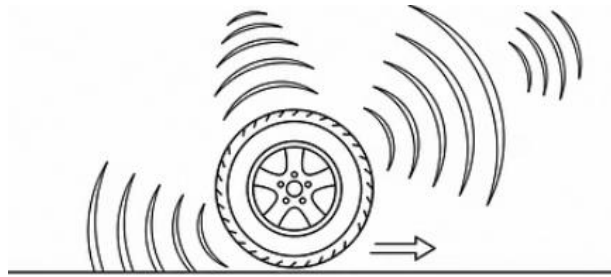


第二章 輪胎噪音產生原理 Tire Noise Generation Mechanisms

摘要 (Abstract)

隨著車輛動力系統逐步電動化，傳統引擎噪音對整體車輛聲學環境之主導性顯著下降，使得輪胎與路面交互作用所產生之噪音成為現代道路交通噪音與車內聲學舒適性之關鍵來源。輪胎噪音並非單一



物理現象，而是由結構振動、空氣動力學效應、摩擦接觸行為與聲學共鳴等多重機制在輪胎-路面接觸區域及其周邊空間中高度耦合所形成之複雜寬頻聲學現象。本章系統性地闡述輪胎噪音的基本概念、量測與評估方法，並從多物理場觀點深入解析主要噪音產生機制，包括輪胎結構振動噪音、胎面溝槽之空氣泵浦效應、溝槽與輪胎內腔之空氣共鳴，以及橡膠-路面摩擦所引發之黏著-滑動效應。研究顯示，輪胎噪音的頻譜特性通常涵蓋約 200 Hz 至 5,000 Hz，其中不同機制於特定頻率範圍內呈現主導地位，並隨輪胎結構設計、胎面花紋幾何、橡膠材料黏彈性、路面紋理特性與行駛條件而顯著變化。

透過結構動力學、計算流體力學與聲學數值模擬方法(如 FEM、CFD 與 BEM)之整合應用，本章說明現代輪胎噪音研究已由經驗量測導向，邁向可預測、可最佳化之設計導向模式。此一多尺度 (Multi-scale)、多物理場的系統性分析，不僅為低噪音輪胎設計提供理論基礎，也為道路鋪面聲學設計與交通噪音管制策略奠定科學依據。

輪胎噪音作為現代交通運輸系統中最主要的聲學污染源之一,其產生機制涉及複雜的物理現象與多重交互作用。隨著電動車輛的快速發展,傳統內燃機引擎噪音的相對減弱使得輪胎與路面交互作用產生的噪音更加突出,成為影響車輛聲學舒適性的主導因素。根據國際標準 ISO 11819 系列規範,輪胎噪音不僅對車內乘員的舒適性產生直接影響,同時也是城市環境噪音的重要組成部分,對周圍環境及居民健康造成長期影響[1]。深入理解輪胎噪音的產生機制,對於開發低噪音輪胎產品、優化路面設計以及制定有效的噪音控制策略具有重要的理論與發展意義。

輪胎噪音的產生涉及結構振動、空氣動力學效



應、材料特性以及路面條件等多個層面的複雜交互作用。從物理機制角度來看,輪胎與路面接觸區域形成的動態接觸面(contact patch)是噪音產生的核心區域,在這個區域內,胎面花紋與路面紋理的週期性接觸產生機械衝擊,胎面溝槽內的空氣被壓縮與排放形成氣動噪音,橡膠材料的黏彈性特性導致黏著-滑動現象,輪胎結構的振動模態被激發並向外輻射聲能。這些物理過程在時域和頻域上相互疊加,形成具有寬頻譜特徵的複雜噪音信號。研究顯示,輪胎噪音的頻譜範圍通常涵蓋 500 Hz 至 5,000 Hz 的中高頻段,其中不同的噪音產生機制在特定頻率範圍內占據主導地位[2]。

從系統角度分析,輪胎噪音的產生與傳播可以劃分為噪音源產生、傳遞路徑以及輻射特性三個階段。在噪音源產生階段,輪胎接觸區域的多種物理機制同時作用,產生初始聲壓波動;在傳遞路徑階段,聲能透過輪胎結構、空氣介質以及車輛底盤等多條路徑向外傳播;在輻射階段,輪胎側壁、胎面以及路面本身作為聲輻射表面,將振動能量轉換為聲波向周圍環境輻射。值得注意的是,輪胎與路面形成的楔形空腔(wedge-shaped cavity)在噪音放大與傳播過程中扮演重要角色,這個半封閉的聲學空間產生的喇叭效應(horn effect)會顯著增強特定頻率成分的輻射效率[3]。當代輪胎噪音研究採用多尺度、多物理場耦合的分析方法,結合實驗測量與數值模擬技術,從微觀的材料黏彈性行為到宏觀的聲學輻射特性進行全面研究。

計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法被廣泛應用於空氣泵浦效應與溝槽共振的模擬分析,有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 用於輪胎結構動態特性與振動模態的預測,邊界元方法 (Boundary Element Method, BEM) 則適用於聲學輻射場的計算。這些先進的分析工具使得研究人員能夠在設

計階段預測輪胎噪音性能,優化胎面花紋設計,並開發創新的噪音控制技術[4]。本章將系統性地闡述輪胎噪音的各種產生機制、輪胎結構參數對噪音的影響,以及路面特性在噪音產生過程中的作用,為後續章節的噪音控制與優化策略奠定理論基礎。

2.1 輪胎噪音的基本概念 (Basic Concepts of Tire Noise)

輪胎噪音作為車輛聲學特性的核心組成部分,其基本概念涵蓋噪音的定義與分類、測量方法與評估指標、頻譜特徵以及影響因素等多個維度。從聲學角度定義,輪胎噪音是指在車輛行駛過程中,由



輪胎與路面交互作用產生並向周圍空間輻射的不期望聲音。這種噪音既包括透過空氣傳播的空氣傳播噪音(airborne noise),也包括透過輪胎結構、懸吊系統和車身結構傳遞的結構傳播噪音(structure-borne noise)。根據 ISO 11819-1 標準的定義,輪胎/路面噪音(tire/road noise)特指由輪胎與路面交互作用產生的聲音,不包括車輛動力系統、傳動系統或空氣動力學產生的其他噪音源[5]。

從產生位置與傳播路徑的角度,輪胎噪音可以進一步細分為外部噪音(exterior noise)和內部噪音(interior noise)兩大類別。外部噪音主要影響車輛周圍環境,是城市交通噪音的主要貢獻源,其測量通常採用透過噪音(pass-by noise)測試方法,按照 ISO 362 標準或 ECE R51 法規的要求進行評估。內部噪音則直接影響車內乘員的聲學舒適性,通常採用車內噪音測量方法進行評估。研究表明,在車速超過 50 km/h 的條件下,輪胎噪音成為車內噪音的主要來源,特別是在電動車輛中,由於缺少內燃機的掩蔽效應,輪胎噪音對車內聲學環境的影響更加突出[6]。從頻率特性來看,外部噪音通常以 800 Hz 至 2000 Hz 的中頻成分為主,而內部噪音則涵蓋更寬的頻率範圍,特別是輪胎空腔共振(tire cavity resonance)在 200 Hz 至 250 Hz 產生的低頻峰值對車內聲學品質有顯著影響[7]。

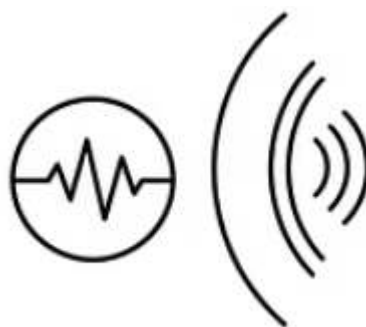
輪胎噪音的測量方法依據不同的應用目的和測試條件而有所差異。國際上廣泛採用的測量方法主要包括透過噪音測量法(pass-by method)、近場測量法(close-proximity method, CPX)以及滾筒法(drum method, 是一種以室內受控環境模擬輪胎滾動行為的實驗方法,主要用於量測輪胎結構振動、滾動噪音與接觸激振特性,並作為數值模型(如 FEM、BEM 與 CFD)之重要驗證依據)等。透過噪音測量法是最傳統且應用最廣泛的方法,車輛以規定速度透過測試路段,在路邊固定位置

的麥克風記錄噪音值,這種方法能夠反映實際道路條件下的綜合噪音水平,但受環境條件影響較大且無法單獨評估輪胎或路面的貢獻。近場測量法將麥克風安裝在非常接近輪胎胎面的位置(通常距離胎面 10-20 mm),隨車輛移動進行連續測量,這種方法能夠有效隔離輪胎/路面噪音,排除其他噪音源的干擾,已被 ISO 11819-2 標準採納作為評估路面聲學特性的標準方法[8]。滾筒法則在室內環境中使用大直徑滾筒模擬路面,可以在控制條件下進行重複性測試,但由於滾筒表面曲率與實際路面的差異,測量結果需要進行修正才能與實際道路測試結果相比較[9]。

在噪音評估方面,國際標準和法規通常採用 A 加權噪音值(A-weighted sound pressure level, L_A)作為主要評估指標,這是因為 A 加權曲線能夠较好地反映人耳對不同頻率聲音的敏感度特性。對於透過噪音測試,結果通常以 $L_{A,max}$ 表示,即車輛透過過程中測得的最大 A 加權噪音值。對於 CPX 測量,則採用連續的等效噪音值 $L_{A,eq}$ 表示特定路段的平均噪音水平。除了總體噪音值指標外,頻譜分析也是重要的評估手段,通常採用 1/3 倍頻程(one-third octave band)或窄頻帶頻譜分析來識別噪音的頻率特徵和主要貢獻成分。對於車內噪音,除了噪音值指標外,還會考慮聲品質(sound quality)指標,如響度(loudness)、尖銳度(sharpness)、粗糙度(roughness)等心理聲學參數,以更全面地評估乘員的主觀感受[10]。

輪胎噪音的頻譜特徵呈現出明顯的寬頻與窄頻成分疊加的特點。寬頻噪音(broadband noise)通常由紊流、衝擊等隨機過程產生,在頻譜上表現為連續的能量分佈,主要集中在 500 Hz 至 5000 Hz 範圍內。窄頻噪音(tonal noise)則對應於特定的物理機制,如溝槽共振、空腔共振等,在頻譜上表現為明顯的峰值。研究顯示,胎面花紋的週期性排列會產生透過頻率(passing frequency)及其諧波成分,這些離散頻率成分在主觀聽感上可能表現為明顯的音調特徵,影響噪音的煩惱度(annoyance)。為了減少音調性噪音,現代輪胎設計普遍採用變節距(variable pitch)花紋設計,透過不規則排列胎面節距來打散離散頻率成分,使能量分佈更加均勻[11]。

影響輪胎噪音的因素極為複雜,涉及輪胎設計參數、材料特性、使用條件以及環境因素等多個方面。從輪胎設計角度,胎面花紋型式、溝槽幾何尺寸、橡膠配方、胎體結構、輪胎尺寸等都會顯著影響噪音水平。從使用條件角度,車速、輪胎氣壓、載重、溫度等操作參數會改變輪胎的動態特



性和接觸狀態,進而影響噪音產生。路面因素包括路面類型、紋理特徵、材料性質、表面狀況(乾燥或潮濕)等,研究表明路面因素對輪胎噪音的影響甚至可能超過輪胎本身的影響,某些路面類型之間的噪音差異可達 10 dB(A)以上[12]。環境因素如溫度、濕度、氣壓等也會透過影響材料特性和聲波傳播而對測量結果產生影響,因此國際標準對測試環境條件都有嚴格的規定。

從物理機制的角度理解,輪胎噪音本質上是機械能轉換為聲能的過程。當輪胎滾動透過路面時,輪胎與路面之間的相互作用力產生週期性變化,這些力的時間變化率越大,產生的聲輻射能力越強。根據聲學理論,偶極子聲源(dipole source)的輻射效率與頻率的平方成正比,因此高頻成分更容易被有效輻射。輪胎接觸面積內的壓力分佈不均勻性、胎面單元進入和離開接觸區的瞬態過程、橡膠材料的黏彈性響應等因素共同決定了作用力的時間歷程,進而影響噪音的頻譜特性和輻射效率。此外,輪胎結構的振動模態,特別是胎面帶的徑向振動(radial vibration)、切向振動(tangential vibration)以及側壁的彎曲振動(sidewall bending vibration),作為有效的聲輻射面,其振動幅度和頻率特性直接決定了結構噪音的水平[13]。

輪胎噪音研究的發展歷程反映了測試技術、分析方法和理論認知的不斷進步。早期研究主要集中於經驗性的噪音測量和簡單的相關性分析,缺乏對物理機制的深入理解。隨著聲學測量技術的發展,特別是多通道數據採集系統、聲學陣列(acoustic array)技術的應用,使得噪音源定位和分離成為可能,研究人員得以識別不同噪音成分的相對貢獻。計算機技術和數值方法的進步使得輪胎噪音的預測性模擬成為可能,有限元分析、邊界元分析、計算流體力學等方法的應用極大地推動了噪音產生機制的理解和低噪音設計技術的發展。當前的研究趨勢包括多物理場耦合模擬、人工智能優化設計、主動噪音控制等前沿領域,這些新技術為實現更低噪音水平的輪胎產品提供了可能性[14]。

理解輪胎噪音的基本概念是深入研究具體噪音產生機制的基礎。輪胎噪音問題的複雜性在於其涉及多尺度、多物理場的耦合現象,從微觀的材料分子鏈運動到宏觀的聲波輻射,跨越多個數量級的時間和空間尺度。同時,輪胎噪音不僅



是一個純粹的物理問題,還涉及人類聽覺感知和主觀評估,因此需要結合客觀測量和主觀評估來全面評估。在法規趨嚴和消費者需求提升的雙重驅動下,輪胎噪音控制已成為輪胎產業技術發展的重要方向,深入理解噪音的基本概念和影響因素,對於開發創新的噪音控制技術和提升產品競爭力具有重要意義。未來的研究需要

進一步完善測量方法的標準化,發展更精確的預測模型,探索新材料和新結構的降噪潛力,並在噪音控制與其他性能需求(如濕地抓地力、滾動阻力、耐磨性等)之間找到最佳平衡[15]。

2.2 輪胎噪音產生機制 (Noise Generation Mechanisms)

輪胎噪音的產生涉及多種複雜的物理機制,這些機制在輪胎與路面接觸區域及其周圍區域同時發生,相互作用並疊加形成最終的噪音信號。根據當代輪胎噪音研究的共識,主要的噪音產生機制可以分為振動噪音(vibration noise)、空氣泵浦效應(air pumping effect)、空氣共鳴(air resonance)、黏著-滑動效應(stick-slip effect)以及衝擊噪音(impact noise)等五大類別。每種機制都有其獨特的物理本質、頻率特徵和影響因素,在不同的行駛條件和輪胎/路面組合下,各種機制的相對貢獻會有所不同[16]。理解這些機制的細節對於有針對性地開發噪音控制技術至關重要,因為不同機制需要採用不同的控制策略,某些設計改進可能對一種機制有效,但對另一種機制效果有限甚至產生負面影響。

從能量轉換的角度來看,輪胎噪音的產生本質上是車輛動能透過輪胎與路面相互作用轉換為聲能的過程。在輪胎滾動過程中,接觸區域內發生複雜的機械作用,包括壓縮、剪切、衝擊等多種形式的力學過程,這些過程產生的力和位移的時間變化激發聲波的輻射。根據聲學基本原理,聲源的輻射效率與其特徵尺寸、振動頻率以及周圍介質的阻抗特性密切相關。輪胎與路面形成的接觸區域尺寸通常為 100-200 mm,這個尺寸決定了有效輻射的起始頻率約在 500 Hz 以上。同時,輪胎結構作為彈性體,具有豐富的振動模態,這些模態被接觸力激發後,將振動能量轉換為聲輻射,特別是在結構共振頻率附近,輻射效率顯著提高[17]。

輪胎噪音產生機制的研究方法包括實驗測量和數值模擬兩大類。實驗方法主要包括多點聲壓測量、振動加速度測量、高速攝影、聲學陣列技術等,這些方法能夠獲取實際條件下的噪音和振動數據,識別主要噪音源的位置和貢獻。數值模擬方法則包括有限元分析(用於結構振動分析)、計算流體力學(用於空氣動力學噪音分析)、邊界元分析(用於聲學輻射計算)等,這些方法能夠在設計階段預測噪音性能,分析不同設計參數的影響,並揭示實驗難以觀測的物理細節。近年來,多物理場耦合模擬技術的發展使得研究人員能夠同時考慮結構振動、流體流動和聲學輻射的相互作用,為更準確地預測輪胎噪音提供了強有力的工具[18]。

各種噪音產生機制在頻率域上呈現不同的特徵分佈。振動噪音通常覆蓋較寬的頻率範圍,從數百赫茲到數千赫茲,其頻譜特徵與輪胎的結構模態密切相關。空氣泵

浦效應主要貢獻於中高頻噪音,典型頻率範圍在 800 Hz 至 3000 Hz。空氣共鳴則產生明顯的峰值特徵,溝槽共振通常出現在 1000 Hz 至 3000 Hz 範圍,而喇叭效應可以將這個範圍內的噪音放大 3-5 dB。輪胎空腔共振是一種特殊的空氣共鳴現象,出現在 200 Hz 至 250 Hz 的低頻範圍,雖然不屬於輪胎/路面接觸區域產生的噪音,但對車內噪音有重要影響。黏著-滑動效應主要在低頻範圍(小於 1,000 Hz)產生噪音,但在某些特殊條件下也可能產生高頻成分。衝擊噪音則呈現寬頻特徵,從低頻到高頻都有貢獻,其頻譜形狀取決於衝擊的時間歷程和接觸區域的幾何特徵[19]。各種噪音機制的相對重要性取決於多種因素,包括輪胎設計特徵、路面特性、行駛速度等。研究表明,在光滑路面上,振動噪音和空氣泵浦效應是主要貢獻者;在粗糙路面上,衝擊噪音的貢獻顯著增加。隨著車速增加,空氣動力學相關的機制(如空氣泵浦和溝槽共鳴)的重要性增加,因為這些機制的聲功率通常與速度的高次方成正比。對於具有深溝槽的輪胎,空氣泵浦效應和溝槽共鳴更為顯著;對於淺溝槽或接近光滑的輪胎,振動噪音則成為主導。理解這些相對貢獻對於制定有效的降噪策略至關重要,因為降噪設計需要針對特定條件下的主要噪音源進行優化[20]。以下各小節將詳細闡述每種主要噪音產生機制的物理本質、特徵表現和影響因素。

2.2.1 振動噪音 (Vibration Noise)

振動噪音是輪胎噪音的最基本和最重要的產生機制之一,它源於輪胎結構在與路面相互作用過程中產生的機械振動,這些振動透過輪胎表面向周圍空氣輻射聲波。從物理本質來看,振動噪音是典型的



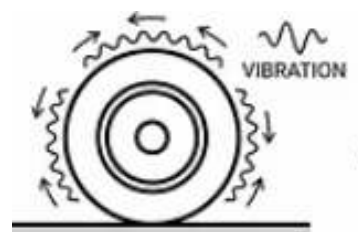
結構-聲耦合現象,輪胎作為複雜的彈性結構體,在受到外部激勵時會產生多種模態的振動,包括徑向振動、切向振動、扭轉振動以及側壁的彎曲振動等,這些振動模態透過位移邊界條件激發周圍空氣的壓力波動,形成聲輻射[21]。振動噪音的頻率特徵主要由輪胎的結構動態特性決定,包括材料的彈性模量、阻尼特性、幾何形狀、邊界條件等因素,同時也受到激勵源(即輪胎與路面接觸產生的力)的頻率成分影響。

輪胎結構的振動可以從多個層次進行分析。在宏觀層次,整個輪胎可以視為一個環形結構,具有特徵的環形模態 (ring modes), 這些模態可以用周向波數 (circumferential wave number) 來描述,不同波數對應不同的振動形狀和共振頻率。研究表明,低階環形模態(波數 2-4)通常在 200-500 Hz 範圍共振,這些模態對車內低頻噪音有重要貢獻。高階模態(波數 5 以上)的共振頻率更高,可達 1000 Hz 以上,

對外部噪音的中頻成分有顯著影響[22]。在中觀層次,胎面帶(tread band)的局部振動是外部噪音的主要來源,胎面帶在接觸區域附近經歷週期性的變形循環,從進入接觸區的壓縮變形到離開接觸區的回彈過程,這個動態過程激發胎面帶的徑向和切向振動。在微觀層次,胎面花紋單元(tread elements)的振動也會產生噪音,特別是花紋溝槽壁面的振動,這些小尺寸結構的振動主要貢獻於高頻噪音成分。

輪胎結構振動的激勵來源主要包括以下幾個方面。首先是路面不平度激勵(road roughness excitation),路面的宏觀不平度(波長數米到數十米)和微觀紋理(波長毫米到厘米)都會對輪胎產生激勵,激勵的頻率範圍取決於不平度的波長和車輛速度,根據關係式 $f = v/\lambda$ (其中 f 是頻率, v 是速度, λ 是波長),可以估算不同波長成分對應的激勵頻率。其次是胎面花紋衝擊激勵(tread pattern impact excitation),當胎面花紋單元進入和離開接觸區時,會產生瞬態衝擊力,這種衝擊具有寬頻特性,能夠激發輪胎的多個振動模態。第三是接觸壓力的空間變化,由於胎面花紋的存在,接觸區域內的壓力分佈是不均勻的,這種空間不均勻性隨著輪胎滾動而產生時間變化的激勵力[23]。

輪胎結構的振動特性受到多種因素的影響。材料特性是最基本的影響因素,輪胎由多種材料組成,包括胎面橡膠、胎體簾布層(carcase ply)、帶束層(belt layers)、胎圈鋼絲等,每種材料都有自己的彈性模量、密度和阻尼



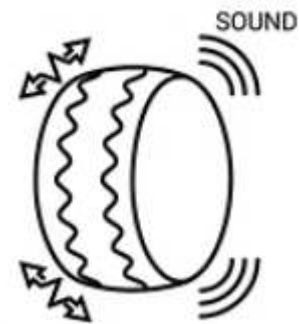
特性。胎面橡膠的配方對振動特性有重要影響,較硬的橡膠配方會提高結構剛度,增加振動的共振頻率,但也可能增加振動幅度;較軟的配方雖然能夠提供更好的阻尼效果,但可能降低輪胎的操控性能和耐磨性。帶束層的結構設計,包括鋼絲簾線的角度、層數、材料等,對胎面帶的徑向和周向剛度有決定性影響,進而影響振動特性和噪音輻射[24]。胎體結構包括簾布層的層數、簾線角度和材料類型,決定了輪胎的整體剛度和模態特性,子午線輪胎(radial tire)和斜交輪胎(bias tire)由於胎體結構不同,表現出明顯不同的振動和噪音特性。

輪胎的幾何參數對振動噪音也有重要影響。輪胎的外徑和斷面寬度決定了結構的基本尺寸,影響振動模態的頻率和形狀。一般而言,較大直徑的輪胎具有較低的模態頻率,但由於輻射面積增大,聲輻射效率可能提高。扁平比(aspect ratio,即斷面高度與斷面寬度的比值)是重要的設計參數,低扁平比輪胎(如扁平比 50 或更低)具有較短的側壁,側壁剛度較高,振動模態頻率較高,同時側壁的輻射面積較小,可能對

某些頻率範圍的噪音有利,但也可能在其他頻率範圍表現較差。胎面曲率半徑 (tread radius)影響接觸區的形狀和應力分佈,進而影響激勵力的特性[25]。

振動噪音的輻射效率是將結構振動能量轉換為聲能的關鍵因素。輻射效率 (radiation efficiency)定義為實際輻射的聲功率與假設表面以活塞運動方式輻射聲功率的比值,它取決於振動的模態形狀、頻率和結構尺寸。對於輪胎這樣的彎曲表面,不同模態的輻射效率差異很大。一般規律是,低頻範圍內,結構尺寸小於聲波波長,輻射效率較低;當頻率增加使得結構尺寸接近或大於聲波波長時(臨界頻率,critical frequency),輻射效率顯著提高。對於輪胎胎面帶,臨界頻率通常在 1000 Hz 左右,因此中高頻振動(1000 Hz 以上)的輻射效率較高,對外部噪音貢獻顯著[26]。值得注意的是,振動模態的形狀也影響輻射效率,體積變化型模態(volumetric modes,即整個結構做同相運動)比表面波動型模態(surface modes,即表面不同區域做反相運動)具有更高的輻射效率,因為後者存在聲學短路效應。

輪胎與路面接觸區域的動態特性對振動噪音有重要影響。接觸長度(contact length)隨輪胎載重、氣壓和結構設計而變化,典型值為 100-200 mm。接觸區域內的應力分佈不均勻,通常在接觸區前後端存在應力集中,這種不均勻分佈產生的激勵力具有豐富的頻率成分。接觸區的動態進程包括胎面單元的接地(snap-in)和離地(snap-out)過程,這兩個過程都是瞬態的非線性過程,會產生衝擊型激勵。研究顯示,接地過程中胎面單元從自由狀態突然接觸路面,產生的衝擊力主要激發高頻振動;離地過程中,被壓縮的胎面單元突然釋放,產生的回彈力也會激發振動[27]。這些接觸動態過程的詳細特徵取決於胎面橡膠的黏彈性特性、花紋幾何形狀以及路面特性。



輪胎氣壓和載重是重要的操作參數,對振動特性有顯著影響。氣壓增加會提高輪胎的整體剛度,導致振動模態頻率上升,同時接觸長度減小,接觸應力增大。載重增加會降低輪胎的固有頻率,增加接觸長度,改變接觸壓力分佈。研究表明,氣壓和載重的變化可以使輪胎的某些模態頻率改變 10-20%,對噪音頻譜產生可測量的影響。在實際應用中,保持適當的輪胎氣壓不僅對噪音控制重要,對輪胎的其他性能(如滾動阻力、磨耗、操控性)也至關重要[28]。

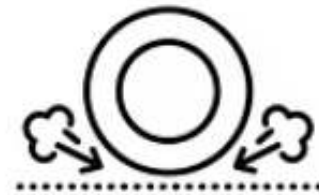
速度對振動噪音的影響是複雜的。一方面,速度增加導致激勵頻率上升,相同波長的路面不平度在更高速度下產生更高頻率的激勵。另一方面,速度增加也改變了

輪胎的動態特性,如離心力效應會使輪胎徑向剛度增加,改變模態頻率和形狀。從聲功率角度,研究表明振動噪音的聲功率通常與速度的 3 次方到 4 次方成正比,這意味著速度加倍會使噪音增加約 9-12 dB。這種強烈的速度依賴性使得高速行駛條件下的噪音控制更具挑戰性[29]。

振動噪音的控制策略主要包括降低激勵力幅度、優化結構動態特性以及提高材料阻尼等方面。降低激勵力可以透過優化胎面花紋設計,採用變節距設計來打散激勵力的頻率成分,避免在特定頻率集中能量。優化結構設計包括調整帶束層結構、改變胎體設計、優化胎面曲率等,目標是將主要模態的共振頻率移出敏感頻率範圍,或降低這些模態的輻射效率。提高材料阻尼可以透過橡膠配方優化實現,增加阻尼能夠減少振動的幅度和持續時間,但需要注意不能過度影響輪胎的其他性能。在某些高端應用中,還探索了主動控制技術,如在輪胎內部安裝壓電致動器或主動質量阻尼器,透過主動產生反相振動來抵消結構振動,但這種技術目前仍處於研究階段,尚未大規模應用[30]。

2.2.2 空氣泵浦效應 (Air Pumping Effect)

空氣泵浦效應是輪胎噪音產生的重要機制之一,特別是對於具有溝槽花紋的輪胎,這種效應在中高頻範圍(800 Hz 至 3000 Hz)對噪音有顯著貢獻。空氣泵浦效應的物理本質是當胎面溝槽進

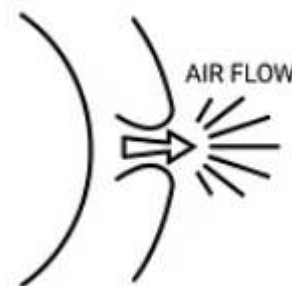


入和離開輪胎與路面的接觸區域時,溝槽內的空氣體積發生急劇變化,導致空氣被壓縮和膨脹,產生壓力波動並向外輻射噪音[31]。這個過程可以類比為一個微型的活塞-氣缸系統,溝槽壁面和路面形成氣缸壁,溝槽內的空氣被壓縮時相當於活塞的壓縮衝程,空氣被擠出時產生氣流和壓力脈衝;當溝槽離開接觸區時,溝槽體積迅速恢復,空氣急速進入形成吸氣過程,同樣產生壓力波動。這種週期性的壓縮-排放-膨脹-吸入過程隨著輪胎滾動而連續發生,形成持續的噪音輻射。

空氣泵浦效應的發生過程可以分為幾個階段。第一階段是溝槽接近接觸區,在溝槽前端接觸路面之前,溝槽開口逐漸被封閉,內部空氣開始受到壓縮,壓力升高。第二階段是溝槽完全進入接觸區,溝槽與路面形成相對密封的空間,空氣被進一步壓縮,壓力達到峰值。壓縮的空氣透過溝槽開口和溝槽之間的連接通道向外逃逸,形成高速氣流。第三階段是溝槽在接觸區內滾動,溝槽體積持續減小,空氣持續排出。第四階段是溝槽離開接觸區,溝槽與路面的接觸解除,溝槽體積迅速恢復,內部壓

力驟降,形成局部真空,周圍空氣快速流入溝槽填補空間。這個循環過程中,空氣的壓縮和膨脹都是相對快速的過程,產生的壓力變化具有高頻特徵[32]。

空氣泵浦噪音的頻率特徵主要由溝槽透過接觸區的頻率決定,這個頻率可以用公式 $f = nv/(\pi D)$ 估算,其中 n 是輪胎周向的溝槽數量, v 是車速, D 是輪胎直徑。對於典型的乘用車輪胎,周向溝槽數量可能在 60-100 之間,在車速 50 km/h 時,基頻約為 200-350 Hz。然而,實際的空氣泵浦噪音頻譜並不是單一頻率,而是包含基頻及其諧波成分,特別是 2 次到 10 次諧波往往具有顯著的幅度,這些諧波成分覆蓋了 800 Hz 至 3000 Hz 的頻率範圍,正是空氣泵浦效應的主要貢獻頻段。頻譜的具體形狀取決於泵浦過程的時間歷程,如果壓縮和排放過程越陡峭、越突然,產生的高頻成分越豐富[33]。



影響空氣泵浦效應的主要因素包括溝槽幾何參數、胎面花紋設計、車速以及路面特性等。溝槽深度是最重要的參數之一,深溝槽意味著更大的體積變化,因此產生更強的空氣泵浦效應。研究表明,溝槽深度從 5 mm 增加到 10 mm,空氣泵浦噪音可以增加 2-3 dB。溝槽寬度也有影響,寬溝槽提供更大的空氣流動通道,但同時也意味著更大的體積變化。溝槽的橫截面形狀影響空氣的壓縮和排放特性,矩形溝槽、V 形溝槽和圓弧形溝槽表現出不同的泵浦效率。溝槽的方向性也很重要,縱向溝槽(circumferential grooves)和橫向溝槽(transverse grooves)產生不同的泵浦模式,橫向溝槽由於其開口在接觸區進出方向,泵浦效應通常更強[34]。

胎面花紋的整體設計對空氣泵浦效應有系統性影響。花紋的節距(pitch)排列影響泵浦事件的時間分佈,均勻節距會導致泵浦脈衝在時間上均勻分佈,產生明顯的離散頻率成分;變節距設計透過隨機化節距長度,可以打散泵浦脈衝的週期性,將離散頻率成分轉換為更均勻的寬頻噪音,雖然總能量可能沒有顯著減少,但主觀煩惱度可以降低。溝槽之間的連通性也是重要因素,當橫向溝槽與縱向溝槽連接時,被壓縮的空氣可以透過縱向溝槽逃逸,減輕單個溝槽的壓力積累。一些創新設計採用溝槽底部的連接通道或側壁的通氣孔,為空氣提供額外的排放路徑,可以有效降低空氣泵浦噪音[35]。

車速對空氣泵浦效應有強烈影響。隨著速度增加,泵浦事件的頻率增加(如前述公式所示),同時每次泵浦事件的時間尺度縮短,壓縮和膨脹過程更加劇烈。從聲功率角度,研究表明空氣泵浦噪音的聲功率與速度的 4 次方到 5 次方成正比,這意味著

速度加倍會使噪音增加約 12-15 dB,這種強烈的速度依賴性使得高速條件下空氣泵浦成為主導噪音源之一。在高速行駛時,溝槽內的氣流可能達到相當高的速度,甚至接近或超過音速,產生激波(shock wave)等複雜的流體動力學現象,進一步增強噪音輻射[36]。

路面特性對空氣泵浦效應也有影響,雖然這種影響不如對其他噪音機制那麼顯著。路面的宏觀紋理(macrotexture)影響溝槽與路面之間的密封程度,粗糙的路面紋理使得溝槽與路面之間存在間隙,減少了密封效果,被壓縮的空氣更容易逃逸,可能降低空氣泵浦效應。相反,非常光滑的路面提供良好的密封,可能增強空氣泵浦效應。路面的多孔特性也是重要因素,多孔瀝青路面(porous asphalt)具有大量連通的孔隙,可以吸收被排出的空氣,顯著減少空氣泵浦噪音,研究表明多孔路面可以使輪胎噪音降低 3-5 dB,其中很大部分貢獻來自空氣泵浦效應的減少[37]。

空氣泵浦過程涉及複雜的流體動力學現象。當空氣被壓縮並從溝槽排出時,會在溝槽開口處形成湍流射流(turbulent jet),這種高速射流本身就是噪音源,產生寬頻的氣動噪音。射流的速度、方向和湍流特性取決於溝槽幾何、壓力差以及周圍氣流條件。計算流體力學(CFD)模擬研究揭示了溝槽內部和周圍複雜的流場結構,包括渦旋的形成、發展和脫落,



這些渦旋結構是聲波產生的重要來源。在溝槽進入接觸區的前緣和離開接觸區的后緣,流動分離和再附著現象特別顯著,這些區域是空氣泵浦噪音的主要輻射位置[38]。

喇叭效應(horn effect)是空氣泵浦噪音的重要放大機制。輪胎與路面之間形成的楔形空腔類似於聲學喇叭,具有聲波導和聲放大功能。當溝槽排出的空氣脈衝在這個空腔內傳播時,楔形幾何會引導聲波向外輻射,並在特定頻率範圍內(通常為 800 Hz 至 2500 Hz)產生 3-5 dB 的放大效果。喇叭效應的強度取決於楔形空腔的幾何參數,包括開口角度、輪胎與路面的間隙高度、接觸長度等。輪胎寬度也影響喇叭效應,寬輪胎形成更大的喇叭開口,可能產生更強的放大。一些研究探索了透過改變輪胎斷面形狀或添加側壁結構來破壞喇叭幾何,以減少喇叭效應的放大作用[39]。

空氣泵浦效應的數值模擬是當前研究的重要方向。早期的模擬採用簡化模型,將溝槽視為剛性腔體,僅考慮空氣的壓縮性和一維流動。近年來,隨著計算能力的提升,研究人員開始採用完整的三維 CFD 模型,考慮溝槽的實際幾何、溝槽壁面的彈

性變形、湍流效應以及聲波的輻射等多種物理現象。這些先進的模擬工具能夠預測空氣泵浦噪音的頻譜特徵,分析不同設計參數的影響,為優化設計提供指導。然而,準確的模擬仍然面臨挑戰,包括計算成本高昂、邊界條件難以精確定義、湍流模型的適用性等問題。驗證模擬結果需要詳細的實驗數據,包括溝槽內的壓力測量、流場可視化以及近場聲壓測量等[40]。

降低空氣泵浦噪音的設計策略包括多個方面。最直接的方法是減少溝槽深度和寬度,但這會影響輪胎的排水性能和濕地抓地力,因此需要在噪音和性能之間找到平衡。採用變節距和變溝槽幾何設計可以打散噪音的頻率成分,降低音調性。增加溝槽的傾斜角度,使溝槽不與接觸區邊界垂直,可以緩和空氣的壓縮和排放過程,減少突變。在溝槽設計中加入通氣孔或連接通道,為空氣提供額外的流動路徑,可以降低溝槽內的峰值壓力。一些創新設計探索了閉孔泡沫材料填充溝槽底部,這種材料可以吸收壓力波動而不影響溝槽的排水功能。此外,開發新型的胎面花紋拓撲結構,如非週期性花紋、分形花紋等,也顯示出降低空氣泵浦噪音的潛力[41]。

2.2.3 空氣共鳴 (Air Resonance)

空氣共鳴是輪胎噪音產生的另一個重要氣動機制,它涉及輪胎結構中各種空腔和通道內空氣的共振現象。與空氣泵浦效應主要由體積變化引起不同,空氣共鳴是由於空氣的彈性和慣性特



性,在特定幾何約束下形成的駐波共振。輪胎系統中存在多種尺度的空腔結構,每種都可能產生特定頻率的共振,包括胎面溝槽共振(groove resonance)、輪胎空腔共振(tire cavity resonance)以及輪胎-路面楔形空腔的管道共振(pipe resonance)等[42]。這些共振現象在頻譜上表現為明顯的峰值,對應於各個空腔的固有頻率,當這些共振頻率落在聽覺敏感頻段時,會顯著影響噪音的主觀評估。

胎面溝槽共振是最常見的空氣共鳴類型,發生在胎面的縱向和橫向溝槽中。當溝槽的兩端開口(或一端開口一端封閉)時,溝槽內的空氣柱可以被激發產生共振,類似於管樂器的發聲原理。對於兩端開口的溝槽,基頻共振條件為 $L = \lambda/2$,其中 L 是溝槽長度, λ 是聲波波長。對於一端開口一端封閉的溝槽,基頻共振條件為 $L = \lambda/4$ 。根據聲波在空氣中的傳播速度(約 340 m/s),可以估算共振頻率 $f = c/\lambda$,其中 c 是聲速。對於典型的輪胎溝槽,長度在 20-100 mm 範圍,對應的基頻共振頻率約為 1700 Hz(對於 $\lambda/2$ 共振)到 4250 Hz(對於 $\lambda/4$ 共振),高次諧波共振出現在基頻的整數倍

頻率[43]。這些共振頻率正好落在輪胎噪音的主要頻段內,對中高頻噪音有重要貢獻。

溝槽共振的激發機制與溝槽內的氣流擾動有關。當輪胎滾動時,溝槽內的空氣受到壓縮、剪切和湍流等多種擾動,這些寬頻的擾動能量中,與溝槽固有頻率匹配的成分會被選擇性地放大,產生共振。溝槽開口處的氣流分離和渦旋脫落是重要的激發源,這種現象類似於管風琴或哨子的發聲機制。溝槽的幾何形狀對共振特性有顯著影響,矩形溝槽、V形溝槽和曲線形溝槽具有不同的聲學特性。溝槽壁面的阻抗特性也很重要,彈性的橡膠壁面會吸收部分聲能,降低共振的 Q 值(品質因數),使共振峰變寬、幅度降低;相反,剛性壁面會產生更尖銳的共振峰[44]。

溝槽的方向性影響共振的輻射效率。縱向溝槽(沿周向延伸)的開口面向輪胎的側向,共振聲波主要向側方輻射;橫向溝槽(沿徑向延伸)的開口面向接觸區的前後方向,共振聲波主要向前後輻射。由於輪胎與路面形成的楔形空腔對側向輻射有部分遮擋作用,縱向溝槽共振的輻射效率相對較低。橫向溝槽共振則可以更有效地向外輻射,特別是當共振聲波透過楔形空腔向外傳播時,還可能受到喇叭效應的放大。斜向溝槽(既有周向也有徑向分量)的共振特性介於兩者之間,其輻射方向和效率取決於溝槽的傾斜角度[45]。



輪胎空腔共振是一種特殊的低頻共振現象,發生在輪胎內部由胎體和輪輞圍成的環形空腔中。這個空腔的體積相對較大(約 20-40 升對於乘用車輪胎),共振頻率相對較低,通常在 200-250 Hz 範圍。輪胎空腔的基本共振模態可以用圓環模型描述,共振頻率近似為 $f \approx (n \times c) / (\pi \times D)$,其中 n 是周向波數(通常 $n=1$ 對應最強的共振), c 是聲速, D 是輪胎平均直徑。這個低頻共振雖然不直接屬於輪胎/路面接觸區域產生的噪音,但它對車內噪音有重要影響,因為共振產生的聲能透過輪輞和懸吊系統傳遞到車身,在車內形成明顯的低頻轟鳴聲(boom noise)[46]。輪胎空腔共振的激發主要來自路面不平度對輪胎的週期性激勵,當激勵頻率與空腔共振頻率匹配時,共振被強烈激發。

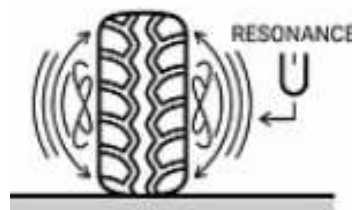
控制輪胎空腔共振的方法包括幾個策略。最直接的方法是在輪胎內部填充多孔吸音材料,如開孔泡沫,這種材料可以吸收共振聲能,顯著降低共振峰幅度,實驗表明可以降低 3-6 dB。然而,這種方法增加了輪胎重量和成本,也給輪胎的安裝和維修帶來不便。另一種方法是優化輪胎的結構設計,透過調整胎體曲率、改變內腔形狀

等手段,改變共振頻率使其偏離敏感頻段。還有研究探索了使用 Helmholtz 共振器(一種調諧吸音器)安裝在輪輞上,透過共振器的反共振效應來抵消空腔共振,但這種方法的實用性仍在驗證中[47]。

管道共振(pipe resonance)是指輪胎與路面之間楔形空腔內的聲波共振現象。這個楔形空腔可以近似視為一個變截面的聲波導,其幾何由輪胎曲率、接觸長度和路面共同決定。當溝槽排氣或其他噪音源在這個空腔內激發聲波時,聲波在空腔內的邊界之間反射傳播,特定頻率的聲波會形成駐波共振。管道共振的頻率取決於空腔的有效長度和截面形狀,對於典型的轎車輪胎,共振頻率通常在 800-1500 Hz 範圍。這種共振與前述的喇叭效應密切相關,共振放大了透過空腔輻射的噪音能量。管道共振的強度受到空腔幾何的精確影響,包括輪胎與路面的間隙高度、接觸長度以及輪胎寬度[48]。

空氣共鳴現象的一個重要特徵是其對溫度和氣壓的敏感性。由於共振頻率與聲速成正比,而聲速又與溫度的平方根成正比($c \propto \sqrt{T}$),因此溫度變化會引起共振頻率的漂移。溫度升高 10°C 會使共振頻率提高約 1.7%。輪胎氣壓也影響輪胎空腔共振,氣壓增加會略微提高聲速(在高壓下),同時也會改變輪胎的形狀和內腔體積,綜合影響共振頻率。這種溫度和氣壓敏感性意味著在不同環境條件下,空氣共鳴噪音的頻率特徵可能有所不同,這在噪音測試和評估中需要加以考慮[49]。

空氣共鳴的數值模擬通常採用聲學有限元或邊界元方法。對於簡單幾何,如直溝槽,可以使用一維或二維聲學模型進行分析,計算共振頻率和模態形狀。對於複雜幾何,如實際的胎面花紋和輪胎空腔,需要建立三維聲學模型。在模擬中,需要準確定義邊界條件,包括開口邊界(輻射邊界條件)、彈性壁面(阻抗邊界條件)等。溝槽壁面的聲學阻抗特性對共振的阻尼有重要影響,橡膠的黏彈性使其具有頻率依賴的複數阻抗,需要透過實驗測量或材料模型來確定。結構-聲耦合分析能夠同時考慮溝槽壁面的彈性振動和空氣共振的相互作用,提供更準確的預測[50]。



降低空氣共鳴噪音的設計策略包括改變共振頻率、降低共振激發以及增加阻尼等方法。改變共振頻率可以透過調整溝槽長度、寬度和深度實現,目標是將共振頻率移出聽覺最敏感的頻段(1000-4000 Hz)。採用變化的溝槽幾何,使不同位置的溝槽具有不同的共振頻率,可以打散共振峰,降低峰值幅度。降低共振激發可以透過優

化花紋設計,減少溝槽內的氣流擾動實現。增加阻尼的方法包括使用具有更高損耗因子的橡膠材料,或在溝槽內設置吸音結構。一些創新設計探索了在溝槽壁面設置微孔或多孔材料,這些結構可以吸收共振聲能而不顯著影響溝槽的排水功能。此外,透過破壞溝槽的規則幾何,如採用波浪形或鋸齒形的溝槽形狀,可以破壞清晰的共振條件,降低共振強度[51]。

2.2.4 黏著-滑動效應 (Stick-Slip Effect)

黏著-滑動效應是輪胎噪音產生的重要機制,源於胎面橡膠與路面之間摩擦接觸的動態特性。這種效應的物理本質是橡膠材料在與路面接觸時,經歷週期性的黏著(stick)和滑動(slip)狀態轉



換,產生自激振動(self-excited vibration)並輻射噪音[52]。黏著-滑動現象廣泛存在於摩擦接觸系統中,如弦樂器的發聲、剎車片的尖叫等,其共同特徵是摩擦力與相對運動速度之間存在負阻尼特性,即摩擦力隨相對速度增加而降低,這種特性提供能量輸入,維持振動的持續。在輪胎/路面接觸中,橡膠的黏彈性特性和路面的微觀粗糙度共同作用,產生複雜的黏著-滑動動態過程。

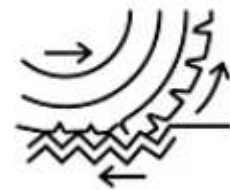
黏著-滑動過程的詳細機制可以從微觀和宏觀兩個層次理解。在微觀層次,橡膠表面與路面粗糙峰之間形成大量的微接觸點,這些接觸點不斷地建立(黏著)和斷裂(滑動)。當接觸點黏著時,橡膠材料在剪切力作用下產生彈性變形並儲存能量;當剪切應力超過靜摩擦力限制時,接觸點突然滑動,儲存的彈性能量快速釋放,產生振動脈衝。這個過程在無數的微接觸點上非同步地發生,形成連續的微觀振動和聲輻射。在宏觀層次,可以觀察到胎面單元整體在接觸區內的運動軌跡,胎面單元進入接觸區時首先黏著在路面上,隨著輪胎滾動,該單元相對於其初始接觸位置產生滑動,最終離開接觸區[53]。這個宏觀的黏著-滑動過程產生周期性的摩擦力變化,激發輪胎結構的低頻振動。

摩擦力與滑動速度的關係是理解黏著-滑動效應的關鍵。經典的摩擦模型顯示,靜摩擦係數通常大於動摩擦係數,這意味著從靜止到滑動的轉變伴隨著摩擦力的突降。更精細的模型考慮了速度依賴的摩擦係數,在低速範圍,摩擦係數隨速度增加而降低(負斜率),這個負斜率區域是產生自激振動的根源。橡膠與路面的摩擦特性還表現出顯著的頻率依賴性,這源於橡膠材料的黏彈性,橡膠在高頻變形下表現出更高的剛度和更低的損耗,影響摩擦行為。路面的粗糙度譜也影響摩擦特性,不同波長的粗糙度成分激發不同頻率的橡膠變形,產生頻率依賴的摩擦力[54]。

黏著-滑動噪音的頻率特徵通常集中在低頻和中頻範圍,從幾百赫茲到約 2000 Hz。低頻成分(200-800 Hz)主要來自宏觀的黏著-滑動過程,與胎面單元在接觸區內的運動週期相關。中頻成分(800-2000 Hz)則與微觀的黏著-滑動過程和橡膠材料的黏彈性響應有關。在某些條件下,黏著-滑動可以產生明顯的音調噪音,表現為頻譜中的尖銳峰值,對應於系統的某個自激振動模態。然而,在正常滾動條件下,黏著-滑動噪音通常表現為寬頻特徵,因為接觸區內同時存在多個胎面單元,它們的黏著-滑動過程在時間和空間上不同步,產生的聲信號相互疊加形成寬頻噪音[55]。

影響黏著-滑動效應的因素眾多且複雜。橡膠材料的配方是最基本的因素,包括聚合物類型、填料種類和含量、增塑劑等成分,這些決定了橡膠的黏彈性特性和摩擦性能。較硬的橡膠配方(高模量、低損耗角)傾向於產生更強的黏著-滑動效應,因為其彈性能量儲存能力強,滑動時的能量釋放更突然。較軟的橡膠配方(低模量、高損耗角)則透過內部阻尼耗散能量,減弱黏著-滑動效應,但可能影響輪胎的其他性能如耐磨性和操控性。輪胎的載重對黏著-滑動有顯著影響,載重增加提高了正壓力,增強了黏著效應,同時也增大了接觸面積,更多的橡膠材料參與黏著-滑動過程[56]。

路面特性對黏著-滑動效應同樣重要。路面的微觀紋理 (microtexture,波長小於 0.5 mm)直接決定了橡膠與路面之間的摩擦特性,粗糙的微紋理提供更多的黏著點,增強黏著-滑動效應。路面的硬度和彈性模量也有影響,硬質



路面(如混凝土)提供剛性支撐,黏著-滑動效應更明顯;軟質路面(如某些瀝青)會吸收部分振動能量,減弱效應。路面的溫度影響摩擦係數,低溫下橡膠變硬,摩擦特性改變;高溫下橡膠變軟,黏著性增強。路面的潮濕狀態會顯著改變摩擦特性,濕路面的摩擦係數降低,同時水膜的存在改變了接觸界面的力學行為,黏著-滑動模式可能發生變化[57]。

車速對黏著-滑動效應的影響是複雜的。從一般規律看,低速條件下黏著-滑動效應可能更顯著,因為低速時有更充分的時間建立黏著狀態,黏著階段的應力積累更充分,滑動時的能量釋放更強烈。隨著速度增加,黏著時間縮短,黏著程度降低,同時動摩擦成為主導,黏著-滑動效應可能減弱。然而,這個趨勢不是絕對的,因為速度也影響橡膠的動態力學性能和摩擦係數的速度依賴性。在某些速度區間,系統可能進入特定的自激振動狀態,黏著-滑動噪音反而增強。實驗研究表明,黏著-滑動噪

音的速度依賴性通常弱於其他噪音機制,聲功率與速度的 2 次方到 3 次方成正比,相比於空氣泵浦效應的 4-5 次方依賴性,速度影響相對較小[58]。

黏著-滑動效應在不同行駛條件下的表現差異很大。在直線勻速滾動條件下,黏著-滑動效應相對較弱,因為接觸區內的滑動相對較小。在轉向、加速或制動條件下,輪胎承受側向力或縱向力,接觸區內的滑動顯著增加,黏著-滑動效應增強,可能產生明顯的噪音,如轉彎時的尖叫聲。在極端條件如緊急制動時,輪胎可能進入完全滑動狀態,產生持續的尖叫噪音,這是典型的黏著-滑動不穩定性表現。某些特殊的路面條件,如冰面或非常光滑的拋光路面,也可能激發強烈的黏著-滑動效應,產生特徵性的噪音[59]。



黏著-滑動效應與輪胎結構的耦合是重要的考慮因素。

輪胎不是剛性體,其結構具有彈性和振動模態,黏著-滑動產生的激勵會激發這些模態,而結構振動反過來又影響接觸區的動態行為,形成結構-摩擦耦合系統。當黏著-滑動的激勵頻率與輪胎的某個固有頻率匹配時,會發生共振放大,產生強烈的噪音。這種耦合效應使得黏著-滑動噪音問題變得更加複雜,需要同時考慮摩擦界面的動態特性和結構的動態特性。有限元模擬研究表明,考慮結構-摩擦耦合的模型能夠更準確地預測黏著-滑動噪音,特別是預測自激振動的頻率和幅度[60]。降低黏著-滑動噪音的策略主要集中在材料優化和結構設計兩個方面。在材料方面,開發具有適當黏彈性特性的橡膠配方是關鍵,目標是在保證足夠摩擦力(濕地抓地力)的前提下,減少負阻尼特性和自激振動傾向。增加橡膠的損耗因子可以透過內部阻尼耗散振動能量,但需要平衡耐磨性和滾動阻力的要求。在結構設計方面,優化胎面花紋可以改變接觸區的壓力分佈和滑動模式,減少大面積同步黏著-滑動的發生。增加胎面的局部柔性,如採用細小的刀槽花紋(sipes),可以打破大尺度的連續黏著,將黏著-滑動分散到更小的單元,降低個體事件的強度。此外,透過調整輪胎的結構剛度和阻尼,改變系統的動態特性,避免在敏感頻率範圍內出現低阻尼的振動模態,也是有效的策略[61]。

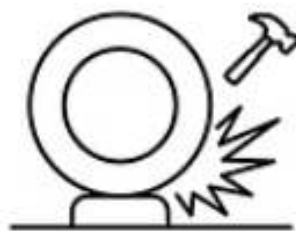
2.2.5 衝擊噪音 (Impact Noise)

衝擊噪音是輪胎噪音的重要組成部分,產生於胎面單元與路面之間的瞬態碰撞和衝擊過程。這種噪音機制的本質是機械能在短時間內的快速轉換,當胎面花紋塊或胎面單元突然接觸路面或從



路面離開時,產生高幅度的瞬態力脈衝,這些脈衝激發輪胎結構的振動和直接的聲輻射[62]。衝擊噪音的特徵是具有寬頻的頻譜成分,從低頻到高频都有貢獻,因為衝擊這種瞬態事件在時域上的持續時間很短,根據傅里葉分析原理,短時脈衝對應於寬頻的頻譜。衝擊噪音的強度取決於衝擊的劇烈程度,包括衝擊速度、接觸剛度、質量等因素,這些因素共同決定了衝擊力的峰值和時間歷程。

衝擊噪音可以進一步分為胎面衝擊(tread impact)和紋理衝擊(texture impact)兩類。胎面衝擊是指胎面花紋塊作為整體與路面的碰撞,這種衝擊主要發生在花紋塊的前緣進入接觸區和後緣離開接觸區的時刻。當花紋塊進入接觸區時,由於輪胎的滾動運動,花紋塊具有向下和向前的速度分量,突然接觸路面產生衝擊,這個



過程稱為"接地衝擊"(snap-in impact)。接地衝擊的強度取決於花紋塊的質量、接觸速度以及花紋塊與胎體之間的連接剛度。當花紋塊離開接觸區時,被壓縮的花紋塊突然釋放,產生向上的回彈運動,這個過程稱為"離地衝擊"(snap-out impact)。離地衝擊的強度與花紋塊在接觸區內積累的壓縮應變以及橡膠的回彈特性有關[63]。

紋理衝擊則是指胎面橡膠與路面的微觀粗糙峰之間的碰撞,這是一種更細微但更普遍的衝擊過程。路面的宏觀紋理(macrotecture,波長 0.5-50 mm)和微觀紋理(microtexture,波長小於 0.5 mm)都會對輪胎表面產生衝擊激勵。當輪胎表面滾過路面的突起時,橡膠材料在短時間內經歷快速變形,產生應力波並傳播到輪胎結構中。紋理衝擊的頻率成分主要由路面紋理的波長和車速決定,根據關係式 $f = v/\lambda$,粗糙路面的小波長成分在高速條件下可以產生數千赫茲的高頻激勵。紋理衝擊對高頻噪音(2000 Hz 以上)有重要貢獻,而胎面衝擊則主要影響中低頻噪音(1000 Hz 以下)[64]。

衝擊過程的力學特性可以用衝擊力學理論來分析。衝擊力的峰值與碰撞速度、接觸剛度和有效質量有關,可以用公式 $F_{\max} \approx kv\sqrt{mk}$ 來估算,其中 k 是接觸剛度, v 是衝擊速度, m 是有效質量。衝擊持續時間則與接觸剛度和質量有關, $t \approx \pi\sqrt{m/k}$ 。對於輪胎/路面衝擊,接觸剛度非常高(因為路面通常是剛性的),導致衝擊持續時間很短(通常小於 1 毫秒),因此產生寬頻的力脈衝。衝擊力的時間歷程並不是簡單的脈衝,而是包含複雜的振盪過程,因為衝擊激發了局部結構的振動,這些振動疊加在衝擊力信號中,形成帶有振盪尾部的力脈衝[65]。

衝擊噪音的輻射機制包括直接輻射和間接輻射兩種。直接輻射是指衝擊區域附近的空氣被快速壓縮和膨脹,直接產生聲波。這種機制對應於聲學中的單極子或偶極子源,輻射效率取決於衝擊區域的尺寸和衝擊的時間尺度。對於較大的胎面花紋塊(尺寸 10-30 mm),其衝擊產生的直接輻射主要在低頻範圍(小於 1000 Hz)有效;對於微小的紋理衝擊(尺寸小於 1 mm),直接輻射主要在高頻範圍(大於 3000 Hz)有效。間接輻射是指衝擊激發的結構振動透過表面運動輻射聲波,這是主要的噪音輻射機制。衝擊產生的彈性波在輪胎結構中傳播,激發各種振動模態,這些模態的振動透過胎面和側壁表面向外輻射聲能[66]。

影響衝擊噪音的因素涉及輪胎設計、路面特性和行駛條件等多個方面。在輪胎設計方面,胎面花紋的幾何形狀是關鍵因素。花紋塊的尺寸影響有效衝擊質量,大花紋塊產生更強的衝擊;花紋塊的剛



度影響接觸衝擊的劇烈程度,剛性花紋塊產生更突然的衝擊。花紋塊的形狀也很重要,尖銳的前緣(leading edge)會產生更強的接地衝擊,圓滑的前緣則可以緩和衝擊過程。花紋塊與胎體的連接設計影響衝擊能量的傳遞,柔性連接可以吸收部分衝擊能量,減少傳遞到胎體的振動。胎面橡膠的硬度對紋理衝擊有顯著影響,硬橡膠對路面粗糙度更敏感,產生更強的紋理衝擊噪音;軟橡膠能夠順應路面微觀形狀,減少衝擊強度[67]。

路面特性對衝擊噪音的影響極為顯著,甚至可能超過輪胎本身的影響。路面的粗糙度是最直接的因素,粗糙路面提供更多的突起和凹陷,產生更頻繁和更強烈的衝擊。路面的紋理可以用功率譜密度(PSD)來表徵,PSD 曲線的形狀和幅度決定了不同波長成分的激勵強度。研究表明,在相同輪胎條件下,不同路面的衝擊噪音差異可達 8-10 dB,顯示路面因素的重要性。路面材料的硬度和彈性模量也有影響,硬質路面(如混凝土)產生更強的衝擊,因為衝擊能量主要由輪胎吸收;軟質路面(如瀝青)可以吸收部分衝擊能量,減少反射到輪胎的力。路面的溫度狀態影響材料特性,低溫下瀝青路面變硬,增強衝擊效應[68]。

車速對衝擊噪音有重要影響。速度增加直接提高了衝擊速度,增大了衝擊力的峰值。同時,速度增加也提高了衝擊事件的頻率,更多的花紋塊在單位時間內參與衝擊過程。從聲功率角度,衝擊噪音通常與速度的 3 次方到 4 次方成正比,這個依賴性介於振動噪音和空氣泵浦效應之間。值得注意的是,在高速條件下,輪胎的動態

特性會發生變化,離心力效應使輪胎徑向膨脹,改變接觸形狀和花紋塊的運動軌跡,可能影響衝擊的模式和強度[69]。

輪胎的載重和氣壓對衝擊噪音也有影響。載重增加會增大接觸壓力和接觸面積,更多的花紋塊同時參與接觸,衝擊的總能量增加。同時,載重也會改變花紋塊的變形程度,影響離地衝擊的強度。氣壓增加會提高輪胎的整體剛度,使花紋塊的運動更加劇烈,可能增強衝擊效應。然而,氣壓和載重對衝擊噪音的影響相對複雜,因為它們同時影響接觸區的幾何形狀、應力分佈以及結構的動態特性,最終效果是這些因素綜合作用的結果[70]。

衝擊噪音的測量和分析通常需要高時間分辨率的數據採集。傳統的穩態噪音測量方法(如使用積分噪音計)只能給出平均水平,無法揭示衝擊事件的瞬態特徵。高速數據採集系統(採樣率通常需要達到 20 kHz 以上)可以捕捉單個衝擊事件的時間歷程,透過信號處理技術(如短時傅里葉變換、小波變換等)可以分析衝擊事件的時頻特徵。同步測量衝擊力和聲壓信號,可以建立兩者之間的傳遞函數,揭示衝擊激勵到聲輻射的轉換機制。高速攝影技術可以可視化花紋塊的運動軌跡,直接觀察接地和離地過程的動態細節[71]。

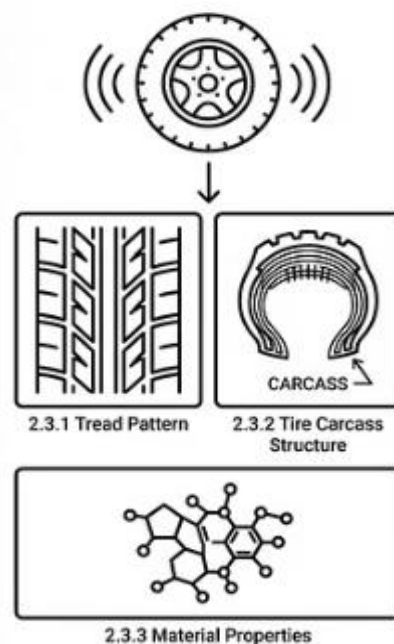
降低衝擊噪音的設計策略包括多個層面。在胎面花紋設計方面,採用圓滑的花紋塊前緣和後緣,避免尖銳的角度,可以緩和衝擊過程。減小花紋塊的尺寸可以降低單個衝擊的強度,但需要平衡花紋的排水性能和剛度要求。採用變化的花紋塊形狀和尺寸,可以使衝擊事件在時間和頻率上分散,避免集中的衝擊能量。在花紋塊與胎體的連接處設計柔性結構,如細小的連接帶或柔性鉸鏈,可以隔離衝擊向胎體的傳遞。在材料方面,選擇適當硬度和阻尼特性的橡膠配方,可以在保證性能的前提下減少衝擊噪音。一些先進的研究探索了在花紋塊內部設置阻尼材料或泡沫填充,這些結構可以吸收衝擊能量,但需要克服製造複雜性和耐久性的挑戰[72]。

2.3 輪胎結構與噪音的關係 (Relationship Between Tire Structure and Noise)

輪胎的結構設計對噪音性能有著決定性的影響,這種影響涵蓋從宏觀的整體結構佈局到微觀的材料組成等多個層次。輪胎作為複雜的複合結構體,由多種材料按照特定的幾何形式組合而成,包括橡膠、簾布、鋼絲等不同性質的組分,這些組分的空間配置決定了輪胎的力學特性、動態響應以及聲學行為。理解輪胎結構與噪音之間的關係,需要從系統的角度分析各個結構要素如何影響噪音產生機制的激發強度、傳遞路徑以及輻射效率[73]。輪胎結構設計的挑戰在於需要同時滿足多種性能要求,包括載重能力、操控性能、耐久性、滾動阻力、濕地抓地力以及噪音

等,這些性能之間往往存在權衡關係,低噪音設計必須在保證其他關鍵性能的前提下進行優化。

輪胎的主要結構組成包括胎面(tread)、帶束層(belt)、胎體(carcase)、側壁(sidewall)、胎圈(bead)以及內襯層(inner liner)等部分,每個部分都有其特定的功能和對噪音的影響。胎面是輪胎與路面直接接觸的部分,其花紋設計、橡膠配方以及幾何形狀直接決定了噪音的產生特性,這部分對噪音的影響最為直接和顯著。帶束層位於胎面下方,通常由鋼絲簾線以特定角度排列而成,其主要功能是提供周向剛度,限制胎面的徑向膨脹,同時影響胎面帶的振動特性。胎體是輪胎的骨架結構,由簾布層構成,決定了輪胎的整體強度和形狀,對輪胎的低階振動模態有重要影響。側壁連接胎面和胎圈,提供徑向柔性,是重要的聲輻射表面。胎圈包含鋼絲圈和填充橡膠,將輪胎固定在輪轆上,也是振動能量從輪胎向車輛傳遞的路徑[74]。



輪胎結構對噪音的影響可以從幾個方面來分析。首先是結構對激勵力的影響,輪胎的接觸特性,包括接觸壓力分佈、接觸形狀以及動態接觸過程,都受到結構設計的影響,這些特性決定了作用在輪胎上的激勵力的大小和頻率成分。其次是結構的動態響應特性,輪胎的振動模態,包括模態頻率、形狀和阻尼,決定了激勵力如何激發振動以及振動的幅度。第三是聲輻射特性,輪胎表面的振動如何轉換為聲輻射,取決於振動的空間分佈、頻率以及輻射表面的幾何特徵。第四是振動傳遞特性,結構如何將振動能量從接觸區傳遞到其他部位以及透過連接點傳遞到車輛,這影響結構傳播噪音(structure-borne noise)的水平[75]。

結構設計對不同噪音產生機制的影響程度不同。對於振動噪音,結構的模態特性是關鍵影響因素,帶束層和胎體的設計直接決定模態頻率和阻尼。對於空氣泵浦效應,胎面花紋的溝槽設計是主導因素,但結構剛度也有間接影響,因為它決定了溝槽在接觸區內的變形程度。對於黏著-滑動效應,胎面橡膠的材料特性最為重要,但胎面的局部剛度和支撐特性也會影響接觸動態。對於衝擊噪音,花紋塊的質量和剛度是直接影響因素,這些特性由花紋幾何和胎面橡膠性質共同決定。因此,全面的低噪音設計需要在多個結構層次上進行優化,而不能僅關注單一要素[76]。

子午線輪胎(radial tire)和斜交輪胎(bias tire)在結構上的根本差異導致了不同的噪音特性。子午線輪胎的胎體簾線與周向成 90 度角排列,帶



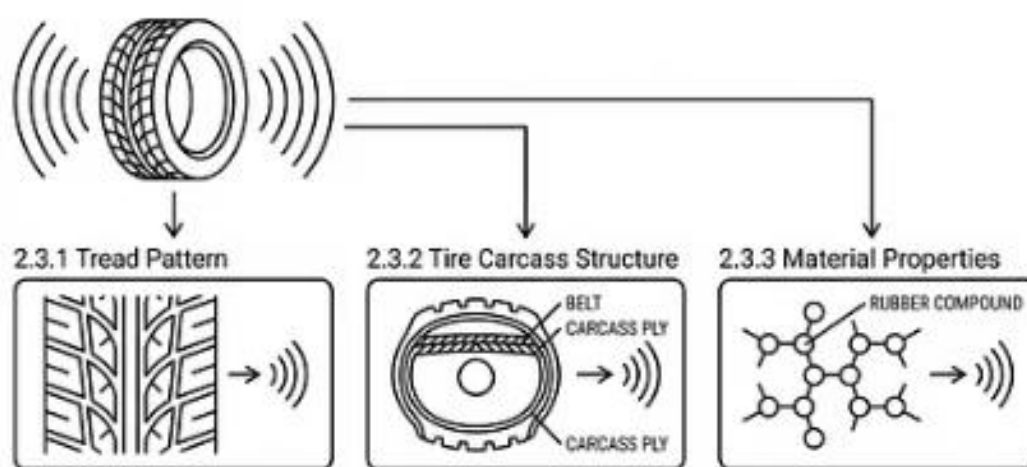
束層的鋼絲簾線則以較小的角度(通常 15-25 度)相對周向排列,這種結構使得胎冠區域具有很高的周向剛度但徑向相對柔軟。斜交輪胎的胎體簾線以 30-40 度角度交叉排列,沒有獨立的帶束層,整體剛度特性更加均勻。從噪音角度看,子午線輪胎由於胎冠剛度高,胎面帶的振動頻率較高,有利於降低中低頻噪音;同時徑向柔軟可以更好地順應路面,減少衝擊激勵。斜交輪胎的胎體剛度較低,振動頻率較低,可能在敏感頻段產生較強的噪音。現代乘用車輪胎幾乎全部採用于午線結構,部分原因就是其在噪音、滾動阻力和操控性能方面的優勢[77]。

輪胎的尺寸參數對噪音有系統性影響。輪胎直徑增大會降低振動模態的頻率,改變噪音的頻譜分布,但也增大了輻射表面積,可能提高某些頻率的輻射效率。輪胎寬度增加會擴大接觸面積,改變接觸形狀,同時加寬了輪胎與路面之間的楔形空腔,增強喇叭效應。扁平比(斷面高度與寬度的比值)是重要的設計參數,低扁平比輪胎側壁較短,側壁剛度高,側壁振動的頻率較高,但輻射面積較小;高扁平比輪胎側壁柔軟,能更好地隔離路面激勵向輪輞的傳遞,但側壁振動頻率較低且幅度可能較大。總體而言,輪胎尺寸對噪音的影響是多方面的,沒有簡單的單調關係,需要透過詳細的分析或測試來評估[78]。以下各小節將詳細討論輪胎結構的主要組成部分與噪音的關係。

2.3.1 胎面花紋 (Tread Pattern)

胎面花紋是輪胎結構中對噪音影響最直接和最顯著的要素,它不僅決定了輪胎與路面相互作用的機械特性,還直接影響多種噪音產生機制的激發強度和頻率特徵。胎面花紋的主要功能包括提供濕地抓地力(透過排水溝槽)、增強牽引力和制動力(透過花紋塊的抓地作用)、保證行駛穩定性以及實現自清潔功能。然而,這些功能性要求往往與低噪音設計存在矛盾,因為有效的排水需要深而寬的溝槽,這會增強空氣泵浦效應和溝槽共振;增強抓地力需要較硬的橡膠和明顯的花紋邊緣,這會增加衝擊噪音和黏著-滑動效應[79]。因此,胎面花紋設計是一個多目標優化問題,需要在噪音、安全性能、耐久性和舒適性之間找到最佳平衡點。

胎面花紋的基本組成要素包括溝槽(grooves)、花紋塊(tread blocks)、細紋(sipes)以及光滑區域(rib)等。溝槽是花紋中的凹陷通道,根據方向可分為縱向溝槽(沿周向延伸)、橫向溝槽(沿徑向延伸)和斜向溝槽(斜角延伸)。縱向溝槽主要用於排水和提供直線行駛穩定性,其對噪音的影響相對較小,因為溝槽開口面向側方,聲輻射受到輪胎本體的部分遮擋。橫向溝槽和斜向溝槽主要用於提供牽引力和側向抓地力,它們的開口面向接觸區的前後方向,產生的空氣泵浦和共振噪音可以更有效地向外輻射。花紋塊是由溝槽分割形成的橡膠單元,其尺寸、形狀、剛度以及排列方式都對噪音有重要影響。細紋是刻在花紋塊表面的細小槽縫,主要用於濕滑路面上提供額外的抓地力,對噪音的影響相對較小但也需要考慮[80]。



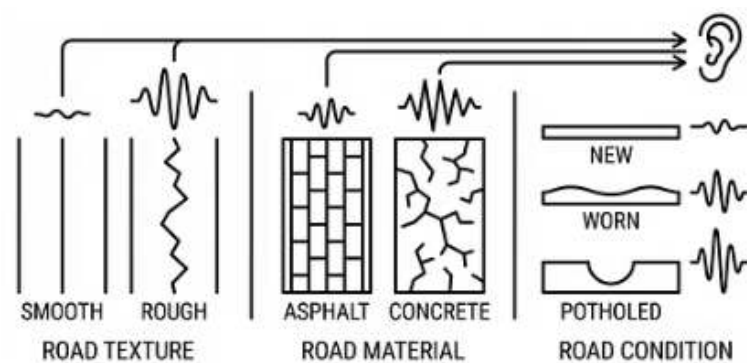
花紋的節距設計(pitch sequence design)是控制噪音的核心技術之一。節距是指周向上相鄰花紋單元的間距,早期輪胎採用均勻節距設計,所有花紋單元等距排列,這種設計簡單但會產生強烈的音調噪音(tonal noise),因為所有花紋單元以相同的頻率透過接觸區,產生的噪音在頻譜上表現為明顯的離散峰值,對應於透過頻率及其諧波。為了解決這個問題,現代輪胎普遍採用變節距設計(variable pitch design),透過隨機或優化的方式改變花紋節距的長度,使噪音能量在頻率上更均勻分佈。變節距設計的理論基礎是將週期性激勵轉換為隨機或准隨機激勵,雖然總能量可能沒有顯著減少,但離散頻率成分的幅度降低,主觀煩惱度顯著改善[81]。

變節距設計的具體實施方法包括幾種策略。最簡單的方法是隨機節距排列,從預定的幾種節距長度中隨機選擇排列順序。更先進的方法是優化節距序列(optimal pitch sequencing),透過數學優化算法(如遺傳算法、模擬退火算法等)搜索最佳的節距排列,目標函數通常是極小化特定頻率範圍內的噪音值峰值或極小化整體 A 加權噪音值。研究表明,經過優化的節距序列可以比均勻節距降低 3-5 dB 的音調噪

音,顯著改善聲品質。節距種類的數量也是設計參數,通常採用 3-7 種不同的節距長度,節距種類越多,噪音分散效果越好,但花紋設計和模具製造的複雜度也增加[82]。節距長度的變化範圍也很重要,一般要求最長和最短節距的比值在 1.3 到 2.0 之間,變化範圍太小則分散效果不明顯,太大則可能影響輪胎的均勻性和操控性能。溝槽的幾何參數對噪音有直接影響。溝槽深度是最重要的參數之一,深度增加會增強空氣泵浦效應,因為體積變化更大;同時也可能降低溝槽共振的頻率,使其移向聽覺更敏感的頻段。研究表明,溝槽深度從 5 mm 增加到 10 mm,噪音可能增加 2-3 dB。然而,足夠的溝槽深度對於排水性能和輪胎壽命至關重要,因此不能簡單地減小深度來降噪。溝槽寬度也有影響,寬溝槽提供更大的空氣流動通道,可能減少空氣泵浦的壓力積累,但同時也增大了體積變化量。溝槽的橫截面形狀影響空氣動力學特性和共振模式,矩形溝槽、V 形溝槽和複合形狀溝槽表現出不同的聲學性能。一些研究探索了變深度和變寬度溝槽設計,在不同周向位置採用不同的溝槽尺寸,以打散共振頻率和優化排水性能的空間分佈[83]。

溝槽的方向性和連通性是重要的設計考慮。如前所述,橫向溝槽產生的噪音通常比縱向溝槽更強,因此減少橫向溝槽的數量或採用斜向溝槽可以降噪。然而,橫向溝槽對牽引性能至關重要,完全消除不可行。一種折衷方案是採用偏斜角度較大的斜向溝槽,既保證抓地力又減少噪音。溝槽的連通性影響空氣的流動路徑,當橫向溝槽與縱向溝槽連接時,被壓縮的空氣可以透過縱向溝槽逃逸,減輕壓力積累。一些創新設計在橫向溝槽中段設置與縱向溝槽的連接通道,或在溝槽底部設置洩壓通道,這些設計可以有效降低空氣泵浦噪音而不顯著影響排水性能[84]。

花紋塊的設計對噪音有多方面影響。花紋塊的尺寸影響其質量和剛度,進而影響衝擊噪音和振動特性。大花紋塊產生更強的接地和離地衝擊,但較大的剛度可能有利於操控性能。小花紋塊產生較弱的個體衝擊,但數量更多,總體噪音效果取決於具體設計。花紋塊的形狀也很重要,特別是前緣和後緣的設計。尖銳的前緣會產生劇烈的接地衝擊,圓滑的前緣可以緩和衝擊過程。一種常見的降噪設計



是採用傾斜的前緣,使花紋塊逐漸接地而非突然接地,顯著減少衝擊噪音。花紋塊的後緣設計影響離地過程,開槽或缺口設計可以減少離地時的突然回彈[85]。

花紋塊與胎體的連接設計影響噪音的傳遞特性。花紋塊透過胎面基部與帶束層連接,連接區域的剛度和阻尼特性決定了花紋塊振動向胎體傳遞的效率。採用細窄的連接帶(thin ties)可以提供一定程度的隔振效果,減少花紋塊的衝擊和振動向胎體的傳遞,但這會降低花紋塊的支撐剛度,可能影響操控性能和磨耗均勻性。一些高性能輪胎在花紋塊底部設計了阻尼層或柔性層,透過材料的黏彈性阻尼吸收振動能量,這種設計可以有效降噪,但增加了製造複雜度和成本[86]。

三維花紋設計(three-dimensional tread design)是近年來的發展趨勢,透過改變花紋的高度分佈和側壁形狀,實現更複雜的功能。例如,採用台階狀的花紋塊高度,使不同高度的部分在不同磨耗階段發揮作用,保持整個壽命期內的性能一致性。從噪音角度,三維設計可以透過改變花紋塊的剛度分佈來優化振動特性,或透過特殊的側壁形狀來影響空氣流動。一些創新設計在花紋塊側壁上設置小孔或通道,為空氣提供額外的流動路徑,減少泵浦壓力。這些複雜的三維特徵需要先進的模具製造技術,通常只在高端產品中應用[87]。

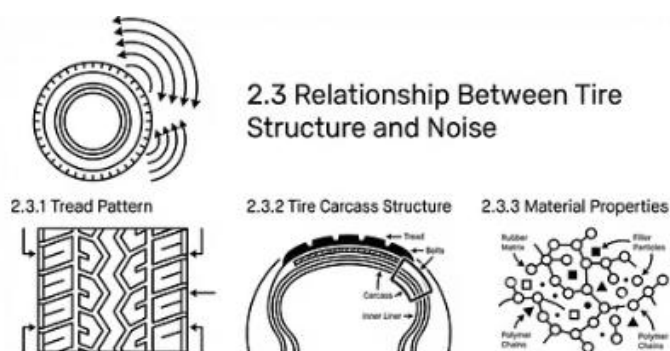
花紋的對稱性和方向性也是設計考慮。對稱花紋在輪胎的左右兩側採用鏡像對稱的設計,這種花紋通常表現出均衡的性能,噪音和操控性能在不同行駛條件下比較一致。非對稱花紋在內外側採用不同的設計,外側通常設計較大的花紋塊和剛度以保證轉向性能,內側設計較多的溝槽以優化排水性能,這種設計可以在不同側面針對性地優化性能,包括噪音控制。方向性花紋指定了輪胎的滾動方向,通常採用V形或箭頭形的花紋走向,這種設計可以優化排水效率和牽引性能,從噪音角度,方向性設計可以控制空氣的排出方向,可能降低某些頻率成分,但也可能在特定方向上增強噪音[88]。

花紋設計的計算機優化技術已成為當代輪胎開發的標準工具。有限元分析可以模擬花紋塊的變形和應力分佈,預測剛度和接觸特性。計算流體力學可以模擬溝槽內的空氣流動和聲學特性,評估空氣泵浦和共鳴效應。多體動力學模擬可以分析花紋塊的運動軌跡和衝擊過程。結合這些模擬工具與優化算法(如遺傳算法、粒子群算法等),可以在設計階段對花紋進行多目標優化,在滿足性能約束的前提下尋找最優的低噪音設計。這種虛擬設計方法可以大幅減少物理原型的數量,縮短開發週期,已成為降低輪胎噪音的重要技術手段[89]。

2.3.2 胎體結構 (Tire Carcass Structure)

胎體結構是輪胎的骨架系統,對輪胎的整體力學特性、動態響應以及噪音性能有著根本性的影響。胎體的主要組成包括簾布層(carcass plies)、帶束層(belt layers)、胎圈(bead)以及各部分之間的橡膠過渡層。這些組分的材料選擇、幾何配置以及層間相互作用決定了輪胎的剛度分佈、振動模態以及能量傳遞特性,進而影響噪音的產生和傳播[90]。

與胎面花紋主要影響噪音的激發不同,胎體結構更多地影響噪音的響應和輻射特性,包括決定輪胎對激勵力的動態響應幅度、振動能量在結構中的傳播路徑以及透過表面運動向空氣輻射聲波的效率。



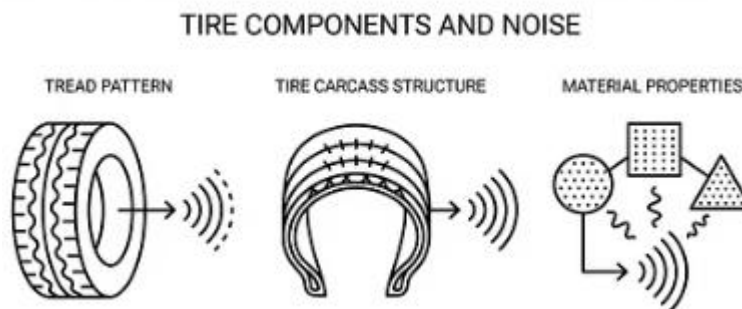
子午線輪胎的胎體結構通常包括一層或兩層簾布層,簾線與周向成 90 度角排列,從一側胎圈延伸到另一側胎圈,形成輪胎的基本骨架。簾線材料通常採用聚酯纖維、尼龍或人造絲,這些材料具有高強度和適當的彈性,能夠承受輪胎的內壓和載重。簾布層的周向剛度相對較低,徑向具有一定的柔性,這種特性使得子午線輪胎能夠順應路面不平,提供良好的乘坐舒適性。從噪音角度看,胎體的徑向柔性有助於減少路面激勵的傳遞,降低高頻振動;但過低的周向剛度可能導致胎面帶的不穩定振動,增加某些模態的噪音貢獻[91]。簾布層的層數和簾線密度影響胎體的整體剛度,雙層簾布比單層簾布提供更高的強度和剛度,但也增加了輪胎的質量和滾動阻力,對噪音的影響則取決於具體的模態特性變化。

帶束層位於簾布層外側、胎面橡膠下方,是子午線輪胎的關鍵結構組件。帶束層通常由 2-4 層鋼絲簾線組成,簾線相對於周向以較小的角度(通常 15-25 度)排列,不同層的簾線角度相反(交叉排列),形成穩定的結構。帶束層的主要功能是限制胎冠區域的徑向膨脹,提供高的周向和側向剛度,保證胎面與路面的接觸穩定性。帶束層的高剛度使得胎面帶作為相對獨立的結構單元振動,其振動特性主要由帶束層的性质決定。帶束層的鋼絲簾線角度是重要的設計參數,角度增大會提高周向剛度但降低側向剛度,角度減小則相反。研究表明,帶束角度對輪胎的振動模態頻率有顯著影響,角度變化 5 度可以使某些模態頻率改變 10-15%[92]。從噪音控制角度,

透過優化帶束角度,可以調整主要振動模態的頻率,使其避開聽覺最敏感的頻段或避免與主要激勵頻率重合。

帶束層的層數和材料也影響噪音性能。兩層帶束是最常見的配置,提供良好的剛度和強度。增加到三層或四層可以進一步提高剛度和均勻性,但增加重量和成本。從噪音角度,更多的帶束層意味著更高的胎冠剛度,可能提高振動模態頻率,改變噪音頻譜。帶束層之間的橡膠層提供層間耦合和阻尼,較厚的橡膠層可以增加阻尼,吸收振動能量,但會降低整體剛度。一些高性能輪胎採用混合帶束結構,例如使用芳綸纖維(Kevlar)或混合纖維替代部分鋼絲,這些材料具有高強度、低密度的特點,可以在保持剛度的同時減輕重量,改善動態特性[93]。帶束層的寬度和輪廓形狀也是設計考慮,帶束層通常比胎面略窄,其邊緣位置影響胎面帶的支撐特性和邊緣效應,從而影響振動和噪音。

胎體結構對輪胎振動模態有決定性影響。輪胎的振動可以用環形結構的模態理論來描述,主要模態包括徑向模態(radial modes)、切向模態(tangential modes)、側



向模態(lateral modes)以及扭轉模態(torsional modes)。每種模態都有其特徵頻率和振動形狀,由輪胎的質量分佈、剛度分佈和邊界條件決定。徑向模態對應於胎面和側壁的徑向運動,是外部噪音的主要貢獻模態,其頻率範圍通常在 200-1000 Hz。切向模態對應於胎面的周向伸縮運動,頻率較高,通常在 1000 Hz 以上。側壁的彎曲模態涉及側壁的複雜變形,對車內噪音有重要影響[94]。胎體結構的設計,包括簾布層和帶束層的配置,直接決定了這些模態的特性。透過有限元模態分析,可以預測不同結構設計下的模態頻率和形狀,為優化設計提供依據。

胎體的阻尼特性對噪音有重要影響。阻尼決定了振動的衰減速度和共振時的放大倍數,高阻尼可以快速耗散振動能量,減小振動幅度,降低噪音輻射。輪胎的阻尼來源於多個方面:橡膠材料的內部阻尼(黏彈性阻尼)、層間的摩擦阻尼、空氣阻尼等。橡膠的黏彈性阻尼與材料配方密切相關,高損耗因子的橡膠提供更好的阻尼但可能影響其他性能。層間摩擦阻尼來自於簾布層、帶束層之間以及與橡膠層之間的微觀相對運動,這種阻尼與層間的壓力、表面處理以及橡膠的黏附特性有關。增加

層間橡膠的厚度可以提高摩擦阻尼,但會降低整體剛度[95]。一些研究探索了在胎體中加入專用阻尼層或阻尼材料,如高阻尼橡膠或粘彈性聚合物,這些材料可以有效吸收振動能量,但需要解決與其他結構組分的兼容性和耐久性問題。

側壁結構對噪音的影響主要表現在兩個方面:作為聲輻射表面和作為振動傳遞路徑。側壁是輪胎的大面積表面,其振動可以有效地向空氣輻射聲波,特別是在中低頻範圍。側壁的剛度和阻尼特性決定了其振動幅度和頻率響應,較柔軟的側壁可以隔離路面激勵向輪輞的傳遞,但也可能產生較大幅度的振動,增加輻射噪音。側壁的厚度分佈、橡膠配方以及加強結構(如側壁加強筋)都會影響其動態特性。從振動傳遞角度,側壁是從胎面到輪輞的主要路徑,其阻抗特性決定了結構傳播噪音的水平。增加側壁的阻尼可以減少傳遞到車輛的振動能量,降低車內噪音[96]。一些輪胎採用非對稱側壁設計,外側側壁較厚較硬以支撐轉向負載,內側側壁較柔軟以優化舒適性和噪音,這種設計需要透過精確的模擬和測試來優化。

胎圈結構是輪胎與輪輞的連接部位,包含鋼絲圈(**bead wire**)和填充橡膠(**bead filler**)。胎圈的主要功能是保證輪胎牢固地安裝在輪輞上,承受內壓和載重產生的分離力。從噪音角度,胎圈區域的剛度影響振動從輪胎向輪輞的傳遞,高剛度的胎圈會有效傳遞振動,可能增加透過懸吊系統傳遞到車身的結構噪音。胎圈填充橡膠的材料特性和幾何形狀影響局部剛度和阻尼,較大且較硬的填充橡膠提高側壁下部的剛度,影響輪胎的整體動態特性。一些研究探索了在胎圈區域加入阻尼材料或隔振結構,以減少振動傳遞,但這些設計需要考慮對輪胎安裝和使用的影響[97]。

輪胎的均勻性(**uniformity**)也與胎體結構相關,並影響噪音性能。輪胎的不均勻性包括質量不均勻、剛度不均勻、幾何不均勻等,這些不均勻性會在滾動時產生週期性的激勵力(如徑向力變化、側向力變化),激發振動和噪音。胎體結構的製造精度,包括簾布層的對接、帶束層的剪接、材料的分佈等,都影響輪胎的均勻性。現代輪胎製造採用嚴格的質量控制和均勻性測試,透過修正磨削(**uniformity grinding**)等工藝改善均勻性。從噪音角度,良好的均勻性可以減少低頻的週期性激勵,降低車內的轟鳴聲。研究表明,改善輪胎的徑向力變化(**RFV, radial force variation**)可以降低 200-300 Hz 範圍的車內噪音 2-3 dB[98]。

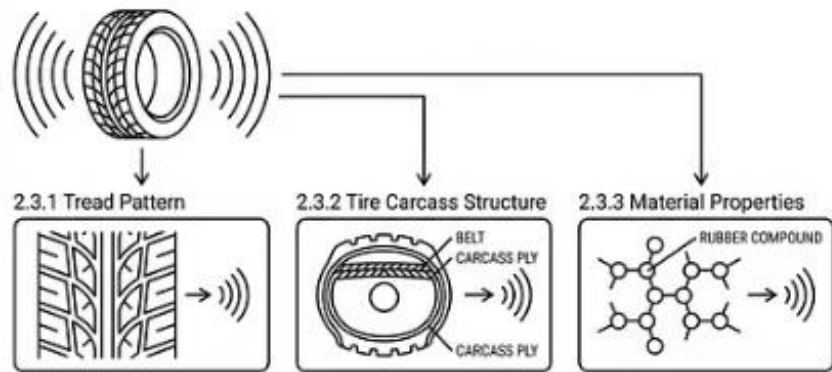
胎體結構的優化設計需要綜合考慮多種性能需求。從噪音控制角度,理想的胎體應該具有適當的剛度以支撐胎面的穩定接觸、高的阻尼以耗散振動能量、良好的均勻性以減少週期性激勵,以及優化的模態分佈以避開敏感頻率範圍。然而,這些目標需要與其他性能要求平衡,如承載能力需要足夠的強度、操控性能需要適當

的剛度分佈、耐久性需要抗疲勞特性、舒適性需要適當的柔性。現代輪胎設計採用多學科優化方法,使用有限元分析、模態分析、噪音預測模型等工具,在多維性能空間中尋找最優解[99]。隨著材料科學和製造技術的進步,新型簾線材料、混合結構設計以及智能製造技術為胎體結構的創新提供了更多可能性,未來的胎體設計將能更好地兼顧噪音控制與其他關鍵性能。

2.3.3 材料特性 (Material Properties)

輪胎材料的特性對噪音性能有著深遠而複雜的影響,這些影響涵蓋從微觀的分子鏈運動到宏觀的結構響應等多個層次。輪胎由多種材料複合而成,主要包括各種橡膠配方、簾線材料(聚酯、尼龍、人造絲、鋼絲等)、鋼絲以及各種添加劑。每種材料都有其特定的力學性能、阻尼特性和動態響應特徵,這些特性決定了輪胎對激勵的響應方式、振動能量的耗散機制以及聲學行為[100]。橡膠作為輪胎的主要組成材料,其黏彈性特性(viscoelastic properties)是理解材料與噪音關係的關鍵,這種特性使橡膠同時表現出彈性(能量儲存)和黏性(能量耗散)的行為,而且這種行為強烈依賴於溫度、頻率和應變幅度。

胎面橡膠的配方設計是影響噪音的最直接材料因素。胎面橡膠通常由基礎聚合物(如天然橡膠、丁苯橡膠、丁二烯橡膠等)、補強填料(如

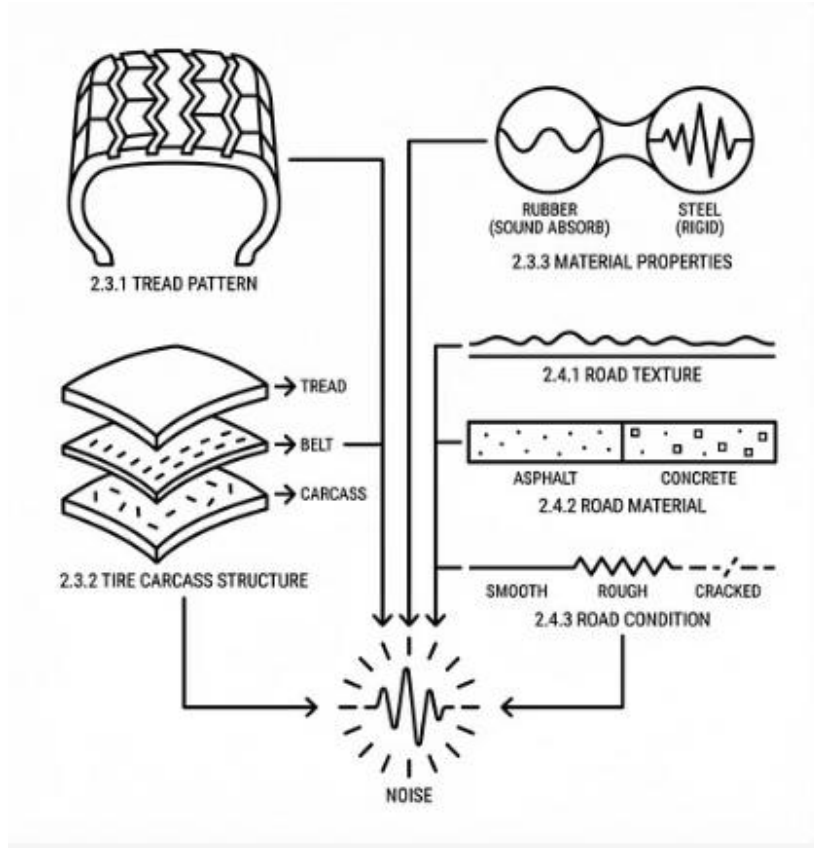


炭黑、二氧化矽)、增塑劑、硫化劑以及其他功能性添加劑組成。這些組分的種類和比例決定了橡膠的硬度(hardness)、模量(modulus)、損耗因子(loss tangent, $\tan \delta$)、撕裂強度、耐磨性等關鍵性能。從噪音角度看,硬度是最直觀的參數,較硬的橡膠(高邵氏硬度)具有更高的彈性模量,對路面不平度更敏感,產生更強的衝擊和振動,特別是紋理衝擊噪音顯著增加。較軟的橡膠能夠順應路面的微觀形狀,減少衝擊強度,但可能增加黏著-滑動效應[101]。研究表明,胎面硬度增加 10 邵氏度,高頻噪音(2000 Hz 以上)可能增加 1-2 dB,這主要是由於與路面紋理相互作用的增強。

橡膠的黏彈性特性可以用複數模量(complex modulus)來表徵,包括儲存模量(storage modulus, E')和損耗模量(loss modulus, E'')。儲存模量代表材料的彈性部

分,決定能量儲存能力;損耗模量代表黏性部分,決定能量耗散能力。損耗因子 $\tan \delta = E''/E'$ 是衡量材料阻尼特性的重要指標,高損耗因子意味著材料能有效地將機械能轉換為熱能耗散掉,從而減少振動的幅度和持續時間。對於噪音控制,希望胎面橡膠在相關頻率範圍(500-3000 Hz)具有適當高的損耗因子,以快速衰減振動。然而,損耗因子的提高通常伴隨著滾動阻力的增加和耐磨性的降低,因為能量耗散在滾動變形中會產生額外的能量損失,在磨耗過程中會加速材料的撕裂[102]。因此,材料設計需要在噪音、滾動阻力和耐磨性之間找到最佳平衡,這通常透過選擇合適的聚合物基礎和填料系統來實現。

橡膠材料的動態特性具有顯著的頻率依賴性和溫度依賴性,這源於其分子結構的鬆弛過程。在低頻變形下,聚合物鏈有足夠時間進行構象調整,材料表現為較低的模量和較高的損耗;在高頻變形下,分子鏈來不及響應,材料表現為較高的模量和較低的損耗。這種頻率依賴性意味著同一橡膠配



方在不同頻率的激勵下表現出不同的力學行為,影響不同頻率成分的噪音產生。時溫等效原理(time-temperature equivalence principle)表明,溫度降低等效於頻率增加,因此低溫下橡膠變硬,高頻特性凸顯;高溫下橡膠變軟,低頻特性主導。在實際使用中,輪胎的工作溫度隨環境溫度、車速、載重等因素變化,材料的動態特性也相應變化,影響噪音性能[103]。先進的橡膠配方設計考慮了寬溫度和寬頻率範圍內的性能優化,透過聚合物共混和填料優化來實現。

填料系統對橡膠的性能有重要影響。傳統的炭黑填料提供良好的補強效果和耐磨性,但會提高模量和降低損耗因子。二氧化矽填料可以在保持較低滾動阻力的同

時提供良好的濕地抓地力,其對噪音的影響取決於具體的配方設計。二氧化矽與橡膠分子的相互作用較弱,可以降低低應變下的模量(有利於降低滾動阻力和改善舒適性),但在高應變下仍能提供足夠的補強(保證抓地力)。從噪音角度,二氧化矽配方通常能提供較好的阻尼特性,特別是在中頻範圍。現代高性能輪胎普遍採用炭黑與二氧化矽的複合填料系統,透過優化兩者的比例和分散性來平衡各項性能[104]。納米填料和功能性填料是當前的研究前沿,這些先進材料有望提供更優的性能組合。

胎面橡膠的配方在輪胎的不同部位可能有所不同。多膠配方設計(**multi-compound tread**)採用兩種或更多種橡膠配方組成胎面,不同配方在不同區域或不同深度發揮作用。例如,胎面表層可以使用高抓地力配方以保證安全性能,基層使用低滾動阻力配方以提高燃油經濟性。從噪音角度,可以在胎面的不同區域採用不同阻尼特性的配方,在噪音敏感區域(如花紋塊的邊緣)使用高阻尼配方,在其他區域使用性能平衡的配方。這種局部優化策略可以在不顯著影響整體性能的前提下改善噪音,但增加了製造的複雜度[105]。

簾線材料的特性對輪胎的結構剛度和阻尼有重要影響。聚酯纖維簾線是乘用車輪胎胎體的常用材料,具有良好的強度、適當的彈性和較低的成本。尼龍簾線具有更高的強度和衝擊韌性,但彈性模量相對較低,更常用於載重輪胎。人造絲(**rayon**)簾線具有低的生熱特性,適用於高速輪胎。不同簾線材料的阻尼特性不同,影響胎體振動的衰減。鋼絲簾線用於帶束層,提供極高的周向剛度,但幾乎沒有阻尼能力,鋼絲帶束層之間的橡膠層是主要的阻尼來源。芳綸纖維(如 **Kevlar**)具有極高的強度重量比和模量,用於某些高性能輪胎的帶束層,可以在減輕重量的同時保持剛度,改善動態響應特性[106]。簾線與橡膠之間的黏合是關鍵的界面性能,良好的黏合保證載荷有效傳遞,防止分層失效,同時界面的微觀特性也影響能量耗散機制。

橡膠的非線性特性在大變形條件下表現明顯,影響輪胎在高載重或極端工况下的噪音行為。橡膠的應力-應變關係是非線性的,隨著應變增加,模量通常會增加(應變硬化效應)。這種非線性會導致振動響應中的諧波失真,基頻激勵會產生高次諧波響應,豐富噪音的頻譜成分。此外,橡膠的 **Mullins** 效應(應力軟化效應)和 **Payne** 效應(應變幅度依賴的動態模量)等複雜行為也影響其動態響應。準確預測這些非線性效應需要複雜的材料本構模型,如超彈性模型(**hyperelastic models**)結合黏彈性模型,這些模型已被納入現代有限元分析軟件中,用於輪胎的詳細模擬[107]。

材料的溫度效應在輪胎噪音中不容忽視。輪胎在使用過程中會因為滾動變形、摩擦等產生熱量,胎面溫度可能比環境溫度高 20-40°C 甚至更多,特別是在高速或高載重條件下。溫度升高會軟化橡膠,降低模量,改變阻尼特性,進而影響噪音產生機制的強度和頻率特徵。例如,溫度升高可能減弱紋理衝擊噪音(因為橡膠變軟能更好地順應路面),但可能增強黏著-滑動效應(因為橡膠的黏著性增強)。季節性溫度變化也影響噪音性能,冬季胎和夏季胎的配方針對不同溫度範圍優化,在各自的設計溫度範圍內提供最佳性能[108]。全季節輪胎需要在寬溫度範圍內保持性能平衡,這對材料設計提出更高要求。

新材料技術為輪胎噪音控制提供了新的可能性。納米複合材料透過在橡膠基體中分散納米尺度的填料(如納米炭黑、納米二氧化矽、碳納米管、石墨烯等),可以在較低填料含量下實現良好的補強效果,同時保持較高的阻尼特性。功能梯度材料(functionally graded materials)透過在空間上連續變化材料組成,實現性能的平滑過渡,避免界面的突變和應力集中。多孔彈性材料(poroelastic materials)具有內部連通的孔隙結構,可以吸收聲波能量,用於胎面或胎體的局部區域可能降低特定頻率的噪音。智能材料如形狀記憶聚合物、磁流變彈性體等,雖然目前還未在商業輪胎中應用,但展現出主動控制振動和噪音的潛力[109]。這些新材料的開發和應用需要克服成本、耐久性、製造工藝等挑戰,但代表了未來輪胎技術的發展方向。

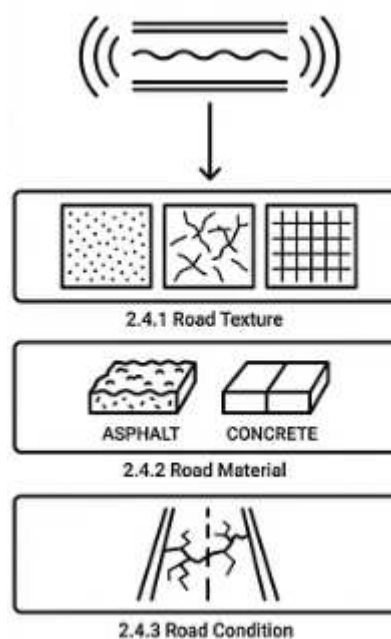
材料的環境友好性也是當代輪胎設計的重要考慮。傳統輪胎材料中的某些成分如芳香烴油、多環芳烴(PAHs)等對環境和健康有潛在危害,正逐步被更安全的替代品取代。生物基材料如天然橡膠、生物合成橡膠、植物油基增塑劑等的應用比例在增加。永續發展的材料策略不僅關注使用階段的性能,也考慮生產過程的環境影響和產品壽命結束後的回收利用。從噪音角度,環保材料的應用不應導致噪音性能的退步,這要求在開發替代材料時同時優化聲學性能,這是當前研究的活躍領域[110]。綜合而言,輪胎材料特性與噪音的關係是多維度和多尺度的,材料設計需要在分子、微觀和宏觀層次上進行優化,結合先進的材料科學、計算模擬和實驗測試,才能實現噪音控制與其他性能需求的最佳平衡。

2.4 路面特性對噪音的影響 (Influence of Road Surface on Noise)

路面作為輪胎/路面交互作用系統的另一半,對輪胎噪音的產生有著極為重要且有時甚至超過輪胎本身的影響。大量研究表明,在相同輪胎和行駛條件下,不同類型路面產生的噪音差異可達 10 dB(A)甚至更高,這相當於噪音能量相差 10 倍[111]。路面對噪音的影響機制是多方面的,包括透過表面紋理影響輪胎的激勵特性、透

過材料的聲學性能影響聲波的吸收和反射、透過表面狀況(乾燥或潮濕)改變摩擦和接觸特性等。認識路面特性與噪音的關係,對於道路設計和維護決策具有重要意義,因為在道路建設時選擇合適的路面類型,或在既有道路上進行降噪改造,往往比要求所有車輛更換低噪音輪胎更經濟和有效。

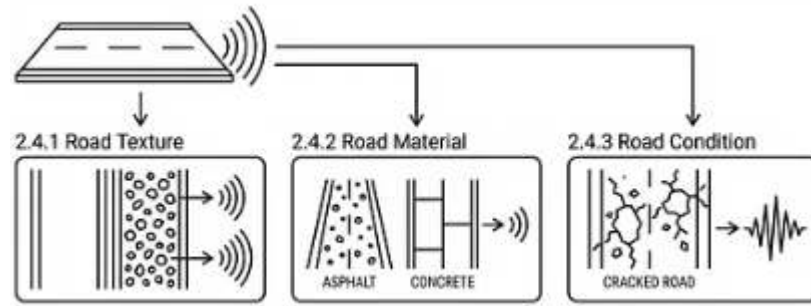
路面對輪胎噪音的影響可以從幾個層面理解。首先,路面作為激勵源,其表面的幾何特徵(紋理)決定了對輪胎的機械激勵強度和頻率成分。粗糙的路面提供更強的衝擊激勵,激發更強的振動和噪音;光滑的路面則激勵較弱,噪音相對較低。其次,路面作為聲學邊界,其材料的聲學性能(吸音係數、阻抗等)影響聲波的傳播和反射。多孔材料可以吸收部分聲能,減少噪音輻射;緻密材料則反射聲波,可能增強噪音。第三,路面影響輪胎的接觸和摩擦特性,路面的微觀紋理決定摩擦係數,影響黏著-滑動效應;路面的硬度和彈性影響接觸變形和衝擊過程[112]。第四,路面與輪胎之間形成的楔形空腔的幾何特徵受路面形狀影響,進而影響喇叭效應和空腔共振。這些多方面的影響使得路面成為輪胎噪音系統中不可忽視的關鍵因素。



喇叭效應和空腔共振。這些多方面的影響使得路面成為輪胎噪音系統中不可忽視的關鍵因素。

路面的分類方法有多種,從材料角度可分為瀝青路面、水泥混凝土路面、複合路面等;從結構角度可分為密級配路面、開級配路面、多孔路面等;從功能角度可分為普通路面、低噪音路面、排水路面等。不同類型的路面在紋理特徵、材料性能和聲學行為上差異顯著,對噪音的影響也大相徑庭。密級配瀝青混凝土(**dense-graded asphalt concrete**)是最常見的路面類型,具有相對緻密的表面和中等的紋理深度,噪音水平處於中等水平。開級配瀝青混凝土(**open-graded asphalt concrete**)使用較大的骨料粒徑和較少的細料,表面較粗糙,但如果設計適當可以提供良好的排水性能。多孔瀝青路面(**porous asphalt pavement**)具有高達 20%的孔隙率,連通的孔隙網絡可以有效吸收聲波,是公認的低噪音路面類型,可比普通密級配路面降低 3-5 dB 噪音[113]。水泥混凝土路面通常比瀝青路面產生更高的噪音,這主要是由於其較高的硬度和剛度,產生更強的衝擊,但透過表面處理(如刻槽、拉毛等)可以改善其噪音性能。

路面的使用壽命和磨耗狀況對噪音有顯著影響。新鋪設的路面通常具有明確的設計紋理特徵,噪音性能符合預期。



隨著使用時間增長,路面經歷車輛碾壓、磨耗、老化、污染等過程,表面紋理逐漸改變。瀝青路面的骨料可能被磨平,降低宏觀紋理深度;表面的瀝青膜可能被磨掉,暴露骨料,改變紋理特性。多孔路面的孔隙可能被灰塵、泥土堵塞,降低吸音能力。這些變化通常導致噪音性能的退化,有研究表明多孔路面在使用5-7年後,噪音性能可能劣化 2-3 dB,接近普通路面的水平[114]。因此,路面的維護和清潔對保持其噪音性能至關重要,對於多孔路面,定期的高壓水沖洗或真空清掃可以恢復部分吸音能力。路面的修復和重鋪也是噪音管理的考慮因素,選擇低噪音的修復材料和工藝可以改善既有道路的噪音環境。

氣候和環境條件對路面的噪音性能也有影響。溫度影響路面材料的性能,高溫下瀝青變軟,可能改變表面紋理和聲學性能;低溫下材料變硬,改變與輪胎的相互作用。降雨使路面變濕,水膜的存在顯著改變輪胎/路面噪音,一般而言濕路面的噪音比乾路面高 2-5 dB,這主要是由於水的飛濺和擠壓產生額外的噪音成分,稱為飛濺噪音(splash noise)。積雪和結冰則完全改變路面特性,噪音特徵可能大幅不同。環境污染物如灰塵、油污等在路面上積累,改變表面的摩擦和聲學特性[115]。這些環境因素的變化使得路面的噪音性能不是恆定的,在噪音評估和管理中需要考慮這些變化。

路面設計和建設標準中逐步納入噪音性能要求。歐盟和一些國家已經制定了路面噪音性能的限值標準,要求新建或改建道路達到一定的噪音水平。這推動了低噪音路面技術的發展和應用,包括優化級配設計、改進鋪設工藝、採用降噪添加劑等技術措施。路面噪音的測試方法也逐步標準化,ISO 11819-2 規定的 CPX 方法可以測量路面的聲學性能,為路面的噪音評估和比較提供標準化手段[116]。路面的全生命週期噪音管理概念也在形成,從設計、施工、使用到維護的各個階段都考慮噪音影響,透過綜合措施保持路面的良好噪音性能。以下小節將詳細討論路面紋理、材料和狀況對噪音的具體影響機制。

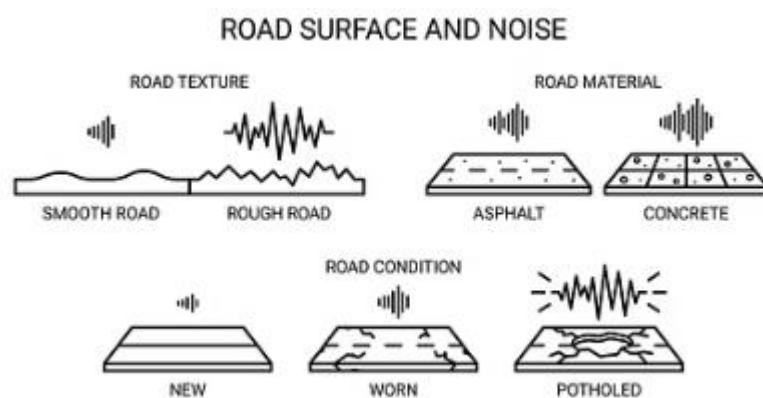
2.4.1 路面紋理 (Road Texture)

路面紋理是路面表面幾何特徵的描述,涵蓋從微米到米尺度的多種波長成分,對輪胎噪音有著直接而複雜的影響。根據國際標準 ISO 13473 的定義,路面紋理按波長範圍分為四個層次:微觀紋理(microtexture,波長小於 0.5 mm)、宏觀紋理(macrotexture,波長 0.5-50 mm)、超宏觀紋理(megatexture,波長 50-500 mm)和不平度(roughness/unevenness,波長大於 500 mm)[117]。不同波長層次的紋理對輪胎噪音的影響機制和頻率範圍不同,理解這些層次化的影響對於優化路面設計和預測噪音性能至關重要。紋理與噪音的關係不是簡單的單調關係,而是呈現複雜的非線性特徵,某些紋理參數的中等值可能對應最低的噪音水平。

微觀紋理主要由路面骨料的表面粗糙度決定,其主要作用是提供輪胎與路面之間的微觀接觸點,影響摩擦係數和抓地力。從噪音角度,微觀紋理影響黏著-滑動效應和高頻紋理衝擊噪音。粗糙的微觀紋理(如暴露的粗糙骨料)提供更多的黏著點,增強黏著-滑動效應,同時在高速滾動時產生高頻激勵(頻率可達數千赫茲)。然而,由於微觀紋理的尺寸很小,單個接觸點產生的激勵能量有限,且高頻聲波的傳播距離較短,因此微觀紋理對總體噪音的貢獻相對有限。研究表明,微觀紋理的變化主要影響 2000 Hz 以上的高頻噪音,對 A 加權總噪音值的影響通常小於 1-2 dB[118]。微觀紋理的主要作用仍然是保證濕地摩擦力,在低噪音路面設計中,需要保持足夠的微觀紋理以保證安全性能。

宏觀紋理是對輪胎噪音影響最顯著的紋理層次,其波長範圍(0.5-50 mm)與輪胎胎面花紋單元的尺寸相當,直接影響輪胎的激勵特性。宏觀紋理的深度和形狀決定了胎

面與路面接觸的幾何特徵,影響接觸壓力分佈、空氣泵浦效應以及衝擊激勵。宏觀紋理深度(通常用平均紋理深度 MTD, Mean Texture Depth 表示)是最常用的表徵參數,它與噪音水平呈現複雜的關係。過低的紋理深度(接近光滑)雖然減少機械激勵,但可能增強空氣泵浦效應(因為輪胎與路面密封更好)和黏著-滑動效應;適中的



紋理深度提供足夠的排水能力和合理的激勵水平,通常對應較低的噪音;過高的紋理深度增強機械衝擊,顯著提高噪音。研究表明,對於瀝青路面,MTD 在 0.4-0.8 mm 範圍通常能提供較好的噪音性能,MTD 每增加 0.1 mm,噪音可能增加約 0.5-1 dB[119]。

宏觀紋理的空間分佈特徵(即紋理的"形狀"而非僅僅"深度")對噪音有重要影響。紋理可以是正紋理(positive texture,突起)或負紋理(negative texture,凹陷),尖銳的突起產生更強的衝擊,圓滑的起伏則激勵較弱。紋理的方向性也很重要,各向同性的紋理(無明顯方向性)與各向異性的紋理(有明顯的紋理走向)產生不同的輪胎響應。例如,橫向溝槽路面(如某些混凝土路面的刻槽)產生週期性的強烈橫向激勵,噪音顯著高於各向同性紋理的路面。縱向紋理(如某些瀝青路面的攤鋪紋理)對噪音的影響相對較小。多項研究探索了透過優化紋理的空間分佈來降低噪音,例如採用隨機或優化的紋理圖案,打散週期性成分,原理類似於輪胎的變節距設計[120]。

紋理的功率譜密度(PSD, Power Spectral Density)是更全面的紋理表徵方法,它描述了紋理在不同波長成分上的能量分佈。PSD 曲線的形狀反映了紋理的多尺度特徵,可以與輪胎噪音的頻譜建立更直接的聯繫。透過測量路面的三維輪廓並進行頻譜分析,可以獲得紋理的 PSD,進而用於噪音預測模型。研究表明,某些特定波長範圍的紋理成分與噪音有更強的相關性,例如 5-15 mm 波長的紋理成分對 800-2000 Hz 的噪音有重要貢獻。基於 PSD 的紋理分析可以更精確地指導路面設計,透過控制關鍵波長範圍的紋理能量來優化噪音性能[121]。然而,PSD 測量和分析需要高精度的儀器和復雜的數據處理,在實際工程中的應用還不如 MTD 那樣普及。

不同路面施工工藝產生不同的紋理特徵,進而影響噪音性能。瀝青路面的紋理主要由骨料級配和攤鋪工藝決定。密級配混合料使用連續級配的骨料,表面相對平滑,紋理深度較小;開級配混合料缺少細料,大骨料之間的空隙形成較深的紋理。表面處理方式如刮平、滾壓等也影響最終紋理。對於多孔瀝青,孔隙結構本身形成特殊的紋理,既有宏觀的骨料突起,又有介於骨料間的孔隙凹陷,這種複雜紋理的噪音效應是多方面的:適度的宏觀紋理提供排水,孔隙結構吸收聲能。水泥混凝土路面的紋理通常透過表面處理產生,包括拉毛(tining)、刻槽(grooving)、磨光(grinding)、暴露骨料(exposed aggregate)等方法。橫向拉毛是常見的防滑處理,但產生明顯的週期性紋理,噪音較高;縱向拉毛或隨機拉毛可以改善噪音性能。表面磨光產生較細膩的紋理,可以顯著降低噪音,但需要專業設備[122]。暴露骨料處理使表面的粗

骨料突出,形成類似開級配瀝青的紋理,可以在保證混凝土強度的同時改善聲學性能。

紋理的測量方法包括接觸式和非接觸式兩類。傳統的鋪砂法(sand patch method)是測量 MTD 的標準方法,透過在路面上鋪展已知體積的標準砂,測量覆蓋面積來推算平均紋理深度,方法簡單但精度有限且費時。激光紋理儀(laser texture scanner)是現代常用的工具,使用激光位移傳感器測量路面的縱向輪廓,可以快速獲得高精度的紋理數據,計算 MTD 和 PSD 等參數。三維路面掃描系統可以獲得路面的完整三維形貌,提供最全面的紋理信息,但設備複雜昂貴。這些測量技術的發展使得路面紋理的定量評估和質量控制成為可能,為低噪音路面的設計和驗證提供了技術支持[123]。

紋理與噪音關係的研究方法包括實驗測量和數值模擬。實驗方法透過在不同紋理的路面上進行噪音測試(如 CPX 測量),建立紋理參數與噪音水平的統計關係。大量的實驗數據已經積累,形成了經驗性的預測模型,如 SILVIA 模型、HyRoNE 模型等,這些模型可以根據路面紋理參數預測輪胎噪音。數值模擬方法則試圖從物理機制層面理解紋理如何影響噪音,包括使用有限元方法模擬輪胎在真實紋理路面上的滾動接觸,使用多體動力學模擬花紋塊的運動,使用聲學模擬計算噪音輻射。這些模擬方法可以揭示實驗難以觀測的細節,但準確性仍受限於模型的簡化假設和計算能力[124]。結合實驗和模擬的混合方法是當前的研究趨勢,透過實驗驗證模型,用模型指導設計。

低噪音路面的紋理設計原則逐漸清晰:保持適中的宏觀紋理深度(0.4-0.8 mm),避免過深的突起和過尖銳的邊緣,採用各向同性或優化的各向異性紋理,避免強週期性特徵,在保證排水和摩擦性能的前提下最小化機械激勵。多孔路面透過其獨特的紋理和孔隙結構,在吸音和降低激勵兩方面發揮作用,是實現低噪音的有效路面類型。表面處理技術如密封(seal coat)、微鋪(microsurfacing)等可以在既有路面上改善紋理,提供經濟的降噪措施。隨著對紋理與噪音關係理解的深入和施工技術的進步,未來有望設計出在安全性能和噪音性能之間達到更好平衡的優化紋理路面[125]。

2.4.2 路面材料 (Road Material)

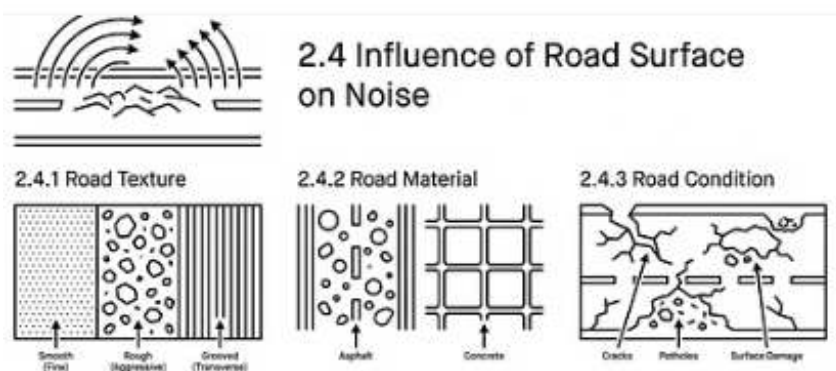
路面材料的物理和聲學性能對輪胎噪音有著根本性的影響,這些影響涵蓋從材料的力學特性(硬度、彈性模量、阻尼)到聲學特性(吸音係數、聲阻抗)等多個方面。不同材料的路面在與輪胎相互作用時表現出不同的接觸動態、激勵特性以及聲波

傳播行為,導致顯著不同的噪音水平和頻譜特徵。路面材料的選擇不僅影響道路的結構性能和耐久性,也是決定其環境影響(包括噪音)的關鍵因素[126]。理解材料特性與噪音的關係,對於開發新型低噪音路面材料和優化既有材料配方具有重要意義。

瀝青混凝土(**asphalt concrete**)是最常用的路面材料,由礦料骨料、瀝青膠結料、填料以及可能的添加劑組成。瀝青的性質對路面的噪音性能有重要影響。瀝青是黏彈性材料,其力學性能強烈依賴於溫度和加載頻率。在常溫下,瀝青表現為彈性與黏性的複合特性,能夠吸收部分衝擊能量,相比於剛性材料產生較小的反彈力。這種阻尼特性有利於降低衝擊噪音。然而,瀝青的軟化也意味著路面在高溫下可能變形,改變紋理特徵。瀝青的含量(通常以瀝青-骨料比表示)影響路面的密實度和表面特性,高瀝青含量可能形成較光滑的表面膜,改變摩擦和噪音特性[127]。改性瀝青如聚合物改性瀝青(**polymer-modified asphalt**)透過添加 SBS、SBR 等聚合物,改善瀝青的高溫穩定性和低溫抗裂性,同時可能提供更好的阻尼特性,有利於噪音控制。

骨料是瀝青混凝土的主要組成,占體積的 90%以上,其性質對路面性能至關重要。骨料的岩性(如玄武岩、石灰岩、花崗岩等)決定其硬度、耐磨

性和表面粗糙度。硬質骨料如玄武岩提供良好的耐磨性,但也可能產生更強的輪胎衝擊;軟質骨料如石灰岩磨耗較快,但與輪胎的相互作用較柔和。骨料的形狀和級配決定路面的紋理和孔隙結構。對於密級配混合料,良好的級配保證骨料間緊密嵌擠,形成穩定的骨架結構;對於開級配或多孔混合料,缺少細料使大骨料間形成連通孔隙。骨料的表面紋理(即微觀粗糙度)影響路面的微觀紋理,粗糙的骨料表面提供更好的摩擦但可能產生更高的高頻噪音[128]。人工骨料如鋼渣、再生骨料等的應用日益增多,這些材料的性能與天然骨料有所不同,對噪音的影響需要具體評估。



水泥混凝土(cement concrete)路面由水泥、骨料、水和添加劑組成,其剛度和硬度顯著高於瀝青路面。混凝土的高彈性模量(通常為 20-40 GPa,而瀝青混合料僅為 2-10 GPa)意味著其變形小,衝擊時的能量主要反射回輪胎,產生更強的輪胎振動和噪音。研究表明,在相同紋理條件下,混凝土路面的噪音通常比瀝青路面高 2-5 dB。混凝土幾乎沒有黏彈性阻尼,無法像瀝青那樣吸收衝擊能量。此外,混凝土路面通常以板塊形式鋪設,板塊間的接縫會產生額外的衝擊噪音,接縫處的不平順(如錯台)尤其影響噪音[129]。然而,混凝土路面的高強度和耐久性使其在重載交通道路上有優勢,透過適當的表面處理(如前述的暴露骨料、磨光等)可以改善其噪音性能,使之接近甚至達到瀝青路面的水平。

多孔材料路面(porous pavement)透過其內部連通的孔隙結構提供卓越的噪音吸收能力,是公認的低噪音路面類型。多孔瀝青(porous asphalt,也稱排水瀝青或開孔瀝青)使用單一粒徑或間斷級配的骨料,瀝青含量較低,形成孔隙率 15-25%的多孔結構。這些孔隙不僅提供排水功能,更重要的是作為聲學吸收體,當聲波進入孔隙時,空氣的黏滯阻力和熱傳導效應將聲能轉換為熱能耗散掉。多孔路面的吸音機制類似於多孔吸音材料的機制,可以用 Delany-Bazley 模型等聲學模型來描述,吸音性能與孔隙率、孔隙尺寸分佈、材料流阻等參數相關[130]。多孔瀝青對中高頻噪音(800-4000 Hz)的吸收尤其有效,可以降低空氣泵浦噪音、溝槽共振噪音以及反射噪音。與密級配瀝青路面相比,多孔瀝青可以降低輪胎噪音 3-6 dB,這是單一技術措施中降噪效果最顯著的。多孔混凝土(pervious concrete)也具有類似的多孔結構和聲學性能,雖然應用不如多孔瀝青廣泛,但在某些場合(如需要高強度的場所)是替代選擇。

多孔路面的設計參數包括孔隙率、骨料級配、瀝青用量、層厚等,這些參數需要優化以平衡噪音性能、排水性能、結構強度和耐久性。孔隙率是最關鍵的參數,更高的孔隙率提供更好的吸音效果,但降低結構強度,增加磨耗和堵塞的風險。研究表明,孔隙率在 20%左右通常能提供良好的綜合性能。雙層多孔瀝青(two-layer porous asphalt)採用上下兩層不同孔隙特性的結構,上層孔隙較小提供吸音和表面性能,下層孔隙較大提供排水,這種設計可以優化性能分佈[131]。多孔路面的主要挑戰是耐久性和維護,孔隙容易被灰塵、泥土堵塞,降低吸音和排水性能,需要定期清潔維護。在寒冷地區,孔隙中的水凍結膨脹可能導致結構損壞。儘管有這些挑戰,多孔路面仍是低噪音道路的首選技術,在歐洲、日本等地已有廣泛應用經驗。

橡膠改性瀝青(**rubber-modified asphalt**)是一種創新材料,透過在瀝青中添加橡膠顆粒(通常來自廢輪胎的回收橡膠)改善瀝青的性能。橡膠顆粒提供額外的彈性和阻尼,使路面更"柔軟",能夠吸收更多的衝擊能量,降低輪胎振動和噪音。研究表明,橡膠改性瀝青路面可以比常規瀝青路面降低 1-3 dB 噪音。橡膠含量通常在 10-20% 範圍,過高的橡膠含量可能影響施工性能和路面強度。除了噪音效益,橡膠改性瀝青還提供環境效益(利用廢輪胎)和性能效益(改善抗疲勞性能、抗裂性能)[132]。這種材料在美國、歐洲等地已有應用,但成本相對較高,推廣受到經濟因素的制約。路面材料的聲學性能可以透過實驗室測量來表徵。吸音係數(**absorption coefficient**)是最重要的聲學參數,表示材料吸收聲能與入射聲能的比值,範圍從 0(完全反射)到 1(完全吸收)。吸音係數是頻率依賴的,通常使用阻抗管法(**impedance tube method**,如 ISO 10534-2 標準)在實驗室測量不同頻率的吸音係數。多孔材料的吸音係數在中高頻通常較高(可達 0.3-0.6),而密實材料的吸音係數很低(通常小於 0.1)。聲阻抗和流阻是描述多孔材料聲學性能的更基本參數,可以用於聲學模型的輸入[133]。現場測量方法如原位吸音測試也在發展中,可以直接評估路面的聲學性能。這些測量和表徵技術為材料的聲學設計和質量控制提供了工具。

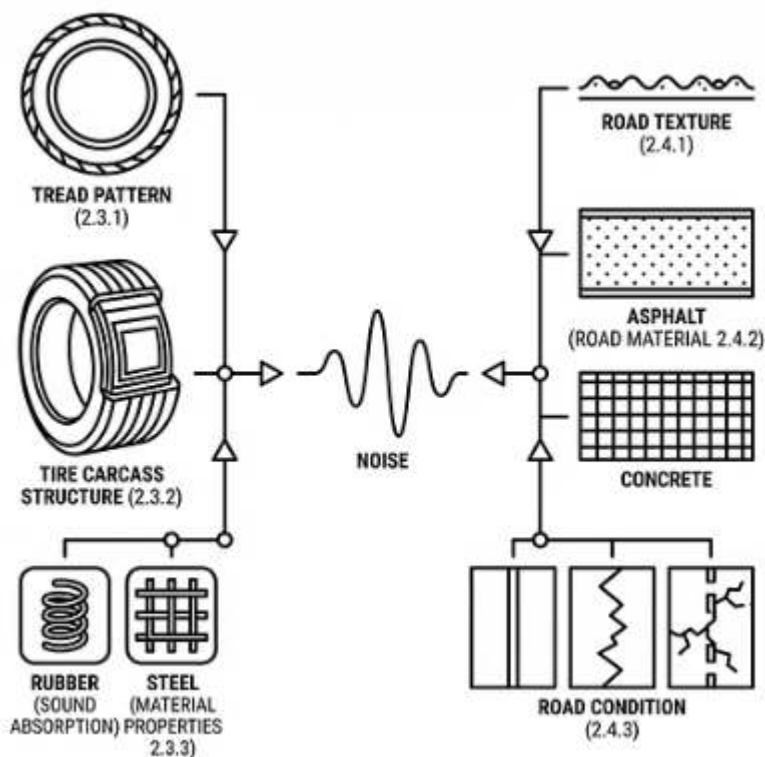
新型路面材料的研發是降低交通噪音的重要方向。泊松比優化材料(**optimized Poisson's ratio materials**)透過設計材料的微結構,實現特定的泊松比(負泊松比或接近零泊松比),這些材料在受力時表現出異常的變形模式,可能提供獨特的聲學和力學性能。複合材料路面如聚合物混凝土、樹脂混凝土等,使用聚合物替代水泥作為膠結料,可以實現更好的阻尼特性和設計靈活性。相變材料(**phase change materials**)嵌入路面可以調節溫度,維持材料性能的穩定性。智能材料如壓電材料嵌入路面可以主動感知和調控振動[134]。這些前沿材料目前大多處於研究階段,實際應用還需要克服成本、耐久性、施工工藝等諸多挑戰,但代表了未來路面材料技術的發展方向。

材料的環境友好性和永續性也是當代路面設計的重要考慮。使用再生材料如再生瀝青路面(**RAP, reclaimed asphalt pavement**)、廢輪胎橡膠、鋼渣、粉煤灰等,不僅減少廢物處置的環境負擔,也可能提供獨特的性能。生物基膠結料如生物瀝青(**bio-asphalt**)從植物油、廢食用油等提取,減少對石油資源的依賴。低溫瀝青技術透過添加劑降低瀝青混合料的施工溫度,減少能源消耗和溫室氣體排放。這些永續材料的開發需要確保其噪音性能不低於傳統材料,在某些情況下,環保材料可能因其獨特的物理特性而提供更好的噪音性能[135]。綜合而言,路面材料與噪音的關係

是多維度的,材料的力學特性、聲學特性以及微觀結構共同決定其噪音性能,透過材料創新和優化設計,可以實現低噪音、高性能、環境友好的路面系統。

2.4.3 路面狀況 (Road Condition)

路面的使用狀況和環境條件對輪胎噪音有著顯著且動態變化的影響,這些影響超出了路面本身的設計特性,涉及路面的磨耗、老化、污染、濕度以及溫度等多種因素。路面狀況隨時間和使用而變化,意味著同一路面在不同時期或不同環境條件下可能表現出不同的噪音性能。理解路面狀況對



噪音的影響,對於路面的維護管理、噪音性能的長期保持以及噪音測試結果的正確解讀都具有重要意義[136]。路面狀況的影響也表現了輪胎噪音問題的複雜性和動態性,單純依靠初始設計無法保證長期的噪音性能,需要全生命週期的管理策略。

路面的磨耗(wear)是最主要的狀況變化,由車輛碾壓、氣候作用、化學侵蝕等因素共同造成。對於瀝青路面,磨耗表現為表面瀝青膜的磨損和骨料的磨平或脫落。初期磨耗可能暴露更多的骨料,增加表面粗糙度,提高摩擦係數,這一階段噪音可能略有增加。隨著磨耗繼續,骨料表面逐漸磨平,宏觀紋理深度減小,路面變得更平滑,這一階段噪音可能降低。然而,如果磨耗不均勻或出現坑洞、裂縫等損壞,噪音會顯著增加。對於多孔瀝青路面,磨耗的影響更為複雜:表面磨耗可能暴露更多孔隙,保持或改善吸音性能;但骨料脫落會減少孔隙的連通性,降低吸音能力[137]。研究表明,多孔瀝青的噪音性能在使用初期可能略有改善(前 1-2 年),隨後逐漸劣化,到 5-7 年時噪音水平可能增加 2-3 dB,接近普通密級配路面。對於混凝土路面,磨耗

主要表現為表面的磨光,骨料和水泥漿體被磨平,紋理深度減小,一般會導致噪音的降低,但同時摩擦係數也會降低,影響安全性能。

路面的堵塞(clogging)是多孔路面面臨的主要問題,孔隙被灰塵、泥土、有機物等堵塞,降低甚至喪失吸音和排水能力。堵塞的程度和速度取決於交通量、環境條件(如附近是否有塵土來源)、降雨量(雨水有自清潔作用)等因素。在乾燥地區或交通量大的道路,堵塞速度較快;在多雨地區或交通量適中的道路,堵塞較慢。堵塞使多孔路面逐漸變成密實路面,噪音性能退化。研究顯示,嚴重堵塞的多孔瀝青其噪音水平可能完全失去初始的降噪效果。定期的維護清潔是保持多孔路面性能的關鍵措施,包括高壓水沖洗、真空吸塵、機械刷洗等方法[138]。高壓水沖洗是最常用和有效的方法,能夠去除孔隙內的大部分污物,恢復 70-90%的初始吸音能力,建議每年進行 1-2 次清潔。然而,清潔維護增加了路面的全生命週期成本,這是多孔路面推廣的障礙之一。

路面的濕度狀態(wet vs. dry condition)對噪音有顯著影響。濕路面通常比乾路面產生更高的噪音,增加量為 2-5 dB,這主要是由於水膜的存在改變了輪胎與路面的相互作用機制。當輪胎透過濕路面時,胎面花紋需要排開水膜才能與路面接觸,這個過程中水被擠壓和飛濺,產生額外的噪音源,稱為飛濺噪音或水噪音(splash noise)。飛濺噪音具有寬頻特性,主要貢獻於中高頻範圍(1000-4000 Hz)。水膜的厚度影響飛濺噪音的強度,較厚的水膜(如暴雨條件)產生更強的噪音[139]。水的存在還改變了輪胎與路面的摩擦特性,降低摩擦係數,可能減弱黏著-滑動效應,但增強水力作用。路面的排水能力影響其濕態噪音性能,多孔路面由於良好的排水能力,其濕態噪音增加較小(通常僅 1-2 dB),而密實路面的濕態噪音增加較大(可達 3-5 dB)。路面的橫向排水坡度、縱向坡度以及排水設施的有效性都影響水在路面上的積累和排放,進而影響濕態噪音。

路面溫度對噪音的影響透過改變材料性能實現。瀝青是熱敏材料,其黏彈性特性強烈依賴溫度,高溫下瀝青變軟,路面的彈性模量降低,阻尼增加;低溫下瀝青變硬,彈性模量增加,阻尼降低。這些變化影響輪胎與路面的相互作用和聲學性能。研究表明,路面溫度每升高 10°C,瀝青路面的噪音可能降低約 0.1-0.3 dB,這主要是由於較軟的路面吸收更多衝擊能量[140]。然而,溫度效應是複雜的,因為輪胎材料的性能也受溫度影響,且溫度還影響空氣的聲速和密度,改變聲波傳播特性。在噪音測試中,通常需要對溫度進行修正,或規定測試的溫度範圍,以保證結果的可比性。ISO 11819-2 標準規定 CPX 測試的路面溫度範圍為 5-50°C,並提供溫度修正公式。

路面的維修和養護措施對噪音有重要影響。常規的養護措施如裂縫封填、坑洞修補等,如果施工不當可能形成局部不平順,增加噪音。表面處治措施如密封層(seal coat)、微鋪(microsurfacing)、薄層罩面(thin overlay)等,會改變路面的紋理和材料特性,對噪音產生顯著影響。如果採用低噪音設計的表面處治,可以在改善路面狀況的同時降低噪音;反之,不當的處治可能增加噪音。路面的銑刨重鋪(mill and overlay)是徹底改善路面狀況的方法,如果採用低噪音瀝青混合料,可以顯著改善噪音性能。一些城市已經實施了噪音敏感區域的路面改造項目,透過更換為低噪音路面(如多孔瀝青)來降低交通噪音[141]。

污染物在路面表面的積累也影響噪音性能。灰塵、泥土、油污、輪胎磨損顆粒等在路面上積累,改變表面的紋理和摩擦特性。對於多孔路面,污染物的積累等同於堵塞,降低吸音能力。降雨有清洗路面的作用,可以部分去除污染物,這解釋了為什麼多雨地區的路面噪音性能退化較慢。道路清掃是路面維護的常規措施,雖然主要目的是環境衛生和安全(防止灰塵飛揚),但對保持路面的噪音性能也有積極作用。在冬季使用融雪劑(如鹽)的地區,融雪劑的殘留可能影響路面材料的性能,長期使用還可能造成路面損壞[142]。

季節性變化對路面狀況和噪音都有影響。冬季的低溫、降雪、結冰會顯著改變路面特性,冰雪覆蓋的路面與乾燥路面的噪音完全不同,通常冰雪路面的噪音較低,因為冰雪層吸收了部分聲能,同時改變了輪胎的接觸模式。然而,冰雪條件下的噪音變化不是本章關注的重點,因為主要研究對象是正常使用條件下的路面。春季融雪後,路面可能積累大量污物,需要清理。夏季的高溫可能導致瀝青路面軟化甚至流動變形,改變紋理。秋季落葉等有機物在路面上積累,影響表面特性。這些季節性變化使得路面的噪音性能不是恆定的,在進行噪音評估時需要考慮測試時間的代表性[143]。

路面狀況的監測和管理是保持噪音性能的重要手段。定期的路面狀況調查,包括紋理測量、平整度測量、損壞評估、吸音性能測試等,可以及時發現性能退化,為維護決策提供依據。一些國家和地區已經建立了路面管理系統(Pavement Management System, PMS),將噪音性能作為路面狀況評估的指標之一。基於狀況監測的預防性維護策略,在路面性能顯著退化之前進行干預,可以以較低成本保持良好的路面性能,包括噪音性能。對於低噪音路面,制定專門的維護方案,如多孔路面的定期清潔、微損壞的及時修補等,對於發揮其長期降噪效益至關重要[144]。

綜合而言,路面狀況對噪音的影響是動態和多樣的,透過有效的監測、維護和管理,可以在路面的整個使用壽命內保持良好的噪音性能,實現低噪音道路的環境效益。

結論 (Conclusions)

壹 五種輪胎噪音產生機制：

一、振動噪音 (Vibration Noise)

物理原理

振動噪音是輪胎噪音最基本且最重要的機制之一,源於輪胎結構在與路面相互作用過程中產生的機械振動。這是典型的結構-聲耦合現象：

- 輪胎作為複雜彈性結構,受外部激勵時會產生多種振動模態：徑向振動、切向振動、扭轉振動及側壁彎曲振動
- 這些振動透過位移邊界條件激發周圍空氣的壓力波動,形成聲輻射

頻率範圍

- 低階環形模態 (波數 2-4) : 200-500 Hz, 主要影響車內低頻噪音
- 高階模態 (波數 5 以上) : 1000 Hz 以上, 對外部噪音的中頻成分有顯著影響
- 臨界頻率約在 1000 Hz 左右, 中高頻振動的輻射效率較高

影響因素

- 輪胎結構設計 (帶束層、胎體)、幾何參數 (直徑、寬度、扁平比)
- 橡膠材料的彈性模量與阻尼特性
- 花紋設計、載重、充氣壓力
- 車速：速度加倍會使噪音增加約 9-12 dB (聲功率與速度的 3-4 次方成正比)

控制策略

降低激勵力幅度、優化結構動態特性、提高材料阻尼、採用變節距花紋設計

二、空氣泵浦效應 (Air Pumping Effect)

物理原理

當胎面溝槽進入和離開輪胎與路面接觸區域時,溝槽內空氣體積發生急劇變化,導致空氣被壓縮和膨脹,產生壓力波動並向外輻射噪音,類似微型活塞效應。

頻率範圍

- 典型範圍：800-3000 Hz

- 基頻約 200-350 Hz，但實際噪音頻譜包含 2 次到 10 次諧波

影響因素

- 溝槽幾何：深度、寬度、橫截面形狀（深溝槽增強效應，寬溝槽加大體積變化）
- 花紋節距設計：變節距可打散頻率成分，降低音調性
- 車速：速度加倍，噪音增加 12-15 dB（聲功率與速度的 4-5 次方成正比）
- 路面特性：多孔路面可吸收被排出的空氣，降噪 3-5 dB
- 喇叭效應：輪胎與路面楔形空腔將某些頻率放大 3-5 dB

特性

強烈的速度依賴、支配中高頻噪音、數值模擬依賴 CFD（計算流體力學）但計算成本較高

三、空氣共鳴 (Air Resonance)

物理原理

包括三種類型：

1. 胎面溝槽共振：空氣柱在溝槽內形成駐波，類似管樂器共振
2. 輪胎空腔共振：輪胎內腔空氣的共振
3. 楔形空腔管道共振：輪胎-路面間空腔的共振

頻率範圍

- 溝槽共振：基頻約 1700 Hz ($\lambda/2$ 模式)，4250 Hz ($\lambda/4$ 模式)，高次諧波更高
- 輪胎空腔共振：200-250 Hz（低頻），對車內「轟鳴聲」有明顯影響
- 管道共振：800-1500 Hz

影響因素

- 溝槽/空腔的幾何形狀、長度、深度、方向
- 壁面材料彈性與阻抗（剛性壁面峰值大，吸能材料降低峰值）
- 聲速（受溫度、氣壓影響）
- 楔形空腔的幾何參數

控制方法

多孔材料或泡沫填充吸能、調整幾何變化共振頻率、局部吸音結構、變化溝槽長度分散共振峰

四、黏著-滑動效應 (Stick-Slip Effect)

物理原理

橡膠與路面間週期性黏著與滑動狀態轉換，產生自激振動，類似弦樂器或剎車片尖叫。摩擦特性呈負阻尼（摩擦力隨速度增長先增後減），可自我激發振動。

頻率範圍

- 低頻成分：200-800 Hz（胎面單元宏觀運動）
- 中頻成分：800-2000 Hz（微觀黏滑，橡膠黏彈性響應）

影響因素

- 橡膠配方（剛性/損耗因子）、路面微觀紋理
- 溫度、載重（正壓力）、車速
- 速度效應：低速時較強，車速上升效果減弱（聲功率與速度的 2-3 次方成正比）
- 工況：轉向/加速/剎車時最強，直線勻速較弱
- 濕路面摩擦係數下降可能降低此效應
- 與輪胎模態耦合時會產生共振

特性

自激振動、主觀音調突出，影響輪胎抓地力及舒適性，材料設計需平衡阻尼/耐磨性/滾動阻力

五、衝擊噪音 (Impact Noise)

物理原理

胎面花紋塊或單元與路面瞬時碰撞，產生高幅值力脈衝，激發結構振動及聲輻射，屬於機械能高速轉移的寬頻脈衝噪音。

分為兩類：

- 胎面衝擊：花紋塊整體進入（snap-in）或離開（snap-out）接觸區
- 紋理衝擊：橡膠與微觀路面突起碰撞

頻率範圍

- 胎面衝擊：主要影響 1000 Hz 以下
- 紋理衝擊：貢獻 2000 Hz 以上高頻成分

影響因素

- 花紋尺寸/質量/剛度、花紋塊連接結構
- 路面粗糙度/材料硬度（硬路面產生更強衝擊）
- 溫度（影響材料剛度）

- 車速：聲功率與速度的 3-4 次方成正比
- 載重/氣壓（決定接觸面壓力及衝擊能量）

特性

寬頻、瞬態事件、測量需高時間解析度，降噪主要透過：

- 圓滑前/後緣設計
- 小型化花紋
- 柔性連接與材料阻尼等措施

小結

這五種機制往往同時作用且相互耦合，共同決定輪胎噪音的整體特性：

- 低頻 (<500 Hz)：振動噪音、輪胎空腔共鳴、黏著-滑動為主
- 中頻 (500-1500 Hz)：空氣泵浦、管道共鳴、衝擊噪音
- 高頻 (>1500 Hz)：溝槽共鳴、紋理衝擊、高階振動模態

輪胎設計需在降噪與其他關鍵性能（抓地力、耐久性、滾動阻力）間取得平衡。

貳 三個影響輪胎噪音的關鍵因素：

一、胎面花紋 (Tread Pattern)

基本概念與矛盾性

胎面花紋是對噪音影響最直接和最顯著的要素。它的主要功能包括：

- 提供濕地抓地力（透過排水溝槽）
- 增強牽引力和制動力
- 保證行駛穩定性
- 實現自清潔功能

核心矛盾：這些功能性要求往往與低噪音設計存在衝突——有效排水需要深而寬的溝槽，但這會增強空氣泵浦效應和溝槽共振；增強抓地力需要較硬的橡膠和明顯的花紋邊緣，但這會增加衝擊噪音和黏著-滑動效應。

核心設計參數

1. 花紋節距設計 (Pitch Sequence Design)

這是控制噪音的核心技術之一：

- 變節距設計：透過改變花紋節距長度，將週期性激勵轉換為隨機或準隨機激勵
- 降噪效果：可比均勻節距降低 3-5 dB 的音調噪音，顯著改善聲品質

- 設計參數：
 - 節距種類：通常採用 3-7 種不同節距長度
 - 變化範圍：最長與最短節距的比值在 1.3-2.0 之間
- 優化方法：使用遺傳算法、模擬退火算法等數學優化算法搜索最佳排列

2. 溝槽幾何參數

深度影響：

- 深度從 5mm 增加到 10mm，噪音可能增加 2-3 dB
- 深溝槽增強空氣泵浦效應（體積變化更大）
- 可能降低溝槽共振頻率，移向聽覺更敏感頻段
- 但足夠深度對排水性能和輪胎壽命至關重要

寬度影響：

- 寬溝槽提供更大空氣流動通道，可能減少壓力積累
- 但也增大體積變化量

橫截面形狀：

- 矩形溝槽、V 形溝槽和複合形狀表現出不同聲學性能
- 變深度和變寬度溝槽設計可打散共振頻率

3. 溝槽方向性與連通性

- 橫向溝槽：產生的噪音通常比縱向溝槽更強（開口面向接觸區前後方向）
- 縱向溝槽：對噪音影響相對較小（開口面向側方，聲輻射受遮擋）
- 折衷方案：採用偏斜角度較大的斜向溝槽，既保證抓地力又減少噪音
- 連通性設計：橫向與縱向溝槽連接時，壓縮空氣可透過縱向溝槽逃逸，減輕壓力積累
- 創新設計：在橫向溝槽中段設置連接通道，或在溝槽底部設置洩壓通道

4. 花紋塊設計

尺寸影響：

- 大花紋塊：產生更強接地和離地衝擊，但剛度大有利於操控
- 小花紋塊：個體衝擊較弱，但數量更多

形狀設計（關鍵降噪點）：

- 前緣設計：尖銳前緣產生劇烈接地衝擊；圓滑或傾斜前緣可緩和衝擊過程，顯著減少衝擊噪音
- 後緣設計：開槽或缺口設計可減少離地時的突然回彈

連接設計：

- 採用細窄的連接帶（thin ties）提供隔振效果
- 花紋塊底部設計阻尼層或柔性層，透過黏彈性阻尼吸收振動能量

5. 三維花紋設計

- 台階狀花紋塊高度，在不同磨耗階段發揮作用
- 特殊側壁形狀影響空氣流動
- 側壁上設置小孔或通道，為空氣提供額外流動路徑

6. 對稱性與方向性

- 對稱花紋：性能均衡，噪音和操控一致
- 非對稱花紋：外側大花紋塊保證轉向性能，內側多溝槽優化排水，可針對性地優化噪音控制
- 方向性花紋：V形或箭頭形走向，可控制空氣排出方向，優化特定頻率成分

降噪策略總結

- 變節距設計與優化
- 優化溝槽結構（深度、寬度、方向、連通性）
- 圓滑化花紋塊前後緣
- 柔性連接與阻尼層設計
- 三維花紋特徵
- 計算機輔助優化（FEM、CFD、遺傳算法等多目標優化）

二、胎體結構 (Tire Carcass Structure)

基本概念

胎體結構是輪胎的骨架系統，對整體力學特性、動態響應和噪音性能有根本性影響。主要組成包括：

- 簾布層（carcass plies）
- 帶束層（belt layers）
- 胎圈（bead）
- 各部分之間的橡膠過渡層

關鍵結構組件

1. 簾布層 (Carcass Plies)

材料與特性：

- 聚酯纖維：最常用，良好強度、適當彈性、低成本
- 尼龍：更高強度和衝擊韌性，常用於載重輪胎
- 人造絲 (Rayon)：低生熱特性，適用於高速輪胎

噪音影響：

- 徑向柔性有助於減少路面激勵傳遞，降低高頻振動
- 過低周向剛度可能導致胎面帶不穩定振動，增加某些模態噪音
- 雙層簾布比單層提供更高強度和剛度，但增加質量和滾動阻力

2. 帶束層 (Belt Layers)

這是子午線輪胎的關鍵結構組件，位於簾布層外側、胎面橡膠下方：

材料：

- 鋼絲簾線：提供極高周向剛度，但幾乎沒有阻尼能力
- 芳綸纖維 (Kevlar)：極高強度重量比，可減輕重量同時保持剛度

帶束角度影響：

- 角度變化 5 度可使某些模態頻率改變 10-15%
- 透過優化帶束角度，可調整振動模態頻率，使其避開聽覺最敏感頻段

層數影響：

- 兩層：最常見配置
- 三層或四層：進一步提高剛度和均勻性，但增加重量
- 更多層數提高胎冠剛度，可能提高振動模態頻率，改變噪音頻譜

層間橡膠：

- 提供層間耦合和阻尼
- 較厚橡膠層增加阻尼，吸收振動能量，但降低整體剛度

3. 振動模態特性

輪胎可用環形結構的模態理論描述：

- 徑向模態：胎面和側壁的徑向運動，200-1000 Hz，是外部噪音的主要貢獻模態
- 切向模態：胎面周向伸縮運動，通常 >1000 Hz
- 側壁彎曲模態：複雜變形，對車內噪音有重要影響
- 扭轉模態：影響整體動態響應

4. 阻尼特性

阻尼決定振動衰減速度和共振放大倍數：

阻尼來源：

- 橡膠材料內部阻尼（黏彈性阻尼）
- 層間摩擦阻尼：簾布層、帶束層之間的微觀相對運動
- 空氣阻尼

設計考慮：

- 高損耗因子橡膠提供更好阻尼但可能影響其他性能
- 增加層間橡膠厚度提高摩擦阻尼，但降低整體剛度

5. 側壁結構

噪音影響兩方面：

1. 作為聲輻射表面：大面積側壁振動可有效向空氣輻射聲波，特別是中低頻
2. 作為振動傳遞路徑：從胎面到輪輞的主要路徑

設計權衡：

- 較柔軟側壁可隔離路面激勵向輪輞傳遞
- 但可能產生較大幅度振動，增加輻射噪音

6. 輪胎均勻性 (Uniformity)

良好均勻性可降低車內轟鳴聲 2-3 dB：

- 質量均勻性
- 剛度均勻性
- 幾何均勻性

不均勻會產生週期性激勵力（徑向力變化、側向力變化），激發振動和噪音。

降噪策略總結

- 優化帶束角度，調整模態頻率避開敏感頻段
- 採用高阻尼材料和層間設計
- 優化側壁厚度和剛度分佈
- 提高製造均勻性
- 使用混合材料（如芳綸纖維）減輕重量改善動態特性

三、材料特性 (Material Properties)

基本概念

材料特性對噪音的影響涵蓋從微觀分子鏈運動到宏觀結構響應等多個層次。輪胎

主要材料包括：

- 各種橡膠配方

- 簾線材料（聚酯、尼龍、人造絲、鋼絲等）
- 各種添加劑

橡膠黏彈性特性

這是理解材料與噪音關係的關鍵，橡膠同時表現出：

- 彈性行為（能量儲存）
- 黏性行為（能量耗散）
- 強烈依賴於溫度、頻率和應變幅度

1. 胎面橡膠硬度

硬度影響：

- 較硬橡膠（高邵氏硬度）：
 - 更高彈性模量
 - 對路面不平度更敏感
 - 產生更強衝擊和振動
 - 紋理衝擊噪音顯著增加
 - 硬度增加 10 邵氏度，高頻噪音 (>2000 Hz) 可能增加 1-2 dB
- 較軟橡膠：
 - 能順應路面微觀形狀
 - 減少衝擊強度
 - 但可能增加黏著-滑動效應

2. 黏彈性參數

複數模量：

- 儲存模量 (E'): 彈性成分
- 損耗模量 (E''): 黏性成分
- 損耗因子 ($\tan \delta = E''/E'$): 能量耗散能力指標

噪音控制目標：

- 希望胎面橡膠在 500-3000 Hz 具有適當高的損耗因子
- 快速衰減振動

設計權衡：

- 損耗因子提高會增加滾動阻力和降低耐磨性
- 能量耗散在滾動變形中產生額外能量損失

3. 頻率與溫度依賴性

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

- 溫度降低 \approx 頻率增加 \rightarrow 低溫下橡膠變硬，高頻特性凸顯
- 溫度升高 \approx 頻率降低 \rightarrow 高溫下橡膠變軟，低頻特性主導

實際影響：

- 輪胎使用中胎面溫度可能比環境高 20-40°C 甚至更多
- 溫度升高軟化橡膠，降低模量，改變阻尼特性
- 季節性溫度變化影響噪音性能 (冬季胎 vs 夏季胎)

4. 填料系統

炭黑填料：

- 提供良好補強效果和耐磨性
- 但會提高模量和降低損耗因子

二氧化矽填料：

- 在保持較低滾動阻力同時提供良好濕地抓地力
- 對噪音影響取決於具體配方設計

現代解決方案：

- 炭黑與二氧化矽的複合填料系統
- 透過優化兩者比例和分散性平衡各項性能

5. 多膠配方設計 (Multi-Compound Tread)

採用兩種或更多種橡膠配方組成胎面：

設計策略：

- 在噪音敏感區域 (如花紋塊邊緣) 使用高阻尼配方
- 在其他區域使用性能平衡的配方
- 不同深度採用不同配方，在不同磨耗階段發揮作用

6. 簾線材料特性

不同簾線材料的特性差異：

材料	特點	應用	阻尼特性
聚酯纖維	良好強度、適當彈性、低成本	乘用車胎體	中等
尼龍	更高強度、衝擊韌性、較低模量	載重輪胎	中等
人造絲	低生熱特性	高速輪胎	較低
鋼絲	極高周向剛度	帶束層	幾乎無
芳綸纖維	極高強度重量比和模量	高性能輪胎帶束層	低

7. 非線性特性

橡膠在大變形條件下的複雜行為：

- 應變硬化效應：應變增加，模量通常增加
- Mullins 效應：應力軟化效應
- Payne 效應：應變幅度依賴的動態模量

這些非線性會導致振動響應中的諧波失真，豐富噪音頻譜成分。

8. 新材料技術

為輪胎噪音控制提供新可能性：

- 納米複合材料：改善材料性能
- 功能梯度材料：在不同位置漸變材料特性
- 多孔彈性材料：內部孔隙結構提供額外阻尼
- 智能材料：形狀記憶聚合物、磁流變彈性體（潛力：主動控制振動和噪音）

降噪策略總結

- 配方設計提升高頻（500-3000 Hz）損耗因子，兼顧磨耗和滾阻
- 局部多配方設計，在噪音敏感區域採用高阻尼配方
- 複合填料系統（炭黑+二氧化矽）平衡性能
- 溫度適性設計（冬季胎/夏季胎配方優化）
- 選擇適合的簾線材料組合
- 探索新材料技術（納米、梯度、多孔、智能材料）

總體設計原則

這三個因素高度相互關聯，需要多目標優化：

1. 花紋設計：直接控制激勵源（空氣泵浦、衝擊、共鳴）
2. 胎體結構：控制振動模態和能量傳遞路徑
3. 材料特性：控制振動響應和能量耗散

平衡考量：

- 噪音 ↔ 安全性（抓地力、濕地性能）
- 噪音 ↔ 耐久性（磨耗壽命）
- 噪音 ↔ 滾動阻力（燃油經濟性）
- 噪音 ↔ 製造成本

現代輪胎設計依賴虛擬設計與優化技術（FEM、CFD、遺傳算法等），在設計階段進行多目標優化，在滿足所有性能約束的前提下尋找最優低噪音設計。

參 路面因素對輪胎噪音的影響：

一、路面紋理 (Road Texture)

基本概念與分類

路面紋理是路面表面幾何特徵的描述，涵蓋從微米到米尺度的多種波長成分。根據 ISO 13473 標準，路面紋理按波長範圍分為四個層次：

據 ISO 13473 標準，路面紋理按波長範圍分為四個層次：

紋理類型	波長範圍	主要影響
微觀紋理 (Microtexture)	< 0.5 mm	高頻噪音 (>2000 Hz)、黏著-滑動效應
宏觀紋理 (Macrottexture)	0.5-50 mm	對輪胎噪音影響最大
超宏觀紋理 (Megattexture)	50-500 mm	乘坐舒適性、低頻振動
不平度 (Roughness/Unevenness)	> 500 mm	車輛動態性能、極低頻振動

各層次紋理的噪音影響

1. 微觀紋理 (< 0.5 mm)

影響機制：

- 主要影響 2000 Hz 以上的高頻噪音
- 影響橡膠-路面的黏著-滑動效應
- 決定路面的摩擦特性（濕地抓地力）

噪音影響程度：

- 對 A 加權總噪音值的影響通常小於 1-2 dB
- 影響相對較小，但對濕地安全性至關重要

2. 宏觀紋理 (0.5-50 mm) — 最關鍵層次

影響機制：

- 決定胎面與路面接觸的幾何特徵
- 影響接觸壓力分佈
- 影響空氣泵浦效應
- 產生衝擊激勵

核心參數：平均紋理深度 (MTD - Mean Texture Depth)

宏觀紋理深度與噪音呈現複雜的非線性關係：

- 過低紋理深度（接近光滑）：
 - 雖然減少機械激勵
 - 但可能增強空氣泵浦效應（輪胎與路面密封更好）
 - 增強黏著-滑動效應

- 適中紋理深度：
 - MTD 在 0.4-0.8 mm 範圍通常能提供較好的噪音性能
 - 提供足夠排水能力
 - 合理的激勵水平
- 過高紋理深度：
 - 增強機械衝擊，顯著提高噪音
 - MTD 每增加 0.1 mm，噪音可能增加約 0.5-1 dB

功率譜密度（PSD - Power Spectral Density）分析：

這是更全面的紋理表徵方法，描述紋理在不同波長成分上的能量分佈：

- 5-15 mm 波長的紋理成分對 800-2000 Hz 的噪音有重要貢獻
- 可用於精確預測特定頻率範圍的噪音特性

紋理特徵對噪音的影響

紋理形狀：

- 正紋理（突起）vs 負紋理（凹陷）：正紋理產生更強的衝擊噪音
- 尖銳邊緣 vs 圓滑邊緣：尖銳邊緣產生高頻衝擊
- 深度變化：劇烈變化產生寬頻噪音

紋理方向性：

- 橫向紋理（垂直於行駛方向）：產生週期性激勵，音調噪音明顯
- 縱向紋理（平行於行駛方向）：產生較弱噪音
- 隨機或各向同性紋理：噪音能量分散，主觀煩惱度較低

紋理分佈模式：

- 週期性紋理：產生明顯音調噪音（如橫向刻槽）
- 隨機紋理：噪音頻譜平滑，類似白噪音

測量方法

1. 鋪砂法（Sand Patch Method）

- 標準方法，用於測量 MTD
- 原理：在路面上鋪展已知體積的標準砂，測量覆蓋面積來推算平均紋理深度
- 優點：簡單、成本低
- 缺點：精度有限、費時、僅能測量平均值

2. 激光紋理儀 (Laser Texture Scanner)

- 現代常用工具
- 使用激光位移傳感器測量路面縱向輪廓
- 優點：快速、高精度
- 可計算 MTD、PSD 等多種參數
- 可進行動態測量 (車載系統)

3. 三維路面掃描系統

- 獲得路面的完整三維形貌
- 提供最全面的紋理信息
- 缺點：設備複雜昂貴
- 主要用於研究和高端應用

施工工藝對紋理的影響

不同路面施工工藝產生不同的紋理特徵：

瀝青路面：

- 紋理主要由骨料級配和攤鋪工藝決定
- 密級配瀝青：紋理較細，但可能密封過度
- 開級配瀝青：較粗紋理，排水性好

混凝土路面：

- 拉毛 (dragging)：產生縱向紋理
- 刻槽 (grooving)：產生橫向或縱向溝槽
- 噴砂 (sandblasting)：產生細密的隨機紋理

降噪策略

紋理設計原則：

1. 保持適中的宏觀紋理深度：MTD 0.4-0.8 mm
2. 避免過深的突起和過尖銳的邊緣
3. 採用各向同性或優化的各向異性紋理
4. 避免強週期性特徵 (原理類似輪胎變節距設計)
5. 在保證排水和摩擦性能的前提下最小化機械激勵

具體技術措施：

多孔路面：

- 透過獨特的紋理和孔隙結構

- 在吸音和降低激勵兩方面發揮作用
- 是實現低噪音的有效路面類型

表面處理：

- 磨光處理：去除尖銳突起
- 微鋪（micro-surfacing）：改善紋理均勻性
- 密封處理：調整紋理深度

優化刻槽設計：

- 採用縱向刻槽而非橫向
- 使用變間距刻槽（類似輪胎變節距）
- 減小刻槽深度和寬度

降噪效果數據

透過優化紋理設計，可實現：

- 相比不良紋理路面降低 3-6 dB
- 多孔路面相比密級配路面降低 3-6 dB

二、路面材料 (Road Material)

基本概念

路面材料的物理和聲學性能對輪胎噪音有根本性的影響。材料的剛度、阻尼、表面特性和孔隙結構是決定噪音性能的關鍵因素。

主要路面材料類型

1. 瀝青混凝土 (Asphalt Concrete)

組成：

- 礦料骨料
- 瀝青膠結料
- 填料
- 添加劑（可選）

材料特性：

- 黏彈性材料：力學性能強烈依賴於溫度和加載頻率
- 在常溫下表現為彈性與黏性的複合特性
- 彈性模量：通常為 2-10 GPa

噪音影響機制：

- 能夠吸收部分衝擊能量

- 相比剛性材料產生較小的反彈力
- 阻尼特性有利於降低衝擊噪音
- 比混凝土路面噪音低 2-5 dB

溫度效應：

- 高溫下軟化，可能變形，改變紋理特徵
- 低溫下變硬，減少阻尼效果

2. 水泥混凝土 (Cement Concrete)

組成：

- 水泥
- 骨料
- 水
- 添加劑

材料特性：

- 高剛度、高硬度
- 彈性模量：通常為 20-40 GPa（遠高於瀝青）
- 幾乎無阻尼能力

噪音影響機制：

- 變形小，衝擊時能量主要反射回輪胎
- 產生更強的輪胎振動和噪音
- 在相同紋理條件下，混凝土路面噪音通常比瀝青路面高 2-5 dB

優點：

- 耐久性好
- 維護需求低
- 壽命長

3. 多孔材料路面 (Porous Pavement)

這是公認的低噪音路面類型。

結構特徵：

- 孔隙率：通常為 15-25%
- 內部連通的孔隙結構
- 雙層設計可進一步優化性能

吸音機制：

- 空氣在孔隙中流動產生黏滯耗散
- 聲波能量轉換為熱能
- 類似海綿的吸音原理

降噪效果：

- 對**中高頻噪音（800-4000 Hz）**的吸收尤其有效
- 可以降低：
 - 空氣泵浦噪音
 - 溝槽共振噪音
 - 反射噪音
- 與密級配瀝青路面相比，可降低輪胎噪音 3-6 dB

雙層多孔設計：

- 上層：細級配，高孔隙率（18-25%），吸音為主
- 下層：較粗級配，中等孔隙率（15-20%），排水為主
- 進一步優化吸音頻率範圍和耐久性

挑戰：

- 孔隙堵塞問題（見 2.4.3）
- 結構強度相對較低
- 需要專門的維護

4. 橡膠改性瀝青（Rubber-Modified Asphalt）

創新點：

- 在瀝青中添加橡膠顆粒（通常來自廢輪胎回收橡膠）
- 環保與性能的雙重效益

性能改善：

- 橡膠顆粒提供額外的彈性和阻尼
- 使路面更"柔軟"
- 能夠吸收更多衝擊能量

降噪效果：

- 可以比常規瀝青路面降低 1-3 dB 噪音
- 橡膠含量每增加 10-20%，降噪效果更明顯

其他優點：

- 改善低溫抗裂性能

- 提高疲勞壽命
- 增強抗車轍能力

5. 新型材料

聚合物混凝土：

- 使用聚合物樹脂替代或部分替代水泥
- 更好的韌性和阻尼

功能梯度材料：

- 從表面到底層材料性能漸變
- 優化力學和聲學性能

多孔混凝土：

- 混凝土基礎的多孔材料
- 結合混凝土耐久性和多孔材料吸音性

智能材料：

- 壓電材料、磁流變材料
- 可感知和主動控制振動與噪音
- 目前處於研究階段

生物基膠結料：

- 使用生物基材料替代石油基瀝青
- 環保可持續

聲學性能測量方法

吸音係數（Absorption Coefficient）

定義：

- 範圍：0 到 1
- 0 = 完全反射（無吸音）
- 1 = 完全吸收（無反射）

測量方法：

阻抗管法（Impedance Tube Method, ISO 10534-2）：

- 實驗室標準方法
- 小樣品測試
- 可獲得頻率相關的吸音係數

現場原位測量：

- 用於已鋪設路面
- 評估實際使用條件下的性能

典型數據：

- 多孔材料：在中高頻（800-4000 Hz）吸音係數可達 0.3-0.6
- 密實材料（瀝青、混凝土）：吸音係數**< 0.1**

降噪策略

材料選擇原則：

1. 首選多孔瀝青：在條件允許時
2. 考慮雙層多孔結構：優化吸音和耐久性
3. 採用橡膠改性：適度橡膠含量（10-20%）
4. 選用高阻尼材料：瀝青優於混凝土

設計考慮：

平衡多種性能：

- 噪音控制
- 結構強度
- 耐久性
- 排水能力
- 成本效益

孔隙率優化：

- 過低：吸音效果不足
- 過高：結構強度下降
- 最佳範圍：18-22%（視具體應用）

維護策略：

- 定期清洗保持孔隙通暢（見 2.4.3）
- 及時修補損壞
- 監測性能衰減

降噪效果數據總結

材料類型	相對密級配瀝青的噪音差異
密級配瀝青（基準）	0 dB
水泥混凝土	+2 ~ +5 dB
橡膠改性瀝青	-1 ~ -3 dB
多孔瀝青	-3 ~ -6 dB
雙層多孔瀝青	-4 ~ -8 dB

三、路面狀況 (Road Condition)

基本概念

路面的使用狀況和環境條件對輪胎噪音有著顯著且動態變化的影響。這些影響超出路面本身的設計特性，涉及：

- 路面磨耗
- 老化
- 污染
- 濕度
- 溫度等多種因素

主要影響因素

1. 路面磨耗 (Wear)

這是最主要的狀況變化因素。

磨耗階段與噪音變化：

初期磨耗：

- 暴露更多的骨料
- 增加表面粗糙度
- 噪音可能略有增加

中期磨耗：

- 骨料表面逐漸磨平
- 宏觀紋理深度減小
- 路面變得更平滑
- 噪音可能降低

後期磨耗/損壞：

- 出現坑洞、裂縫
- 噪音顯著增加
- 結構性能下降

多孔瀝青路面的特殊性：

- 前 1-2 年：
 - 初期磨耗去除表面薄膜
 - 孔隙更通暢
 - 性能可能略有改善

- 5-7 年後：
 - 孔隙逐漸堵塞
 - 骨料磨損
 - 噪音水平增加 2-3 dB
 - 接近普通路面水平

2. 孔隙堵塞 (Clogging)

這是多孔路面面臨的主要問題。

堵塞物來源：

- 灰塵
- 泥土
- 有機物 (樹葉、花粉等)
- 輪胎磨損顆粒
- 排氣微粒

堵塞影響：

- 降低甚至喪失吸音能力
- 排水能力下降
- 堵塞嚴重時，噪音水平可能完全失去初始降噪效果
- 甚至可能高於密級配路面

解決方法：

高壓水沖洗：

- 最有效的方法
- 能恢復 70-90%的初始吸音能力
- 建議頻率：每年 1-2 次
- 最佳時機：春季和秋季

真空吸塵：

- 適用於輕度堵塞
- 可作為輔助措施

預防措施：

- 路肩綠化管理
- 清掃車定期清掃
- 在易堵塞區域增加清洗頻率

3. 路面濕度狀態 (Wet vs. Dry)

濕度對噪音有顯著影響。

濕路面噪音增加機制：

1. 水膜被擠壓：
 - 輪胎進入接觸區時擠壓水膜
 - 產生壓力波動
2. 飛濺噪音 (Splash Noise)：
 - 水被輪胎拋甩
 - 產生額外的中高頻噪音 (1000-4000 Hz)
3. 改變接觸特性：
 - 水膜改變輪胎-路面接觸壓力分佈
 - 影響黏著-滑動行為

噪音增加幅度：

- 密實路面 (瀝青、混凝土)：
 - 濕路面比乾路面高 3-5 dB
 - 水膜無法快速排出
- 多孔路面：
 - 濕路面比乾路面高 1-2 dB
 - 水可快速滲入孔隙
 - 飛濺噪音大幅減少

降低濕路面噪音策略：

- 採用多孔路面設計
- 優化排水坡度
- 確保排水系統暢通
- 適當的縱向和橫向坡度

4. 路面溫度

溫度影響瀝青材料的力學性能。

溫度效應：

- 路面溫度每升高 10°C，瀝青路面噪音可降低 0.1-0.3 dB
- 原因：瀝青軟化，阻尼增加，更能吸收衝擊能量

季節性變化：

- 夏季：路面較軟，噪音較低
- 冬季：路面較硬，噪音較高
- 溫度跨度可能產生 1-2 dB 的季節性差異

測量標準化：

- 噪音測量需要溫度校正
- 通常標準化到 20°C 或 25°C

5. 其他環境因素

污染物：

- 積塵覆蓋路面，改變表面摩擦
- 油污改變橡膠-路面接觸特性

季節性因素：

- 落葉堵塞多孔路面孔隙
- 雪和冰完全改變路面特性
- 春季融雪可能沖刷表面，恢復吸音性能

測量與監測方法

路面狀況監測：

紋理測量：

- 定期進行 MTD/PSD 測量
- 監測紋理變化趨勢

平整度評估：

- 國際平整度指數 (IRI - International Roughness Index)
- 檢測不平度和損壞

損壞評估：

- 視覺檢查
- 雷射掃描
- 評估裂縫、坑洞、車轍等

吸音性能測試：

- 阻抗管法 (實驗室樣品)
- 現場原位吸音測量

噪音監測：

- CPX (Close Proximity) 測試

- 定期測量特定路段噪音水平
- 建立性能衰減曲線

堵塞程度檢查：

- 孔隙率測量
- 滲水試驗
- 目視檢查

路面管理系統（PMS- Pavement Management System）：

部分先進地區已將噪音性能納入 PMS 監控：

- 建立路面噪音數據庫
- 追蹤性能衰減
- 優化維護計劃
- 預測翻修時機

維護策略

1. 針對多孔路面堵塞：

清洗計劃：

- 每年 1-2 次高壓水沖洗
- 重點路段增加頻率
- 選擇適當季節（避免冬季）

效果評估：

- 清洗前後進行吸音測試
- 驗證恢復效果

2. 針對磨耗和損壞：

輕度磨耗：

- 繼續使用
- 監測性能變化

中度磨耗：

- 表面處治：
 - 微鋪（micro-surfacing）
 - 薄層罩面
 - 密封處理
- 使用低噪音材料進行處治

重度磨耗/損壞：

- 路面翻修
- 採用低噪音設計的新路面
- 考慮升級為多孔路面

3. 濕度管理：

排水設計：

- 確保適當的橫向和縱向坡度
- 排水設施維護
- 防止積水

多孔路面優化：

- 保持孔隙通暢
- 檢查排水能力

4. 預防性維護：

定期檢查：

- 早期發現問題
- 及時小規模修補

清掃計劃：

- 定期清掃路面
- 減少污染物積累

綠化管理：

- 修剪路旁樹木
- 減少落葉污染

性能衰減數據總結

路面類型	使用時間	噪音變化	主要原因
密級配瀝青	5-10 年	+1~2 dB	磨耗、損壞
多孔瀝青（無維護）	5-7 年	+2~3 dB	堵塞、磨耗
多孔瀝青（定期清洗）	10-15 年	+1~2 dB	維持性能
混凝土路面	10-20 年	+0.5~1.5 dB	磨平、微裂紋

最佳實踐建議

新建路面：

- 優先考慮多孔瀝青（在氣候適宜地區）
- 採用優化的紋理設計
- 預留維護預算

既有路面：

- 建立監測計劃
- 定期維護（特別是多孔路面清洗）
- 適時翻修使用低噪音材料

政策層面：

- 將噪音性能納入路面設計標準
- 建立噪音性能數據庫
- 制定維護規範
- 提供低噪音路面的激勵措施

三個因素的綜合影響

路面紋理、材料和狀況三者高度相互關聯：

1. 材料決定基礎性能：多孔材料提供吸音能力
2. 紋理決定激勵特性：適中紋理減少機械激勵
3. 狀況決定性能維持：良好維護保持長期效果

最佳組合策略：

- 多孔瀝青材料（降噪 3-6 dB）
- 優化紋理設計（MTD 0.4-0.8 mm）
- 定期維護（高壓水沖洗 1-2 次/年）
- 總降噪潛力：相比不良路面可降低 5-10 dB

這是輪胎噪音控制中最具成本效益的措施之一，因為路面改善可同時惠及所有車輛。

綜合而言，本章所建立之輪胎噪音產生機制理論架構，不僅有助於深入理解噪音形成的物理本質，也為後續章節中關於低噪音胎面設計、材料創新、道路鋪面聲學優化與整體交通噪音治理策略，提供了堅實且可延伸的理論基礎。此一由機制導向出發的研究途徑，正是當代國際輪胎噪音研究與工程實務發展的核心方向。

參考文獻

- [1] International Organization for Standardization. (2023). ISO 11819-1:2023 - Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical pass-by method. Geneva, Switzerland: ISO.
- [2] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [3] Wang, B., & Duhamel, D. (2018). Horn effect of tyre/road noise: Modelling and experiments of acoustic network resonators in horn-like structures. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 14(4), 341-359. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2018.095183>
- [4] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A three-dimensional numerical investigation of air pumping noise generation in tires. Journal of Vibration and Acoustics, 138(6), 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4034345>
- [5] International Organization for Standardization. (2017). ISO 11819-2:2017 - Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. Geneva, Switzerland: ISO.
- [6] Bao, Y., Feng, Q., Zhao, W., & Zhang, Y. (2024). Research on acoustic-structural coupling model and tire parameters of tire acoustic cavity resonance noise. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 43(1), 356-373. <https://doi.org/10.1177/14613484231220187>
- [7] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. International Journal of Vehicle Noise and Vibration, 9(3-4), 276-293. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2013.055811>
- [8] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). Tyre/road noise reference book. Kisa, Sweden: INFORMEX.
- [9] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2016). The effects of tread patterns on tire pavement interaction noise. Proceedings of INTER-NOISE 2016, 253(8), 407-418.
- [10] Frank, E. C., Pickering, D. J., & Raglin, C. (2007). In-vehicle tire sound quality prediction from tire noise data. SAE Technical Paper 2007-01-2253. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2253>

- [11] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 3, 2072-2076. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384558>
- [12] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [13] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Crocker, M. J., Li, Z., & Arenas, J. P. (2005). Measurements of tyre/road noise and of acoustical properties of porous road surfaces. International Journal of Acoustics and Vibration, 10(2), 69-77.
- [17] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [18] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves. Journal of Vibration and Acoustics, 138(5), 051002. <https://doi.org/10.1115/1.4033341>
- [19] Marshall, K. D. (2005). Tire noise and vibration. In The Pneumatic Tire (pp. 835-897). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [20] Eisenblaetter, J., Walsh, S. J., & Krylov, V. V. (2010). Air-related mechanisms of noise generation by solid rubber tyres with cavities. Applied Acoustics, 71(9), 854-860. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.002>

- [21] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. Proceedings of 4th Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Graz, Austria.
- [22] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A computational fluid dynamics model for investigating air-pumping mechanisms in air-borne tire noise. *Tire Science and Technology*, 44(3), 191-209. <https://doi.org/10.2346/tire.16.440302>
- [23] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Xu, S. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 88-97. <https://doi.org/10.3397/1/376360>
- [24] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [25] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). Tire/pavement noise study. NCAT Report 04-02, National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama.
- [26] Suphadon, N. (2010). The viscoelastic properties of rubber under a complex loading. PhD Thesis, Queen Mary University of London, UK.
- [27] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [28] Pinay, J., Saito, Y., Mignot, C., & Gauterin, F. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under various operating conditions. *Acta Acustica*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020003>
- [29] Walker, J. C. (1981). Noise generated at the tyre/road interface. PhD Thesis, Aston University, UK.
- [30] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>

- [31] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A three-dimensional numerical investigation of air pumping noise generation in tires. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(6), 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4034345>
- [32] Eisenblaetter, J., Walsh, S. J., & Krylov, V. V. (2010). Air-related mechanisms of noise generation by solid rubber tyres with cavities. *Applied Acoustics*, 71(9), 854-860. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.05.002>
- [33] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Xu, S. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 88-97. <https://doi.org/10.3397/1/376360>
- [34] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(5), 051002. <https://doi.org/10.1115/1.4033341>
- [35] 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>
- [36] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A computational fluid dynamics model for investigating air-pumping mechanisms in air-borne tire noise. *Tire Science and Technology*, 44(3), 191-209. <https://doi.org/10.2346/tire.16.440302>
- [37] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results from a case study. *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*, Athens, Greece.
- [38] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). A three-dimensional numerical investigation of air pumping noise generation in tires. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(6), 061005. <https://doi.org/10.1115/1.4034345>
- [39] Wang, B. (2015). Reduction of acoustic fields of horn-like structures by optimization of network resonators. PhD Thesis, Université Paris-Est, France.
- [40] Gautam, P., & Chandy, A. J. (2016). Numerical investigation of the air pumping noise generation mechanism in tire grooves. *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(5), 051002. <https://doi.org/10.1115/1.4033341>

- [41] 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>
- [42] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2013.055811>
- [43] Marshall, K. D. (2005). Tire noise and vibration. In *The Pneumatic Tire* (pp. 835-897). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [44] Pinay, J., Saito, Y., Mignot, C., & Gauterin, F. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under various operating conditions. *Acta Acustica*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.1051/aacus/2020003>
- [45] 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>
- [46] Bao, Y., Feng, Q., Zhao, W., & Zhang, Y. (2024). Research on acoustic-structural coupling model and tire parameters of tire acoustic cavity resonance noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 43(1), 356-373. <https://doi.org/10.1177/14613484231220187>
- [47] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 9(3-4), 276-293. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2013.055811>
- [48] Wang, B., & Duhamel, D. (2018). Horn effect of tyre/road noise: Modelling and experiments of acoustic network resonators in horn-like structures. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 14(4), 341-359. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2018.095183>
- [49] Marshall, K. D. (2005). Tire noise and vibration. In *The Pneumatic Tire* (pp. 835-897). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [50] Pinay, J., Saito, Y., Mignot, C., & Gauterin, F. (2020). Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under

- various operating conditions. *Acta Acustica*, 4(2), 4.
<https://doi.org/10.1051/aacus/2020003>
- [51] 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>
- [52] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [53] Walker, J. C. (1981). Noise generated at the tyre/road interface. PhD Thesis, Aston University, UK.
- [54] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [55] Marshall, K. D. (2005). Tire noise and vibration. In *The Pneumatic Tire* (pp. 835-897). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [56] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [57] Gardziejczyk, W. (2007). Comparison of vehicle noise on dry and wet road surfaces. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 9, 87-98.
- [58] 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>
- [59] Marshall, K. D. (2005). Tire noise and vibration. In *The Pneumatic Tire* (pp. 835-897). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- [60] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [61] 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>

- [62] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. Proceedings of 4th Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Graz, Austria.
- [63] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [64] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. Frontiers in Materials, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [65] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. Proceedings of 4th Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Graz, Austria.
- [66] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [67] 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>
- [68] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [69] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 3(3), 179-192. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [70] 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>
- [71] Kindt, P., De Coninck, F., Sas, P., & Desmet, W. (2008). Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations. Proceedings of 4th Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress, Graz, Austria.

- [72] 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>
- [73] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [74] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [75] Crocker, M. J., Li, Z., & Arenas, J. P. (2005). Measurements of tyre/road noise and of acoustical properties of porous road surfaces. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 10(2), 69-77.
- [76] 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>
- [77] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [78] Hanson, D. I., James, R. S., & NeSmith, C. (2004). Tire/pavement noise study. NCAT Report 04-02, National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama.
- [79] Li, T., Burdisso, R., & Sandu, C. (2016). The effects of tread patterns on tire pavement interaction noise. *Proceedings of INTER-NOISE 2016*, 253(8), 407-418.
- [80] 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>
- [81] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 3, 2072-2076. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384558>

- [82] 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>
- [83] Wei, Y., Feng, Q., Wang, H., & Xu, S. (2016). A hybrid numerical-experimental analysis for tire air-pumping noise with application to pattern optimization. *Noise Control Engineering Journal*, 64(1), 88-97. <https://doi.org/10.3397/1/376360>
- [84] 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>
- [85] 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>
- [86] 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>
- [87] 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>
- [88] 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>
- [89] Becker, M. (2006). Genetic algorithms for noise reduction in tire design. 2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 3, 2072-2076. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2006.384558>
- [90] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [91] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>

- [92] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [93] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [94] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [95] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [96] Kim, B. S. (2003). A study on tire-structure-borne sound. *JSME International Journal Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 46(2), 683-690. <https://doi.org/10.1299/jsmec.46.683>
- [97] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [98] Frank, E. C., Pickering, D. J., & Raglin, C. (2007). In-vehicle tire sound quality prediction from tire noise data. *SAE Technical Paper 2007-01-2253*. <https://doi.org/10.4271/2007-01-2253>
- [99] 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>
- [100] Suphadon, N. (2010). The viscoelastic properties of rubber under a complex loading. PhD Thesis, Queen Mary University of London, UK.

- [101] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [102] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>
- [103] Suphadon, N. (2010). The viscoelastic properties of rubber under a complex loading. PhD Thesis, Queen Mary University of London, UK.
- [104] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [105] 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>
- [106] Cao, R., Bolton, J. S., & Black, M. (2018). Force transmission characteristics for a loaded structural-acoustic tire model. *SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems*, 11(4), 299-315. <https://doi.org/10.4271/06-11-04-0025>
- [107] Suphadon, N. (2010). The viscoelastic properties of rubber under a complex loading. PhD Thesis, Queen Mary University of London, UK.
- [108] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.
- [109] Roche, N., Ichchou, M. N., Salvia, M., & Chettah, A. (2011). Dynamic damping properties of thermoplastic elastomers based on EVA and recycled ground tire rubber. *Journal of Elastomers and Plastics*, 43(4), 317-340. <https://doi.org/10.1177/0095244311398631>
- [110] Maghami, S. (2016). Silica-filled tire tread compounds: An investigation into the viscoelastic properties of the rubber compounds and their relation to tire performance. PhD Thesis, University of Twente, Netherlands.

- [111] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [112] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [113] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results from a case study. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athens, Greece.
- [114] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [115] Descornet, G. (2000). Vehicle noise emission on wet road surfaces. Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering, Nice, France.
- [116] International Organization for Standardization. (2017). ISO 11819-2:2017 - Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 2: The close-proximity method. Geneva, Switzerland: ISO.
- [117] International Organization for Standardization. (1997). ISO 13473-1:1997 - Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of mean profile depth. Geneva, Switzerland: ISO.
- [118] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [119] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [120] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>

- [121] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [122] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [123] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [124] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [125] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [126] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>
- [127] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [128] Chen, W., Zheng, M., & Wang, H. (2021). Evaluating the tire/pavement noise and surface texture of low-noise micro-surface using 3D digital image technology. *Frontiers in Materials*, 8, 683947. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.683947>
- [129] Sandberg, U., & Descornet, G. (1980). Road surface influence on tire/road noise. Transportation Research Board Special Report, 78-59.
- [130] Iwase, T., & Kawabata, R. (1999). Measurements of basic acoustical properties of the porous pavement and their applications to the estimation of road traffic

- noise reduction. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 20(1), 63-74.
<https://doi.org/10.1250/ast.20.63>
- [131] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results from a case study. *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*, Athens, Greece.
- [132] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>
- [133] Iwase, T., & Kawabata, R. (1999). Measurements of basic acoustical properties of the porous pavement and their applications to the estimation of road traffic noise reduction. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 20(1), 63-74.
<https://doi.org/10.1250/ast.20.63>
- [134] Ghofrani, M., Ashori, A., Rezvani, M. H., & Ghamsari, F. A. (2016). Acoustical properties of plywood/waste tire rubber composite panels. *Measurement*, 91, 448-453. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.082>
- [135] Biligiri, K. P., Kalman, B., & Samuelsson, A. (2013). Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(1), 12-23.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2011.608798>
- [136] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [137] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results from a case study. *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*, Athens, Greece.
- [138] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results

- from a case study. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athens, Greece.
- [139] Descornet, G. (2000). Vehicle noise emission on wet road surfaces. Proceedings of the 29th International Congress on Noise Control Engineering, Nice, France.
- [140] Gardziejczyk, W. (2007). Comparison of vehicle noise on dry and wet road surfaces. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 9, 87-98.
- [141] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [142] Vieira, T., Lundberg, J., Genell, A., Sandberg, U., & Karlsson, R. (2019). Porous pavement for reduced tyre/road noise and improved air quality: Initial results from a case study. Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athens, Greece.
- [143] Freitas, E., Pereira, P., de Picado-Santos, L., & Santos, A. (2009). Traffic noise changes due to water on porous and dense asphalt surfaces. *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 587-607.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690215>
- [144] Siebert, D. (2017). How wear affects road surface texture and its impact on tire/road noise. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.