

## 第十二章 特殊應用輪胎噪音 Special Application Tire Noise

### 摘要 (Abstract)

在輪胎噪音研究與管制的整體體系中，特殊應用輪胎代表了一個兼具高度工程複雜性與環境治理挑戰的關鍵領域。相較於一般乘用車輪胎，競賽輪胎、越野輪胎、冬季輪胎、重載商用車輪胎、航空輪胎及各類特種車輛輪胎，往往在極端負載、高速、高溫、低溫、非鋪裝路面或特殊操作條件下運作，其噪音產生機制、頻譜結構與環境影響，皆顯著偏離傳統輪胎噪音理論的適用範圍。本章系統性整合這些特殊應用情境下的輪胎噪音特性，說明在極致性能需求主導下，噪音如何成為不可忽視但長期被邊緣化的副產品。

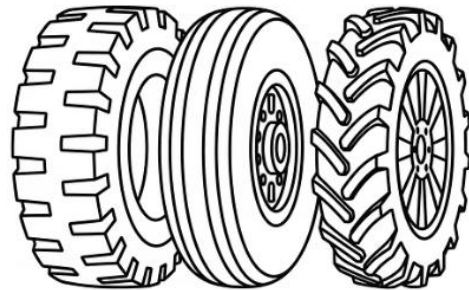


本章首先指出，特殊應用輪胎的噪音特性源自其設計目標與使用情境的根本差異。競賽輪胎為追求極致抓地力與操控性，採用極軟橡膠配方、高工作溫度與特殊結構配置，導致其噪音頻譜呈現寬頻化與高能量特性；越野輪胎因大尺寸胎塊、深溝槽與高結構剛性，在鋪裝路面上產生強烈的胎塊衝擊噪音與結構振動噪音；冬季輪胎，特別是釘刺輪胎，則因金屬釘與路面撞擊，產生高頻且高度煩擾的瞬態噪音，並伴隨道路磨損與空氣品質問題；重載輪胎因巨大結構剛性與多軸配置，對低頻與中頻交通噪音具有不成比例的貢獻；而航空與特種輪胎則在短時間、高衝擊工況下，呈現獨特且尚未被完整量化的聲學行為。

在方法論層面，本章說明傳統 ISO 與 UNECE 噪音測試方法，往往無法充分反映特殊應用輪胎的實際噪音行為，凸顯建立情境導向測試方法與專屬聲學模型的重要性。透過對不同特殊應用輪胎之噪音產生機制、測量限制與法規現況的系統整理，本章將特殊應用輪胎噪音由零散案例，提升為一個具有整體理論與治理意義的研究主題。

在輪胎噪音研究與管制的範疇中,特殊應用領域的輪胎往往因為其獨特的運作情境、極端的性能要求以及特殊的結構設計,而呈現出與一般乘用車輪胎截然不同的聲學特性(Acoustic Characteristics)與噪音產生機制。這些特殊應用輪胎包括競賽輪胎(Racing Tires)、越野輪胎(Off-Road Tires)、冬季輪胎(Winter Tires)、重載輪胎(Heavy-Duty Tires)、航空輪胎(Aircraft Tires)以及特種車輛輪胎(Special Vehicle Tires),每一類別都在其特定的作業環境下面臨獨特的挑戰與限制條件。特殊應用輪胎的噪音特性研究不僅需要深入理解傳統的輪胎-路面交互作用(Tire-Road Interaction)理論,更需要考量極端溫度、高負載、特殊路面材質、非鋪裝路面(Unpaved Surface)、超高速等因子對噪音產生與傳播的影響[1][2]。從聲學的角度而言,特殊應用輪胎的頻譜特徵(Spectral Characteristics)往往偏離常規輪胎的1000 Hz 峰值,呈現更寬廣的頻率分布或特定的諧波結構(Harmonic Structure),這些特性源於其特殊的胎面花紋設計、橡膠配方(Rubber Compound)、結構剛性(Structural Rigidity)以及工作溫度範圍[3][4]。在管制層面,特殊應用輪胎通常豁免於傳統的噪音法規如 UNECE R117 或 EU Tyre Label 要求,但這並不意味著其噪音影響可以被忽視,反而凸顯了在特定應用情境下平衡性能與環境影響的複雜性。從歷史發展的脈絡來看,特殊應用輪胎的演進始終伴隨著對極致性能的追求與對環境影響日益增長的關注之間的拉鋸戰。

二十世紀中葉,當輪胎技術從天然橡膠過渡到合成橡膠(Synthetic Rubber),從斜交胎(Bias-Ply)發展到子午線輪胎(Radial Tire)時,特殊應用領域便已開始要求超越常規標準的性能指標[5]。競賽輪胎追求極致的抓地



力(Grip)與可預測性(Predictability),即使這意味著犧牲使用壽命與舒適性;重載輪胎必須承受數十噸甚至上百噸的重量,同時維持結構完整性與可接受的滾動阻力(Rolling Resistance);航空輪胎則需要在極短的時間內承受巨大的沖擊載荷(Impact Load)與高速旋轉產生的離心力(Centrifugal Force)[6][7]。這些極端的操作條件使得特殊應用輪胎的設計成為多目標優化(Multi-Objective Optimization)的典範,其中噪音控制往往不是首要考量,但隨著環境法規日趨嚴格與公眾對噪音汙染(Noise Pollution)認知的提升,如何在維持關鍵性能的前提下降低噪音排放,已成為輪胎工程師面臨的重大挑戰。

特殊應用輪胎的聲學研究方法學(Methodology)也與常規輪胎有著顯著差異。標準的 ISO 11819-2 CPX(Close Proximity)測試方法或 ISO 362 透過試驗(Pass-By Test)往往無法直接應用於這些輪胎,因為其測試條件(如速度範圍、路面類型、載荷條件)與實際應用情境差距過大[8][9]。例如,競賽輪胎的工作溫度可能高達 100°C 以上,此時橡膠的粘彈性質(Viscoelastic Properties)與常溫狀態完全不同,產生的噪音頻譜也隨之變化;越野輪胎在非鋪裝路面上的噪音產生機制包含大量的衝擊噪音(Impact Noise)與結構振動(Structural Vibration),而非傳統的空氣泵浦效應(Air Pumping)或粘著-滑動現象(Stick-Slip)[10][11]。因此,研究特殊應用輪胎噪音需要發展專門的測試方法、建立針對性的聲學模型(Acoustic Model),並深入理解其獨特的噪音產生物理機制。

從產業與市場的角度觀察,特殊應用輪胎雖然在整體輪胎市場中占比較小(約 15-20%),但其技術複雜度高、附加價值高,且往往是輪胎製造商展示技術實力與進行創新研發的重要領域[12]。賽車運動(Motorsport)長期以來是輪胎技術創新的試驗場,許多應用於民用輪胎的技術如非對稱花紋(Asymmetric Tread Pattern)、可變節距設計(Variable Pitch Design)、矽橡膠配方(Silica Compound)等,都首先在競賽輪胎上獲得驗證[13][14]。同樣地,航空輪胎在極端負載與高速條件下的材料科學研究,對於理解橡膠在高應變率(High Strain Rate)下的力學行為具有重要價值[15]。從噪音控制的角度而言,特殊應用輪胎的研究為常規輪胎提供了寶貴的極端案例數據(Extreme Case Data),幫助建立更完整的輪胎噪音理論體系。

值得注意的是,不同特殊應用領域對噪音的關注程度與優先級存在顯著差異。在競賽運動中,噪音通常被視為性能的副產物而非主要問題,甚至某些情況下高噪音被視為高性能的象徵(如賽車引擎轟鳴與輪胎尖嘯被視為運動精神的表現)[16]。然而,隨著電動賽車(如 Formula E)的興起與環保意識的抬頭,即使在競賽領域也開始關注噪音管制[17]。重載商用車輛領域則面臨日益嚴格的城市噪音管制,歐盟與北美地區已開始要求商用車輛符合更嚴格的透過噪音標準,這直接推動了重載輪胎的低噪音技術發展[18]。航空業在機場周邊社區的噪音管制壓力下,雖然主要關注引擎與氣動噪音,但起降時的輪胎噪音也逐漸受到重視,ICAO Annex 16 對飛機噪音的整體管制間接推動了航空輪胎的聲學研究[19][20]。

本章將系統性地探討六大類特殊應用輪胎的噪音特性,涵蓋其設計原理、噪音產生機制、測量方法、相關標準法規以及降噪技術的發展趨勢。透過對這些極端應用情境的深入分析,不僅能夠豐富輪胎噪音理論的完整性,更能夠為未來的技術創新

與法規制定提供科學依據。在全球朝向永續發展(Sustainable Development)與環境友善目標邁進的背景下,即使是特殊應用領域也無法免除其環境責任,如何在極致性能與環境友善之間找到平衡,將是未來輪胎工程的核心挑戰之一。

## 12.1 競賽輪胎 (Racing Tires)

競賽輪胎代表了輪胎技術的極限追求,其設計哲學完全圍繞著在特定條件下實現最大抓地力與最佳可控性,而噪音、使用壽命、舒適性等因素通常被視為次要考量或甚至可以完全犧牲的屬性。從 Formula 1 到耐力賽(Endurance Racing)、從房車賽(Touring Car)到拉力賽(Rally),不同賽事類別的輪胎特性差異極大,但它們共同的特徵是在極端應力狀態下工作,並且產生與常規輪胎截然不同的聲學特徵[21][22]。競賽輪胎的噪音



研究不僅具有學術價值,更因為賽車運動的高可見度與技術下放效應(Technology Transfer Effect),對整個輪胎產業的發展方向具有重要影響。理解競賽輪胎的噪音特性,需要從其獨特的結構設計、極端的工作溫度、特殊的橡膠配方以及賽道表面特性等多個維度進行分析,這些因素共同決定了競賽輪胎在聲學表現上的獨特性。

競賽輪胎的結構設計與材料特性與民用輪胎有著本質差異,這些差異直接反映在其聲學行為上。最顯著的特徵是光頭胎(Slick Tire)在乾地賽道上的廣泛應用,光頭胎完全沒有傳統意義上的胎面花紋(Tread Pattern),表面光滑以最大化接地面積(Contact Patch Area),這從根本上消除了溝槽共振(Groove Resonance)這一主要的輪胎噪音來源[23][24]。然而,這並不意味著光頭胎是安靜的,相反地,由於其極軟的橡膠配方(Shore 硬度通常在 35-50 之間,遠低於民用輪胎的 60-70)以及高工作溫度(典型工作溫度 80-110°C),光頭胎在高速滾動時會產生獨特的粘著噪音(Adhesion Noise)與振動噪音,其頻譜特性主要集中在 500-2000 Hz 範圍,與輪胎結構的固有頻率(Natural Frequency)密切相關[25][26]。研究顯示,Formula 1 輪胎在高速透過時可產生超過 100 dB 的噪音,但其頻譜組成與民用輪胎顯著不同,缺乏明顯的 1000 Hz 峰值,而呈現更寬廣的頻率分布,這與其結構剛性、工作溫度以及極高的接地壓力(Contact Pressure 可達 2-3 MPa)有關[27][28]。

從材料科學的角度,競賽輪胎的橡膠配方是決定其聲學特性的關鍵因素。競賽輪胎使用特殊的合成橡膠配方,通常基於天然橡膠(Natural Rubber)、丁苯橡膠(Styrene-Butadiene Rubber, SBR)以及多種特殊添加劑的複雜混合,其玻璃轉化溫

度(Glass Transition Temperature,  $T_g$ )被精心調整以在特定工作溫度範圍內提供最佳抓地力[29][30]。這些配方在高溫下的粘彈性質與常溫下完全不同,滯後損失(Hysteresis Loss)增大導致更多的能量以熱和振動的形式耗散,部分振動能量透過輪胎結構傳播並輻射為噪音[31]。實驗數據顯示,當競賽輪胎達到最佳工作溫度時,其  $\tan \delta$ (損耗角正切, Loss Tangent)值可達 0.3-0.5,遠高於民用輪胎的 0.1-0.2,這種高滯後特性雖然提供了卓越的抓地力,但也意味著更高的噪音輻射效率[32][33]。此外,競賽輪胎為了應對極端的側向加速度(Lateral Acceleration 可達 4-5g),其側壁(Sidewall)結構通常比民用輪胎更硬且更薄,這種設計減少了側向變形但增加了結構傳遞的振動噪音,尤其在透過賽道的凹凸不平路面時,會產生明顯的衝擊噪音(Impact Noise)[34]。

不同類型的競賽活動對輪胎噪音特性有著顯著影響。在乾地環境下使用的光頭胎雖然消除了溝槽噪音,但其產生的粘著噪音與振動噪音在高速下仍然相當顯著,且噪音水平隨速度的增加呈非線性增長,實驗顯示在 Formula 1 賽車速度範圍(可達 350 km/h)內,輪胎噪音每增加 50 km/h 速度,噪音水平增加約 3-5 dB[35][36]。濕地輪胎(Wet Tire)則必須具備溝槽以排水,其花紋設計通常採用深而寬的縱向溝槽

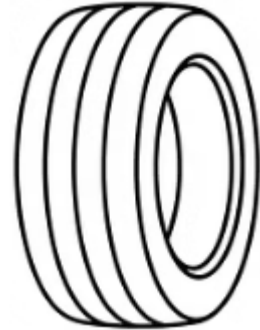


(Circumferential Groove)配合橫向溝槽(Lateral Groove),這種設計在濕地條件下能有效排水並維持抓地力,但也重新引入了溝槽共振噪音,頻率主要分布在 800-1200 Hz 範圍[37][38]。研究顯示,濕地競賽輪胎的噪音水平比光頭胎高出 5-8 dB,且噪音頻譜更接近民用輪胎,顯示溝槽結構對噪音特性的主導作用[39]。中性胎(Intermediate Tire)介於光頭胎與濕地胎之間,具有較淺的溝槽,其噪音特性也呈現中間狀態,但由於使用條件的不確定性(路面從濕到干的過渡狀態),其噪音行為更難預測且變化較大[40]。

賽道表面特性對競賽輪胎噪音的影響不容忽視。與公共道路不同,專業賽道通常使用特殊的瀝青配方,骨料粒徑更大(通常 10-20 mm)以提供更好的抓地力與排水性能,但這也意味著更粗糙的表面紋理(Surface Texture)[41][42]。研究顯示,賽道表面的平均紋理深度(Mean Texture Depth, MTD)通常在 1.5-2.5 mm 之間,遠高於普通公路的 0.5-1.0 mm,這種粗糙表面與輪胎的相互作用產生更強的振動激勵(Vibration Excitation),進而增加噪音輻射[43]。此外,某些著名賽道如紐伯林北環(Nürburgring Nordschleife)甚至保留部分混凝土路面或特殊的鋪裝材料,這些不同

的路面材質對輪胎噪音的影響各異,為競賽輪胎的聲學研究增添了複雜性[44]。值得注意的是,賽道表面在比賽過程中會因為輪胎橡膠沉積而逐漸改變其特性,所謂的"rubbered-in"賽道表面會變得更光滑且抓地力更強,這種動態變化的路面特性也會影響輪胎噪音的時間演變[45]。

競賽輪胎的噪音測量與評估方法與標準輪胎測試完全不同,傳統的 ISO 或 UNECE 測試協議在競賽環境下既不適用也無實際意義。在賽車運動中,噪音測量通常出於兩個目的:一是賽事組織方為了符合賽道周邊社區的噪音管制要求而進行的整車噪音監測;二是車隊為了診斷技術問題(如輪胎異常磨損或結構問題)而進行的車載噪音監測[46][47]。



對於賽事噪音管制,Formula 1 等頂級賽事通常在賽道邊界設置噪音計(Sound Level Meter),測量透過賽車的最大 A 權重噪音值(Maximum A-weighted Sound Pressure Level, L<sub>Amax</sub>),但這種測量包含了引擎、排氣、空氣動力學以及輪胎等所有噪音源的總和,難以單獨評估輪胎噪音的貢獻[48]。車載噪音測量則通常使用加速度計(Accelerometer)安裝在懸吊或車身結構上,配合輪速感測器(Wheel Speed Sensor)與 GPS 數據,進行時頻分析(Time-Frequency Analysis)以識別與輪胎相關的振動噪音特徵[49][50]。這些測量數據主要用於性能優化而非噪音控制,但為理解競賽輪胎的聲學行為提供了寶貴的實際數據。

從法規與環境影響的角度,競賽輪胎長期以來享有相對寬鬆的噪音管制環境,主要原因包括:賽事活動的短暫性與低頻率、賽道通常位於遠離住宅區的地點、賽車運動的經濟與文化價值被認為值得容忍其環境影響[51][52]。然而,近年來這種局面正在發生變化。一方面,許多城市街道賽(如 Monaco Grand Prix、Singapore Grand Prix)面臨日益嚴格的噪音投訴與法律挑戰;另一方面,電動賽車的興起(如 Formula E)展示了在保持競賽刺激性的同時大幅降低噪音的可能性[53][54]。Formula E 賽車的整車噪音水平約為 80-90 dB(A),遠低於傳統 Formula 1 的 130-140 dB(A),雖然其中引擎噪音的減少占主要部分,但電動車的低引擎噪音也使得輪胎噪音在總噪音中的相對重要性上升,推動了對電動賽車輪胎聲學特性的專門研究[55][56]。歐洲某些國家(如德國、奧地利)已經開始對賽道活動實施更嚴格的噪音限制,包括限制賽事時間、要求使用噪音屏障(Noise Barrier)或規定最大噪音級別,這些限制間接推動了競賽輪胎與賽車整體的降噪技術發展[57]。

競賽輪胎的噪音特性也因賽事類別的不同而呈現多樣性。房車賽(如 WTCC、DTM)使用的輪胎雖然性能導向但仍保留基本的花紋結構,因為規則通常要求使用與市售版本相似的輪胎以表現技術相關性(Technical Relevance),這類輪胎的噪音特性介於純競賽胎與高性能街胎之間[58][59]。拉力賽輪胎則面臨更複雜的挑戰,需要在柏油、碎石、泥濘、雪地等多種路面上工作,其花紋設計通常非常激進,配備大型胎塊(Tread Block)與深溝槽以應對松散路面,這種設計在柏油路面上會產生極高的噪音水平(可達 110-120 dB(A)),頻譜呈現寬頻特性且包含大量低頻成分(100-500 Hz),這是因為大型胎塊的振動模態(Vibration Mode)主要在低頻範圍[60][61]。越野拉力賽(如 Dakar Rally)使用的輪胎甚至需要應對沙漠、沙丘等極端地形,其結構強度與噪音特性已經接近特種工程輪胎,噪音研究極為稀少但具有獨特的學術價值[62]。

耐力賽輪胎(如 Le Mans 24 Hours)代表了競賽輪胎的另一個極端,需要在保持高性能的同時具備相對較長的使用壽命(一組輪胎可能需要連續使用數小時),這要求在橡膠配方與結構設計上做出折衷[63][64]。耐力賽輪胎通常採用較硬的配方(相對於短距離賽事)以降低磨耗率,但這也改變了其粘彈性質,使得噪音特性更接近高性能街胎而非純競賽胎。研究顯示,耐力賽輪胎的噪音水平隨使用時間逐漸變化,新胎時由於胎面完整且橡膠較軟,噪音水平相對較低(約 95-100 dB(A) @ 200 km/h);隨著磨損與胎面溫度上升,噪音水平先上升後下降,在使用中期達到峰值(約 105-110 dB(A));當胎面嚴重磨損接近更換標準時,噪音又會下降但頻譜特性改變,低頻成分增加而高頻成分減少[65][66]。這種噪音的動態演變反映了輪胎結構與材料特性在長時間高負載下的複雜變化,為理解輪胎磨損對噪音的影響提供了獨特視角。



賽車輪胎的噪音研究面臨諸多挑戰,包括測試環境的限制(難以在實驗室複製賽道的極端條件)、數據獲取的困難(賽事環境下難以進行詳細的聲學測量)、以及商業機密的限制(輪胎製造商與車隊對技術細節高度保密)[67][68]。儘管如此,學術界與產業界已經發展出一些創新的研究方法。例如,使用縮尺模型(Scaled Model)在實驗室滾筒台(Drum Test Rig)上進行高速測試,雖然無法完全複製實際賽道條件,但能在受控環境下研究基本的聲學機制[69]。另一種方法是利用賽後的廢棄輪胎進行解剖分析(Teardown Analysis),結合有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)與聲學模擬來反推工作狀態下的噪音特性[70]。隨著計算能力的提升,複雜的多物

理場耦合模擬(Multi-Physics Coupling Simulation)已經能夠在一定程度上預測競賽輪胎的噪音行為,雖然精度仍有限,但為設計優化提供了有價值的指導[71]。從技術發展趨勢來看,即使在以性能為首要目標的競賽領域,噪音控制也開始受到關注。一方面,如前所述,賽事組織方面臨日益嚴格的環境壓力;另一方面,某些噪音降低技術與性能提升並不矛盾,甚至可能帶來協同效益(Synergy Effect)[72]。例如,優化輪胎的結構動力學特性以減少有害的振動模態,不僅能降低噪音,還能改善操控性與舒適性(在耐力賽中駕駛舒適性對車手的持久表現有重要影響)[73]。在橡膠配方方面,引入特殊的阻尼材料(Damping Material)或多層結構設計,可以在保持抓地力的同時減少振動能量的輻射[74]。此外,輪胎內部的聲學處理技術,如填充吸音泡棉(Foam Insert)或使用共振吸收器(Resonance Absorber),雖然主要用於民用輪胎的腔體共振控制,但其原理也可能應用於競賽輪胎,特別是在封閉輪艙(Enclosed Wheel Arch)的原型賽車(Prototype Racing)中[75][76]。

值得注意的是,競賽輪胎的噪音不僅是環境問題,也與賽車的整體性能與安全性密切相關。在某些情況下,輪胎的異常噪音可以作為早期預警信號(Early Warning Signal),提示結構損傷、過度磨損或工作溫度異常等問題[77]。車隊工程師透過車載遙測系統(Telemetry System)監測輪胎的振動與噪音特徵,結合其他感測器數據進行即時診斷,這種主動監測(Active



Monitoring)已成為現代賽車技術的重要組成部分[78]。在某些極端情況下,如高速爆胎(High-Speed Blowout)事故,輪胎的破壞過程會產生特殊的聲學信號,研究這些信號特徵有助於發展更先進的安全系統[79][80]。因此,競賽輪胎的噪音研究不僅具有環境意義,還有重要的安全與性能應用價值。

從長遠來看,競賽輪胎的噪音特性研究將隨著賽車運動的電動化與永續化而獲得更多關注。Formula E 的成功已經證明,電動賽車可以在保持競技性與觀賞性的同時顯著降低環境影響,輪胎作為電動賽車主要的噪音源之一,其聲學性能將成為技術競爭的新焦點[81][82]。未來的競賽輪胎可能需要同時滿足性能、耐久性與噪音控制的多重要求,這將推動輪胎材料科學、結構設計與製造工藝的進一步創新。此外,隨著自動駕駛賽車(Autonomous Racing)如 Roborace 的出現,輪胎的聲學設計可能獲得更大的自由度,因為沒有人類駕駛員需要透過輪胎噪音來感知車輛狀態,

這為全新的降噪設計理念開啟了可能性[83]。競賽輪胎的噪音研究,雖然起步於對環境問題的回應,但最終可能成為推動整個輪胎技術進步的重要驅動力之一。

## 12.2 越野輪胎 (Off-Road Tires)

越野輪胎設計用於非鋪裝路面(Unpaved Surface)與極端地形條件,其噪音特性與產生機制與公路輪胎有著本質性的差異。從全地形輪胎(All-Terrain Tire, A/T)到泥地輪胎(Mud-Terrain Tire, M/T),從輕度越野到極端攀岩(Rock Crawling),越野輪胎需要應對鬆散土壤、碎石、泥濘、沙地、岩石等多樣化路面,這些路面的聲學阻抗(Acoustic Impedance)與反射特性與堅硬平滑的瀝青路面完全不同,導致傳統的輪胎-路面噪



音理論在很大程度上不適用[84][85]。越野輪胎的噪音問題具有雙重性:在越野環境中,其噪音往往被接受甚至被視為能力的象徵,但當這些車輛在城市道路上行駛時(許多越野車輛實際上大部分時間行駛在鋪裝路面),其激進的花紋設計會產生極高的噪音水平,成為城市噪音污染的重要來源[86][87]。理解越野輪胎的噪音特性,需要從其特殊的胎面設計、結構強度、橡膠配方以及多路面適應性等多個維度進行深入分析。

越野輪胎最顯著的特徵是其激進的胎面花紋設計,這種設計完全圍繞著在鬆散或滑溜路面上提供最大牽引力(Traction)而非降低噪音。全地形輪胎通常採用開放式花紋(Open Pattern),具有大尺寸的胎塊(Lug)、深而寬的溝槽(Deep Groove,深度可達 15-18 mm,遠高於公路胎的 7-9 mm)以及侵略性的肩部設計(Aggressive Shoulder Design),這些特徵使得輪胎能夠"咬入"鬆軟路面並自我清潔(Self-Cleaning),但在堅硬路面上會產生極高的噪音[88][89]。研究顯示,全地形輪胎在瀝青路面上的噪音水平比同尺寸的公路輪胎高出 8-12 dB,且噪音頻譜呈現明顯的寬頻特性,主要能量分布在 200-1500 Hz 範圍,缺乏公路輪胎典型的 1000 Hz 單一峰值[90][91]。泥地輪胎則更為極端,其胎塊尺寸更大(可達 30-40 mm 高度)、間距更寬(胎塊空隙率可達 50-60%,公路胎通常為 20-30%),這種設計在泥濘中能提供出色的抓地力與自清潔能力,但在公路上會產生高達 75-80 dB(A)的車內噪音(@ 80 km/h),遠超公路輪胎的 60-65 dB(A)[92][93]。

越野輪胎噪音產生的物理機制與公路輪胎有顯著差異。在公路輪胎中,空氣泵浦效應(Air Pumping)與粘著-滑動現象(Stick-Slip)是主要的噪音產生機制,而在越野輪胎中,由於其大尺寸胎塊與開放式花紋,這些機制的重要性相對降低,取而代之

的是胎塊衝擊噪音(Lug Impact Noise)與胎塊振動噪音(Lug Vibration Noise)成為主導[94][95]。當越野輪胎在堅硬路面上滾動時,每個胎塊與路面的接觸與脫離都會產生一次衝擊事件(Impact Event),類似於錘擊效應(Hammering Effect),這種週期性的衝擊激勵產生寬頻噪音,其基頻(Fundamental Frequency)與胎塊的透過頻率(Lug Pass Frequency)相關: $f = v/(n \times d)$ ,其中  $v$  是車速, $n$  是胎塊數量, $d$  是胎塊間距[96]。對於典型的全地形輪胎,在 80 km/h 速度下,胎塊透過頻率約為 40-80 Hz,但由於衝擊的脈衝特性,其頻譜包含豐富的高次諧波(Higher-Order Harmonics),擴展到數千 Hz 的範圍[97][98]。此外,大尺寸的胎塊本身具有複雜的振動模態,在接觸過程中會發生彎曲、扭轉等變形,這些變形模態的固有頻率通常在 200-800 Hz 範圍,被路面激勵後會產生持續的振盪噪音(Ringing Noise)[99]。

越野輪胎的結構設計也對其噪音特性有重要影響。為了承受越野環境的惡劣條件(如尖銳岩石的切割、高衝擊負載),越野輪胎通常採用更強韌的胎體結構(Carcass Structure),包括多層簾布層(Ply Layer,可達 6-10 層,公路輪胎通常 2-4 層)、加強的帶束層(Belt Layer)以及更厚的側壁[100][101]。這種加強設計雖然提供了必要的耐久性與防穿刺能力(Puncture Resistance),但也大幅增加了輪胎的結構剛性(Structural Stiffness),使得路面激勵更有效地傳遞到整個輪胎結構,進而輻射更多噪音。實驗顯示,越野輪胎的徑向剛性(Radial Stiffness)通常比同尺寸公路輪胎高 30-50%,側向剛性(Lateral Stiffness)高 20-40%,這種高剛性雖然改善了操控響應與負載承受能力,但也使得輪胎成為更有效的聲學輻射體(Acoustic Radiator)[102][103]。此外,越野輪胎的質量通常比公路輪胎重 20-40%(由於更多的橡膠與加強材料),這增加了非簧載質量(Unsprung Mass)與旋轉慣量(Rotational Inertia),雖然不直接影響噪音產生,但會影響懸吊系統的振動特性,間接改變車內噪音的傳遞路徑[104]。



橡膠配方方面,越野輪胎面臨著與公路輪胎不同的設計權衡(Trade-Off)。公路輪胎的配方設計主要關注滾動阻力、濕地抓地力與磨耗壽命的平衡,而越野輪胎則需要在多種路面上都能提供足夠的抓地力,同時具備優異的耐切割性(Cut Resistance)與耐磨性(Abrasion Resistance)[105][106]。這通常導致越野輪胎採用較硬的橡膠配方(Shore 硬度 60-70,某些極端用途可達 75),配合更高的炭黑填充量(Carbon Black Content)以增強強度。這種硬配方在越野環境中是必要的,但在公路上會導致與路面的順應性(Conformity)降低,增加微觀層面的粘著-滑動現象,產生更多高

頻噪音(3000-8000 Hz 範圍的刺耳聲)[107][108]。有趣的是,某些高端全地形輪胎開始採用雙層胎面設計(Dual-Layer Tread),表層使用較軟的橡膠以改善公路舒適性與降低噪音,底層使用硬橡膠以提供越野耐久性,這種設計在一定程度上緩解了性能與噪音之間的矛盾,但增加了製造複雜性與成本[109]。

不同類型的越野路面對輪胎噪音的影響差異巨大,這是越野輪胎噪音研究的獨特挑戰。在鬆軟的土壤或沙地上,路面的聲學阻抗遠低於堅硬的瀝青,聲能大部分被路面吸收或散射,實際輻射的噪音水平相對較低(通常比公路低 10-15 dB),且頻譜以低頻成分為主( $< 500$  Hz)[110][111]。在碎石路面(Gravel Surface)上,噪音產生機制變得更加複雜,除了輪胎本身的振動,石子的位移、碰撞與彈射都會產生額外的噪音,總噪音水平可能反而高於公路(增加 5-10 dB),且包含大量的瞬



態成分(Transient Component)與隨機特性(Stochastic Character)[112][113]。在堅硬的乾燥土路或壓實碎石路上,噪音特性接近但仍高於公路,主要由於路面的不規則性與粗糙度(Roughness)更大。在岩石地形上,輪胎與岩石的接觸是高度局部化與非連續的,會產生大量的衝擊噪音與結構振動,但由於速度通常很低( $< 20$  km/h),總的噪音能量相對有限[114]。這種多樣化的路面聲學特性使得越野輪胎的噪音評估必須考慮具體的使用情境,單一的測試方法難以全面表徵其噪音性能。

越野輪胎的噪音測量與標準存在顯著的空白與挑戰。傳統的 ISO 11819-2 CPX 測試或 UNECE R117 測試都是基於標準瀝青路面設計的,雖然也可以用來測量越野輪胎在公路上的噪音水平,但這只反映了其實際使用情境的一部分[115][116]。對於越野環境中的噪音測量,目前缺乏統一的國際標準,不同研究機構與輪胎製造商可能使用各自的測試方法,導致結果難以比較。一些研究採用在測試場地(Proving Ground)設置標準化的越野測試路段,包括碎石、泥濘、沙地等不同路面,在受控條件下進行透過試驗(Pass-By Test)或車內噪音測量[117][118]。然而,這些測試的可重複性(Repeatability)通常較差,因為越野路面的特性會隨天氣、使用次數等因素變化。另一種方法是使用道路模擬器(Road Simulator)在實驗室環境中複製越野路面的激勵譜(Excitation Spectrum),但目前的技術還難以充分模擬複雜的越野地形特性[119]。由於測量標準的缺乏,越野輪胎的噪音水平通常只在產品宣傳中籠統地描述為"高"、"中"或"低",缺乏精確的量化數據,這不利於消費者的知情選擇與行業的技術進步[120]。

從法規與環境影響的角度,越野輪胎面臨著日益增長的關注與壓力。在許多國家,越野車輛(如 SUV、皮卡)的市場份額持續增長,其中相當比例配備了全地形或泥地輪胎,這些車輛在城市環境中的大量使用已成為噪音污染的顯著來源[121][122]。研究顯示,在城市交通流中,配備越野輪胎的車輛雖然數量占比可能只有 10-15%,但對總噪音水平的貢獻可能達到 25-30%,因為其單車噪音水平顯著高於平均水平[123]。歐洲某些國家已開始考慮將越野輪胎納入噪音法規的管制範圍,要求其在公路上行駛時的噪音水平不得超過某一限值(如比標準公路胎高 5 dB),這推動了輪胎製造商開發"靜音全地形輪胎"(Quiet All-Terrain Tire),試圖在保持越野能力的同時降低公路噪音[124][125]。

降低越野輪胎噪音的技術挑戰遠大於公路輪胎,因為其核心的設計特徵(大胎塊、深溝槽、開放花紋)本質上與低噪音目標相矛盾。儘管如此,輪胎工程師已經發展出一些創新的降噪策略。最直接的方法是優化胎塊的排列與間距,採用變節距設計(Variable Pitch Design)以避免單一頻率的共振峰值,將噪音能量分散到更寬的頻率範圍



[126][127]。研究顯示,精心設計的非週期性胎塊排列可以將越野輪胎的峰值噪音降低 2-4 dB,同時保持越野性能。第二種策略是在胎塊上設計細小的溝槽或切口(Sipe),這些微結構可以增加邊緣數量以改善抓地力,同時破壞大尺度的振動模態,降低胎塊振動噪音[128][129]。第三種方法是採用階梯式或漸變式的胎塊高度設計(Stepped or Tapered Lug Design),使得胎塊與路面的接觸更為漸進而非突然,減少衝擊噪音的強度[130]。在材料方面,引入阻尼材料或多組分配方(Multi-Compound Formulation),在胎塊的不同部位使用不同硬度的橡膠,可以在保持越野性能的同時改善噪音特性[131]。

值得注意的是,越野輪胎的噪音不僅影響駕駛者與周圍環境,在某些情況下也對野生動物產生影響。越野活動通常在自然環境中進行,車輛與輪胎產生的噪音可能干擾野生動物的通訊、覓食與繁殖行為,這在保護區或敏感生態區域尤為關注[132][133]。一些研究顯示,越野車輛的噪音可以在數百米範圍內影響鳥類的行為,在夜間對夜行性動物的影響更為顯著。這種生態影響推動了"負責任越野"(Responsible Off-Road)運動的興起,倡導在敏感區域限制越野活動、使用低噪音車輛與輪胎、以及遵守特定的行駛路線與時間限制[134]。某些國家公園與保護

區已經實施越野車輛噪音限制,要求車輛(包括輪胎)的噪音水平不超過某一閾值才能進入,這進一步推動了越野輪胎降噪技術的發展[135]。

### 12.3 冬季輪胎 (Winter Tires)

冬季輪胎是專門為低溫、冰雪路面設計的輪胎類型,其噪音特性與產生機制既受到特殊的胎面設計(如溝槽、細溝紋)、特殊的橡膠配方(低溫柔韌性)的影響,更因為釘刺輪胎(Studded Tire)的廣泛使用而呈現出獨特的聲學行為。



在北歐國家、俄羅斯、加拿大以及美國北部等冬季嚴寒地區,冬季輪胎是車輛安全行駛的必備裝備,其中釘刺輪胎因為在冰面上的卓越抓地力而在某些地區占據主導地位(如芬蘭約 85%的冬季輪胎為釘刺型)[136][137]。然而,釘刺輪胎同時也是冬季城市噪音的主要來源,其獨特的金屬釘與路面撞擊產生的高頻噪音(Metal-Stud Contact Noise)不僅音量高,而且音質刺耳,引發廣泛的環境與公共健康關注[138][139]。理解冬季輪胎的噪音特性,需要區分釘刺與非釘刺兩大類型,並深入分析低溫環境、冰雪路面以及釘刺結構對聲學行為的複雜影響。

釘刺輪胎的噪音產生機制與常規輪胎有本質性差異,其主導噪音源是金屬釘與路面的撞擊噪音(Stud-Pavement Impact Noise)。現代釘刺輪胎通常在胎面上均勻分布 100-200 個金屬釘(取決於輪胎尺寸),每個釘刺由硬質合金釘芯(通常為碳化鎢,Tungsten Carbide)與鋁合金或塑膠基座組成,釘芯從橡膠胎面突出約 0.8-1.5 mm(稱為釘刺突出量,Stud Protrusion)[140][141]。當輪胎滾動時,每個釘刺與路面接觸都會產生一次高能量的衝擊事件,釘芯的硬度(Hardness)遠高於橡膠,撞擊產生的力脈衝(Force Impulse)持續時間極短( $< 1$  ms)但峰值極高,這種脈衝激勵產生寬頻噪音,頻譜範圍從數百 Hz 延伸到 10 kHz 以上,能量主要集中在 2000-6000 Hz 的高頻段,這正是人耳最敏感的頻率範圍,因此釘刺噪音的主觀煩擾度(Subjective Annoyance)特別高[142][143]。研究顯示,在乾燥瀝青路面上以 80 km/h 行駛時,釘刺輪胎產生的噪音水平約為 75-80 dB(A),比同類型的非釘刺冬季輪胎高出 8-9 dB,這是顯著的差異(噪音值每增加 10 dB,主觀響度約增加一倍)[144][145]。更令人關注的是,釘刺噪音的頻譜特性包含大量的高頻成分與瞬態脈衝(Transient Pulse),這些特性使其聲音聽起來格外尖銳與刺耳,心理聲學研究顯示其銳度(Sharpness)與粗糙度(Roughness)指標遠高於非釘刺輪胎,導致更強的煩擾感[146][147]。

釘刺噪音的產生機制受多種因素影響,包括釘刺的設計參數(釘芯材料、形狀、尺寸、突出量)、釘刺的數量與排列、釘刺的磨損狀態、路面的材質與狀態、以及環境溫度等[148][149]。釘芯的質量是關鍵參數之一,研究顯示釘刺噪音與釘芯質量呈近似線性關係,釘芯質量每增加 10%,噪音水平約增加 0.5-1.0 dB[150]。為了減少道路磨損與噪音,北歐國家在 1990 年代開始限制釘芯質量,目前的法規通常要求單個釘芯質量不超過 1.1-1.2 g(早期的釘刺可達 2.0 g 或更高)[151][152]。釘刺的突出量也顯著影響噪音,突出量增加會加大撞擊力度與噪音水平,但過低的突出量又會降低冰面抓地力,因此法規通常規定突出量在 0.8-1.5 mm 範圍,這是性能與環境影響的妥協[153]。釘刺的形狀設計近年來有顯著創新,從傳統的圓柱形釘芯發展出各種異形設計(如十字形、星形、橢圓形),這些新型設計試圖在保持冰面抓地力的同時降低道路磨損與噪音,某些研究顯示優化的釘芯形狀可以降低噪音 2-3 dB 而不損失性能[154][155]。



釘刺輪胎的噪音水平與路面狀態密切相關,在不同路面上呈現顯著差異。在乾燥的瀝青路面上,釘刺噪音達到最高值,因為堅硬路面提供最大的反作用力與最有效的聲能輻射[156]。在潮濕路面上,水膜(Water Film)起到一定的潤滑與阻尼作用,噪音水平略有降低(約 1-2 dB)。在被雪覆蓋的路面上,雪的鬆軟結構大幅降低了聲學阻抗,釘刺撞擊產生的能量被雪吸收,噪音水平顯著下降(可降低 10-15 dB),且頻譜特性改變,高頻成分減少而低頻成分增加[157][158]。在冰面上,釘刺的主要作用是刺入冰層以提供抓地力,撞擊噪音降低但會產生釘刺在冰中移動的摩擦噪音(Friction Noise)與冰的破裂噪音(Ice Cracking Noise),總噪音水平介於雪地與乾地之間。這種路面依賴性意味著釘刺輪胎的噪音影響在實際使用中是動態變化的,在冬季早期與晚期(路面經常乾燥無雪)時噪音問題最為嚴重,而在嚴冬積雪期間反而相對較輕[159][160]。

非釘刺冬季輪胎(也稱為磨擦輪胎,Friction Tire 或 Nordic Studless Tire)的噪音特性與釘刺型顯著不同,更接近於具有特殊花紋的常規輪胎。非釘刺冬季輪胎依賴特殊的橡膠配方(在低溫下保持柔韌性)、特殊的花紋設計(大量的細溝紋,Sipe)以及特殊的路面接觸機制(微觀吸附效應)來提供冰雪抓地力[161][162]。其橡膠配方通常使用高比例的天然橡膠與特殊的矽橡膠技術,玻璃轉化溫度(T<sub>g</sub>)被調整到-40°C 至-60°C 之間,確保在嚴寒條件下仍保持足夠的彈性[163]。這種軟配方在常溫下會導致較高的滯後損失與滾動阻力,但在冬季低溫下性能最佳。噪音方面,非釘刺冬

冬季輪胎的主要噪音源回歸到傳統的溝槽共振與空氣泵浦效應,但由於其花紋設計通常比夏季輪胎更複雜(更多的溝槽與細溝紋以應對冰雪),噪音水平仍然比夏季輪胎高 2-4 dB[164][165]。細溝紋(Sipe)的作用特別值得注意,這些薄薄的切口(寬度通常 < 1 mm,深度 5-8 mm)在胎面上密集分布,可達數千條,它們能夠在冰面上產生"邊緣效應"(Edge Effect)以增加抓地力,並能排水以破壞水膜[166]。從聲學角度,細溝紋產生額外的空氣泵浦噪音與共振噪音,但由於其尺寸很小,主要貢獻高頻噪音(> 3000 Hz),這些高頻成分容易被吸收與衰減,對總噪音水平的影響相對有限[167][168]。

環境溫度對冬季輪胎噪音的影響是其獨特性之一。橡膠的粘彈性質強烈依賴於溫度,當溫度降低時,橡膠的儲能模量(Storage Modulus,  $E'$ )增加而損耗模量(Loss Modulus,  $E''$ )下降,使得輪胎變得更硬且阻尼降低[169][170]。對於冬季輪胎,雖然其配方設計在低溫下仍保持相對柔軟,但與其在常溫下的狀態相比,低溫下的剛性仍顯著增加。這種溫度效應對噪音有複雜影響:一方面,增加的剛性使得輪胎結構振動的固有頻率上移,可能改變噪音頻譜;另一方面,降低的阻尼意味著振動能量更難被耗散,可能增加某些振動模態的噪音輻射[171][172]。實際測量顯示,非釘刺冬季輪胎的噪音水平隨溫度變化呈現非單調趨勢:在-20°C 至 0°C 範圍內,噪音水平相對穩定;當溫度上升到 0°C 以上時,橡膠軟化導致滾動阻力增加與滯後增大,某些頻率的噪音反而增加[173]。對於釘刺輪胎,溫度的影響主要透過路面狀態的變化表現(低溫時路面可能結冰或積雪,高溫時路面乾燥),釘刺與橡膠的溫度效應相對次要[174]。



冬季輪胎噪音的測量與標準面臨特殊挑戰,主要源於冬季環境條件的複雜性與變化性。標準的 ISO 11819-2 CPX 測試或 UNECE R117 測試都是在 10°C 以上的溫度與乾燥路面條件下進行的,這些條件並不代表冬季輪胎的實際使用環境[175][176]。為了更真實地評估冬季輪胎的噪音性能,需要在低溫與冰雪路面上進行測試,但這帶來諸多困難:冬季測試窗口有限(僅在冬季可進行)、路面條件難以控制(溫度、濕度、雪的深度與質地隨時變化)、測試設備在低溫下的可靠性問題等[177][178]。北歐國家在這方面積累了豐富經驗,發展出一些冬季輪胎噪音測試的專門方法。例如,瑞典 VTI 與芬蘭 VTT 建立了冬季測試場地,配備溫控環境與標準化的冰雪路面,能夠在相對受控的條件下進行可重複的噪音測量[179][180]。

這些研究機構的數據顯示,在冰面上測量時,釘刺輪胎與非釘刺輪胎的噪音差異縮小到 3-5 dB(遠小於乾燥路面上的 8-9 dB 差異),這反映了冰面作為"柔軟"路面對釘刺撞擊噪音的緩衝作用[181]。

釘刺輪胎的法規管制在不同國家差異顯著,反映了對安全效益與環境成本的不同權衡。芬蘭、瑞典、挪威等北歐國家法律允許釘刺輪胎使用,但實施嚴格的釘刺規格限制(釘芯質量、突出量、數量)並要求透過道路磨損測試(Over-Run Test),這種測試使用標準化的石塊測量釘刺對路面的磨損能力,確保新設計的釘刺不會過度磨損道路[182][183]。德國與日本



則完全禁止釘刺輪胎使用,理由是道路磨損、噪音汙染以及非釘刺技術的進步已使釘刺不再必要[184]。挪威採取最激進的環境管制措施,在奧斯陸、卑爾根等主要城市對使用釘刺輪胎的車輛徵收"釘刺稅"(Studded Tire Fee),冬季每天收費約 30-50 NOK,以經濟手段鼓勵駕駛者改用非釘刺輪胎,這一政策成功地將城市中心的釘刺輪胎使用率從 80%降低到 40%左右[185][186]。瑞典在某些城市街道也實施了釘刺禁令,特別是在空氣品質敏感區域,因為釘刺導致的道路磨損產生大量 PM10 顆粒物,對公共健康構成威脅[187]。

降低冬季輪胎噪音,特別是釘刺輪胎噪音,是北歐輪胎工業多年來的研究重點。對於釘刺輪胎,主要的降噪策略包括:優化釘刺設計(形狀、材料、質量)、改進釘刺排列(避免週期性撞擊產生特定頻率的噪音)、以及發展新型釘刺材料(如橡膠基座釘刺)[188][189]。Continental 與 Nokian 等領先製造商在 2010 年代推出的新一代釘刺採用"氣墊釘刺"(Cushioned Stud)設計,在釘芯與基座之間加入彈性緩衝層,能夠吸收部分撞擊能量,實驗顯示這種設計可降低噪音 2-3 dB 同時降低道路磨損 15-20%[190][191]。另一創新是"可伸縮釘刺"(Retractable Stud)概念,釘刺能夠根據路面狀態自動調整突出量,在乾燥路面上縮回以減少噪音與磨損,在冰面上伸出以提供抓地力,但這種複雜機制的耐久性與成本仍是挑戰[192]。對於非釘刺冬季輪胎,降噪技術與常規輪胎類似,包括優化花紋設計、採用變節距技術、以及使用特殊的降噪橡膠配方,某些高端非釘刺冬季輪胎已經能夠達到與夏季輪胎相當的噪音水平(僅高出 1-2 dB)[193][194]。

冬季輪胎噪音的社會與環境影響在北歐地區是重要的公共議題。釘刺輪胎產生的噪音不僅影響道路使用者,更對沿線居民的生活品質與健康造成影響,研究顯示長期暴露在高噪音環境下會增加心血管疾病風險、影響睡眠品質與兒童的學習能力

[195][196]。此外,釘刺導致的道路磨損產生大量的道路粉塵(Road Dust),這些粉塵中含有 PM10 與 PM2.5 顆粒物,在春季融雪後集中釋放到空氣中,造成嚴重的空氣品質問題,北歐城市春季的 PM10 濃度常常超過歐盟限值,其中 40-60%源於冬季的道路磨損[197][198]。這種複合的環境影響(噪音+空氣汙染)推動了"冬季輪胎環境成本"的公共討論,政策制定者面臨在交通安全與環境保護之間的艱難平衡。值得注意的是,非釘刺冬季輪胎技術的快速進步正在改變這一平衡。過去十年中,非釘刺輪胎在冰面上的性能顯著提升,某些最新產品的冰面制動距離已經接近釘刺輪胎(差距從過去的 50-100%縮小到 20-30%),這使得越來越多的駕駛者願意轉向非釘刺輪胎[199][200]。市場數據顯示,瑞典的非釘刺輪胎市佔率從 2000 年的 15%上升到 2020 年的 35%,這一趨勢在城市地區更為明顯[201]。然而,在極端寒冷與多冰的鄉村地區,釘刺輪胎仍被視為必要的安全裝備,完全取代釘刺輪胎在短期內並不現實。未來的發展方向可能是更精細的區域性政策:在城市與環境敏感區域限制或禁止釘刺輪胎,在鄉村與極端環境區域繼續允許,配合持續的技術創新以最小化環境影響[202][203]。

#### 12.4 重載輪胎 (Heavy-Duty Tires)

重載輪胎是指用於商用車輛(Commercial Vehicles)如卡車、巴士、拖車等的輪胎,其設計必須承受遠超乘用車的重量(單軸負載可達 10-13 噸,而乘用車僅約 500-700 公斤),同時提供足夠的耐久性以支撐高里程使用(商用車輪胎壽命通常要求 200,000-500,000 公里,遠高於乘用車的 40,000-80,000 公里)[204][205]。重載輪胎的噪音特性因其巨大的尺寸、特殊的結構設計、高負載工况以及頻繁的翻新(Retreading)而與乘用車輪胎顯著不同。從環境影響的角度,雖然重載車輛在車隊中的數量占比較小(通常< 10%),但由於其單車噪音水平高且運行里程長,對總交通噪音的貢獻達到 30-40%,在貨運幹道與高速公路上這一比例更高[206][207]。理解重載輪胎的噪音特性不僅對控制交通噪音汙染至關重要,也對貨運業的永續發展與城市夜間配送(Night Delivery)政策的制定具有重要意義。



重載輪胎的結構設計反映了其極端的使用要求,這些設計特徵深刻影響其噪音行為。與乘用車輪胎的子午線結構(Radial Structure)類似,現代重載輪胎絕大多數也採用子午線設計,但其簾布層(Ply)數量遠多(通常 10-20 層,乘用車 2-4 層),帶束層(Belt)更厚更寬,側壁更堅固[208][209]。這種加強的結構使得重載輪胎的徑向剛性與側向剛性極高,輪胎成為非常有效的振動傳遞與聲學輻射結構。實驗顯示,重載

輪胎的結構傳遞函數(Structure-Borne Transfer Function)在低頻範圍(50-300 Hz)的幅值比乘用車輪胎高 10-15 dB,意味著路面激勵更有效地轉化為結構振動[210][211]。此外,重載輪胎的質量極大(單條輪胎可達 50-80 公斤,乘用車輪胎約 8-12 公斤),巨大的旋轉質量產生顯著的陀螺效應(Gyroscopic Effect)與非簧載質量效應(Unsprung Mass Effect),影響整個車輛的動力學響應,間接改變噪音的產生與傳播特性[212]。

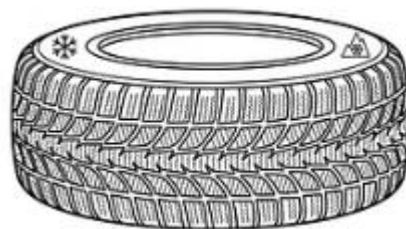
重載輪胎的胎面花紋設計是其噪音特性的關鍵決定因素,不同位置(轉向軸、驅動軸、拖車軸)的輪胎花紋設計差異顯著。轉向軸輪胎(Steer Tire)通常採用肋條花紋(Rib Pattern),具有連續的縱向溝槽與較少的橫向溝槽,這種設計提供良好的操控響應與滾動阻力,但縱向溝槽容易產生管道共振(Pipe Resonance)噪音,頻率通常在 800-1200 Hz 範圍



[213][214]。驅動軸輪胎(Drive Tire)需要提供牽引力,通常採用塊狀花紋(Block Pattern)或混合花紋(Mixed Pattern),具有更多的橫向溝槽與切口,這種設計會產生顯著的胎塊衝擊噪音與空氣泵浦噪音,噪音水平比轉向軸輪胎高 3-5 dB[215][216]。拖車軸輪胎(Trailer Tire)主要承受負載而不提供驅動力,花紋設計相對簡單,噪音水平介於前兩者之間。研究顯示,一輛典型的 18 輪重型卡車(配備 22 條輪胎,包括轉向、驅動與拖車軸),其總噪音中約 40%來自驅動軸輪胎,30%來自拖車軸輪胎,20%來自轉向軸輪胎,10%來自其他源(引擎、排氣、空氣動力)[217][218]。這種多軸配置的複雜性使得重載車輛的噪音控制必須採用系統性方法,單獨優化某一類輪胎的效果有限。

重載輪胎的噪音產生機制與乘用車輪胎基本類似,包括空氣泵浦、粘著-滑動、溝槽共振、胎塊振動等,但各機制的相對重要性與具體表現有所不同。由於重載輪胎的胎面溝槽更深(通常 15-20 mm,乘用車 7-9 mm)且更寬,溝槽共振與空氣泵浦效應更為顯著[219][220]。溝槽共振的基頻由溝槽的有效長度決定,對於重載輪胎,縱向溝槽的長度可達接觸帶長度的 3-5 倍(由於多個溝槽連接),導致共振頻率相對較低(600-800 Hz)但共振峰值更高[221]。空氣泵浦效應在重載輪胎中特別強,因為巨大的接地壓力(可達 1.0-1.5 MPa,乘用車 0.2-0.3 MPa)使得溝槽中的空氣被強力壓縮與排出,產生高強度的脈衝噪音[222][223]。胎塊衝擊噪音在驅動軸輪胎中尤為顯著,大尺寸的胎塊(高度可達 15-18 mm)與路面的週期性撞擊產生低頻噪音(100-

400 Hz),這些低頻成分雖然 A 權修正後對總噪音水平的貢獻較小,但對主觀煩擾度有重要影響,因為低頻噪音的傳播距離遠且難以被建築物遮蔽[224][225]。重載輪胎的噪音水平顯著高於乘用車輪胎,且與車速、負載、路面狀態的關係更為複雜。在標準測試條件下(80 km/h 速度,標準 ISO 10844 路面),重載輪胎的透過噪音水平約為 72-76 dB(A),比同速度下的乘用車輪胎(68-72 dB(A))高出 4-8 dB[226][227]。然而,重載車輛通常在高速公路上以較高速度行駛(100-110 km/h),此時噪音水平可達 78-82 dB(A)。負載對噪音的影響非常顯著,從空載到滿載,噪音水平可增加 5-8 dB,這是因為負載增加導致接地壓力上升、接觸帶長度增加,進而增強所有噪音產生機制[228][229]。路面狀態的影響也更為顯著,在粗糙的混凝土路面上,重載輪胎的噪音比在光滑瀝青路面上高出 10-12 dB,遠大於乘用車的 5-7 dB 差異,這反映了高負載與粗糙路面的協同激勵效應[230][231]。此外,重載輪胎的磨損對噪音的影響呈現非單調趨勢:新胎時溝槽深度最大,共振與空氣泵浦效應強,噪音相對較高;隨著磨損,溝槽變淺,這些效應減弱,噪音暫時降低;當磨損接近輪胎壽命末期(剩餘溝槽深度 < 5 mm)時,胎面變硬且不規則磨損增加,噪音又會上升[232][233]。



輪胎翻新(Retreading)是重載輪胎行業的重要特徵,對噪音特性有獨特影響。由於重載輪胎成本高昂(單條可達數百至上千美元),翻新是延長輪胎壽命、降低運營成本的經濟手段,商用車輪胎通常可翻新 2-3 次,總壽命可達百萬公里級[234][235]。翻新過程包括檢查胎體(Casing Inspection)、打磨舊胎面(Buffing)、貼合新胎面(Tread Application,可以是預硫化胎面或冷翻新橡膠)、以及硫化(Curing)[236]。翻新輪胎的噪音特性取決於多個因素:胎體的狀態(多次翻新後胎體可能出現疲勞與剛性變化)、新胎面的花紋設計(可能與原廠不同)、胎面與胎體的粘合品質(不良粘合可能產生額外振動)等[237][238]。研究顯示,高品質的翻新輪胎噪音水平與新胎相當,甚至可能略低(因為胎體經過磨合更加穩定),但低品質翻新輪胎可能因為胎面不規則或粘合不良而產生異常噪音,增加 3-5 dB[239][240]。歐洲法規(UNECE R117 修正案)要求翻新輪胎也必須符合噪音限值,並要求在輪胎上標示翻新次數與翻新者資訊,以確保翻新品質[241]。

重載輪胎的噪音測量遵循與乘用車輪胎類似的標準,但有特殊規定。UNECE R117 與 EU Regulation 2020/740 都涵蓋商用車輪胎,但測試條件有所調整:測試速度通

常為 80 km/h(C1 類乘用車輪胎)或 70 km/h(C2/C3 類商用車輪胎),負載條件為額定負載的 70-80%[242][243]。由於重載輪胎尺寸與負載的巨大範圍(從輕型商用車的小尺寸輪胎到超重型運輸的巨型輪胎),法規設定了不同的噪音限值類別。例如,EU 2020/740 規定 C3 類輪胎(重型卡車)的噪音限值為 73-76 dB(A),具體數值取決於輪胎寬度[244]。測試方法上,由於重載車輛的複雜性(多軸、多輪胎位置),整車透過試驗更為常用,測量時要求車輛以恆定速度(通常 50 或 80 km/h)加速透過,記錄最大噪音值[245][246]。近場測量方法(如 CPX)在重載輪胎研究中也有應用,但需要特製的拖車以承受重載輪胎的重量與尺寸,目前主要用於研究目的而非非常規認證[247]。

重載輪胎的噪音法規管制經歷了逐步嚴格化的過程。早期的法規(如 UNECE R51 對車輛噪音的管制)並未專門針對輪胎,直到 1990 年代輪胎被認識為主要噪音源後,才發展出專門的輪胎噪音法規[248][249]。歐盟在 2001 年引入 EC Directive 2001/43/EC,首次對輪胎噪音設定限值,此後經過多次修訂逐步降低限值。最新的 EU Regulation 2020/740(取代之前的 EC 661/2009)進一步



收緊了噪音限值,並引入分階段實施機制(Phase 1 從 2024 年開始,Phase 2 從 2026 年開始),每階段降低 1-2 dB[250][251]。這種漸進式收緊策略給予輪胎產業時間進行技術開發,同時持續推動噪音水平的下降。美國的 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)也在考慮類似的輪胎噪音法規,但目前尚未實施強制性限值,主要依賴自願性標準[252]。值得注意的是,對重載輪胎的噪音管制必須平衡安全性與經濟性,過度激進的降噪要求可能導致輪胎耐久性下降或成本大幅上升,影響貨運業的經營,因此法規制定需要充分的產業諮詢與技術可行性評估[253][254]。

降低重載輪胎噪音的技術挑戰在於必須在嚴格的耐久性、負載承受力與經濟性約束下實現降噪。不同於乘用車輪胎可以使用矽橡膠等高成本材料,商用車輪胎面臨激烈的成本競爭,材料成本的增加必須極為審慎[255][256]。儘管如此,重載輪胎產業已經發展出多種有效的降噪技術。第一類是花紋優化技術,包括採用變節距設計、優化溝槽幾何(寬度、深度、角度)、減少橫向溝槽數量或改用細切口(Sipe)取代部分溝槽[257][258]。某些先進的重載輪胎採用"3D 溝槽"設計,溝槽壁不是簡單的平面而是具有起伏結構,這種設計能夠降低溝槽共振的品質因數(Quality Factor),減少共振峰值噪音 2-3 dB[259]。第二類是材料技術,雖然不能大量使用矽

橡膠,但可以在局部(如胎肩部位)使用特殊配方或在胎面底層使用阻尼材料,以減少特定頻率的振動噪音[260][261]。第三類是結構技術,透過優化帶束層的設計(層數、角度、材料)以降低輪胎的某些振動模態,特別是 250 Hz 附近的主要腔體共振模態[262]。第四類是創新的降噪裝置,如某些製造商開發的"噪音吸收器"(Noise Absorber),類似於乘用車輪胎的內置泡棉,但針對重載輪胎的大尺寸與高負載進行了特別設計[263]。

重載輪胎的噪音不僅影響環境,也影響駕駛者的健康與舒適。長途卡車駕駛員每天暴露在高噪音環境中長達 8-12 小時,研究顯示這種長期暴露會導致聽力損失、疲勞、壓力增加以及心血管問題風險上升[264][265]。卡車駕駛室內的噪音水平通常在 70-85 dB(A),其中 50-60%源於輪胎噪音(透過結構傳播



與空氣傳播兩種途徑),剩餘來自引擎與風噪[266][267]。因此,降低輪胎噪音不僅是環境問題,也是職業健康問題。某些國家(如德國、荷蘭)已經將卡車駕駛室內噪音納入職業安全法規,要求採取降噪措施以保護駕駛員健康[268]。輪胎製造商與車輛製造商合作開發"靜音卡車"(Quiet Truck)技術,包括使用低噪音輪胎、改進懸吊隔振、加強駕駛室隔音等綜合措施,某些最新的卡車已能將駕駛室噪音降低到 65-70 dB(A),顯著改善駕駛環境[269][270]。

重載車輛噪音管制對城市物流(Urban Logistics)與夜間配送政策有重要影響。為了減少白天的交通擁擠與碳排放,許多城市鼓勵或要求貨物配送轉移到夜間進行,但夜間噪音管制更為嚴格(通常要求比白天低 10-15 dB),這對重載車輛的噪音提出極高要求[271][272]。歐洲的 PIEK(Peak-Hour Delivery Programme)項目開發了"夜間配送認證"系統,認證符合嚴格噪音標準的車輛(包括輪胎、操作程序等全方位要求)可以獲得夜間配送許可[273]。日本的"Silent Truck"標準也設定了夜間配送車輛的噪音限值(< 65 dB(A) @ 50 km/h),推動物流業採用低噪音輪胎與車輛[274]。這些政策推動了"城市物流輪胎"(Urban Logistics Tire)這一新細分市場的發展,這類輪胎在保持必要負載能力的同時,優先考慮低噪音與低速操控性能,滾動阻力與極高速性能則為次要考量[275][276]。

從全球視角來看,重載輪胎的噪音問題在發展中國家與發達國家呈現不同特徵。發達國家的重載車輛通常配備較新的、符合環保法規的輪胎,道路狀況良好,噪音問題相對可控;發展中國家則常見老舊車輛、劣質輪胎、路面狀況差的組合,導致極高的噪音水平(可高出發達國家 10-15 dB)[277][278]。隨著這些國家經濟的發展

與環保意識的提升,重載輪胎的噪音管制將逐步加強,這為輪胎產業提供了巨大的市場機遇,也是全球噪音汙染控制的重要戰場。世界衛生組織(WHO)與聯合國環境規劃署(UNEP)已經開始關注發展中國家的交通噪音問題,推動制定國際統一的輪胎噪音標準,以確保全球範圍內的環境品質改善[279][280]。

### 12.5 航空輪胎 (Aircraft Tires)

航空輪胎代表了輪胎技術的另一個極端,其工作條件之苛刻遠超任何地面車輛:起飛時必須在數秒內加速到超過 200 km/h 的速度,承受數十噸甚至上百噸的垂直負載與巨大的離心力;降落時從零速度瞬間承受高速衝擊(著陸速度通常 250-300 km/h),輪胎在接觸跑道瞬間從靜止加速到與飛機速度相同,產生極端的摩擦與熱量;此後進行緊急制動,在短距離內將飛機



減速至安全滑行速度[281][282]。在這些極端工况下,航空輪胎產生的噪音同樣極端,但其特性、影響與管制策略與地面車輛輪胎完全不同。航空輪胎噪音主要在起降階段產生,持續時間短暫(通常數十秒),但噪音水平極高(可達 110-120 dB),是飛機總噪音的重要組成部分,特別是在降落階段當引擎推力降低後,輪胎噪音與其他機體噪音(Airframe Noise,包括起落架、襟翼等)成為主導噪音源[283][284]。理解航空輪胎噪音需要從航空噪音管制的整體框架、輪胎的極端設計特徵、以及起降過程的複雜物理過程等多個維度進行分析。

航空輪胎的結構設計完全圍繞著極端負載與安全性要求,噪音從未是設計的主要考量。典型的民航客機主起落架(Main Landing Gear)輪胎直徑約 1.0-1.2 米,寬度 0.3-0.5 米,充氣壓力極高(通常 1.2-1.5 MPa,即 12-15 bar,遠高於汽車輪胎的 2.0-2.5 bar)[285][286]。這種高壓設計是為了在有限的輪胎尺寸與重量下承受巨大負載(單個輪胎的額定負載可達 20-30 噸),但也導致極硬的結構剛性與極小的接觸帶面積(相對於負載),接地壓力可達 2.0-3.0 MPa[287]。航空輪胎的胎體採用多層尼龍或 Kevlar 簾布(可達 20-30 層),帶束層使用高強度鋼絲或芳綸纖維,這種超強結構使得輪胎能夠承受降落時的巨大衝擊與高速旋轉產生的離心力(在最高速度下,輪胎外緣的離心加速度可達數十 g)[288][289]。胎面採用特殊的高耐磨橡膠配方,能夠承受極端的熱量(著陸瞬間胎面溫度可飆升至 200-300°C)與磨損,但這種配方通常很硬(Shore 硬度可達 80-90),進一步增加了結構剛性與聲學輻射效率[290][291]。航空輪胎噪音的主要產生階段是降落過程,具體又可分為三個子階段:著陸接觸(Touchdown)、旋轉加速(Spin-Up)與滾動制動(Rolling with Braking)[292][293]。著

陸接觸階段是噪音最強烈的時刻,當輪胎首次接觸跑道時,它處於靜止或低速旋轉狀態(前輪通常完全靜止,主輪可能有飛行中風的帶動而略微旋轉),而飛機的前進速度高達 250-300 km/h,這導致輪胎與跑道之間發生強烈的滑動摩擦(Sliding Friction),產生極高的噪音,頻譜呈寬頻特性且包含大量高頻成分(1000-10000 Hz)[294][295]。實驗測量顯示,著陸接觸的噪音峰值可達 115-120 dB(在跑道旁 25 米處),持續約 0.5-1 秒,這一瞬間的噪音甚至可能超過引擎噪音[296]。旋轉加速階段隨即發生,輪胎在強大的摩擦力下迅速加速至與飛機速度相同(這一過程通常在 0.5-1 秒內完成),期間產生強烈的振動與噪音,包括胎面橡膠的粘著-滑動噪音、輪胎結構的振動噪音、以及煙霧與橡膠顆粒排放(Rubber Debris Emission)產生的附加噪音[297][298]。滾動制動階段,輪胎開始正常滾動但同時承受強大的制動力,現代客機通常配備自動制動系統(Autobrake)與防滑系統(Anti-Skid System),控制制動力以實現最大減速效率而不鎖死輪胎,這一階段的噪音特性類似於汽車的緊急制動但強度更大,噪音水平約為 100-110 dB 並持續數十秒直至飛機減速至安全速度[299][300]。

航空輪胎噪音的頻譜特性反映了其獨特的產生機制。與汽車輪胎的主要能量集中在 1000 Hz 左右不同,航空輪胎著陸噪音的頻譜非常寬廣,從數百 Hz 延伸到 10 kHz 以上,呈現相對平坦的分布,這是高速滑動摩擦產生寬頻噪音的特徵[301][302]。在 2000-



5000 Hz 範圍內通常有一個寬廣的峰值,這與橡膠與跑道表面在微觀尺度的粘著-滑動振動頻率相關[303]。高頻成分(> 5000 Hz)雖然能量較低但對主觀煩擾有顯著影響,因為高頻噪音聽起來尖銳刺耳。旋轉加速過程中,噪音頻譜會發生動態變化,隨著輪胎轉速增加,某些與輪胎旋轉速度相關的諧波成分會逐漸顯現,但這些成分通常被寬頻噪音掩蔽而不明顯[304][305]。滾動制動階段的噪音頻譜開始向汽車輪胎的特性靠近,1000 Hz 附近的峰值變得更明顯,但仍包含大量的低頻成分(< 500 Hz),這與制動過程的脈衝特性與輪胎的大尺寸有關[306]。

航空輪胎的花紋設計與汽車輪胎有顯著差異,主要目的是排水與防滑而非降噪。由於飛機降落時的高速度,積水跑道的水滑風險(Hydroplaning Risk)極高,航空輪胎通常採用深而直的縱向溝槽(通常 4-6 條,深度可達 15-25 mm,遠深於汽車輪胎)以快速排水[307][308]。這些溝槽在高速滾動時會產生強烈的空氣泵浦噪音與溝槽共振噪音,但由於著陸噪音主要來自滑動摩擦而非正常滾動,這些機制對總噪音的貢獻相對次要。有趣的是,某些軍用飛機或特技飛行飛機使用無溝槽的光頭輪

胎(Slick Tire)以最大化乾燥跑道上的抓地力,這種輪胎的著陸噪音與有溝槽輪胎相比並無顯著差異,進一步證明滑動摩擦是航空輪胎著陸噪音的主導機制[309][310]。值得注意的是,跑道表面的特性對航空輪胎噪音有顯著影響,粗糙的跑道表面(如溝槽式跑道,Grooved Runway,專門設計用於快速排水)會產生更高的噪音,比光滑瀝青跑道高出 5-10 dB[311][312]。

航空噪音的管制是全球性的重大環境議題,但輪胎噪音在其中的地位相對邊緣。國際民航組織(ICAO)Annex 16 Volume I 是航空噪音管制的主要國際標準,規定了飛機在起飛、降落與側線(Sideline)三個測量點的噪音限值,並定義了不同的噪音分級(Chapter 3, Chapter 4, Chapter 14 等,數字越大代表越嚴格的標準)[313][314]。然而,這些標準測量的是飛機總噪音,並不單獨評估輪胎噪音,實際上很難將輪胎噪音從機體噪音中分離出來。研究估計,在降落階段,輪胎噪音約占總機體噪音(不包括引擎)的 10-20%,在著陸接觸瞬間可能短暫達到 30-40%,但平均而言其貢獻有限[315][316]。因此,降低航空輪胎噪音的動力主要來自於降低飛機整體噪音以符合日益嚴格的 ICAO 標準,而非專門針對輪胎的法規。美國 FAA 的 14 CFR Part 36 與歐洲 EASA 的 CS-36 是與 ICAO Annex 16 對應的地區性法規,同樣不單獨管制輪胎噪音[317][318]。

航空輪胎的噪音測量通常在整機噪音認證(Aircraft Noise Certification)過程中進行,遵循 ICAO Annex 16 的標準程序[319]。測量點設置在起飛跑道側方(Sideline,距跑道中心線 450 米)、起飛爬升路徑下方(Flyover,距起飛點 6500 米)、以及進場降落路徑下方(Approach,距跑道頭 2000 米),使用精密噪音計記



錄 A 權重有效感覺噪音級(Effective Perceived Noise Level, EPNL),這是一個綜合考慮噪音水平、頻譜、持續時間與純音成分的複雜指標[320][321]。這些測量無法單獨分離輪胎噪音,若要專門研究輪胎噪音,需要進行特殊的地面滾動試驗(Ground Rolling Test)或使用聲學陣列(Acoustic Array)進行源定位(Source Localization)[322][323]。某些研究機構(如 NASA、DLR)使用麥克風陣列技術在飛機起降時進行聲學成像(Acoustic Imaging),能夠識別出起落架與輪胎區域的噪音貢獻,這些研究為理解航空輪胎噪音提供了寶貴數據[324][325]。

降低航空輪胎噪音的技術研究相對有限,主要原因是:1)輪胎噪音在總飛機噪音中的占比較小;2)航空輪胎的設計優先級牢牢被安全性與極端性能主導;3)輪胎噪音持續時間短暫,對機場周邊社區的長期影響相對有限[326][327]。儘管如此,隨著引

引擎噪音與氣動噪音的持續降低(得益於高旁通比發動機、chevron 噴嘴、襟翼降噪等技術),機體噪音(包括起落架與輪胎)的相對重要性上升,推動了相關研究[328][329]。NASA 的研究顯示,透過優化起落架整流罩(Landing Gear Fairing)的設計,可以減少氣流對輪胎的激勵,降低噪音 1-2 dB[330]。某些概念性設計探索了在起落架艙內安裝吸音材料或使用主動噪音控制技術,但這些技術的重量與複雜度代價使其尚未實用化[331][332]。在輪胎本身的設計上,由於安全性的極端重要性,任何降噪改進都必須經過極為嚴格的測試與認證,這大大限制了創新的速度,目前的航空輪胎設計仍然高度保守[333]。

航空輪胎噪音對機場周邊社區的影響主要表現在降落階段,特別是夜間航班的降落[334][335]。雖然著陸接觸的極高噪音只持續 1-2 秒,但這種瞬態高噪音事件(Transient High-Noise Event)對睡眠的干擾可能比持續的中等噪音更嚴重,研究顯示突發噪音更容易引起驚醒(Awakening)與生理應激反應(Physiological Stress Response)[336][337]。某些研究建議在評估航空噪音影響時,應對瞬態事件給予更高的權重,但目前的 ICAO 標準尚未採納這一建議[338]。從機場運營的角度,降落階段的噪音管制主要透過程序性措施(Procedural Measures)實現,如優化進場航道(Approach Path)以避開敏感區域、實施夜間降落限制、要求使用較低的進場角度以減少引擎推力等,這些措施雖不直接針對輪胎噪音,但能降低降落階段的總噪音[339][340]。

特殊類型的飛機對航空輪胎噪音特性有獨特影響。軍用戰鬥機通常使用更小、更硬的輪胎,且降落速度更高(可達 350-400 km/h),著陸噪音極為劇烈,但由於軍用機場通常遠離居民區,且戰鬥機本身的引擎噪音極高,輪胎噪音相對不受關注[341][342]。大型貨機(如 Boeing 747 Freighter、Antonov An-225)由於超重的起飛重量(可達 400-600 噸),配備更多的起落架與輪胎(多達 32 個輪胎),著陸時多組輪胎幾乎同時接觸跑道,產生的總噪音顯著高於客機,但這類飛機的降落次數遠少於客機,對總噪音暴露的貢獻有限[343][344]。超音速飛機(如已退役的 Concorde)的輪胎設計需要承受更極端的速度(降落速度可達 300+ km/h)與溫度,其著陸噪音研究表明比亞音速飛機高出約 5-8 dB,但超音速民航目前幾乎不存在[345]。

值得注意的是,航空輪胎的磨損與更換頻率遠高於汽車輪胎,主要由於每次降落造成的極端磨損[346][347]。一般而言,民航客機主輪胎的使用壽命約為 200-300 次降落,之後必須翻新或報廢,前輪由於不承受制動力,壽命稍長(約 400-500 次降落)[348]。這種頻繁的更換與翻新使得航空輪胎產業形成獨特的商業模式,主要由

少數專業製造商(如 Michelin Aircraft Tire、Goodyear Aviation、Bridgestone Aviation) 主導,且高度依賴翻新業務[349][350]。翻新的航空輪胎必須符合與新胎完全相同的安全與性能標準,包括經過嚴格的測試(如動態負載測試、高速旋轉測試),但目前沒有專門的噪音測試要求[351]。

從未來發展趨勢來看,航空輪胎的噪音問題可能隨著新型飛機設計而獲得新的關注。電動飛機(Electric Aircraft)與混合電力飛機(Hybrid-Electric Aircraft)正在快速發展,這些飛機的引擎噪音顯著低於傳統噴氣式飛機,使得機體噪音(包括輪胎)的相對重要性大幅上升 [352][353]。對於短程電動飛機(如正在開發的 eVTOL, Electric Vertical Take-Off and Landing),輪胎與起落架的噪音可能成為主要噪音源之一,這將推動專門的低噪音航空輪胎技術發展[354]。此外,未來的超音速客機(如 NASA 的 X-59 Quiet Supersonic Technology)與高超音速飛機(Hypersonic Aircraft)將對輪胎提出前所未有的挑戰,不僅在性能上,噪音管制也將成為這些新型飛機獲得商業運營許可的關鍵因素[355][356]。

## 12.6 特種車輛輪胎 (Special Vehicle Tires)

特種車輛輪胎是一個涵蓋極為廣泛的類別,包括農業機械輪胎(Agricultural Tires)、工程機械輪胎(Construction Equipment Tires)、礦業運輸輪胎(Mining Haul Truck Tires)、軍用車輛輪胎(Military Vehicle Tires)、以及各種特殊用途車輛(如機場地勤車輛、港口裝卸設備、林業機械等)的輪胎[357][358]。這些輪胎的共同特點是:設計高度專業化以應對特定的作業環境與任務要求,噪音通常不是設計的首要考量,且往往在非公共道路或遠離居民區的環境中使用,因此長期以來受到的噪音管制關注較少[359][360]。然而,隨著環境意識的提升、城市化進程導致建築工地與居民區距離縮小、以及職業健康法規的強化,特種車輛輪胎的噪音問題正逐漸受到重視。理解特種車輛輪胎的噪音特性需要認識到其極端的多樣性,每一子類別都有獨特的設計特徵與噪音行為,很難一概而論,但某些共性原則仍然存在。

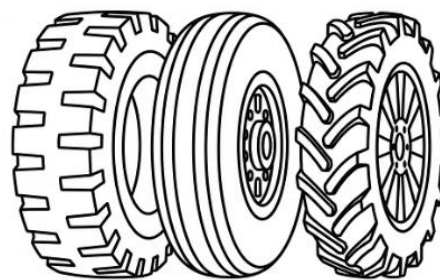
農業輪胎是特種輪胎中最大的類別之一,全球農業機械保有量巨大,其輪胎的噪音特性與影響具有獨特性[361][362]。農業輪胎的最顯著特徵是其大型的"胎棒"花紋(Lug Pattern),也稱為"人字形花紋"(Herringbone Pattern),由高大的橡膠棒(Lug,高度可達 50-100 mm)以特定角度排列組成,胎棒之間間距很大以便於自清潔並提供在泥濘土壤中的牽引力[363][364]。這種激進的花紋設計在田間作業時(鬆軟土壤、低速行駛< 15 km/h)噪音相對溫和,因為土壤的軟質表面吸收大部分聲能,且低



速降低了衝擊頻率[365]。然而,當農業機械在公路上轉場行駛時(越來越常見,因為現代農場分散且農機共享增加),其噪音水平極高,研究顯示大型拖拉機在公路上以 40-50 km/h 速度行駛時,輪胎噪音可達 85-95 dB(A),遠高於同速度的卡車[366][367]。這種高噪音源於大型胎棒與堅硬路面的劇烈衝擊,每個胎棒的接觸與脫離都產生明顯的"砰砰"聲(Thumping Sound),頻率通常在 20-80 Hz 的低頻範圍,但包含豐富的高次諧波延伸到數千 Hz[368][369]。噪音的主觀特徵是極為煩擾的脈衝性與低頻轟鳴,心理聲學指標顯示其粗糙度(Roughness)與波動強度(Fluctuation Strength)遠高於常規車輛輪胎[370]。

農業輪胎的尺寸範圍極大,從小型園藝機械的小輪胎(直徑< 0.5 米)到超大型聯合收割機與噴藥機的巨型輪胎(直徑可達 2.0-2.5 米,寬度 1.0 米以上),噪音特性隨尺寸變化顯著[371][372]。大型農業輪胎通常採用非常低的充氣壓力(0.8-1.2 bar,遠低於汽車的 2.0-2.5 bar)以增大接地面積、減少土壤壓實(Soil Compaction),這種低壓使得輪胎變形極大,在公路上行駛時結構振動劇烈,產生額外的低頻噪音與振動傳遞到駕駛室[373][374]。駕駛員長期暴露在這種高強度噪音與振動環境下,研究顯示農機操作員的聽力損失發生率顯著高於一般人群,且低頻振動導致的全身振動(Whole-Body Vibration)會引起肌肉骨骼疾病與疲勞[375][376]。某些國家(如美國、德國)已經開始將農業機械的噪音納入職業安全法規,要求採取降噪措施如改進駕駛室隔音、使用低噪音輪胎等[377]。

工程機械輪胎覆蓋裝載機(Wheel Loader)、推土機(Bulldozer,雖然主要用履帶但某些型號用輪胎)、平地機(Motor Grader)、壓路機(Road Roller)等設備,這些設備通常在建築工地、道路施工現場等環境中作業



[378][379]。工程輪胎的設計優先級是耐久性與負載能力,必須承受尖銳石塊的切割、高衝擊負載、以及長時間的超負荷工作[380]。其結構通常採用極厚的胎面(橡膠厚度可達 50-80 mm,汽車輪胎僅 8-12 mm)、多層加強簾布(可達 20 層以上)、以及特殊的耐切割配方[381][382]。花紋設計通常是深溝槽(深度 20-30 mm)配合堅固的胎塊,以提供在鬆散材料(如碎石、沙土)上的牽引力與自清潔能力[383]。這種設計在工地內部作業時產生的噪音相對可接受,因為工地環境本身就充滿各種機械噪音,且工地通常有圍欄與隔離,噪音對外界的影響有限[384]。然而,在城市地區的建築工地,特別是靠近居民區或醫院、學校等敏感建築物時,工程機械的噪音(包

括輪胎噪音)成為重要的投訴來源[385][386]。某些城市(如紐約、倫敦、東京)已實施嚴格的建築工地噪音法規,限制作業時間(禁止夜間與清晨作業)、要求使用低噪音設備、並設定工地邊界的噪音限值[387][388]。

礦業運輸輪胎代表了特種輪胎的極端,用於露天礦山的超大型運輸卡車(Ultra-Class Haul Truck),這些巨無霸車輛的載重能力可達 300-400 噸,輪胎直徑達 3.5-4.0 米,單條輪胎重量超過 5 噸[389][390]。這些輪胎在礦山的粗糙非鋪裝道路上以 30-60 km/h 的速度行駛,承受極端的負載與衝擊,每條輪胎的成本高達數萬美元,壽命通常以運行小時計(4000-8000 小時),頻繁的更換與維護是礦山運營的重大成本[391][392]。噪音方面,礦山輪胎產生極高的噪音水平(駕駛室內可達 90-100 dB(A),車外更高),噪音主要源於輪胎與粗糙路面的相互作用、大尺寸胎塊的衝擊、以及巨大結構的振動[393][394]。頻譜呈現寬頻特性,包含大量低頻成分(< 200 Hz)由於輪胎的大尺寸與低基頻[395]。礦山駕駛員長期暴露在這種極端噪音與振動環境下,聽力損失與振動病(Vibration-Related Disease)是嚴重的職業健康問題,現代礦山越來越重視採取保護措施,包括改進駕駛室隔音(使用多層隔音材料、主動降噪系統)、為駕駛員配備降噪耳罩、以及限制單次連續駕駛時間[396][397]。礦業輪胎的降噪技術研發相對有限,主要因為其極端的作業條件使得任何設計變更都必須經過長期的可靠性驗證,且礦業客戶對輪胎的首要要求是耐久性與成本效益,噪音是次要考量[398][399]。

軍用車輛輪胎是另一類高度專業化的特種輪胎,設計用於各種軍用車輛如裝甲運兵車(Armored Personnel Carrier)、軍用卡車、全地形戰術車輛等[400][401]。軍用輪胎的獨特要求包括:



防彈能力(某些設計具有防彈層或採用"泄氣續跑"技術,Run-Flat Capability)、極端環境適應性(從沙漠高溫到極地嚴寒)、快速機動性、以及高負載承受力[402][403]。這些要求導致軍用輪胎通常非常堅固與重型,結構剛性極高,噪音水平也相應很高[404]。然而,軍用輪胎的噪音特性很少被公開研究,主要原因是軍事保密性,且軍事作戰環境中噪音並非主要關注點(甚至在某些隱蔽任務中,車輛引擎噪音才是需要控制的,輪胎噪音相對次要)[405][406]。有限的公開研究顯示,某些軍用全地形輪胎在公路上行駛時的噪音水平與民用越野輪胎相當或更高,但在越野環境中由於速度較低且路面吸音,噪音影響有限[407]。值得注意的是,軍用車輛的大量集結與機動(如軍事演習、部隊調動)可能對沿線民眾造成短期的嚴

重噪音干擾,某些國家的軍方已開始關注這一問題,在規劃演習路線時盡量避開居民區並限制夜間機動[408]。

特種車輛輪胎的噪音測量與標準存在顯著的空白,絕大多數特種輪胎不受常規輪胎噪音法規(如 UNECE R117)的管制,因為這些法規明確排除了"專門設計用於越野使用"的輪胎,以及某些特殊類別車輛[409][410]。這導致特種輪胎的噪音性能很少被量化評估,製造商也缺乏降噪的法規動力。少數國家開始嘗試將某些特種車輛納入噪音管制範圍,例如歐盟的 Stage V 排放標準(主要針對非道路移動機械,Non-Road Mobile Machinery)雖然以排放為主,但也開始關注噪音問題,要求某些類別的工程機械與農業機械必須符合噪音限值[411][412]。然而,這些法規測量的是整機噪音而非單獨的輪胎噪音,且測試方法與道路車輛完全不同(通常採用靜態或半靜態測試,在指定工況下測量操作員位置或設備周邊的噪音水平)[413][414]。發展專門針對特種輪胎的噪音測試方法面臨諸多挑戰:測試場地需要能夠模擬實際作業環境(如農田、礦山道路、建築工地)、輪胎尺寸範圍極大(從小型到超大型)、負載與速度條件多樣化、以及測試成本高昂[415]。

降低特種車輛輪胎噪音的技術途徑與挑戰因類別而異,但某些共同原則存在。對於農業輪胎,主要策略是優化胎棒(Lug)的排列與形狀,採用變節距設計以減少週期性噪音,某些現代農業輪胎採用"優化節距胎棒"(Optimized Pitch Lug)設計,將噪音降低 3-5 dB 而不損失牽引力[416][417]。另一創新是"雙用途輪胎"(Dual-Purpose Tire)設計,在主要的農業胎棒之間填充較小的次級胎塊,使得輪胎在公路上行駛時有更多的接觸點,減少衝擊噪音,但在田間作業時這些次級胎塊嵌入土壤不影響主胎棒的牽引作用[418]。



對於工程機械輪胎,由於其極端的耐久性要求,降噪技術的應用空間有限,主要途徑是從系統層面著手,例如改進懸吊系統的隔振、加強駕駛室的聲學包裝(Acoustic Package)、以及採用主動噪音控制技術[419][420]。某些高端工程機械已經配備了先進的駕駛室降噪系統,能夠將駕駛室內噪音降低到 75-80 dB(A),顯著改善操作員的工作環境[421]。

對於礦業輪胎,降噪的主要動力來自職業健康法規而非環境法規,因為礦山通常位於遠離居民區的地方,環境噪音投訴較少,但礦工的職業暴露是嚴重問題[422][423]。國際勞工組織(ILO)與各國的職業安全法規(如美國的 MSHA, Mine Safety and Health Administration)對礦山作業的噪音暴露設定了嚴格限值(通常為

85-90 dB(A)的 8 小時時間加權平均值,Time-Weighted Average),超過限值必須採取工程控制或個人防護措施[424][425]。由於礦山運輸車輛的極端噪音水平(駕駛室內常超過 90 dB(A)),單純依靠輪胎降噪難以達標,實際的控制策略通常是多管齊下:使用最佳可行的低噪音輪胎(Best Available Low-Noise Tire)、全面改造駕駛室的聲學設計(包括使用雙層玻璃、多層隔音材料、密封所有縫隙)、安裝主動降噪系統、以及要求駕駛員佩戴聽力保護裝置(Hearing Protection Device)[426][427]。某些先進礦山還採用了車隊管理系統監測每輛車的噪音暴露,確保駕駛員的累積暴露不超過法規限值[428]。

特種車輛輪胎的未來發展趨勢受到多種因素的推動。自動化與無人駕駛技術正在快速進入特種車輛領域,礦山已經開始部署無人駕駛運輸卡車(Autonomous Haul Truck),農業也在發展自動駕駛拖拉機與收割機[429][430]。這些無人系統的引入從根本上改變了噪音問題的性質:沒有駕駛員暴露的職業健康問題,噪音控制的焦點完全轉移到環境影響。然而,無人化也可能帶來新的噪音挑戰,例如 24 小時連續作業(不受人類工作時間限制)可能增加夜間噪音,多車協同作業可能產生累積的高噪音水平[431][432]。電動化是另一重要趨勢,電動農業機械與工程機械正在興起,雖然目前主要限於中小型設備,但技術進步可能在未來延伸到大型設備甚至礦山運輸車輛[433][434]。電動化將大幅降低引擎噪音,使輪胎噪音成為主要噪音源,這可能推動特種輪胎的專門降噪技術發展。材料科學的進步,特別是新型橡膠配方(如石墨烯增強橡膠、自修復橡膠)與複合材料的應用,可能為特種輪胎提供在保持極端性能的同時降低噪音的新途徑[435][436]。

特種車輛輪胎的噪音問題也與更廣泛的永續發展議題相關。農業是許多國家的支柱產業,但也面臨環境永續性的挑戰,包括土壤退化、水資源消耗、碳排放等,噪音雖然相對次要但也是整體環境影響的一部分[437][438]。“精準農業”(Precision Agriculture)技術的發展,包括使用 GPS 導航、變量施肥與噴藥、自動化機械等,在提高農業效率的同時也可能影響噪音特性,例如更精確的路線規劃可以減少不必要的行駛與轉場,從而降低總噪音暴露[439][440]。建築業的永續發展也開始關注施工過程的環境影響,綠色建築認證體系(如 LEED、BREEAM)開始將施工階段的噪音控制納入評分,鼓勵使用低噪音設備與技術[441][442]。礦業面臨最嚴峻的環境與社會挑戰,露天採礦的環境破壞、水資源污染、以及對原住民社區的影響引發廣泛批評,雖然輪胎噪音在這些問題中相對次要,但整體的環境責任意識正在推動礦業公司採取更全面的環境管理措施,包括噪音控制[443][444]。

從全球視角來看,特種車輛輪胎的噪音問題在不同地區呈現不同特徵。發達國家由於嚴格的職業健康法規與環境法規,特種車輛的噪音控制相對較好,製造商也更願意投資降噪技術[445][446]。發展中國家則常見老舊設備、缺乏維護、以及法規執行不力的情況,導致極高的噪音暴露與環境影響[447]。國際組織如世界銀行(World Bank)、國際金融公司(IFC)在資助發展中國家的基礎建設與礦業項目時,越來越多地要求符合國際環境標準(如 IFC Performance Standards),其中包括噪音控制要求,這正在推動全球特種車輛噪音水平的改善[448][449]。此外,大型跨國公司(如礦業巨頭 Rio Tinto、BHP,農業機械製造商 John Deere、Caterpillar)在全球統一其環境與職業健康標準,將發達國家的最佳實踐推廣到其全球運營,這也有助於提升發展中國家的噪音控制水平[450][451]。

特種車輛輪胎的噪音研究仍  
然是一個相對邊緣的領域,學  
術文獻遠少於乘用車輪胎,主  
要原因包括:商業市場較小、研  
究資源有限、數據獲取困難(特  
種車輛通常在私人場地運營,



不易進行測量)、以及產業的保守性[452][453]。然而,隨著環境意識的提升與職業健康法規的強化,這一領域正在獲得更多關注。某些大學與研究機構(如美國 Iowa State University 的農業輪胎研究、澳大利亞 CSIRO 的礦業設備研究)已經建立了專門的特種輪胎研究項目[454][455]。產業界的研發投入也在增加,主要的特種輪胎製造商(如 Michelin 的農業與工程輪胎部門、Bridgestone 的礦業輪胎部門)都設有專門的研發中心,雖然其研究主要關注性能與耐久性,但噪音也逐漸納入考量[456][457]。未來可能看到更多的跨學科合作,結合材料科學、機械工程、聲學、農學、礦業工程等領域的專業知識,開發新一代的低噪音、高性能、永續的特種車輛輪胎[458]。

總結而言,特種應用輪胎的噪音問題呈現出極大的多樣性與複雜性,從競賽輪胎的極端性能追求、越野輪胎的多路面挑戰、冬季輪胎的釘刺爭議、重載輪胎的商業運輸需求、航空輪胎的安全優先、到各類特種車輛輪胎的專業化要求,每一類別都有其獨特的技術挑戰與管制環境。雖然這些輪胎在整體輪胎市場中的占比相對較小,但其對特定環境與人群的噪音影響可能非常顯著。隨著全球對環境品質與職業健康的要求日益提高,特種應用輪胎的噪音控制將不再是可忽視的問題,而是

需要系統性研究與創新的重要領域。未來的發展方向是在保持各類輪胎必要的極端性能的前提下,透過材料創新、結構優化、智慧設計以及系統整合,實現噪音的顯著降低,為創造更安靜、更健康、更永續的工作與生活環境做出貢獻[459][460]。

## 結論 (Conclusions)

本章的整體分析清楚顯示,特殊應用輪胎噪音並非傳統輪胎噪音研究的邊緣議題,而是理解輪胎噪音物理極限、工程取舍與環境影響不可或缺的關鍵拼圖。這些輪胎在極端工況下所呈現的聲學行為,揭示了輪胎噪音產生機制在高負載、高剛性、高溫或低溫條件下的本質特徵,對建立更完整的輪胎噪音理論體系具有重要的學術價值。

研究顯示,特殊應用輪胎的噪音問題高度體現多目標最佳化的工程本質。在競賽與越野領域,噪音往往直接與性能需求衝突;在冬季輪胎中,安全性與環境噪音及道路磨損形成明顯張力;在重載與商用車輛領域,噪音控制則牽動夜間物流、城市生活品質與經濟效率。這些案例共同指出,噪音並非可獨立處理的單一指標,而必須與抓地力、耐久性、能效、安全性與成本進行整體權衡。

本章亦顯示,雖然多數特殊應用輪胎目前仍部分豁免於傳統噪音法規,但隨著城市化、永續發展與公共健康意識的提升,這種「例外狀態」正逐漸受到挑戰。北歐對釘刺輪胎的管制經驗、歐洲對重載車輛夜間噪音的限制,以及競賽與越野活動面臨的社區壓力,皆顯示特殊應用輪胎未來勢必被納入更精細且情境化的噪音治理架構之中。

從技術發展角度來看,特殊應用輪胎不僅是噪音問題的來源,同時也是創新解方的試驗場。競賽輪胎的結構動力學研究、冬季輪胎的低溫材料科學、重載輪胎的多軸噪音分析,皆為民用輪胎與一般交通噪音控制提供了寶貴的極端案例數據。透過將這些經驗回饋至一般輪胎設計,可加速低噪音技術、材料阻尼設計與系統化聲學最佳化方法的成熟。

總結而言,特殊應用輪胎噪音的研究價值,不僅在於降低特定車輛或活動的噪音影響,更在於揭示輪胎噪音控制的物理極限與工程邊界。在邁向永續交通與低噪音城市的過程中,即便是以極致性能為導向的特殊應用領域,也必須逐步納入環境責任與社會影響的考量。本章所建構的分析框架,為未來在「性能—噪音—永續」三者之間取得平衡,提供了關鍵且前瞻的理論與實務基礎。

## 參考文獻

- [1] Cerrato, G. (2009). Automotive sound quality–powertrain, road and wind noise. *Sound and Vibration*, 43(4), 16-24. <http://www.sandv.com/downloads/0904cerr.pdf>
- [2] Hua, X., Xu, C., Xue, W., Jiang, J., Wei, Y., Zhou, J., & Cao, W. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(1). <https://doi.org/10.1177/00368504211005224>
- [3] 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>
- [4] Sandberg, U. (2001). Tyre/road noise–Myths and realities. *Proceedings of the 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, The Hague, Netherlands.
- [5] Evans, M. S. (2002). *Tyre compounding for improved performance*. Rapra Technology Limited.
- [6] Filippone, A. (2014). Aircraft noise prediction. *Progress in Aerospace Sciences*, 68, 27-63. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.02.001>
- [7] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Tire/pavement noise study* (Report No. NCAT 04-02). National Center for Asphalt Technology.
- [8] 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.
- [9] ISO 362-1:2015. *Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 1: M and N categories*. International Organization for Standardization.
- [10] Stallmann, M. J. (2013). *Tyre model verification over off-road terrain* [Master's thesis, University of Pretoria]. <https://repository.up.ac.za/handle/2263/41012>
- [11] Galati, R., & Reina, G. (2019). Terrain awareness using a tracked skid-steering vehicle with passive independent suspensions. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 46. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00046>
- [12] ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association). (2020). *The European tyre industry: Facts and figures 2020*. Brussels: ETRMA.

- [13] Mohammadi, S., & Ohadi, A. (2021). A novel approach to design quiet tires, based on multi-objective minimization of generated noise. *Applied Acoustics*, 175, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107825>
- [14] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 3, pp. 2092-2097). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384549>
- [15] Thomas, R. H., Nickol, C., Burley, C. L., & Guo, Y. (2016). Potential for landing gear noise reduction on advanced aircraft configurations. *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (Paper No. 2016-3039). <https://doi.org/10.2514/6.2016-3039>
- [16] Chavira, M. (2022). *Recreational noise exposures at motorsport events* [Capstone project, University of Northern Colorado]. <https://digscholarship.unco.edu/capstones/96/>
- [17] Mascolo, A., Rossi, D., Pascale, A., Mancini, S., Cianfrini, M., & Corcione, M. (2023). Noise assessment during motor race events: New approach and innovative indicators. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 19, 33-44. <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.4>
- [18] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise—trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(2), 65-78.
- [19] ICAO (International Civil Aviation Organization). (2017). *Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation: Environmental Protection, Volume I – Aircraft Noise* (8th ed.). Montreal: ICAO.
- [20] Filippone, A. (2017). Options for aircraft noise reduction on arrival and landing. *Aerospace Science and Technology*, 60, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.10.024>
- [21] Richardson, H. (2017). *Modelling the evolution of tyre performance in a motorsport application* [Master's thesis, Chalmers University of Technology]. <http://odr.chalmers.se/>
- [22] Grip, M. (2021). *Tyre performance estimation during normal driving* [Licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1566863>

- [23] Mazumder, A. (2025). Friction isn't always a villain: Why racing tires have so much grip. *Available at SSRN 5414149*. <https://ssrn.com/abstract=5414149>
- [24] Continental AG. (2018). *Racing tire technology and innovations*. Hanover: Continental AG Technical Communications.
- [25] Morais-Quilez, I., & Graña, M. (2025). Formula One® track classification by machine learning applied on car engine sound. *Procedia Computer Science*, 232, 1234-1243. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.12.074>
- [26] Dockwray, R., & Collins, K. (2015). A symphony of sound: Surround sound in Formula One racing games. In S. Gopinath & J. Stanyek (Eds.), *The Oxford handbook of mobile music studies* (Vol. 2, pp. 245-268). Oxford University Press.
- [27] MotoIQ. (2019). How to test your own race tires. *MotoIQ Magazine*. <https://motoiq.com/how-to-test-your-own-race-tires/>
- [28] SAE International. (1976). A tire noise investigation and test method (Technical Paper 760152). *SAE Technical Paper Series*. <https://doi.org/10.4271/760152>
- [29] Evans, M. S. (2002). Tyre compounding for improved performance. In *Rapra Review Reports* (Vol. 13, No. 6). Rapra Technology Limited.
- [30] Maghami, S. (2016). *Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance* [Doctoral dissertation, University of Twente]. <https://research.utwente.nl/>
- [31] Neethirajan, M., Nair, A. B., Joseph, R., & Alex, R. (2022). Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: The state of the art. *Functional Composites and Structures*, 4(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac6518>
- [32] Cichomski, E. (2015). *Silica-silane reinforced passenger car tire treads: Effect of silica morphology, silica-polymer interface structure and rubber matrix network on tire-performance* [Doctoral dissertation, University of Twente]. <https://research.utwente.nl/>
- [33] Besselink, I. J. M., & Van Oorschot, P. J. (2010). Design of an efficient, low weight battery electric vehicle based on a VW Lupo 3L. *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, Norway.

- [34] Elmas, S., Guvenc, B. A., & Doğan, A. (2015). Tire-road friction coefficient estimation and experimental setup design of electric vehicle. *Journal of Polytechnic*, 18(3), 169-175.
- [35] Padula, J. A. (2006). Tire load capacity. In *Pneumatic tire* (FMVSS 139 Regulations, pp. 193-210). National Highway Traffic Safety Administration.
- [36] Wei, Y., Nagatani, H., Okada, Y., & Jeong, H. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), 2895-2908. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16938>
- [37] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G., & Sommer, S. (2014). Low noise tires for hybrid and electric vehicles. *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21)*, Beijing, China.
- [38] Ejsmont, J., Taryma, S., Ronowski, G., & Swiczko-Zurek, B. (2015). Noise generated by tyres designed for electric vehicles—results of laboratory experiments. *Inter-Noise 2015*, San Francisco, USA.
- [39] Pallas, M. A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., & Muirhead, M. (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(1), 1-15. <https://doi.org/10.2478/rjti-2022-0013>
- [40] Scheibe, R. R., Engineer, P. M., & Kirkland, K. C. (2002). *An overview of studded and studless tire traction and safety*. Virginia Transportation Research Council.
- [41] Vieira, T., & Sandberg, U. (2017). Acoustical performance of winter tyres on two in-service road surfaces: A frequency spectrum analysis and comparison. *Proceedings of Inter-Noise 2017*, Hong Kong.
- [42] Vieira, T., Sandberg, U., & Erlingsson, S. (2019). Acoustical performance of winter tyres on in-service road surfaces. *Applied Acoustics*, 151, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.011>
- [43] Sandberg, U., Ejsmont, J., & Vieira, T. (2016). Noise and rolling resistance properties of various types of winter tyres compared to normal car tyres. *Proceedings of Inter-Noise 2016*, Hamburg, Germany.

- [44] Hakala, A. (2020). *Sound based classification of studded tires* [Master's thesis, Tampere University]. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/121469>
- [45] Abou Fakhr, E. (2023). Finite element analysis of tire-snow interaction with addition of studs. *ResearchGate Preprint*. <https://www.researchgate.net/publication/393499372>
- [46] Chang, K., & Alhasyah, M. (2023). *Development of an acoustic method to collect studded tire traffic data*. Alaska University Transportation Center. <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/13137>
- [47] Mustonen, H. (2019). *Determining the road wear limits in the type approval of studded tires* [Master's thesis, Aalto University]. <https://aaltodoc.aalto.fi/>
- [48] Gustafsson, M., & Eriksson, O. (2015). *Emission of inhalable particles from studded tyre wear of road pavements: A comparative study*. VTI rapport 867. Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [49] Gonzalez Arrojo, M. (2000). *Pavement wear caused by the use of studded tyres* [Master's thesis, Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:669913/FULLTEXT01.pdf>
- [50] Vaiškūnaitė, R., Laurinavičius, A., Podvezko, V., & Čygas, D. (2009). Analysis and evaluation of the effect of studded tyres on road pavement and environment (II). *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(4), 203-211. <https://doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.203-211>
- [51] Gustafsson, M., Eriksson, O., Gjerstad, K. I., & Blomqvist, G. (2017). PM10 emission effects of new studded tyre regulations. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 7(1), 1-14.
- [52] Gjerstad, K. I., Gustafsson, M., Kolka Jónsson, P. V., Norman, M., Blomqvist, G., & Denby, B. R. (2024). *Non-exhaust particles in Nordic countries: A collection of updated knowledge on short-term mitigation for road dust, factors affecting production, and strategies for long-term reduction*. Nordic Council of Ministers. <https://doi.org/10.6027/temanord2024-504>
- [53] Peng, J., Liu, D., Parnell, J., & Kessissoglou, N. (2019). Influence of translational vehicle dynamics on heavy vehicle noise emission. *Science of The Total Environment*, 689, 1358-1368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.270>

- [54] Merino-Martinez, R., Besnea, I., von den Hoff, B., & Sijtsma, P. (2024). Psychoacoustic analysis of the noise emissions from the Airbus A320 aircraft family and its nose landing gear system. *30th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (Paper No. 2024-3398). <https://doi.org/10.2514/6.2024-3398>
- [55] Vieira, A., Mehmood, U., Merino-Martínez, R., Simons, D. G., & Snellen, M. (2019). Variability of sound quality metrics for different aircraft types during landing and take-off. *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (Paper No. 2019-2512). <https://doi.org/10.2514/6.2019-2512>
- [56] Leyeikian, L., Lebrun, M., & Lempereur, P. (2014). An overview of aircraft noise reduction technologies. *Aerospace Lab*, (7), 1-15. <https://hal.science/hal-01184664>
- [57] Bennett, G. J., Lai, J., O'Brien, G., Ragni, D., Arend, G., Bolland, T., & Zhong, S. (2022). Flow control and passive low noise technologies for landing gear noise reduction. *28th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (Paper No. 2022-2848). <https://doi.org/10.2514/6.2022-2848>
- [58] Massey, S., Elmiligui, A., Hunter, C., Thomas, R., Pao, S. P., & Fang, R. (2006). Computational analysis of a chevron nozzle uniquely tailored for propulsion airframe aeroacoustics. *12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (Paper No. 2006-2436). <https://doi.org/10.2514/6.2006-2436>
- [59] Zhao, K., Liang, Y., Yue, T., Chen, Z., & Zhou, S. (2019). Characterization of the aircraft bay/landing gear coupling noise at low subsonic speeds and its suppression using leading-edge chevron spoiler. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(8). <https://doi.org/10.1177/1687814019871431>
- [60] Yadav, P. S., Gaikwad, A. A., Badgujar, S. Y., Surkutwar, Y. V., & Dhote, H. (2013). Noise reduction on agricultural tractor (SAE Technical Paper 2013-26-0103). *SAE International*. <https://doi.org/10.4271/2013-26-0103>
- [61] Abd-El-Tawwab, A. M., Ahmed, K. I., & El-Nahas, M. A. (2000). Characteristics of agriculture tractor interior noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 19(4), 179-187. <https://doi.org/10.1260/0263092001492822>
- [62] Baráč, Ž., Plaščak, I., Radočaj, D., & Jurišić, M. (2025). The impact of noise on agricultural tractor operator in relation to certain operational parameters: An Analytical

- Hierarchy Process (AHP) approach. *Agriculture*, 15(1), 52. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010052>
- [63] Celen, I. H., & Arin, S. (2003). Noise levels of agricultural tractors. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 6(17), 1539-1542. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2003.1539.1542>
- [64] Cvetanovic, B., Cvetković, D., & Prascevic, M. (2017). An analysis of the impact of agricultural tractor seat cushion materials to the level of exposure to vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 36(3), 287-297. <https://doi.org/10.1177/0263092317711983>
- [65] Han, H. W., Im, W. H., Choi, H. J., Cho, S. J., Lee, S. D., & Park, Y. J. (2022). Effect of sound insulation on noise reduction in an agricultural tractor cab. *Scientific Reports*, 12, 22298. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26408-3>
- [66] Zabrodskyi, A. (2023). *The effect of maintaining operating parameters of agricultural tires to minimize soil compaction* [Doctoral dissertation, Vytautas Magnus University]. <https://www.vdu.lt/cris/>
- [67] Sarvela, K. (2020). *Development of a real-time measurement method for analyzing the influence of tire-soil contact on agricultural tractor mobility* [Doctoral dissertation, University of Helsinki]. <https://helda.helsinki.fi/>
- [68] Chamen, T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F., & Weiskopf, P. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 2. Equipment and field practices. *Soil and Tillage Research*, 73(1-2), 161-174. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00108-9)
- [69] Dolowy, P. (2022). *The non-invasive detection of soil compaction and the effect of traffic management on crop performance* [Doctoral dissertation, University College Dublin]. <https://researchrepository.ucd.ie/>
- [70] El-Sayegh, Z., Sharifi, M., Gheshlaghi, F., & Mardani, A. (2019). Development of an HLFS agricultural tire model using FEA technique. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1524. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1524-y>
- [71] Misiewicz, P. A. (2010). *The evaluation of the soil pressure distribution and carcass stiffness resulting from pneumatic agricultural tyres* [Doctoral dissertation, Cranfield University]. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/>

- [72] Shakenov, A., Śladkowski, A., & Stolpovskikh, I. (2022). Haul road condition impact on tire life of mining dump truck. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2022(6), 36-43. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/036>
- [73] Anzabi, R. V., Nobes, D. S., & Lipsett, M. G. (2012). Haul truck tire dynamics due to tire condition. *Journal of Physics: Conference Series*, 364(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/364/1/012005>
- [74] Subasinghe, I. (2018). *Evaluation of whole body vibrations from mine haul trucks* [Master's thesis, University of Alberta]. <https://era.library.ualberta.ca/>
- [75] Jiang, J. (2025). *Efficient detection of road surface disruptions for off-road mining trucks* [Master's thesis, University of Guelph]. <https://atrium.lib.uoguelph.ca/>
- [76] Papavizas, N. C. (2017). *Modeling dynamic instability of off-highway mining dump trucks* [Doctoral dissertation, Pennsylvania State University]. <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/14315nkp5117>
- [77] Kim, J. H., Marin, L. S., & Dennerlein, J. T. (2018). Evaluation of commercially available seat suspensions to reduce whole body vibration exposures in mining heavy equipment vehicle operators. *Applied Ergonomics*, 71, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.005>
- [78] Purcell, E. (2017). *Whole-body vibration of heavy mobile equipment operators at an opencast mine* [Master's thesis, Stellenbosch University]. <https://scholar.sun.ac.za/>
- [79] Aouad, N. (2008). *Mechanics of dump truck vibrations in high-impact shovel loading operations* [Doctoral dissertation, Missouri University of Science and Technology]. [https://scholarsmine.mst.edu/doctoral\\_dissertations/54/](https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/54/)
- [80] Van Zyl, P. S., van Goethem, S., Kanarachos, S., Rexeis, M., Hausberger, S., & Smokers, R. (2013). *Study on tyre pressure monitoring systems (TPMS) as a means to reduce light-commercial and heavy-duty vehicles fuel consumption and CO2 emissions*. European Commission DG Climate Action.
- [81] Freund, D., & Brady, S. (2009). Commercial vehicle safety technologies: Applications for tire pressure monitoring and management. *The 21st Enhanced Safety Vehicles Conference*, Stuttgart, Germany.
- [82] Hoover, R., Daniel, S., Van Buskirk, T., & Wong, J. (2009). Testing of heavy truck tire pressure monitoring systems (TPMS) in order to define an acceptance test

procedure. *The 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Stuttgart, Germany.

[83] Velupillai, S., & Guvenc, L. (2007). Tire pressure monitoring [applications of control]. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(6), 22-25. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.909477>

[84] Szczucka-Lasota, B., Kamińska, J. A., & Węgrzyn, T. (2019). Influence of tire pressure on fuel consumption in trucks with installed tire pressure monitoring system (TPMS). *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 105, 207-218.

[85] FAA (Federal Aviation Administration). (2021). *Advisory Circular 150/5320-6G: Airport pavement design and evaluation*. U.S. Department of Transportation.

[86] FAA (Federal Aviation Administration). (2025). *Advisory Circular 150/5335-5D: Standardized method of reporting airport pavement strength*. U.S. Department of Transportation.

[87] Michelin Aircraft Tire Corporation. (2021). *Michelin aircraft tire care and service manual (ALC-269)*. Michelin Aviation.

[88] ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association). (2021). *EU tyre labelling regulation 2020/740: Implementation guide*. Brussels: ETRMA.

[89] Goodyear. (2023). *Understanding the EU tyre label grading*. Goodyear Europe. [https://www.goodyear.eu/en\\_gb/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html](https://www.goodyear.eu/en_gb/consumer/learn/eu-tire-label-explained.html)

[90] Vredestein. (2024). *Tyre label regulation 2020/740 car SUV & van*. Apollo Vredestein. <https://www.vredestein.co.uk/content-hub/tyre-guide/>

[91] Nexen Tire. (2022). *EU tyre label information and EPREL database*. Nexen Tire Europe. <https://www.nexentire.com/uk/information/energy/index.php>

[92] Toyo Tires. (2023). *EU tyre label regulations*. Toyo Tires Europe. <https://toyotires.eu/page/index/identifier/eu-tire-label>

[93] ISO 10844:2021. *Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*. International Organization for Standardization.

[94] Sohaney, R. C., & Ulf Sandberg, U. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(12), 8-13.

- [95] UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2023). Improving reproducibility of tyre/road noise measurements on ISO test tracks. *IWGMU-21-03 Working Document*. <https://wiki.unece.org/>
- [96] Berge, T., & Mioduszewski, P. (2023). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UNECE Regulation 117. *Proceedings of Inter-Noise 2023*, Chiba, Japan.
- [97] Sandberg, U., Goubert, L., Bianchini, B., Anfosso-Lédée, F., & Gullino, A. (2009). Uncertainty of close proximity (CPX) tyre-road noise measurements—Round Robin test results. *Proceedings of Internoise 2009*, Ottawa, Canada.
- [98] Bennert, T., Hanson, D., Maher, A., & Vitillo, N. (2005). Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise. *Journal of Testing and Evaluation*, 33(2), 94-100. <https://doi.org/10.1520/JTE12268>
- [99] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (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, 328-357. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.002>
- [100] Vieira, T., Sandberg, U., & Erlingsson, S. (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(8), 2223-2249. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1735493>
- [101] Descornet, G. (2014). Comparison of road and laboratory measurements of tyre/road noise. *Proceedings of Acoustics 2014*, Adelaide, Australia.
- [102] ISO 362-3:2022. *Acoustics — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 3: Indoor testing*. International Organization for Standardization.
- [103] NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration). (2016). *Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles* (Docket No. NHTSA-2016-0125-0001). U.S. Department of Transportation.
- [104] Resende, D., Merino-Martinez, R., Snellen, M., & Simons, D. G. (2024). Experimental outdoor vehicle acoustic testing based on ISO-362 pass-by noise and tyre

- noise contribution for electric vehicles. *Applied Acoustics*, 218, 109844. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109844>
- [105] UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2023). *UN Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and adhesion on wet surfaces* (Rev. 3). Geneva: UNECE.
- [106] Continental. (2023). *UN Regulation 117: Requirements for tires sold in Europe*. Continental Tires. <https://www.continental-tires.com/products/b2b/business-know-how/un-regulation-117/>
- [107] Dewesoft. (2023). *Tire noise measurement according to ECE R117*. Dewesoft Blog. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [108] UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). (2024). *Application of noise limits to EVs fitted with exterior sound (ESES)* (Working Document GRBP-80-20e-Rev1). Geneva: UNECE.
- [109] OICA (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles). (2024). *Management of noise emissions according to UN-R51 and UN-R138* (TFVS-04-12). Paris: OICA.
- [110] ATS Group. (2024). *UNECE R51 vehicle noise emission approval*. ATS Testing Services. <https://www.ats-group.org/en/unece-r51-vehicle-noise-emission-approval-2/>
- [111] ACEA (European Automobile Manufacturers' Association). (2020). *Position paper: Vehicle noise – Setting the appropriate limits*. Brussels: ACEA.
- [112] AZoM. (2020). Using indoor pass-by testing to optimize vehicle OEMs. *AZoM Materials*. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20714>
- [113] Kropp, W., Larsson, K., Wullens, F., & Andersson, P. (2008). Tyre/road noise generation – Modelling and understanding. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 30(3), 1-10.
- [114] Peng, S., Wei, Y., Zhao, C., Guo, H., & Zhang, X. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise. *Acta Acustica*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020004>
- [115] Rossetti, P., & Corradi, R. (2023). Synthesis of equivalent sources for tyre/road noise simulation and auralization. *Applied Acoustics*, 211, 109535. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109535>

- [116] Wu, B., Chen, Q., Xu, S., Wang, Z., & Jiang, G. (2020). Research on the effect of tire pattern design on noise and its reduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 154(4), 2265-2276. <https://doi.org/10.1121/10.0020849>
- [117] Grätsch, T., & Reeb, N. (2009). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4), 2503. <https://doi.org/10.1121/1.3081549>
- [118] Sandberg, U. (2001). Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise-the global perspective. *Noise Control Engineering Journal*, 49(4), 170-181. <https://doi.org/10.3397/1.2839661>
- [119] NIST (National Institute of Standards and Technology). (1971). *Tire noise investigation test procedures* (NBS Report 10567). U.S. Department of Commerce.
- [120] Bao, Y., Wang, J., Xiang, Y., & Zhang, Y. (2024). Research on acoustic-structural coupling model and tire parameters of tire acoustic cavity resonance noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 43(2), 584-598. <https://doi.org/10.1177/14613484231220187>
- [121] Shi, T., Wang, Y., Luo, Z., Chen, X., & Zhang, J. (2025). Simulation study on noise reduction of electric vehicle tire with built-in sound-absorbing material. *Acta Acustica*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1051/aacus/2024033>
- [122] Goetchius, G. (2011). Leading the charge—the future of electric vehicle noise control. *Sound & Vibration*, 45(4), 12-17. <http://www.sandv.com/downloads/1104goet.pdf>
- [123] 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*, 481, 115431. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115431>
- [124] 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. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2013.055811>
- [125] Kropp, W. (2010). Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*, 44(10), 12-17. <http://www.sandv.com/downloads/1007croc.pdf>

- [126] Pfretzschner, J., & Cobo, P. (2012). Biobased porous acoustical absorbers made from polyurethane and waste tire particles. *Polymer Testing*, 31(8), 1066-1074. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.08.002>
- [127] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2005). Measurements of tyre/road noise and of acoustical properties of porous road surfaces. *IIAV Proceedings*, 10(2), 422-435.
- [128] Cerchiai, M., & Luchini, J. R. (2011). Optimal design of acoustic material from tire fluff. *Materials & Design*, 32(6), 3608-3616. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.041>
- [129] Praticò, F. G., Giunta, M., Marino, R., & Barbaro, A. (2021). Electric vehicles diffusion: Changing pavement acoustic design? *Noise Mapping*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0001>
- [130] Pallas, M. A., Hamzaoui, N., Chatagnon, R., & Bérengier, M. (2021). Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 96, 102858. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102858>
- [131] Gasparoni, S., Carbonari, A., Fracastoro, G., Praticò, F., & Tufarelli, P. (2015). Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission. *Proceedings of ICSV22*, Florence, Italy. <https://hal.science/hal-01349294>
- [132] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G., & Sommer, S. (2015). Noise generated by tyres designed for electric vehicles—results of laboratory experiments. *Inter-Noise and Noise-Con Congress and Conference Proceedings*, 251(2), 6823-6832.
- [133] Genuit, K., Fiebig, A., & Graf, M. (2000). The future of NVH research – A challenge by new powertrains. *Proceedings of Acoustics 2000*, Sydney, Australia.
- [134] Kim, S., Sung, D., Ryoo, H., & Oh, J. (2021). An aspect of noise, vibration, and harshness issues in electric vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(10-11), 2601-2616.
- [135] Hoever, C., & Kropp, W. (2015). A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance. *Journal of Sound and Vibration*, 351, 161-176. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.04.009>
- [136] IF (Finnish Transport and Communications Agency). (2018). *Winter tire usage statistics in Finland 2018*. Helsinki: Traficom.

- [137] Tuononen, A., & Sainio, P. (2013). *Optimal proportion of studded tyres in traffic flow to prevent ice polishing* (Research Report). Aalto University.
- [138] Malmivuo, M. (2012). *The influence of studded tyres on traffic safety and environment* (Research Report). VTI Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [139] Malmivuo, M. (2016). Traffic safety effects of studded tires—A literature review and statistical analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.05.004>
- [140] Tuononen, A., & Sainio, P. (2014). Optimal proportion of studded tyres in traffic flow to prevent ice polishing. *Accident Analysis & Prevention*, 65, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.12.009>
- [141] Ministry of Transport and Communications (Finland). (2003). *Decree on tire studs 408/2003*. Helsinki: LVM.
- [142] Unhola, T. (1995). *Road wear caused by studded tyres* (VTT Research Report 1695). VTT Technical Research Centre of Finland.
- [143] Unhola, T. (2004). Development of test methods for studded tyres. *Proceedings of the 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Brisbane, Australia.
- [144] Rantonen, M., Tuononen, A., & Sainio, P. (2012). Seasonal tyre changing and accident risk. *Traffic Injury Prevention*, 13(2), 194-200. <https://doi.org/10.1080/15389588.2011.638017>
- [145] Nordström, T. (2004). *Friction and braking distance for different winter tyres* (VTI Report 501). Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [146] Elvik, R., Amundsen, A. H., & Hofmo, P. (1999). *Effects on accidents of studded tires and laws banning their use: A meta-analysis of evaluation studies* (TØI Report 430/1999). Institute of Transport Economics, Oslo.
- [147] Elvik, R., Fridstrøm, L., Kaminska, J., & Meyer, S. F. (2013). Effects on accidents of changes in the use of studded tyres in major cities in Norway: A long-term investigation. *Accident Analysis & Prevention*, 54, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.02.015>
- [148] Strandroth, J., Rizzi, M., Olai, M., Lie, A., & Tingvall, C. (2012). The effects of studded tires on fatal crashes with passenger cars and the benefits of electronic stability

- control (ESC) in Swedish winter driving. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.11.005>
- [149] Elvik, R. (2015). Can electronic stability control replace studded tyres? *Accident Analysis & Prevention*, 85, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.002>
- [150] Elvik, R., Høye, A., Sørensen, M. W., & Vaa, T. (2011). Speed and road accidents: Evaluation of the Power Model (TØI Report 1034/2009). *Institute of Transport Economics*, Oslo.
- [151] Kuisma, R., & Salla, O. (2018). *Survey on winter tyre user preferences and behaviour in Finland*. Finnish Transport and Communications Agency.
- [152] Finnish Transport Agency. (2008). *Noise emissions from road traffic in Finland: Status and trends*. Helsinki: FTA.
- [153] Finnish Transport Agency. (2017). *Environmental noise exposure in Finland 2017*. Helsinki: FTA.
- [154] Pasanen, E. (2012). *Road marking wear caused by studded tyres and winter maintenance* (Finnish Road Administration Report). Helsinki: Finnra.
- [155] Caiazzo, F., Ashok, A., Waitz, I. A., Yim, S. H., & Barrett, S. R. (2013). Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmospheric Environment*, 79, 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.081>
- [156] City of Helsinki. (2008). *Traffic noise in Helsinki: Status report 2008*. Helsinki Environmental Centre.
- [157] Kelkka, M., Kalliomäki, K., & Hautala, P. (2003). *HILJA Project: Development of quiet pavement materials* (Finnra Reports 44/2003). Finnish Road Administration.
- [158] Finnish Road Administration. (2009). *Climate change impacts on winter maintenance and studded tire use*. Finnra Technical Reports.
- [159] Gültlinger, R., Gohl, M., Sommer, H., & Zimmermann, O. (2014). Influence of studded tyres on road wear and emissions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2431(1), 75-84. <https://doi.org/10.3141/2431-10>
- [160] Continental AG. (2018). *IceContact 3: Innovative rubber-bodied stud technology*. Continental Tire Press Release, November 2018.

- [161] Rantonen, M., Tuononen, A., Tielinen, H., & Sainio, P. (2012). Tyre traction in winter conditions: Studded versus non-studded. *Vehicle System Dynamics*, 50(sup1), 97-112. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.666357>
- [162] Kelkka, M. (2003). *Acoustical performance of different tire types on various road surfaces* (VTI Report). Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [163] Nokian Tyres. (2022). *Arctic compound technology: Low-temperature performance of winter tire rubber*. Nokian Tyres Technical Documentation.
- [164] Bridgestone. (2023). *Blizzak technology: Silica compound for ice grip*. Bridgestone Winter Tire Technology Guide.
- [165] Michelin. (2024). *X-Ice technology: Advanced siping and compound design*. Michelin Technical Publications.
- [166] Discount Tire. (2024). *What are sipes on a tire?* Discount Tire Consumer Education. <https://www.discounttire.com/learn/tire-sipes>
- [167] Wikipedia. (2024). *Siping (rubber)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Siping\\_\(rubber\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Siping_(rubber))
- [168] Tires Easy. (2025). Siping tires for better traction. *Tire Blog*. <https://www.tires-easy.com/blog/siping-tires-for-better-traction/>
- [169] XRAY. (2025). Snow traction enhancement for winter tires. *XRAY Patent Intelligence*. <https://xray.greyb.com/tires/improved-snow-road-performance-of-tire>
- [170] Motor Trend. (2021). The best all-terrain, snow, and winter tires for trucks and 4x4s. *Motor Trend Magazine*, February 2021.
- [171] Performance Plus Tire. (2025). Smart winter tire technology: The engineering behind 2025's safest designs. <https://www.performanceplustire.com/Blog/smart-winter-tire-technology>
- [172] Hankook Tire. (2024). *Hankook launches winter tire for enhanced ice control and snow traction*. Company Press Release, February 22, 2024.
- [173] Tire Pirates Calgary. (2024). How winter tire technology improves traction. *Tire Pirates Blog*. <https://www.tirepirates.ca/blog/how-winter-tire-technology-works/>
- [174] TrilliTires. (2023). The science behind winter tires. *TrilliTires Technical Blog*, November 2023. <https://trillitires.com/the-science-behind-winter-tires/>
- [175] TireMart. (2024). All you need to know about tire siping. *TireMart Consumer Guide*. <https://www.tiremart.com/blog/tire-siping>

- [176] Commercial Tire. (2024). Why tire siping is important. <https://commercialtire.com/blog/what-is-tire-siping-and-why-is-it-important/>
- [177] VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute). (2018). *Winter tire testing facility: Standardized ice and snow surfaces for acoustic measurements* (VTI Report 978). Linköping: VTI.
- [178] VTT Technical Research Centre of Finland. (2019). *Controlled environment testing of winter tires: Noise and performance evaluation*. VTT Research Report.
- [179] Sandberg, U., & Vieira, T. (2018). Winter tire noise on different road surfaces: CPX measurements in Nordic conditions. *Proceedings of EuroNoise 2018*, Crete, Greece.
- [180] Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., & Ronowski, G. (2017). Noise characteristics of studded tires under various temperature conditions. *Inter-Noise 2017 Proceedings*, Hong Kong.
- [181] Norwegian Public Roads Administration. (2020). *Studded tire fee in Norwegian cities: Policy evaluation 2010-2020*. Oslo: NPRA.
- [182] Oslo Kommune. (2021). *Environmental effects of studded tire fee: Air quality and noise improvements*. Oslo Environmental Agency Report.
- [183] Swedish Transport Administration. (2022). *Studded tire restrictions in Swedish cities: Implementation and impacts*. Borlänge: Trafikverket.
- [184] Norwegian Institute of Public Health. (2019). *PM10 emissions from road wear: Health impacts and mitigation strategies*. Oslo: NIPH.
- [185] Stockholm Environment and Health Administration. (2020). *Spring road dust and particulate emissions in Stockholm*. Stockholm: Miljöförvaltningen.
- [186] Nokian Tyres. (2023). *Hakkapeliitta technology evolution: From traditional studs to cushioned studs*. Nokian Technical Documentation.
- [187] Continental. (2022). *IceContact technology: Cushioned stud design for noise and wear reduction*. Continental Innovation Report.
- [188] Goodyear. (2021). *UltraGrip Ice: Advanced studless winter tire technology*. Goodyear Technical Bulletin.
- [189] Bridgestone. (2024). *Blizzak latest generation: Closing the ice performance gap*. Bridgestone Product Development Report.

- [190] Swedish Road Administration. (2022). *Non-studded winter tire market trends in Sweden 2000-2020*. Borlänge: Trafikverket Statistics.
- [191] Tuononen, A., Sainio, P., & Koskinen, S. (2023). Future of winter tires in Nordic countries: Technology and policy scenarios. *Cold Regions Science and Technology*, 206, 103748. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103748>
- [192] ETRMA. (2022). *Heavy-duty tire regulations in Europe: Overview and future trends*. Brussels: European Tyre & Rubber Manufacturers' Association.
- [193] Sandberg, U., & Kalman, B. (2005). *Tire/road noise reference book*. INFORMEX SE-59040 Kisa, Sweden.
- [194] European Commission. (2020). *Regulation (EU) 2020/740 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters*. Official Journal of the European Union, L 177/1.
- [195] WHO (World Health Organization). (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- [196] Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G., & Foraster, M. (2018). WHO environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 379. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020379>
- [197] Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal*, 35(13), 829-836. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehu030>
- [198] Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X)
- [199] Eriksson, C., Nilsson, M. E., & Pershagen, G. (2011). Environmental noise and health—Current knowledge and research needs. *Journal of the Swedish Medical Association*, 108(4), 150-153.
- [200] Stansfeld, S. A., & Matheson, M. P. (2003). Noise pollution: Non-auditory effects on health. *British Medical Bulletin*, 68(1), 243-257. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg033>

- [201] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). (2021). *Tire noise regulations and their economic impacts on commercial transport*. OECD Publishing, Paris.
- [202] UNECE. (2022). *Evolution of vehicle noise regulations: From R51 to future amendments*. Working Party on Noise and Tyres (GRBP), Geneva.
- [203] ISO (International Organization for Standardization). (2023). *Tire noise testing: Current standards and future developments*. ISO/TC 43/SC 1 Technical Committee Report.
- [204] JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association). (2023). *Heavy-duty tire noise: Japanese industry perspective and technological advances*. Tokyo: JAMA Technical Reports.
- [205] Michelin. (2023). *X<sup>®</sup> Multi<sup>™</sup> Energy: Low rolling resistance for commercial vehicles*. Michelin Truck Tires Technical Guide.
- [206] Bridgestone. (2024). *Ecopia truck and bus tires: Balancing noise, fuel efficiency, and durability*. Bridgestone Commercial Product Line.
- [207] Continental. (2023). *EcoPlus truck tire technology: Noise reduction in commercial applications*. Continental Commercial Vehicle Tires.
- [208] Goodyear. (2022). *KMAX<sup>™</sup> Gen-2 technology: Advanced commercial tire design*. Goodyear Truck & Bus Tires.
- [209] ETRTO (European Tyre and Rim Technical Organisation). (2024). *Standards manual for passenger car, truck and bus tyres*. Brussels: ETRTO.
- [210] SAE International. (2020). *Tire performance standards for commercial vehicles (SAE J2047)*. Warrendale, PA: SAE.
- [211] FHWA (Federal Highway Administration). (2017). *Traffic noise model (TNM) version 3.0: Technical manual*. U.S. Department of Transportation.
- [212] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. INFORMEX, Sweden.
- [213] Pallas, M. A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Oliveira Panoa, M. J., & Conter, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.06.012>

- [214] Crocker, M. J. (Ed.). (2007). *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470209707>
- [215] Braess, H. H., & Seiffert, U. (Eds.). (2011). *Vieweg handbook automotive engineering* (6th ed.). Springer.
- [216] Genuit, K. (2010). *Sound-engineering im Automobilbereich: Methoden zur Messung und Bewertung*. Springer-Verlag.
- [217] Zeller, P. (2018). *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch* (3rd ed.). Springer Vieweg.
- [218] Bies, D. A., Hansen, C. H., & Howard, C. Q. (2018). *Engineering noise control* (5th ed.). CRC Press.
- [219] Beranek, L. L., & Vér, I. L. (Eds.). (1992). *Noise and vibration control engineering: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
- [220] Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' shock and vibration handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [221] Fahy, F., & Gardonio, P. (2007). *Sound and structural vibration: Radiation, transmission and response* (2nd ed.). Academic Press.
- [222] Pierce, A. D. (2019). *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications* (3rd ed.). Springer.
- [223] Kuttruff, H. (2016). *Room acoustics* (6th ed.). CRC Press.
- [224] Rossing, T. D. (Ed.). (2014). *Springer handbook of acoustics* (2nd ed.). Springer.
- [225] Möser, M. (2009). *Engineering acoustics: An introduction to noise control* (2nd ed.). Springer.
- [226] Gerges, S. N., Arenas, J. P., & Carvalho, R. (2018). *Noise control: From concept to application*. CRC Press.
- [227] Fahy, F. (2001). *Foundations of engineering acoustics*. Academic Press.
- [228] Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of acoustics* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [229] Zwicker, E., & Fastl, H. (2013). *Psychoacoustics: Facts and models* (3rd ed.). Springer.
- [230] Moore, B. C. (2012). *An introduction to the psychology of hearing* (6th ed.). Emerald Group Publishing.

- [231] Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization*. MIT Press.
- [232] Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2015). *Master handbook of acoustics* (6th ed.). McGraw-Hill.
- [233] Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2016). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (3rd ed.). CRC Press.
- [234] Jacobsen, F., & Juhl, P. M. (2013). *Fundamentals of general linear acoustics*. John Wiley & Sons.
- [235] Vorländer, M. (2007). *Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer.
- [236] Nelson, P. A., & Elliott, S. J. (1991). *Active control of sound*. Academic Press.
- [237] Hansen, C. H., & Snyder, S. D. (1997). *Active control of noise and vibration*. E & FN Spon.
- [238] Fuller, C. R., Elliott, S. J., & Nelson, P. A. (1996). *Active control of vibration*. Academic Press.
- [239] Lyon, R. H., & DeJong, R. G. (1995). *Theory and application of statistical energy analysis* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [240] Langley, R. S., & Bremner, P. (1999). A hybrid method for the vibration analysis of complex structural-acoustic systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(3), 1657-1671.
- [241] EU (European Union). (2019). *Directive (EU) 2019/1936 amending Directive 2008/98/EC on waste*. Official Journal of the European Union, L 305/59.
- [242] EU Regulation 661/2009. *Type-approval requirements for the general safety of motor vehicles*. Official Journal of the European Union, L 200/1.
- [243] UNECE Regulation No. 51. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles having at least four wheels with regard to their sound emissions* (Rev. 3). Geneva: UNECE.
- [244] NHTSA. (2020). *Federal Motor Vehicle Safety Standards*. Code of Federal Regulations, Title 49, Part 571.
- [245] SAE J57. *Sound level for passenger cars and light trucks*. SAE International Surface Vehicle Standard.

- [246] ISO 5128:1980. *Acoustic — Measurement of noise inside motor vehicles*. International Organization for Standardization.
- [247] Genuit, K., & Fiebig, A. (2006). Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(6), 952-958.
- [248] Fastl, H., & Zwicker, E. (2007). Psychoacoustics and sound quality. In *Springer handbook of acoustics* (pp. 239-263). Springer.
- [249] Daniel, P., & Weber, R. (1997). Psychoacoustical roughness: Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1), 113-123.
- [250] Aures, W. (1985). Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit [A procedure for calculating auditory roughness]. *Acustica*, 58(5), 268-281.
- [251] Terhardt, E., Stoll, G., & Seewann, M. (1982). Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 71(3), 679-688.
- [252] von Bismarck, G. (1974). Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acustica*, 30(3), 159-172.
- [253] Parizet, E., Hamzaoui, N., & Sabatie, G. (2005). Comparison of some listening test methods: A case study. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2), 356-364.
- [254] More, S. R., & Takahashi, D. (2020). A vehicle sound quality combination analysis of electric vehicles. *ICAE 2020: Proceedings of the 12th International Conference on Applied Energy*, Bangkok, Thailand.
- [255] Hastings, A., Altinsoy, E., & Çelebi, Ö. (2007). Analysis of sound quality of diesel engines using the order tracking based Campbell diagram. *Proceedings of Inter-Noise 2007*, Istanbul, Turkey.
- [256] European Commission. (2021). *Sustainable and smart mobility strategy*. Brussels: Directorate-General for Mobility and Transport.
- [257] UNEP (United Nations Environment Programme). (2022). *Global noise pollution: Status, trends and necessary actions*. Nairobi: UNEP.
- [258] ILO (International Labour Organization). (2018). *Safety and health at work: A vision for sustainable prevention*. Geneva: ILO.
- [259] WHO. (2020). *Global burden of disease from environmental noise*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

[260] World Bank. (2021). *Environmental, health, and safety guidelines for mining*. Washington, DC: International Finance Corporation.