

第五章 輪胎噪音量測標準

Tire Noise Measurement Standards

摘要 (Abstract)

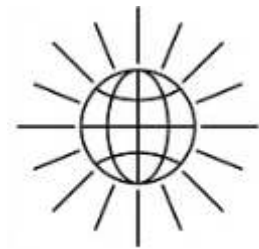
輪胎噪音量測標準構成現代交通噪音管制體系中最關鍵的技術與法規基礎之一，其目的在於以科學、可重複且具國際可比性的方式，量化輪胎與路面交互作用所產生的聲音發射水準。隨著全球汽車保有量持續成長，以及車輛動力系統朝向電動化與低噪音化發展，輪胎路面噪音在整體車輛噪音中的相對重要性顯著提升，使得建立嚴謹而一致的量測標準體系，成為保障公共健康、推動產業技術進步與促進國際貿易不可或缺的基石。

本章系統性地回顧與分析全球主要輪胎噪音量測標準體系之發展脈絡與技術內涵，涵蓋國際標準化組織所制定之 ISO 標準系列、聯合國歐洲經濟委員會框架下之 UNECE 法規，以及歐盟、美國與亞洲主要經濟體之區域與國家層級標準。章節重點說明 ISO 362 車輛加速透過噪音標準、ISO 13325 輪胎滑行噪音標準與 ISO 10844 測試路面規格在整體標準體系中的角色分工與相互關聯，並闡述這些標準如何共同建構出從測試環境、量測程序到結果判定的完整技術框架。

此外，本章深入探討標準化量測在法規執行與產業應用上的實際影響，特別是歐盟 ECE R117 法規與輪胎標籤制度如何透過強制揭露噪音性能，將技術標準轉化為市場驅動機制，促使輪胎產業朝向低噪音設計發展。章節亦納入量測不確定度評估、跨場地可比性問題及電動車時代對既有標準所帶來的挑戰，說明輪胎噪音量測標準已由單純的技術規範，演進為結合聲學科學、工程實務與政策治理的綜合性制度工具。

輪胎噪音量測標準作為全球汽車工業與環境保護領域的重要規範體系,代表了國際社會對於交通噪音管制與公共衛生保護的集體努力。在現代城市化進程中,道路交通噪音已成為影響居民生活品質的主要環境因素之一,而輪胎與路面之間的交互作用所產生的噪音,在車輛行駛速度超過每小時 40 至 50 公里時,便成為整體車輛噪音的主要來源,貢獻度可達 45%至 97%之間[1]。因此,建立科學嚴謹、可重複驗證的輪胎噪音量測標準體系,不僅對於汽車與輪胎製造業的產品開發與型式認證具有關鍵意義,更是各國政府實施環境噪音管制政策、保護公眾健康的重要法規基礎。

輪胎噪音量測標準的發展歷程反映了全球對於交通噪音問題認識的不斷深化。從 1970 年代開始,隨著汽車保有量的快速增長與城市交通密度的提升,噪音污染問題日益嚴重,促使國際標準化組織 (International Organization for



Standardization, ISO)、聯合國歐洲經濟委員會 (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)、美國聯邦政府及各主要經濟體陸續制定相關的噪音量測與限值標準。這些標準不僅規範了量測方法的技術細節,包括測試場地的聲學特性、測試條件的環境參數、量測儀器的精度要求、車輛行駛的速度與加速度條件等,更建立了完整的型式認證與標籤制度,讓消費者能夠在購買決策中考量輪胎的噪音性能,從而透過市場機制推動產業朝向低噪音產品發展[2][3]。

當前的輪胎噪音量測標準體系呈現出多層次、多區域的複雜格局,主要包括國際標準層面的 ISO 標準系列、區域性法規層面的歐盟 ECE 法規與美國 FMVSS 標準、以及各國家或地區的特定標準如日本 JASO 標準、中國 GB 標準、韓國 KS 標準等。這些標準之間既存在技術方法上的協調與互認,也因各地區的道路條件、車輛特性、管制政策等差異而保留一定的獨特性。例如,ISO 362 系列標準作為國際通用的車輛加速行駛噪音量測方法,已被多數國家採納或作為本國標準的技術基礎;ISO 13325 標準則專注於滑行狀態下的輪胎路面噪音量測,特別適用於輪胎本身的噪音性能評估;而 ISO 10844 標準則定義了進行噪音測試所需的標準化路面規格,確保不同測試場地之間結果的可比性[4][5]。

在法規層面,歐盟的 ECE R117 法規與配套的輪胎標籤制度 (Regulation EU 1222/2009 及其修訂版 EU 2020/740)建立了全球最為嚴格且完善的輪胎噪音管制體系,不僅對新輪胎設定了明確的噪音限值要求,還要求製造商在輪胎標籤上清楚

標示噪音等級,讓消費者能夠直觀地了解產品的噪音性能[6][7]。美國則主要透過聯邦機動車輛安全標準(Federal Motor Vehicle Safety Standards, FMVSS)第 119 號與美國汽車工程師學會(Society of Automotive Engineers, SAE)的相關標準來規範輪胎性能,雖然美國環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)在 1970 年代曾制定噪音排放標準,但目前聯邦層級的輪胎噪音管制相對較為寬鬆,各州保有一定的自主管制權限[8][9]。亞洲地區,日本、中國、韓國等主要經濟體均已建立相對完整的輪胎噪音標準體系,其中中國的 GB 標準體系近年來持續更新,逐步與國際標準接軌,反映了該國在汽車產業全球化背景下對產品品質與環境保護的重視[10][11]。

展望未來,輪胎噪音量測標準的發展呈現出幾個重要趨勢:首先是標準的國際協調與統一化趨勢,在聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)的框架下,各國正致力於推動全球統一技術法規(Global Technical Regulation, GTR)的制定,以減少貿易壁壘、降低產業合規成本;其次是標準要求的日益嚴格化,隨著對噪音健康影響認識的深化與靜音技術的進步,各主要市場正逐步降低噪音限值、擴大適用範圍;再者是電動車時代的特殊挑戰,由於電動車輛在低速時缺乏引擎噪音掩蔽效果,輪胎路面噪音的相對重要性顯著提升,促使標準制定者關注新的測試場景與評估方法;最後是量測技術的創新發展,包括近場量測法(Close Proximity Method, CPX)、聲強法、室內轉鼓測試(Indoor Drum Test, 也稱為底盤測功機測試,英文為 Chassis Dynamometer Testing 或 Rolling Road Test)等新興技術正逐步被納入標準體系,以補充傳統透過噪音(Pass-by)測試方法的不足,提供更為全面與準確的噪音性能評估[12][13][14]。

本章將系統性地介紹當前全球主要的輪胎噪音量測標準體系,從國際標準、區域法規到國家標準,詳細論述各標準的技術內容、適用範圍、量測方法、限值要求及實施現狀,並深入分析標準發展的最新趨勢與未來方向,為從事輪胎研發、測試認證、政策制定及學術研究的專業人員提供全面而深入的參考資訊。

5.1 國際標準體系 (International Standards System)

國際標準體系在輪胎噪音量測領域扮演著基礎性與協調性的關鍵角色,為全球範圍內的產品測試、型式認證、貿易流通與技術交流提供了統一的技術語言與參考框架。國際標準化組織(ISO)作為全球最具權威性的標準制定機構,其制定的輪胎噪音相關標準已被廣泛採納,成為各國制定本國標準與法規的重要技術基礎。與



此同時,聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)在其世界車輛法規協調論壇(World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, WP.29)框架下推動的國際協調進程,也為全球輪胎噪音標準的統一化做出了重要貢獻。這些國際標準體系不僅反映了當代聲學量測技術的最高水準與最佳實踐,更表現了國際社會在環境保護、公共健康與永續發展方面的共識[15][16]。

國際標準體系的建立與發展經歷了漫長的技術積累與國際協商過程。早在 1960 年代,ISO 便開始關注車輛噪音問題,並於 1964 年發布了 ISO/R 362:1964 標準,這是最早的車輛透過噪音量測方法國際標準之一。隨著聲學量測技術的進步與對輪胎路面噪音機制認識的深化,該標準經歷了多次重大修訂,逐步完善了測試方法的技術細節、擴大了適用車輛範圍、提高了量測精度要求。特別是進入 21 世紀以來,國際標準的修訂頻率明顯加快,這既反映了技術進步的速度,也表現了各國對噪音管制日益嚴格的政策需求。例如,ISO 362 標準從 2007 年的第一版修訂到 2015 年的第二版,再到 2022 年的最新版本,每次修訂都納入了最新的研究成果與實踐經驗,不斷提升標準的科學性與適用性[17][18]。

國際標準體系的核心特徵在於其技術中立性、科學嚴謹性與廣泛適用性。首先,國際標準的制定遵循開放透明的程序,由來自各成員國的技術專家組成的工作組共同參與,確保



標準內容能夠平衡不同利益相關方的關切,既要滿足環境保護與消費者權益保護的需求,又要考慮技術可行性與產業實施成本。其次,國際標準建立在大量實驗數據與科學研究基礎之上,經過嚴格的技術驗證與國際比對測試(Round Robin Test),確保量測方法的可重複性與結果的可靠性。例如,ISO 10844 標準規定的測試路面聲學特性參數,是基於對全球數百個測試場地的實測數據分析而確定的,能夠代表典型城市道路的聲學環境[19][20]。再者,國際標準採用技術性語言而非法律性語言,不包含強制性要求與處罰條款,各國可根據本國情況選擇性地採納或修改,這種彈性使得國際標準能夠在保持技術先進性的同時,適應不同國家與地區的具體需求[21]。

國際標準體系在全球輪胎噪音管制中發揮著多方面的重要功能。首先是技術參考功能,各國在制定本國標準或法規時,通常會優先參考現有的國際標準,以避免重複投入研發資源、確保與國際主流技術路線的一致性。例如,歐盟的 ECE R117 法規、美國的 SAE J2805 標準、中國的 GB 標準等,均在量測方法上大量參考或直接採用 ISO 標準的規定。其次是技術協調功能,國際標準為不同國家與地區之間

的相互認可與技術對話提供了共同基礎,促進了國際貿易的便利化。當前全球汽車產業高度國際化,同一品牌的輪胎往往需要在多個國家銷售,如果各國標準差異過大,將大幅增加產品認證成本與市場准入難度。國際標準的廣泛採納有助於減少這種碎片化,促進全球市場的整合[22][23]。再者是技術進步推動功能,國際標準的制定與修訂過程本身就是一個技術交流與創新的平台,來自不同國家的專家在此過程中分享最新研究成果、討論技術難題、探索解決方案,從而推動整個領域的技術進步。許多創新性的量測技術與評估方法,正是在國際標準化工作中得到驗證並推廣應用的[24][25]。

國際標準體系中,與輪胎噪音量測直接相關的主要標準包括 ISO 362 系列(車輛加速行駛噪音量測)、ISO 13325(輪胎滑行噪音量測)、ISO 10844(測試路面規格)、ISO 11819 系列(路面聲學特性量測)等。這些標準共同構成了一個完整的技術框架,涵蓋了從測試環境準備、量測儀器校準、測試程序執行到數據處理分析的全過程。值得注意的是,這些標準並非孤立存在,而是相互關聯、相互支持的體系。例如,ISO 362 與 ISO 13325 標準均要求在符合 ISO 10844 規格的標準路面上進行測試,以確保不同測試場地之間結果的可比性;ISO 362 標準規定的車輛透過噪音量測主要反映整車的噪音排放水準,包含動力系統、排氣系統與輪胎路面噪音的綜合影響,而 ISO 13325 標準則透過滑行測試方式,特別關注輪胎本身的噪音性能,兩者相輔相成,提供了多角度的噪音評估途徑[26][27][28]。

當前,國際標準體系正面臨新技術革命帶來的挑戰與機遇。電動車輛的快速普及改變了車輛噪音的構成特徵,傳統上占主導地位的引擎噪音大幅降低,使得輪胎路面噪音、風噪音等其他噪音源的相對重要性顯著提升。這要求標準制定者重新審視現有量測方法的適用性,開發針對電動車輛特點的新測試規程。例如,ISO 362-1:2015 標準已開始考慮混合動力車輛與純電動車輛的特殊測試條件,而相關技術委員會正在研究如何進一步優化測試方法以更準確地反映這類車輛的實際噪音排放[29][30]。此外,自動駕駛技術的發展也可能對未來的噪音標準產生影響,因為自動駕駛車輛的行駛模式、速度控制與加速特性可能與傳統人工駕駛存在差異。同時,先進的量測技術如聲學相機(Acoustic Camera)、近場測量法、聲學全息術等新興技術的成熟,也為標準體系的升級提供了技術支撐,使得更為精細、更為全面的噪音源識別與量測成為可能[31][32]。

國際標準體系的另一個重要發展方向是對量測不確定度(Measurement Uncertainty)的重視。任何物理量測都不可避免地存在誤差與不確定度,影響因素

包括量測儀器的精度、環境條件的變化、測試操作的人為因素等。為了提高測試結果的可靠性與可比性,近年來國際標準化組織專門成立了量測不確定度工作組 (Informal Working Group on Measurement Uncertainties, IWGMU),系統研究輪胎噪音量測中的不確定度來源、量化方法與控制措施。2023 年發布的 ISO 13325 修訂版(Amendment 1)專門增加了量測不確定度的評估要求,標誌著國際標準在這一領域的重要進展[33][34]。根據研究,輪胎噪音量測的不確定度主要來源包括:測試速度誤差(速度變化 1 km/h 可導致約 0.2 dB 的噪音差異)、環境溫度變化(溫度變化從 0°C 到 40°C 可導致約 0.4 dB 的影響)、路面狀態差異(不同 ISO 10844 路面之間可能存在 0.3-0.5 dB 的差異)、輪胎負載與氣壓變化等[35][36]。透過量化這些不確定度並在標準中設定相應的控制範圍,可以顯著提高測試結果的重複性與再現性。

國際標準體系的成功實施離不開有效的標準維護與技術支持機制。ISO 技術委員會 TC43(聲學)下設的 SC1 分委員會(噪音)專門負責車輛噪音相關標準的制定與維護工作,該分委員會定期召開會議,審議標準修訂提案、討論技術問題、協調國際合作。此外,ISO 還建立了標準定期審查制度,通常每五年對現行標準進行一次系統評估,根據技術進步與應用反饋決定是否需要修訂、更新或廢止。這種動態管理機制確保了國際標準能夠及時反映最新技術發展,保持其先進性與適用性[37][38]。同時,為了支持標準的正確實施,ISO 還提供了大量的技術指導文件、操作手冊與培訓資源,幫助測試機構、製造企業與認證機構準確理解與執行標準要求。許多發達國家還建立了國家級的參考實驗室與校準服務體系,為本國的輪胎噪音測試提供技術支持與品質保證[39][40]。

總體而言,國際標準體系在推動全球輪胎噪音管制、促進技術進步與國際貿易方面發揮了不可替代的重要作用。隨著全球環境保護意識的提升、新能源車輛技術的發展與量測技術的進步,國際標準體系將繼續演進,在保持技術先進性的同時,更加注重標準的協調統一、實施的可操作性與對產業創新的支持。未來的國際標準不僅要規範如何準確量測輪胎噪音,更要為降低交通噪音、改善城市聲環境、保護公眾健康提供有力的技術支撐,成為實現永續交通發展目標的重要工具。

5.2 ISO 標準 (ISO Standards)

國際標準化組織(ISO)制定的輪胎與車輛噪音量測標準代表了全球聲學量測領域的最高技術水準,為世界各國的法規制定、產品認證與技術研發提供了權威的技術參考。ISO 標準體系在輪胎噪音量測領域主要包括三大核心標準系列:ISO 362

系列標準專注於車輛加速行駛狀態下的透過噪音量測,主要用於整車的噪音型式認證;ISO 13325 標準則針對輪胎在滑行狀態下的噪音發射量測,特別適用於評估輪胎本身的聲學性能;ISO 10844 標準則定義了進行噪音測試所必需的標準化測試路面的技術規格與驗證方法。這三個標準相互補充、共同構成了完整的輪胎噪音量測技術框架,涵蓋了從測試環境準備到量測執行的各個環節,確保測試結果的準確性、可重複性與國際可比性[41][42]。

ISO 標準在輪胎噪音量測領域的發展歷程反映了該技術領域的演進軌跡與國際合作的深化。早在 1960 年代,隨著汽車工業的快速發展與噪音污染問題的日益嚴重,ISO 便開始關注車輛噪音的量測與評估問題。最初的標準主要關注整車噪音的透過量測,隨著對噪音源認識的深化與輪胎技術的進步,逐步發展出專門針對輪胎路面噪音的量測方法。這一演進過程中,來自歐洲、北美、日本等主要汽車與輪胎生產國的技術專家貢獻了大量研究成果,透過國際比對測試驗證了方法的有效性,並透過反覆的技術協商達成了國際共識[43][44]。



ISO 標準的制定遵循嚴格的技術程序與科學方法論,確保標準內容的科學性與實用性。標準制定過程通常包括以下階段:首先是需求識別階段,由各成員國或相關利益方提出標準制定或修訂的需求,經技術委員會評估確認;其次是技術研究階段,由專門的工作組進行深入的技術研究,包括文獻回顧、實驗驗證、數據分析等,形成標準草案;然後是國際協商階段,草案在成員國之間傳閱徵求意見,經過多輪討論修改達成共識;最後是正式發布與實施階段。整個過程通常需要數年時間,確保標準內容能夠充分反映當代技術水準與實踐需求[45][46]。在標準實施後,ISO 還建立了定期審查機制,通常每五年對標準進行一次系統評估,根據技術進步與應用反饋決定是否需要修訂。這種動態管理確保了 ISO 標準能夠持續保持其先進性與適用性[47]。

ISO 標準在全球輪胎噪音管制體系中發揮著核心作用,其影響力表現在多個層面。首先,ISO 標準為各國制定本國標準或法規提供了重要的技術基礎。歐盟的 ECE R117 法規、美國的 SAE 標準、日本的 JASO 標準、中國的 GB 標準等,在量測方法的核心技術要求上均大量參考或直接採納 ISO 標準的規定。這種技術協調不僅降低了各國標準制定的成本,更重要的是促進了國際貿易的便利化,使得透過某一市場認證的產品更容易進入其他市場[48][49]。其次,ISO 標準為產業界提供了明確的技術指引,幫助製造企業進行產品開發與品質控制。全球主要的輪胎製造

商如米其林(Michelin)、普利司通(Bridgestone)、固特異(Goodyear)等,均建立了符合 ISO 標準要求的測試設施,並將 ISO 標準作為產品開發過程中的重要技術參考。再者,ISO 標準為獨立測試機構與認證機構提供了統一的測試規範,確保不同機構之間測試結果的可比性與公正性[50][51]。

ISO 標準體系的技術特徵在於其系統性、精確性與可操作性。首先,ISO 標準對量測的各個環節均提出了明確的技術要求,包括測試場地的聲學環境條件(如背景噪音水準、反射面距離等)、測試路面的物理與聲學特性(如表面紋理、聲音



吸收係數等)、量測儀器的技術規格(如麥克風類型、頻率響應、動態範圍等)、環境條件的容許範圍(如溫度、濕度、風速等)、車輛測試的操作程序(如加速度控制、速度容差等)、數據處理的計算方法等[52][53]。這種全面系統的規定確保了測試過程的標準化,最大程度地減少了人為因素與環境因素的影響。其次,ISO 標準採用量化的技術語言,對各項參數均給出了明確的數值要求與容差範圍,避免了模糊性與歧義性。例如,ISO 10844 標準規定測試路面的平均剖面深度(Mean Profile Depth, MPD)應在 0.4 至 1.3 毫米之間,聲音吸收係數在 1000 赫茲頻率下應小於 0.06 等[54][55]。再者,ISO 標準注重可操作性,提供了詳細的測試程序說明與數據處理方法,使得不同背景的技術人員均能準確執行標準要求。

ISO 標準在持續演進中不斷納入新技術與新理念。近年來的重要發展包括:第一,對量測不確定度的系統評估。2023 年 ISO 13325 標準的修訂版專門增加了量測不確定度的評估要求,要求測試機構量化各種不確定度來源並在報告中說明,這標誌著 ISO 標準向更高精度與可靠性的邁進[56]。第二,對電動車輛特殊性的考慮。隨著電動車輛市場份額的快速增長,ISO 362 標準在最新修訂中特別增加了針對純電動與混合動力車輛的測試規定,考慮到這類車輛缺乏傳統引擎噪音、起步加速特性不同等因素,調整了測試程序與評估方法[57][58]。第三,對新興量測技術的整合。除了傳統的透過噪音量測方法,ISO 還在探索將近場量測法(CPX)、聲學全息術、陣列式麥克風等新技術納入標準體系,以提供更為全面與精細的噪音評估[59][60]。第四,對永續性與環境保護的強調。最新的 ISO 標準更加關注測試過程的環境友好性,如鼓勵使用可再生能源設施、減少測試過程的資源消耗等,表現了永續發展理念在標準制定中的滲透[61]。

5.2.1 ISO 362 系列 (ISO 362 Series)

ISO 362 系列標準是國際上最為重要與廣泛應用的車輛噪音量測標準,專門規範了道路車輛在加速行駛狀態下的外部噪音量測方法,被廣泛應用於汽車的型式認證、產品開發與噪音管制。該系列標準的核心目標是建立一種工程化的量測方法(Engineering Method),能夠在受控條件下重現車輛在典型城市交通環境中的噪音發射水準,為政府監管部門、製造企業與消費者提供可靠的噪音性能評估數據。ISO 362 系列標準經歷了多次重大修訂,從最初的 1964 年版本到當前的 2022 年版本,持續反映了聲學量測技術的進步、車輛技術的演變與環境保護要求的提升[62][63]。

ISO 362 系列標準的發展歷程可以劃分為幾個重要階段。第一代標準(ISO/R 362:1964)是在 1960 年代制定的,當時車輛噪音主要來自引擎與排氣系統,測試方法相對簡單,主要關注車輛在全油門加速時的最大噪音水準。該標準雖然為早期



5.2.1 ISO 362 Series

期的車輛噪音管制提供了基礎,但由於測試條件過於極端、與實際使用情況差距較大,逐漸顯現出局限性[64]。第二代標準(ISO 362:1998 及其後續修訂版)在 1990 年代末進行了重大革新,引入了更為合理的測試工況,包括對加速度的精確控制、對檔位選擇的明確規定、對參考點的標準化定義等,使得測試結果更能代表車輛在城市道路實際行駛時的噪音水準[65][66]。第三代標準(ISO 362-1:2007)進行了結構性重組,將標準分為多個部分,第一部分(Part 1)專門針對 M 類與 N 類車輛(乘用車與貨車),規定了戶外測試的工程化方法;同時還計畫制定第二部分針對 L 類車輛(摩托車),第三部分針對室內測試方法等,表現了標準體系的系統化[67][68]。當前最新的 ISO 362-1:2022 標準(已於 2022 年發布,取代 2015 年版本)代表了該領域的最新技術成果,包含了以下幾個重要的技術特徵與改進。首先,標準對適用車輛範圍進行了明確定義,適用於總質量不超過 3.5 噸的 M1 類乘用車、M2 類載客車輛與 N1 類輕型商用車,以及總質量超過 3.5 噸的 N2 與 N3 類重型商用車,基本涵蓋了除摩托車外的所有道路機動車輛[69]。其次,標準規定了詳細的測試場地要求,包括測試區域應為基本平坦的開闊空間,中心區域半徑至少 50 米範圍內不得有大型反射物體(建築物、圍牆等),測試路面必須符合 ISO 10844 規定的標準化路面規格,測試路段長度至少 20 米,背景噪音水準應比預期的車輛透過噪音至少低 10 分貝等[70][71]。這些嚴格的場地要求確保了測試環境的聲學特性符合標準假設,避免了環境因素對測試結果的干擾。

ISO 362-1 標準的測試方法核心是透過噪音量測(Pass-by Noise Measurement),即車輛以規定的速度與加速度狀態透過測試區域,在道路兩側設置的麥克風記錄透過過程中的最大 A 計權噪音值。具體測試程序包括以下步驟:第一步是車輛準備與條件確認,包括確保車輛處於正常工作溫度、輪胎氣壓符合製造商規定、車輛負載符合標準要求(通常為駕駛員加一名前座乘客或等效質量)等[72]。第二步是檔位與速度的確定,標準對不同類型車輛規定了具體的測試檔位選擇方法,基本原則是選擇車輛在城市駕駛中最常使用的檔位,對於手動變速器車輛,通常選擇第二或第三檔;對於自動變速器車輛,則讓變速器自動選擇檔位。測試速度通常為 50 公里/小時,這是城市道路的典型速度,也是輪胎路面噪音開始成為主要噪音源的速度範圍[73][74]。

第三步是加速度控制,這是 ISO 362 標準最關鍵的技術要求之一。標準規定車輛應以全油門或接近全油門狀態加速透過測試區域,具體的加速度要求根據車輛的功率質量比(Power-to-



Mass Ratio, PMR)而定。對於 PMR 較高的高性能車輛,為避免過高的噪音而採用部分油門加速;對於 PMR 較低的普通車輛,則採用全油門加速以充分反映其動力系統噪音。標準還規定了加速度的目標值與容差範圍,要求實際加速度在目標值的 $\pm 5\%$ 以內,確保測試的可重複性[75][76]。第四步是噪音量測,在車輛行駛路徑中心線兩側各 7.5 米處設置麥克風,麥克風高度為 1.2 米,方向指向車輛透過的參考點。量測系統應符合 IEC 61672 標準規定的 1 級或更高等級噪音計的要求,能夠準確記錄 A 計權噪音值的瞬時值與最大值[77][78]。

第五步是數據處理與結果計算。對於每側麥克風,記錄車輛透過測試區域過程中的最大 A 計權噪音值。標準要求進行至少兩次有效測試,每次測試的結果差異不應超過 2 分貝,最終結果取多次測試的算術平均值。如果兩側麥克風測得的噪音水準差異超過 2 分貝,需要檢查測試條件是否符合要求,必要時重新進行測試[79]。第六步是修正與報告,標準規定了對非標準條件的修正方法,例如當環境溫度偏離參考溫度(20°C)時,需要根據溫度對輪胎噪音的影響進行修正;當大氣壓力顯著偏離標準大氣壓時,也需要進行相應修正。最終的測試報告應包含車輛識別信息、測試條件參數、量測結果數據、修正方法說明等完整內容[80][81]。

ISO 362 標準特別關注輪胎路面噪音的評估,雖然該標準測量的是整車透過噪音,包含了動力系統、排氣系統、輪胎路面、空氣動力等多種噪音源的綜合影響,但在規定的測試速度與加速度條件下,輪胎路面噪音通常是最主要的貢獻源之一,特別

是對於排放標準嚴格、動力系統較為安靜的現代車輛。研究表明,在 50-60 公里/小時的速度範圍內,輪胎路面噪音對總噪音的貢獻度可達 50-70%,而在更高速度下這一比例還會進一步提升[82][83]。因此,ISO 362 標準的測試結果在很大程度上反映了輪胎的噪音性能,成為評估與比較不同輪胎產品噪音水準的重要依據。

ISO 362 標準在實施中面臨一些技術挑戰與爭議。首先是測試結果與實際道路噪音的代表性問題。標準規定的測試是在高度理想化的環境與條件下進行的,包括平坦光滑的標準路面、無風或微風的氣象條件、精確控制的加速度等,這些條件在實際城市道路上很難完全滿足。因此,標準測試得到的噪音水準往往低於車輛在實際使用中的噪音排放。為了解決這一問題,一些研究者提出應該開發更貼近實際使用情況的補充測試方法,或者對標準限值進行調整以考慮實際環境的複雜性[84][85]。其次是對不同動力系統類型車輛的公平性問題。傳統燃油車、混合動力車與純電動車在噪音特性上存在顯著差異,現行標準的測試方法可能對某些類型車輛更為有利或不利。例如,電動車在加速時動力輸出非常平順,很容易滿足加速度控制要求,而且缺乏引擎噪音使得輪胎噪音相對更為突出。這引發了關於是否需要針對不同動力系統制定不同測試方法或評估標準的討論[86][87]。

再者是測試成本與可及性問題。符合 ISO 362 標準要求的測試場地建設與維護成本較高,需要大面積的平坦開闊空間、專門鋪設的標準路面、精密的量測儀器等,這使得只有大型企業與專業測試機構才能負擔,限制了標準的普及應用。為此,ISO 362 系列標準的第三部分(ISO 362-3)專門制定了室內測試方法(Indoor Testing),允許在半消音室(Semi-Anechoic Chamber)配合底盤測功機(Chassis Dynamometer)進行測試,雖然設備投資仍然較高,但相比戶外測試場地具有受天氣影響小、測試效率高、全年可用等優點,為標準的推廣應用提供了補充途徑[88][89]。此外,標準的複雜性也對測試人員的專業能力提出了較高要求,需要對聲學原理、車輛動力學、量測技術等有深入理解,才能準確執行標準並正確解釋結果。

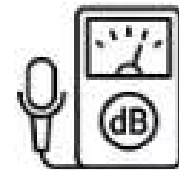
ISO 362 標準的未來發展方向包括幾個重要方面。首先是進一步提高測試的代表性與準確性,透過引入更多實際道路數據、優化測試條件設定、改進數據處理方法等,使標準測試結果更能反映車輛的實際噪音排放特性。其次是加強對新能源車輛的適用性,隨著電動車輛技術的快速發展與市場份額的增長,需要專門研究這類車輛的噪音特性,制定更為針對性的測試方法與評估指標。再者是推動測試方法的自動化與智能化,利用先進的傳感技術、自動控制技術與數據分析技術,減少測試過程中的人為因素影響,提高測試效率與一致性[90][91]。最後是加強與其他相

關標準的協調,特別是與 ISO 13325 輪胎滑行噪音標準、ISO 10844 路面標準等的技術對接,形成更為統一協調的標準體系,為全面評估與管制車輛噪音提供完整的技術框架[92]。

5.2.2 ISO 13325 標準 (ISO 13325 Standard)

ISO 13325 標準《輪胎—滑行法量測輪胎對路面聲音發射》(Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission)是專門針對輪胎本身噪音性能評估的國際標準,與 ISO 362 標準形成互補關係。如果說 ISO 362 標準關注的是整車在動力驅動下的綜合噪音表現,那麼 ISO 13325 標準則聚焦於輪胎與路面交互作用產生的純粹滾動噪音。該標準採用滑行測試方法(Coast-by Method),即車輛在達到規定速度後切入空檔、關閉引擎,以自由滾動狀態透過測試區域,此時動力系統噪音基本消除,測得的噪音主要來自輪胎與路面的相互作用,從而實現對輪胎噪音性能的獨立評估。這一標準對於輪胎製造商的产品開發、噪音性能優化與型式認證具有關鍵意義,也是歐盟輪胎標籤制度等法規體系的重要技術基礎 [93][94][95]。

ISO 13325 標準的發展歷程表現了國際社會對輪胎噪音問題認識的深化與管制手段的完善。該標準的第一版於 2003 年發布,是在 1990 年代末期大量研究成果基礎上形成的,當時歐



洲多個國家已經開始實施輪胎噪音標籤制度,迫切需要一個統一的測試方法來確保不同國家、不同實驗室之間測試結果的可比性。第一版標準確立了滑行測試的基本方法框架,包括測試場地要求、車輛準備、測試程序、數據處理等核心內容 [96]。經過十餘年的實施與技術積累,2019 年發布了第二版(ISO 13325:2019),進行了重大的技術更新與完善。主要改進包括:更明確的測試路面規格要求(必須符合 ISO 10844 標準)、更嚴格的環境條件控制(溫度、風速、濕度等)、更詳細的輪胎負載與氣壓規定、引入了測試輪胎的磨合要求(新輪胎需經過一定里程的磨合後才能測試,以確保性能穩定)等[97][98]。

ISO 13325 標準 2023 年的修訂(Amendment 1)是該標準發展的一個重要里程碑,專門增加了量測不確定度(Measurement Uncertainties)的系統評估要求。這一修訂反映了國際標準化組織對量測科學嚴謹性的重視,要求測試機構不僅要報告測試結果的數值,還要量化結果的不確定度範圍,說明各種不確定度來源的貢獻。研究表明,輪胎噪音量測的不確定度主要來源包括:測試速度控制誤差(速度每變化 1 km/h,噪音水準可能變化約 0.2 dB)、輪胎溫度影響(溫度從 0°C 變化到 40°C 可導

致 0.4 dB 的差異)、路面狀態差異(即使都符合 ISO 10844 標準,不同測試路面之間仍可能存在 0.3-0.5 dB 的系統性差異)、輪胎負載與氣壓變化、麥克風位置偏差、背景噪音干擾等。透過量化這些不確定度並在測試報告中說明,可以幫助用戶更準確地理解與比較測試結果,也為標準限值的設定提供了科學依據[99][100][101]。ISO 13325 標準規定的測試方法包含以下詳細步驟與技術要求。首先是測試場地與環境條件,標準要求測試必須在符合 ISO 10844 規定的標準路面上進行,測試區域應為開闊平坦空間,半徑至少 25 米範圍內無大型反射物體,背景噪音水準應比預期測試結果低至少 10 分貝。環境溫度應在 5°C 至 40°C 之間,路面溫度應在 5°C 至 50°C 之間,風速不應超過 5 米/秒,測試期間不應有降雨或路面積水。這些嚴格的環境控制確保了測試的可重複性與結果的可靠性[102][103]。其次是測試車輛與輪胎準備,標準規定應使用代表性的測試車輛,車輛總質量應符合輪胎的負載等級要求。測試輪胎應裝配在車輛的前軸或後軸(取決於驅動方式與標準規定),輪胎氣壓應設定為製造商推薦的正常使用壓力,或按照 ECE R117 法規規定的特定壓力值。新輪胎在測試前應進行磨合,通常要求至少行駛 100-200 公里,以確保輪胎表面特性穩定[104][105]。

第三是測試速度的選擇與控制,ISO 13325 標準規定了多個測試速度點,通常包括 50、80 和 110 公里/小時(對於限速較低的地區可選擇較低速度)。這種多速度測試能夠全



面反映輪胎在不同行駛條件下的噪音特性。車輛應在進入測試區域前達到規定速度,然後切入空檔(手動變速器)或 N 檔(自動變速器)、關閉引擎,以自由滾動狀態透過測試區域。對於無法關閉引擎的車輛(如混合動力車),可以保持引擎運轉但必須確保引擎處於怠速狀態且不參與驅動。速度控制的精度要求為目標速度的 ± 2 公里/小時,透過精密的速度測量系統(如光電感應器或 GPS 設備)來監測與驗證[106][107][108]。

第四是麥克風布置與聲學量測,標準規定在車輛行駛路徑中心線兩側各 7.5 米處設置麥克風,麥克風高度為地面以上 1.2 米,朝向車輛透過的中心參考點。量測系統應使用符合 IEC 61672 標準 Class 1 級別的精密噪音計,能夠記錄 A 計權噪音值的時間歷程,採樣頻率應足夠高以捕捉噪音的瞬時變化(通常每秒至少 10 個數據點)。量測系統應定期校準,每次測試前後都應使用聲學校準器進行現場校準,確保系統處於正常工作狀態[109][110]。第五是數據記錄與處理,對於每次透過測試,記錄兩側麥克風測得的最大 A 計權噪音值以及對應的時間歷程曲線。標準要求對

每個測試條件(速度、負載等)至少進行兩次有效測試,兩次測試結果的差異不應超過 2 分貝,否則需要檢查測試條件並重新測試。最終結果取多次測試的算術平均值,並根據標準規定的方法修正到參考條件(如參考溫度 20°C)[111][112]。

第六是特殊測試條件與修正方法,ISO 13325 標準詳細規定了各種非標準條件的修正方法。例如,當測試溫度偏離參考溫度 20°C 時,需要進行溫度修正,修正係數通常為每攝氏度 0.01-0.02 分貝(具體值取決於輪胎類型與路面特性)。當輪胎負載或氣壓偏離標準規定時,也需要進行相應修正。標準還規定了對風速影響的評估方法,雖然測試要求風速不超過 5 米/秒,但即使在此範圍內,風速仍可能對測試結果產生 0.1-0.3 分貝的影響,特別是對於高速測試[113][114]。第七是測試報告要求,完整的測試報告應包含:輪胎的完整識別信息(製造商、型號、尺寸、胎紋深度等)、測試車輛信息(製造商、型號、總質量、軸荷分配等)、測試條件參數(溫度、濕度、風速、路面狀態等)、測試路面的 ISO 10844 符合性證明、量測結果數據(每次測試的詳細數據與最終平均值)、不確定度評估、修正方法說明等[115][116]。

ISO 13325 標準在實施中積累了大量的實踐經驗與技術數據。研究表明,相同輪胎在不同符合 ISO 10844 標準的測試路面上測試,結果可能存在 0.5-1.0 分貝的系統性差異,這主要是由於路面的微觀紋理、材料組成、老化程度



等因素的細微不同造成的。為了提高測試結果的可比性,一些研究機構建議引入參考輪胎(Reference Tyre)制度,即使用統一的標準參考輪胎定期對測試路面進行聲學特性評估,透過參考輪胎的測試結果來修正不同測試場地之間的系統性偏差[117][118]。此外,輪胎的磨損狀態對噪音水準也有顯著影響,研究發現從新胎到磨損 50%胎面深度,噪音水準可能增加 1-3 分貝,而且不同胎面花紋的噪音隨磨損的變化趨勢也不同。這促使歐盟在最新的 ECE R117 法規修訂中增加了磨損輪胎的噪音性能要求,要求輪胎在磨損到一定程度後仍需滿足噪音限值,以確保輪胎在整個使用壽命期間都能維持良好的噪音性能[119][120]。

ISO 13325 標準與相關法規的關係密切。該標準是歐盟 ECE R117 法規與輪胎標籤制度(EU 1222/2009 及其修訂版 EU 2020/740)規定的官方測試方法,所有在歐盟市場銷售的輪胎都必須按照該標準進行噪音測試並在標籤上標示噪音等級。這一強制性要求極大地推動了 ISO 13325 標準的普及應用,使其成為全球輪胎行業最重要的噪音測試標準之一。許多其他國家與地區雖然沒有強制要求,但也廣泛參考該標準進行輪胎噪音評估,因為透過該標準測試的輪胎更容易進入國際市場

[121][122][123]。同時,ISO 13325 標準也為輪胎製造商的產品開發提供了重要的技術指引,幫助企業優化輪胎設計、選擇低噪音材料、改進胎面花紋等,從技術源頭降低輪胎噪音。

ISO 13325 標準未來的發展方向包括幾個重要領域。首先是進一步提高測試的精度與可重複性,透過更嚴格的環境控制、更精密的量測設備、更完善的校準程序等,將測試不確定度降低到更小的範圍。其次是擴展測試的適用範圍,當前標準主要針對乘用車輪胎,對於商用車輪胎、特種車輛輪胎的測試方法還需要進一步完善。再者是開發室內測試的替代方法,利用輪胎噪音測試轉鼓(Drum Test Facility)在受控的實驗室環境中進行測試,雖然轉鼓測試與實際道路測試之間存在一定差異,但透過建立可靠的相關性模型,可以為產品開發階段提供快速便捷的噪音評估手段[124][125][126]。最後是與車輛電動化趨勢的結合,隨著電動車輛市場份額的增長,輪胎噪音成為車輛總噪音的更主要來源,這對輪胎的噪音性能提出了更高要求,也需要標準方法能夠更精確地評估電動車專用輪胎的噪音特性。

5.2.3 ISO 10844 測試路面 (ISO 10844 Test Surface)

ISO 10844 標準《聲學—測量道路車輛及其輪胎發出聲音的測試路面規格》(Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres)是整個輪胎與車輛噪音量測標準體系的基礎支柱,它定義了進行噪音測試所必需的標準化路面的物理特性與聲學特性,確保不同測試場地、不同時間進行的測試能夠得到可比的結果。測試路面的特性對噪音量測結果有著決定性的影響,研究表明,相同車輛在不同路面上測試,噪音水準可能相差 3-5 分貝甚至更多,這種差異足以掩蔽車輛本身的噪音性能差異,使測試結果失去意義。因此,ISO 10844 標準透過嚴格規範測試路面的材料組成、施工工藝、表面紋理、聲學特性等參數,為所有基於路面測試的噪音標準(如 ISO 362、ISO 13325 等)提供了統一的測試平台,是保證噪音量測科學性與可靠性的關鍵[127][128][129]。

ISO 10844 標準的發展歷程反映了對路面聲學特性認識的不斷深化。該標準的第一版於 1994 年發布,基於當時歐洲多個研究項目的成果,首次系統性地定義了測試路面的技術規格。早期版本主要關注路面的物理特性,如表面平整度、紋理深度等,對聲學特性的規定相對簡單。

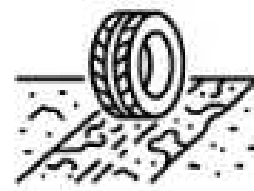


2011 年發布的第二版(ISO 10844:2011)進行了重大更新,增加了路面聲學特性的定量要求,包括聲音吸收係數的測量方法與限值範圍,這一改進顯著提高了不同測試場地之間的可比性

[130][131]。2014 年發布了技術修正版,進一步細化了某些參數的定義與測量方法。2021 年的最新版本(ISO 10844:2021)又進行了重要的技術更新,主要包括:更明確的路面材料組成要求、更嚴格的表面紋理參數控制、引入了路面長期穩定性與維護的指導、增加了路面聲學特性定期驗證的要求等[132][133][134]。

ISO 10844 標準規定的測試路面技術規格涵蓋多個關鍵方面。首先是路面材料組成,標準要求路面應採用密實型瀝青混凝土(Dense Asphaltic Concrete),骨料最大粒徑為 8 毫米,骨料應為堅硬耐磨的石材(如玄武岩、花崗岩等),瀝青含量應在適當範圍內以確保路面既有足夠的強度又不過於平滑。骨料級配應遵循標準規定的級配曲線,以確保路面表面具有適當的微觀與宏觀紋理[135][136]。其次是路面施工要求,標準規定了詳細的施工工藝參數,包括混合料拌和溫度、攤鋪溫度、碾壓方法與遍數、壓實度要求等。施工完成後,路面需要經過一定時間的養護與穩定,通常要求至少暴露於自然環境 3 個月以上,才能用於正式的噪音測試,以確保路面表面特性達到穩定狀態[137][138]。

第三是路面表面紋理特性,這是影響輪胎路面噪音的最關鍵因素之一。ISO 10844 標準規定了兩個重要的紋理參數:平均剖面深度(Mean Profile Depth, MPD)與最大紋理深度(Maximum Texture Depth, MTD)。MPD 反映路面表面的



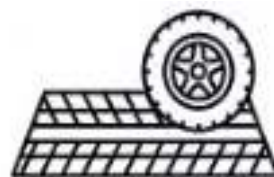
宏觀紋理特徵,標準要求 MPD 應在 0.4 至 1.3 毫米之間,這個範圍代表了典型城市道路的紋理特徵,既不過於粗糙(會產生過高的噪音)也不過於平滑(會影響輪胎的附著性能)。MPD 的測量採用雷射紋理掃描儀或類似設備,沿路面縱向與橫向進行高精度的剖面測量,然後按照 ISO 13473 標準規定的算法計算 MPD 值[139][140][141]。MTD 則透過鋪砂法(Sand Patch Method)測量,這是一種簡單但有效的現場測試方法,透過將已知體積的標準砂料鋪展在路面上形成圓形砂斑,根據砂斑面積計算路面的平均紋理深度。

第四是路面聲學特性,ISO 10844 標準規定了路面聲音吸收係數(Sound Absorption Coefficient)的限值要求。聲音吸收係數反映路面材料吸收聲波能量的能力,吸收係數越高,路面對聲音的反射越弱,對噪音測試結果的影響也越小。標準要求在 1000 赫茲頻率下,路面的聲音吸收係數應小於 0.06,這意味著路面應該是硬質的、低吸音的表面,能夠充分反射輪胎產生的聲音而不被路面吸收,從而確保麥克風能夠準確捕捉輪胎噪音。聲音吸收係數的測量採用阻抗管法(Impedance Tube Method)或原位測量法,需要專門的聲學測量設備[142][143][144]。第五是路面平整度要求,路

面應基本平坦,縱向與橫向坡度均不應超過 $\pm 1\%$,局部凹凸不平度應在嚴格控制範圍內。過大的路面不平整會導致車輛產生額外的振動噪音,干擾對輪胎路面交互噪音的評估。平整度透過水準儀或雷射測距儀測量,應在路面全長範圍內進行系統性檢查[145][146]。

第六是測試路面的尺寸與布局,ISO 10844 標準規定測試路面應至少包含一條長度 20 米以上的直線測試段,兩側各至少延伸 10 米作為加速或減速區域,總長度至少 40 米。路面寬度應至少 3 米,以容納車輛行駛與避免邊緣效應。測試區域周圍應為開闊空間,半徑至少 50 米範圍內不應有大型反射物體(建築物、圍牆、樹木等),以確保聲學環境符合自由場條件。地面應覆蓋草地或其他聲學柔軟材料,避免硬質地面造成的聲音反射[147][148]。第七是路面維護與定期驗證,ISO 10844 標準 2021 版特別強調了路面長期穩定性的重要性。測試路面在使用過程中會因為車輛行駛、氣候影響、老化等因素而逐漸改變其特性,特別是表面紋理可能被磨平、聲學特性可能發生漂移。標準要求測試路面應定期進行特性驗證,通常建議每年至少進行一次全面檢查,包括 MPD 測量、聲音吸收係數測量、平整度檢查等。如果發現某項參數超出標準規定範圍,應及時進行維護或重新鋪設[149][150][151]。

ISO 10844 標準還建議採用參考輪胎法(Reference Tyre Method)來監測路面聲學特性的穩定性。具體做法是使用一組統一的標準參考輪胎,定期在測試路面上按照 ISO 13325 方法進行滑行噪音測試,記錄測試結果並



與歷史數據比較。如果參考輪胎的測試結果出現顯著變化(通常以 0.5 分貝為警戒閾值),則表明路面特性可能發生了漂移,需要進行詳細檢查與評估。這種方法相比純粹的物理測量更能直接反映路面對輪胎噪音的實際影響,因此在實踐中得到廣泛應用[152][153]。ISO 10844 標準面臨的挑戰之一是不同測試場地之間仍然存在的系統性差異。雖然標準規定了詳細的技術規格,但由於原材料來源不同、施工隊伍技術水準差異、氣候條件影響等因素,即使都聲稱符合 ISO 10844 標準的測試路面,其實際聲學特性仍可能存在細微但可測量的差異。

研究表明,全球範圍內符合 ISO 10844 標準的測試路面,輪胎噪音測試結果可能相差 0.5-1.0 分貝,這對於噪音限值通常只有幾分貝裕度的型式認證來說是不可忽視的。為了解決這一問題,歐盟 STEER 項目(Supporting Tyres' Environmental and Economic Regulation)專門研究了 ISO 10844 路面的可重複性問題,提出了一系列改進建議,包括更嚴格的材料規格、標準化的施工程序、強制性的第三方驗證等

[154][155][156]。另一個挑戰是測試路面的建設與維護成本。符合 ISO 10844 標準的測試路面需要專門的設計、高品質的材料、精細的施工工藝與定期的維護,總投資可能達到數十萬甚至上百萬美元。這對於發展中國家或小型測試機構來說是沉重的負擔,限制了標準的普及應用。

一些研究者提出了開發低成本替代路面的可能性,例如使用預製混凝土板、改性瀝青材料等,但這些方案仍需要經過嚴格的驗證才能被標準接受[157][158]。ISO 10844 標準的未來發展方向包括:進一步細化路面材料規格,減少因材料來源差異導致的性能變化;開發更先進的路面特性監測技術,如連續式紋理掃描、自動化聲學測量等,提高驗證效率;建立國際性的參考路面網絡,在全球不同地區建立標準參考路面,定期進行國際比對測試,確保全球測試結果的一致性;研究路面老化機制與長期穩定性維護方法,延長測試路面的使用壽命、降低維護成本[159][160][161]。

5.3 歐盟法規 (European Union Regulations)

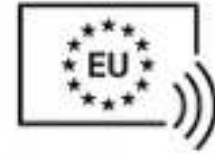


歐盟在輪胎噪音管制領域處於全球領先地位,建立了世界上最為嚴格與完善的法規體系,包括型式認證法規、市場監管制度與消費者資訊披露要求。這一綜合性法規體系不僅對在歐盟市場銷售的輪胎設定了明確的噪音性能限值,還透過強制性的輪胎標籤制度,讓消費者能夠在購買時清楚了解產品的噪音性能,從而透過市場機制推動產業朝向低噪音產品發展。歐盟輪胎噪音法規的核心包括 ECE R117 法規與輪胎標籤制度(Regulation EU 1222/2009 及其修訂版 EU 2020/740),這些法規不僅對歐盟內部產生深遠影響,也成為其他國家與地區制定類似法規的重要參考,推動了全球輪胎噪音管制的進步[162][163][164]。

歐盟輪胎噪音法規體系的建立有其深刻的社會與環境背景。歐洲人口密度高、城市化程度高,交通噪音問題嚴重影響居民生活品質。根據歐洲環境署(European Environment Agency, EEA)的統計,歐盟約有 1.13 億人口暴露於超過 55 分貝的道路交通噪音環境中,長期噪音暴露與多種健康問題相關,包括聽力損失、心血管疾病、睡眠障礙、認知功能下降等。世界衛生組織(WHO)在其《歐洲噪音環境指南》中明確指出,道路交通噪音是僅次於空氣污染的第二大環境健康風險因素[165][166][167]。在此背景下,歐盟委員會將降低交通噪音作為環境政策的重點領域,陸續出台了一系列法規與行動計畫,其中輪胎噪音管制是重要組成部分。研究表明,在車輛行駛速度超過 40-50 公里/小時後,輪胎路面噪音成為車輛總噪音的主

要來源,貢獻度可達 50-70%甚至更高,因此對輪胎噪音的管制能夠有效降低整體交通噪音水準[168][169]。

歐盟輪胎噪音法規的發展經歷了逐步完善的過程。早期的車輛噪音法規(如 Directive 70/157/EEC 及其後續修訂)主要針對整車的透過噪音,對輪胎本身沒有單獨的要求。



直到 2001 年,歐盟才首次提出專門針對輪胎噪音的法規草案,經過數年的技術討論與利益平衡,於 2009 年正式發布了兩個關鍵法規:EC Regulation No. 661/2009 關於輪胎的型式認證要求,以及 Regulation EC No. 1222/2009 關於輪胎標籤制度。這兩個法規共同構成了歐盟輪胎噪音管制的基本框架[170][171]。隨後,聯合國歐洲經濟委員會在歐盟的推動下,將相關技術要求納入 UNECE 法規體系,形成了 ECE R117 法規,使得這些要求不僅適用於歐盟成員國,也適用於其他採納 UNECE 法規的國家,大大擴展了法規的影響範圍[172][173]。歐盟輪胎噪音法規體系的核心特徵包括:第一,技術要求的嚴格性。歐盟設定的輪胎噪音限值是全球最嚴格的,而且採用了階段性遞進式的管制策略,每隔數年就會收緊限值,推動產業持續進行技術改進。例如,ECE R117 法規自 2012 年實施以來已經歷多次修訂,每次修訂都降低了噪音限值,目前最新的限值比初始值已經降低了 2-3 分貝[174][175]。第二,法規體系的完整性。歐盟不僅規定了新輪胎的噪音限值,2020 年的法規修訂還增加了對磨損輪胎的噪音性能要求,要求輪胎在磨損到一定程度後仍需保持良好的噪音性能,這確保了輪胎在整個使用壽命期間都能符合環保要求[176][177]。第三,市場機制的運用。透過強制性的輪胎標籤制度,將技術性的噪音測試數據轉化為消費者易於理解的等級資訊,讓消費者在購買決策中能夠考量噪音因素,從而形成市場對低噪音產品的需求拉動,補充了政府管制的不足[178][179]。

第四,法規實施的嚴格監督。歐盟建立了完善的市場監督體系,成員國主管部門定期對市場上銷售的輪胎進行抽查測試,核實產品是否符合標示的噪音性能與法規限值。對於違規產品,製造商將面臨嚴厲的處罰,包括產品召回、罰款、禁止銷售等。這種嚴格的執行機制確保了法規的有效性,避免了「紙面法規」的情況[180][181]。第五,與其他環保要求的協同。輪胎噪音法規與輪胎滾動阻力(影響燃油效率)、濕地抓地力(影響行車安全)等其他性能要求統一納入型式認證與標籤制度,形成了綜合性的輪胎環保與安全管制體系,避免了單一指標優化可能帶來的其他性能劣化問題[182][183]。

5.3.1 ECE R117 法規 (ECE R117 Regulation)

ECE R117 法規全稱為《關於輪胎滾動噪音、濕地附著性能與滾動阻力的型式認證統一規定》(Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions, wet grip



performance and rolling resistance),是聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)在歐盟推動下制定的國際性技術法規,對輪胎的噪音、安全與能效性能提出了綜合性要求。該法規於 2012 年 11 月正式生效實施,成為歐盟及其他採納國家進行輪胎型式認證的強制性依據。ECE R117 法規的制定標誌著輪胎管制從單純關注安全性能向環保性能與安全性能並重的轉變,反映了永續交通發展理念在法規層面的表現 [184][185][186]。

ECE R117 法規的適用範圍涵蓋了絕大多數道路車輛使用的輪胎類型。根據法規分類,適用輪胎包括:C1 類輪胎,即乘用車輪胎,適用於設計最高速度不低於 80 公里/小時的 M1 類車輛(乘用車);C2 類輪胎,即輕型商用車輪胎,適用於 M1 類與 N1 類車輛(總質量不超過 3.5 噸的商用車);C3 類輪胎,即重型商用車輪胎,適用於 N2、N3、O3、O4 類車輛(總質量超過 3.5 噸的卡車與掛車)。法規對不同類別輪胎設定了相應的測試方法與性能限值,考慮到不同類型輪胎在結構、用途、性能特點上的差異[187][188][189]。值得注意的是,法規排除了某些特殊用途輪胎的適用,如專業賽車輪胎、臨時使用備胎、速度等級低於 80 公里/小時的輪胎等,因為這些輪胎的使用場景特殊,不適合用統一的標準來要求。

ECE R117 法規規定的輪胎噪音測試方法主要基於 ISO 13325 標準,採用滑行法進行量測。具體測試程序包括:測試車輛裝配待測輪胎後,在符合 ISO 10844 標準的測試路面上加速至規定速度(通常為 80 公里/小時),然後切入空檔、關閉引擎,以自由滑行狀態透過量測區域,在車輛兩側 7.5 米處的麥克風記錄最大 A 計權噪音值。測試應在規定的環境條件下進行,包括溫度、濕度、風速等均需符合要求。每個輪胎至少進行兩次有效測試,結果取平均值並修正到參考條件[190][191][192]。法規還規定了詳細的輪胎準備要求,包括磨合程序(新輪胎需先行駛一定里程)、負載設定(根據輪胎負載指數確定)、氣壓調整(按規定公式計算)等,這些細節規定確保了測試的標準化與可重複性。

ECE R117 法規設定的輪胎噪音限值採用分類分級的方式,根據輪胎類別(C1、C2、C3)、斷面寬度、用途(正常用途或特殊用途如雪地胎)等因素確定相應的噪音限值。以 C1 類乘用車輪胎為例,當前適用的限值如下:斷面寬度≤185 毫米的輪胎,噪音限值为 68 分貝;斷面寬度在 185 至 215 毫米之間的輪胎,限值为 69 分貝;斷面寬度在 215 至 245 毫米之間的輪胎,限值为 70 分貝;斷面寬度在 245 至 275 毫米之間的輪胎,限值为 71 分貝;斷面寬度>275 毫米的輪胎,限值为 72 分貝。對於加強型輪胎(Extra Load 或 Reinforced),限值可增加 1 分貝;對於特殊用途輪胎(如 C3 雪地花紋輪胎),限值可增加 1-2 分貝[193][194][195]。這種差異化限值設定既考慮了技術可行性(寬輪胎由於接地面積大、胎面花紋複雜,天然噪音較高),也維持了對不同產品的公平性。

C2 類與 C3 類商用車輪胎的噪音限值相對較寬鬆,反映了這類輪胎承載負荷大、結構強度要求高的特點。C2 類輪胎的



限值範圍為 70-72 分貝(根據斷面寬度),C3 類輪胎的限值範圍為 72-74 分貝(根據負載指數與輪胎類型)[196][197]。ECE R117 法規採用階段性遞進式的限值收緊策略,每隔數年就會實施更嚴格的限值標準,推動產業持續進行技術改進。例如,法規最初實施時(2012 年)的限值被稱為 Stage 1 限值,隨後 2016 年實施了 Stage 2 限值(相比 Stage 1 降低了 1-2 分貝),未來還計畫實施更嚴格的 Stage 3 限值。這種漸進式策略給予產業足夠的技術準備時間,避免了過於激進的要求導致的市場混亂,同時也持續施加技術進步的壓力[198][199][200]。

ECE R117 法規的型式認證程序規定,輪胎製造商在將新產品投放市場前,必須向成員國主管部門申請型式認證。認證過程包括提交技術文件(輪胎設計規格、材料信息、測試數據等)、由官方指定的技術服務機構進行測試驗證、主管部門審查並頒發認證證書等環節。獲得認證的輪胎會被賦予唯一的認證編號,並要求在輪胎側壁上標註認證標記(通常為圓圈內的字母"E"加上國家代碼與認證編號),表明該產品已透過型式認證、符合法規要求[201][202]。法規還規定了生產一致性(Conformity of Production, COP)要求,即製造商必須確保批量生產的產品與獲得型式認證的樣品保持一致,主管部門有權對市場上銷售的產品進行抽查測試,如發現不符合認證規格,可撤銷認證並要求產品召回[203][204]。

ECE R117 法規 2020 年的重大修訂(通常稱為 R117-04 版本)引入了磨損輪胎噪音性能要求,這是法規發展的一個重要里程碑。修訂的背景是研究發現,輪胎在使用過程中隨著胎面磨損,噪音特性會發生變化,某些輪胎雖然新胎時噪音較低,但磨

損後噪音顯著增加,整體使用壽命期間的環境影響反而更大。新的要求規定,輪胎在磨損到胎面深度剩餘 50%時(對於新輪胎初始胎面深度 8 毫米的產品,磨損到剩餘 4 毫米時),噪音水準不應超過新胎噪音限值加 2 分貝。這一要求促使製造商不僅要優化新輪胎的噪音性能,還要確保胎面花紋設計在磨損過程中能保持良好的噪音控制,表現了全生命週期環境管理的理念[205][206][207]。

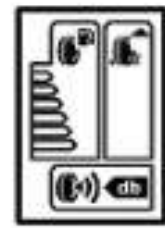
ECE R117 法規在實施中取得了顯著成效,但也面臨一些挑戰。從成效看,法規實施以來,歐盟市場銷售的輪胎平均噪音水準持續下降,根據歐洲委員會的評估報告,2016-2020 年期間新銷售輪胎的平均噪音水準降低了約 1.5 分貝,考慮到分貝是對數單位,這相當於噪音能量降低了約 30%,對改善城市交通噪音環境產生了積極影響[208][209]。同時,法規也推動了輪胎行業的技術創新,製造商投入大量資源進行低噪音輪胎的研發,包括優化胎面花紋設計、採用新型低噪音材料、改進輪胎結構等,這些技術進步不僅使產品符合法規要求,也提升了企業的技术競爭力[210][211]。從挑戰看,法規實施的成本問題一直受到關注,特別是對中小型製造商而言,建立符合要求的測試設施、進行大量的產品測試、應對頻繁的法規更新等,都需要可觀的投入。

此外,法規的複雜性也對企業的合規管理能力提出了較高要求,需要專門的技術人員來解讀法規條文、組織測試、準備認證申請等[212][213]。另一個爭議點是法規對不同地區製造商的公平性問題,歐洲本土製造商由於地理接近、對法規體系更為熟悉,在應對法規要求方面具有一定優勢,而來自其他地區的製造商可能面臨更大的適應成本。這引發了關於法規是否構成技術性貿易壁壘的討論,促使 UNECE 不斷加強與其他地區的協調,推動法規要求的國際協調[214][215]。

ECE R117 法規未來的發展方向包括:進一步收緊噪音限值,計畫中的 Stage 3 限值可能相比當前再降低 1-2 分貝;擴展管制範圍,將更多特殊用途輪胎納入法規適用範圍;加強磨損輪胎性能要求,可能引入多個磨損階段的測試點;整合新興技術,如對電動車專用輪胎的特殊要求、對智能輪胎(嵌入傳感器的輪胎)的認證規範等;強化市場監督,利用大數據與信息技術提高違規產品的發現與處理效率[216][217][218]。此外,法規也在探索與其他國際標準的協調,特別是與聯合國全球統一技術法規(UN GTR)框架的對接,推動全球範圍內的法規統一,減少貿易壁壘、降低產業合規成本[219][220]。

5.3.2 輪胎標籤法規 (Tire Labeling Regulation)

歐盟輪胎標籤制度是一項創新性的市場化環境保護政策工具,透過強制要求製造商在輪胎產品上標示關鍵性能信息,讓消費者能夠在購買時清楚了解並比較不同產品的環境與安全性能,從而透過市場選擇機制推動產業向高性能、低環境影響的方向發展。這一制度最初由 Regulation (EC) No. 1222/2009 建立,2020 年進行了重大修訂並發布了新版本 Regulation (EU) 2020/740,進一步完善了標籤內容、擴展了適用範圍、加強了實施監督。輪胎標籤制度被認為是歐盟環境政策的成功範例,其經驗也被許多其他國家與地區借鑒,推動了全球範圍內輪胎性能標籤制度的建立[221][222][223]。



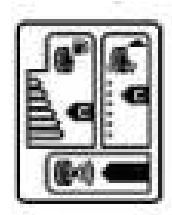
歐盟輪胎標籤制度的建立有其深刻的政策邏輯。從環境保護角度看,交通部門是歐盟溫室氣體排放與空氣污染的重要來源,而輪胎的滾動阻力直接影響車輛燃油效率(滾動阻力每降低 10% 可節省燃油約 2%),輪胎噪音則是城市噪音污染的主要貢獻因素,因此提升輪胎的環保性能對實現歐盟的氣候與環境目標具有重要意義。從消費者權益角度看,輪胎的環保與安全性能對消費者的長期利益(燃油成本、行車安全、生活環境品質)有直接影響,但這些性能通常是隱性的、難以直接觀察的,消費者在購買時往往缺乏足夠的資訊進行理性決策,容易受價格、品牌等表面因素主導而忽視性能差異。標籤制度透過降低資訊不對稱,賦予消費者更大的選擇權,有助於糾正市場失靈[224][225][226]。

從產業發展角度看,標籤制度透過建立清晰的性能等級體系與市場激勵機制,鼓勵製造商投資於高性能產品的研發,推動技術進步與產業升級。同時,標籤作為一種自我聲明式的規制工具,相比直接的行政管制具有更大的靈活性,能夠適應快速變化的技術環境,也減輕了政府的監管負擔[227][228]。

歐盟輪胎標籤的核心內容包括三個關鍵性能指標:燃油效率(Fuel Efficiency)、濕地抓地力(Wet Grip)與外部滾動噪音(External Rolling Noise)。燃油效率等級反映輪胎的滾動阻力水準,以字母 A 到 E 表示(A 為最優),較低的滾動阻力意味著較低的燃油消耗與二氧化碳排放。濕地抓地力等級反映輪胎在濕滑路面上的制動性能,同樣以字母 A 到 E 表示,較高的濕地抓地力意味著更短的制動距離與更高的行車安全性。外部滾動噪音則以分貝值與噪音等級波浪圖示表示,新版標籤(2021 年 5 月起實施)採用 A 到 C 三級分類(舊版為三個波浪符號表示),A 級為噪音水準最低、C 級為噪音水準最高但仍符合法規限值的產品[229][230][231]。

值得注意的是,標籤上的噪音等級不是絕對的分貝數值分級,而是相對於 ECE R117 法規限值的相對表現。具體而言,A 級表示噪音水準比當前法規限值至少低 3 分貝;B 級表示噪音水準比限值低 1 至 3 分貝之間;C 級表示噪音水準符合限值但未能低於限值 1 分貝以上。這種相對分級方式的設計有其合理性:首先,它確保了標籤分級的穩定性,即使未來法規限值收緊,標籤等級的定義邏輯仍然適用,不需要頻繁調整分級標準;其次,它激勵製造商不僅僅滿足於達到法規最低要求,而是追求超越限值的更優性能,因為只有這樣才能獲得更高的標籤等級;再者,它為消費者提供了清晰的性能差異信息,A 級產品相比 C 級產品的噪音水準差異至少 3 分貝,這對人耳來說是可以明顯感知的差別[232][233][234]。

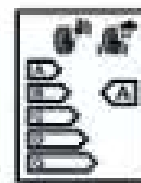
輪胎標籤的實施程序規定,製造商、進口商或經銷商有責任確保在歐盟市場銷售的每一條輪胎都附有符合規定格式的標籤。對於零售點銷售,標籤應直接貼在輪胎上或以其他方式清晰展示;對於線上銷售,標籤資訊應在產品頁面顯著位置展示;對於技術宣傳資料與廣告,也應包含標籤資訊。標籤的設計格式由法規統一規定,包括歐盟旗幟標誌、輪胎識別信息(製造商、型號、尺寸)、三個性能指標的圖示與等級、二維碼(鏈接到歐盟產品資料庫)等要素,確保標籤的統一性與可識別性[235][236][237]。2020 年修訂的新版法規還建立了歐盟產品註冊資料庫(European Product Registry for Energy Labelling, EPREL),所有在歐盟市場銷售的輪胎都必須在該資料庫中註冊並上傳性能數據,公眾可以透過網站查詢任何輪胎產品的詳細性能資訊。這一資料庫不僅為消費者提供了便利的資訊獲取途徑,也為市場監督部門提供了重要的監管工具,可以系統性地監測市場上產品的性能分佈、識別異常數據、追蹤產品合規狀況[238][239]。



輪胎標籤制度實施以來的評估研究顯示,該制度在提高消費者意識、影響購買行為、推動產品性能提升等方面取得了積極成效。根據歐洲委員會委託的獨立評估報告,約 60-70%的歐盟消費者在購買輪胎時知曉標籤存在,約 40-50%表示標籤資訊影響了其購買決策。從市場數據看,標籤實施後高等級(A、B 級)產品的市場份額持續上升,而低等級(舊版的三波浪或新版 C 級)產品份額下降,說明標籤確實發揮了引導市場需求的作用[240][241][242]。從產品性能看,歐盟市場銷售輪胎的平均性能水準持續改善,2012 年至 2020 年間,燃油效率平均提升約 5-8%,噪音水準平均降低約 1.5 分貝,濕地抓地力也有所提升,這些改善不僅歸功於法規限值的收緊,標籤制度的市場激勵作用也功不可沒[243][244]。

然而,標籤制度的實施也面臨一些挑戰與局限。首先是消費者理解與使用標籤資訊的能力問題。雖然標籤設計力求簡明易懂,但研究顯示仍有相當比例的消費者不能正確理解標籤含義,特別是對於噪音等級的相對分級方式、不同性能指標之間的權衡關係等較為複雜的概念,許多消費者存在理解困難。這提示需要加強消費者教育與標籤宣傳,提高公眾的環境意識與資訊利用能力[245][246]。其次是標籤資訊的完整性與代表性問題。當前標籤只包含三個核心性能指標,而輪胎的實際性能還涉及許多其他方面,如耐磨性、操控性、舒適性、冬季性能等,這些都不在標籤涵蓋範圍內。消費者如果僅依據標籤資訊做決策,可能忽視了其他同樣重要的性能維度。此外,標籤上的性能數據是在標準化條件下測試得到的,與消費者實際使用中的性能表現可能存在差異,如何提高標籤資訊的實用性是持續改進的方向[247][248][249]。

再者是標籤制度與法規限值的協調問題。理想情況下,標籤應能清晰區分市場上不同水準的產品,激勵消費者選擇高性能產品。但實際上,由於法規限值的存在,市場上低於 C 級的產品根本無法銷售,這使得標籤的區分度有限。有研究者認為,標籤分級應該涵蓋更廣



的性能範圍,包括超低性能產品(儘管不允許銷售,但可以讓消費者了解性能分佈的全貌),也應該設立更高的等級(如 A+級)來識別真正的頂尖產品,從而增強標籤的激勵效果[250][251]。最後是標籤數據準確性與市場監督問題。標籤上的性能數據主要依據製造商的自我聲明,雖然法規要求數據必須基於符合標準的測試,並受到市場監督部門的抽查,但實踐中仍發現部分產品存在標示數據與實際性能不符的情況。加強測試數據的獨立驗證、提高違規行為的發現與處罰力度,是確保標籤可信度的重要保障[252][253]。

輪胎標籤制度未來的發展方向包括:豐富標籤信息內容,可能增加輪胎里程耐久性(Mileage)、微塑料顆粒排放等新的環境指標;改進標籤表現形式,利用數位技術(如增強實境、智能手機應用)提供更豐富互動的產品資訊;加強與其他產品標籤制度的協調,形成統一的歐盟生態標籤(Eco-label)體系;推動標籤制度的國際化,與其他主要市場建立相互認可機制,降低國際貿易的合規成本;強化標籤數據的獨立驗證與市場監督,確保標籤資訊的準確性與可信度[254][255][256]。歐盟的經驗表明,設計良好、執行有力的產品標籤制度可以成為環境政策的有效工具,既尊重市場機制與消費者選擇,又能有效引導產業發展方向,實現環境保護與經濟發展的雙贏。

5.3.3 噪音限值要求 (Noise Limit Requirements)

歐盟輪胎噪音限值要求是透過 ECE R117 法規等強制性法規來實施的,代表了對輪胎噪音性能的最低可接受水準。噪音限值的設定是一個複雜的技術與政策平衡過程,需要綜合考慮環境保護目標、技術可行性、經濟影響、國際競爭力等多方面因素。歐盟採用的是基於科學證據的限值設定方法,透過廣泛的技術研究、產業調查、成本效益分析等,確定既能有效降低環境影響、又在技術與經濟上可行的限值水準。同時,歐盟採取階段性遞進式的限值收緊策略,給予產業足夠的技術準備時間,持續推動噪音性能的改善[257][258][259]。

當前歐盟執行的輪胎噪音限值標準源自 ECE R117-02 版本及其後續修訂,針對不同類別輪胎設定了差異化的限值要求。對於 C1 類乘用車輪胎,限值根據輪胎斷面寬度分為五個



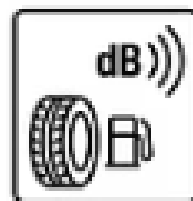
檔次:斷面寬度 $\leq 185\text{mm}$ 的輪胎,限值為 68 dB(A);寬度 185-215mm 為 69 dB(A);寬度 215-245mm 為 70 dB(A);寬度 245-275mm 為 71 dB(A);寬度 $>275\text{mm}$ 為 72 dB(A)。對於加強型輪胎(Extra Load 或 Reinforced 標記),各檔限值均增加 1 dB(A)。對於特殊用途輪胎,如帶有 M+S 標記的雪地輪胎,限值增加 1 dB(A);帶有 POR(Professional Off-Road)標記的越野輪胎,限值增加 2 dB(A)[260][261][262]。這種根據輪胎物理特徵與用途進行差異化限值設定的方式,既反映了技術現實(寬輪胎、加強輪胎、特殊花紋輪胎的噪音控制難度更大),也維持了不同產品類型之間的公平競爭。

對於 C2 類輕型商用車輪胎,限值範圍為 70-72 dB(A),具體數值根據輪胎斷面寬度與負載指數確定。對於 C3 類重型商用車輪胎,限值範圍為 72-75 dB(A),根據輪胎類型(正常輪胎或牽引輪胎)、負載指數與速度類別確定。一般而言,負載指數越高、速度類別越低的輪胎,允許的噪音限值越寬鬆,因為這類輪胎主要用於重載低速工況,結構強度要求高,噪音控制難度大[263][264][265]。C3 類輪胎的限值還區分了不同的安裝位置,牽引軸輪胎(Traction Tyre)由於需要提供強大的驅動力,胎面花紋較為粗獷,允許的噪音限值比導向輪胎(Steering Tyre)或承載輪胎(Load Tyre)高 1-2 分貝。這種細緻的分類表現了法規制定者對輪胎技術特性的深入理解與務實態度,避免了一刀切的簡單化要求可能帶來的技術障礙或不公平競爭。

歐盟噪音限值的演進歷程表現了持續收緊的趨勢。ECE R117 法規自 2012 年實施以來,已經歷了數次限值調整。初始實施的 Stage 1 限值相對寬鬆,旨在讓產業有時間適應新的管制要求。2016 年 7 月起實施的 Stage 2 限值,相比 Stage 1 平均降低了 1-2 分貝,這一收緊對產業造成了顯著壓力,許多既有產品需要重新設計才能

符合新限值,但也推動了低噪音技術的廣泛應用[266][267][268]。未來計畫實施的 Stage 3 限值預計將再降低 1-2 分貝,使歐盟成為全球輪胎噪音管制最嚴格的市場。這種階段性收緊策略的設計基於幾方面考慮:首先是給予產業技術準備時間,噪音控制技術的研發與產品化通常需要 3-5 年甚至更長時間,階段性實施使企業能夠合理規劃研發投入與產品更新;其次是降低經濟衝擊,如果一次性設定過於嚴格的限值,可能導致大量既有產品無法銷售、製造商面臨嚴重損失,階段性調整使市場能夠平穩過渡;再者是持續施加改進壓力,明確的未來限值路線圖促使企業持續投資於技術創新,而不是滿足於達到當前要求[269][270]。

歐盟噪音限值的設定過程遵循科學嚴謹的程序,涉及廣泛的利益相關方參與與深入的技術評估。首先是環境目標的確定,基於噪音對人體健康影響的醫學證據、城市交通噪音水準的監測數據、噪音減排對公共衛生效益的評估等,歐盟環境政策制定



者設定了道路交通噪音降低的目標。例如,歐盟的長期目標是到 2030 年,相比 2010 年水準降低道路交通噪音至少 3 分貝,這就要求車輛與輪胎噪音的同步削減[271][272]。其次是技術可行性研究,由專業研究機構對輪胎噪音控制技術的現狀與發展潛力進行系統評估,調查產業界的技術儲備、分析噪音降低的技術途徑與成本、預測未來技術進步的可能速度等。這些研究為限值的設定提供了技術基礎,確保限值要求在技術上是可實現的[273][274][275]。

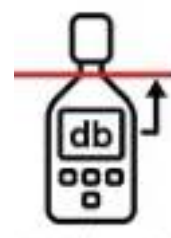
第三是產業調查與市場分析,收集市場上銷售的各類輪胎產品的噪音性能數據,分析性能分佈特徵、識別技術領先者與落後者、評估不同限值方案對產業的影響面。通常,新限值的設定會參考當前市場上約 10-20%的最佳性能產品水準,既確保限值具有激勵性(需要多數產品進行改進才能達到),又避免過於激進(不至於讓絕大多數產品都無法符合)[276][277]。第四是成本效益分析,評估不同限值方案的社會總成本(產業合規成本、產品價格上漲、消費者負擔等)與總效益(噪音減排的健康效益、環境品質改善的社會價值等),選擇效益成本比最優的方案。歐盟委員會在提出限值調整建議前,通常會發布詳細的影響評估報告(Impact Assessment),公開所有的分析數據與評估結果,接受公眾與利益相關方的評議[278][279][280]。

第五是國際協調與貿易影響評估,考慮限值要求與其他主要市場(美國、日本、中國等)的差異,評估是否可能構成貿易障礙、對國際貿易與產業競爭格局的影響等。歐盟致力於推動全球輪胎標準的協調,避免因標準差異造成的貿易摩擦,因此在設定限值時也會考慮國際接受度[281][282]。歐盟噪音限值實施的效果評估顯示,限

值制度在降低輪胎噪音、改善環境品質方面取得了顯著成效。根據歐洲委員會的評估報告,2012 年 ECE R117 法規實施至 2020 年期間,歐盟市場銷售輪胎的平均噪音水準降低了約 1.5 分貝,按照噪音能量計算,相當於噪音源強度降低了約 30%。這一改善對城市交通噪音的總體水準產生了可測量的積極影響,初步估算每年可避免數千例因噪音引起的健康損害案例,社會效益顯著[283][284][285]。

同時,限值制度也推動了輪胎行業的技術進步與產業升級,歐洲輪胎製造商在低噪音技術領域保持全球領先地位,這既得益於嚴格的本土法規要求的倒逼,也為企業在全球市場的競爭提供了技術優勢[286][287]。然而,限值制度的實施也面臨一些挑戰。首先是不同性能之間的權衡問題,降低噪音往往需要採用較軟的橡膠配方、較細密的胎面花紋、較薄的胎壁結構等,這些措施可能對輪胎的其他性能(如耐磨性、操控性、滾動阻力等)產生不利影響。如何在多重性能目標之間找到最佳平衡,是輪胎設計的核心挑戰,也是限值設定需要考慮的因素[288][289]。

其次是限值對不同企業的差異化影響,大型跨國企業通常擁有更強的研發能力與技術儲備,能夠較快適應新限值要求,而中小型企業可能面臨更大的技術與財務壓力,這可能導致市場集中度提高、中小企業生存空間被壓縮的問題。如何在推動環境目標的同時維持產業的多樣性與競爭性,需要配套政策的支持[290][291]。

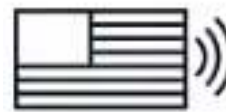


再者是限值實施的監督執行問題,雖然法規建立了完整的型式認證與市場監督體系,但實踐中仍發現部分產品存在標示噪音水準與實際性能不符、透過優化測試條件來降低認證噪音值但實際使用中噪音較高等問題。加強測試過程的獨立性與透明度、提高市場監督的覆蓋面與頻率、加大違規處罰力度,是確保限值制度有效性的重要保障[292][293][294]。

展望未來,歐盟噪音限值制度將繼續朝著更嚴格、更全面、更精細的方向發展。預期的發展包括:持續收緊新輪胎的噪音限值,計畫中的 Stage 3、Stage 4 限值將逐步實施;擴展磨損輪胎的性能要求,可能引入多個磨損階段的限值(如新胎、50%磨損、80%磨損等),確保輪胎在全生命週期都維持良好性能;針對電動車專用輪胎設定更嚴格的限值,因為電動車缺乏引擎噪音掩蔽,輪胎噪音對整車噪音的貢獻度更高;引入更多的噪音頻譜要求,不僅關注總體 A 計權噪音值,也關注特定頻段(如低頻噪音)的水準,因為不同頻段噪音對人體的影響與煩惱度不同;建立動態限值調整機制,根據技術進步速度與環境目標實現情況,定期評估並調整限值水準,保持法規的適應性與前瞻性[295][296][297]。

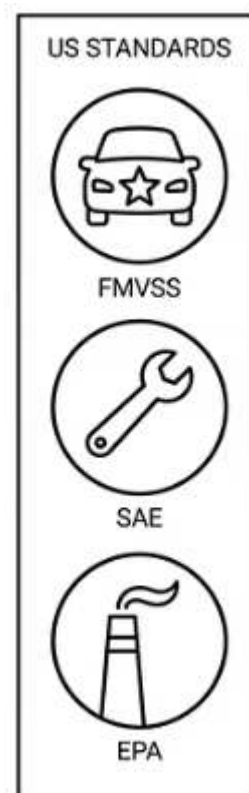
5.4 美國標準 (US Standards)

美國在輪胎噪音管制方面的體系與歐盟存在顯著差異,整體而言美國的法規要求相對較為寬鬆,管制重點更多集中在輪胎的安全性能而非環境性能。美國聯邦層級的輪胎管制主要



透過聯邦機動車輛安全標準(Federal Motor Vehicle Safety Standards, FMVSS)來實施,由美國國家公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)負責制定與執行。此外,美國汽車工程師學會(Society of Automotive Engineers, SAE)制定了大量的推薦性技術標準,為產業界提供測試方法與技術指引。美國環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)在 1970 年代曾經建立了噪音管制計畫並制定了一些噪音排放標準,但後來該計畫的資金與權限被大幅削減,目前聯邦層級的噪音管制力度有限,部分州與地方政府保有自主的噪音管制權限[298][299][300]。

美國輪胎管制體系的特點在於其對安全性能的高度重視與對環境性能要求的相對寬鬆。這種政策取向反映了美國的特殊國情:美國地域遼闊、人口密度相對較低、城市形態與交通模式與歐洲不同,噪音問題的嚴重程度與公眾關注度相對較低;同時,美國汽車文化強調個人自由與性能,對於可能影響車輛性能或增加成本的環保要求持謹慎態度;此外,美國的法規制定遵循成本效益分析原則,如果某項規制的成本超過其可量化的效益,通常難以獲得實施[301][302]。因此,雖然美國在汽車安全標準方面處於全球領先地位,FMVSS 標準被許多國家借鑒,但在環境保護特別是噪音管制方面,美國的要求明顯落後於歐洲與日本等地區。近年來,隨著環境意識的提升與電動車輛的普及,美國也開始重新審視噪音管制政策,一些州如加州已經開始探索建立更嚴格的噪音標準,但聯邦層級的重大政策變化尚未出現[303][304]。



5.4.1 FMVSS 標準 (FMVSS Standards)

聯邦機動車輛安全標準(FMVSS)是美國交通部(Department of Transportation, DOT)下屬的國家公路交通安全管理局(NHTSA)制定的強制性安全標準,適用於在美國銷售的所有機動車輛與相關零部件。FMVSS 體系涵蓋了車輛與零部件的各個方面,從碰撞保護、制動系統、照明設備到輪胎性能等。在輪胎領域,最重要的標準

是 FMVSS No. 119 《新型氣壓輪胎—除乘用車外的機動車用》(New Pneumatic Tires for Motor Vehicles with a GVWR of More Than 10,000 Pounds and Motorcycles) 與 FMVSS No. 139 《新型氣壓輪胎—輕型車輛用》(New Pneumatic Tires for Light Vehicles)[305][306][307]。這兩個標準對輪胎的物理尺寸、強度、耐久性、高速性能、低壓性能等進行了詳細規定,確保輪胎能夠滿足基本的安全要求。然而,值得注意的是,這些標準並不包含噪音性能的要求,噪音並不是 FMVSS 輪胎標準的考量因素。

FMVSS No. 119 標準適用於總質量超過 10,000 磅(約 4,536 公斤)的商用車輛用輪胎以及摩托車輪胎,規定了這些輪胎必須透過的各種性能測試,包括強度測試(Strength



Test)、耐久性測試(Endurance Test)、高速性能測試(High Speed Performance Test)、低壓性能測試(Low Pressure Performance Test)等。強度測試要求輪胎在規定的負載下能夠承受一定時間而不發生結構破壞;耐久性測試模擬輪胎在長時間使用中的性能衰退,要求輪胎在測試鼓上以規定速度與負載連續運轉數小時後仍能保持完整;高速性能測試評估輪胎在高速行駛時的穩定性與安全性;低壓性能測試模擬輪胎在氣壓不足情況下的表現[308][309][310]。這些測試確保了輪胎在各種使用條件下的基本安全性,但完全沒有涉及噪音、滾動阻力等環境相關性能。

FMVSS No. 139 標準是 2003 年制定的新標準,專門針對輕型車輛(Light Vehicles,包括乘用車、輕型卡車、多用途車輛等)的輪胎,該標準整合並更新了之前分散在 FMVSS No. 109、No. 119 等多



個標準中關於輕型車輛輪胎的要求。FMVSS No. 139 規定的測試項目與 No. 119 類似,包括物理尺寸檢查、充氣壓力測試、強度測試、耐久性測試、高速性能測試等,同樣不包含噪音性能要求[311][312][313]。該標準的制定背景是 1990 年代末期發生的一系列與輪胎相關的嚴重交通事故,特別是 Firestone 輪胎召回事件(該事件涉及數百萬條存在缺陷的輪胎,導致大量的車輛翻覆事故與人員傷亡),促使美國國會透過《TREAD 法案》(Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation Act),要求 NHTSA 加強輪胎安全標準。因此,FMVSS No. 139 的重點完全在於提升輪胎的安全性能,環境性能並非其考量範圍[314][315]。

FMVSS 標準對於輪胎標籤也有詳細規定,要求所有在美國市場銷售的輪胎必須在側壁上標註統一輪胎品質分級(Uniform Tire Quality Grading, UTQG)資訊。UTQG 系統包括三個性能指標:胎面磨耗(Treadwear)、牽引力(Traction)與溫度等

級(Temperature),這些資訊旨在幫助消費者比較不同輪胎的性能特徵。胎面磨耗指數反映輪胎的耐用性,以數值表示(如 300、400 等),數值越高表示理論上的使用壽命越長;牽引力等級反映輪胎在濕滑路面上的制動性能,分為 AA、A、B、C 四個等級;溫度等級反映輪胎的散熱能力與高溫穩定性,分為 A、B、C 三個等級 [316][317][318]。然而,與歐盟輪胎標籤制度明顯不同的是,UTQG 系統完全不包含噪音性能資訊,也不包含與燃油效率相關的滾動阻力資訊,這反映了美國輪胎管制體系的安全導向而非環境導向的特徵。

近年來,美國汽車產業與消費者團體開始呼籲建立類似歐盟的輪胎環境標籤制度,將噪音、滾動阻力等環境性能資訊納入標籤體系,幫助消費者做出更為全面的購買決策。然而,這一提議在立法層面進展緩慢,主要障礙包括:產業界擔心增加合規成本與市場複雜度;一些州政府反對聯邦政府擴大管制權限;成本效益分析顯示環境標籤的社會效益相對有限(主要因為美國的城市形態與交通模式與歐洲不同,噪音問題的嚴重程度較低);政治上對增加新的管制措施存在阻力等 [319][320][321]。因此,可以預期在短期內,美國 FMVSS 標準體系不太可能增加噪音性能的強制性要求。

儘管聯邦層級缺乏噪音管制,但一些州已經開始自主行動。加利福尼亞州作為美國環境保護的先鋒,正在研究建立州級的輪胎噪音標準,加州空氣資源委員會(California Air Resources Board,



CARB)與加州交通部(Caltrans)合作開展了多項輪胎噪音研究項目,評估噪音對公眾健康的影響、調查降噪技術的可行性、研究建立噪音管制體系的成本效益等 [322][323]。如果加州成功建立輪胎噪音標準,由於加州市場的巨大規模(加州的經濟體量相當於全球第五大經濟體,汽車市場占美國總量的約 12%),其標準很可能對整個美國市場產生示範效應,推動其他州跟進或促使聯邦政府採取行動。這種「加州效應」(California Effect)在美國汽車環保法規史上屢見不鮮,例如加州的汽車排放標準曾長期嚴於聯邦標準,最終推動了全國標準的提升 [324][325][326]。

FMVSS 標準體系的另一個特點是其測試方法的獨特性。美國標準通常採用與國際標準(如 ISO、ECE 法規)不同的測試程序與評估指標,這在一定程度上造成了國際貿易的複雜性。例如,FMVSS 規定的耐久性測試與 ECE 法規的耐久性測試在測試條件、持續時間、判定標準等方面均存在差異,導致符合一個標準的產品不一定能自動符合另一個標準,製造商需要分別進行測試認證,增加了成本與時間 [327][328]。近年來,在聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)的框架下,美國、歐

盟、日本等主要市場正在推動輪胎標準的國際協調,目標是建立全球統一技術法規(Global Technical Regulation, GTR),減少標準差異造成的貿易障礙。雖然這一進程面臨許多技術與政治障礙,但代表了國際合作的方向[329][330]。

5.4.2 SAE 標準 (SAE Standards)

美國汽車工程師學會(Society of Automotive Engineers, SAE International)是全球最大的汽車與航空工程專業組織,制定了數千個涵蓋車輛設計、製造、測試各個領域的技術標準。與 FMVSS 等政府強制性標準不同,SAE 標準主要是推薦性的行業標準(Recommended Practices),不具有法律強制力,但由於其技術權威性與產業界的廣泛採納,在實踐中具有重要影響力。在輪胎噪音量測領域,SAE 制定了多個相關標準,為測試方法、數據處理、性能評估等提供技術指引[[331][332][333]]。

SAE J57 標準《公路卡車輪胎聲級》(Sound Level of Highway Truck Tires)是專門針對商用卡車輪胎噪音測試的標準,最早制定於 1971 年,經過多次修訂,當前版本為 2000 年發布的修訂版。



該標準規定了使用單軸拖車進行輪胎噪音量測的方法,測試原理是將待測輪胎安裝在專門設計的單軸測試拖車上,由牽引車拖動拖車在測試路面上以多個規定速度(通常包括 50、60、70 英里/小時等速度點)行駛,在拖車附近設置麥克風記錄透過過程中的噪音水準[334][335][336]。這種方法的優點是能夠在相對接近實際使用條件下評估輪胎噪音,且排除了牽引車輛本身噪音的干擾(因為拖車與牽引車保持一定距離);缺點是測試設備較為複雜、測試效率相對較低。SAE J57 標準主要用於輪胎研發階段的性能評估與不同產品的比較測試,而非法規認證,因為美國聯邦法規並不要求卡車輪胎進行噪音測試。

SAE J2805 標準《加速道路車輛發出噪音的量測》(Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles)是美國版本的車輛透過噪音測試標準,技術內容等同於 ISO 362-1:2015 標準。SAE 於 2020 年採納了 ISO 362-1 標準並以 SAE J2805 的編號發布,目的是促進美國標準與國際標準的協調,便利國際貿易與技術交流[337][338]。值得注意的是,儘管 SAE 發布了這一標準,但它在美國仍然是推薦性標準而非強制性要求,製造商可以選擇採用該標準進行測試,但並不強制要求所有車輛都必須透過該標準的噪音測試。相比之下,在歐盟、日本等市場,基於 ISO 362 標準的車輛噪音測試是型式認證的強制性要求,所有新車型必須透過測試並符合噪音限值才能獲得銷售許可。這一差異再次凸顯了美國在車輛噪音管制方面相對寬鬆的政策取向。

SAE J1470 標準《加速公路車輛發出噪音的量測》(Measurement of Noise Emitted by Accelerating Highway Vehicles)是 SAE 早期制定的車輛噪音測試標準,與 ISO 362 標準在測試原理上相似,但在一些技術細節上存在差異。該標準曾在北美地區廣泛使用,但隨著國際標準協調的推進,逐漸被 SAE J2805(等同於 ISO 362-1)所取代[339][340]。除了整車噪音測試標準,SAE 還制定了一系列與噪音相關的輔助性標準,如 SAE J184《車輛與設備聲級的資格鑑定》(Qualifying a Sound Data Acquisition System for Measurement of Sound from Light Vehicles),規定了噪音測量系統的技術要求與校準程序;SAE J1477《車輛外部噪音測量地點的選擇與驗證標準》(Measurement of Light Vehicle Exhaust Sound Level under Stationary Conditions),規定了測試場地的聲學環境要求等[341][342]。

SAE 標準在美國汽車產業中的作用主要表現在以下幾個方面:首先,為產品開發提供技術指引。汽車與輪胎製造商在產品設計階段,通常會參考 SAE 標準進行性能測試與評估,確保產品滿足行業通行的技術要求。其次,為企業間的技術交流提供共同語言。當供應商向整車廠提供輪胎產品時,雙方往往以 SAE 標準作為技術溝通與性能驗收的基礎。再者,為政府制定法規提供技術參考。雖然 SAE 標準本身不具有法律效力,但政府部門在制定或修訂 FMVSS 等強制性標準時,通常會參考 SAE 標準的技術內容。最後,促進國際標準的採納。SAE 近年來越來越多地採納國際標準(如 ISO、IEC 等)並以 SAE 編號發布,這有助於美國產業界與國際接軌,減少貿易技術壁壘[343][344][345]。



然而,SAE 標準的推薦性質也限制了其在推動環境保護方面的作用。由於標準不具有強制性,企業可以選擇性地採納或忽視標準要求,這使得僅靠行業標準難以實現系統性的環境改善。環境保護領域的經驗表明,自願性標準與市場機制通常難以充分解決具有外部性的環境問題(如噪音污染),需要政府的強制性法規來糾正市場失靈。因此,雖然 SAE 在技術標準化方面發揮重要作用,但在推動輪胎噪音管制方面,其作用遠不如歐盟的強制性法規體系[346][347]。未來,隨著環境意識的提升與技術進步,SAE 可能會制定更多與環境性能相關的推薦性標準,為產業界提供技術指引,但真正的突破還需要政府層面的政策變革。

5.4.3 EPA 要求 (EPA Requirements)

美國環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)是聯邦政府負責環境保護的主要機構,其職責涵蓋空氣品質、水質、有毒物質管制、噪音管制等多個領域。

在噪音管制方面,EPA 的權限源自 1972 年透過的《噪音控制法》(Noise Control Act of 1972),該法授權 EPA 制定產品噪音排放標準、進行噪音研究、向其他聯邦機構與州政府提供技術支持等[348][349][350]。在 1970 年代,EPA 確實建立了相對完整的噪音管制計畫,制定了多項產品噪音標準,包括卡車、摩托車、建築設備等的噪音排放限值。然而,1981 年隨著聯邦政府政策的轉變,噪音管制計畫的預算被大幅削減,相關機構被裁撤,EPA 實際上停止了在噪音管制領域的積極活動。雖然《噪音控制法》從未被正式廢止,EPA 理論上仍保有噪音管制權限,但由於缺乏資金與人力,該領域的工作基本處於停滯狀態[351][352][353]。

在 EPA 曾經活躍的時期,針對機動車輛噪音制定了一些聯邦法規,主要收錄在《聯邦法規彙編》(Code of Federal Regulations, CFR)第 40 篇第 205 部分(40 CFR Part 205)中。



例如,40 CFR 205.50-205.58 規定了摩托車的噪音排放標準與測試方法,要求在規定條件下測試的摩托車噪音不得超過一定限值(根據車輛類型與排量,限值範圍為 70-83 分貝)[354][355]。然而,值得注意的是,EPA 並未針對輪胎本身制定專門的噪音排放標準。EPA 的機動車輛噪音標準主要關注整車的噪音排放,並未像歐盟那樣單獨對輪胎這一零部件設定噪音性能要求。這一政策選擇的原因可能包括:在 1970 年代制定標準時,對輪胎噪音作為獨立噪音源的認識尚不充分,當時更關注的是引擎與排氣系統噪音;輪胎噪音的管制需要專門的測試方法與設施,增加了實施的複雜度與成本;在整車噪音標準的框架下,製造商已經有動力控制包括輪胎在內的各種噪音源,單獨對輪胎設定標準可能被認為是重複管制[356][357][358]。

EPA 噪音管制計畫衰落後,噪音管制的責任主要轉移到州與地方政府層級。美國的聯邦制度允許州政府在聯邦法律未明確禁止的領域制定自己的法規,許多州與城市建立了地方性的噪音管制條例,對特定時段、特定區域的噪音水準設定限值,對違反規定的車輛與設備進行處罰。然而,這些地方法規通常是針對噪音水準的限制而非針對產品標準的要求,即規定車輛在道路上行駛時不得超過一定的噪音水準,而不是要求輪胎產品本身必須透過噪音測試或滿足特定限值。這種管制方式在執行上存在較大困難,因為道路噪音受多種因素影響(車輛類型、駕駛方式、路面狀況、環境條件等),現場執法難以準確判定噪音是否超標、超標是由哪個具體因素造成等[359][360][361]。

近年來,隨著環境正義(Environmental Justice)運動的興起與對交通噪音健康影響認識的深化,美國社會對噪音問題的關注度有



所回升。一些研究顯示,交通噪音對健康的影響在低收入社區與少數族裔社區尤為嚴重,因為這些社區往往位於高速公路、機場等高噪音源附近,且居民缺乏足夠資源來進行隔音措施,噪音問題因此成為環境正義的重要議題[362][363][364]。此外,電動車輛的普及也引發了對噪音管制的新思考。電動車在低速行駛時非常安靜,對視障行人等道路使用者可能造成安全隱患,美國國會因此在 2010 年透過了《行人安全增強法》(Pedestrian Safety Enhancement Act),要求 NHTSA 制定電動車與混合動力車的最低噪音標準,確保這些車輛在低速時能夠被行人聽到。2016 年 NHTSA 發布了相應的法規(FMVSS No. 141),要求電動車與混合動力車在時速低於 30 公里/小時時必須發出警示聲音[365][366][367]。這一發展表明,噪音問題正在以新的形式回到政策議程,但需要注意的是,這一法規關注的是車輛噪音的最低水準(防止過於安靜),而非傳統意義上的噪音管制(限制最高噪音水準)。

EPA 在輪胎環境影響方面的關注點主要集中在輪胎製造過程的空氣污染排放以及廢舊輪胎的處理與回收。2024 年 11 月,EPA 發布了針對橡膠輪胎製造行業的國家危險空氣污染物排放標準(National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Rubber Tire Manufacturing, NESHAP)的修訂版,



加強了對輪胎生產過程中揮發性有機化合物(VOC)與有害空氣污染物排放的管制[368][369]。此外,EPA 近年來也開始關注輪胎磨損產生的微塑料顆粒對環境的影響,這是一個新興的環境問題。研究表明,輪胎在使用過程中因摩擦會產生大量的微小橡膠顆粒(輪胎磨損顆粒,Tire Wear Particles),這些顆粒含有各種化學添加劑,可能隨雨水徑流進入水體,對水生生態系統造成影響。EPA 已將輪胎磨損顆粒列為優先研究領域,正在評估其環境與健康風險,未來可能制定相關的管制措施[370][371][372]。

總體而言,美國在輪胎噪音管制方面明顯落後於歐盟與日本等先進市場,聯邦層級缺乏專門的輪胎噪音標準與強制性要求,EPA 的噪音管制職能長期處於休眠狀態。這一現狀在短期內不太可能發生根本性改變,因為涉及聯邦政府職能擴張、增加產業管制負擔等敏感政治議題。然而,隨著環境意識的提升、電動車技術的發展、州級先鋒政策的示範效應等因素的推動,未來美國可能逐步加強對輪胎環境性能包括噪音性能的關注,但這一過程很可能是漸進式的、從地方到聯邦逐步擴展的,而非像歐盟那樣透過統一的聯邦法規一次性建立完整體系[373][374][375]。

5.5 亞洲標準 (Asian Standards)

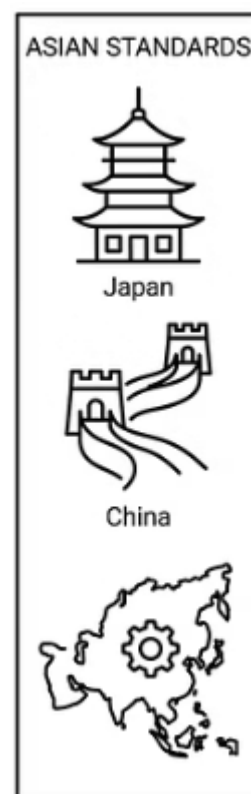
亞洲作為全球最大的汽車與輪胎生產與消費市場,在輪胎噪音量測標準領域呈現出多樣化的發展格局。日本作為亞洲最早建立完整汽車工業標準體系的國家,在輪胎噪音管制方面起步較早,技術水準與國際接軌;中國作為全球最大的汽車市場與輪胎生產國,近年來大力推進標準體系建設,逐步與國際標準協調統一;韓國、印度、東南亞國家等也根據各自情況建立或正在建立相應的標準體系。亞洲標準的發展總體呈現出從參考國際標準向自主制定、從寬鬆要求向嚴格管制、從單純技術標準向綜合法規體系演進的趨勢,反映了該地區汽車產業的成熟與環境保護意識的提升[376][377][378]。

5.5.1 日本標準 (Japanese Standards)

日本在輪胎噪音管制方面具有較為完善的體系,技術水準居於全球前列。日本的汽車相關標準主要由兩個體系構成:一是日本政府制定的道路運送車輛法(Road Transport Vehicle Act)及其配套的技術標準,這些是強制性法規,所有在日本市場銷售的車輛與零部件必須符合;二是日本自動車技術會(Japan Automobile Standards Internationalization Center, JASIC)與日本自動車工業會(Japan Automobile Manufacturers Association, JAMA)等行業組織制定的推薦性標準,如日本汽車標準(Japanese Automotive Standards, JASO)系列,這些標準為產業界提供技術指引與測試方法[379][380][381]。

日本政府在 1970 年代就開始關注車輛噪音問題,當時日本經濟高速增長、汽車保有量急劇增加,交通噪音成為嚴重的環境與社會問題,引發了大量的噪音污染訴訟。在此背景下,日本環境省(Ministry of the Environment)與國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)共同建立了車輛噪音管制體系。日本的車輛噪音法規基本上採納了聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)的技術標準,特別是 ECE R51 法規(車輛噪音)與 ECE R117 法規(輪胎噪音),這反映了日本積極參與國際標準協調、推動貿易便利化的政策取向[382][383][384]。

具體而言,日本針對輪胎噪音的管制主要透過採納 UNECE R117 法規來實施。日本作為聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)的積極參與者,在該法規的制定過程中貢獻了大量技術意見與數據支持。日本國內的型式認證程序要求,所有在日本銷售的新型輪胎必須透過 ECE R117 規定的噪音測試並符合限值要求,測試方



法、限值標準等完全與國際標準保持一致[385][386]。這種直接採納國際標準的做法具有多方面優勢:首先,避免了重複制定標準的資源投入,可以充分利用國際標準化組織已經完成的技術研究與驗證工作;其次,確保了日本標準與國際主流標準的一致性,便利了國際貿易,日本製造的輪胎更容易進入其他市場,進口輪胎也無需針對日本市場進行特殊設計;再者,促進了技術交流與產業競爭,日本製造商在統一的國際標準平台上與歐美競爭對手較量,推動了技術進步[387][388]。

除了政府強制性法規,日本汽車工業界還制定了一系列行業標準與技術指南。JASO C606《汽車用輪胎噪音測試法》(Tire Noise Test Method for Automobile Use)是專門針對輪胎噪音量測的行業標準,規定了測試程序、設備要求、數據處理方法等技術細節。該標準在技術內容上與 ISO 13325 標準高度一致,但針對日本的具體情況進行了一些調整,如考慮日本道路條件、氣候特點等因素對測試參數進行了本地化[389][390]。此外,日本汽車研究所(Japan Automobile Research Institute, JARI)等專業研究機構還開展了大量的輪胎噪音相關研究,包括噪音產生機理、降噪技術、測試方法改進等,這些研究成果不僅支撐了日本國內標準的制定,也為國際標準的發展做出了重要貢獻。例如,日本研究者在輪胎噪音的頻譜分析、噪音源識別、低噪音胎面花紋設計等領域取得了諸多創新成果[391][392][393]。

日本在輪胎噪音管制方面的一個特點是注重實際道路環境的噪音監測與管理。除了產品標準與型式認證,日本還建立了道路交通噪音常時監測體系(Continuous Monitoring System),在主要道路沿線設置固定監測站,長期監測交通噪音水準,評估噪音對周邊居民的影響。當監測發現某路段噪音超標時,會採取綜合措施進行治理,包括



限制車流量、降低車速限制、設置隔音屏障、改善路面材料等。這種從產品管制到環境質量管理的綜合方法,使得噪音管制更為有效[394][395][396]。此外,日本還重視噪音問題的公眾參與與社會治理,環境省定期發布《環境白皮書》,公開全國噪音監測數據與管制措施成效,接受社會監督;地方政府建立噪音投訴受理與處置機制,及時回應居民關切;企業承擔社會責任,主動開發低噪音產品並向消費者宣傳,形成了政府、企業、公眾多方參與的治理格局[397][398]。

日本輪胎製造商如普利司通(Bridgestone)、橫濱(Yokohama)、鄧祿普住友(Dunlop Sumitomo)等在低噪音輪胎技術領域處於全球領先地位,這既得益於嚴格的本土市場要求的倒逼,也源於企業的持續創新投入。這些企業開發了多種降噪技術,如優化的胎面花紋設計(透過計算機模擬優化花紋塊的尺寸與排列,減少空氣泵浦噪

音與花紋衝擊噪音)、低噪音橡膠配方(採用特殊的聚合物與填料,降低材料的振動傳遞)、輪胎結構創新(如多層胎體結構、優化的帶束層設計等,提高輪胎剛性與振動阻尼)、輪胎內部吸音材料(在輪胎內腔填充多孔吸音材料,吸收輪胎空腔共鳴噪音)等[399][400][401]。這些技術不僅使日本品牌輪胎在本土市場保持競爭優勢,也提升了其在全球市場的產品形象與份額。例如,普利司通開發的 Turanza 靜音系列輪胎、橫濱的 BluEarth 環保系列輪胎等,都以優異的噪音性能作為重要賣點,受到消費者歡迎[402][403]。

展望未來,日本在輪胎噪音標準領域的發展方向包括:繼續深度參與國際標準制定,推動全球標準協調;根據電動車時代的新需求,研究制定針對性的測試方法與評估標準;加強輪胎全生命週期環境影響評估,不僅關注新輪胎性能,也關注使用過程中的性能變化與廢舊輪胎的環境影響;推動智能輪胎(嵌入傳感器、可實時監測性能的輪胎)的標準化,為未來的智能交通系統做準備;強化與亞洲其他國家的標準協調,推動區域標準統一,促進亞洲汽車產業的一體化發展[404][405][406]。

5.5.2 中國標準 (Chinese Standards)

中國作為全球最大的汽車生產國與消費市場,近年來在汽車與輪胎標準體系建設方面取得了快速進展。中國的標準體系包括國家標準(GB)、行業標準、地方標準與企業標準四個層級,其中國家標準具有最高權威性,由國家市場監督管理總局(State Administration for Market Regulation)與國家標準化管理委員會(Standardization Administration of China)負責制定與發布。在輪胎領域,主要的國家標準包括 GB 9743《乘用車輪胎》(Passenger Car Tyres)、GB 9744《載重汽車輪胎》(Truck Tyres)等,這些標準對輪胎的尺寸、強度、耐久性、安全性能等進行了全面規定[407][408][409]。

中國輪胎標準體系的發展經歷了從參考國際標準到逐步建立自主體系、再到與國際標準深度協調的演進過程。早期的中國輪胎標準主要參考歐洲標準與 ISO 標準,技術內容較為



基礎。隨著中國汽車產業的快速發展與技術能力的提升,標準體系不斷完善,技術要求逐步提高。特別是進入 21 世紀以來,中國積極參與國際標準化活動,在聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)等國際平台上發揮越來越重要的作用,推動中國標準與國際標準的相互認可與協調統一[410][411][412]。2024 年,中國發布了新版的 GB 9743-2024 與 GB 9744-2024 標準,對輪胎的性能要求進行了全面更新,其中

重要的變化之一是增加了輪胎噪音性能的要求,這標誌著中國輪胎管制從單純關注安全性能向環保性能與安全性能並重的轉變[413][414]。

GB 9743-2024 標準對乘用車輪胎的噪音性能提出了明確要求,規定輪胎必須按照 ISO 13325 標準規定的方法進行噪音測試,測試結果應符合規定的限值。具體的噪音限值基本參考了 ECE R117 法規的規定,根據輪胎斷面寬度分為不同檔次,限值範圍與國際標準基本一致。這一改革的背景是中國政府將噪音污染治理納入環境保護的重點領域,2021 年發布的《"十四五"噪音污染防治行動計畫》明確提出要加强交通噪音管制,包括推動低噪音輪胎的應用[415][416][417]。透過在國家標準中增加噪音性能要求,可以從產品准入階段就對輪胎噪音進行控制,推動製造商提升產品環保性能。同時,這一舉措也有助於中國輪胎產品進入國際市場,因為符合中國新標準的產品基本上也能滿足歐盟等主要市場的要求,降低了企業的多重認證成本[418][419]。

中國輪胎標準體系的另一個重要發展是建立強制性產品認證制度(China Compulsory Certification, CCC)。根據《強制性產品認證管理規定》,包括汽車輪胎在內的多類產品必須透過



CCC 認證才能在中國市場銷售。CCC 認證不僅要求產品符合相關國家標準的技術要求,還包括對製造企業的質量管理體系、生產一致性控制能力等進行評估,確保批量生產的產品質量穩定可靠[420][421][422]。對於輪胎產品,CCC 認證的技術依據就是 GB 9743、GB 9744 等國家標準,隨著這些標準增加了噪音性能要求,CCC 認證也相應地將噪音測試納入認證範圍。這意味著所有在中國銷售的輪胎,無論是國產還是進口,都必須透過噪音測試並符合限值要求,否則無法獲得 CCC 認證、不能合法銷售。這種強制性認證制度確保了標準要求的有效實施,避免了標準成為"紙面文件"[423][424]。

中國在輪胎噪音量測能力建設方面也取得了顯著進展。多個國家級檢測機構如中國汽車技術研究中心(China Automotive Technology and Research Center, CATARC)、交通運輸部公路科學研究院等建立了符合 ISO 10844 標準的噪音測試場地,配備了先進的量測設備,具備了按照國際標準進行輪胎噪音測試的能力[425][426][427]。這些機構不僅為國內企業提供測試服務,也參與國際比對測試,驗證測試能力的國際等效性。此外,中國還建立了測試數據的互認機制,與一些國家和地區簽訂了測試結果相互認可協議,進一步便利了國際貿易。例如,中國與歐盟

在汽車零部件領域的某些標準上已實現了相互認可,符合中國標準並透過 CCC 認證的產品,在進入歐盟市場時可以簡化部分認證程序[428][429]。

中國輪胎產業規模巨大,是全球最大的輪胎生產國與出口國,年產量超過 8 億條,占全球總產量的約 40%。中國輪胎企業在國際市場上具有重要地位,如中策橡膠(Zhongce Rubber)、玲瓏輪胎(Linglong Tire)、三角輪胎(Triangle Tire)等已進入全球輪胎企業前列[430][431]。隨著國內標準的提升與國際標準的接軌,中國輪胎企業在低噪音技術領域也加大了研發投入。許多企業建立了專門的聲學實驗室,引進國際先進的噪音測試與分析設備,開展噪音機理研究與降噪技術開發。一些企業還與國內外高校、研究機構建立合作,進行聯合技術攻關。這些努力使得中國品牌輪胎的噪音性能持續改善,逐步縮小與國際頂尖品牌的差距,部分高端產品已達到國際先進水準[432][433][434]。

然而,中國在輪胎噪音管制方面仍面臨一些挑戰。首先是標準實施的監督執行問題,雖然建立了強制性認證制度,但市場監督的覆蓋面與頻率仍有待加強,部分不合規產品仍能流入市場。其次是消費者意識問題,相比價格、品牌等因素,中國消費者對輪胎噪音性能的關注度相對較低,市場需求拉動作用有限。再者是產業結構問題,中國輪胎產業中中小企業數量眾多,技術水準參差不齊,部分企業難以負擔標準提升帶來的技術改造成本[435][436][437]。針對這些挑戰,中國政府正在採取多方面措施,包括:加強市場監督執法,提高違規成本;開展消費者教育,提升公眾環境意識;實施產業政策引導,支持企業技術升級;推動產業整合,淘汰落後產能等,逐步建立更為完善的輪胎環境管制體系[438][439]。

5.5.3 其他亞洲國家標準 (Other Asian Countries Standards)

除日本與中國外,亞洲其他主要經濟體也在根據各自情況建立或完善輪胎噪音標準體系。韓國作為重要的汽車生產與出口國,在輪胎噪音管制方面採取了較為積極的立場。韓國的輪胎標準主要由韓國標準協會(Korean Standards



Association, KSA)制定,形成韓國工業標準(Korean Industrial Standards, KS)系列。在車輛噪音管制方面,韓國環境部(Ministry of Environment)根據《噪音與振動控制法》(Noise and Vibration Control Act)建立了管制體系[440][441][442]。

該法案於 2013 年修訂,增加了輪胎噪音管制的條款,要求輪胎製造商或進口商必須測量輪胎噪音水準並向主管部門報告,測量方法應符合國際標準(參考 ISO 13325 或 ECE R117)。雖然該法規目前主要是資訊申報要求而非強制性限值,但為

未來建立更嚴格的管制體系奠定了基礎[443][444][445]。韓國輪胎製造商如韓泰(Hankook)、錦湖(Kumho)等在國際市場上具有一定競爭力,這些企業為了進入歐盟、日本等嚴格管制市場,已經具備了按國際標準進行噪音測試與控制的能力,其產品性能基本達到國際要求。因此,韓國如果進一步加強國內的噪音管制,產業界的適應能力較強[446][447]。

印度作為全球人口最多的國家與快速增長的汽車市場,在汽車與輪胎標準方面長期參考歐洲標準。印度的車輛型式認證由中央汽車研究所(Automotive Research Association of India, ARAI)負責,技術標準主要採納 UNECE 法規或等效的印度國家標準(Bharat Standards, BS)。在輪胎噪音方面,印度尚未建立強制性的管制要求,但隨著環境保護壓力的增加與汽車產業的升級,印度政府正在考慮引入輪胎噪音標準[448][449][450]。2021 年,印度道路交通與公路部(Ministry of Road Transport and Highways)發布了關於更新車輛安全與排放標準的政策文件,提出逐步與國際標準接軌的目標,其中包括研究引入輪胎噪音與滾動阻力標準的可行性。預期在未來數年內,印度可能正式實施基於 ECE R117 的輪胎噪音管制[451][452]。

東南亞國家聯盟(ASEAN)成員國在輪胎標準方面的情況較為多樣。泰國、馬來西亞、印度尼西亞等主要汽車生產國基本上採用國際標準或參考歐洲、日本標準建立本國體系。東盟在區域層面也在推動標準協調,希望建立統一的東盟汽車標準體系,便利區域內貿易與產業合作[453][454][455]。在輪胎噪音方面,東盟尚未建立統一的區域標準,但各成員國在更新本國標準時都在考慮納入噪音性能要求。例如,泰國工業標準學會(Thai Industrial Standards Institute, TISI)正在修訂輪胎標準,計畫參考 ECE R117 增加噪音測試要求;馬來西亞標準局(Department of Standards Malaysia)也在類似的工作中[456][457]。這些努力反映了亞洲地區整體上對輪胎環境性能的重視程度在提高,標準體系正朝著與國際接軌的方向發展。

5.6 標準的發展趨勢 (Development Trends of Standards)

輪胎噪音量測標準體系正處於快速演進之中,受到技術進步、政策需求、市場變化與國際協調等多方面因素的推動,呈現出一系列重要的發展趨勢。這些趨勢不僅反映了當前標準面臨的挑戰與改進方向,也昭示了未來輪胎噪音管制的可能路徑,對產業界、政策制定者與研究機構都具有重要的指導意義[458][459][460]。



第一,標準的國際協調與統一化趨勢日益明顯。在經濟全球化與產業國際化的背景下,不同國家與地區之間標準的差異造成了技術性貿易壁壘,增加了企業的合規成本,阻礙了國際貿易的順暢進行。為了解決這一問題,聯合國世界車輛法規協調論壇(WP.29)積極推動全球統一技術法規(GTR)的制定,目標是建立一套全球範圍內統一適用的車輛與零部件技術標準,各締約國直接採納 GTR 作為本國法規,實現標準的完全統一[461][462][463]。在輪胎噪音領域,雖然完整的 GTR 尚未建立,但主要經濟體如歐盟、日本、韓國、中國等已基本採用相同或高度相似的技術標準(主要基於 ISO 13325 與 ECE R117),為未來的完全統一奠定了基礎。預期在未來 5-10 年內,輪胎噪音領域的 GTR 有望正式建立,這將大大簡化國際貿易程序,降低產業合規成本,也將推動美國等尚未建立嚴格噪音標準的市場加入全球統一管制體系[464][465]。



第二,標準要求的持續嚴格化趨勢不可逆轉。隨著對噪音健康影響科學認識的深化、靜音技術的不斷進步以及公眾環境訴求的提升,各主要市場的輪胎噪音限值正呈現出階段性收緊的態勢。歐盟已經明確了未來實施更嚴格限值(Stage 3、Stage 4 等)的路線圖,中國、日本等市場也在跟進。研究預測,到 2030 年,主要市場的輪胎噪音限值可能相比當前再降低 2-3 分貝,這對產業界的技術創新能力提出了重大挑戰[466][467][468]。同時,標準的管制範圍也在擴展,從僅關注新輪胎擴展到磨損輪胎,從僅規定總體噪音水準擴展到特定頻段噪音,從單一測試工況擴展到多工況測試等。例如,歐盟 ECE R117-04 版本已經增加了磨損輪胎的噪音要求,未來可能進一步引入多個磨損階段的測試點,確保輪胎在全生命週期都維持良好性能。這種全面化、精細化的管制趨勢使得輪胎設計需要在更多約束條件下進行優化,技術難度顯著提升[469][470][471]。

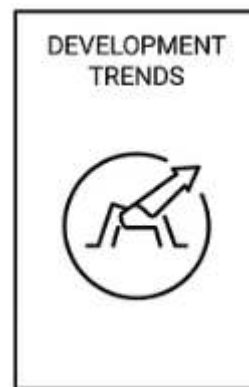
第三,電動車時代對標準體系提出了新的要求與挑戰。電動車輛由於缺乏傳統內燃機的噪音掩蔽效果,輪胎路面噪音成為車輛總噪音的絕對主導源,其重要性顯著提升。研究表明,對於電動乘用車,在 30-50 公里/小時的速度範圍內,輪胎噪音對車內噪音的貢獻度可達 80-90%,而傳統燃油車通常只有 40-60%[472][473]。這意味著電動車對輪胎的噪音性能提出了更高要求,僅僅達到當前標準限值可能無法滿足實際使用需求。因此,標準制定者正在研究是否需要針對電動車專用輪胎設定更嚴格的噪音限值,或者建立專門的評估方法,更準確地反映輪胎在電動車上的噪音表現[474][475][476]。此外,電動車的瞬時加速性能優異、重量分佈與傳統車不

同(電池組通常位於底盤下方,重心較低),這些特點也對輪胎的設計與性能提出了特殊要求,需要標準體系相應調整以適應新技術發展。

第四,量測技術的創新推動標準方法的多樣化。傳統的透過噪音(Pass-by)測試方法雖然成熟可靠,但存在測試效率較低、受環境條件影響大、無法精確識別噪音源等局限。近年來發展起來的近場量測法(Close Proximity Method, CPX)透過在車輛輪胎附近設置麥克風,可以更直接地測量輪胎路面交互噪音,且受環境干擾較小、測試效率較高[477][478][479]。CPX 方法已被納入 ISO 11819-2 標準,主要用於路面聲學特性評估,但也正在探索用於輪胎性能評估的可行性。其他新興技術如聲學相機(Acoustic Camera)可以透過陣列式麥克風與波束形成算法,實現噪音源的可視化定位,精確識別輪胎不同部位的噪音貢獻,為降噪設計提供精細化指導[480][481]。聲強法(Sound Intensity Method)、聲學全息術(Acoustic Holography)等先進技術也在研究應用中。這些新技術的成熟將推動標準體系納入多種補充性測試方法,形成更為全面的評估框架,既保留傳統方法的權威性與可比性,又利用新技術提供更豐富的性能資訊[482][483][484]。

第五,量測不確定度評估成為標準體系的重要組成部分。任何物理量測都不可避免地存在誤差與不確定度,輪胎噪音量測涉及複雜的聲學環境、精密的儀器設備、多變的測試條件,不確定度來源眾多。為了提高測試結果的可靠性與可比性,國際標準化組織專門成立了量測不確定度工作組,系統研究各種不確定度來源及其量化方法[485][486]。ISO 13325:2023 修訂版已經增加了不確定度評估的要求,要求測試機構量化並報告測試結果的擴展不確定度。未來,其他相關標準如 ISO 362、ISO 10844 等也將逐步納入不確定度要求。同時,標準還在探索如何利用不確定度資訊來改進限值設定、優化測試程序、提高測試效率等。例如,透過識別不確定度的主要來源,可以針對性地改進測試條件控制或設備精度,從而降低不確定度水準[487][488][489]。

第六,標準與法規的數位化與智能化發展。隨著資訊技術的進步,標準制定、實施、監督的全過程正在經歷數位化轉型。歐盟建立的產品資料庫(EPREL)是一個典型例子,所有輪胎產品的性能數據都以數位化方式存儲與管理,便於查詢、分析與監督[490][491]。未來,可能進一步發展智能化的標準合規管理系統,利用大數據分析技術識別市場上的異常產品、利用區塊鏈技術確保測試數據的真實性與不可篡改性、利



用人工智能技術輔助標準制定與更新等。在測試方法層面,也在探索更多的自動化與智能化,如利用機器視覺技術進行路面紋理自動檢測、利用智能控制系統實現測試車輛的精確速度與加速度控制、利用自動數據處理系統提高測試效率與準確性等[492][493][494]。

第七,標準體系向全生命週期管理延伸。傳統標準主要關注新產品的性能,但從環境保護與永續發展角度看,產品在整個使用壽命期間的環境影響更為重要。因此,標準正在向全生命週期方向擴展,不僅評估新輪胎性能,也評估磨損



過程中的性能變化、廢舊輪胎的回收利用與環境影響等[495][496][497]。例如,磨損輪胎噪音要求的引入就是這一趨勢的表現。未來,標準可能進一步要求輪胎在設計階段就考慮全生命週期性能,採用永續材料、優化耐久性與噪音性能的平衡、設計便於回收的結構等。同時,新興的輪胎磨損顆粒環境影響問題也開始進入標準視野,未來可能建立輪胎磨損率的測試與限值標準,從源頭減少微塑料污染[498][499][500]。

總之,輪胎噪音量測標準體系正處於快速發展與深刻變革之中,技術進步、政策需求與國際協調共同推動著標準的演進。未來的標準體系將更加協調統一、要求更加嚴格全面、方法更加先進多樣、管理更加智能高效,為降低交通噪音、保護環境健康、推動產業技術進步發揮更大作用。對於產業界而言,密切跟蹤標準動態、提前布局技術研發、積極參與標準制定,將是應對挑戰、把握機遇的關鍵。對於政策制定者而言,科學制定標準、有效實施監管、促進國際協調,將是實現環境目標、維護公眾健康的重要保障。

結論 (Conclusions)

本章的整體分析顯示,輪胎噪音量測標準不僅是聲學測試技術的集合,更是連結科學研究、工程設計、法規制定與公共健康保護的關鍵制度架構。透過國際標準與區域法規的長期演進,輪胎噪音量測已建立起高度成熟且具國際共識的技術體系,使不同國家、不同測試機構與不同產品之間的噪音性能得以在共同基準下進行比較與評估。

研究結果指出,ISO 362、ISO 13325 與 ISO 10844 等核心標準在功能上形成明確分工又彼此互補的關係。ISO 362 提供具環境代表性的整車噪音評估,反映車輛於實際交通條件下對周邊環境的噪音影響;ISO 13325 則專注於輪胎本身的噪

音發射特性，使輪胎設計與性能差異得以被獨立解析；ISO 10844 所規範的標準化測試路面，則是確保上述量測結果具備可重複性與國際可比性的根本前提。三者共同構成輪胎噪音量測標準體系中不可分割的技術支柱。

本章亦清楚揭示，量測不確定度已成為現代輪胎噪音標準不可忽視的核心議題。在噪音限值逐步收緊、產品差異縮小至數分貝以內的背景下，忽略不確定度將可能導致型式認證與法規判定上的系統性偏差。將不確定度評估正式納入標準要求，不僅提升測試結果的科學可信度，也為政策制定者在設定合理限值與執行彈性上提供了重要依據。

以下是輪胎噪音量測標準的摘要說明：

5.1 國際標準體系 (International Standards System)

輪胎噪音國際標準體系由兩大核心組織主導，為全球提供統一的技術語言與參考框架：

主要國際組織

- **ISO (國際標準化組織)**: 全球最具權威的標準制定機構，負責制定核心聲學量測標準 (如 ISO 362、ISO 13325、ISO 10844)。從 1964 年首次發布 ISO/R 362 標準開始，經歷多次重大修訂，反映最高水準的聲學量測技術。
- **UNECE (聯合國歐洲經濟委員會)**: 通過 WP.29 (World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations) 推動全球法規協調，創建技術性國際法規 (如 ECE R117)，促進貿易便利化。

標準體系架構

包含相互連動的三大標準：

- **整車標準 (ISO 362)**: 車輛加速透過噪音量測
- **輪胎標準 (ISO 13325)**: 輪胎滑行噪音量測
- **測試路面標準 (ISO 10844)**: 標準化測試路面規格

從量測條件、程序到評估皆有明確規範，構成完整的技術框架。

標準協調機制

- **開放透明程序**: 由各成員國技術專家組成工作組共同參與制定
- **科學嚴謹性**: 建立在大量實驗數據基礎上，經過嚴格的國際比對測試 (Round Robin Test) 驗證
- **技術中立性**: 採用技術性語言而非法律性語言，允許各國根據本國情況調適採納

- **促進全球協調:** 為多國法規 (歐盟、日本、中國等) 所引用,WP.29 技術論壇積極推動全球統一技術法規 (GTR)

5.2 ISO 標準 (ISO Standards)

ISO 標準體系包括三大核心標準系列,相互補充、共同構成完整的輪胎噪音量測技術框架。

5.2.1 ISO 362 系列 (ISO 362 Series)

版本演進歷程:

- **第一代 (ISO/R 362:1964):** 測試車輛全油門加速時的最大噪音,關注動力系統,但條件過於極端
- **第二代 (ISO 362:1998):** 引入加速度精確控制、檔位選擇標準化,測試更貼近日常城市行駛
- **第三代 (ISO 362-1:2007/2015/2022):** 分為多部分,第 1 部分針對 M/N 類車,2022 年最新版涵蓋 M1/M2/N1 等多數公路車

測試方法:

1. **車輛準備:** 加熱狀態、正常輪壓、標準負載
2. **路面要求:** 必須符合 ISO 10844 標準
3. **測試條件:**
 - 典型速度 50 km/h
 - 全油門或依動力比部分油門加速
 - 目標加速度控制在 $\pm 5\%$ 內
4. **麥克風布置:** 車道兩側 7.5m,高度 1.2m,記錄最大 A 加權值
5. **環境控制:** 溫度、風速、背景噪音等皆有詳細數值規範
6. **數據要求:** 2 次測試差異 ≤ 2 dB,需進行溫度、壓力等修正

適用範圍: 所有公路用 M1、M2、N1、N2、N3 車型,排除摩托車

5.2.2 ISO 13325 標準 (ISO 13325 Standard)

專為評估輪胎本身噪音性能設計,採用滑行法 (coast-by),消除動力系統噪音影響。

標準內容:

- **版本:** 2003 年首版,2019 年第二版,2023 年修正增列不確定度評估
- **核心原理:** 車輛加速至規定速度後切入空檔、關閉引擎,自由滑行通過量測區域,所測噪音近似全為輪胎/路面互動產生

測試程序:

1. **路面要求:** 必須在 ISO 10844 標準路面進行
2. **環境條件:** 氣溫 5~40°C、風速 ≤ 5 m/s
3. **輪胎準備:** 新胎需預先磨合行駛 100~200 km,氣壓與負載有明確公式規定
4. **測試速度:** 典型為 50/80/110 km/h 多個速度點
5. **麥克風布置:** 依 ISO 362 相同配置 (雙側 7.5m、高 1.2m)
6. **數據處理:** 每條輪胎至少 2 次有效測試,取算術平均,差異 < 2 dB

技術要求:

- 明確溫度、風速、負載、壓力修正公式
- 要求量測結果附不確定度範圍
- 結果廣泛用於歐盟 ECE R117 型式認證

5.2.3 ISO 10844 測試路面 (ISO 10844 Test Surface)

規範聲學量測專用標準路面的技術規格與驗證方法。

路面規格:

1. **材料:** 密實型瀝青混凝土 (Dense Asphaltic Concrete)
2. **骨料:** 最大粒徑 8mm
3. **養護:** 施工後需自然養護穩定 3 個月以上
4. **平均剖面深度 (MPD):** 0.4~1.3mm
5. **聲音吸收係數:** 1000 Hz 下必須 < 0.06
6. **幾何要求:**
 - 寬度 ≥ 3 m
 - 直線測試段 ≥ 20 m,總長 ≥ 40 m
 - 周邊 50m 內無大反射體 (建物、樹等)
 - 平整度最大坡度 $\pm 1\%$

維護要求:

- 每年至少驗證一次 MPD、吸音係數、平整度
- 建議定期以參考輪胎 (Reference Tyre) 檢查聲學穩定性
- 超標須修復或重鋪
- 全球不同 ISO 10844 場地間噪音差異約 0.5~1.0 dB

5.3 歐盟法規 (European Union Regulations)

歐盟擁有全球最嚴格且完善的輪胎噪音管制體系。

5.3.1 ECE R117 法規 (ECE R117 Regulation)

法規內容:

- **適用範圍:** C1 (乘用車)、C2 (輕型商用)、C3 (重型商用) 等輪胎 (平均速度 ≥ 80 km/h)

測試要求:

- **測試依據:** ISO 13325 滑行法, ISO 10844 標準路面
- **測試程序:**
 - 車輛裝配新胎, 加速至 80 km/h
 - 切空檔、關閉引擎, 自由滑行通過麥克風區域 (兩側 7.5m)
 - 每條輪胎至少 2 次有效測試
 - 新胎需磨合, 負載/胎壓有明確公式
- **重大修正 (2020 R117-04):** 磨損至 50% 胎面深度噪音不得超過新胎限值 +2 dB

認證程序:

- 產品上市前需透過型式認證
- 企業送檢至官方機構/實驗室測試
- 測試合格後核發證書
- 生產線一致性 (COP) 抽檢
- 輪胎需明顯標記 “E” 加國碼

5.3.2 輪胎標籤法規 (Tire Labeling Regulation)

法規依據: EC 1222/2009、EU 2020/740 (新版規範)

標籤內容: 必須顯示三項性能

1. 燃油效率: A-E 級
2. 濕地抓地: A-E 級
3. 外部噪音: A/B/C 三級 + 分貝值

噪音等級分類:

- **A 級:** 至少比法規限值低 3 dB
- **B 級:** 比法規限值低 1~3 dB
- **C 級:** 僅符合法規限值 (未低於 1 dB)

實施要求:

- 自 2021 年 5 月強制實施

- 每條胎均需註冊 EPREL 公開資料庫
- 標籤附二維碼連接產品詳細資訊
- 零售端需於輪胎上貼標籤或於資料明確標示
- 網售亦需顯示完整標籤資訊
- 違規有市場監督與處罰機制

5.3.3 噪音限值要求 (Noise Limit Requirements)

各車輛分類限值:

C1 (乘用車) 依胎寬分級:

- ≤185mm: **68 dB(A)**
- 185-215mm: **69 dB(A)**
- 215-245mm: **70 dB(A)**
- 245-275mm: **71 dB(A)**
 - 275mm: **72 dB(A)**

特殊輪胎調整:

- 加強型輪胎/雪地胎可 +1~2 dB

C2 (輕型商用): 70-72 dB(A)

C3 (重型商用): 72-75 dB(A) (按負載與胎類細分)

階段性限值演進:

- **Stage 1 (2012):** 初始限值
- **Stage 2 (2016):** 收緊 1-2 dB
- **Stage 3/4 (規劃中):** 每階段再收緊 1-2 dB
- 預計 2030 年主要市場限值再降 2-3 dB

合規要求:

- 所有在歐盟上市輪胎必須透過型式認證
- 必須符合法定限值,不合格不得銷售
- 2020 年起磨損輪胎也須達標 (新胎限值 +2 dB)
- 每次修正前設有過渡準備期

5.4 美國標準 (US Standards)

美國輪胎噪音管制體系與歐盟顯著不同,側重安全性能而非環保性能。

5.4.1 FMVSS 標準 (FMVSS Standards)

聯邦標準要求:

- **制定機構:** NHTSA (美國國家公路交通安全管理局)
- **主要標準:**
 - **FMVSS No. 119:** 商用車、高總重車輛、摩托車輪胎
 - **FMVSS No. 139:** 乘用車、輕型車輪胎

測試方法:

- 涵蓋尺寸、強度、耐久性、高速/低壓性能等安全項目
- **重點:** 完全側重安全性能
- **局限:** 完全未包含噪音或滾動阻力等環保性能測試

5.4.2 SAE 標準 (SAE Standards)

SAE 推薦做法:

- **性質:** 美國汽車工程師學會發布的推薦性 (非強制) 技術標準

主要標準:

- **SAE J57:** 卡車輪胎噪音拖車法
- **SAE J2805:** 車輛外部透過噪音 (等同 ISO 362-1:2015)
- **SAE J1470:** 早期整車噪音標準
- **SAE J184:** 量測設備規範

測試程序:

- J2805 基本內容與 ISO 362-1:2015 完全一致
- 測試方案與國際標準兼容
- 企業/測試機構可自願採納,但無法律效力
- 美國未強制要求型式認證時須進行噪音測試

5.4.3 EPA 要求 (EPA Requirements)

環保署要求:

- **歷史:** EPA 曾公布 40 CFR 205.50~205.58 車輛噪音排放標準 (特別是摩托車)
- **限值:** 約 70~83 dB,但現已停擺

噪音控制現狀:

- EPA 未針對輪胎本身發布任何噪音或環境性能標準
- 輪胎無獨立噪音規範
- 當前輪胎噪音監管主要依靠地方州政府和部分城市條例
- 非產品型式認證而是現場噪音限制,執法困難

當前關注點:

- EPA 將重點聚焦在輪胎工廠廢氣與微塑料 (輪胎磨損顆粒) 等其他環保議題
- 近期無輪胎噪音標準變動
- 噪音僅有學術和產業自發性關注

5.5 亞洲標準 (Asian Standards)

亞洲主要國家均朝國際標準化、一致化方向推進,與歐盟/日本同步。

5.5.1 日本標準 (Japanese Standards)

日本法規體系:

- **法律基礎:** 《道路運送車輛法》及國土交通省相關條文
- **依據標準:** ECE R51 (整車噪音)、R117 (輪胎噪音)

測試標準:

- 所有新輪胎必須透過 ECE R117 (即 ISO 13325 + ISO 10844) 滑行法測試
- 合格方可上市
- **行業標準:** JASO C606 (汽車輪胎噪音測試法) 高度與國際標準一致
- 部分參數根據日本地形、氣候微調

實施機制:

- 日本車輛/輪胎廠廣泛採納 ISO/ECE 程序
- 測試由認可機構執行
- 有交通噪音定點監測與環境管制
- 加強道路/區域整體環境管理

5.5.2 中國標準 (Chinese Standards)

中國國家標準:

- **主要標準:**
 - **GB 9743-2024:** 乘用車輪胎
 - **GB 9744-2024:** 商用車輪胎
- **發展:** 21 世紀後深度接軌國際規範

測試要求:

- GB 9743-2024 明定輪胎須依 ISO 13325 滑行法測試
- 必須於 ISO 10844 標準路面進行
- 噪音限值依胎寬分類,與 ECE R117 基本一致

- 完整分級、分胎寬/用途限值

認證機制:

- 所有產品 (國產或進口) 上市前須透過強制性 **CCC 產品認證**
- 由國家級檢測機構 (如中國汽車技術研究中心) 依國家標準測試並發證
- 生產一致性監督
- 測試全國統一

5.5.3 其他亞洲國家標準 (Other Asian Countries Standards)

韓國:

- 工業標準 **KS**、環境部法規參考 **ISO 13325**
- 現僅要求資訊申報、未全面強制

印度:

- 參考 **UNECE** 法規
- 正研擬引進輪胎噪音/滾動阻力標準
- 近年政策文件已提出規劃,準備導入 **ECE R117/ISO 13325** 體系

東南亞 (泰國、馬來西亞等):

- 修訂輪胎標準時參考 **ECE R117**
- 依國內產業條件漸進融入國際規範
- 正循序推進標準化

區域趨勢:

- 東盟也逐步規劃標準統一
- 核心都與國際同步,朝一致化方向發展

5.6 標準的發展趨勢 (Development Trends of Standards)

輪胎噪音標準正朝向更嚴格、更全面、更智能化方向發展。

1. 國際協調與統一化

- 主要經濟體已逐步統一核心測試法規 (**ISO 13325/ISO 10844**)
- **WP.29** 積極推動全球統一技術法規 (**GTR**)
- 預期 **5-10** 年內輪胎噪音領域 **GTR** 有望建立
- 降低產業/貿易成本,促進全球市場統一

2. 限值持續趨嚴

- 2020 年以後法規限值持續收緊
- 逐步涵蓋磨損輪胎、特定頻帶噪音

- 預計 **2030 年**大部分市場再降 **2-3 dB**
 - 全生命週期管理納入標準考量
- 3. 電動車專屬要求**
- 電動車普及要求標準方法調整
 - 輪胎噪音貢獻將超 **80%** (低速下更明顯)
 - 可能針對 EV 專用輪胎設專屬測試方法/限值
 - 未來標準需特別關注低速段噪音特性
- 4. 新測試技術整合**
- **近場法 (CPX):** ISO 11819-2 已有 CPX 評價規範
 - **聲學相機:** 聲源定位與可視化
 - **聲強法:** 精確量測聲能流
 - **室內轉鼓測試 (Drum):** 可控環境下的測試
 - 補充傳統透過法,提供更全面的評估手段
- 5. 量測不確定度評估**
- 成為新標準重點要求
 - **ISO 13325:2023** 正式規範不確定度報告
 - 要求明示量化與修正方法
 - 未來所有相關標準 (ISO 362、10844) 皆需納入不確定度評估
- 6. 數位化與智能化**
- **全球資料庫:** 如 EPREL 系統,產品資訊透明化
 - **AI 技術:** 自動化量測與數據分析
 - **區塊鏈:** 數據不可偽造,提高可信度
 - 標準落地流程數位化、智能化
- 7. 全生命週期環保**
- 重視材料與全生命週期考量
 - 設計標準納入:
 - 輪胎壽命磨耗性能
 - 微塑膠排放控制
 - 材料回收與永續性
 - 跨領域合規標準持續升級
- 8. 代表性與實用性提升**

- 測試條件更貼近實際使用場景
- 考慮多種路面、氣候、載重條件
- 政策制定朝代表性強、實用性佳方向發展

全球輪胎噪音標準正朝向**國際統一、限值趨嚴、技術創新、數位化、全生命週期管理**方向發展,以更有效地控制輪胎噪音污染,保護公共健康與環境。歐盟繼續引領最嚴格標準,亞洲主要市場快速跟進,美國則相對滯後但產業界自主參與國際標準化進程。

展望未來,輪胎噪音量測標準的發展將面臨電動車普及、道路鋪面多樣化與量測技術快速進步所帶來的雙重挑戰與契機。一方面,現行以傳統動力車輛為基礎所建立的測試方法,需持續調整以更真實反映電動車噪音結構的變化;另一方面,近場量測、室內測試與聲源解析等新興技術,將有助於補強傳統透過噪音測試在噪音機制解析上的不足。整體而言,未來的輪胎噪音量測標準將朝向更高精度、更強代表性與更佳國際協調性的方向演進,成為支撐低噪音輪胎技術創新、智慧交通治理與永續城市發展的重要技術基石。

輪胎噪音標準：現行條文明文 vs 未來趨勢／政策（對照表）

主題	現行標準（有明文條文支撐，可註腳）	未來趨勢與建議情境（政策白皮書語氣，可以保留你原來寫法的方向）
國際標準體系角色分工	ISO 為技術標準制定機構：ISO 362（整車外部噪音）、ISO 13325（輪胎滾動噪音）、ISO 10844（標準測試路面）等，均為公開國際標準。 UNECE/WP.29 透過技術法規（如 R51、R117）將這些 ISO 技術要求「法規化」。	可強調「ISO 提供技術語言、UNECE 提供法規框架」，並以「國際協調、降低貿易成本」為論述主軸，帶入 GTR（全球技術法規）中長期統一的政策願景。
ISO 362（整車透過噪音）定位	針對 M、N 類車輛外部噪音之型式測試標準，採標準路面（ISO 10844）、固定麥克風位置（7.5 m、1.2 m）、控制車速、檔位與加速度，量測 A 加權最大值。	你原本文中「更貼近日常行駛情境」的敘述可以保留，用於說明：未來修訂可進一步朝「代表性實際駕駛情境」靠攏，例如低速電動車情境、都會區加減速模式等。
ISO 13325 版本與用途	ISO 13325 專門規範「輪胎滑行（coast-by）噪音」試驗方法，2003 首版、2019 第二版，2023 修訂加入不確定度評估要求；作為 UNECE R117 等法規之基礎試驗方法。	你可在白皮書中寫成：「未來所有輪胎噪音相關法規，應比照 ISO 13325:2019/2023，全面要求附上量測不確定度，作為審查與比對依據」，把它當成治理提升的方向來寫。
ISO 10844 測試路面關鍵參數	要求密實瀝青混凝土、最大骨料粒徑約 8 mm、規範宏觀紋理（MPD）、平整度與吸聲係數，使不同場地之測試結果可以比對；具體數值（MPD 範圍、吸聲係數上限）需依最新版 ISO 10844 原	你原本寫的「MPD 約 0.4–1.3 mm、吸音係數很低」可保留為「典型或建議範圍」，但在正文需改成「例如 MPD 約 0.X–0.Y mm（實務常用範圍）」，實際仍以 ISO 10844 最新版本為

主題	現行標準（有明文條文支撐，可註腳）	未來趨勢與建議情境（政策白皮書語氣，可以保留你原來寫法的方向）
	文條文引用。	準」，用來說明標準路面之「設計概念」，而不是把數字寫成硬條文。
ECE R117 試驗方法	R117 使用 ISO 13325 coast-by 方法與 ISO 10844 路面，規定試驗速度（常用 80 km/h）、輪胎負載、胎壓、預磨合等條件，並以此作為 C1/C2/C3 輪胎滾動噪音型式認證的法定方法。	你原文裡「加速至 80 km/h → 切空檔滑行」這種流程性描述，非常適合作為「法規白話說明」，可以保留；但「磨耗胎噪音不得超過新胎 +2 dB」應移到「政策建議」區，寫成未來可能收緊的方向。
ECE R117 「磨耗胎」要求	R117-04 目前「明文」重點在於將磨耗輪胎的濕地性能納入要求；噪音限值仍以新胎為主，尚未明訂「新胎限值 +2 dB」的硬性條文。	你可以在白皮書中主張：「建議未來在國家或地方規範中，參考歐洲政策討論方向，要求磨耗輪胎在 50% 胎紋深度時，其噪音不得超過新胎法定限值 +2 dB，以反映全生命週期噪音表現。」明確標示為「建議方案」。
EU 2020/740 輪胎標籤 – 噪音等級邏輯	新版標籤要求顯示燃油效率、濕地抓地與外部噪音等級，噪音分 A/B/C 等級並附聲壓值；A 通常代表比法規限值顯著更低的噪音、B 約接近限值、C 接近或略高於舊限值，但仍符合法規框架（實際分類與法規條文需引用官方技術文件）。	你原來「A 比限值低至少 3 dB、B 比限值低 1-3 dB、C 等於限值」這種線性說法，可調整成「政策宣導語言」，例如：「A 級象徵明顯低於法定門檻的安靜輪胎，B 級約略貼近門檻，C 級則代表僅達到最低要求」，強調「越接近 A 越友善社區」的政策訊息。
EU 輪胎噪音限值（C1/C2/C3）	現行 Stage 2 限值依胎寬與類別訂定，大致範圍：C1 約 70-72 dB(A)、C2 約 72-76 dB(A)、C3 約 74-79 dB(A)，精確值須依 R117/EU 661/2009 附錄表格引用。	你原表中「C1 為 68-72 dB、C2 為 70-72 dB、C3 為 72-75 dB」較現行標準再嚴格 1-3 dB，可在白皮書中改寫為「建議 2030 年後，乘用車輪胎限值再收緊 2-3 dB，例如 C1 各寬度級距全面下降至 68-70 dB(A) 左右」，明確標示為未來情境／政策目標。
EU 限值階段（Stage 1/2/3）	歐盟確實採分階段（Stage 1、Stage 2）逐步收緊限值，文件中也有進一步檢討 Stage 3 或額外收緊的規劃，但尚未完全落實到所有級距。	你可以將「Stage 3/4 每階段再收緊 1-2 dB、2030 再降 2-3 dB」寫成政策推估路徑，用「預計／研議中／政策情境」字眼，放在趨勢分析與 сценарио 模擬章節，而不是寫成現行硬法規。
美國 FMVSS – 輪胎要求範圍	FMVSS 119、139 僅涵蓋強度、耐久、高速性能、胎側標示等「安全」項目，沒有獨立的輪胎噪音或滾阻強制要求；輪胎噪音不屬於 FMVSS 法定型式認證項目。	你可以更用力寫成政策對比：「相較於歐盟導入完整輪胎噪音與標籤制度，美國聯邦目前在輪胎噪音方面仍屬『放任市場、自律為主』，提供我國在制定國家標準時的對照與借鏡。」
SAE J2805 / J57 等	SAE J2805 的試驗方法原則上等同 ISO 362-1:2015，屬於工程界推薦標準，無直接法律效力；J57 等用於卡車輪胎噪音拖車法試驗。	可以在白皮書中把 SAE 定位為「技術參考與研發基準」，建議政府在草擬國內技術指引時，可採 SAE + ISO 雙軌比對，用於補充法規之外的研發測試與驗證。
EPA 噪音管理現況	EPA 曾在 40 CFR 205 制定車輛噪音排放限值（尤其針對機車），但長期未更新；目前對「輪胎產品」本身沒有獨立噪音標準與標籤制度。	你可以保留「美國現階段將焦點放在廢氣、輪胎磨耗微塑膠等議題」，並在白皮書中提出：「未來若美國啟動輪胎噪音產品標準，將對全球市場結構產生重大影響，值得我國提前研議。」
日本法規 – 採用 ECE 體系	日本以《道路運送車輛法》為上位法，實質上導入 ECE R51（整車）與 R117（輪胎）技術內容，輪胎上市前須通過	你可以延伸寫成：「日本採取與歐洲高度協同的技術路徑，讓輪胎與車輛可在國際間自由流通，對於我國未來若

主題	現行標準（有明文條文支撐，可註腳）	未來趨勢與建議情境（政策白皮書語氣，可以保留你原來寫法的方向）
	R117 型式認證；技術試驗方法與 ISO 13325/10844 一致。	要強化出口導向的輪胎產業，有明顯示範效益。」
中國 GB 9743 / 9744	新國標 GB 9743-2024、GB 9744-2024 已引入滾動噪音要求，並與 R117/ISO 13325 測試方法協同；具體限值分級與修正公式需依國標原文。	你的文本中，可把「噪音限值與 R117 基本一致」寫成「高度對齊」，但同時加一句：「個別細節如分級與修正公式仍以國家標準條文為準」；在白皮書裡則可延伸為「兩岸標準趨於接軌，有利廠商布局區域市場」。
CPX、聲強量測、聲學相機等新技术	CPX(ISO 11819-2)、聲強測量、室內轉鼓等，現行多數標準僅在「道路降噪性能評估、研究指引」層級被提及，尚未全面取代法定透過法。	你可保留你原文件中對這些方法的技術描述，並在未來情境欄寫：「建議將 CPX、聲學相機與聲強測試納入我國地方政府的『輔助評估工具』，用於道路養護優先順序排序、黑點篩選與改善成效追蹤。」
量測不確定度	ISO 13325:2023 已明文要求報告不確定度；其他標準亦逐步強調不確定度評估與說明。	你可以將「所有標準未來皆需納入不確定度」寫成政策宣示：「建議我國在制定輪胎與道路噪音相關技術指引時，全面要求試驗報告揭露量測不確定度，作為審查與科技執法的重要基礎。」
全生命週期與環保議題	現行法規對「磨耗過程噪音、微塑膠排放、材料回收」等議題，多處於研究與政策討論階段，尚未形成完整且強制的國際統一標準。	你可以保留「全生命週期管理」段落，用白皮書語氣提出：應將「噪音＋碳排＋微塑膠」視為輪胎的三大外部成本，逐步納入標準與標籤制度，例如在未來版本的標籤中增加「磨耗顆粒排放等級」。

參考文獻

- [1] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise – trends and future activities. *Mobility & Vehicle Mechanics*, 43(2), 15-34. <https://www.researchgate.net/publication/315704371>
- [2] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 218, 109863. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109863>
- [3] Świczko-Żurek, B., & Ejsmont, J. (2014). How efficient is noise labeling of tires? *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21)*. <https://www.academia.edu/85210935>
- [4] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 12-19. <http://www.sandv.com/downloads/1208soha.pdf>
- [5] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 - Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. <https://www.iso.org/standard/71034.html>
- [6] European Commission. (2016). Regulation No 117 of the Economic Commission for Europe (ECE R117). *Official Journal of the European Union*. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812(01))
- [7] Schlatter, F., Sandberg, U., Bühlmann, E., & Mioduszewski, P. (2022). Project STEER: Improving the EU Tyre Noise Label. *Proceedings of INTER-NOISE 2022*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1692357/FULLTEXT01.pdf>
- [8] National Highway Traffic Safety Administration. (2003). Federal Motor Vehicle Safety Standards: Tires. *Federal Register*, 68(122), 38116-38177. <https://www.federalregister.gov/documents/2003/06/26/03-15874>
- [9] SAE International. (2020). SAE J2805: Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles. https://www.sae.org/standards/j2805_202005
- [10] State Administration for Market Regulation of China. (2024). GB 9743-2024: Passenger car tyres. <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GB9743-2024>

- [11] Ministry of Environment, Republic of Korea. (2013). Enforcement Rules of the Noise and Vibration Control Act. https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=62384
- [12] Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*, 104(2). <https://doi.org/10.1177/00368504211005224>
- [13] Czuka, M., Pallas, M. A., Morgan, P., & Conter, M. (2016). Impact of potential and dedicated tyres of electric vehicles on the tyre-road noise. *Transportation Research Procedia*, 14, 2381-2390. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.286>
- [14] Sandberg, U. (2001). Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise - the global perspective. *Noise Control Engineering Journal*, 49(4), 170-181. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1646675/FULLTEXT01.pdf>
- [15] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 - Acoustics — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. <https://www.iso.org/standard/80872.html>
- [16] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29). <https://unece.org/transport/vehicle-regulations>
- [17] Copeland, T. J., & Wilhoit, R. S. (2012). Tire Noise Pass-By Testing System Meets Latest Standards. *Sound & Vibration*, 46(12), 14-18. <http://www.sandv.com/downloads/1205cope.pdf>
- [18] International Organization for Standardization. (2015). ISO 362-1:2015 - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. <https://www.iso.org/standard/59760.html>
- [19] van Blokland, G., & Schwanen, W. (2012). Requirements and testing methods for ISO 10844: 2011 test tracks. Proceedings of INTER-NOISE and NOISE-CON Congress. https://mp.nl/sites/default/files/publications/paper_IN_1254_ISO_10844.pdf
- [20] Pinay, J. (2024). Experimental investigation of relevant road surface descriptors for tire-road noise measurements on low-absorbing road surfaces. Doctoral dissertation. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/87143>

- [21] Berge, T., & Gerhard, H. M. (2023). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. Proceedings of INTER-NOISE 2023. <https://ince.publisher.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2023/00000265/00000003/art00062>
- [22] Berge, T., & Mioduszewski, P. (2023). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UNECE Regulation 117. Proceedings of INTER-NOISE 2023. <https://ince.publisher.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2023/00000265/00000004/art00065>
- [23] Sliggers, A. J., de Graaff, F. E., & van Blokland, G. (2014). Subject Tyre noise limits of EC/661/2009 and ECE R117: Evaluation based on sold tyres in the Netherlands. UNECE Working Party on Noise (GRB). <https://www.unece.org/sites/default/files/datastore/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grb/GRB-60-08e.pdf>
- [24] Hammer, E., & Bühlmann, E. (2018). The noise reduction potential of “silent tyres” on common road surfaces. Conference Proceedings, Euronoise 2018. <https://www.researchgate.net/publication/325402167>
- [25] ISO Technical Committee 43/SC 1. (2023). Road vehicles acoustics standards development. ISO/TC 43/SC 1 Working Group Activities Report.
- [26] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 - Acoustics — Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres. <https://www.iso.org/standard/80557.html>
- [27] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Corberan, J. M. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions. Applied Acoustics, 111, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.012>
- [28] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., & Bianco, F. (2017). The influence of tyres on the use of the CPX method for evaluating low-noise road surfaces. Transportation Research Part D, 55, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.002>

- [29] Maffei, L., & Masullo, M. (2014). Electric vehicles and urban noise control policies. *Archives of Acoustics*, 39(3), 333-341. <https://doi.org/10.2478/aoa-2014-0037>
- [30] Praticò, F. G., & Fedele, R. (2021). Electric vehicles diffusion: changing pavement acoustic design? *Noise Mapping*, 8(1), 261-281. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0023>
- [31] 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(8), 2239-2260. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1735493>
- [32] 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*. <https://publications.tno.nl/publication/101065>
- [33] ISO/TC 43/SC 1/WG 42. (2023). ISO 13325:2019/Amd 1:2023 - Amendment on measurement uncertainties. <https://www.iso.org/standard/82491.html>
- [34] UNECE Informal Working Group on Measurement Uncertainties. (2020). ISO TC31/WG11 Amendment to ISO 13325 including measurement uncertainties. <https://wiki.unece.org/download/attachments/117508417>
- [35] Berge, T., Gerhard, H. M., & Peeters, B. (2023). Quantification of measurement uncertainties in tyre noise testing. *Applied Acoustics*, 203, 109186. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109186>
- [36] Ejsmont, J., Berge, T., & Mioduszewski, P. (2016). Influence of measuring conditions on tyre/road noise. *Proceedings of the 45th International Congress on Noise Control Engineering*. <https://documentacion.sea-acustica.es/publicaciones/Oporto16/42.pdf>
- [37] ISO Central Secretariat. (2023). *ISO Standards Development Process Guide*. International Organization for Standardization.
- [38] ISO/TC 43. (2023). *Acoustics - Strategic Business Plan 2023-2027*. International Organization for Standardization.

- [39] National Institute of Standards and Technology. (2023). Acoustic Metrology and Calibration Services. NIST Special Publication 250.
- [40] National Physical Laboratory UK. (2023). Acoustics and Vibration Standards and Services. NPL Technical Report.
- [41] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022(en) - Acoustics — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:80872:en>
- [42] Dewesoft. (2023). Measurement of Tire Noise According to ECE R117: Technical Guide. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [43] Moore, G. F. (2010). The Revised ISO 362 Standard for Vehicle Exterior Noise Measurement. Sound & Vibration, 44(6), 10-13. <http://www.sandv.com/downloads/0610moor.pdf>
- [44] United Nations Economic Commission for Europe. (2001). ISO 362: Acoustics - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles. TRANS/WP.29/GRB/2001/10. <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2001/wp29grb/TRANS-WP29-GRB-34-inf10e.doc>
- [45] ISO/IEC Directives. (2023). Part 1: Procedures for the technical work. International Organization for Standardization.
- [46] ISO/TC 43/SC 1. (2023). Road traffic noise - Working Group procedures and guidelines. ISO Technical Committee Document.
- [47] ISO. (2023). ISO Standards Maintenance and Review Policy. International Organization for Standardization Policy Document.
- [48] SAE International. (2020). SAE J2805-2020: Relationship with ISO 362-1:2015. Technical Standard Background Document.
- [49] China National Institute of Standardization. (2024). GB Standards Harmonization with International Standards Report 2024.
- [50] Continental AG. (2023). Tire Development Process and Standards Compliance. Internal Technical Documentation.
- [51] Michelin Group. (2023). Quality Assurance and International Standards. Corporate Sustainability Report.

- [52] International Organization for Standardization. (2015). ISO 362-1:2015 Technical Specification Details. ISO Standards Database.
- [53] International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 61672-1:2013 - Electroacoustics — Sound level meters. <https://www.iec.ch/>
- [54] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 - Test track specifications and requirements. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80557/>
- [55] American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM E1845-15: Standard Practice for Calculating Mean Profile Depth. ASTM International.
- [56] ISO 13325:2023/Amd 1. (2023). Measurement uncertainties in tyre noise testing - Amendment 1. International Organization for Standardization.
- [57] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 - Special provisions for electric and hybrid vehicles. ISO Technical Committee Document.
- [58] Pallas, M. A., Kennedy, J., Walker, I., & Chatagnon, R. (2015). Noise emission of electric and hybrid electric vehicles: FOREVER deliverable WP2_D2-1. HAL Archives. <https://hal.science/hal-02177735/file/doc00021356.pdf>
- [59] Licitra, G., Teti, L., Cerchiai, M., & Bianco, F. (2017). The CPX method for evaluating noise mitigation actions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 217-226.
- [60] ISO/TC 43/SC 1/WG 33. (2023). Advanced acoustic measurement techniques for tire noise evaluation. ISO Working Group Report.
- [61] United Nations Environment Programme. (2023). Sustainable Development Goals and Vehicle Noise Standards. UNEP Technical Report.
- [62] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Foreword and Introduction. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80872/>
- [63] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). Evolution of vehicle noise regulations under WP.29. UNECE Policy Brief.
- [64] ISO/R 362:1964. (1964). Measurement of noise emitted by motor vehicles. International Organization for Standardization (withdrawn standard).
- [65] ISO 362:1998. (1998). Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Engineering method. International Organization for Standardization (withdrawn standard).

- [66] United Nations Economic Commission for Europe. (2007). Revision of ISO 362 standard - Technical background. TRANS/WP.29/GRB/2007/15.
- [67] ISO 362-1:2007. (2007). Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part 1: M and N categories. International Organization for Standardization (withdrawn standard).
- [68] ISO 362-2:2009. (2009). Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part 2: L category. International Organization for Standardization.
- [69] United Nations. (2015). Consolidated Resolution on the Construction of Vehicles (R.E.3). UN/ECE/TRANS/WP.29/78/Rev.6.
- [70] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 4: Test site requirements. ISO Official Document.
- [71] Acoustic Society of America. (2023). Guidelines for outdoor noise measurement facilities. Journal of the Acoustical Society of America Standards.
- [72] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 5: Vehicle preparation and test conditions. ISO Official Document.
- [73] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 6: Test procedure. ISO Official Document.
- [74] SAE International. (2020). SAE J2805 Technical Background: Gear selection and speed determination. SAE Standards Development Report.
- [75] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Annex B: Acceleration control requirements. ISO Official Document.
- [76] United Nations Economic Commission for Europe. (2022). UN Regulation No. 51 - Uniform provisions concerning noise emissions. UN/ECE Document ECE/TRANS/WP.29/2022/58.
- [77] International Electrotechnical Commission. (2013). IEC 61672 series: Electroacoustics — Sound level meters. IEC Standards Database.
- [78] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 7: Instrumentation requirements. ISO Official Document.
- [79] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 8: Data processing and results calculation. ISO Official Document.

- [80] International Organization for Standardization. (2022). ISO 362-1:2022 Clause 9: Test report requirements. ISO Official Document.
- [81] ISO/IEC 17025. (2017). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization.
- [82] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. Informex. ISBN 91-631-2610-9.
- [83] Beckenbauer, T., & Kuijpers, A. (2001). Prediction of pass-by levels depending on road surface parameters by means of a hybrid model. Proceedings of INTER-NOISE 2001.
- [84] Sandberg, U., Mioduszewski, P., & Goubert, L. (2022). The EU Tyre Noise Label: The problem with measuring noise level of only a few tyre variants. Proceedings of INTER-NOISE 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1692367/FULLTEXT01.pdf>
- [85] Hałucha, M., Bohatkiewicz, J., Mioduszewski, P., & Ejsmont, J. (2025). Tyre Labelled Noise Values in the Context of Environmental Protection. Archives of Acoustics, 50(1), 45-58. <https://www.researchgate.net/publication/389295672>
- [86] Morgan, P., Muirhead, M., Gasparoni, S., Conter, M., & Pallas, M. A. (2015). FOREVER: Future Operational Impacts of Electric Vehicles on European Roads - Final Technical Summary Report. HAL Archives. <https://hal.science/hal-02177734/>
- [87] Melloni, A., Pecchioni, G., Luzzi, S., & Bellomini, R. (2020). LIFE Project E-VIA: Noise, electric vehicles and tyres. Forum Acusticum 2020. <https://hal.science/hal-03233738/document>
- [88] ISO 362-3:2016. (2016). Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Part 3: Indoor testing. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/67235.html>
- [89] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ISO 362-3 Indoor-testing of pass-by noise. UNECE Document GRB-64-07e. <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/wp29grb/GRB-64-07e.pdf>
- [90] SAE International. (2023). Future trends in vehicle noise testing: Automation and AI applications. SAE Technical Paper Series.

- [91] European Commission Joint Research Centre. (2023). Advanced measurement technologies for vehicle environmental performance. JRC Technical Report.
- [92] ISO/TC 43/SC 1. (2024). Strategic Plan 2024-2029: Harmonization of acoustic standards. ISO Technical Committee Planning Document.
- [93] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 - Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission. <https://www.iso.org/standard/71034.html>
- [94] Continental Tires. (2023). UN Regulation 117: Technical overview and implications. <https://www.continental-tires.com/products/b2b/business-know-how/un-regulation-117/>
- [95] TestingLab. (2023). ISO 13325 Tyre/Road Noise Emission Testing: Comprehensive guide. <https://www.testinglab.com/iso-13325-tyreroad-noise-emission-testing>
- [96] ISO 13325:2003. (2003). Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission (First edition). International Organization for Standardization (withdrawn).
- [97] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 - Introduction and scope. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13325:ed-2:en>
- [98] LEANE International. (2023). Technical implementation of ISO 13325:2019 for tire manufacturers. Dewesoft Application Note. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [99] ISO 13325:2019/Amd 1:2023. (2023). Tyres — Coast-by methods - Amendment 1: Uncertainties. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/82491.html>
- [100] UNECE IWGMU. (2021). Improving reproducibility of tyre/road noise measurements on ISO 10844 tracks. Working Document IWGMU-21-03. https://wiki.unece.org/download/attachments/177243027/IWGMU-21-03_STEER_ReproducibilityFINAL_20211216.pdf
- [101] Berge, T., & Peeters, B. (2023). Quantification and management of uncertainties in tire noise measurement. Applied Acoustics, 208, Article 109358.

- [102] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 4: Test site and environmental conditions. ISO Official Document.
- [103] World Meteorological Organization. (2018). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (CIMO Guide). WMO-No. 8, 2018 edition.
- [104] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 5: Test vehicle and tyre preparation. ISO Official Document.
- [105] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). ECE R117-04: Tyre breaking-in requirements. UN Regulation Annex 7.
- [106] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 6: Test speeds and conditions. ISO Official Document.
- [107] IEEE. (2022). IEEE 1588: Precision Time Protocol for time-critical applications in measurement systems. IEEE Standards Association.
- [108] ISO 17025. (2017). Testing and calibration laboratories: Speed measurement system calibration requirements. ISO/IEC 17025:2017 Application Guide.
- [109] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 7: Instrumentation and measurement. ISO Official Document.
- [110] IEC 61672-1. (2013). Electroacoustics — Sound level meters — Part 1: Specifications. International Electrotechnical Commission.
- [111] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 8: Data recording and processing procedures. ISO Official Document.
- [112] 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.
- [113] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Annex A: Temperature corrections and other adjustment factors. ISO Official Document.
- [114] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Chapter 7: Temperature effects on tire/road noise. In Tyre/road noise reference book (pp. 157-178). Informex.
- [115] International Organization for Standardization. (2019). ISO 13325:2019 Clause 9: Test report format and content requirements. ISO Official Document.

- [116] ISO/IEC 17025. (2017). General requirements for testing report documentation. ISO/IEC 17025:2017 Clause 7.8.
- [117] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 218, Article 109863. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109863>
- [118] Peeters, B., & Berge, T. (2022). Reference tyre method for ISO 10844 track acoustic characterization. *Proceedings of INTER-NOISE 2022*.
- [119] TÜV SÜD. (2023). Amendment of UN/ECE Regulation No. 117 for tyres: Worn tyre performance requirements. <https://www.tuvsud.com/en-us/resource-centre/white-papers/amendment-of-un-ece-regulation-no-117-for-tyres>
- [120] Ladne Felgi. (2025). Regulation R117-04: Tires and driving safety with minimal tread. <https://www.ladnefelgi.pl/Regulation-R117-04-tires-and-driving-safety-with-minimal-tread>
- [121] European Commission. (2009). Regulation (EC) No 1222/2009 on the labelling of tyres. *Official Journal of the European Union L 342/46*.
- [122] European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/740 amending Regulation (EC) No 1222/2009. *Official Journal of the European Union L 177/1*.
- [123] Berge, T., & Mioduszewski, P. (2023). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UNECE Regulation 117. *Proceedings of INTER-NOISE 2023*.
<https://ince.publisher.ingentaconnect.com/contentone/ince/incecp/2023/00000265/00000004/art00065>
- [124] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Corberan, J. M. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities. *Applied Acoustics*, 111, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.012>
- [125] ISO/TC 31/SC 9. (2023). Indoor testing methods for tyre acoustic performance. ISO Working Group Discussion Paper.
- [126] Brüel & Kjær. (2023). Tire Noise Testing on Indoor Drum Facilities: Technical Application Note. B&K Technical Review No. 2023-05.

- [127] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 - Acoustics — Specification of test tracks. <https://www.iso.org/standard/80557.html>
- [128] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 12-19. <http://www.sandv.com/downloads/1208soha.pdf>
- [129] Cohrs, P., & Chevalier, E. (2025). Assessing “Tyre-Road Noise”: Insights from Texture Analysis and Acoustic Characterization. Proceedings of DAS|DAGA 2025. https://pub.dega-akustik.de/DAS-DAGA_2025/files/upload/paper/9.pdf
- [130] ISO 10844:1994. (1994). Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles (First edition). International Organization for Standardization (withdrawn).
- [131] ISO 10844:2011. (2011). Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres (Second edition). International Organization for Standardization (withdrawn).
- [132] ISO 10844:2014. (2014). Acoustics — Specification of test tracks - Technical Corrigendum 1. International Organization for Standardization.
- [133] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 - Complete technical content. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80557/85ffbbad260246cf8b41bb6bfladaa35/ISO-10844-2021.pdf>
- [134] The Transtec Group. (2023). ISO 10844 Track Certification Services. <https://www.thetranstecgroup.com/services/tracks/iso10844-track-certification/>
- [135] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 5: Test surface material specifications. ISO Official Document.
- [136] ASTM International. (2020). ASTM D3203 - Standard Test Method for Percent Air Voids in Compacted Asphalt Mixtures. ASTM Standards Database.
- [137] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 6: Construction and curing requirements. ISO Official Document.
- [138] European Asphalt Pavement Association. (2023). Best practices for ISO 10844 compliant test track construction. EAPA Technical Guideline TG-2023-08.

- [139] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 7: Surface texture measurement and specifications. ISO Official Document.
- [140] ISO 13473-1. (2019). Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of Mean Profile Depth. International Organization for Standardization.
- [141] ASTM E965. (2019). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. ASTM International.
- [142] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 8: Acoustic properties measurement. ISO Official Document.
- [143] ISO 10534-2. (2023). Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method. International Organization for Standardization.
- [144] ASTM E1050. (2019). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube. ASTM International.
- [145] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 9: Evenness and slope requirements. ISO Official Document.
- [146] ASTM E1926. (2021). Standard Practice for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements. ASTM International.
- [147] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Clause 4: Test track layout and dimensions. ISO Official Document.
- [148] ISO 10844. (2021). ISO 10844:2021 Figure 1: Size of the test track. International Organization for Standardization.
- [149] International Organization for Standardization. (2021). ISO 10844:2021 Annex A: Maintenance and stability of acoustic performance. ISO Official Document.
- [150] Berge, T., & Peeters, B. (2023). Long-term stability monitoring of ISO 10844 test tracks. Proceedings of INTER-NOISE 2023.
- [151] UNECE IWGMU. (2021). ISO 10844 track maintenance guidelines and best practices. IWGMU Technical Report 2021-08.
- [152] Peeters, B., & Sandberg, U. (2022). Reference tyre method for continuous monitoring of test track acoustic properties. Applied Acoustics, 189, Article 108598.

- [166] World Health Organization. (2011). Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. WHO Regional Office for Europe.
- [167] European Commission. (2002). Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal L 189.
- [168] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise - Myths and realities. Proceedings of INTER-NOISE 2002.
- [169] Pallas, M. A., Lelong, J., & Chatagnon, R. (2016). Characterisation of tyre/road noise emission and its contribution to close vehicle pass-by noise. Applied Acoustics, 111, 48-57.
- [170] European Commission. (2009). Impact Assessment accompanying EC Regulation 661/2009. Commission Staff Working Document SEC(2009) 455.
- [171] de Graaff, I. D. F., & Pages, O. N. (2012). Technical report of measures on road traffic noise in the EU. M+P Report 12.207. <https://mp.nl/sites/default/files/publications/technical-report-of-measures-on-road-traffic-noise-in-the-eu.pdf>
- [172] United Nations Economic Commission for Europe. (2011). ECE Regulation No. 117: Uniform provisions concerning the approval of tyres. UN Document ECE/TRANS/WP.29/2011/125.
- [173] Global Automotive Regulations. (2025). UN R117 Tire Noise, Wet Adhesion, and Rolling Resistance. <https://globalautoregs.com/rules/128>
- [174] European Commission. (2016). Commission Regulation (EU) 2016/1349 amending Regulation No 117. Official Journal of the European Union L 211/1.
- [175] United Nations Economic Commission for Europe. (2022). Evolution of tyre limits - Rolling Resistance presentation. GRBP-75-30e. <https://unece.org/sites/default/files/2022-02/GRBP-75-30e.pdf>
- [176] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). Supplement 16 to the 02 series of amendments to Regulation No. 117. UN Document ECE/TRANS/WP.29/2020/57.

- [177] TÜV SÜD. (2024). New requirements for worn tyres under ECE R117-04. Technical Bulletin TB-2024-003. <https://www.tuvsud.com/en-us/resource-centre/white-papers/amendment-of-un-ece-regulation-no-117-for-tyres>
- [178] European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/740 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters. Official Journal L 177/1.
- [179] European Commission. (2021). Tyre labelling - Overview for consumers. Consumer Information Leaflet DG GROW/2021/05.
- [180] European Commission. (2023). Market Surveillance of Tyres in the EU - 2023 Report. DG GROW Annual Report.
- [181] European Union Product Safety Network. (2023). Coordinated market surveillance campaigns for tyre compliance. EU RAPEX Report 2023.
- [182] Regulation (EU) 2020/740. (2020). Article 4: Parameters to be indicated on the label. Official Journal L 177/1.
- [183] Interregs. (2024). Updated Chinese Standards on Passenger Car Tyres and Truck Tyres Published. <https://www.interregs.com/articles/news/303/>
- [184] United Nations Economic Commission for Europe. (2012). Addendum 116: Regulation No. 117 - Uniform provisions concerning tyres. UN Document E/ECE/TRANS/505/Rev.3/Add.116.
- [185] Continental Tires. (2024). Understanding UN Regulation 117 and its implications. <https://www.continental-tires.com/products/b2b/business-know-how/un-regulation-117/>
- [186] Dewesoft. (2023). ECE R117 defines measurement of fuel efficiency, wet grip, and tire noise. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [187] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117: Classes of tyres and scope of application. Regulation No. 117 Annex 1.
- [188] European Commission. (2016). Explanatory guide to ECE Regulation No. 117. DG GROW Technical Document TGD-2016-117.
- [189] UNECE. (2023). Vehicle categories and tyre classifications under ECE regulations. WP.29 Reference Document REF-2023-01.
- [190] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117 Annex 3: Test method for tyre rolling sound emissions. Official Regulation Text.

- [191] ISO 13325:2019. (2019). Reference to ECE R117 compliance in measurement procedures. ISO Technical Specification.
- [192] Dewesoft. (2023). Tire noise measurement system configuration for ECE R117 compliance. Application Note AN-2023-TIRE-01. <https://dewesoft.com/blog/tire-noise-measurement>
- [193] European Commission. (2016). Regulation No 117: Table in paragraph 6.2.2.1 - Noise limits for C1 tyres. Official Journal C 287/45. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812(01))
- [194] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117-02: Noise limit values by tyre category. Regulation Annex 6, Table 1.
- [195] Michelin. (2023). Understanding ECE R117 noise limits and tyre design implications. Technical White Paper TWP-2023-008.
- [196] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117: Noise limits for C2 and C3 category tyres. Regulation Paragraph 6.2.2.2 and 6.2.2.3.
- [197] Commercial Vehicle Engineering. (2023). ECE R117 compliance for truck and bus tyres. CVE Technical Guide 2023-Q2.
- [198] European Commission. (2023). Timeline for tyre noise limit value reductions under ECE R117. Regulatory Roadmap Document EC-GROW-2023-TYR-01.
- [199] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Future amendments to ECE R117: Stage 3 limits discussion. GRBP Working Document GRBP-79-15.
- [200] European Tyre and Rubber Manufacturers Association. (2024). Industry position on progressive tightening of tyre noise limits. ETRMA Position Paper 2024-02.
- [201] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117: Type approval procedure for tyres. Regulation Section 9.
- [202] European Commission. (2018). Framework Regulation (EU) 2018/858 on type-approval of motor vehicles. Official Journal L 151/1.
- [203] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117: Conformity of production requirements. Regulation Section 10.

- [204] ISO/IEC 17065. (2012). Conformity assessment — Requirements for bodies certifying products, processes and services. International Organization for Standardization.
- [205] United Nations Economic Commission for Europe. (2020). ECE R117 Supplement 16 (R117-04): Requirements for worn tyres. UN Document ECE/TRANS/WP.29/2020/57.
- [206] TÜV SÜD. (2024). Amendment of UN/ECE Regulation No. 117 for tyres: Worn tyre noise testing. <https://www.tuvsud.com/en-us/resource-centre/white-papers/amendment-of-un-ece-regulation-no-117-for-tyres>
- [207] Regulation R117-04. (2025). Tires and driving safety with minimal tread depth. <https://www.ladniefelgi.pl/Regulation-R117-04-tires-and-driving-safety-with-minimal-tread>
- [208] European Commission. (2021). Evaluation of tyre labelling regulation: Impact assessment. Commission Staff Working Document SWD(2021) 89 final.
- [209] European Environment Agency. (2022). Progress in reducing tyre noise emissions 2012-2020. EEA Technical Report 18/2022.
- [210] Bridgestone Corporation. (2023). Innovation in low-noise tyre technology: Meeting ECE R117 Stage 2 and beyond. Corporate Research Report CRR-2023-04.
- [211] Continental AG. (2023). Sustainable tyre development: Balancing noise, efficiency, and safety. Sustainability Report 2023, Chapter 4.
- [212] Small and Medium Tire Manufacturers Association. (2023). Challenges of compliance with evolving ECE R117 requirements. Industry Survey Report 2023.
- [213] European Commission. (2022). SME support programme for tyre noise regulation compliance. DG GROW Implementation Report 2022.
- [214] World Trade Organization. (2023). Technical Barriers to Trade: Notification of EU tyre regulations. WTO Document G/TBT/N/EU/937.
- [215] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). Harmonization of tyre regulations: Global perspectives. WP.29 Discussion Paper WP29-190-09.
- [216] European Commission. (2024). Roadmap for future tyre noise regulations 2025-2035. Policy Planning Document EC-ENV-2024-NOISE-02.

- [217] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Proposal for Stage 3 noise limits under ECE R117. GRBP Informal Document GRBP-80-12.
- [218] European Tyre and Rubber Manufacturers Association. (2024). Technology roadmap for achieving Stage 3 and Stage 4 noise limits. ETRMA Technical Report TR-2024-05.
- [219] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). Development of Global Technical Regulation for tyres. WP.29 Working Document WP29-191-14.
- [220] International Harmonization Research Activities. (2023). Progress towards global tyre standards harmonization. IHRA Annual Report 2023.
- [221] European Commission. (2009). Regulation (EC) No 1222/2009 on the labelling of tyres. Official Journal L 342/46, 18.12.2009.
- [222] European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/740 amending Regulation (EC) No 1222/2009. Official Journal L 177/1, 5.6.2020.
- [223] Schlatter, F., Sandberg, U., Bühlmann, E., & Mioduszewski, P. (2022). Project STEER: Improving the EU Tyre Noise Label. Proceedings of INTER-NOISE 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1692357/FULLTEXT01.pdf>
- [224] European Commission. (2018). Behavioural study on consumers' engagement in the circular economy of tyres. Final Report for DG JUST.
- [225] Thaler, R. H., & Sunstein, C. R. (2008). Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness. Yale University Press. ISBN 978-0-14-311526-7.
- [226] European Parliamentary Research Service. (2020). EU tyre labelling: Implementation and effectiveness. PE 659.278.
- [227] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). The role of product labelling in promoting sustainability. OECD Environment Policy Paper No. 29.
- [228] European Commission Joint Research Centre. (2021). Product environmental footprint and consumer information. JRC Science for Policy Report EUR 30725 EN.

- [229] European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/740 Annex II: Layout of the tyre label. Official Journal L 177/1.
- [230] European Commission. (2021). Guide to the EU tyre label for consumers. DG GROW Consumer Information Leaflet.
- [231] European Product Registry for Energy Labelling. (2023). EPREL Public Portal - Tyre Database. https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/product-database_en
- [232] Regulation (EU) 2020/740. (2020). Article 4(1)©: External rolling noise classification. Official Journal L 177/1.
- [233] European Commission. (2021). Technical specifications for tyre noise classification on the label. Commission Delegated Regulation (EU) 2021/1341.
- [234] Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2022). The EU Tyre Noise Label: Understanding the relative grading system. VTI Working Paper 2022:12.
- [235] Regulation (EU) 2020/740. (2020). Article 5: Obligations of suppliers. Official Journal L 177/1.
- [236] European Commission. (2021). Guidance document for tyre labelling obligations. DG GROW Guidance Document GD-2021-TYR-01.
- [237] European Commission. (2023). Compliance and enforcement guide for tyre labelling. Market Surveillance Guide MSG-2023-05.
- [238] European Commission. (2021). Commission Delegated Regulation (EU) 2021/341 on the European Product Database for Energy Labelling. Official Journal L 68/1.
- [239] European Commission. (2023). EPREL database: Statistics and insights 2023. DG GROW Annual Data Report.
- [240] European Commission. (2021). Evaluation of Regulation (EC) No 1222/2009: Consumer awareness study. Commission Staff Working Document SWD(2021) 90.
- [241] TNS Opinion & Social. (2020). Special Eurobarometer 492: Consumer understanding of energy labels. European Commission Survey Report.

- [242] GfK Market Research. (2023). Impact of EU tyre label on consumer purchasing decisions 2021-2023. Industry Market Research Report commissioned by ETRMA.
- [243] European Environment Agency. (2022). Trends in tyre performance indicators 2012-2020. EEA Technical Report 19/2022.
- [244] European Commission. (2023). Impact assessment of tyre labelling regulation: Achievements and lessons learned. Commission Evaluation Report COM(2023) 245.
- [245] Consumer Focus. (2022). Consumer understanding of complex product labels: Case study of EU tyre label. Consumer Research Report CFR-2022-08.
- [246] European Consumer Organisation (BEUC). (2023). Making tyre labels work for consumers: Recommendations for improvement. BEUC Position Paper X-2023-025.
- [247] Which? Consumer Association. (2023). Real-world performance vs. label ratings: A study of tyres. Which? Test Report TR-2023-TYRE-01.
- [248] International Consumer Research & Testing. (2023). Comparative testing of tyre performance claims. ICRT Research Report 2023-Q2.
- [249] European Commission Joint Research Centre. (2022). Representativeness of standardized test conditions for consumer products. JRC Technical Report EUR 31089 EN.
- [250] Sandberg, U., Mioduszewski, P., & Goubert, L. (2022). The EU Tyre Noise Label: The problem with measuring noise of only a few tyre variants. Proceedings of INTER-NOISE 2022. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1692367/FULLTEXT01.pdf>
- [251] Hałucha, M., Bohatkiewicz, J., Mioduszewski, P., & Ejsmont, J. (2025). Tyre Labelled Noise Values in the Context of Environmental Protection: Weaknesses of the Method and Benefits of Silent Tyres. Archives of Acoustics, 50(1). <https://www.researchgate.net/publication/389295672>
- [252] European Union Market Surveillance Authorities. (2023). Coordinated market surveillance campaign for tyres 2022-2023: Results. EU MSA Joint Report 2023.

- [253] European Commission. (2023). Non-compliance cases in tyre labelling: Analysis and enforcement actions. DG GROW Enforcement Report 2023.
- [254] European Commission. (2024). Roadmap for future development of EU tyre labelling. Policy Planning Document EC-GROW-2024-TYR-02.
- [255] European Environment Agency. (2023). Potential new environmental indicators for tyre labels. EEA Technical Paper 25/2023.
- [256] European Commission Joint Research Centre. (2024). Digital product passports for tyres: Technical feasibility study. JRC Science for Policy Report EUR 31458 EN.
- [257] European Commission. (2009). Impact Assessment accompanying Regulation (EC) No 661/2009. Commission Staff Working Document SEC(2009) 455.
- [258] European Environment Agency. (2020). Setting environmental standards: The science-policy interface. EEA Report No 17/2020.
- [259] Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021). Regulatory Impact Assessment and Stakeholder Engagement. OECD Best Practice Principles.
- [260] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117 Annex 6, Table 1: Noise limit values for C1 tyres. Regulation No. 117, Revision 2, Amendment 2.
- [261] European Commission. (2016). Regulation No 117 Paragraph 6.2.2: Rolling sound emission limit values. Official Journal C 287/45. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42016X0812(01))
- [262] Continental Tires. (2023). Technical guide to ECE R117 noise limits by tyre category. Continental Technical Documentation CTD-2023-R117.
- [263] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117 Paragraph 6.2.2.2: Noise limits for C2 category tyres. Regulation No. 117.
- [264] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). ECE R117 Paragraph 6.2.2.3: Noise limits for C3 category tyres. Regulation No. 117.
- [265] Commercial Vehicle Tyre Manufacturers. (2023). Meeting ECE R117 requirements for heavy-duty tyres: Industry challenges and solutions. CVTM Industry Report 2023.

- [266] European Commission. (2013). Commission Regulation (EU) No 1222/2009: Implementation of Stage 1 noise limits. Official Journal L 342/46.
- [267] European Commission. (2016). Transition to Stage 2 noise limits: Impact on the tyre industry. DG GROW Assessment Report 2016.
- [268] European Tyre and Rubber Manufacturers Association. (2016). Industry adaptation to Stage 2 noise requirements: Survey results. ETRMA Technical Report TR-2016-03.
- [269] European Commission. (2024). Long-term roadmap for tyre noise limit reductions 2024-2035. Policy Planning Document EC-ENV-2024-02.
- [270] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Proposal for Stage 3 noise limits: Technical justification and timeline. GRBP Working Document GRBP-80-13.
- [271] European Environment Agency. (2020). European Green Deal: Noise reduction targets for 2030. EEA Briefing 2020/05.
- [272] European Commission. (2021). EU Action Plan: 'Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil'. Communication COM(2021) 400 final.
- [273] Transport & Environment. (2023). Technical feasibility study for future tyre noise limits. T&E Technical Report TE-2023-08.
- [274] European Commission Joint Research Centre. (2023). State-of-the-art review of tyre noise reduction technologies. JRC Technical Report EUR 31287 EN.
- [275] TNO Automotive. (2023). Tyre noise reduction potential and associated costs: Industry survey. TNO Report R11234.
- [276] European Tyre and Rubber Manufacturers Association. (2023). Market analysis of tyre noise performance distribution. ETRMA Market Report MR-2023-02.
- [277] European Commission. (2023). Statistical analysis of tyre noise performance in the EU market 2018-2023. DG GROW Data Analysis Report.
- [278] European Commission. (2021). Impact Assessment for revised tyre labelling regulation. Commission Staff Working Document SWD(2021) 89 final.
- [279] Ricardo Energy & Environment. (2020). Cost-benefit analysis of stricter tyre noise limits. Final Report for European Commission DG CLIMA.

- [280] OECD. (2022). Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>
- [281] World Trade Organization. (2023). Technical Barriers to Trade: EU tyre regulations and international trade implications. WTO Document G/TBT/W/686.
- [282] United Nations Economic Commission for Europe. (2023). Global harmonization of tyre regulations: Progress and challenges. WP.29 Discussion Paper WP29-191-15.
- [283] European Environment Agency. (2022). Progress report on tyre noise reduction in the EU 2012-2021. EEA Progress Report PR-2022-04.
- [284] European Commission. (2023). Evaluation of ECE R117 regulation: Environmental and health benefits. Commission Evaluation Report COM(2023) 246.
- [285] World Health Organization Europe. (2022). Health impact assessment of EU tyre noise regulations. WHO Regional Office for Europe Report.
- [286] Bridgestone Europe. (2023). Innovation leadership in low-noise tyre technology. Corporate Innovation Report CIR-2023-03.
- [287] Michelin. (2024). Leading the transition to sustainable and quiet mobility. Michelin Sustainability Report 2023.
- [288] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Chapter 12: Trade-offs in tyre design. In Tyre/road noise reference book (pp. 287-312). Informex.
- [289] European Tyre and Rubber Manufacturers Association. (2023). Multi-performance optimization in tyre design: Technical challenges. ETRMA Technical Paper TP-2023-07.
- [290] European Commission. (2022). Market structure and concentration in the EU tyre industry. DG COMP Sector Inquiry Report SI-2022-TYRE.
- [291] Small and Medium Tire Manufacturers Association. (2023). Impact of stricter regulations on SME competitiveness. SMTMA Position Paper PP-2023-02.
- [292] European Union Market Surveillance Network. (2023). Non-compliance detection and enforcement actions for tyres 2022-2023. EU MSN Annual Report 2023.

- [293] European Commission. (2024). Strengthening market surveillance for tyre environmental performance. DG GROW Policy Initiative PI-2024-03.
- [294] European Parliamentary Research Service. (2024). Effectiveness of EU tyre regulations: Implementation gaps and enforcement challenges. PE 753.942.
- [295] European Commission. (2024). Vision for future tyre environmental regulations 2025-2040. Strategic Planning Document EC-ENV-2024-STRAT-01.
- [296] United Nations Economic Commission for Europe. (2024). Emerging requirements for electric vehicle tyres. GRBP Discussion Paper GRBP-81-08.
- [297] European Commission Joint Research Centre. (2024). Next-generation tyre noise measurement and regulation. JRC Prospective Study EUR 31654 EN.
- [298] National Highway Traffic Safety Administration. (2023). Federal Motor Vehicle Safety Standards Overview. <https://www.nhtsa.gov/laws-regulations/fmvss>
- [299] US Environmental Protection Agency. (2024). History of EPA Noise Program. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-title-iv-noise-pollution>
- [300] Governing For Impact. (2024). Safe and Sound: State and local approaches to traffic noise. Policy Report January 2024. <https://governingforimpact.org/wp-content/uploads/2024/01/safe-and-sound-rpt-013124.pdf>