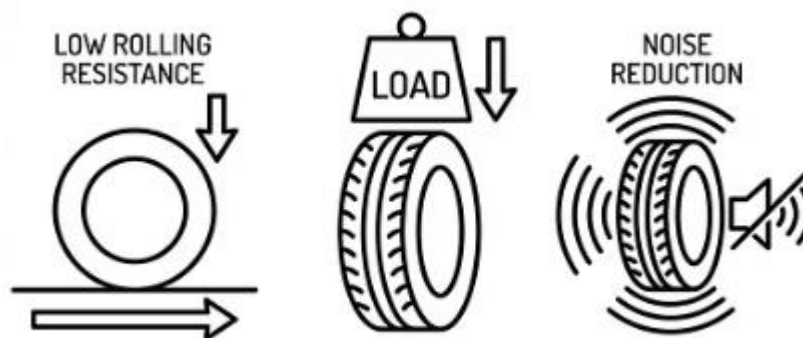
如透過法規要求所有新售車輛(不僅是豪華車)都必須配備符合嚴格噪音標準的輪胎,或提供補貼鼓勵在公共交通與共享車輛中採用低噪音技術。從全球永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)的框架來看,降低交通噪音與 SDG 3(良好健康與福祉)、SDG 11(永續城市與社區)以及 SDG 13(氣候行動)都有關聯,因為它同時解決了公共健康、城市宜居性與交通電動化的多重目標[78]。

最後,輪胎噪音在電動車中的重要性也反映在其作為產品差異化與品牌定位工具的潛力上。隨著電動車技術的成熟與商品化,不同品牌在基本性能(續航、加速、充電速度)上的差距逐漸縮小,NVH 品質成為重要的差異化因素[79]。一些品牌選擇在輪胎噪音控制上投入大量資源,作為其「豪華」或「高科技」定位的具體表現。例如,某些車型標配米其林 Pilot Sport EV 或倍耐力 P Zero Elect 等專為電動車設計的高性能低噪音輪胎,作為產品亮點進行宣傳[80]。輪胎製造商也看到了這個市場機會,紛紛開發「電動車認證」(EV-certified)輪胎產品線,透過與汽車製造商的聯合開發與原廠配備來建立品牌關聯[81]。這種商業策略的成功取決於消費者對輪胎噪音差異的實際感知能力,以及他們願意為更安靜的輪胎支付的價格溢價,市場研究顯示這個溢價窗口約在 15%至 25%之間,超過這個範圍消費者可能轉向更便宜的替代品[82]。

11.3 電動車輪胎設計考量 (EV Tire Design Considerations)

電動車輪胎設計

代表著輪胎工程學的前沿挑戰,需要在多個往往相互衝突的性能維度上達成微妙的平衡。與傳統內燃機車輪胎相

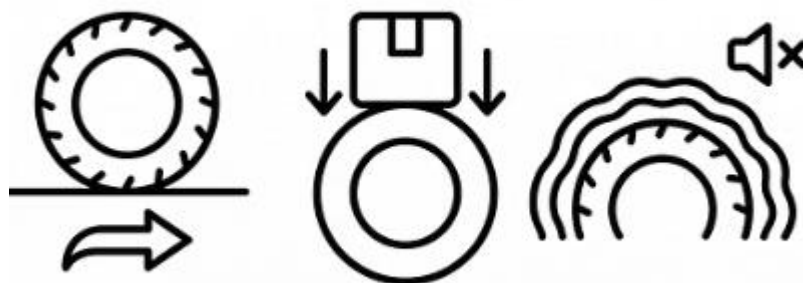


比,電動車輪胎必須同時滿足更嚴格的噪音要求、更低的滾動阻力、更高的承載能力、以及應對瞬時高扭力的耐久性,這些需求來自於電動車的獨特特徵包括較重的車身重量(由於電池組)、瞬間爆發的扭力輸出、對續航里程的敏感性、以及缺乏引擎噪音遮蔽的安靜動力系統[1][83]。這種多維度的約束條件使得電動車輪胎設計成為一個複雜的多目標最佳化問題,需要整合材料科學、結構力學、聲學、摩擦學與空氣動力學等多個學科的知識與工具[84]。輪胎設計師必須深入理解不同

設計參數之間的交互效應,因為單一參數的改變往往會在多個性能維度上產生連鎖反應,例如增加胎面厚度可能降低噪音但增加滾動阻力,使用較軟的膠料可能改善舒適性但降低耐磨性,這些權衡關係定義了設計空間的邊界與可行解的範圍[85]。

電動車輪胎設計的系統性方法始於對使用情境與性能優先順序的深入理解。不同類型的電動車對輪胎性能的要求差異顯著,城市通勤型電動車優先考慮低滾動阻力與靜音性以最大化續航里程與乘坐舒適性,高性能電動跑車則強調抓地力與操控回應性即使犧牲部分續航里程,豪華電動轎車追求全方位的平衡與精緻的 NVH 表現,而電動商用車需要高耐久性與承載能力[86]。這種市場區隔要求輪胎製造商開發多樣化的產品系列,每個系列針對特定的使用場景進行最佳化。輪胎尺寸的選擇是設計流程的起點,電動車由於電池組布置的空間需求,往往採用較大直徑的輪圈(18 至 21 英寸甚至更大),這提供了更大的設計自由度但也帶來挑戰,因為大輪圈通常搭配較薄的胎壁,這可能增加結構傳遞的振動與降低乘坐舒適性[87]。輪胎結構設計是噪音控制的基礎,包括胎體簾布層的材料與角度、帶束層的配置、胎側的厚度與剛性、以及胎圈的設計等多個要素。子午線輪胎(Radial Tire)由於其徑向排列的胎體簾線與環向的帶束層,相較於斜交輪胎具有更低的滾動阻力與更好的操控性,因此是現代乘用車輪胎的標準結構[88]。然而子午線輪胎的噪音特性更為複雜,因為其較柔軟的胎側允許更大的變形,可能在某些模態頻率上產生共振。帶束層的材料選擇對輪胎的動態行為有顯著影響,鋼絲帶束層提供高剛性與尺寸穩定性,但重量較大且可能增加滾動噪音,聚酯或芳綸(Aramid)等有機纖維帶束層重量較輕且阻尼較高,有利於降低噪音與滾動阻力,但成本較高且高速性能可能受限[89]。最新的研究探索混合帶束層結構,結合不同材料的優點以達到最佳的多目標性能[90]。

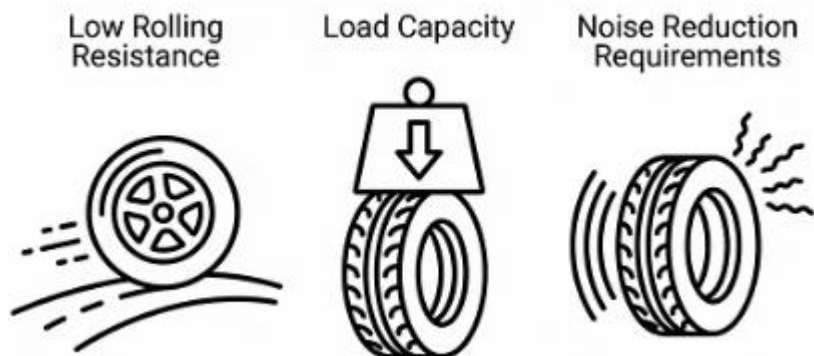
胎面花紋設計是輪胎噪音產生的關鍵因素,涉及花紋幾何形狀、深度、節距序列與溝槽配置的複雜交互作用。胎面花紋的主要功能是



提供濕地排水通道與在多種路面條件下的抓地力,但同時也是主要的噪音產生機

制[91]。花紋噪音的物理機制包括多個貢獻者:空氣泵浦噪音(Air-Pumping Noise)由於花紋溝槽在接觸地面時空氣被壓縮隨後快速釋放而產生,主要頻率在 800 至 1600 赫茲範圍;花紋塊撞擊噪音(Pattern Impact Noise)來自胎面塊撞擊路面的瞬態衝擊,產生寬頻噪音與低頻振動;管道共振噪音(Pipe Resonance)由於縱向溝槽如同開口管產生共振,頻率取決於溝槽的長度與截面;以及黏滑振動(Stick-Slip Vibration)在胎面與路面之間的摩擦界面產生高頻噪音[92][93]。這些機制的相對重要性隨車速、路面紋理與輪胎狀態而變化,需要透過綜合的設計方法來控制。節距變化(Pitch Variation)是控制花紋噪音的核心技術,透過使用不同長度的胎面節距(即沿圓周方向重複單元的尺寸)來打散離散頻率的噪音峰值,將其轉化為更寬頻的噪音分布,從而降低主觀煩擾感[94]。理想的節距序列設計是一個組合最佳化問題,目標是使節距透過頻率的功率譜盡可能平坦,避免出現突出的純音成分。Becker 使用遺傳演算法(Genetic Algorithm)來搜索最佳節距序列,相較於傳統的試誤法,這種方法可以更有效地探索龐大的設計空間並找到接近全域最優的解[95]。最新的研究進一步考慮多重花紋元素的同步最佳化,不僅優化主節距序列,還同時優化橫向溝槽、細溝

槽(Sipe)與肩部花紋的配置,以達到更廣頻段的噪音降低[96]。Mohammadi 與 Ohadi 提出的多目標最佳化框架同時考慮噪音、滾動阻力與



濕地性能,使用 Pareto 前沿分析來識別非支配解集,為設計師提供不同權衡方案的選擇[22]。這種方法論的進步使得設計週期大幅縮短,並能達到傳統方法難以企及的性能水平。

花紋深度與溝槽寬度的選擇涉及安全性能與噪音之間的權衡。較深的花紋提供更好的濕地排水能力與更長的使用壽命,但會增加空氣泵浦噪音與滾動阻力[97]。歐盟法規要求轎車輪胎的法定最小胎面深度為 1.6 毫米,但新胎的典型深度在 7 至 9 毫米之間[98]。隨著輪胎磨損,花紋深度減少,噪音通常會降低 2 至 3 分貝,但同時濕地性能顯著劣化,因此存在一個最佳的花紋深度範圍需要在設計時考慮整個使用壽命內的性能演變[99]。一些創新設計探索變深度花紋,中央區域採用較淺的花

紋以降低噪音與滾動阻力,肩部區域採用較深的花紋以保證轉彎時的抓地力[100]。三維花紋幾何如波浪形溝槽壁與階梯式花紋塊也被用來破壞共振條件並改善排水效率,但其製造複雜度與成本較高[101]。

胎面膠料配方是決定輪胎噪音、滾動阻力與抓地力三角關係的關鍵因素。輪胎膠料是一個複雜的多成分系統,包括彈性體基質(通常是天然橡膠與合成橡膠的混合)、補強填料(炭黑與/或二氧化矽)、軟化劑(油類與樹脂)、硫化劑與促進劑、以及多種功能性添加劑[102]。膠料的黏彈性特性直接影響輪胎的動態性能,其頻率與溫度依賴性由 Williams-Landel-Ferry 方程或 Prony 級數模型描述[103]。在低頻變形(對應滾動阻力)下,需要低的損耗因子以減少能量耗散;在高頻振動(對應噪音激發)下,需要高的阻尼以吸收振動能量;而在中間頻率(對應路面摩擦)下,需要適度的損耗因子以保證抓地力[104]。這種頻率依賴性的多重需求使得單一膠料配方難以同時最佳化所有性能,因此先進的輪胎設計採用多層膠料結構,胎冠層針對抗磨耗與抓地力最佳化,內襯層針對氣密性與低損耗最佳化,胎側層針對撓曲阻尼與抗老化最佳化[105]。

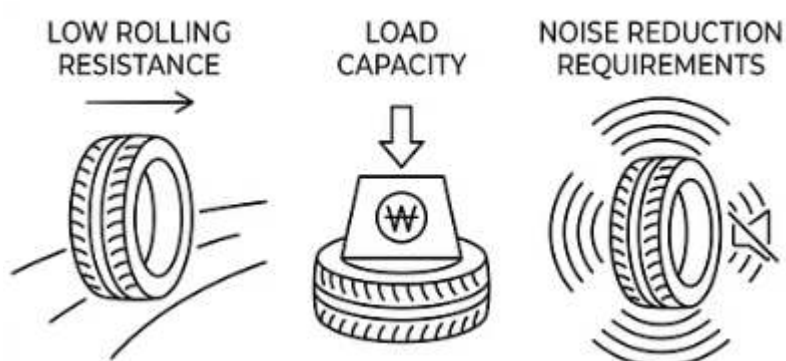
二氧化矽填料技術自 1990 年代初由米其林首次大規模商業化以來,已經成為低滾動阻力輪胎的標準技術。矽膠相較於傳統炭黑填料的優勢在於其較低的填料網絡剛性與較弱的 Payne 效應(應變依賴的模量降低),這導致在滾動變形的低應變條件下具有較低的滯後損失[106]。然而未經處理的二氧化矽與橡膠基質的親和性差,必須使用矽烷偶聯劑(如雙-(三乙氧基矽丙基)-四硫化物, TESPT)來實現化學鍵結,這個過程對混煉工藝的溫度與時間控制要求極高[107]。Neethirajan 等人的綜述詳細討論了矽膠補強橡膠的微觀機制,包括填料-填料網絡、填料-聚合物界面與聚合物鏈段的流動性,這些因素共同決定了宏觀的力學與聲學性能[108]。最新的發展包括高度分散的沉澱二氧化矽、表面預處理的矽膠、以及矽膠與炭黑的雙填料系統,目標是進一步降低滾動阻力並改善加工性能[109]。

從聲學角度來看,膠料的損耗因子 $\tan(\delta)$ 在不同頻段的值對噪音產生有直接影響。在振動激發的頻率範圍(100 至 1000 赫茲),較高的 $\tan(\delta)$ 意味著更多的振動能量被轉化為熱能而非輻射為聲音,因此有利於降噪[110]。然而在滾動阻力相關的低頻範圍(1 至 10 赫茲),較高的 $\tan(\delta)$ 意味著更多的能量損耗,不利於能效。這種頻率依賴性的需求透過調整聚合物的玻璃轉移溫度(T_g)、交聯密度與填料分散狀態來實現[111]。聚合物共混技術允許結合不同 T_g 的橡膠(如天然橡膠 T_g 約-70°C、丁苯橡膠 SBR 約-50°C、丁二烯橡膠 BR 約-100°C)來調控損耗譜的形狀,官能化的

聚合物如末端改性 SBR 或星形聚合物可以提供額外的控制維度[112]。這種材料設計的精密度反映了輪胎化學工程的成熟程度,也是大型輪胎公司的核心競爭力所在。

輪胎內部的降噪技術代表了結構聲學控制的應用。輪胎空腔共振是車室內噪音的重要成分,其抑制方法包括被動吸音材料、被動共振器與主動控制等途徑。聚氨酯泡棉襯裡(如 Continental 的 ContiSilent 技術、Pirelli 的 PNCS 技術)是目前最常用的被動控制方法,將約 5 至 10 毫米厚的開孔泡棉黏貼在輪胎內表面,利用其多孔結構的聲阻抗來吸收聲能[1][113]。研究顯示這種方法可以在空腔共振頻率處(200 至 250 赫茲)降低噪音值 6 至 9 分貝,但在更高頻段的效果有限[114]。泡棉的聲學性能取決於其孔隙率、流阻與厚度,存在一個最佳化的設計窗口,過薄的泡棉效果不佳,過厚的泡棉增加重量與滾動阻力且可能影響輪胎的熱管理[115]。Shi 等人的 2025 年模擬研究探

討了非均勻泡棉分布的效果,發現將吸音材料集中在胎肩區域可以在減少總質量的同時維持相當的降噪效果[15]。



Helmholtz 共振器

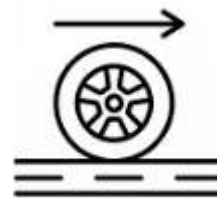
是另一種被動控制空腔共振的方法,透過在輪圈上安裝調諧的共振腔來吸收特定頻率的聲能。Daniel 的研究開發了整合在輪圈內的共振器設計,透過優化共振器的體積、頸部尺寸與數量來匹配輪胎空腔共振頻率[73]。這種方法的優點是不增加輪胎重量且不影響熱平衡,但需要專門設計的輪圈且成本較高。多個共振器的組合可以針對不同輪胎尺寸的共振頻率進行調諧,提供更寬頻的控制能力[116]。動態吸振器(Dynamic Vibration Absorber, DVA)的原理也被探索用於抑制輪胎的結構振動模態,透過在胎側或胎圈附加質量-彈簧系統來吸收特定頻率的振動能量[117]。這些先進的減振技術雖然在實驗室中顯示出前景,但在耐久性、成本與製造可行性上仍面臨挑戰,目前主要應用於高端車型。

11.3.1 低滾動阻力 (Low Rolling Resistance)

低滾動阻力是電動車輪胎設計的首要性能指標之一,因為它直接影響車輛的能量效率與續航里程,而續航里程是電動車市場接受度的關鍵限制因素。輪胎滾動阻

力的物理本質是輪胎在滾動過程中由於材料的黏彈性與結構變形而產生的能量耗散,這些能量最終以熱的形式散失,無法回收利用[118]。滾動阻力的尺寸通常用滾動阻力係數(Rolling Resistance Coefficient, RRC)來表征,定義為滾動阻力力矩除以輪胎負載與有效半徑的乘積,無量綱數值通常在 0.005 至 0.015 之間,數值越低代表能效越高[119]。對於電動車,滾動阻力對能耗的貢獻比傳統車輛更為顯著,因為電動車較重的車身重量增加了總滾動阻力,同時電動傳動系統的高效率(通常超過 90%)意味著輪胎損失占總能耗的比例更高[120]。研究估計,將滾動阻力係數從 0.010 降低至 0.008(即 20%的相對降低)可以使電動車在城市行駛循環中的續航里程增加 4%至 6%,這對於一輛續航 400 公里的車輛相當於額外的 16 至 24 公里,對於緩解里程焦慮具有實際意義[67][68]。

滾動阻力的物理機制可以分解為多個貢獻成分,理解這些成分是設計低滾動阻力輪胎的基礎。主要的能量耗散機制包括胎面與路面接觸區的遲滯變形、胎側的週期性彎曲、帶束層的剪切變形、胎圈區域的應力集中、以及輪胎與空氣的摩擦損失[121]。胎面變形貢獻約 50%至 60%的總滾動阻力,這是因為胎面在接觸地面時被壓縮,離開地面時回彈,但由於橡膠的黏彈性,加載與卸載路徑不重合形成遲滯環,這個遲滯環的面積代表每個滾動週期損失的能量[122]。胎側彎曲變形貢獻約 20%至 30%,特別是在側壁較厚的輪胎中更為顯著,因為每次輪胎轉動胎側都經歷壓縮與拉伸循環,材料的損耗因子決定了這個過程的能量損失[123]。帶束層的剪切變形貢獻約 10%至 20%,這是因為帶束層在接地區域被壓平,在非接地區域恢復弧形,這種形狀變化伴隨著帶束層與胎體之間的相對滑移,產生剪切損耗[124]。其餘的損失包括胎圈的滾動變形、輪胎與輪圈之間的摩擦、以及輪胎表面與空氣的摩擦等較小的貢獻者[125]。



降低滾動阻力的材料策略核心是開發低損耗的胎面膠料,這要求在低頻(對應滾動變形,約 1 至 10 赫茲,23°C 條件下)具有低的 $\tan(\delta)$,同時在中高頻(對應路面摩擦激發,約 10^3 至 10^5 赫茲)保持足夠的 $\tan(\delta)$ 以保證抓地力[126]。這種頻率選擇性的損耗特性可以透過調控聚合物的分子結構來實現。功能化的丁苯



橡膠(Solution SBR, S-SBR)透過在聚合物鏈端引入官能團(如羥基、氨基、環氧基)來增強與矽膠填料的相互作用,減少填料聚集與降低 Payne 效應,從而降低滾動阻力[127]。星形聚合物具有更低的流變黏度與更均勻的應力分布,也有助於降低滾

動損耗[128]。聚合物的玻璃轉移溫度(Tg)是關鍵參數,較低的 Tg 使得在室溫附近的低頻損耗降低,但可能影響高溫性能,因此需要在 Tg 約-50 至-20°C 之間進行優化[129]。聚合物共混可以調控 Tg 的寬度與形狀,理想的損耗譜應該在低頻有尖銳的最小值,在中高頻有寬廣的平台,這種形狀可以透過天然橡膠/S-SBR/BR 的三元共混體系來接近[130]。

二氧化矽填料技術是低滾動阻力輪胎的核心使能技術,其優勢來自於矽膠網絡的獨特流變學特性。炭黑填料形成強的填料-填料網絡結構,這種網絡在小應變下非常剛性(高模量),但在中等應變下迅速崩解(Payne 效應),導致在滾動變形的應變範圍內產生顯著的遲滯損失[131]。矽膠由於表面的矽烷醇基團,其填料-填料相互作用較弱,Payne 效應較小,因此在滾動應變下的損耗較低[132]。然而矽膠的表面能與橡膠不匹配,必須使用矽烷偶聯劑來建立化學橋接,常用的 TESPT 或雙-(三乙氧基矽丙基)-二硫化物(TESPD)在混煉過程中與矽膠表面的矽烷醇反應,另一端與橡膠在硫化時透過硫橋鍵結[133]。這個矽烷化反應的效率對最終性能至關重要,需要在 140 至 160°C 的溫度下進行足夠時間以完成水解與縮合反應,但過高的溫度可能導致聚合物降解[134]。矽膠的粒徑、比表面積與結構度也影響其補強效果與加工性能,通常使用比表面積 160 至 200 m²/g 的高分散矽膠以在補強性與分散性之間取得平衡[135]。

輪胎結構的優化是降低滾動阻力的另一個重要途徑,涉及帶束層的剛性、胎側的厚度與形狀、胎圈的設計等要素。較硬的帶束層減少了接地時的變形程度,從而降低遲滯損失,但過高的帶束剛性可能增加結構傳遞的振動與劣化舒

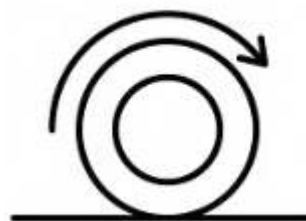


適性[136]。帶束層的材料與結構對滾動阻力有顯著影響,使用高模量低收縮的芳綸纖維或混合纖維帶束可以在維持必要剛性的同時降低重量與損耗[137]。胎側的厚度與形狀影響彎曲變形的應變分布與損耗,較薄的胎側減少材料體積因而降低總損耗,但可能犧牲側向支撐性與耐久性[138]。計算建模如有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)被廣泛用於優化這些結構參數,透過模擬不同設計的滾動變形與能量耗散來識別最優配置[139]。多目標優化算法如非支配排序遺傳算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)可以系統地探索設計空間並生成 Pareto 最優解集,展示滾動阻力與其他性能指標之間的權衡前沿[140]。

輪胎充氣壓力對滾動阻力有直接而顯著的影響,提高充氣壓力可以有效降低滾動阻力。物理機制是較高的壓力使輪胎更硬,減少接地變形的深度與面積,從而降低

變形能量損失[141]。研究顯示,將充氣壓力從 2.0 bar 提高到 2.5 bar(即 25%的增加)可以使滾動阻力係數降低約 10%至 15%[142]。因此電動車通常推薦較高的輪胎壓力,典型值在 2.5 至 3.0 bar 之間,高於傳統車輛的 2.0 至 2.5 bar[143]。然而過高的壓力會降低接地面積與影響抓地力,特別是在濕滑路面上,同時也會劣化乘坐舒適性因為輪胎的吸震能力降低[144]。輪胎壓力監測系統(Tire Pressure Monitoring System, TPMS)在電動車中變得更加重要,因為即使輕微的壓力不足(如 10%至 15%)也會顯著增加滾動阻力與能耗,研究顯示壓力不足 20%可能增加滾動阻力達 15%至 20%,對應續航里程損失約 3%至 4%[145][146]。主動壓力管理系統可以根據行駛條件自動調整輪胎壓力,在高速公路行駛時提高壓力以降低滾動阻力,在彎道或惡劣天氣時降低壓力以改善抓地力,這種技術在競賽車輛中已有應用,在乘用車市場的普及則有待成本與可靠性的改善[147]。

滾動阻力的測試方法與標準對於產品開發與法規遵循至關重要。ISO 28580 標準規定了使用滾筒設備測量轎車輪胎滾動阻力的方法,輪胎在規定的速度(80 km/h)、負載與溫度下在標準滾筒(直徑 1.7 至 2.0 米)上滾動,測量所需的驅動力矩即可計算滾動阻力係數[148]。UNECE R117 法規採用類似的測試方法,並規



定了不同輪胎類別的滾動阻力限值,這些限值在過去十年逐步收緊以推動技術進步[10]。歐盟輪胎標籤顯示輪胎的滾動阻力等級(從 A 到 E),A 級代表 $RRC \leq 6.5$ kg/t,E 級代表 $RRC > 12$ kg/t,消費者可以據此選擇更節能的輪胎[16]。然而實驗室測試的滾動阻力與實際道路使用的值可能有差異,因為道路測試涉及不同的路面紋理、溫度變化、車速波動與轉彎加速等因素[149]。實車能耗測試如滑行測試(Coast-Down Test)可以在真實條件下評估滾動阻力,但無法將輪胎貢獻與空氣阻力分離,需要結合風洞測試或計算模型來解耦這些效應[150]。

滾動阻力與噪音之間的權衡是電動車輪胎設計的核心挑戰之一。許多降低滾動阻力的措施如較硬的膠料、較薄的胎面、較高的充氣壓力都可能增加噪音,因為較硬的結構傳遞更多的振動能量到車身[151]。Ejsmont 等人對低滾動阻力輪胎的噪音測試發現,某些 RRC 低於 0.007 的輪胎其噪音水平反而比 RRC 約 0.009 的傳統輪胎高出 1 至 2 分貝[69]。這種負面權衡並非不可避免,透過精細的設計可以在一定程度上解耦滾動阻力與噪音。例如使用矽膠填料可以同時降低滾動阻力與改善濕地性能,而噪音水平可以透過花紋優化獨立控制[152]。多層胎面結構允許外層針

對噪音與抓地力優化,內層針對滾動阻力優化,雖然製造複雜度增加但可以達到更好的整體平衡[153]。Berge 等人對專為電動車設計的輪胎的研究顯示,最佳的電動車輪胎在滾動阻力、噪音與濕地性能之間找到了優於傳統輪胎的新平衡點,雖然沒有任何單一性能達到最優,但綜合性能最適合電動車的需求特徵[154]。

11.3.2 承載能力 (Load Capacity)

電動車輪胎必須具備比傳統車輛輪胎更高的承載能力,以應對電池組帶來的額外重量以及瞬時高扭力產生的增大負載。這種承載能力的提升要求不僅涉及輪胎的靜態載重能力,還包括動態負載下的結構完整性、熱管理能力、以及長期耐久性等多個維度[155]。電動車重量增加的主要來源是高容量鋰離子電池組,一個典型的長續航電動車電池組重量在 400 至 700 公斤之間,相當於四至五



位成年乘客的重量,使得電動車整備質量比同尺寸的內燃機車輛增加 10%至 30%[5][156]。例如,特斯拉 Model 3 長續航版重量約 1,847 公斤,而尺寸相近的 BMW 3 系列約 1,500 公斤,差異達 23%[157]。這種重量增加直接轉化為對輪胎的更高負載要求,輪胎的負載指數(Load Index)必須相應提升以確保安全裕度。負載指數是一個數字代碼(通常在 80 至 120 之間對於轎車輪胎),對應輪胎在規定充氣壓力下可以安全承載的最大重量,每增加 1 個指數值代表約 3%的載重能力提升 [158]。

輪胎的載重能力由其結構強度決定,包括胎體簾布層的強度與層數、帶束層的設計、胎圈鋼絲的配置、以及充氣壓力等因素[159]。胎體簾布是輪胎的骨架結構,通常由聚酯、尼龍或人造絲等高強度纖維製成,以徑向排列的方式從一側胎圈延伸到另一側,承擔輪胎內壓產生的張力[160]。增加胎體層數可以提高載重能力,但也會增加輪胎重量、滾動阻力與製造成本,因此需要權衡[161]。高強度纖維如芳綸或超高分子量聚乙烯(UHMWPE)可以在較少的層數下達到相同的強度,但材料成本顯著更高[162]。帶束層在徑向輪胎中主要承擔周向應力,限制輪胎在高速旋轉時的膨脹,其設計對高速載重性能至關重要[163]。鋼絲帶束層提供最高的剛性與尺寸穩定性,是高載重輪胎的標準配置,但重量與滾動噪音較大;有機纖維帶束層如芳綸提供更好的重量與舒適性,但強度與高溫性能可能受限[164]。

充氣壓力與載重能力有直接關係,較高的壓力允許輪胎承載更大的負載而不超過結構應力限制。輪胎製造商提供的載重-壓力表顯示了不同充氣壓力下的推薦最大負載,遵循這些規範對於安全至關重要[165]。電動車由於較重的車身,通常要求

較高的輪胎壓力,前述的 2.5 至 3.0 bar 壓力推薦不僅有利於降低滾動阻力,也是確保足夠載重能力的必要條件[143]。然而過高的壓力超過輪胎的額定值會導致結構過應力與增加爆胎風險,特別是在高溫或道路障礙物衝擊的情況下[166]。充氣壓力不足是更常見的問題,研究顯示約 25%的車輛長期在壓力不足的狀態下行駛,這不僅增加滾動阻力,更嚴重的是增加輪胎側壁的撓曲應變,導致過熱與結構疲勞,最終可能引發爆胎[167][168]。對於電動車,TPMS 的正確使用變得更加關鍵,駕駛者應該定期檢查並調整輪胎壓力以匹配車輛的實際負載狀況。

電動車的高扭力特性對輪胎的縱向負載能力提出額外要求。電動馬達可以在零轉速時提供全部扭力,使得電動車的 0 至 100 km/h 加速時間遠短於同級別的传统車輛,高性能電動車如 Tesla Model S Plaid 可以在不到 2 秒內完成這一加速[169]。這種劇烈加速在輪胎與路面接觸點產生極高的切向力,對胎面與帶束層的



剪切強度構成挑戰[170]。如果輪胎結構不足以承受這種負載,可能發生胎面塊撕裂、帶束層分離或胎面與胎體脫膠等失效模式[171]。輪胎製造商為高性能電動車開發專用輪胎時,會強化帶束邊緣的加強層、增加胎面與帶束層之間的黏合強度、以及優化花紋塊的幾何形狀以更均勻地分布剪切應力[172]。米其林為 Porsche Taycan 開發的 Pilot Sport 4S 輪胎就採用了特殊的 N0 規格,包括更強的內部結構與專門配方的胎面膠料以應對 Taycan 的高扭力輸出[173]。

熱管理是重載輪胎設計的另一個關鍵考量,因為較重的車輛與更高的扭力都會導致輪胎產生更多熱量。輪胎在滾動與加速煞車過程中,變形能量的一部分轉化為熱,這些熱量如果無法有效散逸,會導致輪胎溫度升高[174]。高溫對輪胎性能有多重負面影響:膠料的力學性能劣化,模量降低而損耗因子增加,導致更多的能量損失形成惡性循環;高溫加速膠料的氧化老化與疲勞裂紋擴展,縮短使用壽命;極端情況下,過熱可能導致胎體分離或爆胎等災難性失效[175]。輪胎的熱源主要在胎面(與路面的摩擦與遲滯損失)與胎側(週期性彎曲變形),而散熱主要透過輪胎外表面對空氣的對流與輻射,以及透過輪圈向車輪的傳導[176]。改善熱管理的設計策略包括使用低滯後的膠料以減少生熱、增加輪胎表面積以促進散熱、設計通風花紋或側壁開口以增強空氣流動、以及使用高熱導率的輪圈材料以加快傳導散熱[177]。

輪胎的耐久性測試對於驗證其在電動車高負載條件下的長期性能至關重要。法規測試如 UNECE R30(轎車輪胎)與 UNECE R54(商用車輪胎)規定了輪胎必須透過

的一系列強度與耐久性測試,包括高速耐久測試、負載能力測試與破壞測試[178][179]。高速耐久測試要求輪胎在高於額定速度的條件下連續運轉一定時間而不發生失效,負載能力測試逐步增加負載直到達到額定值的超載狀況,破壞測試則持續增加負載直到輪胎失效以驗證安全裕度[180]。對於電動車,額外的測試考慮可能包括高扭力下的加速耐久測試、長期高負載下的熱穩定性測試、以及再生煞車對輪胎磨損模式的影響評估[181]。實車耐久測試在各種道路條件下累積數萬公里的里程,記錄輪胎的磨損速率、性能退化與任何結構問題,這些數據用於驗證設計與改進產品[182]。加速壽命測試方法使用更嚴苛的條件(如更高的負載、溫度或速度)來縮短測試時間,但需要建立可靠的外推模型來預測實際使用壽命[183]。

負載分布的不均勻性是電動車輪胎面臨的另一個實務挑戰。電動車的電池組通常布置在車底部以降低重心,這有利於操控性但也導致前後軸負載分布可能與傳統車輛不同[184]。某些電動車如特斯拉 Model S 採用後輪驅動或全輪驅動配置,後軸負載顯著高於前軸,這要求後輪使用更高負載指數的輪胎或更



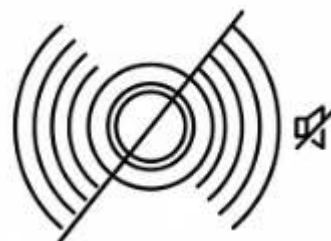
高的充氣壓力[185]。不均勻的負載分布會導致不同車軸的輪胎磨損速率不同,前輪與後輪可能需要在不同的里程數進行更換,增加維護複雜性[186]。輪胎輪換(Tire Rotation)策略可以幫助均衡磨損,但對於使用前後不同規格輪胎的車輛(如某些高性能電動車)則無法適用[187]。車輛動力學控制系統如電子穩定程序(Electronic Stability Program, ESP)與扭力矢量控制(Torque Vectoring)可以透過智能分配驅動力來優化輪胎負載分布,但這需要與輪胎性能特性的精確模型集成[188]。

材料科學的進步為提升輪胎承載能力提供了新的可能性。高性能纖維如碳纖維增強複合材料在航空航天與賽車領域已有應用,其極高的比強度(強度與重量之比)使得在相同重量下可以達到更高的承載能力,或在相同承載能力下顯著減輕重量[189]。然而碳纖維的成本極高且與橡膠的黏合性差,目前尚未在量產乘用車輪胎中廣泛應用[190]。芳綸纖維如 Kevlar 提供了更實際的平衡,其強度約為鋼絲的五倍(按單位重量計),已經在部分高性能輪胎的帶束層中使用[191]。納米材料如碳納米管或石墨烯被探索作為橡膠的補強填料,理論上可以在極低的添加量下顯著提升強度與模量,但分散技術與成本是商業化的主要障礙[192]。智能材料如形狀記憶聚合物或自修復橡膠也在研究中,前者可以在特定溫度下改變剛性以適應不同

的負載條件,後者可以在微裂紋產生時自動修復以延長壽命[193]。這些前沿材料技術雖然短期內難以大規模應用,但代表了輪胎技術發展的長期方向。

11.3.3 降噪需求 (Noise Reduction Requirements)

電動車輪胎的降噪需求源於電動動力系統缺乏傳統引擎噪音遮蔽的獨特聲學環境,以及日益嚴格的環境噪音法規與消費者對靜音性的高期待。降噪設計必須在多個頻段與噪音傳播路徑上同時進行,因為輪胎噪音是一個複雜的多機制現象,單一的降噪措



施往往只在特定頻率範圍內有效[194]。有效的降噪策略需要整合材料選擇、結構設計、花紋優化與主被動控制技術,形成多層次的防護體系[195]。從系統角度來看,輪胎降噪不僅涉及輪胎本身的聲學設計,還需要考慮輪胎與車輛其他子系統的聲學耦合,包括懸吊系統的隔振性能、車身結構的聲學透射損失、以及車室內的聲學處理[196]。這種系統性的方法論反映了現代車輛 NVH 工程的整合性本質,要求輪胎製造商、車輛製造商與材料供應商之間的緊密協作。

輪胎噪音的產生機制可以分為空氣傳播噪音(Airborne Noise)與結構傳播噪音(Structure-borne Noise)兩大類,降噪設計需要針對這兩種路徑分別施策[197]。空氣傳播噪音主要在 800 至 2000 赫茲頻段,透過空氣直接傳播至車室外部與透過開口(如門窗縫隙)進入車室內部,其主要機制包括空氣泵浦、花紋衝擊與黏滑振動[198]。結構傳播噪音主要在 200 至 800 赫茲頻段,由輪胎的振動透過懸吊系統傳遞至車身結構,再由車身面板輻射聲音進入車室,其主要機制包括輪胎模態共振、空腔共振與帶束層振動[199]。這兩種噪音的頻譜特徵有所重疊但也有差異,需要採用頻譜分析與傳遞路徑分析(Transfer Path Analysis, TPA)來識別主要貢獻者與設計降噪方案[200]。

花紋設計是控制空氣傳播噪音的最直接方法,前述的節距變化技術是基礎,但現代降噪花紋設計已經發展出更精細的策略。多節距變化(Multi-Pitch Variation)使用三至五種不同長度的節距,並優化其排列順序以最小化透過頻率譜的峰值,相較於單一節距可以降低噪音 3 至 5 分貝[201]。相位優化(Phase Optimization)不僅考慮節距長度,還考慮不同花紋元素(如橫向溝槽、細溝槽、肩部花紋)的相對位置,使得它們產生的噪音在某些頻率上相互抵消[202]。Li 的綜述總結了輪胎花紋設計的多種降噪策略,包括不對稱花紋設計(內外側花紋不同以打散共振頻率)、變深度溝槽(沿周向改變溝槽深度以破壞管道共振)、以及仿生花紋(模仿鯊魚皮或貓頭鷹羽

毛的微結構以降低湍流噪音)[203]。這些設計方法都需要透過試驗或數值模擬來驗證其降噪效果,因為花紋與噪音之間的關係是高度非線性的,直覺的設計改變可能產生意外的結果[204]。

溝槽幾何形狀的優化可以降低空氣泵浦噪音與管道共振噪音。空氣泵浦噪音的產生機理是花紋溝槽在進入接地區時空氣被壓縮,產生高壓脈衝,離開接地區時空氣快速膨脹,產生負壓脈衝,這些脈衝傳播形成聲波



[205]。降低空氣泵浦噪音的策略包括減小溝槽體積(使用較窄或較淺的溝槽)、提供空氣逃逸通道(如橫向連通槽或微細溝槽)、以及使用閉合式或半閉合式溝槽設計以限制空氣壓縮[206]。Wei 等人的數值模擬研究顯示,橫向溝槽的寬度與角度對空氣泵浦噪音有顯著影響,優化設計可以降低該機制的噪音貢獻達 3 至 4 分貝[207]。管道共振噪音來自於縱向溝槽如同開口或半開口的管道產生共振,其頻率由溝槽長度決定,典型值在 1000 至 1500 赫茲範圍[208]。抑制管道共振的方法包括使用變截面溝槽(沿長度方向改變寬度或深度以破壞共振條件)、在溝槽內設置障礙物或分隔器、以及使用螺旋狀或鋸齒狀溝槽壁面以增加聲學阻抗[209]。

胎面膠料的聲學性能優化涉及材料的阻尼特性與表面粗糙度。較高的材料阻尼(即較高的 $\tan(\delta)$ 在噪音相關頻率)可以吸收振動能量而非輻射為聲音,但如前所述這可能與低滾動阻力的需求衝突[210]。多層胎面設計允許外層使用較高阻尼的膠料以控制噪音,內層使用較低損耗的膠料以控制滾動阻力,這種結構雖然製造複雜但可以實現更好的性能組合[211]。胎面表面的微觀紋理也影響黏滑振動噪音,過度光滑的表面在某些條件下可能產生強烈的黏滑振動,而適度的粗糙度可以破壞這種振動模式[212]。然而表面紋理的控制 在實際製造中是困難的,因為輪胎脫模與冷卻過程會改變表面狀態,需要精密的模具設計與工藝控制[213]。仿生表面如鯊魚皮的肋條結構(Riblets)被探索用於降低空氣動力學噪音,但在輪胎胎面的應用仍處於研究階段[214]。

抑制結構傳播噪音需要降低輪胎結構的振動激發與提高振動傳遞路徑的衰減。輪胎的模態振動可以透過有限元模態分析來識別,典型的輪胎有多個振動模態,頻率從低於 100 赫茲的剛體模態到超過 500 赫茲的高階模態[215]。降低模態振動的策略包括增加結構阻尼、避開激發頻率與系統共振頻率的重合、以及使用動態吸振器來抑制特定模態[216]。帶束層的阻尼特性對結構噪音有重要影響,使用阻尼層(如橡膠基的黏彈性材料)夾在帶束層之間可以增加模態阻尼,但會增加重量與

成本[217]。胎側的剛性與阻尼影響振動從接地區向輪圈的傳遞,較軟的胎側提供更好的隔振,但可能影響操控性與載重能力,這又是一個需要權衡的設計參數[218]。

輪胎空腔共振是電動車結構噪音的最突出問題,前述的泡棉襯裡與 Helmholtz 共振器是主要的控制方法。泡棉襯裡的設計參數包括厚度(通常 5 至 10 毫米)、密度(約 20 至 40 kg/m³)、流阻(1000 至 5000 N·s/m⁴)與覆蓋面積



(通常覆蓋 80%至 100%的輪胎內表面)[219]。Shi 等人的模擬優化研究探索了非均勻泡棉分布的效果,發現將較厚的泡棉放置在胎肩區域(空腔共振模態的壓力最大區域)可以在使用較少總質量的情況下達到相當的降噪效果[15]。泡棉的耐久性也是實務考量,它必須能夠承受輪胎運轉時的離心力、溫度變化與臭氧暴露而不脫落或性能退化,這要求使用耐久的開孔聚氨酯或三聚氰胺泡棉與強力的黏合劑[220]。Helmholtz 共振器提供了不增加輪胎重量的替代方案,但需要專門設計的輪圈,其商業化應用目前主要限於高端車型[221]。主動噪音控制技術如在輪圈內安裝加速度計與致動器來主動抵消空腔共振振動,在實驗室已經展示了 10 至 15 分貝的降噪效果,但成本、可靠性與能耗是實用化的障礙[222]。

輪胎與路面的交互作用是噪音產生的根源,因此道路路面的聲學性能也是降噪策略的一部分,雖然這超出輪胎設計本身的範疇。路面紋理的宏觀(波長 10 至 500 毫米)與微觀(波長 0.01 至 10 毫米)特性都影響輪胎噪音,粗糙的路面在所有頻段產生更高的噪音[223]。多孔瀝青路面(Porous Asphalt)使用開級配的瀝青混合料,孔隙率達 15%至 25%,可以吸收輪胎噪音的聲能並提供排水通道,相較於密級配路面可以降低噪音 3 至 8 分貝[224]。然而多孔路面的耐久性較差,容易堵塞且在冬季氣候下性能劣化,維護成本較高,因此應用主要限於噪音敏感區域如居民區或醫院附近[225]。LIFE E-VIA 項目專門研究為電動車優化的低噪音路面,結合輪胎與路面的共同設計來最大化降噪效果[226]。ISO 10844 標準規定了噪音測試跑道的路面特性,包括紋理深度、吸音係數與平整度要求,確保不同測試場地之間的結果可比性[227]。Berge 與 Mioduszewski 的研究指出,即使在符合 ISO 10844 的測試跑道之間,輪胎噪音測量結果也可能有 1 至 2 分貝的差異,這種測試不確定性需要在法規限值設定時考慮[228]。

噪音測試方法與指標對於驗證降噪設計的效果至關重要。車輛透過噪音測試 (Pass-by Noise Test)依照 ISO 362-1 標準進行,車輛在規定的加速條件下透過測試

跑道,兩側各 10 米處的麥克風記錄最大噪音值[8]。這種測試反映了車輛在真實加速場景下的噪音發射,但無法分離輪胎、動力系統與風噪音的貢獻。滑行測試 (Coast-by Test)要求車輛在空檔滑行透過測試區域,動力系統不工作,此時測量的噪音主要來自輪胎與風噪音,更適合評估輪胎的貢獻[229]。近接測量法(Close Proximity Method, CPX)使用裝有麥克風的拖車,將麥克風置於輪胎周圍極近的位置(通常在輪胎後方與側方各 20 至 50 毫米),直接測量輪胎路面交互作用噪音而不受其他噪音源與傳播距離的影響[11]。CPX 方法的優點是測量結果對環境條件不敏感,可以在實際道路上進行連續測量來繪製路面的聲學地圖,缺點是設備成本較高且測量結果與車外噪音的關聯需要透過模型建立[230]。ISO 11819-2 標準規定了 CPX 方法的程序與設備要求,確保測量的可重複性[231]。

室內測試方法如滾筒測試與消音室測試為輪胎開發提供了受控的測試環境。滾筒測試使用大直徑(通常 1.7 至 2.0 米)的鋼製滾筒模擬路面,輪胎在滾筒上以規定速度與負載滾動,周圍的麥克風陣列測量噪音[232]。滾筒測試的優點是可控且可重複,不受天氣影響,缺點是滾筒的曲率與鋼質表面與真實路面有顯著差異,測量的噪音頻譜與道路



測試不完全一致[233]。為了提高相關性,一些先進的設施使用表面覆蓋標準路面材料的滾筒,或使用平板式路面模擬器[234]。ISO 362-3:2022 標準規定了使用半消音室與動態測功機進行室內車輛噪音測試的方法,目標是使室內測試結果與戶外測試高度相關,為開發提供高效的工具[9]。消音室測試可以精確測量輪胎的聲功率級與指向性,為聲學建模提供輸入數據[235]。聲學全息(Acoustic Holography)與波束成形(Beamforming)技術使用麥克風陣列來定位與量化輪胎表面不同區域的噪音貢獻,幫助設計師識別噪音熱點並針對性地改進[236]。

主觀音質評估是降噪設計的最終檢驗,因為客觀的噪音值數據無法完全預測人的主觀感受。心理聲學評估使用訓練過的評估員在標準化條件下聽取不同輪胎的噪音錄音,評估響度、尖銳度、煩擾度與音質等主觀屬性[237]。配對比較(Paired Comparison)方法讓評估員在兩個樣本之間選擇較好或較差的一個,透過多次比較建立偏好順序[238]。語意差異法(Semantic Differential)使用一組形容詞對(如安靜-吵雜、愉悅-煩人、柔和-尖銳)讓評估員評分,量化聲音的多維主觀特徵[239]。心理聲學參數如響度(按照 ISO 532 計算,單位 Sone)、尖銳度(按照 Aures 或 von

Bismarck 模型計算,單位 Acum)可以從聲音錄音自動計算,作為主觀感受的客觀指標[240]。研究顯示,尖銳度與煩擾度的相關性通常高於響度,意味著噪音的頻譜特徵(特別是高頻成分)比總噪音值更影響主觀評估[241]。因此降噪設計不僅要降低總噪音水平,更要塑造令人愉悅的噪音頻譜,這是聲音設計(Sound Design)的核心理念[242]。

法規要求設定了輪胎降噪的強制性目標。UNECE R117 法規規定了不同輪胎類別的滾動噪音限值,例如 C1 類轎車輪胎(最常見的乘用車輪胎)的噪音限值根據胎寬從 68 至 72 分貝不等,較窄的輪胎允許較低的限值[10]。這些限值在過去二十年逐步收緊,預計未來還會進一步降低。歐盟計劃中的第四階段限值(預計 2026 年後實施)可能再降低 2 至 3 分貝,這對輪胎製造商構成持續的技術挑戰[243]。不符合噪音限值的輪胎無法獲得型式認證,無法在市場上銷售,因此降噪性能已經成為輪胎設計的必要條件而非可選項。歐盟輪胎標籤上的噪音等級(A 至 C)也影響消費者選擇,雖然實際購買決策中噪音等級的權重低於價格與品牌,但在高端市場噪音性能可能成為差異化因素[244]。環境影響評估與城市規劃中也越來越重視交通噪音控制,一些城市開始限制高噪音輪胎在特定區域或時段的使用,這種趨勢可能推動低噪音輪胎的更廣泛應用[245]。

11.4 電動車輪胎噪音量測 (EV Tire Noise Measurement)

電動車輪胎噪音的量測方法學必須適應電動車獨特的噪音特徵與測試需求,包括更安靜的背景環境、不同的噪音頻譜分布、以及對精確度與重複性的更高要求。傳統的車輛噪音測試方法雖然基本原理仍然適用,但在實施細節、數據處理與結果解釋上需要進行調整以確保測量結果的有效性與實用性[246]。電動車缺乏引擎噪音遮蔽使得輪胎噪音更容易被測量到,但同時也意味著環境背景噪音與風噪音的干擾變得更加顯著,要求更嚴格的



測試條件控制[247]。此外,電動車的瞬時高扭力特性與再生煞車系統創造了與傳統車輛不同的動態測試場景,標準測試程序可能需要修改以反映這些特性[248]。量測方法學的發展也反映了技術進步,數位化測量系統、陣列訊號處理技術、以及數值模擬的整合使得噪音量測從單純的符合性測試演進為支持設計優化與問題診斷的綜合工具[249]。

ISO 362 標準系列是車輛外部噪音量測的國際基準,其演變反映了對測試方法不斷精進的追求。ISO 362-1:2015 規定了 M 與 N 類車輛加速透過噪音的工程測量方法,這是大多數國家型式認證的基礎[8]。測試在符合 ISO 10844 標準的室外測試跑道上進行,測試跑道必須具有規定的表面紋理、聲學吸收特性與平整度[250]。測試區域長 20 米,兩側各 10 米處放置麥克風,麥克風高度 1.2 米,車輛以規定的加速條件透過測試區域,記錄最大 A 加權噪音值[8]。測試分為幾種檔位與速度組合,根據車輛的動力質量比(Power-to-Mass Ratio, PMR)來確定具體的測試條件[251]。對於電動車,由於其高扭力特性,測試條件的選擇可能與傳統車輛不同,需要確保測試代表實際的城市行駛場景[252]。

ISO 362-2:2009 規定了使用車載測量設備進行道路噪音調查的方法,允許在實際道路條件下測量車輛噪音[253]。這種方法的優點是可以涵蓋各種真實的道路表面與行駛條件,但缺點是結果的重複性較差且無法直接與型式認證測試比較[254]。ISO 362-3:2022 引入了使用半消音室與滾筒測功機的室內測試方法,專門設計用於精確測量車輛噪音而不受戶外環境條件的限制[9]。這種方法對於電動車特別有價值,因為它允

MEASUREMENT



許在受控條件下分離輪胎噪音、馬達噪音與風噪音的貢獻,並且可以在整個開發過程中持續進行測試而不受季節或天氣的限制[255]。室內測試的挑戰在於確保測量結果與戶外測試高度相關,這需要精確的聲學環境設計(半消音室的吸音特性)、滾筒表面的聲學特性匹配、以及車輛在滾筒上的動態行為標定[256]。

UNECE R51 法規規定了 M 與 N 類車輛噪音排放的限值與測試方法,其測試程序與 ISO 362 類似但有一些差異,R51 是許多國家法規認證的直接依據[257]。R51.03 版本(2016 年生效)收緊了噪音限值並引入了附加聲發射條款(Additional Sound Emission Provision, ASEP),要求車輛不僅在標準測試條件下符合限值,在更廣泛的操作條件下也不能顯著超過限值,防止製造商針對測試條件進行優化而在實際使用中噪音過高[258]。ASEP 測試包括在不同檔位、速度與加速度下的多次測試,車輛噪音不能超過型式認證值 2 分貝以上(對於少數測試點)或超過 1 分貝以上(對於大多數測試點)[259]。這種「真實駕駛」測試理念與歐盟排放法規中的真實駕駛排放(Real Driving Emissions, RDE)測試相呼應,旨在確保測試結果代表實際性能[260]。

輪胎專用的噪音測試方法在 UNECE R117 與 ISO 13325 標準中規定。UNECE R117 測試使用滑行方法(Coast-by Method),車輛加速到測試速度加 10 至 15 公里/小時,然後脫檔或關閉動力滑行透過測試區域,測試速度通常為 80 公里/小時對於轎車輪胎[10]。這種方法測量的噪音主要來自輪胎與路面的交互作用,動力系統的貢獻被排除,因此可以相對純粹地評估輪胎的噪音性能[261]。測試在符合 ISO 10844 的跑道上進行,使用與 ISO 362 相同的麥克風配置,記錄滑行透過時的平均噪音值[262]。輪胎噪音測試的重複性較好,同一輪胎在同一跑道上的測試標準差通常小於 1 分貝,但在不同跑道之間可能有 1 至 2 分貝的系統性差異,這種跑道間變異性是測試方法學的持續挑戰[228]。ISO 13325:2003 標準規定了輪胎滑行測試的詳細程序,包括輪胎的預處理(需要在測試前進行一定里程的磨合)、充氣壓力與負載的設定、以及測試速度的選擇[263]。

近接測量法(Close Proximity Method, CPX)提供了更直接的輪胎噪音測量方法,特別適合用於道路路面的聲學特性評估與輪胎開發過程中的快速比較測試。CPX 使用專門設計的拖車,裝備一對或多對麥克風緊貼測試輪胎周圍(通常在輪胎後方 30 度



角位置與側方位置各一個麥克風,距離輪胎表面僅 20 至 50 毫米)[11]。拖車被車輛拖拽在道路上行駛,以規定速度(通常 50 至 80 公里/小時)連續測量輪胎噪音[264]。CPX 測量的是輪胎路面接觸區周圍的噪音值,與遠場的車外噪音不直接等同,但兩者之間存在統計關聯,通常 CPX 噪音值高於遠場噪音值約 15 至 25 分貝,具體差異取決於輪胎類型與測量幾何[265]。CPX 方法的優點包括:對環境背景噪音不敏感,可以在交通流量較大的道路上測試;測量結果主要反映輪胎路面交互作用,不受車輛動力系統與風噪音的影響;可以連續測量得到路面聲學特性的空間分布圖[266]。CPX 的缺點是設備成本較高(專用拖車與數據採集系統成本可達數十萬美元),測量結果與標準的透過噪音測試不直接可比(需要透過經驗模型轉換),且測試結果對 CPX 拖車的設計細節敏感,不同拖車之間可能有系統性差異[267]。ISO 11819-2:2017 標準規定了 CPX 方法的設備設計、測試程序與數據處理要求,但標準化程度仍不如 ISO 362,跨機構的測量協調性是持續改進的重點[268]。

室內滾筒測試方法為輪胎噪音測量提供了受控的實驗室環境,特別適合研發階段的系統性參數研究與品質控制。滾筒測試使用大直徑鋼製滾筒(直徑 1.7 至 2.0 米,以減少曲率對輪胎接觸的影響)模擬路面,輪胎以規定的速度、負載與充氣壓力在

滾筒上滾動[269]。測試在消音室或半消音室內進行以排除環境噪音,麥克風陣列環繞輪胎周圍以測量噪音值與聲功率級[270]。滾筒測試的主要挑戰是滾筒表面與真實路面的差異,鋼質表面非常光滑且聲學反射性強,導致測量的噪音頻譜與道路測試顯著不同[271]。為了提高相關性,研究者探索了幾種方法:在滾筒表面黏貼或機械加工出近似真實路面紋理的層;使用表面覆蓋標準路面材料的滾筒;或透過經驗校正函數調整測量結果[272]。Clar-Garcia 等人提出了一種基於 ISO 3744 聲功率測量原理的滾筒測試方法,使用多個麥克風環繞輪胎計算聲功率級,相較於單點噪音值測量具有更好的重複性與較低的位置敏感性[273]。這種方法已被納入 UNECE R117 的替代測試程序,允許在滾筒上進行型式認證測試,但需要建立與戶外測試的相關性驗證[274]。

聲學陣列測量技術使用多個麥克風組成的空間陣列來定位與量化噪音源的分布,為輪胎噪音的機制研究與設計優化提供了強大工具。波束成形(Beamforming)是最常用的陣列處理算法,透過對不同麥克風接收的信號進行時間延遲補償與加權求和,可以聚焦到空間中特定位置,生成該位置的



噪音強度估計[275]。對所有空間位置重複這一過程,可以生成二維或三維的噪音源分布圖,直觀地顯示輪胎表面不同區域的噪音貢獻[276]。先進的波束成形算法如延遲求和波束成形(Delay-and-Sum Beamforming)、最小方差無失真響應(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)與反卷積波束成形(Deconvolution Beamforming)提供了不同的空間解析度與動態範圍權衡[277]。近場聲學全息(Nearfield Acoustic Holography, NAH)使用緊密排列的麥克風陣列測量聲壓場,透過逆向傳播計算重建聲源表面的振動分布,提供比波束成形更高的空間解析度但測量距離更受限[278]。這些陣列技術在輪胎噪音研究中的應用揭示了噪音產生的空間特徵,例如胎面中央區域主要產生花紋噪音,胎肩區域產生更多的空氣泵浦噪音,這些洞察指導了針對性的降噪設計[279]。

振動測量是理解結構傳播噪音的關鍵,補充了聲學測量的信息。加速度計安裝在輪胎表面(胎側或胎面)、輪圈、懸吊組件與車身結構上,測量振動的幅值與頻譜[280]。輪胎表面的振動測量揭示了振動模態與激發機制,但安裝加速度計在旋轉的輪胎上需要特殊的無線遙測系統或滑環裝置[281]。雷射都卜勒測振儀(Laser Doppler Vibrometer, LDV)提供了非接觸式的振動測量方法,可以掃描輪胎表面得到操作模態形狀,但需要在受控的實驗室環境中進行[282]。傳遞路徑分析

(Transfer Path Analysis, TPA)整合多點的振動與聲學測量,識別從輪胎到車室內部的主要傳遞路徑與各路徑的相對貢獻[283]。經典 TPA 測量所有連接點的力與速度以及對應的傳遞函數,透過矩陣運算分離各路徑的貢獻,但測量工作量大[284]。操作 TPA 僅測量正常操作條件下的響應,使用統計方法估計路徑貢獻,測量更簡便但精度稍低[285]。TPA 分析的結果指導了隔振設計的優化,例如如果發現某個懸吊安裝點是主要的振動傳遞路徑,可以透過增加襯套剛度或阻尼來減少傳遞[286]。

信號處理與數據分析方法對於從測量數據中提取有用信息至關重要。時域分析觀察聲壓波形的時間歷程,識別瞬態事件如花紋塊撞擊或空氣脈衝[287]。頻域分析透過快速傅立葉變換(Fast Fourier Transform, FFT)將信號轉換為頻譜,顯示不同頻率成分的能量分布,這是最常用的分析方法[288]。



時頻分析如短時傅立葉變換(Short-Time Fourier Transform, STFT)與小波變換(Wavelet Transform)同時提供時間與頻率信息,適合分析非平穩信號如加速過程的噪音[289]。階次分析(Order Analysis)將頻率軸轉換為階次軸(頻率除以轉速),使得與轉速同步的噪音成分(如花紋透過頻率)在不同轉速下顯示為恆定的階次線,方便識別旋轉相關的噪音源[290]。統計分析計算噪音值的平均值、標準差、百分位數等統計量,評估測量的不確定性與結果的顯著性[291]。A 加權(A-weighting)是最常用的頻率加權,模擬人耳對不同頻率聲音的敏感度,將物理噪音值轉換為近似主觀響度的加權噪音值,單位為 dB(A)[292]。心理聲學分析計算響度、尖銳度、粗糙度等心理聲學參數,提供更接近主觀感受的客觀指標[293]。

測量不確定性的評估與報告是確保測量結果可信度與可比性的基礎。ISO/IEC Guide 98-3 規定了測量不確定性表達的通用方法,將不確定性分為 A 類(透過統計分析評估)與 B 類(透過其他方式如校準證書、規格書評估)[294]。輪胎噪音測量的不確定性來源包括:測量儀器的校準不確定性(麥克風靈敏度、噪音計精度)、環境條件的變化(溫度、濕度、風速影響聲速與大氣吸收)、測試跑道的特性變異(表面紋理與吸音係數隨時間與地點變化)、輪胎狀態的變異(溫度、磨損影響噪音)、以及測試程序執行的變異(車速控制精度、輪胎定位)[295]。Berge 等人的研究估計 ISO 362 測試的擴展不確定性(覆蓋因子 $k=2$,約 95%置信水平)約為 1.0 至 1.5 dB(A),這意味著兩個測量值如果差異小於 2 至 3 分貝可能無法判定為真正不同

[296]。降低不確定性需要精密的儀器校準、嚴格的測試程序控制、以及足夠的重複測量次數,但這些都會增加測試成本與時間[297]。

電動車特有的測試考量包括 AVAS 系統的處理、再生煞車的影響、以及背景噪音要求。AVAS 系統在低速時發出人工警示聲,如果在噪音測試時啟動會影響測量結果[298]。



UNECE R51 與 R138 規定了測試時 AVAS 系統的狀態,通常要求分別進行 AVAS 啟動與關閉的測試,前者驗證警示聲符合最低聲級要求,後者驗證車輛本身的噪音符合最大聲級限

值[299]。再生煞車在電動車減速時將動能回收為電能,這個過程中馬達作為發電機運轉,產生不同於機械煞車的噪音特徵[300]。標準的滑行測試程序可能需要調整以考慮再生煞車的影響,或者明確規定測試時再生煞車系統的設定[301]。電動車的噪音特性對測試環境的背景噪音提出更嚴格的要求,ISO 362-1 要求測試時背景噪音至少比測量的車輛噪音低 10 dB(A),否則需要進行背景噪音修正[8]。對於非常安靜的電動車,這可能要求測試在極低背景噪音的環境下進行,如深夜或遠離其他噪音源的場地,或者使用室內測試設施[302]。

實車道路測試補充了標準化測試的不足,提供真實使用條件下的噪音特性評估。主觀評估測試由訓練過的評估員駕駛或乘坐車輛在各種道路條件下行駛,評估不同速度、路面與操作情境下的噪音水平與音質[303]。評估員使用標準化的評分量表(如 10 分量表)與描述詞彙,記錄對車室內噪音的主觀感受[304]。客觀測量系統如車載雙耳麥克風(Binaural Microphone)安裝在假人頭部位置記錄車室內聲場,結合 GPS 與車輛 CAN 總線數據記錄車速、位置與操作狀態[305]。長期道路測試累積數萬公里里程,評估輪胎磨損對噪音的影響,研究顯示輪胎噪音通常在使用初期(前 5000 公里)有一個磨合期,噪音可能先輕微增加後降低,隨後在大部分使用壽命內保持相對穩定,接近磨損限度時可能再次變化[306]。不同路面類型的對比測試揭示了輪胎與路面交互作用的複雜性,同一輪胎在粗糙的混凝土路面可能比光滑的瀝青路面高 5 至 10 分貝[307]。

數值模擬與計算方法正在成為輪胎噪音測量的重要補充,允許在設計階段預測噪音性能並探索大量設計變體而無需製作物理原型。有限元法(Finite Element Method, FEM)模擬輪胎結構在滾動負載下的變形與振動,計算振動模態頻率與模態形狀[308]。邊界元法(Boundary Element Method, BEM)計算振動結構周圍的聲場輻射,將結構振動轉換為空間中的聲壓分布[309]。FEM/BEM 耦合方法整合結

構振動與聲學輻射的計算,提供從激發源到聲學響應的完整模擬[310]。計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模擬花紋溝槽中的空氣流動,預測空氣泵浦噪音的產生[311]。統計能量分析(Statistical Energy Analysis, SEA)適合高頻段的聲學預測,將複雜系統分解為耦合的子系統,透過能量平衡方程計算各子系統的能量級與噪音值[312]。這些模擬方法的精度取決於材料參數的準確性、網格的精細度與計算模型的完整性,通常需要透過實驗測量來驗證與校準[313]。虛擬原型(Virtual Prototype)方法整合 CAD 幾何、FEM 結構分析、聲學模擬與優化算法,在數位環境中迭代設計,相較於傳統的製作-測試-修改循環可以大幅縮短開發時間並降低成本[314]。

機器學習與人工智能技術開始應用於輪胎噪音的預測與診斷。監督學習方法如支持向量機(Support Vector Machine, SVM)與隨機森林(Random Forest)從歷史測試數據學習輪胎設計參數與噪音性能之間的映射關係,可以快速預測新設計的噪音水平[315]。深度神經網絡(Deep Neural Network)可以從原始聲學信號學習特徵表示,實現端到端的噪音分類或異常檢測[316]。遷移學習(Transfer Learning)利用在一個數據集上訓練的模型作為起點,透過少量新數據快速適應到新的輪胎或車輛類型[317]。這些數據驅動的方法補充了物理模型的不足,特別是在處理複雜的非線性關係與高維參數空間時展現優勢[318]。然而機器學習模型需要大量高質量的訓練數據,其預測能力受限於訓練數據的覆蓋範圍,外推到訓練範圍外的可靠性有限[319]。可解釋性也是挑戰,深度學習模型通常是黑箱,難以提供物理洞察或因果解釋[320]。結合物理模型與數據驅動模型的混合方法正在探索中,目標是整合兩種方法的優點[321]。

11.5 電動車輪胎噪音標準 (EV Tire Noise Standards)

電動車輪胎噪音標準的法規框架由國際、區域與國家層面的多層次體系構成,這些標準不僅規定了噪音限值,還定義了測試方法、符合性評估程序與標籤要求,共同形成了推動輪胎噪音技術進步的制度環境[322]。標準的演進反映了社會對環境噪音控制日益增長的重視、技術能力的提升、以及電動車普及帶來的新挑戰與機遇[323]。與



傳統車輛相比,電動車的噪音標準呈現出一些獨特的特徵:輪胎噪音成為更關鍵的符合性要素,因為缺乏引擎噪音遮蔽;最低噪音要求(AVAS)與最高噪音限值(透過噪音與輪胎噪音)必須同時滿足,創造雙向約束;對測試不確定性與實際使用相關

性的要求更高,因為噪音餘裕度更小[324]。理解標準體系對於輪胎製造商、車輛製造商與政策制定者都至關重要,因為它定義了產品開發的邊界條件、市場准入的門檻、以及技術創新的方向[325]。

UNECE(聯合國歐洲經濟委員會)法規體系是全球最具影響力的車輛噪音標準框架,被超過 50 個國家採納為型式認證的基礎[326]。UNECE R51 規定了 M、N 與 O 類車輛(轎車、商用車與拖車)的最大噪音限值與測試方法,其最新版本 R51.03(2016 年起實施)將轎車的噪音限值收緊至 68 至 72 dB(A),具體限值取決於車輛的動力質量比與檔位數[327]。R51.03 引入的重要創新是 ASEP(附加聲發射條款),要求車輛在多種操作條件下的噪音都不能顯著超過型式認證值,防止製造商針對單一測試條件優化而在實際使用中噪音過高[328]。ASEP 測試包括不同檔位、加速度與車速的組合,覆蓋從城市行駛到高速公路的典型場景[329]。對於電動車,R51 的應用需要特殊考慮,因為電動車通常沒有傳統意義的檔位(單速變速箱或雙速變速箱),測試條件的選擇基於等效的速度與加速度範圍[330]。

UNECE R117 專門規定了輪胎滾動聲發射、濕地附著力與滾動阻力的要求,是輪胎型式認證的直接依據[10]。

R117 將轎車輪胎(C1 類)按照標稱截面寬度分為三個組別,每組有不同的噪音限值:標稱寬度 $\leq 185\text{mm}$ 的輪胎限值为 68 dB(A),寬度在 185 至 245mm 之間的為 70 dB(A),寬度 $>245\text{mm}$ 的為 72 dB(A)[331]。這種分組反映了輪胎寬度與噪音之間的正相關關係,較寬的輪胎有更大的接地面積因而產生更多噪音[332]。R117 也規定了商用車輪胎(C2 與 C3 類)的限值,通常比轎車輪胎高 3 至 5 分貝,反映其更粗糙的胎面花紋與更高的負載[333]。測試方法為滑行測試,車輛在 80 km/h 速度下滑行透過測試區域,測量輪胎噪音[334]。R117.04 版本(2020 年起實施)引入了磨損輪胎的性能要求,要求輪胎在磨損到法定最小胎面深度時仍需保持至少 80%的濕地制動性能,這是提升道路安全的重要措施[335]。對於電動車專用輪胎,R117 沒有特殊的噪音限值類別,但製造商通常會標註「適用於電動車」或類似的標識,表示該輪胎在滾動阻力與噪音之間達到了適合電動車的平衡[336]。

UNECE R138 規定了安靜道路運輸車輛的最低聲發射要求,即 AVAS 系統的法規基礎[337]。R138 要求純電動車與外接充電式混合動力車在車速從啟動到 20 km/h 範圍內必須發出連續的警示聲,倒車時也必須啟動警示聲[338]。警示聲的噪音值

STANDARDS



必須在車輛前方與側方 2 米處、高度 0.7 至 1.5 米範圍內任一點測量至少達到 56 dB(A),同時在任何操作條件下不得超過 75 dB(A)[339]。警示聲的頻譜必須包含至少兩個 1/3 倍頻程頻帶的成分,頻率範圍在 160 至 5000 Hz 之間,以確保聲音的可聽見性與方向性識別[340]。R138 允許製造商自行設計警示聲的音色,可以是模擬傳統引擎聲、未來科技聲或其他任何聲音,只要符合噪音值與頻譜要求[341]。駕駛者可以臨時關閉 AVAS(如在車庫內避免擾民),但車輛再次啟動後 AVAS 必須自動重新啟動[342]。R138 的實施日期為 2021 年 7 月(新型車)與 2022 年 7 月(所有新車),標誌著電動車必須發出最低聲音成為強制性要求[343]。這個法規的制定經歷了激烈的辯論,平衡行人安全與避免增加環境噪音的雙重目標[344]。

歐盟輪胎標籤法規(EU 2020/740)要求所有在歐盟市場銷售的轎車與商用車輪胎必須附有標準化的標籤,顯示輪胎的滾動阻力等級、濕地抓地力等級與外部滾動噪音[16]。標籤於 2021 年 5 月全面實施,替代了之前的 EC 1222/2009 法規[345]。新標籤的噪音部分顯示三個信息:測量的外部滾動噪音值(單位 dB(A))、噪音等級(A、B 或 C 三級,A 為最安靜)、以及一個 QR 碼連結到歐盟產品數據庫(EPREL)提供更詳細信息[346]。噪音等級的劃分基於輪胎噪音相對於 R117 法規限值的餘裕:A 級表示比限值低至少 3 dB,B 級表示比限值低 1 至 3 dB,C 級表示符合限值但餘裕小於 1 dB[347]。這種相對分級方法確保不同寬度的輪胎可以在同一尺度上比較,因為限值本身已經考慮了寬度因素[348]。標籤的目標是提高消費者對輪胎性能的認識,引導市場需求向低噪音輪胎轉移,從而激勵製造商投資降噪技術[349]。然而研究顯示消費者購買決策中輪胎標籤的實際影響有限,價格與品牌仍是主導因素,噪音等級的權重較低[350]。提高標籤的有效性需要配套的消費者教育與可能的經濟激勵如低噪音輪胎的稅收優惠[351]。

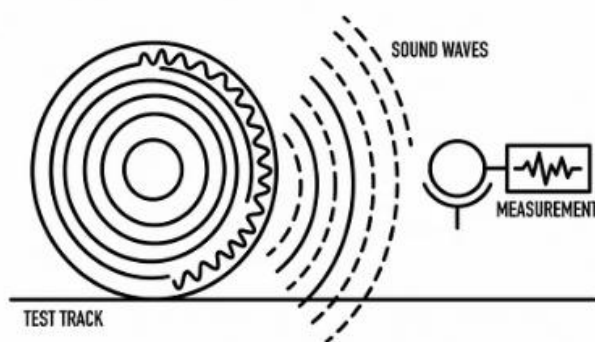
ISO 標準系列提供了技術規範與測試方法的國際協調基礎,雖然 ISO 標準本身通常不是強制性的,但經常被法規引用作為技術基準。ISO 362 系列(前述)規定了車輛外部噪音測量方法[8][9]。ISO 10844 規定了測試跑道的規範,包括表面紋理、吸音係數與平整度要求,確保不同測試場地之間結果的可比性[352]。ISO 10844:2021 最新版本收緊了某些表面參數的容差,並引入了定期驗證測試跑道性能的要求,使用標準參考輪胎(Standard Reference Test Tyre, SRTT)測量跑道的聲學特性[353]。ISO 11819 系列規定了道路路面聲學特性的測量方法,ISO 11819-1 使用統計透過法(Statistical Pass-By, SPB)測量實際交通流的



噪音,ISO 11819-2 規定了 CPX 方法[354][355]。ISO 13325 規定了輪胎滑行測試方法的細節[356]。ISO 28580 規定了使用滾筒設備測量輪胎滾動阻力的方法[357]。這些 ISO 標準共同構成了輪胎與車輛噪音測試的技術基礎設施,其持續更新反映了測量科學與工程實踐的進步[358]。

美國的車輛噪音法規體系相對分散,聯邦與州層面都有相關規定。美國環境保護署(EPA)在 1970 年代制定了噪音控制法規,但 1981 年後聯邦層面的噪音法規制定權力基本轉移到州政府[359]。加州車輛法規(California Vehicle Code)第 27200-27207 條規定了車輛噪音限值,但具體數值與測試方法與 UNECE 標準有所不同[360]。美國國家公路交通安全管理局(NHTSA)制定的 FMVSS 141(Federal Motor Vehicle Safety Standard 141)規定了混合動力與電動車的最低聲發射要求,於 2020 年 9 月全面實施[361]。FMVSS 141 的要求與 UNECE R138 類似但有細節差異,例如最低噪音值要求在車輛前方與側方各 1 米處測量為 56 dB(A),測試點距離比 R138 的 2 米更近[362]。FMVSS 141 也允許車輛在超過 30 km/h 速度後自動停止發出警示聲(而 R138 的閾值是 20 km/h),反映了不同的工程判斷[363]。這些差異意味著製造商如果要在全球市場銷售需要滿足多個略有不同的標準,增加了符合性驗證的複雜度[364]。

中國車輛與輪胎噪音標準近年來快速發展,逐步與國際標準接軌。GB 1495-2002《汽車加速行駛車外噪音限值及測量方法》規定了車輛噪音限值,但數值相對寬鬆,近年來正在修訂以收緊限值[365]。GB 9743-2015《轎車輪胎》規定了輪胎

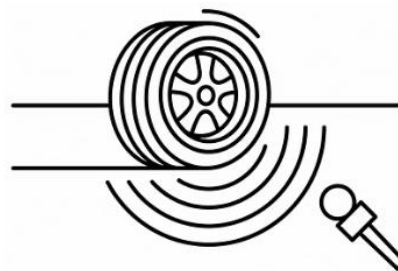


的滾動噪音限值,基本等同於 UNECE R117 但實施時間表滯後[366]。中國工信部 2020 年發布的《電動汽車低速提示音》標準(GB/T 37153-2018)規定了電動車的警示音要求,類似於 UNECE R138 但有一些本地化調整[367]。作為全球最大的電動車市場(2023 年電動車銷量超過 800 萬輛,占全球 60%),中國標準的演進對全球輪胎產業有重大影響[368]。中國政府將噪音控制納入環境保護與綠色交通的政策框架,預計未來標準會持續收緊並與國際最佳實踐趨同[369]。

其他主要市場如日本、韓國、印度與巴西都有自己的車輛噪音法規,大多參考 UNECE 或 ISO 標準但有不同程度的調整[370]。全球技術法規(Global Technical

Regulation, GTR)框架下的努力試圖協調這些差異,UNECE 的世界車輛法規協調論壇(World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, WP.29)推動制定全球統一的技術法規,GTR No. 1 涉及車門鎖與車門保持件,未來可能制定噪音相關的GTR[371]。然而噪音標準的完全統一面臨挑戰,因為不同地區的道路條件、交通模式、消費者偏好與政策優先級存在差異[372]。實務上,製造商通常採取「符合最嚴格標準」的策略,設計產品時以最嚴格的市場(通常是歐盟)為基準,確保產品可以在所有目標市場銷售[373]。

標準的未來發展趨勢包括進一步收緊限值、擴大測試覆蓋範圍、以及整合新的評估方法。歐盟委員會的研究表明,技術上可行將輪胎噪音限值再降低 2 至 3 dB 而不顯著增加成本或犧牲其他性能,這可能在 2025 年後的下一輪法規



修訂中實現[374]。真實世界噪音排放(Real-World Noise Emissions)的監測與法規可能參照排放法規的 RDE(真實駕駛排放)概念,要求車輛在實際使用條件下的噪音不顯著超過型式認證值[375]。車載噪音監測系統(On-Board Noise Monitoring, OBNM)如同車載診斷系統(On-Board Diagnostics, OBD)可以持續監測車輛噪音,在超過閾值時警告駕駛者或記錄數據供監管機構審查[376]。這些技術尚處於概念階段,但代表了噪音法規可能的演進方向。標籤體系的改進可能包括更精細的噪音分級(如五級而非三級)、顯示噪音頻譜特徵(如低頻噪音與高頻噪音分開評級)、以及整合車室內噪音信息[377]。數位化產品護照(Digital Product Passport)概念將輪胎的所有性能信息、製造歷史、使用記錄與回收信息整合在區塊鏈或雲端數據庫中,透過掃描輪胎上的 QR 碼或 RFID 標籤訪問,這將大幅提升產品透明度與可追溯性[378]。

標準的有效實施需要健全的符合性評估與市場監督機制。型式認證(Type Approval)是產品上市前的主要關卡,由指定的技術服務機構(Technical Service)進行測試,確認產品符合所有適用標準[379]。符合性證書(Certificate of Conformity, CoC)由製造商或其代表簽發,聲明產品符合認證型式[380]。市場監督(Market Surveillance)由政府機構進行,從市場隨機抽取樣品進行測試,驗證符合性聲明的真實性[381]。不符合產品可能面臨召回、罰款或禁售等處罰[382]。歐盟的產品安全法規(General Product Safety Regulation)與市場監督法規(Market Surveillance Regulation)提供了執法框架[383]。然而市場監督的資源有限,實際檢查覆蓋率很

低,依賴製造商的自律與行業自我監管[384]。第三方認證與標章如歐洲標準化委員會(CEN)的認證標誌提供了額外的質量保證,但屬於自願性質[385]。

標準制定過程涉及多方利益相關者的參與與協商,包括政府機構、製造商、消費者組織、環保團體、研究機構與標準化組織[386]。UNECE WP.29 下的噪音工作組(Groupe Rapporteur sur le Bruit, GRB)負責車輛噪音法規的制定與修訂,每年召開兩次會議討論技術提案與法規修正[387]。ISO TC 43/SC 1(聲學技術委員會/噪音分委會)負責聲學測量標準的制定[388]。這些論壇提供了技術專家交流最新研究成果、分享最佳實踐、以及就法規方向達成共識的平台[389]。標準制定平衡多重目標:保護公共健康與環境免受過度噪音影響、不對製造商施加不合理的技術或經濟負擔、促進技術創新而非固化現有技術、以及確保全球市場的公平競爭[390]。這種多目標平衡本質上是政治性的,反映了不同價值取向與利益訴求之間的妥協[391]。

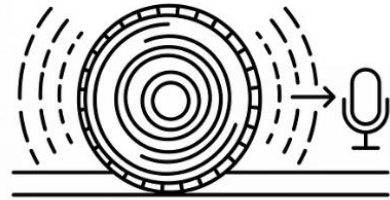
電動車時代的噪音標準面臨重新定義噪音概念的挑戰。傳統的噪音法規基於「噪音越低越好」的假設,但電動車的經驗顯示過度安靜也有問題(行人安全風險)[392]。「適當噪音」(Adequate Sound)的概念正在浮現,指的是足夠低以保護環境與健康,但又足夠高以確保車輛可聽見性的聲音水平[393]。定義這個「適當」的範圍需要跨學科的研究,整合聲學工程、心理聲學、交通安全與城市規劃等領域[394]。聲音質量(Sound Quality)而非僅僅聲音水平可能成為未來標準的關注點,認識到某些聲音即使噪音值相同但主觀煩擾感不同[395]。聲景(Soundscape)方法將噪音視為城市聲學環境的一部分,不僅考慮車輛噪音本身,還考慮其與其他聲音(如鳥鳴、人聲、音樂)的交互作用如何影響整體環境質量[396]。這種範式轉變從純粹的噪音控制向聲學環境設計演進,要求標準制定者、工程師與城市規劃者之間更緊密的合作[397]。

結論 (Conclusions)

本章的綜合分析清楚顯示,電動車輪胎噪音特性代表車輛聲學工程的一次典範轉移。隨著動力系統噪音的顯著降低,輪胎噪音不僅在物理量測上成為主導聲源,更在主觀感知與環境影響層面扮演決定性角色。這一轉變意味著,未來電動車的靜肅性表現,將在很大程度上取決於輪胎與路面系統的聲學設計品質,而非傳統意義上的引擎或動力總成控制。

研究結果指出，電動車輪胎噪音的關鍵挑戰在於其頻譜結構與人耳敏感頻段高度重疊，且缺乏遮蔽效應，使中高頻噪音成分對主觀煩擾感的影響被顯著放大。因此，單純追求整體噪音值降低已不足以滿足電動車使用者對舒適性的期待，未來輪胎噪音控制需更加重視頻譜分佈、調變特性與音質指標的最佳化。

在設計與工程實務上，本章顯示電動車輪胎必須在多重性能目標之間進行精細平衡。高車重與高扭力需求提高了結構剛性與耐久性要求，而續航里程壓力則促使滾動阻力必須持續降低，這些因素往往與降噪目標產生內在衝突。胎內吸音材料、



結構調諧與花紋最佳化雖能有效抑制特定噪音機制，但亦可能帶來重量增加、成本上升或能效劣化等副作用，顯示電動車輪胎設計本質上是一個多目標最佳化問題。

從法規與社會層面來看，電動車輪胎噪音同時受到「最低可聽性」與「最高噪音限值」的雙重約束。AVAS 系統的導入雖有助於提升行人安全，但也凸顯輪胎本身噪音特性在低速警示效果中的角色。理想的未來策略，並非單純透過人工聲音彌補過度安靜，而是發展具自然可聽性且不造成環境負擔的輪胎聲學特徵，將安全需求與環境噪音控制納入同一設計框架。

展望未來，電動車輪胎噪音研究將朝向系統化與數位化方向發展。多物理場模擬、數位孿生與資料驅動最佳化方法，將使輪胎噪音控制得以前移至設計初期；智慧輪胎感測與主動噪音控制技術，則可能進一步改善車內外聲學體驗。整體而言，本章所建立的電動車輪胎噪音特性分析架構，為低噪音輪胎研發、電動車 NVH 設計以及未來交通噪音治理，提供了關鍵且前瞻的理論與工程基礎。

參考文獻

- [1] Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(2), 1-24. <https://doi.org/10.1177/00368504211005224>
- [2] Peutz, V. M. A. (1987). Noise of electric vehicles versus noise of ICE powered vehicles: An ill-judged comparison. *Noise Control Engineering Journal*, 29(3), 97-101.
- [3] Cesbron, J., Bianchetti, S., Pallas, M. A., Le Bellec, A., Buisson, C., Joumard, R., & Levebvre, L. (2021). Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. *Noise Mapping*, 8(1), 63-76. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0005>
- [4] Forssén, J., Kropp, W., Brunskog, J., Andersson, P., Sörensen, S., & Li, S. (2012). Auralization model for electric vehicle tire-road noise: Effect of rotation. *Acta Acustica United with Acustica*, 98(5), 785-797.
- [5] Besselink, I. J. M., van Oorschot, P. F., Meinders, E., & Nijmeijer, H. (2010). Design of an efficient, low weight battery electric vehicle based on a VW Lupo 3L. *EVS25: The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, 1-12.
- [6] Continental Tires. (2023). Electric vehicle tires – Everything you need to know. Retrieved from <https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/electric-vehicle-tires/>
- [7] Redrouthu, B. M., & Das, S. (2014). Tyre modelling for rolling resistance. *M.Sc. Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [8] ISO 362-1:2015. Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 1: M and N categories. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [9] ISO 362-3:2022. Acoustics — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 3: Indoor test. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [10] UNECE Regulation No. 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to

rolling resistance. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.

- [11] 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>
- [12] 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.
- [13] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293.
- [14] Periyathamby, H. (2004). Helmholtz resonator for reducing tire cavity resonance and in-vehicle noise. *Canadian Acoustics*, 32(4), 32-33.
- [15] 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*, 9, 2-14. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024033>
- [16] EU Regulation 2020/740. Regulation on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters. *Official Journal of the European Union*, L 177, 1-28.
- [17] UNECE Regulation No. 51. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [18] UNECE Regulation No. 138. Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [19] Evans, M. S. (2002). Tyre compounding for improved performance. Smithers Rapra Technology, Shrewsbury, UK.

- [20] Neethirajan, J., Parathodika, A. R., Hu, G. H., Nair, S. S., & Thomas, S. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art. *Functional Composite Materials*, 3, 7. <https://doi.org/10.1186/s42252-022-00035-7>
- [21] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: an investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- [22] 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>
- [23] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Liang, Z. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 101-111.
- [24] Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1993). Active noise control. *IEEE Signal Processing Magazine*, 10(4), 12-35.
- [25] Garcia-Pozuelo, D., Gauchia, A., Olmeda, E., & Diaz, V. (2017). Bump modeling and vehicle vertical dynamics prediction. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4), 1-11.
- [26] Mundo, D., Hadjit, R., Donders, S., Brughmans, M., Mas, P., & Desmet, W. (2009). Simplified modelling of rolling tyre for NVH analysis. In *Proceedings of ISMA 2009 International Conference on Noise and Vibration Engineering* (pp. 2675-2687).
- [27] Genuit, K. (2010). The future of NVH research - A challenge by new powertrains. SAE Technical Paper 2010-36-0515. <https://doi.org/10.4271/2010-36-0515>
- [28] Hazra, S., & Reddy, J. K. (2021). An aspect of noise, vibration, and harshness issues in electric vehicles. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 6(1), 23-33. <https://doi.org/10.4271/10-06-01-0002>
- [29] Hazra, S., & Reddy, J. K. (2021). An aspect of noise, vibration, and harshness issues in electric vehicles. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 6(1), 23-33.

- [30] Praticò, F. G., & Fedele, R. (2021). Electric vehicles diffusion: changing pavement acoustic design? *Noise Mapping*, 8(1), 293-304. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0023>
- [31] Emerson, R. W., Naghshineh, K., Hapeman, J., & Freeland, A. (2011). A pilot study of pedestrians with visual impairments detecting traffic gaps and surges containing hybrid vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(2), 117-127.
- [32] Kropp, W., Larsson, K., Wullens, F., & Andersson, P. (2014). Tyre/road noise generation—Modelling and understanding. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 36(6), 1-10.
- [33] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. Informex, Kisa, Sweden.
- [34] Forssén, J., Kropp, W., Brunskog, J., Andersson, P., Sörensen, S., & Li, S. (2012). Auralization model for electric vehicle tire-road noise: Effect of rotation. *Acta Acustica United with Acustica*, 98(5), 785-797.
- [35] Hucho, W. H., & Sovran, G. (1993). *Aerodynamics of road vehicles*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25, 485-537.
- [36] Zwicker, E., & Fastl, H. (1999). *Psychoacoustics: Facts and models* (2nd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [37] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293.
- [38] Huang, H. B., Huang, X. R., Ding, W. P., Yang, M. L., Yu, D. J., & Li, W. T. (2015). Uncertainty optimization of pure electric vehicle interior tire/road noise comfort based on data-driven. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108300.
- [39] Cohen, L. (1995). *Time-frequency analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [40] Pallas, M. A., Berengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101.

- [41] Kang, J. (2007). Urban sound environment. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [42] Bianco, F., Fredianelli, L., Lo Castro, F., Gagliardi, P., Fidecaro, F., & Licitra, G. (2020). Stabilization of a p-u sensor mounted on a vehicle for measuring the acoustic impedance of road surfaces. *Sensors*, 20(5), 1239.
- [43] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [44] Ryu, Y., & Jeon, J. Y. (2011). Influence of noise sensitivity on annoyance of indoor and outdoor noises in residential buildings. *Applied Acoustics*, 72(6), 336-340.
- [45] Jennings, P., Dunne, G., Williams, R., & Giudice, S. (2010). Tools and techniques for understanding the fundamentals of automotive sound quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(10), 1263-1278.
- [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] Doran, B. R., Crossland, K., Wilkening, S., & Warren, V. (2022). Investigation of the external noise emitted from electric buses in New Zealand and the need for acoustic vehicle alerting systems to improve road user safety. NZ Transport Agency Research Report 703, Wellington, New Zealand.
- [48] 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>
- [49] Hosoz, M., Direk, M., & Yigit, K. S. (2017). Performance evaluation of an integrated automotive air conditioning and heat pump system. *Energy Conversion and Management*, 141, 327-333.
- [50] Desreveaux, A., Bouscayrol, A., Castex, E., Trigui, R., Chaplais, N., & Pollini, S. (2019). Coupled thermal and energy management for a high-power electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(11), 10431-10440.
- [51] Wolsink, M. (2020). Sustainable city requires ‘recognition’—The example of environmental education under pressure from the compact city. *Land Use Policy*, 52, 174-180.

- [52] National Highway Traffic Safety Administration. (2016). Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles. *Federal Register*, 81(241), 90416-90503.
- [53] Barlow, J. M., Bentzen, B. L., & Bond, T. (2010). Blind pedestrians and the changing technology and geometry of signalized intersections: Safety, orientation, and independence. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 104(9), 558-563.
- [54] UNECE Regulation No. 138. Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [55] FMVSS 141. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141: Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [56] Laib, F., & Schmidt, J. A. (2019). Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) of electric cars and its possible influence on urban soundscape. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, Germany, 817-822.
- [57] Fiebig, A. (2020). Electric vehicles get alert signals to be heard by pedestrians: Benefits and drawbacks. *Acoustics Today*, 16(4), 37-45.
- [58] World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- [59] Peeters, B., & van Blokland, G. (2017). The noise emission model for European road traffic. Report M+P.VENOLIVA.17.1.1, TNO, Delft, Netherlands.
- [60] Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59-64.
- [61] Berkeley, N., Bailey, D., Jones, A., & Jarvis, D. (2017). Assessing the transition towards Battery Electric Vehicles: A Multi-Level Perspective on drivers of, and barriers to, take up. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 106, 320-332.
- [62] Tesla Motors Club Forum. (2023). Road noise complaints in Model 3. Retrieved from <https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/road-noise-complaints.html>

- [63] Tire Rack. (2023). Tesla Model 3 tire reviews and ratings. Retrieved from <https://www.tirerack.com/tires/surveyresults/>
- [64] Kim, S. M., & Lim, J. H. (2022). Lightweight design and crash analysis of automotive body structures with advanced high-strength steels. *International Journal of Automotive Technology*, 23, 999-1008.
- [65] Elliott, S. J. (2008). A review of active noise and vibration control in road vehicles. ISVR Technical Report No. 311, University of Southampton, Southampton, UK.
- [66] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Sommer, S., & Ronowski, G. (2014). Low noise tires for hybrid and electric vehicles. *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21)*, Beijing, China.
- [67] Wang, Q., Li, A., & Yan, J. (2025). Study on the relationship between the steady-state rolling resistance of radial tires and energy consumption of electric vehicles. *Scientific Reports*, 15, 1-12.
- [68] Zhang, D., Ivanco, A., & Filipi, Z. (2015). Model-based estimation of vehicle aerodynamic drag and rolling resistance. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 8(2), 430-441.
- [69] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., & Taryma, S. (2015). Noise generated by tyres designed for electric vehicles—results of laboratory experiments. *Proceedings of EuroNoise 2015*, Maastricht, Netherlands, 279-284.
- [70] European Commission. (2022). Commission staff working document: Impact assessment accompanying the proposal for a regulation on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers. SWD(2022) 541 final, Brussels, Belgium.
- [71] Berge, T., & Haukland, F. (2023). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 218, 109906.
- [72] Gong, S., & Zhou, J. (2020). Tire vibration characteristics analysis and structure optimization. *Shock and Vibration*, 2020, 8815749.
- [73] Daniel, J. O. (2020). Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 465, 115008.

- [74] Mundo, D., Hadjit, R., Donders, S., Brughmans, M., Mas, P., & Desmet, W. (2009). Simplified modelling of rolling tyre for NVH analysis. In Proceedings of ISMA 2009 International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven, Belgium, 2675-2687.
- [75] van der Seijs, M. V., de Klerk, D., & Rixen, D. J. (2016). General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 68-69, 217-244.
- [76] Casey, J. A., Morello-Frosch, R., Mennitt, D. J., Fristrup, K., Ogburn, E. L., & James, P. (2017). Race/ethnicity, socioeconomic status, residential segregation, and spatial variation in noise exposure in the contiguous United States. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 077017.
- [77] Prasevic, M., & Cvetkovic, D. (2017). Application of fuzzy AHP for ranking and selection of alternatives in construction project management. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1123-1135.
- [78] United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1.
- [79] Lindgren, P. (2016). The business model ecosystem. *Journal of Multi Business Model Innovation and Technology*, 4(2), 51-110.
- [80] Michelin. (2023). Pilot Sport EV: The first Michelin tire designed for sports electric vehicles. Press release, Clermont-Ferrand, France.
- [81] Pirelli. (2023). Pirelli Elect: The new technology dedicated to electric and plug-in hybrid cars. Retrieved from <https://www.pirelli.com/tyres/en-ww/car/technology/elect>
- [82] Nielsen, K. A., & Landex, A. (2014). Consumer willingness to pay for green vehicle features. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32, 383-393.
- [83] Goetchius, G. (2011). Leading the charge—the future of electric vehicle noise control. *Sound & Vibration*, 45(4), 14-17.

- [84] Clark, S. K. (Ed.). (1981). *Mechanics of pneumatic tires* (2nd ed.). US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [85] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45.
- [86] Nicolaisen, M. S., Driscoll, P. A., & Hyldal, J. (2023). Electric vehicles and the role of cities in achieving transport decarbonisation. *Energy Policy*, 173, 113369.
- [87] Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA.
- [88] Padula, S. M. (2006). Tire load capacity. In *The pneumatic tire* (pp. 181-205). US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [89] Cichomski, E. M. (2015). *Silica-silane reinforced passenger car tire treads: effect of silica morphology, silica-polymer interface structure and rubber matrix network on tire-performance properties*. Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- [90] Pidaparti, R. M., Vogt, B. D., & Koratkar, N. (2008). Influence of interface properties on the mechanical behavior of carbon nanotube-polymer composites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8(6), 2827-2833.
- [91] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. Informex, Kisa, Sweden.
- [92] Kropp, W. (1992). Structure-borne sound on a smooth tyre. *Applied Acoustics*, 26(3), 181-192.
- [93] Klein, P. (2011). On the nature of tire/road noise. *Journal of Sound and Vibration*, 330(15), 3785-3794.
- [94] Jennings, P. A. (1997). The use of simulated annealing to optimise tyre pitch sequence. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 211(6), 437-444.
- [95] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Taipei, Taiwan, 4, 3278-3283.

- [96] Li, T. (2018). A state-of-the-art review of measurement techniques on tire–pavement interaction noise. *Measurement*, 128, 325-351.
- [97] Dare, T., Ejsmont, J., & Ronowski, G. (2019). Impact of tire wear on tire rolling resistance and its influence on vehicle fuel consumption. *Energies*, 12(21), 4031.
- [98] European Parliament and Council. (2014). Regulation (EU) No 167/2013 on the approval and market surveillance of agricultural and forestry vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 60/1.
- [99] Vázquez, V. F., Terán, F., Paje, S. E., & Luong, J. (2016). Assessment of an action against environmental noise: Acoustic durability of a pavement surface with crumb rubber. *Science of the Total Environment*, 542, 223-230.
- [100] Continental Tire. (2020). Variable tread depth technology for electric vehicles. Technical white paper, Hanover, Germany.
- [101] Kim, J. H., Jeong, W. B., & Jeong, H. M. (2013). Numerical analysis of tire pattern noise using hybrid method. *Applied Acoustics*, 74(12), 1437-1449.
- [102] Erman, B., Mark, J. E., & Roland, C. M. (Eds.). (2013). *The science and technology of rubber* (4th ed.). Academic Press, Waltham, MA, USA.
- [103] Williams, M. L., Landel, R. F., & Ferry, J. D. (1955). The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 77(14), 3701-3707.
- [104] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2008). Recent advances in the theory of filler networking in elastomers. In *Filled elastomers drug delivery systems* (pp. 1-44). Springer, Berlin, Germany.
- [105] Dick, J. S., Harmon, C., & Vare, A. (2014). *Quality assurance in the rubber industry: A practical guide to ISO 9001 for the rubber and plastics industries*. Carl Hanser Verlag, Munich, Germany.
- [106] Wolff, S., Wang, M. J., & Tan, E. H. (1993). Filler-elastomer interactions. Part VII. Study on bound rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(2), 163-177.
- [107] Reuvekamp, L. A. E. M., ten Brinke, J. W., van Swaaij, P. J., & Noordermeer, J. W. M. (2002). Effects of time and temperature on the reaction of TESPT silane coupling agent during mixing with silica filler and tire rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 75(2), 187-198.

- [108] Neethirajan, J., Parathodika, A. R., Hu, G. H., Nair, S. S., & Thomas, S. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art. *Functional Composite Materials*, 3, 7.
- [109] Kaewsakul, W., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. M. (2013). Optimization of mixing conditions for silica-reinforced natural rubber tire tread compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 86(2), 313-329.
- [110] Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(19), 57-63.
- [111] Mark, J. E., Erman, B., & Roland, M. (Eds.). (2013). *The science and technology of rubber* (4th ed.). Academic Press, Waltham, MA, USA.
- [112] Hogan, T. E., Randall, A. M., & D'Sidocky, R. (2004). Styrene-butadiene polymers for tire tread compounds. *Rubber World*, 230(5), 34-39.
- [113] Continental AG. (2015). ContiSilent technology: Silent ride for premium vehicles. Press release, Hanover, Germany.
- [114] Kim, Y. H., Hwang, W. S., & Song, O. S. (2007). Experimental validation for reduction of tire cavity noise using polyurethane foam. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 17(9), 848-854.
- [115] Bolton, J. S., & Kim, N. (2010). Use of CFD to calculate the dynamic resistive end correction for microperforated materials. *Acoustics Australia*, 38(3), 134-139.
- [116] Kim, S. J., Lee, H. M., & Seong, W. J. (2012). A study on the improvement of sound quality for a passenger car utilizing an active noise control system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 226(1), 65-76.
- [117] Jazar, R. N. (2017). *Vehicle dynamics: Theory and application* (3rd ed.). Springer, Cham, Switzerland.
- [118] Schuring, D. J., & Futamura, S. (1990). Rolling loss of pneumatic highway tires in the eighties. *Rubber Chemistry and Technology*, 63(3), 315-367.
- [119] Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: A textbook in tribology*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

- [120] Pusztaí, Z., Kőrös, P., & Szauter, F. (2024). Examination of the resistance components of an energy-efficient electric vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 2848(1), 012011.
- [121] Koutný, F., Krmela, J., Radford, D. W., & Krmelová, V. (2004). Rolling resistance and industrial pneumatic tires. *Scientific Proceedings of the Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, 50(1), 1-12.
- [122] Pillai, P. S. (2009). A review of the factors influencing tyre rolling resistance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(8), 969-978.
- [123] Ebbott, T. G., Hohman, R. L., Jeusette, J. P., & Kerchman, V. (1999). Tire temperature and rolling resistance prediction with finite element analysis. *Tire Science and Technology*, 27(1), 2-21.
- [124] Cho, J. R., Lee, H. W., Jeong, W. B., Jeong, K. M., & Kim, K. W. (2013). Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire. *International Journal of Solids and Structures*, 50(1), 86-96.
- [125] Hall, D. E., & Moreland, J. C. (2001). Fundamentals of rolling resistance. *Rubber Chemistry and Technology*, 74(3), 525-539.
- [126] Heinrich, G., Grosch, K. A., & Vilgis, T. A. (2002). Rubber friction, tread deformation and tire traction. *Wear*, 265(7-8), 1052-1060.
- [127] Hogan, T. E., Randall, A. M., & D'Sidocky, R. (2004). Styrene-butadiene polymers for tire tread compounds. *Rubber World*, 230(5), 34-39.
- [128] Nakajima, N., & Harrell, E. R. (1984). Star-shaped polymers. *Rubber Chemistry and Technology*, 57(5), 1065-1086.
- [129] Stöckelhuber, K. W., Das, A., & Klüppel, M. (2017). Designing of elastomer nanocomposites: From theory to applications. In *Designing of elastomer nanocomposites: From theory to applications* (pp. 1-19). Springer, Cham, Switzerland.
- [130] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2008). Recent advances in the theory of filler networking in elastomers. In *Filled elastomers drug delivery systems* (pp. 1-44). Springer, Berlin, Germany.

- [131] Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(19), 57-63.
- [132] Wang, M. J. (1998). Effect of polymer-filler and filler-filler interactions on dynamic properties of filled vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*, 71(3), 520-589.
- [133] Görl, U., Hunsche, A., Müller, A., & Koban, H. G. (1997). Investigations into the silica/silane reaction system. *Rubber Chemistry and Technology*, 70(4), 608-623.
- [134] Reuvekamp, L. A. E. M., ten Brinke, J. W., van Swaaij, P. J., & Noordermeer, J. W. M. (2002). Effects of time and temperature on the reaction of TESPT silane coupling agent during mixing with silica filler and tire rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 75(2), 187-198.
- [135] Hunsche, A., Görl, U., Müller, A., Knaack, M., & Göbel, T. (1997). Investigations concerning the reaction silica/organosilane and organosilane/polymer. Part 1: Reaction mechanism and reaction model for silica/organosilane. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 50(12), 881-889.
- [136] Kim, K. W., Kim, D. H., Kim, S. H., & Jeon, W. S. (2012). Development of a tire model based on an analysis of tire strain obtained by an intelligent tire system. *International Journal of Automotive Technology*, 13(3), 442-448.
- [137] Futamura, S. (2004). Reduced rolling resistance tires. *Tire Technology International*, 12(3), 54-57.
- [138] Schuring, D. J. (1980). The rolling loss of pneumatic tires. *Rubber Chemistry and Technology*, 53(3), 600-727.
- [139] Korunović, N., Trajanović, M., & Stojković, M. (2007). Finite element model for steady-rolling tire analysis. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 1(1), 63-79.
- [140] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- [141] Clark, S. K. (1981). The rolling tire under load. In *Mechanics of pneumatic tires* (pp. 409-596). US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.

- [142] Schuring, D. J., & Pelz, W. (1977). Sensitivity of rolling resistance to operating conditions. *Tire Science and Technology*, 5(3), 194-214.
- [143] Michelin. (2023). Tire pressure guide for electric vehicles. Technical document, Clermont-Ferrand, France.
- [144] Kuiper, E., & van Brummelen, J. T. J. (2001). The influence of tire pressure on vehicle handling. SAE Technical Paper 2001-01-3185.
- [145] Taylor, M. M. (2003). Correlation of tire pressure with tire failures. SAE Technical Paper 2003-01-0724.
- [146] National Highway Traffic Safety Administration. (2008). Tire pressure monitoring systems: FMVSS No. 138. *Federal Register*, 73(125), 36738-36829.
- [147] Hoppe, M., & Janssen, H. (2011). Central tire inflation systems and their benefits. *ATZ Worldwide*, 113(6), 18-21.
- [148] ISO 28580:2018. Passenger car, truck and bus tyres — Methods of measuring rolling resistance. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [149] Andriaminahy, F., Amamou, A., Vinot, E., & Sauvinet, G. (2019). Comparative study of vehicle aerodynamic and rolling resistance coefficients estimation methods. Proceedings of 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Hanoi, Vietnam, 1-7.
- [150] SAE J2263. Road load measurement using onboard anemometry and coastdown techniques. SAE International, Warrendale, PA, USA.
- [151] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G., & Sommer, S. (2017). Rolling resistance and rolling noise—Does a relationship exist? *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 10(2), 514-521.
- [152] Wagner, M. P. (1974). Reinforcing silicas and silicates. *Rubber Chemistry and Technology*, 47(4), 839-853.
- [153] Fritzsche, J., & Klüppel, M. (2011). Structural dynamics and interfacial properties of filler-reinforced elastomers. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23(3), 035104.
- [154] Berge, T., Haukland, F., Mioduszewski, P., Reuter, C., & Sandberg, U. (2015). Tyre/road noise of passenger car tyres, including tyres for electric vehicles—road

- measurements. Proceedings of EuroNoise 2015, Maastricht, Netherlands, 307-312.
- [155] Michelin. (2022). Load index and speed rating guide for electric vehicles. Technical bulletin, Greenville, SC, USA.
- [156] Tesla. (2023). Model 3 specifications. Retrieved from <https://www.tesla.com/model3/specs>
- [157] BMW. (2023). BMW 3 Series specifications. Retrieved from <https://www.bmw.com/en/all-models/3-series/sedan/2023/bmw-3-series-sedan-technical-data.html>
- [158] Tire and Rim Association. (2023). Year book 2023. Copley, OH, USA.
- [159] Norris, C. J. (1965). Radial tire developments. *Rubber Chemistry and Technology*, 38(5), 1175-1186.
- [160] Hofferberth, W. (1993). Radial tire cord requirements. *Rubber World*, 208(6), 18-22.
- [161] Clark, S. K. (1981). Tire reinforcement and tire performance. In *Mechanics of pneumatic tires* (pp. 223-408). US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [162] Kawabata, S. (1989). High performance fibers. In *Comprehensive polymer science* (Vol. 5, pp. 717-738). Pergamon Press, Oxford, UK.
- [163] Gough, V. E. (1968). Tyre to ground contact pressure distribution. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Conference on Tyre Traction*, London, UK, 1-16.
- [164] DuPont. (2010). Kevlar aramid fiber for tire applications. Technical guide, Wilmington, DE, USA.
- [165] Tire and Rim Association. (2023). Load and inflation tables. In *Year book 2023* (pp. 25-67). Copley, OH, USA.
- [166] National Highway Traffic Safety Administration. (2018). Tire-related factors in the pre-crash phase. *Traffic Safety Facts Research Note DOT HS 812 506*, Washington, DC, USA.
- [167] Tire Industry Association. (2019). *Tire pressure monitoring: Best practices guide*. Bowie, MD, USA.

- [168] Rubber Manufacturers Association. (2015). Tire maintenance and safety. Technical bulletin, Washington, DC, USA.
- [169] Tesla. (2023). Model S Plaid performance specifications. Retrieved from <https://www.tesla.com/models>
- [170] Pacejka, H. B. (2012). Tire and vehicle dynamics (3rd ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [171] Futamura, S., & Goldstein, A. A. (1983). A simple pneumatic tire model for aircraft shimmy analysis. *Journal of Aircraft*, 20(4), 371-377.
- [172] Pirelli. (2022). P Zero Elect: Technical specifications for high-performance electric vehicles. Technical document, Milan, Italy.
- [173] Michelin. (2021). Porsche Taycan N0-specification Pilot Sport 4S development. Case study, Clermont-Ferrand, France.
- [174] Ebbott, T. G., Hohman, R. L., Jeusette, J. P., & Kerchman, V. (1999). Tire temperature and rolling resistance prediction with finite element analysis. *Tire Science and Technology*, 27(1), 2-21.
- [175] Veith, A. G. (1987). Tire deformation and rolling resistance. *Tire Science and Technology*, 15(2), 88-110.
- [176] Allouis, C., Amoresano, A., Giordano, D., & Russo, F. (2017). Measurement of the thermal diffusivity of a tire compound by means of infrared optical technique. *International Journal of Thermophysics*, 38, 1-14.
- [177] Goodyear. (2020). Heat management in high-performance electric vehicle tires. Technical white paper, Akron, OH, USA.
- [178] UNECE Regulation No. 30. Uniform provisions concerning the approval of pneumatic tyres for motor vehicles and their trailers. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [179] UNECE Regulation No. 54. Uniform provisions concerning the approval of pneumatic tyres for commercial vehicles and their trailers. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [180] ISO 4000:2017. Passenger car tyres and rims — Part 1: Tyres (metric series). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- [181] Ejsmont, J., Ronowski, G., Świczko-Żurek, B., & Sommer, S. (2017). Influence of load and inflation pressure on tire rolling resistance. *Tire Science and Technology*, 45(3), 206-220.
- [182] Cooper Tire & Rubber Company. (2018). Tire durability testing procedures. Internal technical document, Findlay, OH, USA.
- [183] Nelson, W. B. (1990). *Accelerated testing: Statistical models, test plans, and data analysis*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- [184] Kang, N., & Fathy, H. K. (2014). Optimal battery pack selection for electric vehicles: A vehicle-level approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(4), 1591-1600.
- [185] Tesla. (2023). Model S weight distribution specifications. Owner's manual, Palo Alto, CA, USA.
- [186] Tire Industry Association. (2020). Tire rotation guide for electric vehicles. Technical bulletin, Bowie, MD, USA.
- [187] Michelin. (2019). Tire rotation strategies for vehicles with staggered fitments. Technical guide, Greenville, SC, USA.
- [188] Piyabongkarn, D., Lew, J. Y., Rajamani, R., Grogg, J. A., & Yuan, Q. (2010). On the use of torque-biasing devices for vehicle stability control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6), 1397-1405.
- [189] Chung, D. D. L. (2012). *Carbon fiber composites*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [190] Formela, K., Sulkowski, M., Saeb, M. R., Colom, X., & Haponiuk, J. T. (2016). Assessment of microstructure, physical and thermal properties of bitumen modified with LDPE/GTR/elastomer ternary blends. *Construction and Building Materials*, 106, 160-167.
- [191] DuPont. (2015). Kevlar in tires: Forty years of performance. Technical brochure, Wilmington, DE, USA.
- [192] Bokobza, L. (2007). Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review. *Polymer*, 48(17), 4907-4920.

- [193] Kang, M., Choi, J., Kweon, J. H., Park, Y. B., & Kim, J. (2014). A study on the application of shape memory alloy wire for improving the impact resistance of composite plates. *Smart Materials and Structures*, 23(8), 085008.
- [194] Sandberg, U. (2001). Tyre/road noise—Myths and realities. Proceedings of the 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, The Hague, Netherlands, 1-10.
- [195] Kim, G. J., & Holland, D. B. (2002). Modeling tire stiffness for full vehicle analysis. SAE Technical Paper 2002-01-0626.
- [196] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta Acustica United with Acustica*, 92(6), 952-958.
- [197] Kropp, W. (1989). Structure-borne sound on a smooth tyre. *Applied Acoustics*, 26(3), 181-192.
- [198] Hayden, R. E. (1971). Roadside noise from the interaction of a rolling tire with the road surface. Proceedings of the Purdue Noise Control Conference, West Lafayette, IN, USA, 59-64.
- [199] Kim, Y. J., Thompson, D. J., & Kim, G. (2012). Experimental validation for transmission paths of tire cavity resonance noise to vehicle interior. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 22(3), 258-265.
- [200] Plunt, J. (2005). Finding and fixing vehicle NVH problems with transfer path analysis. *Sound and Vibration*, 39(11), 12-16.
- [201] Jennings, P. A. (1997). The use of simulated annealing to optimise tyre pitch sequence. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 211(6), 437-444.
- [202] Saemann, E. U. (2006). State-of-the-art computer analysis of tire and vehicle noise generation and propagation. *Tire Technology International, Annual Review 2006*, 60-64.
- [203] Li, T. (2018). Influencing parameters on tire–pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4), 38.
- [204] Andersson, P. (2007). Tyre/road noise generation and propagation: Numerical modelling, literature study and theoretical framework. VTI Rapport 601A, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden.

- [205] Yamauchi, H., & Akiyoshi, Y. (2002). Theoretical analysis of tire acoustic cavity noise and proposal of improvement technique. *JSAE Review*, 23(1), 89-94.
- [206] Klein, P., & Hamet, J. F. (2007). Road texture and rolling noise: An envelopment procedure for tire-road contact. *Noise Control Engineering Journal*, 55(6), 517-525.
- [207] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Liang, Z. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 101-111.
- [208] Li, S., Andersson, P., Kropp, W., & Thompson, D. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise under various road surface conditions. *Acta Acustica*, 4(4), 1-12.
- [209] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2014). A literature survey on tyre cavity resonance noise control. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 10(3-4), 276-293.
- [210] Payne, A. R., & Scott, J. R. (1960). *Engineering design with rubber*. Maclaren & Sons, London, UK.
- [211] Evans, M. S. (2002). *Tyre compounding for improved performance*. Smithers Rapra Technology, Shrewsbury, UK.
- [212] Persson, B. N. J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A. I., & Tosatti, E. (2005). On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(1), R1-R62.
- [213] Grosch, K. A. (2007). The rolling resistance, wear and traction properties of tread compounds. *Rubber Chemistry and Technology*, 80(3), 379-411.
- [214] Dean, B., & Bhushan, B. (2010). Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1929), 4775-4806.
- [215] Larsson, K., & Kropp, W. (2002). A high-frequency three-dimensional tyre model based on two coupled elastic layers. *Journal of Sound and Vibration*, 253(4), 889-908.

- [216] den Hartog, J. P. (1956). Mechanical vibrations (4th ed.). McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- [217] Jones, D. I. G. (2001). Handbook of viscoelastic vibration damping. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [218] Gent, A. N., & Walter, J. D. (Eds.). (2005). The pneumatic tire. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [219] Allard, J. F., & Atalla, N. (2009). Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials (2nd ed.). John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [220] Continental AG. (2016). ContiSilent durability testing and long-term performance. Technical report, Hanover, Germany.
- [221] Kim, Y. H., Seo, J. H., Lee, S. K., Lee, J. M., & Oh, J. E. (2008). Optimization of a tire cavity resonator using genetic algorithm. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 222(7), 1219-1227.
- [222] Fuller, C. R., Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1996). Active control of vibration. Academic Press, London, UK.
- [223] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden.
- [224] Bendtsen, H., Larsen, L. E., & Skov, R. (2009). Noise reduction on porous asphalt: Long-term effect. Road Directorate, Danish Road Institute, Copenhagen, Denmark.
- [225] Rasmussen, R. O., Bernhard, R. J., Sandberg, U., & Mun, E. P. (2007). The little book of quieter pavements. Report No. FHWA-IF-08-004, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA.
- [226] Pallas, M. A., Cesbron, J., Bianchetti, S., Klein, P., Hamet, J. F., & Vandermoere, F. (2022). LIFE E-VIA: Prototypal low-noise road surface for the reduction of electric vehicle rolling noise in urban area. Romanian Journal of Transport Infrastructure, 11(2), 96-104.

- [227] ISO 10844:2021. Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [228] Berge, T., & Mioduszeowski, P. (2023). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UNECE Regulation 117. Proceedings of INTER-NOISE 2023, Chiba, Japan, 4654-4663.
- [229] ISO 13325:2003. Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [230] Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Ascari, E., & Fredianelli, L. (2017). Durability and variability of the acoustical performance of rubberized road surfaces. *Applied Acoustics*, 127, 321-331.
- [231] ISO 11819-2:2017. Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [232] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., Campillo-Davo, N., & Peral-Orts, R. (2019). An alternative Drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 144, 144-155.
- [233] Ejsmont, J., Swieczko-Zurek, B., & Ronowski, G. (2014). Comparison of road and laboratory measurements of tyre/road noise. Proceedings of INTER-NOISE 2014, Melbourne, Australia, 1-10.
- [234] Fujikawa, T., Koike, H., Oshino, Y., & Tachibana, H. (2007). Definition of the representative value of tyre/road noise on various road surfaces for labeling in Japan. *Applied Acoustics*, 68(10), 1114-1127.
- [235] Bravo, T., & Maury, C. (2013). The experimental synthesis of random pressure fields: Methodology. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133(5), 2901-2914.
- [236] Johnson, D. H., & Dudgeon, D. E. (1993). *Array signal processing: Concepts and techniques*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

- [237] 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.
- [238] Thurstone, L. L. (1927). A law of comparative judgment. *Psychological Review*, 34(4), 273-286.
- [239] Osgood, C. E., Suci, G. J., & Tannenbaum, P. H. (1957). *The measurement of meaning*. University of Illinois Press, Urbana, IL, USA.
- [240] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [241] Bisping, R., & Aures, W. (1998). Objective parameters for the assessment of tire-road noise. In *Proceedings of INTER-NOISE 98*, Christchurch, New Zealand, 1-4.
- [242] Jennings, P., Dunne, G., Williams, R., & Giudice, S. (2010). Tools and techniques for understanding the fundamentals of automotive sound quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 224(10), 1263-1278.
- [243] European Commission. (2022). Proposal for amendments to UNECE Regulation 117: Stage 4 noise limits. Working document GRBP-77-24, Brussels, Belgium.
- [244] Grigoratos, T., Gustafsson, M., Eriksson, O., & Martini, G. (2018). Experimental investigation of tread wear and particle emission from tyres with different treadwear marking. *Atmospheric Environment*, 182, 200-212.
- [245] City of Paris. (2023). Low-emission and low-noise zone regulations. Environmental policy document, Paris, France.
- [246] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *Proceedings of EuroNoise 2003*, Naples, Italy, 1-6.
- [247] Cesbron, J., Yin, H., Anfosso-Lédée, F., Duhamel, D., Le Houédec, D., & Benaim, D. (2009). Acoustic emission from tyre/road contact: A combined experimental and theoretical study. *Proceedings of EuroNoise 2009*, Edinburgh, Scotland, 1-6.
- [248] Wullens, F., & Kropp, W. (2004). A three-dimensional contact model for tyre/road interaction in rolling conditions. *Acta Acustica United with Acustica*, 90(4), 702-711.

- [249] Thompson, D. J. (2008). *Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier, Oxford, UK.
- [250] ISO 10844:2021. *Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [251] UNECE Regulation No. 51.03. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions. Amendment 3*, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [252] Dittrich, M. G., & Janssens, M. H. A. (2000). Improved measurement methods for railway rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 595-609.
- [253] ISO 362-2:2009. *Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 2: Survey method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [254] Steven, H. (2005). Further noise reductions for motorized road vehicles. In *Proceedings of the Workshop of the German Federal Environmental Agency*, Berlin, Germany, 1-12.
- [255] Moore, D. B. (2005). Evaluation of the revised ISO 362 standard for vehicle exterior noise measurement. *SAE Technical Paper 2005-01-2417*.
- [256] Pang, J., Lee, S. K., & Ahn, S. J. (2011). Comparison of structure-borne and air-borne noise level of a passenger car for an idle condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 225(3), 276-289.
- [257] UNECE Regulation No. 51.03. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions*. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [258] Helfer, M. (2016). *Additional Sound Emission Provisions (ASEP) in UNECE R51.03*. Presentation at GRBP meeting, Geneva, Switzerland.
- [259] Steven, H., Bischoff, A., & Stradtner, S. (2002). *ASEP development and validation studies*. Report for the European Commission DG TREN, Contract B2000/B4-3050/ST/31, FIGE GmbH, Aachen, Germany.

- [260] European Commission. (2017). Commission Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 on type-approval of motor vehicles: Real Driving Emissions (RDE). Official Journal of the European Union, L 175, 1-643.
- [261] Berge, T., & Haukland, F. (2015). Tyre/road noise of passenger car tyres, including tyres for electric vehicles—road measurements. Proceedings of EuroNoise 2015, Maastricht, Netherlands, 307-312.
- [262] Mioduszewski, P., Ejsmont, J., Grabowski, J., & Karpiński, D. (2016). Noise map of cement concrete pavement. *Applied Acoustics*, 111, 27-33.
- [263] ISO 13325:2003. Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [264] Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2010). Acoustic aging of asphalt pavements: A Californian/Danish comparison. Report 218, Road Directorate, Danish Road Institute, Copenhagen, Denmark.
- [265] Donavan, P. R. (2006). Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and the United States. *Noise Control Engineering Journal*, 54(4), 232-240.
- [266] Anfosso-Lédée, F., & Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tyre-road noise. *Applied Acoustics*, 68(1), 1-16.
- [267] de Roo, F., Telman, J., & van Blokland, G. (2009). Uncertainty of Close Proximity (CPX) tyre-road noise measurements—Round Robin test results. Proceedings of EuroNoise 2009, Edinburgh, Scotland, 1-8.
- [268] ISO 11819-2:2017. Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [269] Descoriet, P. G. (1969). Mechanics of the pneumatic tire. In *Theory of pneumatic tire* (pp. 1-68). US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [270] ISO 3744:2010. Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Engineering methods for

an essentially free field over a reflecting plane. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- [271] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., 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*, 111, 107-116.
- [272] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2009). Experimental analysis of the structure-borne tyre/road noise due to road discontinuities. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(8), 2557-2574.
- [273] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., 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*, 111, 107-116.
- [274] UNECE Regulation No. 117. Annex 3: Test method for measuring rolling sound emissions. Appendix: Alternative drum test method. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [275] Van Veen, B. D., & Buckley, K. M. (1988). Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2), 4-24.
- [276] Christensen, J. J., & Hald, J. (2004). Beamforming. Technical Review No. 1-2004, Brüel & Kjær, Nærum, Denmark.
- [277] Sijtsma, P. (2007). CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6(4), 357-374.
- [278] Williams, E. G. (1999). Fourier acoustics: Sound radiation and nearfield acoustical holography. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- [279] Bolton, J. S., Yoo, T., & Olivieri, O. (2007). Measurement of normal incidence transmission loss and other acoustical properties of materials placed in a standing wave tube. *Brüel & Kjær Technical Review*, 1, 1-44.
- [280] Pinnington, R. J., & Briscoe, A. R. (2002). Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe. *Journal of Sound and Vibration*, 254(3), 595-617.

- [281] Scavuzzo, R. J., & Charek, L. T. (1993). Tire rolling loss prediction using FEA techniques. *Tire Science and Technology*, 21(4), 218-236.
- [282] Rothberg, S. J., Allen, M. S., Castellini, P., Di Maio, D., Dirckx, J. J. J., Ewins, D. J., Halkon, B. J., Muyshondt, P., Paone, N., Ryan, T., Steger, H., Tomasini, E. P., Vanlanduit, S., & Vignola, J. F. (2017). An international review of laser Doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 99, 11-22.
- [283] van der Seijs, M. V., de Klerk, D., & Rixen, D. J. (2016). General framework for transfer path analysis: History, theory and classification of techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 68-69, 217-244.
- [284] Verheij, J. W. (1982). Multi-path sound transfer from resiliently mounted shipboard machinery. Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, Netherlands.
- [285] Noumura, K., & Yoshida, J. (2003). Method of transfer path analysis for vehicle interior sound with no excitation experiment. *Proceedings of FISITA World Automotive Congress*, Tokyo, Japan, F03V061, 1-8.
- [286] de Klerk, D., & Ossipov, A. (2010). Operational transfer path analysis: Theory, guidelines and tire noise application. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(7), 1950-1962.
- [287] Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random data: Analysis and measurement procedures* (4th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- [288] Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297-301.
- [289] Qian, S., & Chen, D. (1999). Joint time-frequency analysis. *IEEE Signal Processing Magazine*, 16(2), 52-67.
- [290] Fyfe, K. R., & Munck, E. D. S. (1997). Analysis of computed order tracking. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(2), 187-205.
- [291] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers* (6th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- [292] IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications*. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

- [293] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [294] ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [295] Berge, T., & Gerhard, H. M. (2023). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. *Proceedings of INTER-NOISE 2023*, Chiba, Japan, 4644-4653.
- [296] Berge, T., Haukland, F., & Mioduszewski, P. (2024). Measurement uncertainty in tire/road noise testing: Analysis and recommendations. *Applied Acoustics*, 215, 109734.
- [297] ISO 5725-1:1994. *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [298] Müller, L., Nykänen, A., & Sandberg, U. (2019). Detection of AVAS sounds from quiet vehicles under urban ambient noise conditions. *Acta Acustica United with Acustica*, 105(6), 1068-1077.
- [299] UNECE Regulation No. 138.01. *Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. Amendment 1*, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [300] Hayes, J. G., & Goodarzi, G. A. (2018). *Electric powertrain: Energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [301] SAE J2889. *Measurement of minimum noise emitted by road vehicles*. SAE International, Warrendale, PA, USA.
- [302] ISO 362-3:2022. *Acoustics — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 3: Indoor test*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [303] 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.

- [304] ITU-R BS.1534-3. Method for the subjective assessment of intermediate quality level of audio systems. International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.
- [305] Genuit, K., & Bray, W. R. (2007). Prediction of sound and vibration in a vehicle cabin. In Handbook of noise and vibration control (pp. 1310-1323). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- [306] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Effects of tread wear on tire/road noise. In Tyre/road noise reference book (pp. 237-248). Informex, Kisa, Sweden.
- [307] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2018). Literature review of models on tire-pavement interaction noise. *Journal of Sound and Vibration*, 420, 357-445.
- [308] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). The finite element method: Its basis and fundamentals (7th ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [309] Kirkup, S. M. (2007). The boundary element method in acoustics: A survey. *Applied Sciences*, 9(8), 1642.
- [310] Marburg, S., & Nolte, B. (Eds.). (2008). Computational acoustics of noise propagation in fluids: Finite and boundary element methods. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [311] Li, T., Feng, J., & Burdisso, R. (2016). Validation of a CFD-vibroacoustic model for predicting tire-pavement noise. SAE Technical Paper 2016-01-1848.
- [312] Lyon, R. H., & DeJong, R. G. (1995). Theory and application of statistical energy analysis (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA.
- [313] Ohayon, R., & Soize, C. (2014). Advanced computational vibroacoustics: Reduced-order models and uncertainty quantification. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [314] Andersson, P. B. U. (2005). A semi-empirical model for truck tyre/road noise prediction. In Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal, 1-8.
- [315] Vapnik, V. N. (1995). The nature of statistical learning theory. Springer-Verlag, New York, NY, USA.
- [316] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.

- [317] Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345-1359.
- [318] Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260.
- [319] Karpatne, A., Atluri, G., Faghmous, J. H., Steinbach, M., Banerjee, A., Ganguly, A., Shekhar, S., Samatova, N., & Kumar, V. (2017). Theory-guided data science: A new paradigm for scientific discovery from data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 29(10), 2318-2331.
- [320] Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., García, S., Gil-López, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82-115.
- [321] Willard, J., Jia, X., Xu, S., Steinbach, M., & Kumar, V. (2020). Integrating physics-based modeling with machine learning: A survey. *arXiv preprint arXiv:2003.04919*.
- [322] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise—trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(1), 65-78.
- [323] World Health Organization. (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.
- [324] Pallas, M. A., Lelong, J., & Chatagnon, R. (2016). Characterisation of tyre/road noise emission and classification of road surfaces according to noise levels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 203-214.
- [325] UNECE. (2014). Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3). Document ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.6, United Nations, Geneva, Switzerland.
- [326] UNECE. (2023). Status of the 1958 Agreement and of the annexed UN Regulations. Document ECE/TRANS/WP.29/343/Rev.29, United Nations, Geneva, Switzerland.

- [327] UNECE Regulation No. 51.03. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [328] Steven, H. (2003). Additional sound emission provisions (ASEP) for limit values of tyre/road noise emissions. Report for the European Commission, Contract B2000/B4-3050/ST/31, FIGE GmbH, Aachen, Germany.
- [329] Helfer, M. (2017). ASEP testing experiences and recommendations. Presentation at GRBP-65 meeting, Geneva, Switzerland.
- [330] ATS Group. (2023). UNECE R51 vehicle noise emission approval for electric vehicles. Technical guide, Madrid, Spain.
- [331] UNECE Regulation No. 117.04. 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, Geneva, Switzerland.
- [332] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre width and noise. In Tyre/road noise reference book (pp. 131-138). Informex, Kisa, Sweden.
- [333] Mioduszewski, P., & Ejsmont, J. (2016). Truck tyre rolling noise characteristics. *Applied Acoustics*, 113, 1-9.
- [334] ISO 13325:2019. Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [335] TÜV SÜD. (2022). Amendment of UN/ECE Regulation No. 117 for tyres: New safety requirements. White paper, Munich, Germany.
- [336] Continental Tire. (2023). Electric vehicle tire identification and specifications. Product catalog, Hanover, Germany.
- [337] UNECE Regulation No. 138.01. Uniform provisions concerning the approval of Quiet Road Transport Vehicles with regard to their reduced audibility. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [338] Global NCAP. (2021). Implementation of Acoustic Vehicle Alerting Systems (AVAS) for quiet vehicles. Policy brief, London, UK.

- [339] UNECE Regulation No. 138. Annex 4: Test procedure for minimum sound requirements. United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland.
- [340] Pardo, S. A., & Menegazzo, M. (2020). Design and evaluation of acoustic vehicle alerting systems (AVAS) for electric vehicles. Proceedings of INTER-NOISE 2020, Seoul, Korea, 1-10.
- [341] Esteves, A. R. R. F. (2024). Sound design for electric vehicles: Enhancing safety and user experience through Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS). Master's Thesis, Polytechnic Institute of Porto, Portugal.
- [342] European Commission. (2019). Questions and answers on Regulation (EU) 540/2014 on sound level of motor vehicles (AVAS). Brussels, Belgium.
- [343] EU Regulation 540/2014. On the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems. Official Journal of the European Union, L 158, 131-195.
- [344] Wiener, J. G., Lathrop, B. W., & Rouse, K. (2010). Detectability of quiet vehicles by pedestrians. Report DOT HS 811 387, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [345] EU Regulation 2020/740. On the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters, amending Regulation (EU) 2017/1369 and repealing Regulation (EC) No 1222/2009. Official Journal of the European Union, L 177, 1-48.
- [346] European Commission. (2021). The new EU tyre label: What has changed. Information brochure, Brussels, Belgium.
- [347] Nexen Tire. (2021). New EU tyre labelling regulation (2020/740). Technical guide, Yangsan, South Korea.
- [348] Goodyear. (2021). Understanding the new EU tyre label. Consumer guide, Luxembourg.
- [349] Michelin. (2022). Impact of EU tyre labelling on consumer behavior: Five-year retrospective. Market research report, Clermont-Ferrand, France.

- [350] Rexfelt, O., & Hiort af Ornäs, V. (2009). Consumer acceptance of the Tyre energy efficiency label. Report for the European Commission, DGTREN, SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden.
- [351] Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2008). Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness. Yale University Press, New Haven, CT, USA.
- [352] ISO 10844:2021. Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [353] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 10-14.
- [354] ISO 11819-1:1997. Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical Pass-By method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [355] ISO 11819-2:2017. Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [356] ISO 13325:2019. Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [357] ISO 28580:2018. Passenger car, truck and bus tyres — Methods of measuring rolling resistance. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [358] ISO/TC 43/SC 1. (2023). Acoustics — Subcommittee 1: Noise. Programme of work, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [359] Environmental Protection Agency. (1982). Noise Control Act of 1972. Public Law 92-574, Washington, DC, USA.
- [360] California Vehicle Code. (2023). Division 12, Chapter 5: Noise limits. Sacramento, CA, USA.

- [361] FMVSS 141. Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 141: Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles. 49 CFR § 571.141, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC, USA.
- [362] National Highway Traffic Safety Administration. (2018). Final rule: Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles. Federal Register, 83(242), 63580-63594.
- [363] NHTSA. (2020). FMVSS 141 compliance and testing guide for manufacturers. Technical document, Washington, DC, USA.
- [364] Society of Automotive Engineers. (2019). Global harmonization of vehicle regulations: Challenges and opportunities. SAE International, Warrendale, PA, USA.
- [365] GB 1495-2002. Limits and measurement methods for noise emitted by accelerating motor vehicles. China National Standards, Beijing, China.
- [366] GB 9743-2015. Passenger car tyres. China National Standards, Beijing, China.
- [367] GB/T 37153-2018. Electric vehicles — Low-speed acoustic warning device — Performance requirements and test methods. China National Standards, Beijing, China.
- [368] International Energy Agency. (2024). Global EV Outlook 2024. IEA Publications, Paris, France.
- [369] Ministry of Ecology and Environment, China. (2023). 14th Five-Year Plan for noise pollution prevention and control. Beijing, China.
- [370] United Nations. (2023). World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29): Overview of global vehicle regulations. ECE/TRANS/WP.29/2023/1, Geneva, Switzerland.
- [371] UNECE WP.29. (2022). 1998 Agreement on Global Technical Regulations: Status and activities. Document ECE/TRANS/WP.29/1145, United Nations, Geneva, Switzerland.
- [372] Kobayashi, M., & Yoshihisa, K. (2010). Vehicle noise regulation in Japan and future prospects. R&D Review of Toyota CRDL, 41(4), 23-29.
- [373] Volkswagen Group. (2020). Global vehicle noise compliance strategy. Internal technical document, Wolfsburg, Germany.

- [374] European Commission. (2020). Study on further reduction of vehicle noise emissions. Final report, DG GROW, Brussels, Belgium.
- [375] Helfer, M. (2018). Real-world noise emissions: Concepts for future regulations. Presentation at GRBP-67 meeting, Geneva, Switzerland.
- [376] Pallas, M. A., & Bérengier, M. (2013). Vehicle noise emission monitoring: State of the art and perspectives. *Acta Acustica United with Acustica*, 99(6), 968-980.
- [377] Grigoratos, T., & Martini, G. (2020). Future developments in tyre labelling: Technical considerations. JRC Science for Policy Report, European Commission, Ispra, Italy.
- [378] European Commission. (2022). Digital product passport: Concept and implementation roadmap. Circular Economy Action Plan, Brussels, Belgium.
- [379] UNECE. (2014). Revision 3 of the 1958 Agreement: Mutual recognition of type approvals. Document ECE/TRANS/WP.29/2014/89, United Nations, Geneva, Switzerland.
- [380] European Parliament and Council. (2018). Regulation (EU) 2018/858 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles. *Official Journal of the European Union*, L 151, 1-218.
- [381] European Commission. (2019). Regulation (EU) 2019/1020 on market surveillance and compliance of products. *Official Journal of the European Union*, L 169, 1-44.
- [382] Prosser, S., Neville, S., & Hearne, A. (2015). *Product safety and liability law in the European Union*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, USA.
- [383] European Parliament and Council. (2001). Directive 2001/95/EC on general product safety. *Official Journal of the European Communities*, L 11, 4-17.
- [384] ANEC & BEUC. (2018). Market surveillance in the EU: Challenges and recommendations. Position paper, Brussels, Belgium.
- [385] CEN/CENELEC. (2023). *European standards and conformity assessment*. Information brochure, Brussels, Belgium.
- [386] Jasanoff, S. (2005). *Designs on nature: Science and democracy in Europe and the United States*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.

- [387] UNECE. (2023). Working Party on Noise and Tyres (GRBP): Terms of reference and rules of procedure. Document ECE/TRANS/WP.29/GRBP/2023/1, United Nations, Geneva, Switzerland.
- [388] ISO/TC 43/SC 1. (2023). Strategic business plan: Noise subcommittee. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [389] Guston, D. H. (2014). Understanding ‘anticipatory governance’. *Social Studies of Science*, 44(2), 218-242.
- [390] OECD. (2020). Regulatory policy and governance: Supporting economic growth and serving the public interest. OECD Publishing, Paris, France.
- [391] Shapiro, S., & Rabinowitz, R. (1997). Punishment, compensation, and law: A theory of enforceability. *American Journal of Political Science*, 41(2), 461-479.
- [392] Fiebig, A., Koch, R., & Hoege, H. (2019). Acoustic perception of road vehicles: A systematic review. *Frontiers in Psychology*, 10, 1789.
- [393] Genuit, K., & Fiebig, A. (2020). Electric vehicles: Noise emission, sound quality and perception. In *Psychoacoustics: State of the art* (pp. 285-302). Springer, Cham, Switzerland.
- [394] Brown, A. L., Kang, J., & Gjestland, T. (2011). Towards standardization in soundscape preference assessment. *Applied Acoustics*, 72(6), 387-392.
- [395] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [396] ISO 12913-1:2014. Acoustics — Soundscape — Part 1: Definition and conceptual framework. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [397] Kang, J., Aletta, F., Gjestland, T. T., Brown, L. A., Botteldooren, D., Schulte-Fortkamp, B., Lercher, P., van Kamp, I., Genuit, K., Fiebig, A., Coelho, J. L. B., Ardoino, M., & Maffei, L. (2016). Ten questions on the soundscapes of the built environment. *Building and Environment*, 108, 284-294.