

第三章 輪胎磨擦噪音 Tire Friction Noise

摘要 (Abstract)

當車輛行駛速度超過中低速範圍後，輪胎與路面之間所產生的磨擦噪音即成為道路交通噪音的主要來源，其聲學特性直接主導車外環境噪音與車內行駛舒適性。輪胎磨擦噪音並非單一物理機制所致，而是源自輪胎胎面橡膠之黏彈性行為、輪胎與路面接觸力學、滑移與黏著交替現象，以及輪胎結構振動與聲學輻射之多重耦合結果。

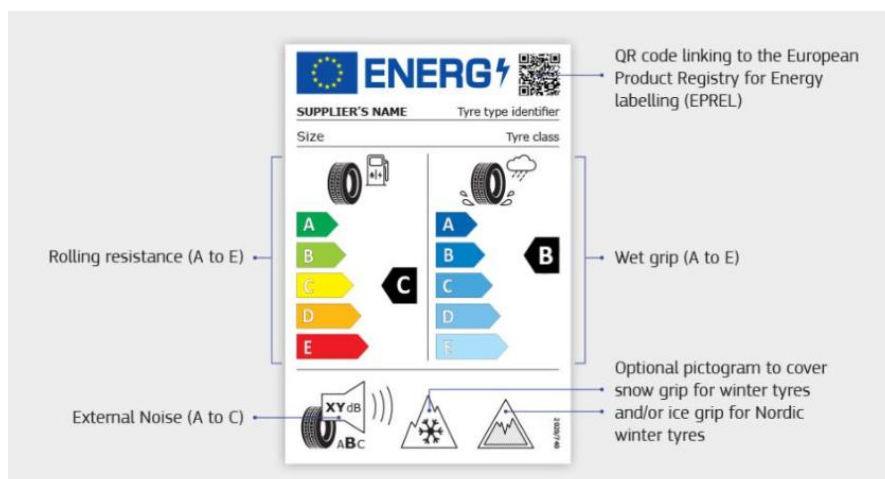


本章系統性地闡述輪胎磨擦噪音的基本理論基礎，並從多尺度角度深入分析輪胎-路面接觸區域內的力學與聲學行為。研究顯示，橡膠磨擦行為可由黏著理論與遲滯理論共同描述，其中遲滯機制在實際瀝青與混凝土路面條件下通常佔據主導地位。輪胎胎面在滾動過程中所經歷的週期性壓縮、剪切與釋放，會在接觸區內激發彈性波與局部振動模態，部分能量以聲波形式向外輻射，形成寬頻磨擦噪音。進一步分析指出，磨擦噪音的頻譜特性與接觸壓力分佈、接觸剛度、路面多尺度紋理以及輪胎滑移狀態密切相關。

中低頻噪音主要來自胎面花紋與路面宏觀紋理所引發的衝擊激勵，而高頻噪音則與黏滑振盪、黏斷現象及橡膠黏彈性耗散行為密切相關。藉由有限元素法、邊界元素法與動態接觸模型的整合，本章建立了一個能夠連結微觀磨擦機制與宏觀噪音輻射的理論架構，為低噪音輪胎設計與道路噪音控制提供科學依據。

輪胎磨擦噪音作為輪胎與路面交互作用所產生的聲學現象,在車輛噪音研究領域佔據著極為關鍵的地位。當車輛行駛速度超過 50-55 公里每小時後,輪胎與路面的接觸噪音便成為道路交通噪音的主導來源,其重要性遠超過動力系統噪音[1][2]。這種噪音不僅對車輛乘員與沿線居民造成聽覺負擔,更在城市噪音污染管控與環境品質提升方面構成重大挑戰。本章將系統性地探討輪胎磨擦噪音的基本理論、接觸特性、力學關係、路面條件影響以及速度效應,為深入理解此複雜聲學現象提供全面的理論基礎。輪胎磨擦噪音的生成機制涉及多重物理過程的耦合作用,包括輪胎胎面與路面之間的動態接觸、橡膠材料的黏彈性行為、滑移與黏著交替現象、空氣泵送效應以及輪胎結構的振動響應等。這些機制在不同頻率範圍內以不同方式主導著噪音的產生與傳播。研究顯示,中低頻段噪音(500-1,000 Hz)主要由胎面與路面紋理的衝擊激勵所引發,而高頻段噪音(1,000 Hz 以上)則更多地與磨擦機制和空氣動力效應相關[3][4]。了解這些機制之間的相互作用與頻率依賴性,對於開發低噪音輪胎與路面系統具有重要的指導意義。

從工程經驗角度而言,輪胎磨擦噪音的控制需要在多個因素上進行權衡。輪胎設計者必須在噪音性能、抓地力、滾動阻力以及耐久性之間尋求最佳平衡點。早期研究曾質疑是否存在噪音與抓地力之間的本質衝突,但後續的大規模實驗研究表明,透過優化胎面設計與材料配方,可以在不顯著犧牲安全性能的前提下實現噪音降低[5]。這一發現為輪胎工業的技術創新提供了重要方向,也促進了國際標準組織制定更嚴格的輪胎噪音限值法規,如歐盟輪胎標籤法規(正式名稱為「歐盟輪胎標籤規範 (EU Tyre Labelling Regulation)」,是歐盟針對市售輪胎強制揭露性能資訊的重要制度,目的在於提升道路安全、降低交通噪音並促進節能減碳,同時讓消費者在選購輪胎時能做出透明且可比較的選擇。)與聯合國 UNECE R117 法規等。



路面工程在輪胎噪音控制中同樣扮演著不可或缺的角色。路面紋理的尺度特性,從微觀紋理(小於 0.5 毫米)到宏觀紋理(0.5-50 毫米)再到超大紋理(大於 50 毫米),對不同頻率範圍的噪音生成具有差異化影響[6][7]。多孔隙瀝青路面透過其開放式孔隙結構能夠有效衰減空氣泵送噪音,在實際應用中可實現 7-10 分貝的噪音降低效果[8]。然而,這類路面的長期性能保持、堵塞問題以及冬季除冰困難等挑戰,使得路面噪音控制技術的研發仍需持續推進。

國際標準化組織(ISO)已發展出一系列針對輪胎與路面噪音測量的標準方法。ISO 11819 系列標準規範了統計透過法(Statistical Pass-By, SPB)與近接法(Close-Proximity, CPX)的測量程序,確保不同研究機構與製造商之間數據的可比性[9][10]。ISO 13325 標準則專門針對輪胎滑行噪音測量,為輪胎型式認證提供標準化測試方法[11]。ISO 10844 標準更是詳細規定了標準測試路面的表面特性要求,包括紋理深度、平整度以及聲學吸收係數等技術指標[12]。這些標準的建立與不斷完善,為全球範圍內的輪胎噪音研究與管控提供了統一的技術語言與評估體系。當前輪胎磨擦噪音研究呈現出多學科交叉融合的趨勢,結合了聲學、振動力學、材料科學、路面工程以及計算模擬等多個領域的理論與方法。先進的有限元素法(FEM)與邊界元素法(BEM)能夠對輪胎與路面的接觸力學行為進行高精度數值模擬,揭示接觸區域內的應力分佈、變形模式以及動態響應特性[13][14]。多體動力學模擬技術則可以捕捉輪胎在複雜行駛工況下的瞬態行為,包括加速、制動、轉向等動態過程中的磨擦噪音特性[15]。機器學習與人工智慧技術的引入,更為基於大數據的噪音預測模型開發與智能化噪音控制系統設計開闢了新途徑。

3.1 磨擦噪音基本理論 (Basic Theory of Friction Noise)

輪胎磨擦噪音的基本理論建立在固體力學、聲學以及摩擦學的交叉基礎之上,涉及橡膠與剛性表面之間複雜的接觸力學行為、能量耗散機制以及聲波傳播過程。從根本上講,磨擦噪音源於兩個固體表面相對運動時,在接觸界面處發生的一系列動態事件,這些事件將機



械能轉換為聲能並向周圍空間輻射。輪胎作為一個高度複雜的黏彈性結構,其與路面的接觸過程涉及多尺度、多物理場的耦合現象,使得磨擦噪音的理論描述極具挑戰性[16][17]。換句話說,輪胎磨擦噪音的產生,來自於輪胎在行駛過程中與路面之間持續接觸與相對運動所引發的物理現象。當車輛前進時,輪胎表面的橡膠會受到車重壓迫而產生變形,並在與堅硬路面接觸的區域內不斷被壓縮與回復。

此一反覆變形的過程，會使輪胎結構產生微小但快速的振動。在接觸區域中，輪胎與路面之間並非完全平滑滑動，而是同時存在黏著與滑移的交替狀態。這種不斷「抓住又放開」的接觸行為，會在輪胎內部產生力的變化，並使部分機械能轉換為熱能與振動能。當這些振動傳遞至周圍空氣時，便形成可被人耳感知的聲波，亦即所謂的輪胎磨擦噪音。由於輪胎本身是一種具有彈性與黏滯特性的複合材料，其行為會隨速度、載重、路面粗糙程度及輪胎結構設計而改變，使得接觸區域內的振動與聲音產生機制相當複雜。此外，輪胎與路面的接觸並非單一尺度的現象，而是同時涉及輪胎整體變形與局部微觀接觸的多層次互動，因此在理論描述與預測上具有相當的挑戰性。

整體而言，輪胎磨擦噪音可視為一個由結構變形、摩擦作用與聲波傳播共同構成的物理過程，其本質是機械能在輪胎與路面接觸過程中轉換為聲能，並向周圍環境傳播的結果。所以，**輪胎磨擦噪音其實就是：**

輪胎在動 → 輪胎在抖 → 胎紋內空氣被推 → 聲音跑出來。

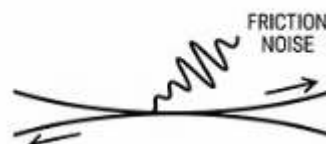
一、黏著理論與遲滯理論(橡膠磨擦)

磨擦的經典理論最早可追溯至 Leonardo da Vinci 與 Guillaume Amontons 的研究，他們提出了磨擦力與法向荷重成正比的基本規律(所謂法向荷重，指的是物體受到另一物體垂直方向所施加的壓力；而磨擦力，則是阻礙物體在接觸面上相對滑動的力)。然而，這種宏觀理論無法充分解釋橡膠材料與粗糙表面之間的磨擦行為。橡膠磨擦的現代理論由 Grosch、Schallamach 與 Persson 等學者逐步建立，強調了橡膠的黏彈性特性在磨擦過程中的核心作用[18][19]。當橡膠表面滑過粗糙基底時，表面突起對橡膠產生週期性的變形，這種變形在橡膠內部引發應力波的傳播。由於橡膠材料具有顯著的黏滯性，應力波在傳播過程中會發生能量耗散，這種耗散以熱的形式表現出來，同時也產生聲學輻射。Persson 的多尺度接觸力學理論進一步揭示，磨擦力的產生與橡膠在不同波長尺度下對表面粗糙度的響應密切相關，從奈米級到毫米級的粗糙度特徵都對宏觀磨擦係數有所貢獻[20]。

黏著理論(Adhesion Theory)與遲滯理論(Hysteresis

Theory)是解釋橡膠磨擦的兩大主要機制。黏著理論認為，橡膠與路面之間在分子尺度上形成短暫的黏合鍵，當橡膠元素被拉離表面時，這些鍵的斷裂需要

消耗能量，從而產生磨擦力。這種機制在平滑表面上尤為重要，且對溫度與滑移速度高度敏感。遲滯理論則關注橡膠在受到路面粗糙度引起的週期性變形時，由於



材料的黏彈性而產生的能量損失。當橡膠元素爬升過表面突起時吸收能量,而在下降階段釋放的能量較少,這種不對稱性導致淨能量耗散,表現為磨擦阻力。對於輪胎與瀝青或混凝土路面的接觸,遲滯機制通常佔據主導地位,特別是在中高速行駛條件下[21][22]。

換句話說,橡膠材料所具有的黏彈性特性,在磨擦行為中扮演關鍵角色。與剛性材料不同,橡膠在受力與滑動過程中會同時展現彈性變形與黏滯耗能行為,使其磨擦機制呈現高度非線性與多尺度特性。當橡膠表面滑動於具有粗糙結構的基底時,路面表面的微觀突起會使橡膠產生反覆的局部變形。這些變形會在橡膠內部引發應力傳遞與波動,而由於橡膠具有顯著的黏滯性,部分機械能在此過程中無法完全回復,而轉換為熱能並伴隨振動與聲學輻射。此一能量耗散機制,是橡膠磨擦力與磨擦噪音產生的重要物理來源。在解釋橡膠磨擦機制時,文獻中通常將其歸納為黏著理論(Adhesion Theory)與遲滯理論(Hysteresis Theory)兩大類。黏著理論認為,橡膠與接觸表面之間在分子尺度上會形成短暫的黏合區域,當橡膠因滑動而被拉離接觸面時,黏合鍵的斷裂需要消耗能量,進而表現為磨擦阻力。此機制在表面較為平滑的情況下較為顯著,且對溫度與滑移速度相當敏感。相較之下,遲滯理論著重於橡膠在粗糙表面作用下所產生的週期性變形行為。由於橡膠材料具有黏彈性,其在爬升與通過路面突起的過程中,吸收與釋放能量並不對稱,導致部分能量以熱與振動的形式耗散,形成宏觀可觀測的磨擦力。對於輪胎與瀝青或混凝土路面之接觸情境,遲滯磨擦機制通常為主要影響因素,特別是在中高速行駛條件下,其貢獻更為明顯。

磨擦過程中的能量轉換與耗散是噪音生成的關鍵環節。當輪胎在路面上滾動時,胎面橡膠元素經歷連續的壓縮、剪切與釋放循環。在接觸區的前緣,橡膠元素首先被壓縮並向前推進,逐漸建立起與路面的接觸;在接觸區中心,橡膠處於相對穩定的接觸狀態;而在接觸區的後緣,橡膠元素經歷快速的釋放過程,脫離路面表面。這種週期性的接觸與釋放過程在橡膠內部及輪胎結構中激發出彈性波與振動模態。根據能量守恆原理,輸入到系統中的機械能一部分以熱的形式耗散,一部分以彈性波的形式在輪胎結構中傳播,還有一部分則以聲波的形式向周圍空氣中輻射。聲學輻射效率取決於振動表面的尺寸、振動頻率以及輻射阻抗匹配程度[23][24]。

二、黏滑現象

黏滑現象 (Stick-Slip Phenomenon) 是磨擦噪音產生的重要機制之一,特別與高頻噪音的生成密切相關。所謂黏滑,指的是兩個接觸表面之間的相對運動並非連

續平順的滑動，而是呈現「先黏住、再突然滑動」的交替狀態。這種不連續的運動方式，會在接觸系統中引發快速振動，進而產生聲音。以輪胎與路面接觸為例，當胎面橡膠元素進入接觸區時，在車重所造成的法向壓力作用下，橡膠元素最初會與路面保持黏著狀態，並隨輪胎一起向前運動。此時，接觸界面主要由靜摩擦力支撐。然而，隨著輪胎持續滾動，橡膠內部會逐漸累積切向應力；當此應力超過靜摩擦力所能承受的臨界值時，橡膠元素便會突然發生快速滑移，釋放先前儲存的彈性能。滑移發生後，橡膠元素又會再次與路面黏著，進入下一個黏滑循環。這種週期性的黏滑振盪可在極短時間內重複發生，其頻率範圍可達數百赫茲至數千赫茲，正好落在人耳對高頻噪音敏感的區間，因此成為輪胎高頻磨擦噪音的重要來源[25][26]。

黏滑噪音的頻譜特性受到多項因素影響。首先，黏滑振盪的頻率與接觸系統的動力特性密切相關，包括橡膠局部元素的剛度、質量及阻尼等參數。其次，磨擦係數隨滑移速度變化的特性，對黏滑現象是否發生具有關鍵影響。當磨擦係數隨滑移速度增加而降低時，系統呈現所謂的「負斜率特性」，此時黏滑振盪較容易產生；相反地，若磨擦係數隨速度增加而上升，則有助於穩定接觸狀態並抑制黏滑行為。橡膠材料的黏彈性在此過程中扮演關鍵角色。在低滑移速度下，橡膠表現出較高的磨擦係數，使黏著狀態得以維持；而在較高滑移速度下，由於黏彈性效應導致有效接觸面積減少，磨擦係數隨之下降，為黏滑振盪的發生提供了必要的動態條件[27]。

橡膠材料的黏彈性在這裡發揮了關鍵作用：在低滑移速度下，橡膠表現出較高的磨擦係數；而在高滑移速度下，由於黏彈性效應，有效接觸面積減小，磨擦係數相應降低。這種速度依賴性的磨擦特性為黏滑振盪提供了必要的動態條件[28][29]。

三、黏斷現象

除了黏滑機制之外，黏斷現象（Stick-Snap Mechanism）亦是磨擦噪音的重要來源之一。黏斷現象主要發生於接觸區後緣，指的是胎面橡膠元素與路面之間的快速脫離過程。當橡膠元素即將離開接觸區時，可能因表面黏附作用或局部真空效應而受到額外的吸附力，使其短暫「被拉住」。

當這股吸附力突然被克服時，橡膠元素會如同被彈開一般，產生瞬態的高頻振動，並向周圍空氣輻射聲波。



此一黏斷機制在潮濕路面條件下尤為顯著，因為水膜所造成的表面張力效應會進一步增強橡膠與路面之間的黏附作用。由黏斷所產生的聲學脈衝通常具有寬頻譜特性，其能量多集中於 1,000 Hz 以上的頻段，對整體輪胎磨擦噪音的尖銳感與刺耳感具有顯著影響[30][31]。

四、衝擊激勵機制

衝擊激勵機制(Impact Excitation Mechanism)則著重於胎面花紋塊與路面紋理之間的突然接觸所產生的瞬態衝擊力。當輪胎滾動時，胎面花紋塊以一定的速度衝擊路面粗糙突起，產生脈衝狀的接觸力。這種衝擊力的幅值與衝擊速度、接觸剛度以及路面粗糙度密切相關。衝擊激勵在輪胎結構中激發出多種振動模態，包括徑向振動、周向振動以及側向振動等。這些振動模態透過輪胎側壁與胎面向空氣輻射聲波，形成中低頻段的噪音成分。研究表明，路面宏觀紋理(波長約 10-50 毫米)是衝擊激勵的主要來源，其特徵頻率範圍約為 600-1000 Hz(在時速 30 公里條件下)[32][33]。

輪胎結構的振動特性對磨擦噪音的頻譜與幅值有著決定性影響。輪胎作為一個旋轉的彈性殼體結構，具有複雜的模態特性。根據殼體振動理論，輪胎的固有頻率與模態形狀取決於其幾何參數(半徑、寬度、側壁高度)、材料特性(橡膠模量、鋼絲帶剛度、簾布層特性)以及邊界條件(輪輞約束、充氣壓力)。輪胎的主要振動模態可分為幾類:徑向模態(振動方向垂直於胎面)、周向模態(振動沿輪胎圓周方向)、側向模態(振動平行於輪軸方向)以及扭轉模態。每種模態在不同頻率範圍內具有不同的聲學輻射效率[34][35]。

五、振動模態

在輪胎所產生的各類振動模態中，徑向振動模態通常具有最高的聲學輻射效率。其主要原因在於，徑向振動的方向是輪胎表面向外與向內的往復運動，這種運動方式能直接推動周圍空氣，使空氣產生明顯的體積變化，進而形成聲壓波動並向外輻射聲音。相較之下，平行於輪胎表面的振動較不容易有效驅動空氣，因此其聲音輻射能力相對較低。

低階徑向模態(例如一階與二階模態)的振動頻率通常落在約 100 至 300 Hz 的範圍內。此一頻率區間與整車車體結構、懸吊系統及車艙結構的固有頻率相當接近，容易產生結構共振或耦合效應。因此，低階徑向振動模態雖然不一定使車外噪音特別明顯，但對車內低頻噪音與乘坐舒適性具有重要影響。

隨著模態階數提高，徑向振動的頻率也隨之上升，高階徑向模態的頻率可達數千赫茲。這類高頻模態多與胎面花紋塊的局部振動有關，屬於較小尺度的結構運動。由於其頻率位於人耳較敏感的區域，高階徑向模態常被視為輪胎高頻噪音的重要來源，特別是在粗糙路面或高速行駛條件下，其影響更為明顯。

除了徑向振動之外，**輪胎的周向彎曲波（Circumferential Bending Wave）**亦在噪音生成機制中扮演關鍵角色。周向彎曲波可視為沿著輪胎圓周方向傳播的彎曲振動，其傳播速度約為 80 至 100 公尺每秒。當輪胎滾動時，路面所施加的激勵會不斷觸發此類彎曲波在輪胎結構中傳遞。

在約 500 至 1000 Hz 的頻率範圍內，周向彎曲波的傳播特性與路面激勵頻率容易形成有效耦合，使振動能量得以在輪胎結構中累積並轉換為聲學能量。此一頻段正好位於車外輪胎噪音中相當顯著的中高頻區域，因此周向彎曲波被認為是連結路面激勵與可聽噪音之間的重要橋樑。

整體而言，輪胎噪音的頻譜特性可視為不同振動模態共同作用的結果：低階徑向模態主要影響低頻與車內噪音表現，高階徑向模態主導高頻胎噪，而周向彎曲波則在中高頻區間扮演能量傳遞與放大的關鍵角色[36][37]。



「低頻—結構共振、高頻—胎面局部振動」。

輪胎模態類型、頻率範圍與噪音影響對照表

模態類型	典型頻率範圍	主要物理特性	噪音影響與說明
低階徑向振動模態 (Radial Modes, 1 階、2 階)	約 100 - 300 Hz	輪胎整體沿徑向進行大尺度振動，能有效推動周圍空氣	與車體與懸吊系統的結構共振頻率接近，容易耦合並放大聲音，對車內低頻噪音與隆隆聲影響顯著
高階徑向振動模態 (Higher-order Radial Modes)	約 1,000 Hz 以上 (可達數千 Hz)	胎面局部區域快速振動，振動尺度較小但頻率高	聲學輻射效率高，是 高頻輪胎噪音 的重要來源，常造成尖銳、刺耳的聽感
胎面花紋局部振動模態	約 1,000 - 3,000 Hz	花紋塊在路面激勵下產生局部彈跳與變形	與路面粗糙度與花紋排列高度相關，為 輪胎行駛尖銳聲與嘯叫聲 主要來源
周向彎曲波 (Circumferential Bending Wave)	約 500 - 1,000 Hz	沿輪胎周向傳播的彎曲波，傳播速度約 80 - 100 m/s	容易與路面激勵形成有效耦合，對 中頻行駛噪音 貢獻顯著
旋轉狀態下的前行波模態 (Forward Traveling Wave)	原固有頻率略高於靜止狀態	由科氏力導致，波動方向與旋轉方向相同	在高速行駛時影響輪胎振動分布，可能改變特定頻段噪音強度
旋轉狀態下的後行波模態 (Backward Traveling Wave)	原固有頻率略低於靜止狀態	波動方向與旋轉方向相反	與前行波形成頻率分裂現象，可能造成噪音頻譜展寬

模態類型	典型頻率範圍	主要物理特性	噪音影響與說明
離心力主導之徑向模態 (高速)	隨車速上升 (約每 +10 km/h, +2.4 Hz)	輪胎徑向膨脹, 預 應力提高, 整體剛 度增加	使低頻模態頻率上移, 改變噪 音共振條件
黏滑/黏斷相關高頻模態	約 1,000 - 5,000 Hz	接觸區快速不連續 運動	造成尖銳、高頻、刺耳噪音

低頻模態主要影響車內舒適性，而高頻模態則主導外部輪胎滾動噪音。

六、旋轉效應

當輪胎由靜止狀態開始旋轉時，其振動與動態特性會受到旋轉所引入的慣性力影響，其中以科氏力與離心力最為關鍵。這些力的存在，使輪胎在旋轉狀態下的振動行為，與靜止或僅考慮準靜態條件時有明顯差異。

首先，科氏力會導致輪胎振動模態出現「頻率分岔現象」。在輪胎未旋轉時，某些振動模態具有相同的固有頻率，稱為簡併模態；然而，當輪胎開始旋轉後，這些原本頻率相同的模態會分裂為兩種不同的振動形式，分別為沿著輪胎旋轉方向傳播的前行波，以及逆著旋轉方向傳播的後行波。由於科氏力的影響，前行波與後行波的固有頻率不再相同，並且其頻率差會隨著輪胎轉速的提高而逐漸增大。此一現象顯示，輪胎旋轉本身即會改變振動能量在結構中的傳播方式。

其次，離心力主要影響輪胎的結構剛性。當輪胎旋轉時，離心力會使輪胎在徑向方向產生膨脹，進而在胎面與胎體中引入額外的預應力。這種預應力的效果等同於提高輪胎的整體結構剛度，使輪胎對外部激擾的動態反應產生改變。實驗研究顯示，隨著車輛行駛速度增加，輪胎的徑向固有頻率也會隨之上升，其變化趨勢約為行駛速度每增加每小時 10 公里，徑向固有頻率提高約 2.4 赫茲。

然而，旋轉效應對輪胎動態行為的影響，並非在所有行駛速度範圍內都同樣顯著。研究指出，在中低速行駛條件下（約低於每小時 100 公里），科氏力與離心力對輪胎接觸力學與振動行為的影響相對有限，此時採用準靜態近似方法，仍能對輪胎接觸特性與主要振動行為提供合理的預測。隨著車速進一步提高，旋轉效應的重要性才會逐漸增加，需納入完整的旋轉動力學模型進行分析。

七、黏彈性特性

輪胎橡膠的黏彈性特性是理解磨擦噪音的關鍵。輪胎胎面橡膠通常由填充炭黑或二氧化矽的天然橡膠與合成橡膠複合物構成，表現出顯著的黏彈性行為。這種黏彈性表現為應力-應變關係的時間依賴性與頻率依賴性，可以用複數模量 $E^* = E' + iE''$ 來描述，其中 E' 為儲存模量(Storage Modulus)，代表彈性響應； E'' 為損耗

模量(Loss Modulus),代表黏性耗散。損耗因子 $\tan\delta=E''/E'$ 是衡量材料能量耗散能力的重要指標[39][40]。

橡膠的黏彈性特性遵循時間-溫度等效原理(Time-Temperature Superposition Principle),可透過 Williams-Landel-Ferry(WLF)方程描述溫度對黏彈性響應的影響。這意味著在較低溫度下橡膠表現出較高的模量與較強的彈性特徵,而在較高溫度下則變得更軟、更具黏性。在輪胎與路面的接觸過程中,局部接觸區域的溫度可能顯著升高(特別是在高速或重載條件下),從而改變橡膠的黏彈性響應特徵。此外,橡膠的應力-應變關係還表現出幅值依賴性,包括 Payne 效應(應變幅值對動態模量的影響)與 Mullins 效應(預應變對後續力學響應的影響)[41][42]。

在頻域分析中,橡膠的黏彈性特性決定了其對不同波長粗糙度的響應特徵。低頻激勵(對應於長波長粗糙度)主要引起橡膠的整體變形,儲存模量主導響應,表現出彈性特徵。高頻激勵(對應於短波長粗糙度)則更多地激發橡膠內部的黏性耗散,損耗模量的作用變得顯著。這種頻率選擇性響應直接影響磨擦係數的頻譜分佈,進而影響噪音的頻譜特性。Persson 理論指出,磨擦係數可以表示為路面粗糙度功率譜與橡膠黏彈性響應函數的卷積,這一理論框架為定量預測橡膠磨擦提供了有力工具[43][44]。

八、接觸區域

接觸區域的局部動力學行為是連接微觀磨擦機制與宏觀噪音輻射的橋樑。在輪胎與路面的接觸區內,接觸壓力分佈高度不均勻,典型呈現出中心區域壓力較高、邊緣區域壓力較低的特徵。這種非均勻壓力分佈導致不同位置的橡膠元素經歷不同程度的壓縮與剪切變形。當考慮路面粗糙度的影響時,真實接觸面積(Real Contact Area)僅佔表觀接觸面積(Apparent Contact Area)的一小部分,且真實接觸發生在離散的微觀接觸點上。這些微觀接觸點的動態演化—包括形成、生長、融合與消失—構成了接觸力的微觀時間歷程,其統計特性最終決定了宏觀測量的接觸力信號及其噪音輻射[45][46]。

接觸剛度(Contact Stiffness)是描述接觸區局部力學響應的關鍵參數,定義為接觸力對接觸變形的導數。接觸剛度不僅取決於橡膠材料的彈性模量,還受到接觸幾何形狀、接觸面積大小以及約束條件的影響。在輪胎-路面接觸系統中,接觸剛度表現出明顯的頻率依賴性:低頻下,整個輪胎結構的整體剛度起主導作用;高頻下,胎面橡膠的局部剛度與路面的局部剛度決定了接觸剛度。Winkler 基床模型(Winkler



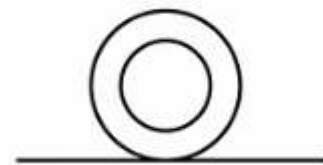
Foundation Model)常被用於簡化描述接觸剛度,假設接觸壓力與局部變形成正比,比例係數即為 Winkler 剛度。雖然這種模型忽略了接觸點之間的耦合作用,但在特定條件下仍能提供合理的近似[47][48]。

聲學輻射機制將輪胎的機械振動轉換為向空氣傳播的聲波。根據聲學理論,振動表面向遠場輻射聲功率的效率取決於表面振動速度、振動面積以及聲學輻射阻抗。對於低頻振動(波長遠大於振動表面尺寸),輻射效率較低,因為表面不同區域的振動容易產生相互抵消的聲壓;對於高頻振動(波長與表面尺寸相當或更小),輻射效率顯著提高,聲波能夠有效地向遠場傳播。輪胎作為一個複雜的三維輻射體,其聲學輻射模式包括單極子輻射(體積振動)、偶極子輻射(橫向振動)以及高階多極子輻射等。不同的振動模態對應不同的輻射模式,進而影響遠場聲壓的方向性與頻譜[49][50]。

非線性效應在特定工況下對磨擦噪音的生成具有重要影響。當輪胎處於加速、制動或轉向等動態工況時,接觸區內的切向力與法向力均顯著增大,接觸力學行為進入非線性區域。大變形條件下,橡膠的應力-應變關係呈現出顯著的非線性特徵,包括應變強化效應(Strain Hardening)與軟化效應(Strain Softening)。此外,磨擦係數本身也是滑移速度、接觸壓力與溫度的非線性函數。這些非線性因素導致接觸力信號中出現諧波成分與組合頻率成分,豐富了噪音的頻譜結構。在極端工況下,如急剎車或急轉彎,輪胎可能進入部分或完全滑移狀態,此時的尖叫噪音(Squeal Noise)主要由黏滑振盪的非線性動力學行為所主導[51][52]。

3.2 輪胎與路面接觸特性 (Tire-Road Contact Characteristics)

輪胎與路面的接觸特性是理解磨擦噪音生成機制的核心要素,涉及接觸區域的幾何形態、壓力分佈、應力傳遞以及動態演化等多方面內容。接觸區通常被稱為接觸印跡(Contact Patch)或接觸足跡(Footprint),是輪胎與路面之間力與能量交換的唯一界面。



儘管接觸區的面積相對輪胎整體尺寸而言很小(典型乘用車輪胎的接觸面積約為 100-200 平方厘米),但正是在這個有限區域內發生的複雜力學過程決定了車輛的操控性能、制動性能以及噪音與振動特性[53][54]。

接觸力學的研究可以追溯至 Hertz 在 19 世紀末對彈性體接觸問題的經典分析。Hertz 理論假設接觸體為光滑、彈性、半無限大固體,在小變形條件下求解接觸壓力分佈與接觸面積。對於球形或圓柱形接觸,Hertz 理論給出了橢圓形或矩形的接

觸區域,壓力分佈呈橢圓或拋物線形狀,最大壓力出現在接觸區中心。然而,輪胎與路面的接觸問題遠比 Hertz 接觸複雜:輪胎並非單一均質材料,而是由橡膠、簾線層、鋼絲帶等多種材料組成的複合結構;路面表面並非光滑,而是具有多尺度粗糙度;接觸變形可能達到較大幅度,超出小變形假設的適用範圍;此外,輪胎內部的充氣壓力、胎面花紋以及動態滾動效應都使得實際接觸問題極為複雜[55][56]。現代輪胎接觸力學研究主要依賴數值模擬與實驗測量相結合的方法。有限元素法(Finite Element Method, FEM)是最常用的數值工具,能夠考慮輪胎的複雜幾何形狀、材料非線性以及大變形效應。三維有限元模型通常包含胎面橡膠、胎體簾線層、鋼絲帶束層、胎圈鋼絲以及側壁等主要結構組件,材料本構關係採用超彈性模型(如 Mooney-Rivlin 模型、Ogden 模型)結合黏彈性模型來描述橡膠的力學行為。路面可建模為剛性體或彈性半空間,表面紋理透過實測數據或隨機生成的粗糙度場來表徵。接觸分析採用接觸力學算法,如罰函數法(Penalty Method)或 Lagrange 乘法(Lagrange Multiplier Method),求解接觸壓力分佈、接觸面積以及切向應力分佈[57][58]。

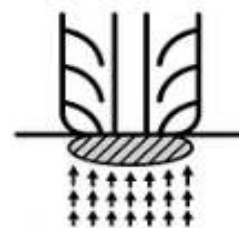
實驗測量接觸壓力的方法包括壓力敏感薄膜(Pressure-Sensitive Film)、電阻式壓力傳感器陣列(Resistive Sensor Array)以及光學測量技術(Optical Measurement)等。壓力敏感薄膜透過材料的電阻或顏色變化來指示接觸壓力大小,具有較高的空間分辨率,但時間響應較慢,主要用於靜態或準靜態測量。電阻式傳感器陣列由嵌入柔性基底的多個壓力傳感單元組成,能夠實時測量動態滾動條件下的接觸壓力分佈,採樣頻率可達數千赫茲,為研究接觸力的時間演化提供了有力工具。然而,傳感器的引入會改變接觸界面的力學特性,可能導致測量結果與真實情況存在一定偏差[59][60]。

3.2.1 接觸面積與壓力分佈 (Contact Area and Pressure Distribution)

為什麼影響噪音?

壓力不均勻 → 某些地方特別用力 → 產生強烈振動 → 噪音變大
就像踩在 LEGO 積木上比踩在平地上痛,也更容易發出聲音!

接觸面積是描述輪胎與路面接觸狀態的首要幾何參數,直接影響接觸壓力的大小與分佈。對於充氣輪胎,接觸面積主要由輪胎荷重、充氣壓力以及輪胎結構剛度決定。在理想化的均勻壓力假設下,接觸面積 A 可由平衡方程估算: $A=F/p$,其中 F 為輪胎荷重, p 為充氣壓力。這一簡單關係

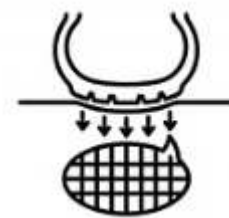


式表明,接觸面積與荷重成正比,與充氣壓力成反比。然而,實際接觸面積的形狀與大小受到多種因素的綜合影響,包括輪胎設計參數(斷面寬度、扁平比、胎面輪廓)、材料特性(橡膠硬度、簾線剛度)以及路面條件(平整度、剛度)等,使得精確預測接觸面積成為一個挑戰性問題[61][62]。

實驗觀測表明,典型乘用車輪胎的接觸印跡在平坦路面上呈近似橢圓形或矩形,長度方向(沿滾動方向)約為 80-120 毫米,寬度方向約為 120-180 毫米,具體數值取決於輪胎尺寸與荷重條件。接觸印跡並非完全均勻填充,而是由離散的接觸塊(Contact Block)構成,每個接觸塊對應胎面花紋的一個溝槽之間的橡膠單元。溝槽的存在使得表觀接觸面積(包含溝槽的總面積)大於實際橡膠-路面接觸面積。溝槽面積比(Groove Area Ratio),即溝槽面積與表觀接觸面積之比,是輪胎設計的重要參數,通常在 20%-40%範圍內。較高的溝槽面積比有利於排水性能,但可能增加噪音水平[63][64]。

接觸壓力分佈呈現出顯著的非均勻性,這種非均勻性源於輪胎結構的複雜性與路面粗糙度的影響。在宏觀尺度上(接觸印跡整體),壓力分佈受輪胎斷面形狀與充氣壓力的主導。對於具有圓弧形斷面的輪胎,接觸壓力在中心區域較高,向邊緣逐漸降低,呈現出"駝峰狀"(Hump-Shaped)分佈。這種分佈與輪胎胎冠的曲率半徑密切相關:曲率半徑越小,壓力集中越明顯。對於扁平比較低的運動型輪胎,胎冠較為平坦,壓力分佈相對均勻。充氣壓力的影響表現為:較高的充氣壓力導致接觸面積減小,同時增加中心區域的壓力峰值;較低的充氣壓力則使接觸面積增大,壓力分佈趨於均勻[65][66]。

在中觀尺度上(花紋塊尺度),胎面花紋的幾何特徵對壓力分佈產生重要影響。花紋塊的前緣與後緣承受的壓力通常高於中部,這是由於花紋塊在進入與離開接觸區時經歷較大的變形梯度。橫向溝槽的存在導致壓力在滾動方向上呈現出週期性波動,波動頻率與花紋節距(Pitch)和滾動速度相關。縱向溝槽則使壓力在橫向方向上呈現出分段特徵,每個花紋肋條(Rib)或花紋塊列(Block Row)承受的壓力相對獨立。這種由花紋引起的壓力非均勻性是噪音生成的重要來源,特別是在中頻段(500-1000 Hz)的噪音與花紋衝擊機制密切相關[67][68]。



在微觀尺度上(路面紋理尺度),路面粗糙度引起的壓力波動成為主導因素。真實路面表面具有從微米到毫米尺度的多尺度粗糙度,這些粗糙度特徵使得真實接觸發

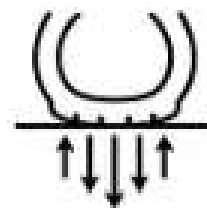
生在離散的微觀接觸點上,而非連續的接觸面。微觀接觸點的大小、形狀與分佈由路面紋理的統計特性與橡膠的黏彈性響應共同決定。根據 Persson 的接觸力學理論,真實接觸面積與表觀接觸面積之比(稱為接觸面積比)是接觸壓力的函數,且與路面粗糙度功率譜以及橡膠黏彈性模量密切相關。在較低壓力下,僅有最高的路面突起與橡膠接觸,真實接觸面積很小;隨著壓力增加,更多的粗糙度尺度參與接觸,真實接觸面積逐漸增大[69][70]。

靜態接觸與動態滾動接觸之間存在顯著差異。在靜態荷重條件下測量的接觸面積通常大於滾動條件下的接觸面積,實驗觀測到的減小幅度約為 10%-20%。這種差異主要歸因於橡膠的黏彈性特性:在靜態加載時,橡膠有充足的時間蠕變(Creep)以適應路面形狀,形成較大的接觸面積;而在動態滾動時,接觸過程的時間尺度較短,橡膠來不及充分蠕變,表現出較高的有效剛度,因而接觸面積減小。這種動態效應隨滾動速度的增加而更加顯著,且在不同頻率範圍內表現出不同的接觸剛度與阻尼特性[71][72]。

接觸區的形狀與尺寸還受到輪胎側偏角(Slip Angle)與縱向滑移率(Longitudinal Slip Ratio)的影響。當輪胎處於轉向狀態時,側偏角使接觸印跡發生偏移與變形,導致橫向力的產生以及接觸壓力分佈的不對稱性。側偏角增大時,接觸區前部的橫向位移小於後部,形成所謂的側偏變形(Lateral Deformation),這種變形模式在接觸區內產生顯著的剪切應力。類似地,在加速或制動工況下,縱向滑移率導致接觸區內的切向應力增大,接觸壓力分佈也會相應調整以平衡增大的切向力。這些動態工況下的接觸特性變化對磨擦噪音有重要影響,通常導致噪音水平的增加,特別是在高頻段[73][74]。

接觸壓力的測量與建模一直是輪胎力學研究的熱點與難點。

實驗測量方面,Cesbron 等人使用電阻式壓力傳感器陣列對輪胎在不同路面上的動態接觸壓力進行了系統測量,採樣頻率達到 10752 赫茲,能夠捕捉接觸力的高頻動態特徵。他們的



的研究發現,接觸力的均方根值在不同速度下基本保持不變,但頻譜特徵隨速度顯著變化,這表明輪胎振動對接觸力的頻域特性有重要影響。此外,他們發現路面宏觀紋理在 800 赫茲附近產生的接觸力與噪音水平之間存在良好的線性相關性,為基於接觸力預測噪音提供了實驗依據[75]。

數值建模方面,有限元方法是最常用的工具。Dubois 等人發展了基於多尺度方法的輪胎-路面接觸壓力計算模型,將宏觀的輪胎結構力學與微觀的表面粗糙度接觸

力學相結合。他們使用兩尺度迭代方法求解接觸問題:在宏觀尺度上求解輪胎的整體變形與荷重分佈;在微觀尺度上考慮路面粗糙度對局部接觸壓力的影響。這種多尺度方法能夠在合理的計算成本下獲得包含粗糙度效應的詳細接觸壓力分佈,為噪音預測模型提供輸入數據[76][77]。

接觸面積與噪音之間的關係是輪胎噪音研究的重要課題。一般而言,較大的接觸面積意味著更多的胎面橡膠元素與路面發生接觸,因而產生更多的激勵源,導致噪音水平增加。Li 等人的綜述研究指出,輪胎荷重增加導致接觸面積增大,通常伴隨噪音水平的上升,增幅約為每倍增荷重增加 3 分貝。類似地,充氣壓力降低使接觸面積增大,也會導致噪音水平上升。然而,這種關係並非絕對,因為接觸壓力分佈的變化同樣重要:更均勻的壓力分佈可能降低局部的高壓力峰值,從而減輕衝擊激勵的強度,部分抵消接觸面積增大的負面效應[78][79]。

接觸印跡的形狀還與輪胎的結構設計密切相關。子午線輪胎(Radial Tire)與斜交輪胎(Bias Tire)在接觸特性上存在顯著差異:子午線輪胎由於簾線沿徑向佈置,胎側柔順性較高,能夠形成較大且較平坦的接觸印跡;斜交輪胎的簾線呈交叉佈置,整體剛度較高,接觸印跡較小且壓力分佈不均勻。

現代乘用車幾乎全部採用子午線輪胎,這不僅是出於操控性能與燃油經濟性的考慮,也有利於降低噪音水平。胎面輪廓(Tread Contour)的設計也對接觸壓力分佈有重要影響:透過優化胎面曲率,可以在保持足夠接觸面積的同時,實現更均勻的壓力分佈,從而降低噪音[80][81]。

花紋設計對接觸特性的影響是多方面的。縱向主溝槽(Longitudinal Grooves)將胎面分為若干肋條,每個肋條獨立承受部分荷重,肋條之間的壓力可能存在差異。橫向溝槽(Lateral Grooves)在滾動方向上分割花紋塊,使接觸過程呈現出離散的塊狀接觸特徵。細小溝槽(Sipe)雖然不顯著改變宏觀接觸面積,但透過增加橡膠邊緣的數量,增強了微觀尺度上的接觸力波動,對高頻噪音有影響。花紋深度(Tread Depth)隨磨損而減小,新輪胎與磨損輪胎的接觸特性存在差異:新輪胎的深溝槽使花紋塊具有較大的柔順性,接觸壓力波動較大;磨損輪胎的溝槽變淺,花紋塊剛度增加,接觸壓力趨於均勻,通常導致噪音水平降低[82][83]。

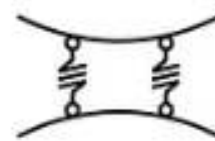
3.2.2 接觸剛度 (Contact Stiffness)

為什麼影響噪音?

輪胎越硬 → 碰到石頭時彈得越快 → 振動越劇烈 → 噪音越大

軟輪胎像海綿,會「吃掉」振動;硬輪胎像鼓面,會「放大」振動!

接觸剛度(硬度)是描述輪胎與路面接觸區域力學響應特性的核心參數,定義為接觸力增量與相應接觸變形增量之比,即 $K_c=dF/d\delta$,其中 F 為接觸力, δ 為接觸變形。接觸剛度反映了接觸系統抵抗外部激勵的能力,是決定接觸區動態響應與振動傳遞特性的關鍵因素。在輪胎噪音研究中,接觸剛度不僅影響輪胎結構對路面激勵的響應幅值,還決定了系統的固有頻率與阻尼特性,從而對噪音的頻譜分佈與幅值水平產生重要影響[84][85]。



接觸剛度是一個多尺度、多物理場耦合的複雜參數,受到眾多因素的綜合影響。在宏觀尺度上,輪胎的整體結構剛度,包括胎體簾線的拉伸剛度、鋼絲帶的彎曲剛度以及橡膠的剪切剛度,共同決定了輪胎對荷重的整體響應。這種宏觀剛度主要在低頻範圍內(數十赫茲以下)起主導作用,對應於輪胎的整體徑向振動模態。在中觀尺度上,胎面花紋塊的幾何尺寸與橡膠材料的彈性模量決定了花紋塊的局部剛度,這種局部剛度在中頻範圍內(數百赫茲)主導接觸剛度特性,對應於花紋塊的彎曲與扭轉振動模態。在微觀尺度上,橡膠表面與路面粗糙度之間的微觀接觸剛度取決於橡膠的高頻黏彈性響應以及粗糙度的統計特性,這種微觀剛度在高頻範圍內(數千赫茲以上)成為主導因素[86][87]。

Winkler 基床模型是描述接觸剛度的經典簡化模型,假設接觸界面上任一點的接觸壓力僅與該點的局部變形成正比,而與鄰近點的變形無關,即 $p(x,y)=k_w \cdot \delta(x,y)$,其中 k_w 為 **Winkler** 剛度係數, p 為接觸壓力, δ 為局部變形, (x,y) 為接觸面內的位置坐標。這種模型的優點是數學形式簡單,易於在動態分析中實施,因而被廣泛應用於輪胎振動與噪音的理論模型中。然而,**Winkler** 模型忽略了接觸點之間的彈性耦合作用,即一點的變形會透過彈性體內的應力傳遞影響鄰近點的響應。這種簡化在某些情況下是可接受的,特別是當接觸區尺寸遠小於輪胎整體尺寸,且關注的是高頻局部響應時[88][89]。

更精確的接觸剛度描述需要考慮彈性耦合效應。彈性半空間理論(Elastic Half-Space Theory)提供了一個更為嚴格的理論框架,將輪胎胎面視為彈性或黏彈性半空間,利用 **Boussinesq** 解或積分方程方法求解接觸壓力與變形之間的關係。在這種框架下,接觸剛度不再是局部的標量,而是一個非局部的積分算子,一點的接觸壓力取決於整個接觸區域的變形分佈。邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)是實施這種

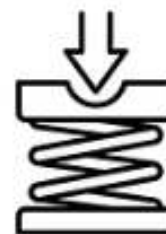


非局部接觸力學計算的有效數值工具,透過在接觸界面上離散化並求解積分方程,可以獲得考慮彈性耦合的精確接觸壓力分佈與接觸剛度[90][91]。

接觸剛度的頻率依賴性是輪胎動態接觸力學的重要特徵。這種頻率依賴性主要源於橡膠材料的黏彈性特性。在低頻激勵下,橡膠有足夠的時間進行黏性流動與分子鏈段重排,表現出較低的有效模量,因而接觸剛度較低。在高頻激勵下,橡膠的響應來不及充分鬆弛,表現出較高的有效模量(接近玻璃化模量),因而接觸剛度顯著增加。這種頻率依賴性可以透過複數接觸剛度 $K_c^* = K_c' + iK_c''$ 來描述,其中 K_c' 為儲存剛度,代表彈性響應; K_c'' 為損耗剛度,代表能量耗散。損耗角 $\delta_c = K_c''/K_c'$ 表征接觸系統的阻尼特性[92][93]。

Winroth 等人透過實驗與理論相結合的方法系統研究了接觸剛度的頻率依賴性及其對輪胎噪音的影響。他們發展了一個考慮胎面慣性與阻尼效應的動態接觸模型,能夠預測接觸剛度在不同頻率下的變化。研究表明,胎面橡膠的慣性效應在高頻段(數百赫茲以上)對接觸剛度有顯著影響:當激勵頻率接近胎面局部共振頻率時,接觸剛度呈現出明顯的頻率選擇性特徵,某些頻率的剛度顯著增強,而其他頻率的剛度相對較低。這種頻率選擇性直接影響輪胎對路面激勵的響應特性,從而影響噪音的頻譜分佈[94][95]。

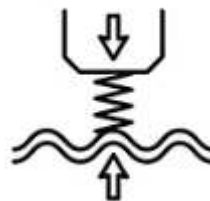
接觸剛度的幅值依賴性與橡膠的非線性力學特性相關。橡膠在大變形條件下表現出應變強化效應,即隨著應變幅值增加,有效模量上升。這種非線性效應導致接觸剛度隨接觸力幅值而變化:在較小荷重下,接觸剛度相對較低;隨著荷重增加,接觸面積增大,同時橡膠進入非線性變形區域,接觸剛度呈非線性增加。Payne 效應進一步描述了動態應變幅值對橡膠黏彈性模量的影響:在小應變幅值下,模量較高;隨著應變幅值增加,模量顯著降低,直至達到某個臨界應變後趨於穩定。這種效應在填充橡膠中尤為顯著,源於填料網絡的破壞與重建過程[96][97]。



溫度對接觸剛度的影響透過改變橡膠的黏彈性特性來實現。根據時間-溫度等效原理,溫度降低相當於頻率升高,會導致橡膠模量增加,從而提高接觸剛度;反之,溫度升高則降低接觸剛度。在實際行駛條件下,接觸區的溫度可能因磨擦與黏彈性耗散而顯著升高,特別是在高速或重載條件下。這種溫度升高會軟化橡膠,降低接觸剛度,從而改變輪胎的動態響應特性。Bühlmann 等人的研究發現,路面溫度變化

對輪胎噪音有系統性影響,溫度每升高 10 攝氏度,噪音水平約降低 0.5-1 分貝,這種溫度效應與接觸剛度的變化密切相關[98]。

路面剛度也是影響系統整體接觸剛度的重要因素。雖然多數研究將路面視為剛性體,但在某些情況下,路面的彈性變形不可忽略,特別是對於柔性瀝青路面。路面的彈性模量通常遠大於橡膠,但其有限的厚度與下層柔軟的地基使得路面在輪胎荷重作用下會產生宏觀的撓曲變形。這種路面變形會降低



系統的整體接觸剛度,影響低頻段的振動傳遞特性。此外,路面的黏彈性特性,包括隨溫度與加載速率變化的模量,也會對接觸力學行為產生影響,進而影響噪音特性[99][100]。

接觸剛度與輪胎振動模態之間存在強耦合關係。接觸區可視為輪胎結構的一個動態邊界條件,其剛度特性影響輪胎的固有頻率與模態形狀。Kindt 等人測量了輪胎在運行激勵水平下的動態傳遞剛度,發現接觸剛度的頻率依賴性對結構傳遞噪音成分有重要影響。他們指出,動態傳遞剛度描述了接觸區強制位移如何激發輪胎振動,這種傳遞函數的峰值頻率對應於輪胎的共振模態,是噪音輻射的主要頻率成分[101]。

花紋設計對接觸剛度的影響主要表現在花紋塊的局部剛度上。較小的花紋塊具有較高的柔順性,局部接觸剛度較低,容易在接觸過程中發生較大的變形與振動,可能增加噪音水平。較大的花紋塊則剛度較高,變形較小,噪音可能相對較低,但過大的花紋塊會導致接觸壓力分佈不均,反而可能增加衝擊噪音。花紋塊的形狀與排列方式也影響其剛度特性:具有複雜邊界形狀的花紋塊由於邊緣效應可能表現出各向異性的剛度;花紋塊之間的溝槽使得相鄰花紋塊之間的彈性耦合減弱,使得接觸剛度在空間上呈現出離散特徵[102][103]。

接觸剛度的實驗測量方法包括靜態壓痕測試、動態激勵測試以及滾動接觸測試等。靜態壓痕測試透過將已知形狀的壓頭(如球形或圓柱形)壓入橡膠表面,測量荷重與壓入深度之間的關係,從而推算接觸剛度。這種方法適用於研究橡膠材料的局部力學特性,但無法完全代表輪胎滾動接觸的真實條件。動態激勵測試使用振動台或衝擊錘對輪胎施加已知的動態激勵,測量輪胎的振動響應,透過頻響函數(Frequency Response Function, FRF)分析提取接觸剛度與阻尼參數。這種方法能夠獲得頻率依賴的接觸剛度信息,但需要精確的力與加速度測量以及信號處理技術[104][105]。

滾動接觸測試是最接近實際工況的測量方法,透過在鼓式試驗機或實際路面上滾動輪胎,測量接觸力的動態變化。結合接觸壓力傳感器陣列,可以獲得接觸壓力的時空分佈,從而推算接觸剛度的動態特性。Cesbron 等人的實驗研究採用這種方法,獲得了輪胎在不同速度與不同路面上的接觸力信號,為接觸剛度的動態特性提供了寶貴的實驗數據。他們發現,接觸力的均方根值基本不隨速度變化,但頻譜特徵顯著依賴於速度,這表明接觸剛度的頻率依賴性在動態接觸中起重要作用[106]。接觸剛度在輪胎噪音預測模型中扮演關鍵角色。基於振動響應的噪音預測模型通常需要將路面激勵透過接觸剛度轉換為輪胎的振動響應,再透過聲學輻射模型計算噪音水平。接觸剛度參數的準確性直接影響預測結果的可靠性。研究表明,使用頻率依賴的接觸剛度能夠顯著提高噪音預測的精度,特別是在中高頻段。此外,接觸剛度的不確定性分析也是模型驗證的重要內容,因為接觸剛度受到多種難以精確控制的因素影響,其變異性會傳遞到噪音預測結果中[107][108]。

3.2.3 滑移特性 (Slip Characteristics)

為什麼影響噪音?

黏-滑效應:輪胎一下黏住、一下滑動(像拉小提琴)

這種「卡住-放開-卡住-放開」的循環 → 產生規律的振動 → 形成尖銳噪音
就像用濕手指摩擦杯子邊緣會發出聲音!

輪胎的滑移特性描述了輪胎在接觸區內橡膠元素相對路面的運動狀態,是理解輪胎磨擦力生成機制與磨擦噪音產生的關鍵。滑移可分為縱向滑移與橫向滑移兩類:縱向滑移發生在加



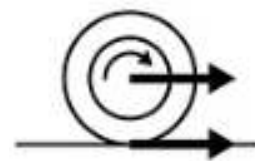
速或制動工況下,描述輪胎圓周速度與車輛前進速度之間的差異;橫向滑移發生在轉向工況下,描述輪胎前進方向與輪胎平面之間的夾角。無論是縱向還是橫向滑移,都會在接觸區內產生顯著的切向應力與能量耗散,從而增強磨擦噪音的生成,特別是與黏滑機制相關的高頻噪音成分[109][110]。

縱向滑移率(Longitudinal Slip Ratio)是量化縱向滑移程度的參數,定義為 $s_x = (\omega R - V_x) / V_x$ (制動工況)或 $s_x = (\omega R - V_x) / (\omega R)$ (驅動工況),其中 ω 為輪胎角速度, R 為輪胎有效滾動半徑, V_x 為車輛縱向速度。在自由滾動狀態下, $s_x = 0$,即無縱向滑移;在完全鎖死制動狀態下, $s_x = 1$,即 100%滑移。在正常行駛過程中,即使沒有明顯的加速或制動,由於輪胎的彈性變形,也存在微小的縱向滑移(通常小於 1%),這種微滑移對磨擦力的生成與噪音特性也有影響[111][112]。

橫向滑移通常用側偏角(Slip Angle) α 來表征,定義為輪胎前進方向與輪胎平面法線方向之間的夾角。在直線行駛時, $\alpha=0$,無橫向滑移;在轉向時, $\alpha>0$,產生橫向滑移與橫向力。側偏角的產生是由於車輛轉向時,輪胎需要提供向心力以維持圓周運動,這種向心力透過接觸區內的橫向磨擦力來實現,而橫向磨擦力的產生伴隨著胎面橡膠相對路面的橫向滑移。側偏角通常在數度以內,但即使較小的側偏角也會顯著影響接觸力分佈與噪音水平[113][114]。

輪胎的磨擦力-滑移率特性曲線是輪胎力學的核心內容,通常呈現出非線性特徵。在小滑移率範圍內(通常低於 5%-10%),磨擦力與滑移率近似成正比,這一區域稱為線性區或黏著區,此時接觸區內的大部分橡膠元素處於黏著狀態,僅有少量滑移。隨著滑移率增加,磨擦力增長速率逐漸降低,並在某個臨界滑移率處達到峰值,這個峰值對應於最大可用磨擦力,是輪胎提供制動力或驅動力的極限。超過峰值滑移率後,磨擦力開始下降,進入完全滑移區,此時接觸區內幾乎所有橡膠元素都在滑移,磨擦係數由動磨擦係數決定,通常低於峰值磨擦係數[115][116]。

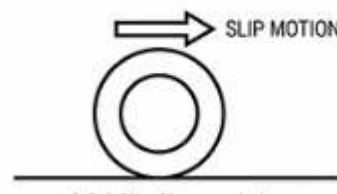
這種磨擦力-滑移率特性的非線性與接觸區內橡膠元素的運動狀態密切相關。刷子模型(Brush Model)是解釋這種非線性的經典理論模型,將胎面橡膠元素比擬為一排排彈性刷毛,刷毛根部隨輪胎圓周運動,而刷毛尖端與路面接觸。



在小滑移率下,刷毛進入接觸區後,尖端與路面黏著,隨車輛前進方向移動,而刷毛根部則隨輪胎圓周運動,導致刷毛發生彎曲變形,積累彈性能。當彎曲變形產生的切向力超過局部磨擦力極限時,刷毛尖端開始滑移,釋放部分彈性能,然後可能重新黏著。在接觸區前部,刷毛主要處於黏著狀態;在接觸區後部,由於累積變形較大,刷毛更容易發生滑移。隨著滑移率增加,滑移區從接觸區後部向前部擴展,當滑移區覆蓋整個接觸區時,輪胎進入完全滑移狀態[117][118]。

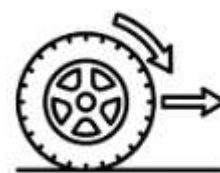
魔術公式(Magic Formula)是廣泛應用於輪胎動力學模擬的半經驗模型,由 Pacejka 等人發展,能夠精確擬合實測的磨擦力-滑移率曲線。魔術公式採用正弦函數與指數函數的組合,透過一組可調參數(包括峰值因數、形狀因數、剛度因數、曲率因數等)來描述磨擦力隨滑移率的變化規律。這種模型的優點是形式靈活,能夠適應不同類型輪胎與不同路面條件下的特性曲線,且計算效率高,適合實時仿真應用。然而,魔術公式的參數缺乏明確的物理意義,需要透過實驗測量進行標定,且外推能力有限[119][120]。

路面條件對磨擦力-滑移率特性有顯著影響,主要表現為磨擦係數的變化。乾燥瀝青路面的峰值磨擦係數通常在 0.7-0.9 範圍內,混凝土路面稍高,可達 0.8-1.0。濕滑路面的磨擦係數顯著降低,典型值為 0.3-0.5,降低幅度取決於水膜厚度、路面紋理以及輪胎花紋的排水能力。結冰或積雪路面的磨擦係數進一步降低,可能僅為 0.1-0.3,使得車輛的制動與操控性能嚴重退化。磨擦係數的降低不僅影響車輛的安全性能,也會改變磨擦噪音的生成機制與頻譜特性[121][122]。



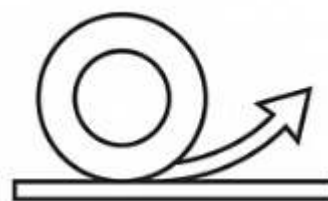
滑移速度(Slip Velocity)是影響磨擦係數的重要參數,定義為橡膠表面相對路面的瞬時速度。磨擦係數通常隨滑移速度的增加而降低,這種負斜率特性源於橡膠的黏彈性特性:在低滑移速度下,橡膠有更多時間適應路面粗糙度,形成較大的真實接觸面積,因而磨擦係數較高;在高滑移速度下,橡膠的響應時間不足,真實接觸面積減小,磨擦係數降低。此外,高滑移速度會導致接觸區溫度升高,進一步軟化橡膠,降低磨擦係數。這種磨擦係數的速度依賴性是黏滑振盪的一個重要動力學條件,也影響制動系統的穩定性[123][124]。

滑移對噪音的影響機制是多方面的。首先,滑移增加了接觸區內的切向應力水平,加劇了橡膠的變形與能量耗散,產生更多的熱量與振動能,部分能量以聲波形式輻射出去。其次,滑移導致黏滑頻率與幅值的增加,使得高頻噪音成分顯著增強。Li 等人的研究指出,在制動與轉向工況下,輪胎噪音水平在高頻段(2 kHz 以上)可增加 5-10 分貝,這主要歸因於增強的黏滑機制。再次,滑移改變了接觸區內橡膠元素的運動軌跡與接觸時間,影響花紋衝擊的時序特性,從而改變中頻段噪音的頻譜結構 [125][126]。



複合滑移(Combined Slip)是指縱向滑移與橫向滑移同時存在的情況,常見於車輛在彎道中加速或制動的工況。在複合滑移條件下,接觸區內的應力狀態更為複雜,縱向力與橫向力的耦合導致磨擦圓(Friction Circle)或磨擦橢圓(Friction Ellipse)的概念,即縱向力與橫向力的合力受到磨擦力極限的約束。複合滑移條件下的噪音特性尚未得到充分研究,但可以預期,由於應力水平的進一步增加與運動狀態的複雜化,噪音水平可能比單一滑移條件下更高[127][128]。

滑移的瞬態特性在真實行駛條件下非常重要。在急加速或急制動時,滑移率快速變化,接觸區內的應力狀態與橡膠元素的運動狀態也相應快速演化。這種瞬態過程可能激發輪胎結構的瞬態振動模態,產生瞬態噪音峰值。此外,在路面不平或遇到障礙物時,輪胎的滾動



速度會發生瞬時波動,產生瞬態的滑移,這些瞬態事件都對噪音有貢獻。建立考慮瞬態滑移效應的噪音預測模型是當前研究的一個挑戰[129][130]。

輪胎的滾動阻力(Rolling Resistance)與滑移特性密切相關。滾動阻力源於橡膠在週期性變形過程中的黏彈性能量耗散,這種耗散主要以熱的形式表現,但也有少量以聲學輻射的形式存在。滑移增加了橡膠的變形幅度與變形速率,從而增加了能量耗散與滾動阻力。研究表明,在保持足夠抓地力的前提下降低滾動阻力,通常也有助於降低噪音,因為兩者都與能量耗散相關。然而,這種關係並非絕對,因為噪音還取決於振動的空間模態與聲學輻射效率,而這些因素與滾動阻力的關係較為間接[131][132]。

換句話說,輪胎不是硬梆梆的圓形物體,而是一顆「會被壓扁、會變形、會滑動的橡皮球」,而噪音,就是這顆橡皮球在地上「被擠、被彈、被拖」時發出的聲音。

一、接觸面積與壓力分佈 (Contact Area and Pressure Distribution)

可以把輪胎和路面接觸的地方,想成「鞋底踩在地上」。

當車子停在地面上時,輪胎底部會被壓扁,形成一塊接觸面積(接地斑)。但這一塊不是每個地方壓力都一樣,有些地方壓得重,有些地方壓得輕,這就叫壓力分佈。

如果輪胎設計不好,或胎壓不對,可能會出現:

- 中間壓力特別大
- 邊緣壓力集中
- 壓力分佈很不均勻

這時候,橡膠在路面粗糙顆粒上「一下被壓、一下彈起」,就很容易產生振動,而振動就是噪音的源頭。

簡單說: 🖐️ 壓得不均勻 = 抖動多 = 噪音容易大

二、接觸剛度 (Contact Stiffness)

接觸剛度可以理解成一句話：輪胎踩在地上時，是「軟 Q 的」還是「硬梆梆的」？

如果輪胎接觸剛度很高：

- 路面一點點顛簸
- 輪胎就立刻「彈回來」
- 像敲桌子一樣，反應很快、很硬

這種情況下，振動頻率高，聲音就會比較尖銳、刺耳。

如果接觸剛度比較低：

- 輪胎像橡皮一樣慢慢變形
- 能把路面的震動「吸掉一部分」
- 聲音就比較低沉、不那麼吵

所以可以這樣記：👉 **越硬，越容易把路面震動變成聲音**

三、滑移特性 (Slip Characteristics)

很多人會以為輪胎是「純滾動」，但其實不是。

事實上，輪胎在接觸地面時，會發生很小的：

- 微滑動
- 拖曳
- 橡膠被拉伸後又突然釋放

這就叫滑移特性。

尤其在以下情況很明顯：

- 加速
- 煞車
- 轉彎

當滑移控制得不好，橡膠會出現「黏住 → 放開 → 再黏住」的循環，這就像拉橡皮筋時發出的聲音一樣，會產生摩擦噪音或尖叫聲。

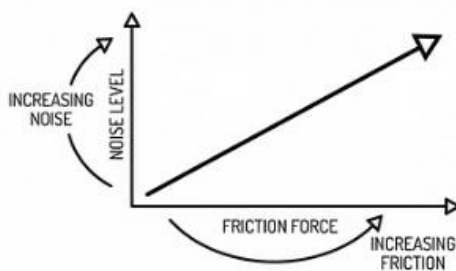
簡單說：👉 滑得越不穩定，聲音越容易出現突發、刺耳的噪音

四、三個特性與「噪音」的比較表

項目	現象	對噪音的主要影響	常見噪音特徵
接觸面積與壓力分佈	輪胎踩地面時哪裡壓比較重	壓力不均會引發輪胎局部振動	低頻轟鳴聲、規律性滾動噪音
接觸剛度	輪胎踩地時有多硬	剛度高容易把路面震動放大	尖銳、高頻噪音
滑移特性	輪胎是否在偷偷滑動	不穩定滑移會產生摩擦聲	尖叫聲、吱吱聲、瞬間噪音

3.3 磨擦力與噪音的關係 (Relationship Between Friction Force and Noise)

磨擦力與噪音之間存在複雜而直接的因果關係,磨擦力是輪胎噪音生成的主要驅動力之一,透過多種物理機制將機械能轉換為聲能。理解這種關係對於發展基於物理的噪音預測模型、優化輪胎設計以及制定有效的噪音控



制策略至關重要。磨擦力的大小、方向、時間變化特徵以及空間分佈都對噪音的幅值、頻譜與方向性產生重要影響。本節將從磨擦力的測量與表徵、磨擦力對輪胎振動的激勵作用、磨擦力與噪音之間的統計相關性以及磨擦力在不同噪音生成機制中的角色等方面,系統闡述磨擦力與噪音的關係[133][134]。

為什麼影響噪音?

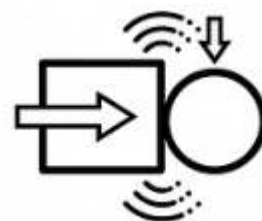
磨擦力越大 → 輪胎和路面「對抗」越激烈 → 產生更多振動能量
而且磨擦力不穩定(忽大忽小)→ 產生「顫抖」式振動 → 變成噪音
就像用粉筆在黑板上寫字,壓太用力會「吱吱」叫!

磨擦力的基本組成包括法向力(Normal Force)與切向力(Tangential Force)。法向力垂直於接觸面,主要由輪胎荷重以及路面不平度引起的動態荷重波動構成。切向力平行於接觸面,可進一步分解為縱向力(沿滾動方向)與橫向力(垂直於滾動方向)。在自由滾動狀態下,縱向力主要為滾動阻力,幅值相對較小(約為荷重的 1%-2%);在加速或制動工況下,縱向力顯著增加,可達荷重的數十百分比乃至超過荷重(在高磨擦係數路面上)。橫向力在直線行駛時接近於零,在轉向時根據側偏角與側向加速度而增大。這些力的動態變化在接觸區內產生複雜的應力狀態,激發輪胎的各種振動模態[135][136]。

磨擦力的時間歷程特徵直接影響噪音的頻譜。當輪胎在具有週期性紋理的路面上滾動時,接觸力呈現出週期性或準週期性的時間變化,其基頻對應於紋理的空間週期除以滾動速度。例如,在具有 10 毫米特徵波長的路面上,以 30 公里每小時(8.33 米每秒)的速度行駛時,激勵基頻約為 833 赫茲。接觸力信號中通常包含豐富的諧波成分,這些諧波源於非線性的接觸力學行為以及輪胎結構的非線性響應。頻譜分析顯示,接觸力能量主要集中在數百赫茲至一千赫茲的頻率範圍內,與輪胎噪音的主要能量分佈相一致[137][138]。

Cesbron 等人的實驗研究提供了磨擦力與噪音關係的重要實證證據。他們使用壓力傳感器陣列測量了輪胎在六種不同路面上、不同速度下的動態接觸力,同時使用近接法測量了相應的噪音水平。統計相關性分析表明,在 30 公里每小時的條件下,800 赫茲頻率的接觸力水平與 500-1000 赫茲頻段的噪音水平之間存在高度線性相關性(相關係數接近 0.99)。這一發現表明,路面宏觀紋理(對應於約 10 毫米波長)透過接觸力激勵,在 800 赫茲附近產生輪胎振動,進而在中頻段輻射噪音。這種強相關性為基於接觸力預測噪音提供了理論依據[139]。

接觸力對輪胎振動的激勵可以從強迫振動理論的角度來理解。輪胎可視為一個具有多個自由度的振動系統,其運動方程可表示為 $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F\}$,其中 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分別為質量矩陣、阻尼矩陣與剛度矩陣, $\{u\}$ 為位移向量, $\{F\}$ 為外力向量,代表接觸力激勵。在頻域中,這個方程可改寫為 $([K]-\omega^2[M]+i\omega[C])\{U(\omega)\}=\{F(\omega)\}$,其中 ω 為角頻率, $\{U(\omega)\}$ 與 $\{F(\omega)\}$ 分別為位移與力的頻域表示。系統的頻響函數 $[H(\omega)]=([K]-\omega^2[M]+i\omega[C])^{-1}$ 描述了力激勵與振動響應之間的傳遞特性,其峰值對應於系統的共振頻率(每個模態都有一個「最容易被激發」的頻率,叫做**共振頻率**),即固有頻率附近的激勵會產生最大的振動響應[140][141]。



輪胎的固有頻率與模態形狀是決定其對接觸力響應特性的關鍵。實驗模態分析與數值模態分析表明,輪胎的低階模態(數十赫茲)主要為整體徑向與側向彎曲模態,對應於輪胎作為整體的剛體運動與彈性變形。中階模態(數百赫茲)為周向彎曲波以及胎冠局部振動模態,這些模態與胎面花紋塊的尺寸及其彎曲剛度密切相關。高階模態(數千赫茲)對應於胎面橡膠的局部高頻振動,與微觀的接觸力波動相關。當接觸力的頻譜與某個模態的固有頻率重合時,該模態被有效激發,產生較大的振動幅值與聲學輻射[142][143]。

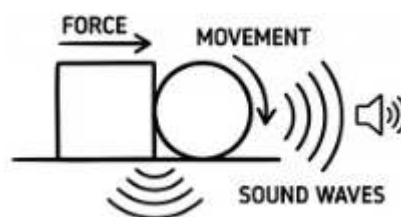
磨擦力的空間分佈特徵也對噪音有重要影響。接觸力並非均勻分佈在接觸區內,而是呈現出空間不均勻性,包括宏觀的壓力梯度(從接觸區中心向邊緣降低)以及微觀的壓力波動(由路面粗糙度引起)。這種空間不均勻性決定了激勵的空間模態,而只有與輪胎結構模態相匹配的空間激勵才能有效激發相應的振動模態。模態匹配理論指出,當激勵的空間波數(Spatial Wavenumber)與結構模態的波數相匹配時,激勵效率最高。因此,即使接觸力幅值很大,如果其空間分佈與輪胎模態不匹配,也可能產生較小的振動響應[144][145]。

磨擦力在不同噪音生成機制中扮演不同角色。在衝擊激勵機制中,法向接觸力的快速變化(如花紋塊衝擊路面突起)是主要激勵源,切向磨擦力的作用相對次要。衝擊產生的脈衝力具有寬頻譜特徵,能夠激發輪胎的多個振動模態,產生中低頻噪音。在黏滑機制中,切向磨擦力起決定性作用:黏滑振盪源於靜磨擦力與動磨擦力之間的差異,以及磨擦係數的速度依賴性。當切向力超過靜磨擦力極限時,橡膠元素突然滑移,釋放累積的彈性能,產生高頻振動與噪音。黏滑噪音的頻率主要由接觸系統的局部剛度與質量決定,典型頻率範圍為 1000-5000 赫茲[146][147]。

在黏斷機制中,法向磨擦力(或法向吸附力)在橡膠元素離開接觸區時起關鍵作用。當橡膠被強制拉離路面時,需要克服黏附力或真空吸力,這種力的突然釋放產生瞬態的高頻振動。黏斷噪音的頻譜較寬,能量主要在 1000 赫茲以上。在潮濕條件下,水膜的表面張力與黏滯效應可能增強黏斷效應,導致噪音特性的變化。空氣泵送機制雖然主要與空氣動力學過程相關,但也受到磨擦力的間接影響:接觸力決定了溝槽的閉合與開啟過程,影響空氣的壓縮與釋放速率,從而影響空氣泵送噪音的幅值與頻譜[148][149]。

磨擦力的測量方法包括直接測量與間接推斷兩類。直接測量通常使用力傳感器,如多維力傳感器(Multi-Axis Load Cell)或壓電傳感器(Piezoelectric Sensor),安裝在輪軸或輪轂上,測量輪胎傳遞到車輛的總力與力矩。這種方法能夠獲得輪胎的整體受力信息,但無法解析接觸區內的力分佈細節。壓力傳感器陣列能夠測量接觸區內的壓力分佈,透過對測量壓力進行積分可以得到合力,但通常僅測量法向力,切向力的測量較為困難。間接推斷方法透過測量輪胎的振動響應(如加速度或位移),結合輪胎的動力學模型,反向估計激勵力。這種方法的優點是非侵入性,但精度依賴於模型的準確性[150][151]。

磨擦力與噪音之間的定量關係可以透過傳遞函數(Transfer Function)來描述。聲學傳遞函數 $H_a(\omega)$ 定義為噪音聲壓 $P(\omega)$ 與激勵力



$F(\omega)$ 之比: $H_a(\omega) = P(\omega) / F(\omega)$ 。這個傳遞函數涵蓋了從力激勵到振動響應再到聲學輻射的全過程,包括輪胎的結構動力學特性與聲學輻射特性。實驗測定傳遞函數的方法是使用已知的激勵力(如衝擊錘或振動台)激發輪胎,同時測量噪音響應,透過頻譜分析得到傳遞函數。一旦獲得了傳遞函數,就可以根據實際行駛時的接觸力預測噪音水平。然而,傳遞函數可能隨行駛條件(如速度、荷重、充氣壓力)而變化,且受到測量條件(如邊界條件、測點位置)的影響,因此其普適性有限[152][153]。

磨擦力的非線性特性對噪音有重要影響。如前所述,磨擦係數是滑移速度、接觸壓力、溫度等多種因素的非線性函數,這種非線性導致接觸力信號中出現諧波失真與組合頻率成分。此外,輪胎結構本身也表現出幾何非線性(大變形)與材料非線性(橡膠的非線性本構關係),這些非線性效應使得輪胎對接觸力的響應呈現出非線性特徵,如跳躍現象(Jump Phenomenon)、亞諧波響應(Subharmonic Response)以及混沌振動(Chaotic Vibration)等。在極端工況下,這些非線性現象可能導致噪音的突然增加或頻譜特徵的顯著變化[154][155]。

磨擦力與噪音之間的相關性還依賴於頻率範圍。在低頻段(數十至一百赫茲),噪音主要由輪胎的整體振動模態與車身結構的共振所主導,接觸力的低頻成分起重要作用。在中頻段(數百赫茲至一千赫茲),接觸力與噪音之間的相關性最強,因為這一頻段對應於花紋衝擊與路面紋理激勵的主要能量範圍,且輪胎的多個重要振動模態位於這一頻段。在高頻段(數千赫茲以上),噪音更多地由局部的黏滑與空氣動力效應主導,接觸力的直接影響可能減弱,但切向磨擦力仍然是黏滑噪音的驅動力[156][157]。



路面紋理與接觸力-噪音關係密切相關。路面紋理透過調製接觸力的時間與空間特徵,從而影響噪音。Cesbron 等人的研究表明,路面的宏觀紋理(波長 4-100 毫米)與 800 赫茲的接觸力水平存在正相關,而 800 赫茲的接觸力又與 500-1000 赫茲的噪音水平正相關,因此路面宏觀紋理透過接觸力這一中間變量影響中頻噪音。路面的微觀紋理(波長小於數毫米)則主要影響高頻接觸力與高頻噪音,但這種影響的定量關係尚不如宏觀紋理清晰。路面的超大紋理(波長大於 50 毫米)主要影響低頻振動,對輪胎噪音的直接影響較小,但可能透過改變輪胎的動態荷重影響接觸條件[158][159]。

磨擦力的隨機性與統計特性也是重要的研究內容。真實路面的粗糙度具有隨機性,導致接觸力呈現出隨機波動特徵。這種隨機性可以透過功率譜密度(Power Spectral Density, PSD)來表徵,描述接觸力能量在不同頻率上的分佈。噪音的隨機特性與接觸力的隨機特性密切相關:如果接觸力的功率譜呈寬頻特徵,噪音也呈寬頻特徵;如果接觸力功率譜在某些頻率上有峰值,噪音譜也相應有峰值。統計能量分析(Statistical Energy Analysis, SEA)是處理隨機振動與噪音問題的有效工具,將系統劃分為若干子系統,透過能量平衡方程描述各子系統之間的能量流動,從而預測噪音的統計特性[160][161]。

3.4 不同路面條件下的磨擦噪音 (Friction Noise Under Different Road Conditions)

路面條件是影響輪胎磨擦噪音的最重要外部因素之一,涵蓋了路面的材料類型、表面紋理特徵、濕度狀態以及溫度等多個方面。不同的路面條件透過改



變輪胎與路面之間的接觸力學行為、磨擦特性以及聲學特性,對噪音的生成機制、頻譜分佈以及幅值水平產生顯著而複雜的影響。理解這些影響對於路面的聲學設計、噪音預測模型的建立以及交通噪音管控政策的制定具有重要意義。本節將分別討論乾燥路面、濕滑路面以及粗糙路面條件下的磨擦噪音特性[162][163]。

路面可從多個角度進行分類。按材料類型,主要分為瀝青混凝土路面(Asphalt Concrete Pavement)與水泥混凝土路面(Portland Cement Concrete Pavement)。瀝青路面由瀝青膠結料與礦料(包括碎石、砂與填料)組成,具有較好的彈性與較低的剛度,且表面相對較軟;水泥混凝土路面由水泥、骨料與水組成,硬度高、剛度大,表面較為堅硬。按表面紋理,路面可分為密級配路面(Dense-Graded Pavement)與開級配路面(Open-Graded Pavement)。密級配路面骨料級配連續,空隙率低(通常小於 5%),表面相對光滑;開級配路面(如多孔瀝青路面,Porous Asphalt)骨料級配不連續,空隙率高(可達 15%-25%),表面多孔且粗糙[164][165]。

路面紋理的多尺度特徵對輪胎噪音有不同層次的影響。根據 ISO 13473 標準,路面紋理按波長分為四個尺度:微觀紋理(Microtexture,波長小於 0.5 毫米)、宏觀紋理(Macrotexture,波長 0.5-50 毫米)、超大紋理(Megatexture,波長 50-500 毫米)與不平度(Roughness/Unevenness,波長大於 500 毫米)。微觀紋理主要影響橡膠與路面之間的微觀接觸與磨擦係數,對高頻噪音(1000 Hz 以上)有重要影響。宏觀紋理對應於骨料的尺寸與分佈,是影響輪胎噪音的最重要紋理尺度,主要影響中頻噪音(500-1000 Hz)。超大紋理與不平度主要影響低頻振動與乘坐舒適性,對輪胎噪音的直接影響較小[166][167]。

路面紋理的測量方法包括接觸式與非接觸式兩類。接觸式方法如砂鋪法(Sand Patch Method)透過將已知體積的細砂鋪在路面上,測量覆蓋面積,推算平均紋理深度(Mean Texture Depth, MTD)。這種方法簡單但測量速度慢,且僅能獲得一個統計平均值。非接觸式方法如激光輪廓儀(Laser Profilometer)使用激光位移傳感器掃描路面,獲得高精度的三維紋理數據。這種方法測量速度快,能夠獲得完整的紋理

波高信息,是目前路面紋理研究的主要工具。從紋理輪廓數據可以計算多種紋理指標,如均方根粗糙度(RMS Roughness)、功率譜密度(PSD)以及分形維數(Fractal Dimension)等[168][169]。

3.4.1 乾燥路面 (Dry Road Surface)

為什麼影響噪音?

想像乾的砂紙,摩擦力最大 → 黏-滑效應最強

輪胎花紋會「卡」在路面紋理裡 → 突然彈開 → 產生「啪啪」聲

就像撕魔鬼氈的聲音!這是最吵的情況

乾燥路面是輪胎噪音研究中最常考慮的基準條件,也是國際標準測試方法(如 ISO 11819-2, ISO 13325)所規定的標準測試環境。在乾燥條件下,輪胎與路面之間形成直接的固-固接觸,磨擦係數相對較高且穩定,噪音生成機制主要包括衝擊激勵、黏滑與黏斷磨擦以及空氣泵送等。乾燥路面條件



下的噪音特性已得到廣泛研究,積累了大量的實驗數據與理論模型,為其他條件下的噪音研究提供了參照基準[170][171]。

乾燥瀝青路面是最常見的路面類型,根據骨料尺寸、級配與施工工藝的不同,可進一步細分為多種類型。密級配瀝青混凝土(Dense Asphalt Concrete, DAC)是傳統的路面類型,骨料最大粒徑通常為 10-20 毫米,表面相對密實,宏觀紋理深度適中(MTD 約 0.5-1.5 毫米)。這種路面的噪音水平處於中等水平,典型的近接法噪音水平(在 80 公里每小時條件下)約為 95-100 分貝。薄層瀝青路面(Thin Layer Asphalt)使用較小的骨料(最大粒徑 6-10 毫米)與較薄的鋪裝層(厚度約 2-3 厘米),表面紋理較細,噪音水平可比傳統密級配路面降低 2-3 分貝[172][173]。

多孔隙瀝青路面(Porous Asphalt, PA)是專門為降噪設計的路面類型,透過採用開級配骨料級配,形成連通的孔隙網絡,空隙率通常為 15%-25%。這種高孔隙率結構具有兩方面的降噪效果:首先,孔隙允許空氣自由流動,大大減弱了空氣泵送噪音機制;其次,孔隙結構具有良好的吸音特性,能夠吸收部分輪胎輻射的聲波能量。實驗研究表明,與傳統密級配瀝青路面相比,多孔隙瀝青路面可實現 7-10 分貝的噪音降低,效果最顯著的頻率範圍為 800-2000 赫茲。然而,多孔隙路面也存在一些挑戰:孔隙容易被灰塵、泥土與碎屑堵塞,導致降噪效果隨時間衰減;在寒冷地區,孔隙中的水分凍結可能破壞路面結構;維護成本相對較高[174][175]。

表面修處理路面(Surface Dressing)是另一種常見的路面類型,透過在既有路面上噴灑瀝青黏結劑並撒布骨料形成新的磨耗層。骨料粒徑通常為 6-14 毫米,形成較粗糙的表面紋理。這種路面的宏觀紋理深度較大(MTD 可達 1.5-3.0 毫米),有利於排水與抗滑,但噪音水平相對較高,可能比密級配路面高 3-5 分貝。細骨料表面修處理(Fine Surface Dressing)使用較小的骨料(粒徑 4-8 毫米),能夠在保持良好抗滑性能的同時降低噪音水平[176][177]。

乾燥混凝土路面通常比瀝青路面產生更高的噪音水平,差異約為 2-4 分貝。這種差異主要源於混凝土路面的高剛度與粗糙表面。混凝土的彈性模量約為 25-35 GPa,遠高於瀝青混合料的 3-7 GPa,較高的剛度導致輪胎與路面之間的衝擊力更大,振動傳遞更有效。混凝土路面的表面紋理通常透過拉毛



(Tining)或刷毛(Brushing)工藝形成,產生規則的縱向或橫向溝槽。橫向拉毛混凝土路面(Transverse Tined Concrete)的噪音水平最高,因為橫向溝槽與輪胎滾動方向垂直,產生強烈的週期性衝擊激勵,導致特徵噪音峰值,俗稱"嗡嗡聲"(Rumble Noise)。縱向拉毛混凝土路面的噪音水平較低,因為溝槽與滾動方向平行,衝擊激勵較弱[178][179]。

暴露骨料混凝土路面(Exposed Aggregate Concrete, EAC)是一種低噪音混凝土路面技術,透過在混凝土初凝後使用化學緩凝劑或水沖洗方法,去除表層水泥漿,暴露出骨料顆粒,形成類似於瀝青路面的粗糙紋理。這種路面的噪音水平顯著低於傳統拉毛混凝土路面,可接近甚至低於密級配瀝青路面的噪音水平。暴露骨料表面的降噪機制包括:不規則的紋理減少了週期性衝擊激勵;骨料之間的微小空隙提供一定的吸音效果;較軟的表面(相對於純混凝土)降低了接觸剛度[180][181]。

路面年齡與磨損狀態對噪音有重要影響。新鋪設的路面通常表面較粗糙,瀝青膜較厚,噪音水平可能相對較高。隨著車輛碾壓,路面表面逐漸被磨光,宏觀紋理深度減小,噪音水平通常呈現出先降低後穩定的趨勢。對於密級配瀝青路面,噪音水平在開放交通後的 6-12 個月內可能降低 2-3 分貝,之後趨於穩定。對於多孔隙瀝青路面,孔隙堵塞是主要的老化機制,隨著孔隙率的降低,降噪效果逐漸減弱,噪音水平可能在 5-10 年內回升 3-5 分貝,接近密級配路面水平。定期清洗與維護可以延緩這一過程[182][183]。

乾燥路面條件下,溫度對噪音的影響主要透過改變輪胎橡膠與路面瀝青的黏彈性特性來實現。較高的路面溫度(30-40 攝氏度)使瀝青軟化,路面剛度降低,同時輪胎橡膠的模量也降低,接觸剛度減小,導致噪音水平輕微降低,幅度約為每 10 攝氏度變化 0.5-1 分貝。在極端高溫條件下(超過 50 攝氏度),瀝青可能過度軟化,路面表面出現泛油或車轍,反而可能增加噪音。較低的溫度(0-10 攝氏度)使材料變硬,接觸剛度增加,噪音水平上升。溫度效應在不同頻率段的表現可能不同:低頻噪音受溫度影響較小,而高頻噪音對溫度更為敏感[184][185]。



路面紋理與輪胎花紋之間的相互作用是乾燥路面噪音的重要影響因素。當路面紋理的特徵波長與輪胎花紋節距相匹配時,可能發生共振放大效應,產生噪音峰值。這種現象稱為紋理-花紋耦合效應(Texture-Tread Pattern Coupling)。為避免這種效應,現代輪胎通常採用變節距設計(Variable Pitch Design),使花紋節距在圓周方向上變化,將噪音能量分散到更寬的頻率範圍,避免單一頻率的峰值。路面設計也可採用類似策略,避免形成規則的週期性紋理[186][187]。

乾燥路面的聲學吸收特性對噪音傳播有重要影響。密級配路面的吸音係數很低(通常小於 0.1),幾乎不吸收聲波能量,輪胎輻射的聲波主要透過路面反射與空間傳播。多孔隙路面的吸音係數顯著提高(可達 0.3-0.6),特別是在中高頻段,能夠吸收部分聲波能量,減少反射聲的貢獻,從而降低測量點的總噪音水平。吸音效應對近接法測量的影響大於統計透過法測量,因為近接法測量點更接近路面,接收到更多的反射聲成分[188][189]。

3.4.2 濕滑路面 (Wet Road Surface)

為什麼影響噪音?

想像塗了肥皂水的地板,摩擦力變小 → 黏-滑效應減弱 → 尖銳摩擦音變少,但! 水被擠壓會發出「咻咻」聲(像捏濕海綿),水花飛濺也會產生「刷刷」聲,整體來說比乾路面安靜一點,但有不同的噪音。

濕滑路面條件對輪胎磨擦噪音產生複雜而顯著的影響,這些影響源於水膜的存在改變了輪胎與路面之間的接觸狀態、磨擦特性以及聲學傳播特性。濕滑條件在實際道路使用中非常常見,特別是在多雨地區,年降雨天數可能佔全年的 30%-50%。因此,理解濕滑路面條件下的噪音特性對於全



面評估輪胎噪音性能以及制定噪音管控策略具有重要現實意義。然而,由於濕滑

條件引入了額外的複雜性,包括水膜厚度的不確定性、水的動力學行為以及測量條件的難以控制等,濕滑路面噪音的研究相對乾燥路面較少,且結論的一致性較低[190][191]。

水膜的存在首先改變了輪胎與路面之間的接觸模式。在乾燥條件下,橡膠直接與路面固體接觸,形成固-固接觸;在濕滑條件下,接觸變為固-液-固三相接觸,水膜作為中間介質改變了力的傳遞方式。水膜厚度是影響濕滑效應的關鍵參數,取決於降雨強度、路面排水能力、車輛速度以及路面坡度等因素。在薄水膜條件下(水膜厚度小於 0.5 毫米),橡膠仍能透過水膜滲透與路面紋理的高點接觸,部分保持固-固接觸,磨擦係數適度降低;在厚水膜條件下(水膜厚度大於 1 毫米),橡膠與路面之間形成完整的水膜隔離,磨擦係數顯著降低,極端情況下可能發生滑水現象(Hydroplaning)[192][193]。

濕滑路面對磨擦係數的影響是廣泛認知的事實:濕路面的峰值磨擦係數通常僅為乾路面的 40%-60%,典型值從乾燥時的 0.7-0.9 降低到濕滑時的 0.3-0.5。磨擦係數的降低主要源於兩個機制:潤滑效應與黏附力降低。水的存在起到潤滑劑作用,降低了橡膠與路面之間的剪切應力;同時,水膜阻斷了橡膠分子與路面之間的直接接觸,削弱了分子間的黏附作用。磨擦係數的降低對車輛的制動與操控性能有嚴重影響,但對噪音的影響則更為複雜,既有降低噪音的機制,也有增加噪音的機制[194][195]。



多項實驗研究表明,濕滑路面條件下的輪胎噪音水平通常高於乾燥路面,增幅約為 1-3 分貝,但這一趨勢並非在所有頻率範圍內均成立。Gardziejczyk 的研究比較了多種車輛在乾濕路面上的噪音水平,發現濕路面噪音平均高出 1.5-2.5 分貝,重型車輛的增幅大於乘用車。Descornet 的研究也報告了類似的結果,並指出噪音增幅與路面紋理深度有關:紋理較深的路面(MTD 大於 1.5 毫米)在濕滑時噪音增幅較小(約 1 分貝),而紋理較淺的路面噪音增幅較大(可達 3 分貝)。這種差異源於路面排水能力的不同:紋理深的路面能夠更有效地排除水分,減少水膜厚度,從而減輕濕滑效應[196][197]。

頻譜分析揭示了濕滑路面對不同頻率噪音的差異化影響。在低頻段(低於 500 赫茲),濕滑路面噪音通常略低於或等於乾燥路面,降低幅度約為 0-2 分貝。這種降低可能源於水膜的阻尼效應:水的黏滯性對低頻振動提供額外阻尼,降低振動幅值。在中頻段(500-1000 赫茲),濕滑路面噪音可能略高於或等於乾燥路面,變化幅度在

±1 分貝範圍內。在高頻段(1000 赫茲以上),濕滑路面噪音顯著高於乾燥路面,增幅可達 3-5 分貝。這種高頻噪音增加是濕滑路面噪音特性的最顯著特徵,源於水相關的噪音生成機制[198][199]。

水飛濺噪音(Water Splash Noise)是濕滑路面特有的噪音源,由輪胎驅逐水膜產生的水滴與水霧的運動與碰撞引起。當輪胎高速透過水膜時,接觸區前緣的水被向前推送,形成水浪(Bow Wave);接觸區兩側的水被橫向噴射,形成水花



(Water Spray);接觸區後緣的水膜被撕裂,形成水霧(Water Mist)。這些水的快速運動過程產生寬頻的氣動噪音,能量主要集中在高頻段。水飛濺噪音的幅值隨車速增加而迅速增大,隨水膜厚度增加而增大,隨輪胎花紋溝槽深度增加而增大。對於重型車輛,由於輪胎較寬、荷重較大,水飛濺效應更為顯著,濕滑噪音增幅可達 4-6 分貝[200][201]。

水泵送噪音(Water Pumping Noise)是濕滑條件下空氣泵送機制的變體,由胎面溝槽中水的快速壓縮與排出引起。當花紋溝槽進入接觸區時,溝槽內的水被壓縮,產生高壓;當溝槽離開接觸區時,水被快速噴出,產生射流。水的可壓縮性遠低於空氣,因此水泵送產生的壓力波動與流速比空氣泵送更為劇烈,產生更高的噪音水平。水泵送噪音的頻率特徵與溝槽的尺寸和滾動速度相關,典型頻率範圍為 1000-3000 赫茲。增加溝槽的寬度與深度有助於降低水泵送噪音,因為較大的溝槽容積能夠緩衝壓力波動[202][203]。

水膜對黏滑與黏斷機制的影響較為複雜。一方面,水的潤滑作用降低了磨擦係數,減小了黏滑振盪的驅動力,可能降低黏滑噪音。多項研究觀測到濕滑路面的中低頻振動水平略低於乾燥路面,這與黏滑效應的減弱相一致。另一方面,水的表面張力與黏滯效應可能增強黏斷機制:當橡膠元素離開接觸區時,水膜的表面張力形成



"液橋"(Liquid Bridge),對橡膠產生吸附力;液橋的突然斷裂產生瞬態高頻振動,類似於乾燥條件下的黏斷現象。這種水介導的黏斷效應可能是高頻噪音增加的一個貢獻因素[204][205]。

路面紋理對濕滑噪音的影響更為顯著。如前所述,宏觀紋理深度決定了路面的排水能力,進而影響水膜厚度與濕滑效應的強度。多孔隙瀝青路面由於其開放的孔隙結構,能夠快速排水,大大減少水膜厚度,因此在濕滑條件下仍能保持良好的降噪效果,濕滑



噪音增幅通常小於 1 分貝。密級配路面的排水能力較弱,濕滑噪音增幅較大。橫向拉毛混凝土路面的排水能力很好,但其粗糙紋理在濕滑時仍產生較高噪音,且由於水飛濺效應,濕滑噪音增幅可達 5-7 分貝[206][207]。

輪胎花紋設計對濕滑噪音也有重要影響。具有良好排水性能的花紋(如方向性花紋、V 型花紋)能夠更快地排除接觸區內的水分,減少水膜厚度,從而降低濕滑噪音。溝槽的寬度、深度與方向都影響排水效率:寬而深的溝槽排水能力強,但可能增加乾燥條件下的空氣泵送噪音;縱向溝槽有利於水的快速排出,橫向溝槽則相對低效。現代輪胎設計通常在降噪與排水性能之間尋求平衡,透過優化溝槽的幾何形狀與佈局,在保持足夠排水能力的同時最小化噪音[208][209]。

濕滑路面噪音的測量面臨特殊挑戰。噪音水平隨水膜厚度變化,而水膜厚度又取決於多種難以控制的因素,導致測量結果的可重複性較差。標準測試方法通常規定在乾燥條件下進行噪音測量,因此濕滑噪音的系統性數據相對缺乏。一些研究者開發了人工濕化路面的方法,透過灑水車在測試路段上噴灑均勻水膜,然後立即進行噪音測量。這種方法能夠在一定程度上控制濕滑條件,但仍無法完全模擬自然降雨的情況。另一個挑戰是水噪音源的定位與分離:水飛濺噪音可能輻射自輪胎的多個部位,包括接觸區前緣、側面以及後緣,這些聲源與輪胎的振動噪音混合在一起,難以單獨測量[210][211]。

濕滑路面對車內噪音的影響可能不同於車外噪音。車外噪音(如統計透過法或近接法測量)主要由輪胎輻射的空氣傳播聲構成,受水飛濺噪音的影響較大。車內噪音除了空氣傳播聲外,還包括透過懸架系統傳遞的結構傳播聲(Structure-Borne Noise)。濕滑條件下,由於水膜的阻尼效應,輪胎的振動水平可能降低,結構傳播噪音相應減小,部分抵消了水飛濺噪音增加的影響。因此,某些研究報告在濕滑條件下車內噪音水平基本不變甚至略有降低,儘管車外噪音增加[212][213]。

3.4.3 粗糙路面 (Rough Road Surface)

為什麼影響噪音?

想像走在石頭路上,輪胎不停地撞擊小突起 → 像敲鼓一樣「咚咚咚」,凹凸越多 → 撞擊頻率越高 → 噪音越大,而且粗糙路面讓輪胎一直振動,停不下來,就像推購物車在磁磚地面上,「喀啦喀啦」很吵!

粗糙路面在本文中特指具有較大宏觀紋理深度或表面不平度的路面,包括粗骨料路面、磨損嚴重的老舊路面以及表面修處理路面等。這些路面的共同特徵是表面起伏較大,對輪胎產生強烈的激勵,通常導致較高的噪音水平。粗糙路面噪音是交

通噪音污染的重要來源,特別是在維護不善的道路網絡中。理解粗糙路面的噪音特性對於路面維護決策、噪音地圖繪製以及降噪措施的優先級排序具有實際意義[214][215]。

路面粗糙度可以透過多種指標來量化。國際粗糙度指數(International Roughness Index, IRI)是最廣泛使用的路面不平度指標,單位為米每公里(m/km),描述路面的縱向不平度,主要反映波長範圍為 1-30 米的路面起伏。IRI 主要與乘坐



舒適性和低頻振動相關,與輪胎噪音的相關性相對較弱。平均紋理深度(MTD)或平均輪廓深度(Mean Profile Depth, MPD)是描述宏觀紋理的指標,單位為毫米,反映波長範圍為 0.5-50 毫米的表面起伏,與輪胎噪音的相關性較強。粗糙路面通常具有較大的 MTD 值(大於 1.5 毫米)或較高的 IRI 值(大於 3 m/km)[216][217]。

粗骨料表面修處理路面是典型的粗糙路面,使用粒徑 10-20 毫米的大骨料撒布在瀝青黏結劑上,形成突出的表面紋理。這種路面的 MTD 通常為 2-4 毫米,宏觀紋理深度是普通密級配路面的 2-4 倍。由於紋理起伏大,輪胎花紋塊與路面骨料之間產生強烈的衝擊,激發高幅值的接觸力波動,導致噪音水平顯著升高。Sandberg 和 Descornet 的經典研究發現,粗骨料表面修處理路面的噪音水平比密級配瀝青路面高 5-8 分貝,是所研究路面類型中噪音最高的。噪音增加主要集中在中頻段(500-1000 赫茲),對應於宏觀紋理激勵的主要頻率範圍[218][219]。

開級配粗骨料路面(Open-Graded Coarse Aggregate)使用大粒徑骨料(10-25 毫米)並省略細骨料與填料,形成開放的骨架結構,兼具高宏觀紋理與高孔隙率。這種路面在乾燥條件下提供優異的抗滑性能,但噪音水平也相對較高。然而,由於孔隙的吸音效應,其噪音水平低於相同紋理深度的密級配粗骨料路面。實驗顯示,與密級配路面相比,開級配粗骨料路面的噪音增加約 3-5 分貝,而相同紋理的密級配粗骨料路面噪音增加可達 6-9 分貝。這表明孔隙的降噪效益能夠部分抵消粗糙紋理的增噪效應[220][221]。

路面磨損與老化可能導致表面粗糙度增加或減少,取決於具體的磨損模式。對於瀝青路面,交通荷重的反覆作用可能導致表層瀝青膠結劑流失,骨料逐漸暴露並突出表面,形成所謂的"骨料突露"(Aggregate Polishing)現象。在這一過程的早期階段,宏觀紋理深度增加,噪音水平可能上升 2-3 分貝。然而,隨著磨損持續,突出的骨料尖角被磨平,表面逐漸光滑,宏觀紋理深度反而減小,噪音水平可能回落。對



於混凝土路面,表面磨損通常表現為拉毛溝槽的逐漸填平與骨料的磨光,導致紋理深度減小,噪音水平降低[222][223]。

路面損壞對噪音有顯著影響,包括裂縫(Cracking)、坑槽(Potholes)、車轍(Rutting)以及波浪(Corrugation)等病害。縱向與橫向裂縫本身對噪音的影響較小,因為裂縫寬度通常僅為數毫米,不足以顯著改變接觸力學行為。但裂縫可能導致路面結構的局部剛度變化,在輪胎經過時產生瞬態的振動激勵。坑槽是局部的路面缺失,產生強烈的衝擊激勵,導致瞬態噪音峰值,幅值可能比正常滾動噪音高 10-20 分貝。車轍是路面的永久性變形,形成縱向凹陷,改變輪胎的荷重分佈與接觸幾何,可能增加滾動噪音 1-3 分貝。波浪是路面的週期性起伏,波長通常為 0.5-3 米,頻率範圍(在典型車速下)為 5-50 赫茲,主要激發車輛的低頻振動,對輪胎高頻噪音的影響較小[224][225]。

粗糙路面對不同頻率噪音的影響呈現出頻率選擇性特徵。宏觀紋理(波長 0.5-50 毫米)主要影響中頻噪音(500-2000 赫茲)。根據關係 $f=V/\lambda$,其中 f 為頻率, V 為行駛速度, λ 為紋理波長,在速度 80 公里每小時(22.2 米每秒)條件下,10 毫米波長對應約 2220 赫茲,50 毫米波長對應約 444 赫茲,正好覆蓋中頻段。超大紋理(波長 50-500 毫米)主要影響低頻噪音(50-500 赫茲),對應於輪胎的低階振動模態與車身結構的共振,更多地影響車內噪音與振動舒適性而非車外噪音。微觀紋理對高頻噪音(2000 赫茲以上)有影響,但粗糙路面的主要特徵是宏觀紋理較大,微觀紋理的影響相對次要[226][227]。



粗糙路面與輪胎花紋之間的相互作用可能產生共振放大效應。當路面紋理的主導波長與輪胎花紋節距接近時,接觸力的週期性波動可能與輪胎的某個固有頻率重合,產生共振,導致噪音水平顯著增加,增幅可達 5-10 分貝。這種共振現象稱為"紋理-花紋共振"(Texture-Tread Resonance)。為避免共振,輪胎設計採用變節距技術,路面設計則應避免形成單一主導波長的週期性紋理。實際路面的紋理通常具有寬頻譜特徵,即包含多種波長成分,共振現象相對少見,但在某些特殊情況下(如規則拉毛的混凝土路面)仍可能發生[228][229]。

粗糙路面的聲學測量需要考慮路面狀態的空間變異性。路面粗糙度在空間上可能分佈不均,導致噪音水平隨測量位置變化。標準測試方法(如 ISO 11819-2)規定測量路段長度至少為 100 米,並對多個路段的測量結果進行平均,以獲得代表性的噪音水平。對於損壞嚴重的路面,空間變異性更大,需要更長的測量路段或更多的重

複測量以提高結果的可靠性。此外,粗糙路面可能導致車輛速度波動,而噪音水平對速度高度敏感(每 10%速度變化對應約 3 分貝噪音變化),因此需要嚴格控制測量速度[230][231]。

路面維護與修復對噪音水平有重要影響。表面修處理是常見的維護措施,透過施加新的磨耗層恢復路面的表面功能。傳統粗骨料表面修處理雖然能夠恢復抗滑性能,但會顯著增加噪音水平(5-8 分貝)。



細骨料表面修處理使用較小的骨料(4-8 毫米),噪音增加較少(2-4 分貝),且能提供足夠的抗滑性能,是在噪音敏感區域更優的選擇。薄層罩面(Thin Overlay)使用薄層瀝青混合料(厚度 2-4 厘米)覆蓋既有路面,能夠恢復表面平整度與紋理特性,噪音水平取決於罩面材料的類型,使用低噪音瀝青混合料可實現噪音降低 3-5 分貝[232][233]。

路面銑刨(Milling)與刨磨(Grinding)是修復混凝土路面的常用方法,透過機械加工去除受損表層,形成新的表面紋理。金剛石刨磨(Diamond Grinding)能夠產生細密的縱向紋理,噪音水平顯著低於橫向拉毛混凝土路面,降低幅度可達 5-8 分貝,接近瀝青路面水平。下一代混凝土表面(Next Generation Concrete Surface, NGCS)技術包括優化刨磨、暴露骨料以及表面紋理設計等方法,旨在實現混凝土路面的低噪音與良好抗滑性能。這些技術已在多個國家得到應用,效果良好,但長期耐久性與成本效益仍需進一步評估[234][235]。

粗糙路面噪音與其他環境因素的交互作用值得關注。在濕滑條件下,粗糙路面的深紋理有利於排水,減少水膜厚度,因此濕滑噪音增幅相對較小(1-2 分貝)。在寒冷地區,粗糙路面的裂縫與孔隙容易積水並凍結,導致路面進一步破壞,噪音水平隨時間惡化。在炎熱地區,粗糙路面的大表面積導致更快的溫度升降,瀝青老化速度加快,影響長期噪音性能。這些交互作用表明,路面降噪設計需要綜合考慮氣候條件、交通荷重以及維護策略[236][237]。

一、乾燥路面 (Dry Road Surface)

乾燥路面可以想成「乾淨、沒有水的柏油地」。

在這種情況下,輪胎橡膠會直接貼著路面粗糙顆粒,橡膠和地面之間的接觸非常充分,摩擦力最大。

橡膠在滾動時,會不斷發生:

橡膠被拉住 → 變形 → 放開 → 回彈

這個過程就像你用手指在桌面上用力拖動橡皮擦一樣。

因此乾燥路面時：

- 摩擦最穩定
- 輪胎抓地力最好
- 噪音主要來自橡膠的變形與回彈振動

這類噪音通常是連續、穩定的滾動聲或低頻轟鳴聲，在高速行駛時特別明顯。

一句話理解：👉 乾路＝橡膠抓很緊，吵得很穩定

二、濕滑路面（Wet Road Surface）

濕滑路面可以想成「輪胎和地面中間隔了一層水」。

當路面有水時，水膜會：

- 降低橡膠與路面的直接接觸
- 減少摩擦力
- 改變橡膠變形的方式

在低速時，輪胎會「壓破水膜」，噪音反而可能比乾燥路面小；

但在中高速時，水會被擠壓、抽吸，甚至在胎紋中快速流動，產生水流相關噪音。

此外，因為抓地力下降，橡膠容易出現：

黏住 → 滑動 → 再黏住

這種不穩定摩擦，會產生比較突發、不規則的聲音。

一句話理解：👉 濕路＝橡膠抓不穩，聲音變得比較亂

三、粗糙路面（Rough Road Surface）

粗糙路面可以想成「滿是小石頭、凹凸不平的地板」。

這時候，輪胎不只是在「磨擦」，而是同時在：

- 被很多突起顆粒敲擊
- 被迫快速變形
- 產生強烈的結構振動

每一個路面突起，都像是在敲輪胎一次。

當車速越快，敲擊頻率越高，噪音也就越大。

在粗糙路面上：

- 摩擦噪音和結構振動噪音會混在一起
- 聲音通常比較大聲、低頻、厚重

- 人會覺得「整個路面都在吵」

一句話理解：👉 粗路 = 輪胎一直被敲，聲音最大也最厚

四、不同路面條件與噪音的比較表（重點整理）

路面條件	輪胎在做什麼（白話）	磨擦噪音特性	常見聽感
乾燥路面	橡膠緊貼路面、不斷變形回彈	穩定、連續的磨擦振動	低頻轟鳴、規律滾動聲
濕滑路面	橡膠隔著水膜抓地	磨擦不穩定，混合水流效應	雜音、偶發尖聲、水聲
粗糙路面	橡膠被大量顆粒敲擊	磨擦 + 結構振動同時存在	大聲、厚重、整體噪音

3.5 速度對磨擦噪音的影響 (Effect of Speed on Friction Noise)

為什麼影響噪音？

一般而言，三個主要原因：

1. 磨擦頻率變高

- 速度越快 → 每秒磨擦次數越多 → 聲音頻率變高(變尖銳)

2. 能量變大

- 速度越快 → 撞擊能量越大 → 噪音越響
- 就像快速打鼓比慢速打鼓響！

3. 空氣噪音出現

- 速度很快時(高速公路),開始有「風切聲」
- 輪胎花紋打到空氣,發出「呼呼」聲
- 速度越快,這種噪音越明顯

行駛速度是影響輪胎磨擦噪音的最重要參數之一,對噪音的幅值、頻譜以及主導機制都有顯著而系統的影響。理解速度效應對於噪音預測模型的建立、交通管理策略的制定以及降噪措施的評估至關重要。速度對噪音的影響涉及多



個物理過程:接觸力的變化、振動激勵頻率的遷移、空氣動力效應的增強以及溫度效應等。本節將系統闡述速度如何透過這些機制影響輪胎磨擦噪音,並討論速度相關的噪音控制策略[238][239]。

輪胎噪音水平與行駛速度之間的基本關係可以用冪律函數(Power Law)來描述： $L=L_0+n\cdot\log_{10}(V/V_0)$,其中L為噪音水平(分貝), L_0 為參考速度 L_0 處的噪音水平, n 為速度指數(Speed Exponent), V 為實際速度。這個公式的物理意義是：

- 噪音水平隨速度呈對數增長,而非線性增長
- 速度每增加一倍(如 50→100 km/h),噪音增加 $n\times\log_{10}(2)\approx 0.3n$ 分貝

速度指數 n 反映了噪音隨速度變化的快慢,其值取決於車輛類型、輪胎特性、路面條件以及頻率範圍。對於乘用車,總體 A 計權噪音水平的速度指數通常在 20-40 範圍內,意味著速度每增加一倍,噪音水平增加 6-12 分貝。對於重型車輛,速度指數通常在 30-40 範圍內,略高於乘用車。這些經驗值被廣泛應用於交通噪音預測模型,如歐洲的 CNOSSOS-EU 模型與美國的 TNM 模型[240][241]。

基於學術文獻和研究資料,我現在可以為您提供完整的分析:

▮ 速度指數 n 的典型數值

根據國際研究,速度指數 n 的數值範圍如下:

一、不同噪音機制的速度指數

噪音產生機制	速度指數 n	主導頻率範圍
胎面/路面衝擊 (Tread/Texture Impact)	3-4	≤ 1000 Hz
黏著-滑移 (Stick/Slip)	3-4	1000-3000 Hz
黏著-斷裂 (Stick/Snap)	3-4	1000-3000 Hz
空氣泵送 (Air Pumping)	4-5	> 1000 Hz
空氣擾流 (Air Turbulence)	5-6	高頻區域
管道共振 (Pipe Resonance)	0	特定頻率
赫姆霍茲共振 (Helmholtz Resonance)	0	特定頻率

註: 速度指數為 0 表示該機制的放大效應與速度無關,但僅限於共振放大,而非噪音產生本身。

二、車輛類型的速度係數

根據 CNOSSOS-EU 和國際標準,實務上常用的 B 係數值(公式: $L = A + B \cdot \log_{10}(V)$):

車輛類型	B 係數範圍	整體速度指數 n
小客車 (Passenger Cars)	30-35	約 3.0-3.5
輕型商用車 (Light Commercial Vehicles)	30-35	約 3.0-3.5
中型卡車 (Medium Trucks)	32-37	約 3.2-3.7
重型卡車 (Heavy Trucks)	33-38	約 3.3-3.8

CPX 測量標準: $B = 35$ (近接拖車法標準化數值)

三、頻率相關的速度指數分布

研究顯示速度指數 n 隨頻率變化的特性:

頻率範圍	速度指數 n
< 500 Hz	3.5-4.0
500-800 Hz	2.5-3.5 (下降區)
800-1600 Hz	3.5-4.5
> 1600 Hz	4.0-5.0

重要發現: 在 **500-800 Hz** 頻段,速度指數會明顯下降,這與輪胎結構共振特性有關。

四、影響速度指數的關鍵因素

A. 車輛類型影響

1. 小客車:

- 輪胎較窄(165-215mm)
- 胎壓較高(2.2-2.5 bar)
- 主導頻率: 800-1200 Hz
- 速度 > 40 km/h 時輪胎噪音主導

2. 重型卡車:

- 輪胎寬度更大,但承載力高 5-7 倍
- 噪音峰值偏向低頻(< 800 Hz)
- A 加權後整體噪音可能低於高性能轎車
- 速度 > 70 km/h 時輪胎噪音主導

B. 輪胎特性影響

參數	對速度指數的影響
輪胎寬度	每增加 10mm → +0.3-0.4 dB (70 km/h)
橡膠硬度	每增加 10 Shore A → +1-2.5 dB
胎面花紋	攻擊性花紋 → n 值增加 0.2-0.5
徑向/斜交結構	徑向胎比斜交胎低 2 dB
帶束層剛度	高剛度 → 降低空氣泵送效應

C. 路面條件影響

路面類型	速度指數修正	主要機制
光滑密實瀝青 (ISO 10844)	n ≈ 3.0-3.3	空氣泵送為主
多孔隙瀝青 (Porous Asphalt)	n ≈ 2.8-3.2	衝擊減弱
粗糙混凝土	n ≈ 3.5-4.0	衝擊加劇
石塊鋪面	n ≈ 4.0-4.5	強烈衝擊

實例: 多孔隙瀝青可降低噪音 3-5 dB,且速度敏感性降低。

五、實用計算範例

範例 1: 速度增加一倍的噪音增量

若速度從 50 km/h 增加到 100 km/h:

$$\Delta L = n \times \log_{10}(100/50)$$

$$= n \times \log_{10}(2)$$

$$= n \times 0.301$$

≈ 0.3n dB

- 小客車 (n=3.3): 增加約 1.0 dB
- 重型卡車 (n=3.6): 增加約 1.1 dB
- 空氣泵送機制 (n=4.5): 增加約 1.4 dB

範例 2: 標準化公式應用

使用標準公式 $L = A + 35 \cdot \log_{10}(V)$:

- 60 km/h 測量值: 72 dB
- 標準化至 80 km/h:

$$\begin{aligned}L_{80} &= 72 + 35 \times \log_{10}(80/60) \\ &= 72 + 35 \times 0.125 \\ &= 72 + 4.4 \\ &= 76.4 \text{ dB}\end{aligned}$$

六、結論與應用建議

1. 冪律關係成立: $L = L_0 + n \cdot \log_{10}(V/V_0)$ 是國際公認的模型
2. 速度指數 n 範圍: 通常為 3.0-4.0, 特殊機制可達 5-6
3. 多因素影響: 車輛類型、輪胎特性、路面條件、頻率範圍都會影響 n 值

實務應用要點

- 噪音預測: 使用 $B=30-35$ 作為一般車輛的經驗值
- 低噪音設計: 優先降低高頻噪音(n 值較大區域)
- 路面選擇: 多孔隙路面可同時降低 n 值和基準噪音 L_0
- 電動車考量: 無引擎遮蔽效應, 輪胎噪音在全速域更明顯

七、參考標準

- ISO 9613-2: 戶外聲傳播衰減計算
- ISO 362-1: 加速行駛噪音測量
- CNOSSOS-EU: 歐盟環境噪音評估方法
- ISO 10844: 標準測試路面規範

速度對噪音的影響在不同頻率範圍內表現出差異化特徵:

- 在低頻段(50-200 赫茲), 速度指數相對較低, 約為 10-20, 表明低頻噪音對速度的敏感性較弱。這一頻段的噪音主要由輪胎的低階振動模態以及動力系統噪音貢獻, 而這些源的強度隨速度變化相對緩慢。

- 在中頻段(200-1000 赫茲),速度指數增加到 20-35,表明中頻噪音隨速度變化較快。這一頻段的噪音主要由花紋衝擊與路面紋理激勵產生,激勵強度與速度密切相關。
- 在高頻段(1000-5000 赫茲),速度指數進一步增加到 30-50,表明高頻噪音對速度高度敏感。這一頻段的噪音主要由空氣泵送、黏滑磨擦以及空氣動力效應產生,這些機制的強度隨速度快速增加[242][243]。

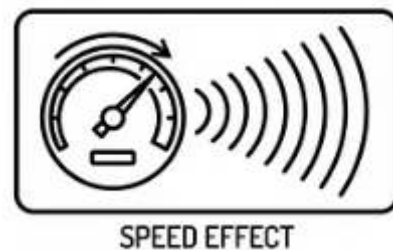
速度對接觸力的影響是複雜的。Cesbron 等人的實驗研究發現,接觸力的均方根值(RMS)在 30-50 公里每小時範圍內基本不隨速度變化,但接觸力的頻譜特徵隨速度顯著變化。這一看似矛盾的現象可以理解為:接觸力的總能量主要由路面紋理的幾何特徵決定,與速度關係不大;但接觸力能量在頻域的分佈隨速度變化,因為相同的紋理波長在不同速度下對應不同的激勵頻率。具體而言,速度增加導致激勵頻率向高頻遷移,根據關係 $f=V/\lambda$,速度增加 n 倍,所有激勵頻率都相應增加 n 倍。這種頻率遷移改變了接觸力頻譜與輪胎固有頻率之間的匹配關係,從而改變輪胎的振動響應與噪音輻射[244][245]。為什麼會影響噪音?

地面有多凹凸(能量)不會變,但你騎越快,顛簸的節奏(頻率)就越快,就可能剛好讓輪胎發出更大的聲音!「路面像一首固定的樂譜,輪胎是樂器。你開得越快,這首曲子的『播放速度』越快,音調就越高。雖然樂譜的音符總數沒變(RMS 不變),但音調改變了(頻譜變化),輪胎這個『樂器』對不同音調的共鳴程度不同,所以產生的噪音也不同。當播放速度恰好讓某個音符對準輪胎的共鳴點時,噪音就會特別大!」

一、輪胎振動

輪胎振動對速度的響應可以從模態(振動方式)激勵理論來理解。輪胎的固有頻率主要由其結構特性(質量、剛度、阻尼)決定,在靜止或旋轉狀態下相對穩定(旋轉效應對固有頻率有輕微影響,如前所述)。當接觸力的某個頻率成分與輪胎的某個固有頻率重合時,該模態被有效激發,產生共振,振動幅值顯著增大。隨著速度變化,接觸力頻譜向高頻或低頻遷移,不同的固有頻率依次被激發,導致噪音頻譜的變化。

在某些速度下,主要的激勵頻率可能恰好避開了輪胎的主要固有頻率,導致噪音水平相對較低;而在其他速度下,激勵頻率與固有頻率良好匹配,導致噪音水平較高。



這種速度相關的模態激勵解釋了為什麼噪音水平隨速度的變化並非完全平滑,而是可能呈現出波動特徵[246][247]。

模態激勵理論告訴我們：

「輪胎像一個複雜的樂器，有很多特定的共振頻率（模態）。當你開得越快，路面會用越高的頻率『彈奏』這個樂器，激發不同的振動模式，產生不同音調的噪音。噪音不是簡單地隨速度變大，而是當速度讓激勵頻率接近某個共振頻率時，噪音會暴增！」

孔隙吸收空氣泵送噪音 + 降低高頻激勵強度 → 高頻模態響應降低 → 整體噪音下降 3-5 dB

二、空氣泵送效應

空氣泵送噪音對速度高度敏感,是高速條件下輪胎噪音的主要貢獻者之一。空氣泵送效應的強度與溝槽的閉合與開

啟速率成正比,而速率直接正比於滾動速度。此外,空氣被壓縮與釋放時產生的壓力波動幅值也隨速度增加,因為更高的速度意味著更快的



體積變化率,產生更強的聲源。理論分析與實驗觀測表明,空氣泵送噪音的速度指數在 50-60 範圍內,遠高於總體噪音的速度指數。這意味著在低速條件下(如 30 公里每小時),空氣泵送噪音相對較弱,輪胎噪音主要由衝擊與磨擦機制主導;而在高速條件下(如 100 公里每小時以上),空氣泵送噪音可能成為主導噪音源[248][249]。黏滑磨擦噪音的速度依賴性源於磨擦係數的速度依賴性以及黏滑頻率的變化。如前所述,磨擦係數通常隨滑移速度增加而降低,這種負斜率特性是黏滑振盪的動力學條件。在較低的行駛速度下,滑移速度也較低,磨擦係數較高,黏滑振盪的幅值較大。然而,黏滑頻率與接觸系統的剛度和質量有關,與行駛速度的直接關係較弱。因此,黏滑噪音的速度指數可能低於空氣泵送噪音,但仍高於衝擊噪音。實驗數據顯示,黏滑主導的高頻噪音(2000-5000 赫茲)的速度指數約為 30-40。此外,在動態工況(加速、制動、轉向)下,滑移率增加,黏滑效應顯著增強,高頻噪音水平可能比自由滾動時高 5-10 分貝[250][251]。

三、空氣動力

空氣動力噪音在高速條件下變得重要,包括輪胎周圍的空氣湍流噪音以及輪胎旋轉產生的渦流噪音(Vortex Shedding Noise)。輪胎以高速旋轉時,表面花紋塊與溝

槽對空氣流動產生擾動,形成湍流邊界層與尾流,產生寬頻的空氣動力噪音。根據空氣動力學理論,湍流噪音的聲功率正比於速度的 5-6 次方,因此速度指數約為 50-60,與空氣泵送噪音相當。然而,空氣動力噪音通常在速度超過 110-130 公里每小時後才變得顯著,對於乘用車的正常行駛速度範圍(50-120 公里每小時),其貢獻相對較小。對於高速列車與飛機,空氣動力噪音是主導噪音源,但對於道路車輛,輪胎/路面噪音仍是主要貢獻者[252][253]。

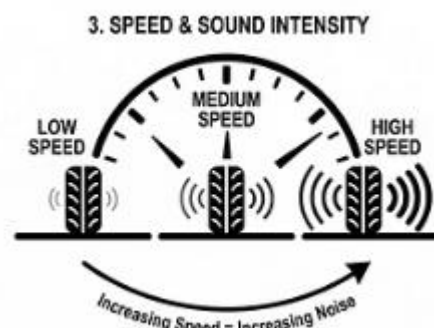
速度對溫度的影響間接影響噪音特性。輪胎在行駛過程中,由於橡膠的黏彈性能量耗散以及磨擦生熱,溫度逐漸升高。溫度升高的幅度與行駛速度、荷重以及環境溫度有關。在高速長時間行駛後,胎面溫度可能比環境溫度高 20-40 攝氏度。溫度升高導致橡膠軟化,模量降低,從而改變接觸剛度、磨擦係數以及黏彈性響應特性。一般而言,溫度升高使噪音水平輕微降低,幅度約為每 10 攝氏度變化 0.5-1 分貝。然而,這種溫度效應在不同速度下可能有所不同:高速行駛時溫度升高更多,溫度降噪效應可能更顯著,部分抵消速度增加的增噪效應[254][255]。

動力系統噪音與輪胎噪音的相對貢獻隨速度變化。在低速條件下(低於 30-40 公里每小時),動力系統噪音(包括發動機噪音、排氣噪音、傳動系統噪音)通常是車輛總噪音的主導貢獻者,輪胎噪音相對較弱。隨著速度增加,動力系統噪音的增長速度慢於輪胎噪音(動力系統噪音的速度指數約為 10-20),因此在中高速條件下(高於 50-60 公里每小時),輪胎噪音逐漸超過動力系統噪音,成為主導噪音源。在高速條件下(高於 80-100 公里每小時),輪胎噪音通常比動力系統噪音高 5-10 分貝,佔據絕對主導地位。這種轉變速度稱為"交叉速度"(Crossover Speed),是車輛噪音特性的重要參數[256][257]。

四、輪胎類型與花紋設計

輪胎類型與花紋設計對速度效應有影響。光面輪胎(Slick Tire,無花紋)的空氣泵送噪音很弱,噪音主要由衝擊與磨擦機制產生,速度指數相對較低,約為 20-30。花紋輪胎的空氣泵送噪音較強,特別是具有深溝槽的越野輪胎或冬季輪胎,速度指數較高,約為 30-40。低噪音輪胎(Low-Noise Tire)透過優化花紋設計,

減小溝槽體積,降低空氣泵送效應,能夠實現較低的速度指數。一些先進的低噪音



輪胎透過在溝槽底部設置吸音材料或多孔結構,進一步降低空氣泵送噪音,在高速條件下的降噪效果可達 3-5 分貝[258][259]。

路面類型對速度效應也有影響。多孔隙瀝青路面由於其吸音特性,能夠有效降低中高頻噪音,且降噪效果隨頻率增加而增強。因此,在多孔隙路面上行駛,高頻噪音的速度指數降低,總體噪音的速度指數也相應降低,從通常的 30-35 降低到 25-30。這意味著在多孔隙路面上,速度限制的降噪效益相對較小:速度從 100 公里每小時降低到 80 公里每小時(降低 20%),在密級配路面上噪音降低約 2.5 分貝,而在多孔隙路面上僅降低約 2 分貝。然而,多孔隙路面的絕對噪音水平仍顯著低於密級配路面,因此從總體降噪效果而言,多孔隙路面仍是優選方案[260][261]。

速度限制是交通噪音管控的常用措施,透過降低行駛速度來降低噪音水平。根據速度指數 $n=30$ 的典型值,速度從 100 公里每小時降低到 80 公里每小時,噪音降低約 2.9 分貝;速度從 100 公里每小時降低到 50 公里每小時,噪音降低約 9 分貝。這種降噪效果是立即且確定的,無需任何基礎設施投資,因此在噪音敏感區域(如居民區、醫院、學校附近)廣泛應用。然而,速度限制也有負面影響,包括增加通行時間、降低道路通行能力、可能增加燃油消耗與排放(如果速度降低到發動機最佳效率區間之外)。因此,速度限制需要在噪音效益與交通效率之間進行權衡 [262][263]。

動態速度管理(Dynamic Speed Management)是近年來發展的智能交通管理策略,根據實時交通狀況、天氣條件以及噪音水平動態調整速度限制。在交通流量較小、環境噪音較低的時段(如深夜),可以放寬速度限制以提高通行效率;在交通流量大、噪音水平高的時段(如早晚高峰),或在噪音敏感時段(如夜間),可以實施更嚴格的速度限制以保護聲環境。這種策略需要配合先進的交通監測系統與可變信息標誌,實施成本較高,但能夠在保證交通效率的同時實現噪音管控[264][265]。

速度與其他噪音影響因素的交互作用值得關注。速度與荷重的交互作用:荷重增加導致接觸面積增大,接觸力增加,噪音水平上升;速度增加強化這種效應,因為更高的動態荷重波動激發更強的振動。速度與路面條件的交互作用:在粗糙路面上,速度效應更顯著,因為粗糙紋理產生的激勵強度隨速度快速增加;在平滑路面上,速度效應相對較弱。速度與環境條件的交互作用:在濕滑條件下,水飛濺噪音隨速度快速增加(速度指數



可達 50-60),使濕滑路面的速度效應比乾燥路面更強[266][267]。

行駛速度不僅決定輪胎磨擦噪音的大小，也改變其主導機制與頻譜特性。

低速時噪音主要受微滑動與動力系統影響；中速時輪胎-路面互動成為主導；高速時空氣泵送與氣動效應迅速放大，使噪音對速度高度敏感。行駛速度不只讓噪音變大，而是改變「誰在發聲」：低速聽到摩擦細節，中速輪胎成為主角，高速則由空氣效應接手主導。

結論 (Conclusions)

一、磨擦噪音基本理論

理論基礎

輪胎磨擦噪音的基本理論建立在固體力學、聲學和摩擦學的交叉基礎上，本質是一個機械能轉換為聲能的過程。這個過程涉及：

1. 橡膠與路面的接觸力學行為
2. 能量耗散機制
3. 聲波傳播過程

輪胎作為高度複雜的黏彈性結構，其與路面的接觸過程涉及多尺度、多物理場的耦合現象。

核心理論機制

1. 黏著理論與遲滯理論（橡膠摩擦的兩大機制）

黏著理論（Adhesion Theory）：

- 原理：橡膠與路面在分子尺度上形成短暫的黏合鍵
- 能量耗散：這些鍵的斷裂需要消耗能量
- 主導條件：
 - 平滑表面
 - 低速條件
 - 乾燥環境
- 影響因素：
 - 對溫度和速度高度敏感
 - 溫度升高，分子運動增強，黏著效應增強
 - 速度過快，接觸時間短，黏著效應減弱

遲滯理論（Hysteresis Theory）：

- 原理：橡膠受到路面粗糙度引起的週期性變形時，由於材料的黏彈性而產生能量損失
- 物理過程：
 - 橡膠在路面突起處被壓縮
 - 離開突起時回彈
 - 加載和卸載路徑不同（遲滯環）
 - 形成能量耗散
- 主導條件：
 - 對於輪胎與瀝青或混凝土路面的接觸，遲滯機制通常佔據主導地位
 - 特別是在中高速行駛條件下

兩種機制的相對貢獻：

- 實際路面上，通常是兩種機制的複合作用
- 瀝青/混凝土路面：遲滯機制主導（60-80%）
- 光滑表面：黏著機制主導

2. 黏滑現象（Stick-Slip Phenomenon）

基本概念：

一種不連續的運動模式，在接觸區域交替出現黏著（靜止）和滑動（運動）狀態。

物理過程：

1. 黏著階段：
 - 橡膠元素與路面黏著
 - 切向力累積
 - 彈性變形增加
2. 滑動階段：
 - 切向力超過靜摩擦力極限
 - 突然滑動
 - 釋放儲存的彈性能
 - 產生快速振動
3. 循環重複：產生週期性或準週期性振盪

頻率特性：

- 黏滑振盪頻率與接觸系統的動力特性相關：
 - 橡膠局部元素的剛度

- 質量
- 阻尼

產生條件（負斜率特性）：

- 當摩擦係數隨滑移速度增加而降低時，系統呈現「負斜率特性」
- 此時黏滑振盪較容易產生
- 數學條件： $d\mu/dv < 0$

噪音特徵：

- 產生高頻、尖銳的噪音
- 典型頻率範圍：500-2000 Hz
- 音調性明顯，主觀煩惱度高

3. 黏斷現象（Stick-Snap Mechanism）

發生位置：

主要發生於接觸區後緣（輪胎離開路面處）

物理過程：

1. 橡膠元素與路面之間存在黏附力（或濕滑時的液橋）
2. 當輪胎滾動離開時，黏附力被拉伸
3. 達到臨界點時，吸附力突然被克服
4. 橡膠元素如同被彈開，產生瞬態的高頻振動
5. 向周圍空氣輻射聲波

噪音特徵：

- 高頻脈衝噪音
- 典型頻率： >2000 Hz
- 在濕滑路面更為明顯（液橋效應）

4. 衝擊激勵機制（Impact Excitation Mechanism）

基本概念：

著重於胎面花紋塊與路面紋理之間的突然接觸所產生的瞬態衝擊力。

衝擊源：

- 花紋塊進入接觸區（snap-in）
- 花紋塊離開接觸區（snap-out）
- 花紋塊與路面突起的碰撞

特徵：

- 產生脈衝狀的接觸力
- 激發輪胎的多種振動模態
- 頻率範圍寬廣

振動模態與聲輻射

輪胎振動模態決定了噪音的頻率分佈和輻射效率。

主要振動模態：

徑向振動模態（Radial Modes）：

- 低階徑向模態（1 階、2 階）：
 - 頻率範圍：100-300 Hz
 - 與車體懸吊系統固有頻率相近
 - 主要影響車內低頻噪音
- 高階徑向模態（3 階以上）：
 - 頻率範圍：>1000 Hz
 - 主導高頻胎噪
 - 聲學輻射效率最高

周向彎曲波（Circumferential Bending Waves）：

- 頻率範圍：500-1000 Hz
- 與中高頻車外噪音顯著相關
- 沿胎面周向傳播

側壁模態：

- 影響車內噪音傳遞
- 低頻振動主導

扭轉模態：

- 與操控穩定性相關
- 對噪音貢獻相對較小

旋轉效應（Rotation Effects）：

科氏力效應：

- 輪胎旋轉產生的科氏力導致模態頻率分離
- 前行波（forward traveling wave）
- 後行波（backward traveling wave）

頻率漂移：

- 固有頻率隨速度提升而上移
- 「以某典型模態有效波長約 1 m 為例，車速每增加 10 km/h，大約會造成數 Hz 等級的固有頻率漂移。」或「頻率隨速度大致成正比 ($f \propto V$)，具體值視對應模態的等效波長而定。」
- 高速時模態分佈顯著變化

離心效應：

- 改變輪胎的應力狀態
- 影響接觸特性和振動特性

黏彈性特性的數學描述

複數模量 (Complex Modulus)：

$$E^* = E' + iE''$$

其中：

- E' (儲存模量, Storage Modulus)：彈性成分，能量儲存
- E'' (損耗模量, Loss Modulus)：黏性成分，能量耗散
- i ：虛數單位

損耗因子 (Loss Factor)：

$$\tan \delta = E''/E'$$

- 物理意義：每個應變循環中耗散能量與儲存能量的比值
- 高 $\tan \delta$ ：高阻尼，有利於降噪，但可能增加滾動阻力
- 低 $\tan \delta$ ：低阻尼，低滾動阻力，但振動衰減慢

時溫等效原理 (Time-Temperature Superposition)：

- 溫度降低 \approx 頻率增加
- 溫度升高 \approx 頻率降低
- 可以通過改變溫度來研究不同頻率下的材料行為

頻率依賴性：

橡膠模量隨頻率增加而增加：

- 低頻 (<100 Hz)：橡膠較軟，模量低
- 高頻 (>1000 Hz)：橡膠變硬，模量高
- 這解釋了為什麼高頻噪音更難控制

綜合機制

輪胎摩擦噪音的產生是以下多種機制的複雜耦合：

1. 黏著與遲滯：提供基礎摩擦力和能量耗散
2. 黏滑振盪：產生週期性高頻激勵
3. 黏斷現象：產生瞬態高頻脈衝
4. 衝擊激勵：激發寬頻振動模態
5. 結構振動：將機械能轉換為振動能
6. 聲輻射：振動能轉換為聲能並傳播

這些機制在不同的：

- 頻率範圍
- 速度區間
- 路面條件
- 接觸狀態

下有不同的主導地位，形成複雜的噪音頻譜。

二、輪胎與路面接觸特性

3.2.1 接觸面積與壓力分佈

接觸印跡（Contact Patch / Footprint）的基本特徵

幾何形態：

- 典型乘用車輪胎在平坦路面上呈近似橢圓形或矩形
- 長度（沿滾動方向）：約 80-120 mm
- 寬度：約 120-180 mm
- 面積：約 100-200 cm²

影響因素：

- 荷重：荷重增加 → 接觸面積增大
- 胎壓：胎壓降低 → 接觸面積增大
- 輪胎結構：胎體剛度、帶束層設計
- 路面平整度：不平路面減少實際接觸面積

壓力分佈特徵

空間分佈：

- 呈顯著非均勻性
- 「駝峰型」分佈：
 - 中心區域壓力較高（可達 0.4-0.6 MPa）
 - 邊緣壓力較低

- 前後端壓力較低

花紋影響：

- 花紋溝槽處壓力接近零
- 花紋塊處壓力集中
- 產生壓力的週期性波動
- 波動幅度可達平均壓力的 50-100%

動態特性：

- 靜態 vs 動態：
 - 滾動時接觸面積較靜態減小 10-20%
 - 原因：橡膠的黏彈性，高頻變形響應不及
- 速度影響：
 - 速度增加 → 接觸面積減小
 - 接觸時間縮短
 - 黏彈性響應不足

微觀接觸特性

多尺度接觸：

- 表觀接觸面積（Apparent Contact Area）：肉眼可見的接觸區
- 實際接觸面積（Real Contact Area）：微觀層面實際接觸的區域
- 實際接觸面積遠小於表觀接觸面積（可能僅為 1-10%）

粗糙度影響：

- 路面粗糙度決定微觀接觸點分佈
- 影響高頻噪音產生機制
- 粗糙度越大，實際接觸面積越小，但接觸點處壓力越高

側偏和滑移的影響

側偏角（Side Slip Angle）：

- 使接觸區形狀變形
- 壓力分佈不對稱
- 側向力增加
- 增強高頻噪音

縱向滑移：

- 改變接觸區前後壓力分佈

- 增加切向應力
- 激發黏滑振盪

測量技術

壓力敏感薄膜：

- 一次性使用
- 空間解析度較低
- 成本低

電阻式壓力陣列：

- 可重複使用
- 高空間解析度（可達數百個測點）
- 可進行動態測量
- 成本較高

光學方法：

- 透過透明路面觀察接觸區
- 可視化接觸特徵
- 研究用途

3.2.2 接觸剛度（Contact Stiffness）

基本定義

$$K_c = dF/d\delta$$

其中：

- K_c ：接觸剛度
- F ：接觸力
- δ ：接觸變形

物理意義：反映接觸力變化對應的變形增量，是接觸系統抵抗變形的能力。

多尺度特性

接觸剛度具有多尺度特性，不同尺度對應不同頻率範圍：

1. 宏觀尺度（整胎結構剛度）：

- 主導頻率：低頻（<200 Hz）
- 決定因素：
 - 胎體結構
 - 帶束層設計

- 充氣壓力
- 輪胎幾何
- 2. 中觀尺度（花紋塊局部剛度）：
 - 主導頻率：中頻（200-1000 Hz）
 - 決定因素：
 - 花紋塊尺寸和形狀
 - 花紋塊連接方式
 - 胎面橡膠硬度
- 3. 微觀尺度（表面微觀剛度）：
 - 主導頻率：高頻（>1000 Hz）
 - 決定因素：
 - 橡膠黏彈性
 - 路面微觀粗糙度
 - 接觸點分佈

頻率依賴性

橡膠黏彈性導致剛度的頻率依賴：

- 低頻：橡膠表現為柔軟，剛度低
- 高頻：橡膠來不及變形，表現為剛硬，剛度高
- 結果：高頻下接觸剛度可能比低頻下高一個數量級或更多

研究發現（Winroth 等）：

- 高頻段（>1000 Hz）接觸剛度呈現選擇性加強
- 受胎面局部慣性和阻尼影響顯著
- 不能簡單用靜態剛度外推

理論模型

Winkler 基床模型：

- 假設：局部壓力與變形成正比
- 優點：簡單，計算效率高
- 缺點：忽略了非局部耦合效應
- 適用：一階近似，初步分析

彈性半空間理論：

- 考慮彈性耦合效應

- 更準確反映應力傳遞
- 計算複雜度中等

邊界元素法（BEM）：

- 可處理複雜幾何和邊界條件
- 高精度
- 計算成本高
- 用於詳細分析和驗證

影響因素

溫度：

- 溫度每升高 10°C，剛度降低
- 噪音降低約 0.5-1 dB
- 原因：橡膠軟化，阻尼增加

荷重：

- 荷重增加 → 接觸面積增大 → 總體剛度增加
- 但單位面積壓力可能變化

充氣壓力：

- 壓力增加 → 剛度增加
- 影響接觸特性和振動模態

噪音影響

高剛度：

- 放大振動響應
- 增加高頻噪音
- 提高聲輻射效率

低剛度：

- 吸收能量
- 減少高頻噪音
- 但可能增加低頻振動

優化策略：

- 在不同頻率範圍優化剛度分佈
- 高頻段降低剛度（柔軟橡膠配方）
- 低頻段保持剛度（結構穩定性）

測量方法

動態激勵測試：

- 使用激振器施加已知頻率的激勵
- 測量響應
- 計算頻率相關的剛度

滾動接觸測試：

- 實際滾動條件下測量
- 更接近真實情況
- 採樣頻率需達 10 kHz 或更高（捕捉高頻特性）

數值模擬：

- 有限元分析（FEA）
- 可預測不同設計的剛度特性
- 驗證需要實驗數據支持

3.2.3 滑移特性（Slip Characteristics）

滑移的定義與類型

縱向滑移率（Longitudinal Slip Ratio）：

兩種定義方式：

1. 基於車速： $\kappa = (\omega R - V_x) / V_x$
2. 基於輪周速度： $\kappa = (\omega R - V_x) / (\omega R)$

其中：

- ω ：輪胎角速度
- R ：輪胎有效滾動半徑
- V_x ：車輛實際速度

橫向滑移（側偏角，Side Slip Angle α ）：

- 輪胎前進方向與車輪平面方向的夾角
- 轉彎時產生
- 產生側向力

重要觀察：

- 即使在**「正常」勻速直線行駛**時，也存在細微滑移（<1%）
- 完全無滑移的純滾動在實際中幾乎不存在

摩擦力-滑移率曲線

典型曲線呈非線性，可分為三個區域：

1. 線性區（低滑移率， $\kappa < 5-10\%$ ）：
 - 摩擦力與滑移率近似線性關係
 - 黏著主導
 - 大部分接觸區處於黏著狀態
 - 僅後緣少量滑移
2. 峰值區（Peak）：
 - 達到最大摩擦力（最大抓地力）
 - 對應的滑移率： $\kappa_{\text{peak}} \approx 10-20\%$
 - 這是輪胎提供最大制動力或驅動力的點
3. 動摩擦區（高滑移率， $\kappa > 20\%$ ）：
 - 摩擦力隨滑移率增加而下降（負斜率）
 - 全滑移狀態
 - 整個接觸區處於滑動狀態
 - 這是 ABS 系統要避免的區域

理論模型

刷子模型（Brush Model）：

- 概念：將輪胎接觸區視作由許多彈性刷毛組成
- 物理圖像：
 1. 刷毛進入接觸區時黏著
 2. 隨輪胎滾動而彎曲（儲存彈性能）
 3. 切向力達到局部摩擦極限時開始滑動
 4. 離開接觸區
- 黏著區與滑移區：
 1. 低滑移率：主要是黏著區
 2. 滑移率增加：滑移區從後緣向前擴展
 3. 高滑移率：全部為滑移區

魔術公式（Magic Formula，Pacejka 模型）：

這是一個經驗公式，精確擬合實測摩擦-滑移曲線：

$$F_x = D \cdot \sin[C \cdot \arctan\{B \cdot \kappa - E(B \cdot \kappa - \arctan(B \cdot \kappa))\}]$$

參數意義：

- D：峰值因子（決定最大摩擦力）
- C：形狀因子
- B：剛度因子
- E：曲率因子

優點：

- 精度高
- 可適應不同輪胎和路面
- 廣泛應用於車輛動力學模擬

影響因素

路面條件：

路面狀態	峰值摩擦係數 μ_{peak}
乾燥瀝青	0.7 - 0.9
乾燥混凝土	0.8 - 1.0
濕滑瀝青	0.3 - 0.5
濕滑混凝土	0.4 - 0.6
冰面	0.1 - 0.2
雪面	0.2 - 0.4

滑移速度：

- 滑移速度 = $V_x \cdot \kappa$
- 滑移速度越高，實際摩擦係數下降
- 原因：橡膠自加熱，模量降低

溫度：

- 溫度升高 → 橡膠軟化 → 黏著增強
- 但過高溫度 → 性能衰退

荷重：

- 荷重增加 → 摩擦力增加
- 但摩擦係數可能略微下降（非線性效應）

滑移對噪音的影響

噪音增加幅度：

- 正常滾動 ($\kappa < 1\%$)：基準噪音水平
- 輕微滑移 ($\kappa = 1-5\%$)：噪音增加 2-3 dB
- 中度滑移 ($\kappa = 5-15\%$)：噪音增加 5-8 dB

- 強烈滑移 ($\kappa > 15\%$, 如制動): 高頻段噪音可增加 5-10 dB 或更多

頻率特性變化:

- 低頻 (<500 Hz): 變化較小
- 中頻 (500-1500 Hz): 增加明顯
- 高頻 (>1500 Hz): 增加最顯著
 - 黏滑振盪增強
 - 黏斷現象頻繁
 - 高頻摩擦噪音主導

實驗數據 (Li 等):

- 在制動條件下 (高滑移率)
- 高頻段 (>2000 Hz) 噪音可增加 5-10 dB
- 產生明顯的「尖叫聲」

設計啟示

低噪音設計要點:

1. 減少不必要的滑移 (優化驅動控制)
2. 在必要滑移時優化摩擦特性 (負斜率區域盡量平緩)
3. 增加阻尼降低黏滑振盪
4. 優化花紋設計減少局部滑移

三、磨擦力與噪音的關係

理論基礎

摩擦力與噪音之間存在複雜而直接的因果關係:

- 摩擦力是輪胎噪音生成的主要驅動力之一
- 透過多種物理機制將機械能轉換為聲能

摩擦力的組成

法向力 (Normal Force, F_n):

- 垂直於接觸面
- 主要來源:
 1. 輪胎荷重 (靜態)
 2. 路面不平度引起的動態荷重波動
 3. 懸吊系統響應

切向力 (Tangential Force, F_t):

- 平行於接觸面
- 可分為：
 1. 縱向力 (沿滾動方向): 驅動力或制動力
 2. 橫向力 (垂直於滾動方向): 轉向力

這些力的動態變化在接觸區內產生複雜的應力狀態, 激發輪胎的各種振動模態。

摩擦力的時間歷程特徵

週期性與準週期性激勵:

當輪胎在具有週期性紋理的路面上滾動時, 接觸力呈現出週期性或準週期性的時間變化:

基頻計算:

$$f = V / \lambda$$

其中:

- f : 激勵基頻
- V : 滾動速度
- λ : 紋理的空間週期

示例:

- 路面紋理波長 $\lambda = 10 \text{ mm}$
- 速度 $V = 80 \text{ km/h} = 22.2 \text{ m/s}$
- 激勵頻率 $f = 22.2 / 0.01 = 2220 \text{ Hz}$

諧波成分:

- 實際接觸力包含基頻及其多次諧波
- 形成複雜的頻譜

實驗研究成果

Cesbron 等人的研究 (關鍵發現):

實驗設置:

- 使用壓力傳感器陣列測量動態接觸力
- 同時用**近接法 (CPX)**測量噪音水平
- 不同路面和速度條件

主要發現:

在 30 km/h 條件下:

- 800 Hz 頻率的接觸力與 500-1000 Hz 的噪音呈非常高度線性相關
- 相關係數約 0.99（幾乎完美相關）

物理解釋：

- 路面宏觀紋理（約 10 mm 波長）
- 在 800 Hz 產生輪胎振動
- 進而在中頻段輻射噪音

一般結論：

- 中頻段（500-1000 Hz）：接觸力與噪音高度相關
- 其他頻段：相關性較弱，涉及更複雜機制

數學模型

強迫振動理論：

輪胎系統可描述為：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

其中：

- $[M]$ ：質量矩陣
- $[C]$ ：阻尼矩陣
- $[K]$ ：剛度矩陣
- $\{u\}$ ：位移向量
- $\{F\}$ ：摩擦力激勵向量

頻域表示：

$$(-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K])\{U(\omega)\} = \{F(\omega)\}$$

頻響函數（Frequency Response Function, FRF）：

$$H(\omega) = U(\omega) / F(\omega)$$

描述激勵力與振動響應之間的傳遞關係：

- 共振頻率處， $H(\omega)$ 出現峰值
- 共振時，小的激勵力產生大的響應

聲學傳遞函數：

$$H_a(\omega) = P(\omega) / F(\omega)$$

描述從激勵力到聲壓的全鏈路傳遞：

- 結合結構動力學和聲學輻射
- 可用於預測噪音頻譜

摩擦力在各種噪音產生機制中的角色

1. 衝擊激勵：

- 主要由法向力脈衝驅動
- 花紋塊撞擊產生的力脈衝
- 激發寬頻振動

2. 黏滑振盪：

- 主要由切向力驅動
- 切向力超過靜摩擦極限時釋放能量
- 產生週期性高頻噪音

3. 黏斷現象：

- 主要由法向力的快速脫離驅動
- 黏附力突然釋放
- 產生瞬態高頻脈衝

4. 空氣泵送：

- 受摩擦力間接影響
- 接觸壓力決定密封效果
- 影響空氣泵送效率

摩擦力的測量技術

總體力測量：

多維力傳感器：

- 可同時測量三個方向的力 (F_x, F_y, F_z)
- 安裝在輪胎與輪輞之間或輪軸上
- 提供輪胎總體受力

壓電元件：

- 高頻響應（可達 10 kHz 以上）
- 適合動態測量
- 精度高

局部接觸力測量：

壓力傳感器陣列：

- 在接觸區內提供空間分辨的壓力分佈
- 可達數百個測點

- 捕捉壓力的動態變化

優勢：

- 揭示局部力的空間和時間特性
- 識別高壓區域和激勵源
- 驗證數值模擬

間接測量方法：

輪胎振動響應測量 + 反推：

- 測量輪胎表面的加速度
- 結合數值模型反推接觸力
- 非侵入性

優點：不影響接觸過程

挑戰：需要準確的動力學模型

非線性性質

摩擦係數與多種因素呈強非線性關聯：

與滑移速度的非線性：

- 低速： μ 增加
- 達到峰值
- 高速： μ 下降（負斜率）
- 可能導致：
 - 黏滑振盪
 - 頻譜失真
 - 產生諧波成分

與壓力的非線性：

- 壓力增加， μ 可能略微下降
- 非線性接觸行為

與溫度的非線性：

- 溫度升高，橡膠性能複雜變化
- 存在最佳工作溫度

極端非線性現象：

- 黏著（Adhesion）：突然黏住
- 跳躍（Jump）：狀態突變

- 混沌 (Chaos)：不可預測的行為

噪音後果：

- 頻譜失真
- 諧波豐富
- 極端情況下噪音暴增

頻率區間的差異

低頻 (<500 Hz)：

- 主要受結構振動控制
- 摩擦力的低頻成分激發低階模態
- 影響車內噪音

中頻 (500-1500 Hz)：

- 摩擦力與噪音相關性最高
- 接觸力直接激發中頻振動
- 這是最容易通過力學控制來降噪的頻段

高頻 (>1500 Hz)：

- 主要由：
 - 切向力的高頻分量
 - 黏滑振盪
 - 黏斷現象
 - 空氣動力效應
- 摩擦力仍重要，但機制更複雜

路面紋理通過接觸力影響噪音

傳遞鏈：

路面紋理 → 接觸力波動 → 輪胎振動 → 聲輻射

功率譜密度 (PSD) 關聯：

- 路面紋理的 PSD
- ↓ (接觸過濾)
- 接觸力的 PSD
- ↓ (結構傳遞函數)
- 振動的 PSD
- ↓ (聲輻射效率)

- 噪音的 PSD

設計啟示：

- 優化路面紋理 PSD 可降低接觸力波動
- 從而降低噪音

統計特性與隨機性

實際接觸力呈寬頻隨機波動：

- 原因：路面微觀粗糙度的隨機性
- 結果：噪音也呈現隨機特性

統計能量分析（SEA - Statistical Energy Analysis）：

- 適用於高頻、多模態耦合系統
- 預測不同子系統之間的能量流動
- 可用於多模式功率預測

四、不同路面條件下的磨擦噪音

3.4.1 乾燥路面（Dry Road Surface）

基本特徵

- 乾燥路面是測試和理論的基準條件
- 輪胎橡膠與路面粗糙顆粒直接接觸
- 摩擦係數最大且最穩定（ $\mu \approx 0.7-0.9$ ）

噪音產生機制

在乾燥路面上，主要噪音機制包括：

1. 衝擊激勵：花紋塊與路面的機械撞擊
2. 黏滑與黏斷摩擦：橡膠與路面的摩擦振動
3. 空氣泵送效應：溝槽內空氣被壓縮和排出
4. 結構振動與聲輻射：輪胎振動向空氣輻射聲波

噪音水平數據（CPX 近接法，80 km/h）

路面類型	噪音水平（dB(A)）	相對密級配瀝青
傳統密級配瀝青	95-100	基準（0 dB）
薄層瀝青路面	93-97	-2 ~ -3 dB
多孔隙瀝青（18-25%孔隙率）	88-93	-7 ~ -10 dB
水泥混凝土	97-104	+2 ~ +4 dB
拉毛混凝土（橫向溝槽）	100-106	+5 ~ +6 dB（最高）

頻譜特性

密級配瀝青路面：

- 低頻 (200-500 Hz)：中等水平
- 中頻 (500-1500 Hz)：主要能量集中區
- 高頻 (1500-4000 Hz)：逐漸衰減

多孔隙瀝青路面：

- 800-2000 Hz 段降噪最明顯 (-7 ~ -10 dB)
- 吸音機制有效抑制中高頻噪音
- 低頻降噪效果較小 (-2 ~ -3 dB)

混凝土路面：

- 整體頻譜向高頻偏移
- 高頻成分更豐富
- 原因：高剛度，反射能量強

拉毛/橫向溝槽混凝土：

- 產生明顯的音調噪音 (tonal noise)
- 特定頻率出現尖銳峰值
- 原因：週期性紋理產生共振放大效果
- 主觀煩惱度極高

聲學吸音特性

密級配路面：

- 吸音係數非常低 ($\alpha < 0.1$)
- 幾乎完全反射聲波
- 噪音以空氣傳播為主

多孔隙路面：

- 吸音係數高 ($\alpha = 0.3-0.6$ ，在 800-2000 Hz)
- 聲波進入孔隙後被耗散
- 顯著降低反射噪音

共振耦合現象

路面紋理與輪胎花紋的共振：

- 當路面紋理週期與輪胎花紋節距相近時
- 產生共振耦合
- 噪音峰值可增加 3-5 dB 甚至更多

解決方案：

- 輪胎採用變節距設計（類比降噪原理）
- 路面採用隨機或優化的紋理
- 避免強週期性特徵

3.4.2 濕滑路面（Wet Road Surface）

基本特徵

- 路面上存在水膜
- 形成**「固-液-固」三相接觸**
- 橡膠、水膜、路面之間的複雜相互作用

摩擦特性變化

摩擦係數下降：

路面狀態	摩擦係數 μ
乾燥瀝青	0.7 - 0.9
濕滑瀝青	0.3 - 0.5
乾燥混凝土	0.8 - 1.0
濕滑混凝土	0.4 - 0.6

下降原因：

1. 潤滑效應：水膜減少直接接觸
2. 分子黏著力降低：水分子隔離橡膠與路面
3. 遲滯效應減弱：水填充微觀凹陷

噪音特性變化

總體噪音水平：

- 相比乾燥路面，濕滑路面噪音略高 1-3 dB
- 但變化不定，取決於多種因素

頻率依賴的變化：

低頻（<500 Hz）：

- 噪音下降（約-1 ~ -2 dB）
- 原因：水的阻尼效應
- 水吸收部分振動能量

中頻（500-1500 Hz）：

- 變化不明顯（約±1 dB）
- 競爭效應：阻尼 vs 水噪音

高頻（>1500 Hz）：

- 噪音顯著增加 (+3 ~ +5 dB)
- 原因：水飛濺噪音和水泵送效應

水相關的噪音機制

1. 水飛濺噪音 (Splash Noise) :

- 水被輪胎高速拋甩
- 產生寬頻雜音
- 主要頻率：1000-4000 Hz

2. 水泵送效應 (Water Pumping) :

- 類似空氣泵送，但介質是水
- 水的密度和黏度更高
- 壓力波動更強
- 產生更強的高頻噪音

3. 水膜射流 (Water Jet) :

- 水從溝槽高速射出
- 形成水霧和水滴
- 產生空氣動力學噪音

4. 液橋效應 (Liquid Bridge) :

- 橡膠離開路面時，水形成「橋」
- 橋斷裂時產生黏斷噪音
- 增強高頻脈衝噪音

路面類型的差異

多孔隙瀝青路面：

- 水可快速滲入孔隙
- 大幅減少水膜厚度
- 濕滑下噪音增幅非常小 (<1 dB)
- 排水性能優異

密級配路面：

- 水無法滲透，形成連續水膜
- 濕滑下噪音增幅較大 (+3 dB 或更多)
- 高速時尤其明顯

速度影響

低速 (<50 km/h) :

- 水膜厚度較薄
- 飛濺效應較弱
- 噪音增加不明顯

中速 (50-80 km/h) :

- 水膜效應明顯
- 飛濺噪音顯著
- 噪音增加 2-3 dB

高速 (>80 km/h) :

- 可能出現水滑現象 (hydroplaning)
- 輪胎部分或完全失去接觸
- 噪音特性劇烈變化
- 安全性嚴重下降

輪胎花紋設計的影響

排水型花紋 (V 型花紋) :

- 有效將水從接觸區排出
- 減少水膜厚度
- 可降低濕滑噪音 2-3 dB

縱向溝槽為主 :

- 提供排水通道
- 減少水飛濺

橫向溝槽較少 :

- 減少水泵送效應

測量挑戰

水膜厚度難以控制 :

- 取決於降雨強度、路面排水、車速等
- 再現性差

環境變量多 :

- 溫度、濕度、風速等都影響水的行為

標準化困難 :

- 國際上尚無統一的濕滑路面噪音測試標準
- 研究數據差異較大

3.4.3 粗糙路面（Rough Road Surface）

定義與特徵

粗糙路面的定義：

- 宏觀紋理深度（MTD）> 1.5 mm
- 大骨料（骨料粒徑 > 10 mm）
- 表面不平整，突起明顯

典型代表：

- 磨損嚴重的舊路面
- 開級配瀝青（粗骨料暴露）
- 碎石路面
- 損壞路面（裂縫、坑洞、波浪）

噪音水平

與密級配瀝青的對比：

路面類型	噪音增加
密級配瀝青（基準）	0 dB
粗糙瀝青（MTD 1.5-2.5 mm）	+5 ~ +8 dB
開級配瀝青（高孔隙率）	+3 ~ +5 dB（孔隙吸音降回）
嚴重損壞路面	+8 ~ +12 dB（瞬態峰值更高）

噪音特性：

- 整體噪音水平顯著提高
- 中高頻噪音尤其明顯
- 出現厚重的敲擊聲

噪音產生機制

強烈的衝擊激勵：

- 花紋塊與大骨料突起的猛烈碰撞
- 產生高幅值的衝擊力脈衝
- 激發輪胎的多種振動模態

頻率特性：

- 噪音主導頻率由粗糙度波長決定
- 關係式： $f = V / \lambda$

示例計算：

- 突起間距 $\lambda = 10 \text{ mm}$
- 速度 $V = 80 \text{ km/h} = 22.2 \text{ m/s}$
- 主導頻率 $f = 22.2 / 0.01 = 2220 \text{ Hz}$

速度越快：

- 對應的激勵頻率越高
- 高頻噪音更加突出

共振型路面紋理

危險情況：

當路面紋理波長與輪胎花紋節距一致時：

- 產生強烈共振
- 噪音峰值可增加 5-10 dB 甚至更多
- 特定頻率的音調噪音非常突出

實際案例：

- 某些混凝土路面的橫向刻槽
- 與特定輪胎花紋產生共振
- 導致極度煩人的噪音

速度影響

車速越快：

- 衝擊能量越大（與速度平方成正比）
- 衝擊頻率越高
- 噪音水平急劇上升

實驗觀察：

- 在粗糙路面上，速度指數 n 可達 3.5-4.5
- 意味著速度加倍，噪音增加 10.5-13.5 dB

路面損壞的影響

裂縫：

- 輪胎滾過時產生突變激勵
- 瞬態噪音峰值

坑洞：

- 產生極強的衝擊

- 噪音峰值可達**120 dB(A)**或更高
- 對輪胎和懸吊系統也有損害

波浪狀變形：

- 產生低頻的週期性激勵
- 引起車輛共振
- 影響乘坐舒適性

開級配瀝青的特殊性

矛盾的特性：

- 一方面：粗糙度高，機械激勵強（+5 ~ +8 dB）
- 另一方面：高孔隙率，吸音能力強（-3 ~ -5 dB）
- 淨效果：噪音仍比密級配高，但增加幅度有限（+3 ~ +5 dB）

最佳化開級配設計：

- 控制骨料粒徑分佈
- 優化孔隙率（18-22%）
- 在粗糙和吸音之間取得平衡
- 可接近或甚至低於密級配噪音水平

維護和改善措施

薄層罩面（Thin Overlay）：

- 在粗糙路面上加鋪薄層（1-3 cm）
- 使用細骨料瀝青混合料
- 可降噪 2-5 dB
- 成本相對較低

金剛石刨磨（Diamond Grinding）：

- 用金剛石刀具磨平混凝土路面
- 去除粗糙和不平整
- 產生均勻的細紋理
- 可降噪 3-5 dB

新型低噪音混凝土（如 NGCS - Next Generation Concrete Surface）：

- 採用特殊的表面處理技術
- 優化紋理和暴露骨料
- 可降噪 5-8 dB

- 接近低噪音瀝青路面水平

定期維護：

- 及時修補裂縫和坑洞
- 防止路面進一步惡化
- 維持良好的聲學性能

三種路面條件的綜合對照

特徵	乾燥路面	濕滑路面	粗糙路面
主要機制	衝擊、黏滑、空氣泵送	+水飛濺、水泵送、液橋	強烈衝擊、共振
摩擦係數	0.7-0.9 (高)	0.3-0.5 (低)	0.6-0.8 (中等)
總噪音	基準 (95-100 dB)	+1~3 dB	+5~8 dB
低頻特性	中等、規律	下降 1-2 dB (阻尼)	提高，週期性
高頻特性	穩定	增加 3-5 dB (水噪音)	顯著增加，厚重
頻譜形態	平滑寬頻	高頻雜音、偶發騷音	中高頻主導、敲擊聲
多孔路面效果	-7~10 dB	-6~9 dB (濕滑增幅小)	-3~5 dB (部分抵消)
主觀感受	連續、穩定	濕潤、飛濺	粗糙、敲擊、煩躁

五、速度對磨擦噪音的影響

基本數學關係

行駛速度是影響輪胎摩擦噪音的最重要參數之一。

幂律關係 (Power Law)：

形式一：

$$L = L_0 + n \cdot \log_{10}(V/V_0)$$

其中：

- L：噪音水平 (dB)
- L_0 ：參考速度 V_0 時的噪音水平
- V：實際速度
- V_0 ：參考速度 (通常為 80 km/h)
- n：速度指數 (關鍵參數)

形式二：

$$L = A + B \cdot \log_{10}(V)$$

其中：

- A：常數
- $B = 10n$ ：速度指數的另一種表示

物理意義：

- 速度加倍 ($V \rightarrow 2V$)
- 噪音增加： $\Delta L = n \cdot \log_{10}(2) \approx 0.3n \text{ dB}$
- 或： $\Delta L = 10n \cdot \log_{10}(2) \approx 3n \text{ dB}$ (當用 B 表示時)

速度指數的典型值

按車輛類型：

車輛類型	速度指數 n	速度加倍噪音增加
乘用車	30-35	9-10.5 dB
輕型商用車	32-37	9.6-11.1 dB
重型卡車	33-38	9.9-11.4 dB

常用值：

- 乘用車在瀝青路面上： $n \approx 30$ ($B \approx 30$)
- 意味著速度從 50 km/h 提升到 100 km/h (翻倍)
- 噪音增加約 9 dB

按噪音產生機制：

機制	速度指數 n	速度依賴程度
胎面/路面衝擊	30-40 (3-4)	中等
黏著-滑移	30-40 (3-4)	中等
黏斷	30-40 (3-4)	中等
空氣泵送	40-50 (4-5)	強
空氣湍流	50-60 (5-6)	極強

解釋：

- 數值 30-40 意味著，當用 $L=L_0+n \cdot \log(V/V_0)$ 形式時， $n=30-40$
- 括號內 3-4 是當用聲功率與速度的幕次關係 $W \propto V^n$ 時的指數
- 兩者關係： $10 \cdot \log(V^n) = n \cdot 10 \cdot \log(V)$ ，所以分貝形式的速度指數是幕次指數的 10 倍

重要觀察：

- 空氣動力效應 (泵送、湍流) 的速度依賴性最強
- 高速時 (>100 km/h)，空氣動力噪音成為主導

頻率依賴的速度指數

速度指數不是常數，而是頻率的函數。

典型頻率依賴特性：

頻率範圍	速度指數 n	主導機制
<500 Hz	35-40	結構振動、低階模態
500-800 Hz	25-35 (急降)	過渡區域
800-1600 Hz	35-45 (回升)	中階模態、花紋衝擊

頻率範圍	速度指數 n	主導機制
>1600 Hz	40-50	高階模態、空氣泵送、黏滑

物理解釋：

低頻段 (<500 Hz)：

- 主要是輪胎結構的整體振動
- 速度增加激發更強的低階模態
- 速度敏感度較高

中頻過渡段 (500-800 Hz)：

- 多種機制競爭
- 某些機制（如結構共振）在此段相對不敏感
- 速度指數下降

中高頻段 (800-1600 Hz)：

- 花紋衝擊頻率隨速度增加而提高
- 進入輪胎共振頻率範圍
- 速度敏感度回升

高頻段 (>1600 Hz)：

- 空氣泵送效應主導
- 高頻黏滑和黏斷
- 速度依賴性最強

路面類型的影響

不同路面的速度指數有顯著差異。

按路面類型的速度指數：

路面類型	速度指數 n	特徵
多孔瀝青	28-32	最低，降噪效果好且速度敏感性小
光滑密級配瀝青	30-33	中等
粗糙混凝土	35-40	較高
石塊/碎石路面	40-45	最高，速度敏感性極大

重要啟示：

- 多孔瀝青路面不僅絕對噪音水平低
- 而且速度敏感度也低
- 在高速公路上優勢更加明顯

示例計算：

假設 80 km/h 時，密級配瀝青和多孔瀝青噪音都為 95 dB：

- 密級配瀝青 (n=30) :
 - 120 km/h : $L = 95 + 30 \cdot \log_{10}(120/80) = 95 + 5.3 = 100.3 \text{ dB}$
- 多孔瀝青 (n=28) :
 - 120 km/h : $L = 95 + 28 \cdot \log_{10}(120/80) = 95 + 4.9 = 99.9 \text{ dB}$

多孔瀝青在高速時的優勢更加明顯。

物理機制的速度依賴性

低速區 (<50 km/h) :

主導機制 :

- 結構振動
- 花紋衝擊
- 黏滑效應 (在低速時可能更明顯)

特徵 :

- 機械激勵為主
- 空氣動力效應較弱
- 噪音頻譜以中低頻為主

中速區 (50-100 km/h) :

主導機制 :

- 花紋衝擊
- 空氣泵送 (開始顯著)
- 中高頻振動

特徵 :

- 這是大多數日常行駛的速度範圍
- 各種機制都有貢獻
- 噪音控制的重點區域

高速區 (>100 km/h) :

主導機制 :

- 空氣泵送效應 (速度指數 50-60)
- 空氣湍流噪音
- 高階振動模態

特徵 :

- 噪音水平快速上升

- 空氣動力噪音成為主導（可能超過 50%的總能量）
- 花紋設計的影響減弱，空氣動力設計變得關鍵

速度對噪音頻譜的影響

頻譜遷移（Frequency Shift）：

速度增加導致噪音能量分佈向高頻遷移：

原因：

1. 激勵頻率提高： $f = V / \lambda$
 - 速度翻倍，激勵頻率翻倍
2. 空氣泵送頻率提高：
 - 基頻隨速度線性增加
 - 高次諧波進入更高頻率
3. 振動模態被激發：
 - 高速時激發更高階模態
 - 這些模態的固有頻率更高

結果：

- 低速：能量集中在 500-1500 Hz
- 高速：能量擴展到 2000-5000 Hz

共振效應：

結構共振：

- 當激勵頻率接近輪胎的某個固有頻率時
- 發生共振，該頻率的噪音顯著放大
- 可能產生 5-10 dB 的局部峰值

速度掃描時的噪音峰值：

- 在某些特定速度下
- 激勵頻率恰好匹配固有頻率
- 噪音出現明顯峰值
- 這些"噪音速度"在設計中應避免與常用速度重合

輪胎設計參數對速度指數的影響

輪胎寬度：

- 輪胎寬度每增加 10 mm
- 在 70 km/h 時，噪音增加約 0.3-0.4 dB

- 速度指數略微增加（約+0.1-0.2）

原因：

- 更寬的輪胎 → 更大的接觸面積
- 更強的空氣泵送效應

橡膠硬度：

- 橡膠硬度每增加 10 Shore A
- 噪音增加 1-2.5 dB
- 速度指數增加約 0.2-0.3

原因：

- 硬橡膠 → 更強的衝擊
- 更高的接觸剛度
- 振動衰減慢

花紋類型：

花紋類型	速度指數增量 Δn
對稱、細密花紋	基準 (0)
攻擊性花紋 (大塊、深溝)	+2-5
運動型花紋	+1-3
低噪音優化花紋	-1~-2

輪胎結構：

結構類型	相對噪音 (70 km/h)	速度指數 n
徑向輪胎	基準 (0 dB)	30-32
斜交輪胎	+2 dB	32-35

徑向輪胎優勢：

- 更低的噪音水平
- 更低的速度敏感度
- 這是現代乘用車全部採用徑向輪胎的原因之一

溫度效應

橡膠自加熱：

物理過程：

- 速度提升 → 橡膠變形頻率增加
- 黏彈性耗散增加 → 發熱
- 胎面溫度可能升高 20-40°C

對噪音的影響：

- 溫度升高 → 橡膠軟化
- 模量降低 → 阻尼增加
- 噪音可能略微下降（每 10°C 約-0.5 ~ -1 dB）

淨效果：

- 溫度效應部分抵消速度效應
- 但抵消幅度有限（約 10-20%）
- 速度增加時噪音總體仍然上升

速度限制的降噪成效

政策啟示：

速度限制是最直接有效的降噪措施之一。

計算示例（n=30）：

速度降低	噪音降低
100 → 90 km/h	-1.3 dB
100 → 80 km/h	-2.9 dB
100 → 70 km/h	-4.6 dB
100 → 50 km/h	-9.0 dB

實際應用：

- 在噪音敏感區域（醫院、學校、住宅區附近）
- 設置較低的速度限制
- 降噪成效顯著且成本低

與其他措施的比較：

降噪措施	降噪幅度	成本	實施難度
速度限制（100→80）	-3 dB	極低	低（執法挑戰）
換用低噪音輪胎	-2~3 dB	中	中（需要更換）
鋪設多孔瀝青	-3~6 dB	高	高（大規模施工）
聲屏障	-5~10 dB	極高	高（佔地、景觀）

空氣泵送效應的速度主導

臨界速度：

存在一個臨界速度（約 100-120 km/h），超過此速度：

- 空氣泵送噪音成為主導來源（>50%總能量）
- 速度指數急劇增加（可達 50-60）
- 噪音控制的重點從結構設計轉向空氣動力設計

高速公路設計啟示：

- 在高速公路上（限速 120 km/h）

- 必須特別關注空氣動力噪音
- 多孔路面的優勢更加明顯（吸收空氣泵送噪音）

綜合設計策略

低噪音設計的速度考慮：

多目標優化：

1. 降低絕對噪音水平
2. 降低速度敏感度

優選組合：

- 路面：多孔瀝青
- 輪胎：
 - 較窄的胎寬
 - 柔軟的胎面配方
 - 低攻擊性花紋
 - 變節距設計
 - 徑向結構

結果：

- 在整個速度範圍內保持較低噪音
- 特別在高速時優勢明顯

總結：輪胎摩擦噪音的系統性理解

輪胎摩擦噪音是一個高度複雜的多物理場耦合現象，涉及：

1. 基本理論：黏著、遲滯、黏滑、黏斷、衝擊等多種機制
2. 接觸特性：面積、壓力、剛度、滑移的多尺度行為
3. 摩擦力：作為噪音的主要驅動力，具有複雜的非線性特性
4. 路面條件：乾燥、濕滑、粗糙路面下機制和特性的顯著差異
5. 速度影響：噪音水平、頻譜分佈、主導機制隨速度變化

降噪設計需要系統性方法：

- 優化輪胎結構和材料
- 優化胎面花紋
- 選用低噪音路面
- 控制行駛速度

- 考慮路面維護

只有綜合考慮所有這些因素，才能實現有效的輪胎噪音控制。

綜合而言，輪胎磨擦噪音的有效控制必須採取系統性與多目標的設計思維，在噪音降低、抓地力、安全性與滾動阻力之間取得平衡。單一參數的局部最佳化往往無法達成整體噪音改善，甚至可能引發其他性能劣化。本章所建立之磨擦噪音理論架構，不僅深化了對噪音生成物理本質的理解，也為後續低噪音胎面設計、材料配方優化、路面聲學工程及交通噪音管制策略，提供了堅實且可延伸的科學基礎。

參考文獻 (References)

- [1] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. INFORMEX, Kisa, Sweden.
- [2] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(2), 87-120. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [3] Cesbron, J., Anfosso-Lédée, F., Duhamel, D., Yin, H. P., & Le Houédec, D. (2009). Experimental study of tyre/road contact forces in rolling conditions for noise prediction. *Journal of Sound and Vibration*, 320(1-2), 125-144. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.018>
- [4] Dubois, G., Cesbron, J., Yin, H. P., & Anfosso-Lédée, F. (2013). Statistical estimation of low frequency tyre/road noise from numerical contact forces. *Applied Acoustics*, 74(9), 1085-1093. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.03.003>
- [5] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2000). *Noise emission, friction and rolling resistance of car tires: Summary of an experimental study*. VTI report 367A, Swedish National Road and Transport Research Institute.
- [6] Li, T. (2018). Influencing parameters on tire-pavement interaction noise: Review, experiments, and design considerations. *Designs*, 2(4), 38. <https://doi.org/10.3390/designs2040038>
- [7] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). *Road surface influence on tire/road noise*. Proceedings of Inter-Noise 80, Miami, USA.
- [8] Vázquez, V. F., Hidalgo, M. E., García-Hoz, A. M., Cámara, A., & Paje, S. E. (2020). Tire/road noise, texture, and vertical accelerations: Surface assessment of an urban road. *Applied Acoustics*, 160, 107153. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107153>
- [9] ISO 11819-1:2023. *Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical Pass-By method*. International Organization for Standardization.

- [10] ISO 11819-2:2017. *Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: Close-Proximity method*. International Organization for Standardization.
- [11] ISO 13325:2019. *Tyres — Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission*. International Organization for Standardization.
- [12] ISO 10844:2021. *Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*. International Organization for Standardization.
- [13] Dubois, G., Cesbron, J., Yin, H. P., & Anfosso-Lédée, F. (2012). Numerical evaluation of tyre/road contact pressures using a multi-asperity approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54(1), 84-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.09.010>
- [14] Zheng, B., Chen, J., Zhao, R., Tang, J., Tian, R., Luo, S., & Ma, X. (2022). Analysis of contact behaviour on patterned tire-asphalt pavement with 3-D FEM contact model. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), 171-186. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1736294>
- [15] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2010). Measurement of the tire dynamic transfer stiffness at operational excitation levels. *Proceedings of ISMA 2010*, Leuven, Belgium.
- [16] Persson, B. N. J. (2001). Theory of rubber friction and contact mechanics. *Journal of Chemical Physics*, 115(8), 3840-3861. <https://doi.org/10.1063/1.1388626>
- [17] Heinrich, G., & Klüppel, M. (2008). Rubber friction, tread deformation and tire traction. *Wear*, 265(7-8), 1052-1060. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.016>
- [18] Grosch, K. A. (1963). The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 274(1356), 21-39. <https://doi.org/10.1098/rspa.1963.0112>
- [19] Schallamach, A. (1971). How does rubber slide? *Wear*, 17(4), 301-312. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(71\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(71)90033-0)
- [20] Persson, B. N. J. (2006). Contact mechanics for randomly rough surfaces. *Surface Science Reports*, 61(4), 201-227. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2006.04.001>

- [21] Klüppel, M., & Heinrich, G. (2000). Rubber friction on self-affine road tracks. *Rubber Chemistry and Technology*, 73(4), 578-606. <https://doi.org/10.5254/1.3547607>
- [22] Lorenz, B., Persson, B. N. J., Fortunato, G., Giustiniano, M., & Baldoni, F. (2013). Rubber friction for tire tread compound on road surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25(9), 095007. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/25/9/095007>
- [23] Kropp, W. (1989). Structure-borne sound on a smooth tyre. *Applied Acoustics*, 26(3), 181-192. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(89\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(89)90063-9)
- [24] Saemann, E. U., & Kaliske, M. (2015). On the influence of tyre inflation pressure on car dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 53(11), 1642-1655.
- [25] Li, T. (2019). Tire braking/cornering noise analysis: Stick/slip mechanism. *Proceedings of Inter-Noise 2019*, Madrid, Spain.
- [26] Wang, X. C., Huang, B., Wang, R. L., Mo, J. L., & Ouyang, H. (2020). Friction-induced stick-slip vibration and its experimental validation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 142, 106705. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106705>
- [27] Zuleeg, J. (2015). How to measure, prevent, and eliminate stick-slip and noise generation with lubricants. *SAE Technical Paper* 2015-01-2259. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2259>
- [28] Tian, Y., Khan, M., Yuan, H., & Zheng, B. (2025). Wear modeling and friction-induced noise: A review. *Tribology International* (in press).
- [29] Maghami, S. (2016). *Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance* [Doctoral dissertation]. University of Twente, Netherlands.
- [30] Kropp, W., Larsson, K., Wullens, F., & Andersson, P. (2006). *Tyre/road noise: Generation mechanisms and reduction potential*. Report F&U 2006:14, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [31] Ejsmont, J. A., Sandberg, U., & Taryma, S. (1984). Influence of tread pattern on tire/road noise. *SAE Technical Paper* 840734. <https://doi.org/10.4271/840734>

- [32] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. *Proceedings of Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress 2008*, Graz, Austria.
- [33] Yang, S., Wei, Y., Ye, Z., Liu, H., Yang, B., Liu, W., & Wang, L. (2025). Characterization and modeling of textured cement concrete pavement surfaces for tire-pavement noise prediction. *Applied Acoustics*, 221, 110017.
- [34] López, I., Blom, R., Roozen, N. B., & Nijmeijer, H. (2011). Modelling vibrations on deformed rolling tyres—A modal approach. *Journal of Sound and Vibration*, 330(8), 1687-1715. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.10.020>
- [35] Larsson, K., & Kropp, W. (2002). A high-frequency three-dimensional tyre model based on two coupled elastic layers. *Journal of Sound and Vibration*, 253(4), 889-908. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.4073>
- [36] Nilsson, N. A. (1980). *Wave propagation in and sound radiation from tyres* [Doctoral dissertation]. Chalmers University of Technology, Sweden.
- [37] Kim, S. M., & Jeong, W. (2013). Effect of green tire assembly on high-speed uniformity. *Tire Science and Technology*, 41(2), 68-83.
- [38] Yamauchi, H., & Akiyoshi, Y. (1984). Theoretical analysis of tire acoustic cavity noise and proposal of improvement technique. *SAE Technical Paper* 840447. <https://doi.org/10.4271/840447>
- [39] Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [40] ISO 13473-4:2008. *Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 4: Spectral analysis of surface profiles*. International Organization for Standardization.
- [41] ISO/CD 11819-2 (2000). *Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method* (Committee Draft). International Organization for Standardization.
- [42] Anfosso-Lédée, F., & Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tire-road noise. *Applied Acoustics*, 68(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.05.007>
- [43] Persson, B. N. J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A. I., & Tosatti, E. (2005). On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing,

- rubber friction and adhesion. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(1), R1-R62. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/1/R01>
- [44] Selig, M., Lorenz, B., Henrichmüller, D., Forsbach, F., & Persson, B. N. J. (2014). Rubber friction and tire dynamics: A comparison of theory with experimental data. *Tire Science and Technology*, 42(4), 216-262.
- [45] Wriggers, P., & Zavarise, G. (2004). Computational contact mechanics. *Encyclopedia of Computational Mechanics*, Vol. 2: Solids and Structures, 195-226.
- [46] Popov, V. L. (2017). *Contact mechanics and friction: Physical principles and applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53081-8>
- [47] Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit*. Dominicus, Prague.
- [48] Andersson, P. B. U., & Kropp, W. (2008). Time domain contact model for tyre/road interaction including nonlinear contact stiffness due to small-scale roughness. *Journal of Sound and Vibration*, 318(1-2), 296-312. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.013>
- [49] Fahy, F., & Gardonio, P. (2007). *Sound and structural vibration: Radiation, transmission and response* (2nd ed.). Academic Press.
- [50] Norton, M. P., & Karczub, D. G. (2003). *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [51] Pacejka, H. B. (2012). *Tire and vehicle dynamics* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [52] Kinkaid, N. M., O'Reilly, O. M., & Papadopoulos, P. (2003). Automotive disc brake squeal. *Journal of Sound and Vibration*, 267(1), 105-166. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01573-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01573-0)
- [53] Clark, S. K. (Ed.). (1981). *Mechanics of pneumatic tires* (2nd ed.). U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.
- [54] Gent, A. N., & Walter, J. D. (Eds.). (2006). *The pneumatic tire*. National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation.
- [55] Hertz, H. (1882). Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92, 156-171.
- [56] Johnson, K. L. (1985). *Contact mechanics*. Cambridge University Press.

- [57] Wriggers, P. (2006). *Computational contact mechanics* (2nd ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-32609-0>
- [58] Laursen, T. A. (2002). *Computational contact and impact mechanics*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04864-1>
- [59] Tekscan Inc. (2020). *Pressure mapping systems: Technology overview*. Technical documentation, Tekscan, Boston, MA.
- [60] Sensor Products Inc. (2019). *Pressure sensitive film applications in tire testing*. Technical bulletin, Sensor Products LLC, Madison, NJ.
- [61] Wong, J. Y. (2008). *Theory of ground vehicles* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [62] Gillespie, T. D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers.
- [63] Hall, D. E., & Moreland, J. C. (2001). *Fundamentals of rolling resistance*. *Rubber Chemistry and Technology*, 74(3), 525-539. <https://doi.org/10.5254/1.3547650>
- [64] Ejsmont, J. A., Ronowski, G., Świczko-Żurek, B., & Sommer, S. (2017). Road texture influence on tyre/road rolling resistance. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 181-198. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1160835>
- [65] Nakajima, Y. (2019). *Advanced tire mechanics*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2>
- [66] Gim, G., & Nikraves, P. E. (1991). An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations. Part 1: Pure slips. *International Journal of Vehicle Design*, 12(3), 270-280.
- [67] Soedel, W. (1975). Tire contact patch phenomena. *Tire Science and Technology*, 3(2), 91-115. <https://doi.org/10.2346/1.2167200>
- [68] Zegelaar, P. W. A. (1998). *The dynamic response of tyres to brake torque variations and road unevennesses* [Doctoral dissertation]. Delft University of Technology, Netherlands.
- [69] Persson, B. N. J., Sivebæk, I. M., Samoilov, V. N., Zhao, K., Volokitin, A. I., & Zhang, Z. (2008). On the origin of Amontons's friction law. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(39), 395006. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/39/395006>

- [70] Müser, M. H., Dapp, W. B., Bugnicourt, R., Sainsot, P., Lesaffre, N., Lubrecht, T. A., ... & Molinari, J. F. (2017). Meeting the contact-mechanics challenge. *Tribology Letters*, 65(4), 118. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0900-2>
- [71] Winroth, J., Kropp, W., Andersson, P., & Beckenbauer, T. (2017). *Contact stiffness in tyre/road noise modelling and speed dependencies of tyre/road noise generation mechanisms* [Licentiate thesis]. Chalmers University of Technology, Sweden.
- [72] Heinrich, G., Klüppel, M., & Vilgis, T. A. (2002). Reinforcement of elastomers. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 6(3), 195-203. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00030-X)
- [73] Pacejka, H. B., & Bakker, E. (1992). The magic formula tyre model. *Vehicle System Dynamics*, 21(S1), 1-18. <https://doi.org/10.1080/00423119208969994>
- [74] Guo, K., & Lu, D. (2007). UniTire: Unified tire model for vehicle dynamic simulation. *Vehicle System Dynamics*, 45(S1), 79-99. <https://doi.org/10.1080/00423110701816742>
- [75] Cesbron, J. (2007). *Expérimentation et modélisation du contact pneumatique/chaussée pour la prédiction du bruit de roulement* [Doctoral dissertation]. Ecole Centrale de Nantes, France.
- [76] Dubois, G. (2012). *Modélisation du contact pneumatique/chaussée pour la simulation du bruit de roulement* [Doctoral dissertation]. Université Paris-Est, France.
- [77] Yin, H. P., Duhamel, D., Feng, Z. Q., & Li, J. (2010). Finite element modeling of tire/pavement contact. *Advances in Engineering Software*, 41(12), 1331-1340. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.09.005>
- [78] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2018). Tire-pavement noise: A comparative study of experimental methods and analyses. *SAE Technical Paper 2018-01-1500*. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1500>
- [79] Sandberg, U. (2001). *Tyre/road noise: Myths and realities*. Proceedings of Inter-Noise 2001, The Hague, Netherlands.
- [80] Walter, J. D. (1974). *The pneumatic tire*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration.

- [81] Davis, H. P., & Mecham, D. (1957). *Pneumatic tire design*. Edwards Brothers, Ann Arbor, MI.
- [82] Biermann, J. W., & Burde, A. W. (1981). Tire tread pattern noise reduction through the application of pitch sequencing. *SAE Technical Paper* 810053. <https://doi.org/10.4271/810053>
- [83] Samuels, S. E., & Bekker, P. C. F. (2005). Tyre noise reduction by pitch sequencing and the use of multiple pitches. *Applied Acoustics*, 66(12), 1447-1460. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2005.04.006>
- [84] Pinnington, R. J. (1990). Radial force transmission to the hub from an unloaded stationary tire. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(4), 1603-1611. <https://doi.org/10.1121/1.399406>
- [85] Brinkmeier, M., Nackenhorst, U., Petersen, S., & von Estorff, O. (2008). A finite element approach for the simulation of tire rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 309(1-2), 20-39. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.11.040>
- [86] Kung, L. E., Soedel, W., Yang, T. Y., & Charek, L. T. (1986). Natural frequencies and mode shapes of an automotive tire with interpretation and classification using 3-D computer graphics. *Journal of Sound and Vibration*, 102(3), 329-346. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(86\)80144-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(86)80144-8)
- [87] Waki, Y., Mace, B. R., & Brennan, M. J. (2009). Numerical issues concerning the wave and finite element method for free and forced vibrations of waveguides. *Journal of Sound and Vibration*, 327(1-2), 92-108. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.06.005>
- [88] Winkler, E. (1867). *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. H. Dominicus, Prague.
- [89] Pasternak, P. L. (1954). *On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants*. Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow (in Russian).
- [90] Gaul, L., & Fiedler, C. (1997). *Methode der Randelemente in Statik und Dynamik*. Vieweg, Braunschweig.
- [91] Bonnet, M. (1999). *Boundary integral equation methods for solids and fluids*. John Wiley & Sons.

- [92] Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- [93] Lakes, R. S. (2009). *Viscoelastic materials*. Cambridge University Press.
- [94] Winroth, J., Andersson, P. B. U., & Kropp, W. (2014). Importance of tread inertia and damping on the tyre/road contact stiffness. *Journal of Sound and Vibration*, 333(21), 5378-5391. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.06.003>
- [95] Andersson, P. B. U., Larsson, K., & Kropp, W. (2013). A method to estimate the dynamic contact stiffness for tyre/road contact. In T. Maeda, P. Gautier, C. Hanson, B. Hemsworth, J. Nelson, B. Schulte-Werning, D. Thompson, & P. de Vos (Eds.), *Noise and vibration mitigation for rail transportation systems* (pp. 381-388). Springer. https://doi.org/10.1007/978-4-431-53927-8_45
- [96] Payne, A. R. (1962). The dynamic properties of carbon black-loaded natural rubber vulcanizates. Part I. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(19), 57-63. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070061906>
- [97] Kraus, G. (1984). Mechanical losses in carbon-black-filled rubbers. *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium*, 39, 75-92.
- [98] Bühlmann, E., Sandberg, U., & Mioduszewski, P. (2015). Speed dependency of temperature effects on road traffic noise. *Proceedings of Inter-Noise 2015*, San Francisco, CA, USA.
- [99] Tielking, J. T., & Roberts, F. L. (1987). Tire contact pressure and its effect on pavement strain. *Journal of Transportation Engineering*, 113(1), 56-71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1987\)113:1\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1987)113:1(56))
- [100] De Beer, M., Fisher, C., & Jooste, F. J. (2002). Determination of pneumatic tire/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surfacing layers. *Proceedings of the 9th International Conference on Asphalt Pavements*, Copenhagen, Denmark.
- [101] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2010). Measurement of the tire dynamic transfer stiffness at operational excitation levels. *Proceedings of ISMA 2010*, Leuven, Belgium, 2871-2885.
- [102] Van der Auweraer, H., Mas, P., Dom, S., Vecchio, A., Janssens, K., & Van de Ponsele, P. (2007). Transfer path analysis in the critical path of vehicle

- refinement: The role of fast, hybrid and operational path analysis. *SAE Technical Paper* 2007-01-2352. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2352>
- [103] Mollica, F., Ventura, G., & Vitali, R. (2006). Simulation of tire-obstacle impacts by a ring-spring model. *Tire Science and Technology*, 34(3), 156-174. <https://doi.org/10.2346/1.2217975>
- [104] Ewins, D. J. (2000). *Modal testing: Theory, practice and application* (2nd ed.). Research Studies Press, Baldock, UK.
- [105] Heylen, W., Lammens, S., & Sas, P. (2007). *Modal analysis theory and testing*. Katholieke Universiteit Leuven, Department of Mechanical Engineering, Belgium.
- [106] Cesbron, J., Anfosso-Lédée, F., Duhamel, D., Yin, H. P., & Le Houédec, D. (2008). Influence of road texture on tyre/road contact in static and dynamic conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 9(4), 689-710. <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690145>
- [107] Nilsson, C. M. (2004). *Waveguide finite elements applied on a car tyre* [Licentiate thesis]. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- [108] Larsson, K. (2002). *Modelling of dynamic contact – exemplified on tire/road interaction* [Doctoral dissertation]. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [109] Burckhardt, M. (1993). *Fahrwerktechnik: Radschlupf-Regelsysteme*. Vogel Buchverlag, Würzburg, Germany.
- [110] Guiggiani, M. (2018). *The science of vehicle dynamics: Handling, braking, and ride of road and race cars* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73220-6>
- [111] Bakker, E., Nyborg, L., & Pacejka, H. B. (1987). Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies. *SAE Technical Paper* 870421. <https://doi.org/10.4271/870421>
- [112] Pacejka, H. B. (2005). Spin: Camber and turning. *Vehicle System Dynamics*, 43(S1), 3-17. <https://doi.org/10.1080/00423110500141014>
- [113] Segel, L. (1966). *Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control*. *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers: Automobile Division*, 181(1), 26-46.
https://doi.org/10.1243/PIME_AUTO_1966_181_014_02
- [114] Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race car vehicle dynamics*. SAE International, Warrendale, PA.
- [115] Svendenius, J., & Wittenmark, B. (2003). *Brush tire model with increased flexibility*. Proceedings of the 2003 European Control Conference, Cambridge, UK, 1863-1868.
- [116] Dugoff, H., Fancher, P. S., & Segel, L. (1970). *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*. SAE Technical Paper 700377. <https://doi.org/10.4271/700377>
- [117] Gäfvert, M., & Svendenius, J. (2003). A novel semi-empirical tyre model for combined slips. *Vehicle System Dynamics*, 39(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1076/vesd.39.1.1.3312>
- [118] Von Schlippe, B., & Dietrich, R. (1941). *Das Flattern eines bepneuten Rades* [The shimmy of a pneumatic tire]. Bericht 140 der Lilienthal-Gesellschaft, Berlin, Germany.
- [119] Pacejka, H. B., & Besselink, I. J. M. (1997). Magic formula tyre model with transient properties. *Vehicle System Dynamics*, 27(S1), 234-249.
<https://doi.org/10.1080/00423119708969658>
- [120] Besselink, I. J. M., Schmeitz, A. J. C., & Pacejka, H. B. (2010). An improved Magic Formula/Swift tyre model that can handle inflation pressure changes. *Vehicle System Dynamics*, 48(S1), 337-352.
<https://doi.org/10.1080/00423111003748088>
- [121] World Road Association (PIARC). (1995). *International PIARC experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements*. PIARC Technical Report 01.04.T, Paris, France.
- [122] Henry, J. J. (2000). *Evaluation of pavement friction characteristics*. NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [123] Dorsch, V., Becker, A., & Vossen, L. (2002). *Enhanced rubber friction model for finite element simulations of rolling tyres*. *Plastics, Rubber and Composites*, 31(10), 458-464. <https://doi.org/10.1179/146580102225006513>

- [124] Persson, B. N. J., Albohr, O., Creton, C., & Peveri, V. (2004). Contact area between a viscoelastic solid and a hard, randomly rough, substrate. *Journal of Chemical Physics*, 120(18), 8779-8793. <https://doi.org/10.1063/1.1697376>
- [125] Li, T. (2019). Tire braking/cornering noise analysis: Stick/slip mechanism. *Proceedings of Inter-Noise 2019*, Madrid, Spain, 2603-2612.
- [126] Genesseeux, M. (2012). *Vibrational and acoustical diagnostics of friction-excited instabilities: Application to disc brake squeal* [Doctoral dissertation]. Ecole Centrale de Lyon, France.
- [127] Canudas-de-Wit, C., Tsiotras, P., Velenis, E., Basset, M., & Gissinger, G. (2003). Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Vehicle System Dynamics*, 39(3), 189-226. <https://doi.org/10.1076/vesd.39.3.189.14152>
- [128] Velenis, E., Tsiotras, P., & Lu, J. (2008). Modeling aggressive maneuvers on loose surfaces: The cases of trail-braking and pendulum-turn. *Proceedings of the 2008 European Control Conference*, Kos, Greece, 1233-1238.
- [129] Olson, B. J., Shaw, S. W., Shi, C., Pierre, C., & Parker, R. G. (2014). Circulant matrices and their application to vibration analysis. *Applied Mechanics Reviews*, 66(4), 040803. <https://doi.org/10.1115/1.4027722>
- [130] Naets, F., Cuadrado, J., & Desmet, W. (2015). Stable force identification in structural dynamics using Kalman filtering and dummy-measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50-51, 235-248. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.05.042>
- [131] Schuring, D. J. (1980). *Prediction of rolling resistance using CALSPAN TIRF*. SAE Technical Paper 800090. <https://doi.org/10.4271/800090>
- [132] Ejsmont, J. A., Sandberg, U., & Taryma, S. (2017). Influence of temperature on the tyre rolling resistance. *International Journal of Automotive Technology*, 18(1), 45-54. <https://doi.org/10.1007/s12239-017-0005-4>
- [133] Kropp, W. (2007). *Structure-borne sound in and sound radiation from tyres*. Report F&U 2007:01, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [134] Saemann, E. U. (2007). *Tire forces on road surfaces: Theory and experiment* [Doctoral dissertation]. University of Hannover, Germany.

- [135] Gipser, M. (2007). FTire – the tire simulation model for all applications related to vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 45(S1), 139-151. <https://doi.org/10.1080/00423110801899960>
- [136] Oertel, C., & Fandre, A. (2009). *Reifen–Fahrwerk–Fahrbahn*. ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, Germany.
- [137] Cesbron, J., Yin, H. P., Anfosso-Lédée, F., Duhamel, D., Le Hou 人類 deLitteras.jpg D., & Feng, Z. Q. (2008). Numerical and experimental study of multi-contact on an elastic half-space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(7), 1287-1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2008.03.003>
- [138] Klein, P. (2007). *Ein Hybrides Verfahren zur Simulation der Reifenakustik* [A hybrid method for tire acoustics simulation] [Doctoral dissertation]. Technische Universität Darmstadt, Germany.
- [139] Cesbron, J., Anfosso-Lédée, F., Yin, H. P., Duhamel, D., & Le Houédec, D. (2009). Experimental study of tyre/road contact forces in rolling conditions for noise prediction. *Journal of Sound and Vibration*, 320(1-2), 125-144.
- [140] Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of vibrations*. McGraw-Hill, New York.
- [141] Inman, D. J. (2014). *Engineering vibration* (4th ed.). Pearson, Upper Saddle River, NJ.
- [142] Huang, S. C., & Soedel, W. (1987). Effects of Coriolis acceleration on the free and forced in-plane vibrations of rotating rings on elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration*, 115(2), 253-274. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(87\)90471-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(87)90471-8)
- [143] Kim, Y. J., & Bolton, J. S. (2004). Effects of rotation on the dynamics of a circular cylindrical shell with application to tire vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), 605-621. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.06.003>
- [144] Graff, K. F. (1975). *Wave motion in elastic solids*. Ohio State University Press, Columbus, OH.
- [145] Cremer, L., Heckl, M., & Petersson, B. A. T. (2005). *Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies* (3rd ed.). Springer, Berlin.

- [146] Persson, B. N. J., Albohr, O., Tartaglino, U., Volokitin, A. I., & Tosatti, E. (2004). On the nature of surface roughness with application to contact mechanics. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17(1), R1-R62.
- [147] Bengisu, M. T., & Akay, A. (1994). Stability of friction-induced vibrations in multi-degree-of-freedom systems. *Journal of Sound and Vibration*, 171(4), 557-570. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1140>
- [148] Hamet, J. F., & Klein, P. (2000). Road texture and tire noise. *Proceedings of Inter-Noise 2000*, Nice, France.
- [149] Dare, A., & Bernhard, R. (2009). Propagation of sound waves in monolayer of spheres. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(6), 3569-3575. <https://doi.org/10.1121/1.3117437>
- [150] Bolton, J. S., & Kim, Y. J. (2007). Wave-number domain representation of tire vibration. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 221(11), 1423-1433. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO558>
- [151] Duvall, D. E. (2000). Measurement and analysis of tyre (tire)-road noise. *Applied Acoustics*, 59(1), 41-58. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(99\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(99)00013-8)
- [152] Thompson, D. J. (2009). *Railway noise and vibration: Mechanisms, modelling and means of control*. Elsevier, Oxford, UK.
- [153] Gerretsen, E. (1986). Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings. *Applied Acoustics*, 19(4), 245-264. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(86\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0003-682X(86)90001-0)
- [154] Ibrahim, R. A. (1994). Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos—Part I: Mechanics of contact and friction. *Applied Mechanics Reviews*, 47(7), 209-226. <https://doi.org/10.1115/1.3111079>
- [155] Ibrahim, R. A. (1994). Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos—Part II: Dynamics and modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 47(7), 227-253. <https://doi.org/10.1115/1.3111080>
- [156] Rasmussen, G. (1981). Tire/road noise: Where do we stand? *Inter-Noise 81 Proceedings*, Amsterdam, Netherlands, 19-30.

- [157] Pottinger, M. G. (1992). Contact patch (footprint) phenomena. In S. K. Clark (Ed.), *Mechanics of pneumatic tires* (Monograph 122, 2nd ed., pp. 233-365). U.S. Department of Transportation.
- [158] Hamet, J. F. (2001). Tire/road noise: Time domain Green's function for the orthotropic plate model. *Acta Acustica united with Acustica*, 87(4), 470-474.
- [159] Klein, P., Hamet, J. F., & Gautier, P. E. (1999). TINO: A model for predicting tire/road noise. *Proceedings of Inter-Noise 99*, Fort Lauderdale, FL, USA.
- [160] Lyon, R. H., & DeJong, R. G. (1995). *Theory and application of statistical energy analysis* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- [161] Craik, R. J. M. (1996). *Sound transmission through buildings using statistical energy analysis*. Gower, Aldershot, UK.
- [162] Sandberg, U. (2003). The multi-coincidence peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. *Proceedings of Euronoise 2003*, Naples, Italy.
- [163] Buhlmann, E., & Ziegler, T. (2015). *Low-noise road surfaces: A state-of-the-art review*. UBA Texte 87/2015, German Environment Agency (UBA), Dessau-Roßlau, Germany.
- [164] Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction* (2nd ed.). NAPA Education Foundation, Lanham, MD.
- [165] Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [166] ISO 13473-1:2019. *Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of mean profile depth*. International Organization for Standardization.
- [167] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (1998). *Texturing of cement concrete pavements to reduce traffic noise*. *Noise Control Engineering Journal*, 46(6), 231-243. <https://doi.org/10.3397/1.2828517>
- [168] ASTM E965-15 (2019). *Standard test method for measuring pavement macrottexture depth using a volumetric technique*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- [169] PIARC (1987). *Report of the committee on surface characteristics*. Permanent International Association of Road Congresses (PIARC), Paris, France.
- [170] Sandberg, U. (2001). *Noise emissions of road vehicles—Effect of regulations*. Final report, 01-1, I-INCE Working Party on Regulation of Noise from Road Vehicles.
- [171] Morgan, P., & Phan, H. (2000). *Guide to the use and specification of low-noise road surfaces*. TRL Report TRL447, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- [172] Bendtsen, H., Lu, Q., & Kohler, E. (2010). *Temperature influence on road traffic noise: Quiet pavement effects*. Final Report, Danish Road Institute & University of California Pavement Research Center.
- [173] Sandberg, U., & Goubert, L. (2011). PERSUADE—a European project for exceptional noise reduction by means of poroelastic road surfaces. *Proceedings of Inter-Noise 2011*, Osaka, Japan.
- [174] van Keulen, W., Duškov, M., & van de Ven, M. (2008). *Porous asphalt for noise abatement in the Netherlands. Proceedings of Quiet Pavement Conference 2008*, Pisa, Italy.
- [175] Crocker, M. J. (Ed.). (2007). *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- [176] Descornet, G. (2005). *Low-noise road surfaces: European state of the art*. Belgian Road Research Centre (BRRC), Brussels, Belgium.
- [177] Paje, S. E., Bueno, M., Terán, F., Miró, R., & Pérez-Jiménez, F. (2010). Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Applied Acoustics*, 71(6), 578-582. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.12.010>
- [178] Rasmussen, R. O., Bernhard, R. J., Sandberg, U., & Mun, E. P. (2007). *The Little Book of Quieter Pavements*. Report FHWA-IF-08-004, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- [179] Rado, Z. (1994). Quiet pavement technologies from a US perspective. *Proceedings of Inter-Noise 1994*, Yokohama, Japan.
- [180] Neithalath, N., Weiss, J., & Olek, J. (2006). Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic

- performance. *Cement and Concrete Research*, 36(11), 2074-2085. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.001>
- [181] Bendtsen, H., Andersen, B., & Kalman, B. (2009). *Noise-reducing pavements: State of the art in Denmark*. Road Directorate, Danish Road Institute, Copenhagen, Denmark.
- [182] Dare, T., Keulen, W., & van Blokland, G. (2016). Acoustic durability of thin noise reducing asphalt layers. *Proceedings of Euronoise 2016*, Tampere, Finland.
- [183] Sandberg, U., Goubert, L., & Bühlmann, E. (2016). *Optimization of thin asphalt layers for noise reduction: The PERSUADE project*. *Transportation Research Procedia*, 14, 3190-3199. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.258>
- [184] Anfosso-Lédée, F., & Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tire-road noise. *Applied Acoustics*, 68(1), 1-16.
- [185] Donovan, P. R. (2005). *Comparative measurements of tire/pavement noise in Europe and the United States*. *Noise Control Engineering Journal*, 53(1), 17-24. <https://doi.org/10.3397/1.2839247>
- [186] Trevino, M., Dossey, T., McCullough, B. F., & Grzywacz, F. (2000). *Evaluation of diamond ground surfaces and pavement texture*. Research Report 1832-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
- [187] Wayson, R. L. (1998). *Relationship between pavement surface texture and highway traffic noise*. NCHRP Synthesis 268, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [188] Attenborough, K., & Ver, I. L. (1988). *Sound propagation in the atmosphere*. In L. L. Beranek & I. L. Ver (Eds.), *Noise and vibration control engineering* (pp. 113-140). John Wiley & Sons, New York.
- [189] Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105-116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
- [190] Kongrattanaprasert, W., Nomura, H., Kamakura, T., & Ueda, K. (2009). Detection of road surface conditions using tire noise from vehicles. *IEEJ*

- Transactions on Industry Applications*, 129(7), 761-767.
<https://doi.org/10.1541/ieejias.129.761>
- [191] Kongrattanaprasert, W., Nomura, H., Kamakura, T., & Ueda, K. (2010). Detection of road surface states from tire noise using neural network analysis. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, 130(7), 920-925.
<https://doi.org/10.1541/ieejias.130.920>
- [192] Rado, Z. (1994). *On the mechanisms of tire-pavement interaction noise*. *Noise Control Engineering Journal*, 42(1), 1-16. <https://doi.org/10.3397/1.2827799>
- [193] Storeheier, S. Å. (1991). *Relations between road surface characteristics and traffic noise*. *Proceedings of Inter-Noise 91*, Sydney, Australia, 633-636.
- [194] Moore, D. F. (1975). *The friction of pneumatic tyres*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- [195] Persson, B. N. J., Tartaglino, U., Albohr, O., & Tosatti, E. (2005). Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect. *Physical Review B*, 71(3), 035428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.035428>
- [196] Gardziejczyk, W. (2007). Comparison of vehicle noise on dry and wet road surfaces. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 9, 67-82.
- [197] Descornet, G. (2000). Vehicle noise emission on wet road surfaces. *Proceedings of Inter-Noise 2000*, Nice, France.
- [198] Walker, J. C. (1981). *Noise generated at the tyre/road interface* [Doctoral dissertation]. Aston University, Birmingham, UK.
- [199] Sandberg, U. (2001). *Tyre/road noise—Myths and realities*. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [200] Ongel, A., Harvey, J., & Kohler, E. (2008). *Investigation of noise, durability, permeability, and friction performance trends for asphaltic pavement surface types: Three-year results*. Research Report UCPRC-RR-2007-03, University of California Pavement Research Center, Davis, CA.
- [201] Jabben, J., van Blokland, G., Potma, K., & Mulder, J. (2014). *Variability in tire/road noise levels*. *Proceedings of Inter-Noise 2014*, Melbourne, Australia.
- [202] Ronneberger, D. (1987). The acoustics of air flow in complex pipe systems. In *Noise and vibration control engineering* (pp. 373-413). John Wiley & Sons.

- [203] Kuijpers, A., & van Blokland, G. (2001). Tyre/road noise models in the last two decades: A critical evaluation. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [204] Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces* (3rd ed.). Academic Press, Burlington, MA.
- [205] de Gennes, P. G., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D. (2004). *Capillarity and wetting phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves*. Springer, New York.
- [206] Raitanen, N. (2005). *Measuring of noise and wearing of quiet surfaces* [Master's thesis]. Helsinki University of Technology, Finland.
- [207] Descornet, G., Beuving, E., Beyer-Lout, B., & van Blokland, G. (2003). *Wet effects on tyre/road noise*. SILVIA-FEHRL-01-02, FEHRL, Brussels, Belgium.
- [208] Srirangam, S. K., Anupam, K., Scarpas, A., Kasbergen, C., Kane, M., & Kokkalis, A. (2014). Influence of pavement texture on tire/road noise: An experimental and numerical study. *Road Materials and Pavement Design*, 15(3), 705-723. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.906351>
- [209] Fujikawa, T., Koike, H., Oshino, Y., & Tachibana, H. (2001). *Definition of tire/road noise: Definition, method, and conditions for its prediction*. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [210] Mioduszewski, P., & Gardziejczyk, W. (2012). Tire/road noise of pneumatic tires on dry and wet road surfaces. *Proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, France.
- [211] Berge, T., & Mioduszewski, P. (2023). Tyre/road noise measurements on ISO tracks according to the UNECE Regulation 117. *Proceedings of Inter-Noise 2023*, Chiba, Japan.
- [212] Deng, Z., & Crocker, M. J. (2005). Transmission mechanisms of vehicle interior noise. *Proceedings of Inter-Noise 2005*, Rio de Janeiro, Brazil.
- [213] Harrison, M. (2004). *Vehicle refinement: Controlling noise and vibration in road vehicles*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [214] Sandberg, U., Bergiers, A., Ejsmont, J. A., Goubert, L., Karlsson, R., & Zoller, M. (2011). *Road surface influence on tyre/road rolling resistance*. MIRIAM SP1 Report, European Road Authorities (ERAs), Brussels, Belgium.

- [215] FHWA (2017). *Pavement surface characteristics: A synthesis and guide*. Publication FHWA-HIF-17-050, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- [216] Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI.
- [217] Paterson, W. D. O. (1986). *International roughness index: Relationship to other measures of roughness and riding quality*. *Transportation Research Record*, 1084, 49-59.
- [218] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise—Part I. *Proceedings of Inter-Noise 80*, Miami, FL, USA, 259-264.
- [219] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise—Part II. *Proceedings of Inter-Noise 80*, Miami, FL, USA, 265-270.
- [220] McDaniel, R. S., & Coree, B. J. (2003). *Identification of laboratory techniques to optimize Superpave HMA surface friction characteristics*. Final Report, SQDH 2003-6, Wisconsin Highway Research Program, Madison, WI.
- [221] Gibbs, D. C., Iwasaki, R., Bernhard, R. J., Bledsoe, J., Carlson, D., Corbisier, C., ... & Witte, M. (2012). *Quiet pavement technologies: A comparative case study*. *Transportation Research Record*, 2270, 31-39. <https://doi.org/10.3141/2270-05>
- [222] Hanson, D. I., Waller, B. R., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Effects of mixture and aggregate properties on skid resistance of asphalt pavements*. *Transportation Research Record*, 1891, 13-23. <https://doi.org/10.3141/1891-03>
- [223] Ahammed, M. A., & Tighe, S. L. (2012). Concrete pavement surface textures and multivariable frictional performance analysis: A North American case study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(7), 727-738. <https://doi.org/10.1139/l2012-053>
- [224] Fernando, E. G., & Musani, D. (2010). *Premature pavement distress: Manual for detection and prevention of premature rutting on hot mix asphalt surfaces*. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, TX.

- [225] Gerardo, W. F., David, W. F., & Lester, A. H. (2006). *Pavement roughness and rideability*. NCHRP Synthesis 308, Transportation Research Board, Washington, DC.
- [226] Saykin, V. V., Zhang, Y., Cao, Y., Wang, M. L., & Mazzotti, M. (2013). Pavement macrotexture monitoring through sound generated by a tire-pavement interaction. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(9), 1158-1167. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000485)
- [227] Li, R. (2020). *Correlating pavement texture, noise and friction properties* [Doctoral dissertation]. University of Texas at Austin, TX, USA.
- [228] Huang, Y., & Wang, L. (2011). Effect of pavement texture and air voids on tire-pavement interaction noise. *Journal of Advanced Transportation*, 45(4), 291-308. <https://doi.org/10.1002/atr.137>
- [229] Bernhard, R., & Wayson, R. L. (2005). *An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement*. Institute of Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University, West Lafayette, IN.
- [230] Donovan, P. R. (2012). *Findings from the FHWA study tour on European noise policies and mitigation practices*. Report FHWA-PL-12-030, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- [231] ISO 11819-1:2023. *Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical Pass-By method*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [232] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 8-14.
- [233] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). *Tire/pavement noise study*. NCAT Report 04-02, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, AL, USA.
- [234] Rasmussen, R. O., Garber, S. I., Fick, G. J., Ferragut, T. R., & Wiegand, P. D. (2008). *How to reduce tire-pavement noise: Interim better practices for constructing and texturing concrete pavement surfaces*. Report DTFH61-06-H-

- 00011, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- [235] Scofield, L. A. (2011). *Development and implementation of next generation concrete surfaces. Proceedings of Inter-Noise 2011*, Osaka, Japan.
- [236] Bennert, T., & Maher, A. (2005). *The development of a performance specification for granular base and subbase material*. FHWA-NJ-2005-003, Center for Advanced Infrastructure and Transportation, Rutgers University, Piscataway, NJ.
- [237] Bueno, M., Luong, J., Terán, F., Viñuela, U., & Paje, S. E. (2014). Macrotecture influence on vibrational mechanisms of the tyre-road noise. *Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration*, Beijing, China.
- [238] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/road noise reference book*. INFORMEX, Kisa, Sweden, Chapter 4.
- [239] Beckenbauer, T., & Kuijpers, A. (2001). Prediction of pass-by levels depending on road surface type. *Proceedings of Inter-Noise 2001*, The Hague, Netherlands.
- [240] Kephelopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU)*. EUR 25379 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [241] FHWA (2004). *Traffic Noise Model (TNM) version 2.5: Technical Manual*. Report FHWA-PD-96-010, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- [242] Pallas, M. A., Bérengier, M., Chatagnon, R., Czuka, M., Conter, M., & Muirhead, M. (2016). Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU. *Applied Acoustics*, 113, 89-101. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.06.012>
- [243] Jonasson, H., & Storeheier, S. Å. (2001). *Nord 2000: New Nordic prediction method for road traffic noise*. SP Report 2001:10, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden.
- [244] Cesbron, J. (2007). *Expérimentation et modélisation du contact pneumatique/chaussée pour la prédiction du bruit de roulement* [Doctoral dissertation]. Ecole Centrale de Nantes, France.

- [245] Larsson, K. (2002). *Modelling of dynamic contact—Exemplified on tire/road interaction* [Doctoral dissertation]. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [246] Kim, Y. J., Thompson, D. J., & Bolton, J. S. (2003). Effects of rotation on the dynamics of a circular cylindrical shell with application to tire vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 275(3-5), 605-621.
- [247] Nilsson, C. M., Finnveden, S., & Fraggstedt, M. (2007). A waveguide finite element analysis of the scattering of a plane wave by a discontinuity in a fluid-filled pipe with flexible walls. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31(6), 572-585. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.11.004>
- [248] Hamet, J. F. (2001). Tire/road noise: Time domain Green's function for the orthotropic plate model. *Acta Acustica united with Acustica*, 87(4), 470-474.
- [249] Bécot, F. X., & Jaouen, L. (2013). An alternative Biot's formulation for dissipative porous media with skeleton deformation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6), 4801-4807. <https://doi.org/10.1121/1.4826175>
- [250] Li, T. (2019). Tire braking/cornering noise analysis: Stick/slip mechanism. *Proceedings of Inter-Noise 2019*, Madrid, Spain.
- [251] Akay, A. (2002). Acoustics of friction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 111(4), 1525-1548. <https://doi.org/10.1121/1.1456514>
- [252] Hucho, W. H., & Sovran, G. (1993). Aerodynamics of road vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25, 485-537. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.002413>
- [253] Howe, M. S. (1998). *Acoustics of fluid-structure interactions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [254] Ejsmont, J. A., Sandberg, U., & Taryma, S. (2017). Influence of temperature on the tyre rolling resistance. *International Journal of Automotive Technology*, 18(1), 45-54.
- [255] Bühlmann, E., Ziegler, T., & Sandberg, U. (2017). Temperature effects on road traffic noise under various meteorological conditions. *Proceedings of Inter-Noise 2017*, Hong Kong.

- [256] Dittrich, M. G., & Janssens, M. H. A. (2000). Improved measurement methods for railway rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 595-609. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2544>
- [257] Nelson, P. M. (Ed.). (1987). *Transportation noise reference book*. Butterworths, London, UK.
- [258] Tanaka, M., Kubo, S., Miyake, Y., & Sakai, N. (2009). Development of a low noise tire with built-in silencer. *Tire Science and Technology*, 37(1), 2-15. <https://doi.org/10.2346/1.3081103>
- [259] Mohammadi, S., & Ohadi, A. (2021). A novel approach to design quiet tires, based on multi-objective minimization of generated noise. *Applied Acoustics*, 175, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107825>
- [260] van Keulen, W., & van Blokland, G. (2009). Porous asphalt road surface acoustic performance related to mixture composition and age. *Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4), 2464-2464. <https://doi.org/10.1121/1.4783496>
- [261] Licitra, G., Cerchiai, M., Teti, L., Ascari, E., & Fredianelli, L. (2017). Durability and variability of the acoustical performance of rubberized road surfaces. *Applied Acoustics*, 120, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.001>
- [262] de Kluijver, H., Stoter, J., & Kuijpers, A. (2002). *Modeling of road traffic noise in the Netherlands*. Proceedings of Inter-Noise 2002, Dearborn, MI, USA.
- [263] Abbott, P. G., & Nelson, P. M. (2002). *Converting the UK traffic noise index LA10,18h to EU noise indices for noise mapping*. TRL Report TRL543, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- [264] Quartieri, J., Troisi, A., Guarnaccia, C., D'Ambrosio, S., & Iannone, G. (2009). An application of a predictive acoustic software for modelling and managing traffic noise. *Proceedings of WSEAS Conference on Environment, Medicine and Health Sciences*, Puerto De La Cruz, Tenerife, Spain.
- [265] Murphy, E., & King, E. A. (2014). *Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy*. Elsevier, Oxford, UK.
- [266] Bühlmann, E. (2016). *Influence of temperature on tire-road noise emission* [Doctoral dissertation]. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

- [267] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2018). Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches. *Journal of Vibroengineering*, 20(6), 2424-2452. <https://doi.org/10.21595/jve.2018.19935>