

## 第四章 輪胎噪音量測方法 Tire Noise Measurement Methods

### 摘要 (Abstract)

輪胎噪音量測方法是連結基礎聲學理論、輪胎工程設計與交通噪音法規執行之關鍵技術核心。隨著道路交通噪音管制日益嚴格，以及車輛動力系統逐步電動化，輪胎噪音在整體車輛噪音中所佔比重持續提升，使得具備高重現性、可比較性與代表性的量測方法成為輪胎研發與政策治理不可或缺的基礎。本章系統性回顧輪胎噪音量測方法自 1970 年代以來的發展脈絡，說明其如何由簡單噪音值量測，演進至結合多通道資料擷取、頻譜分析、聲源定位與量測不確定性評估的高度專業化聲學量測體系。

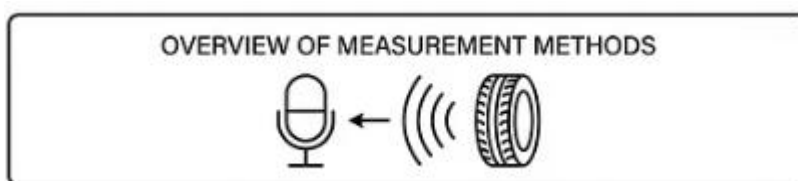
本章首先從量測環境與量測距離兩個核心面向，將輪胎噪音量測方法區分為戶外實車測試與室內實驗室測試，以及遠場量測與近場量測。透過噪音量測 (pass-by noise measurement) 作為國際法規遵循與型式認證的基礎方法，能夠直接反映車輛對道路周邊環境的噪音影響；而近場量測方法，如 CPX 與 OBSI，則更能針對輪胎與路面本質聲學特性進行解析，廣泛應用於輪胎研發與道路鋪面聲學性能評估。章節中亦詳細說明 ISO 362、ISO 11819、ISO 10844 及 UNECE 相關法規與標準之技術內涵，闡述其在測試程序、場地條件、儀器規格與數據處理上的一致性與差異性。

進一步地，本章深入探討量測系統架構、校準程序、環境條件控制與數據分析方法，說明量測不確定性來源及其對結果判定之影響。透過頻譜分析、時頻分析與心理聲學指標的輔助應用，輪胎噪音量測已不再僅限於單一噪音值評定，而是逐步發展為能夠支持噪音機制診斷、降噪設計優化與跨方法比對的整合性技術平台。



輪胎噪音量測方法的發展與演進反映了聲學測量技術與汽車工業標準化進程的密切關係。從最早期的簡單噪音值量測,到現今結合多通道數據擷取、先進信號處理技術以及精密聲源定位系統的綜合測量平台,輪胎噪音量測方法已經發展成為一門高度專業化的聲學測量學科。這些量測方法不僅是車輛噪音法規遵循(regulatory compliance)的基礎,更是輪胎設計優化、路面聲學特性評估以及噪音控制策略開發的關鍵工具。根據 Sandberg 與 Ejsmont (1986)在其開創性研究所述,輪胎噪音量測方法的發展始於 1970 年代,當時主要動機是建立可重複且具有實際意義的量測程序,以支持日益嚴格的車輛噪音法規[1]。

當代輪胎噪音量測方法可依據多種分類標準進行系統性區分。首先,從量測



環境角度,可分為戶外實車測試(outdoor vehicle testing)與室內實驗室測試(indoor laboratory testing)。戶外測試包括透過噪音量測(pass-by noise measurement)、滾動噪音量測(coast-by noise measurement)以及近場噪音量測(close proximity measurement),這些方法能夠在真實道路條件下捕捉輪胎與路面交互作用產生的噪音特徵。室內測試則以滾筒設施(drum facility)為主,提供高度可控的實驗環境,便於系統性研究輪胎設計參數對噪音生成的影響。其次,從量測距離觀點,可區分為遠場量測(far-field measurement)與近場量測(near-field measurement)。遠場量測如 ISO 362 標準規定的 7.5 公尺距離量測,主要反映輪胎噪音對周遭環境的影響;近場量測如 CPX 方法與 OBSI 方法,則著重於輪胎與路面接觸區域附近的聲場特性,更直接地評估輪胎或路面的本質聲學性能(Braun et al., 2013)[2]。

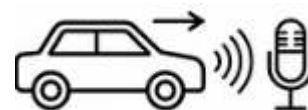
從量測目的與應用領域來看,輪胎噪音量測方法服務於不同的技術需求。法規遵循測試(regulatory compliance testing)如 UNECE R117 與 ISO 362-1,要求嚴格遵循標準化程序,以確保不同實驗室間量測結果的可比較性與一致性。研發測試(research and development testing)則更注重揭示噪音生成機制、識別主要聲源以及評估降噪措施的效果,因此常採用更先進的量測技術,如聲強量測(sound intensity measurement)、聲學全息(acoustic holography)以及波束成形技術(beamforming technology)(Li, 2019)[3]。品質控制測試(quality control testing)則強調量測效率與經濟性,通常採用簡化的測試程序,但仍需維持足夠的量測精度以確保產品一致性。

量測方法的選擇涉及多重考量因素的權衡。量測精度(measurement accuracy)與重現性(repeatability)是首要考量,直接影響量測結果的可信度與應用價值。實務上,不同量測方法的精度差異可達數個分貝,這對於需要精確評估降噪措施效果的研發工作至關重要。量測成本(measurement cost)包括設備投資、場地建設以及人力時間成本,是影響量測方法普及程度的重要因素。例如,建設符合 ISO 10844 標準的戶外測試道需要龐大投資,而室內滾筒測試雖設備成本較高,但可提供全天候測試能力並減少環境因素干擾(Clar-Garcia et al., 2016)[4]。量測效率(measurement efficiency)關係到測試週期與產能,在輪胎開發過程中,快速取得量測結果對於縮短開發時程具有重要意義。量測結果的代表性(representativeness)則涉及量測條件與實際使用情境的相關性,這是量測方法實用價值的根本。

當代輪胎噪音量測技術面臨諸多挑戰。首先是量測不確定性(measurement uncertainty)的量化與控制,這涉及儀器校準、環境條件變異、測試程序執行以及數據處理等各環節的誤差傳播。Berge 與 Gerhard (2023)的研究指出,即使在嚴格控制的實驗室條件下,輪胎噪音量測的總不確定度仍可達到 0.5 至 1.0 dB(A),這對於法規限值的判定具有顯著影響[5]。其次是量測方法標準化與協調的問題,不同國家與地區採用不同的測試標準與程序,造成量測結果比較的困難。國際標準組織如 ISO、IEC 以及 UNECE 持續推動量測方法的國際協調,但仍存在技術細節上的差異。第三個挑戰是新興量測技術的驗證與應用,如基於麥克風陣列的聲源定位技術、移動參考座標系聲學全息(moving frame acoustic holography)等先進方法,雖展現出優異的空間分辨能力,但其量測結果與傳統方法的關聯性、量測不確定性評估以及標準化程序的建立仍在發展中。

#### 4.1 量測方法概述 (Overview of Measurement Methods)

輪胎噪音量測方法的系統性分類與理解是進行噪音評估與控制的基礎。從歷史發展脈絡來看,輪胎噪音量測方法的演進經歷了從簡單到複雜、從單一參數到多維度特徵描述的發展過程。1970 年代初期,輪胎噪音量測主要依賴簡單的噪音值量測,量測儀器通常為手持式噪音計(sound level meter),量測位置與程序缺乏標準化規範,導致不同實驗室或不同時期的量測結果難以比較。隨著車輛噪音法規的建立,特別是 ISO 362 標準於 1981 年首次發布,標準化的透過噪音量測方法逐漸成為主流。1980 年代中期,Sandberg 與 Ejsmont 等研究者系統性開發了滾動噪音量測方法(coast-by method)、拖車式近場噪音量測方法(trailer-based CPX method)以及



室內滾筒測試方法(indoor drum test method),為輪胎噪音量測建立了較為完整的方法體系[1]。

1990 年代是量測技術快速發展的時期,聲強探頭(sound intensity probe)的應用使得聲能流動方向與強度的量測成為可能,這對於識別主要噪音源與評估噪音傳播路徑具有重要意義。同時期,多通道數據擷取系統與數位信號處理技術的進步,使得頻譜分析、時頻分析(time-frequency analysis)等先進分析方法得以廣泛應用於輪胎噪音研究。進入 21 世紀,聲學量測技術經歷了革命性變革,大規模麥克風陣列(microphone array)與先進信號處理算法的結合,使得聲源可視化(sound source visualization)與精確定位成為現實。波束成形技術(beamforming technology)、近場聲學全息(nearfield acoustic holography, NAH)以及等效源法(equivalent source method)等先進技術,不僅能夠識別主要噪音源的空間位置,更能定量評估各聲源的貢獻度,為噪音控制提供了精確的診斷工具(Hald et al., 2003)[6]。

從量測環境的角度,輪胎噪音量測方法可分為戶外測試與室內測試兩大類別,各自具有獨特的優勢與限制。戶外測試的主要優勢在於能夠在真實道路條件

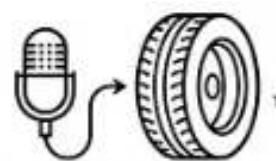


下進行量測,輪胎與實際路面的交互作用得以完整呈現,量測結果具有較高的生態效度(ecological validity)。然而,戶外測試面臨諸多挑戰。首先是環境條件的變異性,氣溫、濕度、風速、路面溫度等環境參數都會影響輪胎噪音的生成與傳播。研究顯示,氣溫每變化 10°C,輪胎噪音可能變化 0.3 至 0.5 dB(A),這對於法規遵循測試的判定具有重要影響(Berge et al., 2025)[7]。其次是背景噪音(background noise)的干擾,即使在專用測試場地,來自周遭環境的噪音(如風噪、遠處交通噪音等)仍可能影響量測結果,特別是在低速或低噪音輪胎的測試中。第三是測試道路面條件的維護與控制,路面紋理(surface texture)的細微變化會顯著影響輪胎噪音,因此需要定期監測與維護測試道路面狀況。

室內測試主要依賴滾筒設施,將輪胎安裝於大型鋼製或混凝土滾筒表面進行測試。室內測試的主要優勢包括:環境條件可控,溫度、濕度等參數可精確調控;不受天候影響,可全天候進行測試;測試效率高,可快速更換輪胎樣品並進行重複量測;便於實施先進的量測技術,如多點振動量測、近距離聲學量測等。然而,室內滾筒測試也存在顯著局限性。最關鍵的問題是滾筒曲率效應(drum curvature effect),輪胎在曲面滾筒上的變形模式與在平坦路面上不同,導致接觸區域特性與噪音生成機制的差異。研究表明,滾筒直徑對量測結果有顯著影響,直徑越小,曲率效應越明顯。

一般而言,滾筒直徑需要至少為輪胎外徑的三倍以上,才能使曲率效應降至可接受程度(Ejsmont, 1982)[8]。其次是滾筒表面與實際路面的差異,鋼製滾筒表面的聲學阻抗(acoustic impedance)、粗糙度特性與實際瀝青或混凝土路面存在本質差異,影響噪音生成機制。為了改善這一問題,有些先進滾筒設施會在滾筒表面鋪設真實路面材料,或採用表面紋理加工技術來模擬路面特性。

從量測距離與聲場特性的角度,量測方法可區分為遠場量測與近場量測。遠場量測是指在距離聲源足夠遠的位置進行量測,此時聲波已充分傳播並趨於平面波特性和,量測結果主要反映總體噪音輻射特性與對周遭環境的影響。ISO 362 標準規定的 7.5 公尺距離量測即屬於遠場量測,這一距離的選擇基於多重考量:首先,需足夠遠以使得車輛可視為點聲源或線聲源,簡化聲學分析;其次,需代表實際交通環境中行人或路側居民所經歷的噪音暴露情境;第三,需確保量測位置在自由聲場(free field)範圍內,避免近場效應與駐波干擾。遠場量測的主要優勢在於量測程序相對簡單,所需設備標準化,量測結果具有明確的環境噪音評估意義。然而,遠場量測也存在局限性:首先,無法有效區分不同噪音源(如動力系統噪音與輪胎噪音)的貢獻;其次,對輪胎或路面本質聲學性能的評估不夠精確,因為量測結果受到車輛其他噪音源、聲波傳播路徑特性等多重因素影響。



近場量測是指在緊鄰聲源的位置進行量測,典型距離為數十公分以內,此時量測結果主要反映聲源本身的聲學特性,較不受傳播路徑與環境因素影響。近場量測方法主要包括 CPX 方法(close-proximity method)與 OBSI 方法(on-board sound intensity method)。CPX 方法將麥克風安裝在輪胎附近的固定位置,通常距離輪胎接觸區域 20 至 30 公分,並以聲學遮蔽罩(acoustic enclosure)隔絕外部噪音干擾,量測輪胎在標準參考路面上滾動時產生的噪音值。ISO 11819-2 標準詳細規範了 CPX 方法的實施程序,包括麥克風位置、測試輪胎規格、測試速度、路面狀態等技術細節[9]。CPX 方法的主要優勢在於能夠精確評估路面聲學特性,排除車輛其他噪音源的干擾,適用於路面噪音性能評估與路面聲學特性監測。OBSI 方法則使用聲強探頭(sound intensity probe)進行量測,探頭位置更接近輪胎接觸區域,通常在 10 至 15 公分範圍內,量測聲強級(sound intensity level)而非噪音值。聲強量測的優勢在於能夠有效抑制反射聲與背景噪音的干擾,因為聲強量測本質上是方向性量測,僅對特定方向的聲能流動響應。

從量測參數的角度,輪胎噪音量測可獲得多種聲學指標。最基本的參數是 A 加權噪音值(A-weighted sound pressure level, LA),這是國際法規與標準普遍採用的評估指標,其加權特性模擬了人耳對不同頻率聲音的感知靈敏度。對於透過噪音量測,通常量測最大 A 加權噪音值(LAmax);對於近場量測,則常採用等效連續噪音值(equivalent continuous sound pressure level, LAeq)或時間平均噪音值。除了總體噪音級,頻譜分析(spectral analysis)是理解噪音特性的重要工具,通常採用 1/3 倍頻程頻譜(one-third octave band spectrum)或更精細的窄頻譜分析。輪胎噪音頻譜通常在 500 Hz 至 5000 Hz 範圍內具有主要能量,不同頻率成分反映了不同的噪音生成機制。低頻噪音(500-800 Hz)主要與輪胎振動模態有關,中頻噪音(800-2000 Hz)與胎紋衝擊(tread impact)和空氣泵浦(air pumping)機制相關,高頻噪音(2000-5000 Hz)則主要源於黏滑現象(stick-slip)與表面粗糙度交互作用(Li, 2018)[10]。

時域分析(time domain analysis)能夠揭示噪音的時間變化特性,對於理解噪音生成的動態過程具有重要意義。透過噪音量測中,時間歷程曲線(time history)顯示噪音值隨車輛透過的變化過程,峰值出現的時刻與位置可用於驗證量測程序的正确性。對於胎紋噪音,時域信號常呈現週期性特徵,其基頻對應於胎紋節距(tread pitch)與車速的乘積。時頻分析技術如短時傅立葉變換(short-time Fourier transform)、小波變換(wavelet transform)等,能夠同時提供時間與頻率維度的信息,揭示噪音頻譜隨時間的演變,這對於識別瞬態噪音事件與分析非穩態過程特別有用。聲品質(sound quality)參數如響度(loudness)、尖銳度(sharpness)、粗糙度(roughness)等心理聲學指標,則從人類感知角度評估噪音的煩擾程度,這些參數在輪胎噪音的主觀評估與產品開發中越來越受到重視。

量測系統的組成與技術規格是確保量測質量的基礎。典型的輪胎噪音量測系統包括以下主要組件:測量麥克風(measurement microphone)是將聲壓轉換為電信號的感測器,需具備寬頻響應、低本底噪音、高動態範圍等特性。法規測試通常要求使用符合 IEC 61672 標準的一級(Class 1)或二級(Class 2)精度麥克風,頻率響應範圍至少涵蓋 20 Hz 至 20 kHz。前置放大器(preamplifier)緊密連接於麥克風,提供阻抗匹配與初級信號放大,需具備低噪音、高穩定性特性。數據擷取系統(data acquisition system)負責將類比信號轉換為數位信號並進行儲存與初步處理,需具備足夠的取樣率(通常至少 48 kHz)、動態範圍(至少 80 dB)以及多通道同步擷取能力。

儀器校準(calibration)是確保量測準確性的關鍵環節。麥克風系統需要定期進行靈敏度校準,通常使用聲學校準器(acoustic calibrator)在標準頻率(如 1 kHz)產生已知噪音值(通常為 94 dB 或 114 dB),校準麥克風的絕對靈敏度。在每次量測前後都應進行現場校準,以確認系統狀態。對於精密應用,還需要進行頻率響應校準,在寬頻範圍內確定麥克風的頻率相關靈敏度。實驗室環境的聲學校準也很重要,對於半無響室(semi-anechoic chamber)或測試道,需要定期進行聲學性能驗證,確認背景噪音級、混響特性、自由場條件等符合標準要求。氣象儀器如溫度計、濕度計、風速計等也需要定期校準,以確保環境參數量測的準確性。

數據處理與分析程序對於從原始量測數據中提取有意義的信息至關重要。訊號前處理(signal preprocessing)包括消除異常值、濾波、去趨勢等步驟,以提高數據質量。頻率加權處理(frequency weighting)是將原始線性頻譜轉換為 A 加權、C 加權等加權頻譜,模擬人耳感知特性。統計分析(statistical analysis)包括計算平均值、標準差、信賴區間等統計量,評估量測結果的變異性與不確定性。對於法規測試,通常需要進行多次重複量測,並對結果進行統計處理以提高可靠度。ISO 362 標準要求至少進行兩次獨立量測,若兩次結果差異在規定範圍內(通常為 1 dB),則取其算術平均作為最終結果;若差異超過限值,則需進行額外量測並重新評估。

量測不確定性(measurement uncertainty)的評估是現代量測學的重要內容,對於法規遵循判定與量測結果的信賴度評估具有關鍵意義。量測不確定性來源眾多,包括儀器不確定性(instrument uncertainty)、環境變異性(environmental variability)、測試程序執行差異(procedural variability)、數據處理誤差(data processing error)等。根據 ISO 測量不確定度表示指南(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM),不確定性應透過系統性分析各不確定性分量並進行合成來評估。Przysucha 等人(2015)的研究系統分析了噪音量測的不確定性來源與評估方法,指出即使在良好控制的條件下,綜合不確定度(combined uncertainty)仍可達到 0.5 至 1.5 dB[11]。這一不確定度水平對於法規限值判定具有顯著影響,特別是當量測結果接近限值時,需要考慮不確定性以做出合理的符合性判定。



量測方法的驗證與比較是確保量測質量與促進方法改進的重要工作。國際比對實驗(international comparison exercise)透過讓不同實驗室採用相同方法量測相同樣

品,評估量測結果的一致性與可比較性,識別系統性偏差與異常。ISO 與 UNECE 等國際組織定期組織比對實驗,以驗證標準方法的可行性並促進實驗室能力提升。方法間比較研究(inter-method comparison study)則探討不同量測方法之間的相關性與可轉換性,例如 CPX 方法與透過噪音方法的相關性、滾筒測試與實車測試的一致性。這類研究對於發展替代測試方法、建立量測結果轉換關係具有重要價值。Swieczko-Zurek 等人(2014)的研究比較了道路量測與不同滾筒設施的量測結果,發現雖然存在系統性差異,但透過適當的修正因子可以建立合理的對應關係 [12]。

## 4.2 透過噪音量測 (Pass-by Noise Measurement)

透過噪音量測是評估車輛整體噪音排放最重要且應用最廣泛的方法,其測試情境模擬



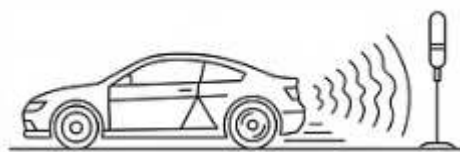
車輛在典型城市交通條件下透過固定觀測點時產生的噪音,因此量測結果能夠直接反映車輛對道路沿線環境與居民的噪音影響。透過噪音量測方法的發展與車輛噪音法規的演進密切相關,自 1960 年代末期歐洲與北美開始實施車輛噪音限值管制以來,標準化的透過噪音量測方法就成為車輛型式認證(vehicle type approval)的強制性測試項目。國際標準化組織於 1981 年發布 ISO 362 標準,首次建立了國際統一的透過噪音量測程序,此後該標準經歷多次修訂,最新版本包括 ISO 362-1:2015 針對戶外測試道量測、ISO 362-2:2009 針對工程方法以及 ISO 362-3:2022 針對室內半無響室量測的規範。聯合國歐洲經濟委員會(UNECE)制定的 R51 法規則是歐洲車輛噪音法規的基礎,與 ISO 362 標準技術內容高度協調,但在具體實施細節與限值要求上有所差異。

透過噪音量測方法的基本原理是在車輛加速透過測試區域時,於道路兩側固定位置量測最大 A 加權噪音值。測試情境的設計基於統計分析顯示,城市交通噪音主要來自於車輛加速過程,此時動力系統處於較高負荷狀態,動力系統噪音(powertrain noise)與輪胎噪音(tire noise)同時達到較高水平。量測位置的選擇則考慮了代表性與實務可行性,7.5 公尺的距離既能涵蓋整車噪音輻射特性,又便於現場實施。透過噪音量測所得的最大噪音值不僅用於法規遵循判定,也是車輛噪音性能評估、不同車型噪音比較以及噪音控制效果驗證的重要指標。Braun 等人(2013)對 ISO 362 測試中的噪音源特性進行了系統性文獻回顧,指出在加速測試條

件下,動力系統噪音(包括引擎、進氣系統、排氣系統)與輪胎/道路系統噪音對總體透過噪音級的貢獻度隨車輛類型、速度範圍以及加速強度而變化,對於 M1 類乘用車,在低速(如 50 km/h 以下)加速時,動力系統噪音通常占主導地位;而在高速(70 km/h 以上)或低加速度條件下,輪胎噪音的貢獻逐漸增加[2]。

透過噪音量測的實施涉及多個關鍵要素的精確控制。測試場地(test site)是首要考量,需要符合嚴格的聲學與幾何要求。測試道表面需符合 ISO 10844 標準規範,該標準詳細規定了測試道的表面紋理特性、聲學吸收特性以及機械強度要求。表面紋理以平均紋理深度(mean profile depth, MPD)表示,ISO 10844:2021 版本要求 MPD 在 0.2 至 1.0 mm 範圍內,以確保測試道具有代表性的聲學特性而不至於過於光滑或粗糙(ISO 10844, 2021)[13]。測試道周遭需為開闊空間,在測試區域周圍 50 公尺範圍內不得有大型反射物如建築物、圍牆等,以確保自由場條件。路面需平坦且坡度不超過 $\pm 1\%$ ,以避免車輛加速性能與噪音輻射的異常。測試區域長度至少為 20 公尺,中央 10 公尺為主要量測區域,兩端各 5 公尺為加速與減速緩衝區。

麥克風配置(microphone setup)需嚴格遵循標準規範。標準配置為道路兩側各設置一支麥克風,距離車道中心線 7.5 公尺,高度 1.2 公尺,麥克風軸向指向車道中心線並略微向上



傾斜。這一配置的設計考量包括:7.5 公尺距離足以使車輛可近似為等效聲源,簡化聲學分析;1.2 公尺高度代表站立成人耳朵的典型高度,具有明確的環境噪音評估意義;兩側同時量測可以檢測車輛左右噪音排放的對稱性,提高量測可靠性。麥克風需使用符合 IEC 61672-1 標準的一級精度測量麥克風,頻率響應範圍至少 20 Hz 至 10 kHz,動態範圍足以涵蓋車輛噪音級範圍(通常 60 至 90 dB(A))。麥克風需配備防風罩(windscreen),以減少風噪干擾,但防風罩的聲學透明度需經過驗證,確保對量測結果的影響在可接受範圍內(通常要求在感興趣頻率範圍內插入損失小於 0.5 dB)。

環境條件(environmental conditions)的控制與監測是確保量測有效性的重要環節。ISO 362 標準對環境條件設定了明確的限值要求。氣溫需在 5°C 至 40°C 範圍內,這一範圍涵蓋了大多數地區的正常工作溫度,避免極端溫度對輪胎性能與動力系統運作的異常影響。路面溫度也需記錄,因為路面溫度直接影響輪胎與路面的交互作用。相對濕度需在 20%至 95%範圍內,極端乾燥或高濕條件都可能影響聲波傳播特性。風速是最關鍵的環境參數之一,因為風不僅直接產生麥克風噪音干擾,

還會影響聲波傳播路徑。ISO 362 要求量測時風速不超過 5 m/s,這是基於研究顯示風速超過此值時,風噪與聲波折射效應會顯著影響量測結果。風向也需記錄,橫風對兩側麥克風的影響不對稱,可能導致左右量測值的系統性差異。大氣壓力需在標準大氣壓的 $\pm 10\%$ 範圍內,極端氣壓條件會影響引擎性能與聲速。背景噪音級需至少低於車輛透過噪音級 10 dB(A),以確保背景噪音的干擾可忽略。

車輛準備與測試條件(vehicle preparation and test conditions)是影響量測結果重現性的關鍵因素。車輛需處於正常使用狀態,輪胎氣壓、車輛載重、引擎溫度等參數需符合製造商規範或標準規定。輪胎是最重要的因素之一,需確保輪胎為標準配置型號,胎紋深度在合理範圍內(通常要求至少 50%的新胎紋深度),輪胎氣壓按照製造商建議值設定並在測試前進行檢查。輪胎需經過適當的預熱(run-in)程序,通常要求以測試速度行駛至少 30 分鐘,以確保輪胎達到穩定的工作溫度與性能狀態。車輛載重按照標準規定,通常為駕駛員加上規定的壓艙物(ballast),M1 類乘用車通常為駕駛員加上 75 kg 或 150 kg 壓艙物,具體取決於車輛類型與測試方法。引擎需達到正常工作溫度,冷卻液溫度、機油溫度等參數需在製造商規定的正常範圍內。車輛電氣附件如空調、音響等需關閉,以避免這些系統對動力輸出與噪音排放的影響。

#### 4.2.1 ISO 362 標準 (ISO 362 Standard)

ISO 362 標準是國際公認的車輛透過噪音量測標準,其發展歷程反映了車輛噪音管制需求的演變與量測技術的進步。ISO 362 標準於 1981 年首次發布,當時為 ISO 362:1981 版本,建立了基本的透過噪音量測框架,包括測試場地要求、麥克風配置、車輛運行條件以及數據處理程序。此版本的測試方法基於全油門加速(wide-open throttle acceleration),車輛以最大動力輸出加速透過測試區域,量測最大噪音值。這一方法的優點是操作簡單,測試條件易於重現,但其代表性受到質疑,因為實際城市交通中車輛很少在全油門狀態下行駛,因此測試結果可能高估車輛在正常使用條件下的噪音排放。

隨著對車輛噪音特性理解的深化與法規要求的提升,ISO 362 經歷了多次重大修訂。1998 年發布的 ISO 362:1998 版本引入了固定引擎轉速方法(constant

engine speed method),要求車輛以固定的引擎轉速(通常為最大功率轉速的 75%)透過測試區域,這一方法更接近實際駕駛條件,但實施較為複雜,需要駕駛員精確控制引擎轉速。2007 年發布的 ISO 362-1:2007 版本代表了標準體系的重大變革,ISO



362 被拆分為多個部分:ISO 362-1 針對工程方法(engineering method),ISO 362-2 針對勘測方法(survey method)。工程方法適用於型式認證與研發測試,要求嚴格的測試條件控制;勘查方法適用於在用車輛的抽樣檢查,程序相對簡化。更重要的是,ISO 362-1:2007 引入了部分動力測試(partial power test, PPT)程序,這是基於大量統計研究顯示,在現代交通條件下,車輛加速過程通常使用部分動力而非全油門,因此部分動力測試更能代表實際噪音排放情境。

ISO 362-1:2015 版本是目前廣泛實施的版本,進一步完善了部分動力測試程序並提升了量測精度要求。該版本的核心特點包括:首先,測試方法分為兩類,適用於不同車輛類型。

ISO 362 Standard



第一類為加速測試(acceleration test),適用於動力/質量比(power to mass ratio, PMR)較高的車輛,測試時車輛從預定的參考速度  $V_{ref}$ (根據車輛動力性能計算得出)開始加速,使用部分油門(通常為預定的加速度目標值,如  $2.0 \text{ m/s}^2$ ),透過測試區域時量測最大噪音值。第二類為恆速測試(constant speed test),適用於 PMR 較低的車輛,車輛以恆定速度(通常為  $50 \text{ km/h}$ )透過測試區域,使用穩定的引擎負荷,量測噪音值。這種分類測試方法的設計基於研究顯示,不同動力特性的車輛在實際使用中的加速行為存在顯著差異,採用統一的測試方法會導致對低動力車輛的評估偏嚴或對高動力車輛的評估偏寬。

ISO 362-1:2015 版本對測試道路面的要求更加嚴格,明確引用 ISO 10844:2014 標準,規定測試道表面的聲學特性需透過標準參考輪胎(standard reference tire, SRTT)的滾動噪音量測進行驗證。測試道需定期進行聲學驗證測試,使用 SRTT 在規定速度(通常為  $80 \text{ km/h}$ )滾動透過,量測噪音值,確保路面聲學性能在允許範圍內。這一要求的引入顯著提升了不同測試場地間量測結果的可比較性。Sohaney 等人(2012)的研究詳細分析了新版 ISO 10844 標準對測試道聲學性能控制的改進,指出新標準透過更精確的表面紋理規範與聲學驗證程序,能夠將測試道間的聲學變異性從早期版本的 $\pm 2 \text{ dB}$ 降低至 $\pm 0.5 \text{ dB}$ [14]。

ISO 362-1:2015 版本也完善了量測不確定性的處理。標準要求每次認證測試需進行至少兩次獨立量測,左右兩側麥克風的量測值都需記錄。最終結果的計算遵循以下規則:對於每次測試,取左右兩側麥克風量測值的算術平均;對於多次測試,取各次測試平均值的算術平均作為最終結果。若任意兩次測試的平均值差異超過  $1.0 \text{ dB(A)}$ ,則認為測試條件可能存在異常,需進行額外測試並檢查測試條件。這一程序設計旨在透過重複量測降低隨機誤差的影響,提高量測結果的可靠性。標準

也規定了量測結果的修正程序,如溫度修正、背景噪音修正等,以進一步提高量測準確性。

ISO 362-2:2009 版本規範了勘查方法,這是針對在用車輛噪音檢查的簡化測試方法。勘查方法與工程方法的主要差異在於:測試場地要求相對寬鬆,可使用一般道路而不必是專用測試道,但仍需滿足基本的聲學條件如足夠的開闊空間、低背景噪音等;車輛準備程序簡化,不要求嚴格的預熱與載重控制,但需確保車輛處於正常使用狀態;量測程序簡化,可只使用單側麥克風,測試次數可減少。勘查方法適用於執法機構對在用車輛的路邊檢查,或對車輛噪音性能進行快速篩選,其量測精度雖不及工程方法,但對於識別明顯超標車輛或進行統計性噪音調查仍然有效。

ISO 362-3:2022 版本是最新制定的標準,規範了使用半無響室(semi-anechoic chamber)進行車輛透過噪音量測的室內測試方法。這一標準的制定反映了汽車工業對於室內測試能力的需求,室內測試不受天候影響,可全年進行;環境條件高度可控,有利於提高量測重現性;便於實施先進量測技術如多點同步量測、聲源識別等。然而,室內測試也面臨挑戰,最關鍵的是如何確保室內測試結果與戶外測試的等效性。ISO 362-3 透過詳細規範半無響室的聲學性能要求、底板動態特性(模擬實際路面)、麥克風配置等,力求使室內測試結果與 ISO 362-1 戶外測試結果具有良好的相關性。UNECE 的研究項目驗證了 ISO 362-3 方法與傳統戶外方法的等效性,結果顯示在適當校準與修正後,兩種方法的測量結果差異可控制在 1.0 dB 以內[15]。

ISO 362 標準與 UNECE R51 法規的關係值得特別說明。R51 法規是歐盟車輛噪音型式認證的法定要求,其技術內容在很大

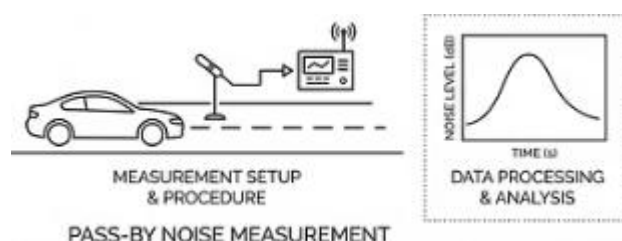


程度上參考 ISO 362 標準,但並非完全相同。R51 法規通常會參考特定版本的 ISO 362 標準,但可能在某些技術細節上有所調整以適應法規執行需求。例如,R51-03 版本(2016 年生效)參考了 ISO 362-1:2015,但在噪音限值、測試車輛分類等方面有法規自身的規定。這種安排既保持了技術方法的國際協調,又保留了法規制定的靈活性。Miloradović 等人(2017)系統分析了全球主要車輛噪音法規的發展趨勢,指出雖然不同法規體系(如 UNECE、美國 FMVSS、日本、中國等)在具體要求上存在差異,但都在逐步向基於 ISO 362 的國際協調方法靠攏,這有利於促進國際貿易並減少重複測試的負擔[16]。

ISO 362 標準的未來發展方向包括幾個重要方面。首先是進一步提升測試代表性,使測試條件更接近實際城市交通情境。目前的測試方法雖已考慮部分動力條件,但仍存在簡化,如未充分考慮不同駕駛風格、道路坡度、交通流條件等因素的影響。其次是擴展測試方法以涵蓋新興車輛技術,如電動車輛(electric vehicles)、混合動力車輛(hybrid vehicles)的噪音特性與傳統內燃機車較顯著不同,現有測試方法可能需要調整。特別是低速電動車輛噪音較低,輪胎噪音成為主導噪音源,如何在透過噪音測試中更準確地評估輪胎噪音貢獻是一個重要課題。第三是加強與其他噪音評估方法的協調,如近場噪音量測方法(CPX/OBSI)、室內滾筒測試方法等,建立不同方法間的轉換關係,使得不同方法的量測結果能夠相互補充與驗證。

#### 4.2.2 量測設置與程序 (Measurement Setup and Procedure)

透過噪音量測的實施是一個系統性工程,涉及測試場地準備、儀器設置、車輛準備、測試執行以及數據記錄等多個環節,每個環節都需要嚴格按照標準程序操



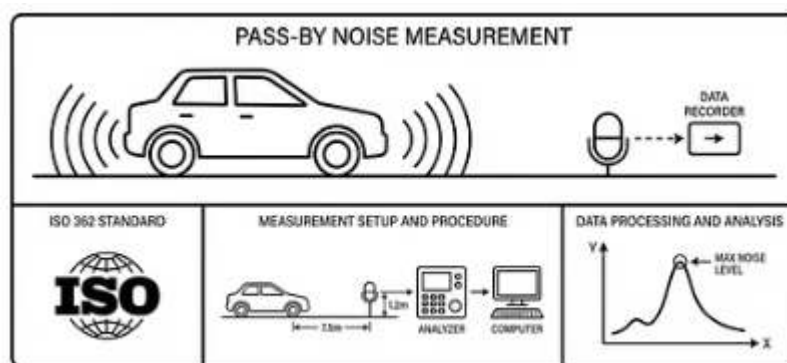
作以確保量測結果的有效性與可重現性。量測設置的第一步是測試場地的選擇與準備。理想的透過噪音測試場地應為專用測試道,路面符合 ISO 10844 標準,周遭環境開闊且背景噪音低。然而,建設與維護這樣的專用場地成本高昂,因此實務上許多測試機構需要在現有設施條件下進行適當的場地改造與優化。場地評估的首要任務是確認幾何條件,測量車道寬度、測試區域長度、周圍障礙物距離等參數,確保符合標準要求。標準要求測試車道寬度至少 3 公尺,中央測量線(measurement line, PP')應清楚標示,兩側麥克風位置點也應永久標記。

路面狀況檢查是場地準備的關鍵環節。首先進行目視檢查,確認路面無明顯損壞如裂縫、坑洞、鬆散骨材等,這些缺陷不僅影響車輛行駛平順性,更會產生異常的衝擊噪音。路面清潔度也很重要,灰塵、泥沙、積水等都會影響輪胎噪音特性,因此測試前應清掃路面並確保乾燥。路面紋理特性需透過定量方法評估,標準方法是測量平均紋理深度(MPD),這可透過鋪砂法(sand patch method)或非接觸式紋理掃描儀進行。鋪砂法是將已知體積的標準砂料鋪展於路面並測量覆蓋面積,從而計算平均紋理深度。ISO 10844:2021 要求 MPD 在 0.2 至 1.0 mm 範圍內,這一範圍代表了中等粗糙度的瀝青路面,既不會因過於光滑而產生異常低的噪音(不具代表性),也不會因過於粗糙而產生過高的噪音[13]。對於已建成的測試道,需要定期

(至少每年一次)進行紋理測量,監測路面磨耗與老化情況,必要時進行路面修復或重鋪。

路面聲學性能驗證是確保不同測試場地間量測結果可比較性的重要措施。ISO 10844 標準規定,測試道需使用標準參考輪胎(SRTT)進行滾動噪音量測驗證。SRTT 是專門為測試道驗證設計的特殊輪胎,其規格與性能經過嚴格控制,不同批次的 SRTT 噪音特性差異極小。驗證測試的程序是:將車輛裝配 SRTT,以 80 km/h 的恆定速度滾動透過測試道(引擎處於空檔或怠速,以排除動力系統噪音),在兩側 7.5 公尺位置量測透過噪音級。ISO 10844 規定,SRTT 滾動噪音級應在標準參考值的 $\pm 1.0$  dB 範圍內,若超出此範圍,表示路面聲學性能異常,需要調查原因並採取修正措施。這一驗證程序通常在測試道初次建成時、經過重大維修後以及定期檢查時進行。

麥克風系統的設置需要精確定位與可靠固定。麥克風位置按照標準規定,距車道中心線 7.5 公尺,高度 1.2 公尺,這些



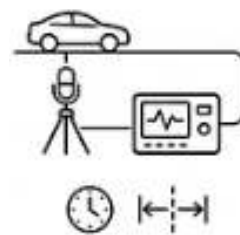
尺寸需要使用經校準的測量工具(如測距儀、水平儀等)精確設定,允許誤差通常為 $\pm 0.05$ 公尺。麥克風支架需牢固穩定,避免因風吹或地面振動而產生晃動,因為麥克風位置的微小變化都可能影響量測結果。麥克風朝向也有規定,通常要求麥克風軸向指向車道中心線且水平或略微向上傾斜(傾角約 0-15 度),這一朝向使得麥克風對來自車輛的直達聲最為敏感。麥克風需配備防風罩以減少風噪干擾,防風罩的選擇需考慮聲學透明度與防風效果的平衡。對於中等風速條件(風速 3-5 m/s),通常使用直徑約 90 mm 的球形泡沫防風罩;對於低風速條件(風速 $< 3$  m/s),可使用較小的防風罩或不使用防風罩。防風罩的聲學影響需要透過校準實驗量化,確保其對感興趣頻率範圍(特別是 1-4 kHz,這是輪胎噪音的主要頻段)的插入損失在可接受範圍內。

數據擷取系統的配置需要滿足多項技術要求。首先是取樣率,需要足夠高以準確捕捉聲壓信號的時域特徵。考慮到車輛透過噪音的頻率成分主要在 10 kHz 以下,根據奈奎斯特定理(Nyquist theorem),取樣率應至少為 20 kHz,實務上通常設定為 48 kHz 或 51.2 kHz(2 的整數次幕,便於 FFT 處理)。動態範圍需要涵蓋從背景噪音

級到最大車輛噪音級的整個範圍,通常至少需要 80 dB 的動態範圍,這要求數據擷取系統具有至少 16 位元的解析度。類比/數位轉換器(ADC)的線性度與失真特性也很重要,總諧波失真(total harmonic distortion, THD)應低於-80 dB 以避免引入測量誤差。時間同步功能對於雙通道或多通道量測特別重要,兩側麥克風的數據需要精確同步擷取,以便後續分析車輛透過過程的空間特徵。

儀器校準是每次測試前的必要程序。使用聲級校準器(acoustic calibrator)對麥克風系統進行現場校準,校準器產生已知頻率(通常為 1 kHz)與已知噪音值(通常為 94.0 dB 或 114.0 dB)的標準聲場,將麥克風放入校準器並記錄讀數,調整系統靈敏度使得讀數與校準器標稱值一致。校準應在測試前與測試後都進行,前後兩次校準讀數的差異應在 0.5 dB 以內,若超過此值,表示系統可能發生漂移或故障,該時段的量測數據可能無效。除了現場校準,麥克風系統還需要定期進行實驗室級別的完整校準,包括頻率響應校準、靈敏度溫度係數測定等,這通常由專業計量機構進行,校準週期通常為一年。

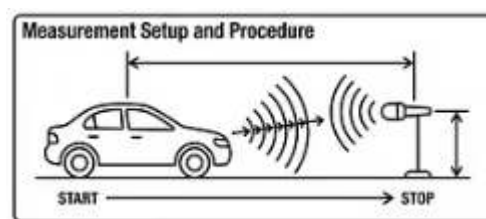
環境條件監測系統的設置包括氣象參數測量儀器的佈置。溫度計應設置在測試區域附近的陰涼處,避免陽光直射,高度約 1.5 公尺,代表空氣溫度。路面溫度計可以是接觸式溫度計或紅外線測溫儀,測量測試區域路面的表面溫度。濕度計與溫度計通常整合在氣象站中,測量相對濕度。風速風向儀是最重要的氣象儀器,需要設置在測試區域附近的開闊位置,高度約 1.2 至 1.5 公尺,避免局部地形對風場的干擾。風速風向數據應連續記錄,以監測測試期間風況的變化。大氣壓力計用於測量氣壓,這對於海拔較高的測試場地特別重要。現代氣象監測系統通常整合為自動氣象站,能夠連續記錄並顯示各項參數,有些系統還能自動判斷環境條件是否符合測試要求,並在條件超出限值時發出警告。



車輪準備程序是影響量測結果重現性的關鍵因素。車輛應提前到達測試場地,進行全面的狀態檢查。首先檢查輪胎,確認輪胎型號為車輛標準配置,檢查胎紋深度(應至少為新胎紋深度的 50%),檢查輪胎表面無異常磨損或損傷,測量並調整輪胎氣壓至製造商規定值(通常在測試前進行調整,測試完成後再次檢查以確認氣壓保持穩定)。輪胎預熱(warm-up)是必要程序,車輛需以測試速度範圍內的速度行駛至少 30 分鐘或 20 公里,以使輪胎達到穩定的工作溫度與性能狀態。研究顯示,冷胎與熱胎的噪音特性可相差 1-2 dB,因此預熱程序對於量測重現性至關重要。

車輛載重按照標準規定進行調整。對於 M1 類乘用車,通常要求駕駛員(或等效質量 75 kg)加上一名前座乘客位置的壓艙物(75 kg),或按照特定的載重百分比(如車輛最大允許總重的某個比例)。壓艙物應安全固定並合理分布,以模擬實際載人情況。車輛液體(燃油、機油、冷卻液等)應在正常範圍內,燃油量通常要求至少為油箱容量的 75%,以避免油箱晃動噪音並確保車輛質量接近正常使用狀態。引擎預熱也是必要程序,車輛需運行至引擎冷卻液溫度達到正常工作範圍(通常為 80-95°C),機油溫度也應穩定。現代車輛的引擎管理系統在冷機狀態下會調整運行參數(如加濃混合氣、提高怠速轉速等),這會影響噪音排放,因此必須確保引擎達到正常工作溫度。

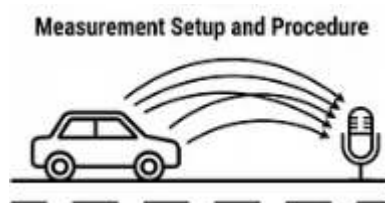
測試執程序需要駕駛員與測試人員的密切配合。測試前,應進行試運行(practice run)以讓駕駛員熟悉測試路線、加速點、目標速度等要求。正式測試時,車輛從測試區



域前方足夠距離(通常至少 50 公尺)處開始加速或建立恆定速度,確保進入測試區域時已達到規定的測試條件。對於加速測試,車輛需以規定的參考速度進入測試區域,然後以目標加速度(如  $2.0 \text{ m/s}^2$ )加速透過。駕駛員需要根據車速表與加速度計(或經驗)控制加速強度,這需要一定的駕駛技巧與經驗。對於恆速測試,車輛需以恆定速度(通常 50 km/h)透過測試區域,速度容差通常為 $\pm 1 \text{ km/h}$ 。車輛行駛軌跡應盡可能保持在車道中心線上,橫向偏離不應超過 $\pm 0.3$  公尺,因為橫向位置的變化會改變聲源與麥克風的距離,影響量測結果。

數據擷取系統在車輛進入測試區域前即開始記錄,持續至車輛完全透過測試區域後。記錄時段通常為 5-10 秒,涵蓋整個透過過程並包括前後的背景噪音時段。現代測試系統通常配備觸發功能,可以根據噪音值閾值、光電感測器或 GPS 定位信號自動啟動記錄,以確保捕捉完整的透過事件。每次測試後,應立即進行初步數據檢查,確認波形無異常(如削波、突波等),噪音值在合理範圍內,左右兩側量測值的差異在可接受範圍內(通常要求差異小於 2 dB)。若發現異常,應立即檢查測試條件並考慮重複測試。

測試重複性要求至少進行兩次獨立測試,對於型式認證,通常需要進行四次測試以確保統計可靠性。獨立測試之間應有足夠的時間間隔(通常至少 1 分鐘),以讓車輛返回起點並重新建立測試條件。

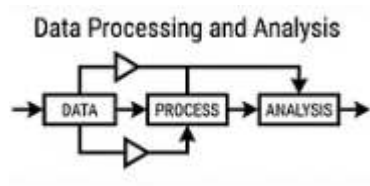


若任意兩次測試的結果差異超過 1.0 dB(A),需要檢查測試條件是否發生變化(如風速增大、背景噪音升高等),並考慮進行額外測試或排除異常數據。測試期間,環境條件應持續監測,若環境參數超出限值(如風速突然增大至>5 m/s),應暫停測試並等待條件恢復。測試記錄應詳細記載每次測試的所有相關信息,包括測試時間、環境條件、車輛狀態、量測值、異常情況等,以便後續分析與審核。

### 4.2.3 數據處理與分析 (Data Processing and Analysis)

透過噪音量測的原始數據為時域聲壓信號,需要經過系統性的數據處理與分析程序才能得出最終的評估結果。數據處理的第一步是信號預處理 (signal preprocessing),目的是去除無效數據、抑制干擾並提取有效信號段。原始信號通常包含測試前後的背景噪音時段、車輛透過時段以及可能的異常事件(如突發噪音干擾),需要透過自動或手動方法識別並分割出車輛透過的有效時段。有效時段的識別通常基於噪音值閾值,設定一個高於背景噪音級的閾值(如背景噪音級+6 dB),當信號超過此閾值時判定為車輛接近,低於閾值時判定為車輛遠離。有效時段的確定需要包含噪音值從上升到峰值再到下降的完整過程,通常持續 3-5 秒。

信號質量檢查是預處理的重要環節,目的是識別與排除異常數據。首先檢查信號是否發生削波 (clipping),即信號幅度超過 ADC 的量測範圍導致波形頂部被切平。削波會引入嚴重的非線性失真,使量



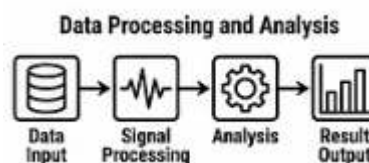
測結果無效,因此一旦發現削波,該次量測應作廢。削波的識別可透過檢查信號峰值是否達到或接近 ADC 的滿刻度來判定。其次檢查是否存在突波(spike)或脈衝干擾,這些異常通常由電氣干擾、儀器故障或突發環境噪音(如鳥叫、飛機透過等)引起。突波的識別可基於信號的時域特徵(如過高的峰值因子 peak factor)或頻域特徵(如不正常的頻譜成分)。對於識別出的突波,可採用適當的濾波或插值方法進行修復,或在嚴重情況下排除該次量測。

頻率加權處理是將原始線性聲壓信號轉換為加權噪音值的關鍵步驟。A 加權是最常用的加權特性,其加權曲線基於 40 方(phon)等響度曲線的倒數,反映了人耳對不同頻率聲音的相對敏感度。A 加權對低頻聲音(如 100 Hz 以下)有較大的衰減(約-20 至-50 dB),對中頻聲音(1-4 kHz)衰減較小,對高頻聲音(>8 kHz)也有一定衰減。A 加權處理可在時域透過數位濾波器實現,也可在頻域透過對頻譜施加加權函數實現。IEC 61672 標準詳細規定了 A 加權濾波器的頻率響應特性與容差要求,確

保不同儀器與軟體實現的一致性。除了 A 加權,有時也會使用 C 加權或線性(未加權)特性進行輔助分析,以了解低頻噪音成分的貢獻。

時域參數的提取是數據分析的核心步驟。對於透過噪音量測,最重要的參數是最大 A 加權噪音值(LA<sub>max</sub>)與最大噪音值發生的時刻。LA<sub>max</sub> 的計算通常採用時間常數為"Fast"的指數平均(exponential averaging),時間常數為 125 毫秒,這一設置符合人耳對聲音響度的時間整合特性。計算過程是對加權後的瞬時噪音值信號施加指數平滑濾波,然後在平滑後的曲線上尋找最大值。一些標準也要求記錄 LA<sub>max</sub> 發生時車輛相對於測量線 PP'的位置,這可透過車速與時間計算得出,用於驗證測試程序的正確性(LA<sub>max</sub> 通常應發生在車輛接近或透過 PP'時)。除了 LA<sub>max</sub>,有時也會計算等效連續噪音值(LA<sub>eq</sub>),這是對整個透過時段的能量平均,能夠反映總體噪音能量,但在法規應用中較少使用。

頻譜分析提供了噪音的頻率組成信息,對於理解噪音特性與識別主要噪音源具有重要意義。標準的頻譜分析方法是 1/3 倍頻程頻譜分析,將頻率範圍(通常 20 Hz 至 20 kHz)劃分為一系列 1/3 倍頻



程頻帶(共約 30 個頻帶),計算每個頻帶的噪音值。1/3 倍頻程分析的優勢在於頻率解析度與人耳聽覺特性相匹配,頻譜圖直觀易讀,且分析結果相對穩定(不受頻率細節波動的影響)。1/3 倍頻程頻譜可以透過數位濾波器組(digital filter bank)實現,即將信號依次透過一系列帶通濾波器,每個濾波器對應一個頻帶,然後計算各頻帶輸出信號的 RMS 值並轉換為噪音值。對於更詳細的頻率分析,可採用窄頻 FFT 分析,頻率解析度可達到數赫茲,能夠識別特定的色調噪音成分(tonal noise components)與諧波結構。

時頻分析技術如短時傅立葉變換(STFT)或小波變換能夠同時提供時間與頻率維度的信息,以聲譜圖(spectrogram)的形式呈現。聲譜圖的橫軸為時間,縱軸為頻率,顏色或亮度表示對應時間-頻率點的能量密度。對於透過噪音分析,聲譜圖能夠清晰顯示不同噪音源隨車輛運動的演變過程。例如,動力系統噪音通常在特定頻率範圍(如 500-2000 Hz)呈現連續的能量分布,隨車輛加速而頻率上升(對應引擎轉速增加);輪胎噪音則在更寬的頻率範圍(500-5000 Hz)呈現較為均勻的寬頻特徵。透過分析聲譜圖,可以識別各噪音源對總體噪音級的貢獻時段與頻率範圍,為噪音控制提供診斷信息。

背景噪音修正是提高量測準確性的重要步驟,特別是當車輛噪音級與背景噪音級差異較小時(如安靜車輛或測試環境背景噪音較高的情況)。背景噪音對量測結果的影響可透過能量相減法進行修正。基本原理是,量測到的總噪音值  $L_m$  是車輛噪音級  $L_v$  與背景噪音級  $L_b$  的能量疊加:

$$L_m = 10 \log(10^{(L_v/10)} + 10^{(L_b/10)})$$

若已知  $L_m$  與  $L_b$ ,可反算出  $L_v$ :

$$L_v = 10 \log(10^{(L_m/10)} - 10^{(L_b/10)})$$

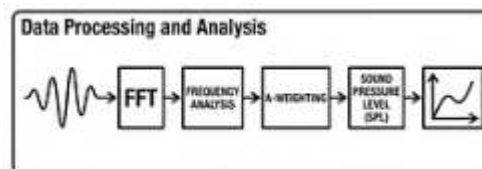
背景噪音級  $L_b$  通常在測試前後的無車輛時段測量。ISO 362 標準規定,當  $L_m - L_b \geq 10$  dB 時,背景噪音影響可忽略,無需修正;當  $6$  dB  $\leq L_m - L_b < 10$  dB 時,應進行背景噪音修正;當  $L_m - L_b < 6$  dB 時,背景噪音干擾過大,量測結果無效。背景噪音修正雖能改善量測準確性,但會增加量測不確定性,因此最佳做法是盡可能選擇低背景噪音的測試環境,避免或減少修正的需要。

溫度修正是針對氣溫對輪胎噪音影響的補償。研究顯示,氣溫對輪胎噪音有顯著影響,主要機制是溫度改變輪胎橡膠的剛度與阻尼特性,進而影響輪胎振動與噪音生成。一般規律是溫度升高,輪胎噪音略有下降。ISO 362 標準規定的測試氣溫範圍為  $5^\circ\text{C}$  至  $40^\circ\text{C}$ ,對於在標準參考溫度(通常為  $20^\circ\text{C}$  或  $25^\circ\text{C}$ )之外的溫度進行的測試,可施加溫度修正以提高不同溫度條件下量測結果的可比較性。溫度修正公式通常為線性形式:

$$L_{\text{corr}} = L_{\text{meas}} + k \times (T - T_{\text{ref}})$$

其中  $L_{\text{meas}}$  為實測值, $T$  為測試溫度, $T_{\text{ref}}$  為參考溫度, $k$  為溫度係數, $L_{\text{corr}}$  為修正後的值。溫度係數  $k$  的取值基於實驗數據,ISO 標準建議的典型值約為  $-0.03$  至  $-0.05$  dB/ $^\circ\text{C}$ ,但具體值可能因輪胎類型與路面特性而異。需要注意的是,溫度修正主要針對輪胎噪音,對於動力系統噪音為主的情況,溫度修正的適用性與效果需要進一步研究。

數據驗證與異常值處理是確保量測結果可靠性的質量控制環節。首先檢查量測值是否在合理範圍內,對於特定車輛類型,透過



噪音級通常在可預期的範圍內(如 M1 類乘用車通常在 68-78 dB(A)範圍),若量測值明顯偏離預期範圍(如過高或過低),需要檢查測試條件與程序是否異常。左右兩側麥克風的量測值也應進行一致性檢查,兩側差異通常應小於 2 dB,較大的差異可能指示車輛左右噪音排放不對稱(如單側排氣管、不對稱載重等)或測試條件異常

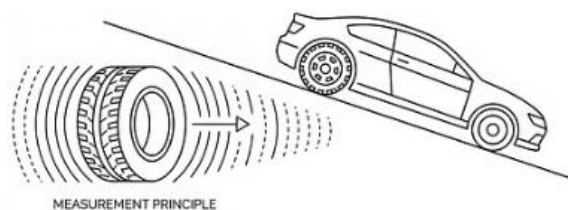
(如橫風、地面反射不對稱等)。對於多次重複測試,應計算平均值與標準差,評估量測的重現性。ISO 362 標準要求任意兩次測試的差異不超過 1.0 dB,若超過此限值,需要進行額外測試並調查原因。

統計處理與不確定性評估是高質量測的重要組成部分。對於型式認證等正式測試,通常要求多次重複量測(如 4 次),最終結果的計算需要考慮統計原則。最簡單的方法是算術平均,但這種方法未考慮量測的變異性。更嚴謹的方法是計算平均值的標準誤差(standard error of mean),並給出信賴區間。例如,對於 4 次量測,可計算 95%信賴區間:

$$CI = \text{mean} \pm t \times (SD / \sqrt{n})$$

其中 mean 為平均值,SD 為標準差,n 為樣本數,t 為 t 分布的臨界值(對於 n=4,95% 信賴水平,t≈3.18)。信賴區間能夠量化量測結果的統計不確定性,對於接近法規限值的情況,這一信息對於符合性判定至關重要。量測不確定性的全面評估還需要考慮系統性誤差來源,如儀器不確定性、背景噪音修正引入的不確定性、溫度修正的不確定性等,這些不確定性分量需要按照 GUM 方法進行合成,得出擴展不確定度(expanded uncertainty)。Berge 與 Gerhard (2023)的研究系統分析了車輛噪音量測的不確定性預算(uncertainty budget),指出典型的擴展不確定度(k=2,約 95%信賴水平)可達 0.8 至 1.2 dB(A)[5]。

量測結果的報告與解釋需要遵循標準格式並包含必要的信息。標準的測試報告應包括:測試基本信息(日期、地點、測試標準等)、車輛信息(製造



商、型號、引擎規格、輪胎規格、載重等)、測試條件(環境參數、路面狀況等)、量測結果(各次測試的 LAmax 值、平均值、標準差等)、異常情況說明、結論(如是否符合法規限值)等。對於型式認證,還需要包括更詳細的技術數據如頻譜分析結果、時間歷程曲線等,以便審查與存檔。量測結果的解釋需要考慮不確定性的影響,特別是在符合性判定時。若量測結果接近法規限值(如在限值±1 dB 範圍內),不確定性的影響可能決定判定結果,此時需要採用統計判定規則,如考慮擴展不確定度後的上限值是否超過限值。

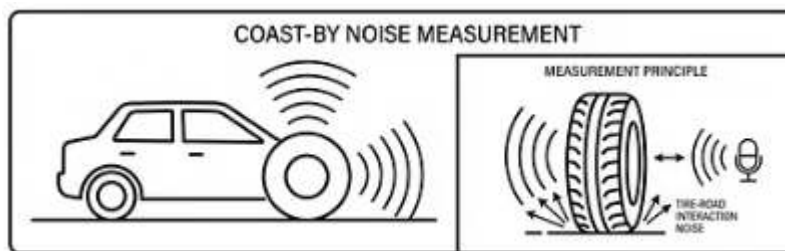
數據處理軟體與自動化工具的應用顯著提升了數據分析的效率與一致性。現代透過噪音量測系統通常配備專用的數據處理軟體,能夠自動執行信號預處理、加權濾波、參數提取、頻譜分析等功能,並生成標準化的測試報告。這些軟體工具的優

勢在於：處理速度快，可實時或準實時給出量測結果；一致性好，避免人工處理的主觀性與錯誤；可追溯性強，所有處理步驟與參數設置都有記錄，便於審核與驗證。然而，自動化工具的使用也需要謹慎，操作人員需要理解工具的工作原理與限制，能夠識別自動處理的異常結果，必要時進行人工檢查與修正。數據處理算法也需要經過驗證，確保其符合標準要求並給出正確的結果。一些國家的計量機構或認證機構會對數據處理軟體進行評估與認可，透過認可的軟體才能用於正式的法規測試。

### 4.3 滾動噪音量測 (Coast-by Noise Measurement)

滾動噪音量測，又稱為滑行透過噪音量測(coast-by noise measurement)，是專門評估輪胎與路面交互作用產生的噪音的測試方法，其核心特點是在測試過程中將車輛動力系統與傳動系統切離(通常為引擎熄火或置於空檔)，使車輛僅靠慣性滑行透過測試區域，從而排除動力系統噪音的干擾，獲得純粹的輪胎/路面噪音數據。滾動噪音量測方法的發展始於 1970 年代末期，當時研究者認識到，在車輛透過噪音測試中，動力系統噪音與輪胎噪音同時存在，難以分別評估兩者的貢獻，而理解輪胎噪音特性對於開發低噪音輪胎與路面具有重要意義，因此需要一種能夠隔離輪胎噪音的量測方法。Sandberg 與 Ejsmont (1986)系統性開發了滾動噪音量測方法，並透過大量實驗驗證了方法的有效性與重現性，確立了滾動噪音量測作為輪胎/路面噪音研究基本工具的地位[1]。

滾動噪音量測方法與透過噪音量測在測試配置上基本相同，採用相同的測試場地(符合 ISO



10844 標準的測試道)、相同的麥克風配置(道路兩側 7.5 公尺、高度 1.2 公尺)以及相同的數據擷取與處理程序。關鍵區別在於車輛運行條件：在滾動噪音測試中，車輛從測試區域前方足夠遠的位置開始加速至目標速度(通常為高於測試速度 5-10 km/h)，然後駕駛員將引擎熄火或將變速箱置於空檔(對於電動車，則切斷電機動力)，車輛進入滑行狀態，靠慣性透過測試區域。在透過測試區域時，由於空氣阻力與滾動阻力的作用，車輛速度會略有下降，但在短距離的測試區域內(如 20 公尺)，速度變化通常在可接受範圍內(如 1-2 km/h)。量測的噪音值即為滾動噪音級，主要反映輪胎與路面交互作用產生的噪音，還包括少量的氣動噪音(aerodynamic noise)，

但在中低速條件下(如 80 km/h 以下),氣動噪音的貢獻相對較小,可以認為量測結果主要代表輪胎噪音。

滾動噪音量測的主要應用領域包括:輪胎噪音特性評估,透過量測不同輪胎在相同路面與速度條件下的滾動噪音級,可以比較不同輪胎的噪音性能,為輪胎選擇與開發提供依據;路面聲學性能評估,透過使用標準參考輪胎(SRTT)量測不同路面的滾動噪音級,可以評估路面的聲學特性,識別低噪音路面材料與結構;輪胎/路面交互作用機制研究,結合滾動噪音量測與其他測試方法(如振動量測、聲源定位等),可以深入理解噪音生成機制;法規測試補充,雖然滾動噪音量測不是法規要求的測試項目,但其結果可為車輛型式認證測試提供補充信息,特別是對於電動車或混合動力車,其動力系統噪音較低,輪胎噪音成為主要噪音源,滾動噪音數據對於整車噪音性能評估具有更直接的意義。

#### 4.3.1 量測原理 (Measurement Principle)

滾動噪音量測的基本原理是透過消除或最小化動力系統噪音源,使輪胎/路面交互作用產生的噪音成為唯一顯著的噪音源,從而實現對輪胎噪音的直接量測。這一原理的實施基於車輛噪音源的可分離性假設,即車輛總體噪音可視為多個獨立或弱耦合噪音源的疊加,包括動力系統噪音(引擎、進氣、排氣)、傳動系統噪音(變速箱、差速器、傳動軸)、輪胎噪音以及氣動噪音。



在正常行駛或加速條件下,這些噪音源同時存在,各自的貢獻度隨車速、負荷、引擎轉速等運行參數而變化。在滑行條件下,引擎熄火或置於空檔並處於怠速狀態,引擎本身的燃燒與機械噪音大幅降低;排氣系統僅有怠速排氣流動,排氣噪音極低;進氣系統無負壓或負壓極小,進氣噪音也可忽略。傳動系統在空檔狀態下,動力傳遞路徑切斷,變速箱與差速器的負荷噪音消失,僅有軸承與齒輪的微弱嚙合噪音,這些噪音通常遠低於輪胎噪音。

在滑行狀態下,輪胎依然以正常方式與路面接觸並滾動,輪胎變形、胎紋衝擊、空氣泵浦、振動輻射等噪音生成機制持續作用,產生的噪音特性與正常行駛時基本相同。因此,滑行量測的噪音值可以認為主要代表輪胎噪音。嚴格來說,滑行噪音還包括少量的氣動噪音與殘餘的傳動系統噪音,但對於中低速條件(如 60-80 km/h,這是輪胎噪音評估的典型速度範圍),這些噪音源的貢獻通常比輪胎噪音低 10 dB 以上,根據能量疊加原理,它們對總體噪音級的影響小於 0.5 dB,可以忽略。研究也

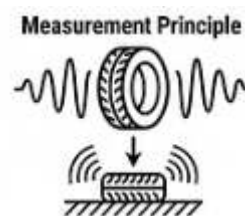
表明,對於同一車輛,滑行噪音級與透過噪音級之間的差值主要反映動力系統噪音的貢獻,這一差值可用於分析車輛噪音源的組成(Braun, 2014)[17]。

滾動噪音量測的理論基礎還涉及輪胎噪音生成的物理機制。輪胎在路面上滾動時,噪音產生的主要機制包括:胎紋衝擊機制(tread impact mechanism),當胎紋塊進入接觸區域時,對路面產生衝擊,激發輪胎與路面的振動並輻射噪音,這一機制在中頻範圍(800-2000 Hz)產生顯著能量;空氣泵浦機制(air pumping mechanism),胎紋溝槽與路面紋理形成的空氣腔在輪胎滾動過程中週期性地被壓縮與膨脹,壓縮時空氣被擠出並產生噴流,膨脹時空氣被吸入,這一過程產生寬頻噪音,主要能量在 1000-3000 Hz 範圍;黏滑機制(stick-slip mechanism),輪胎橡膠與路面粗糙紋理的微觀交互作用產生高頻振動,主要在 2000 Hz 以上頻率範圍;輪胎振動輻射機制(tire vibration radiation),輪胎作為彈性結構,在滾動過程中被激發的振動模態向周圍輻射噪音,不同模態在不同頻率範圍產生貢獻(Li, 2019)[3]。這些機制在輪胎滾動過程中持續作用,與車輛是處於驅動還是滑行狀態基本無關,因此滑行量測能夠有效捕捉輪胎噪音的本質特性。

滾動噪音量測的速度選擇是一個重要考量。輪胎噪音與車速密切相關,通常遵循速度對數定律,即噪音級與車速對數成正比:

$$L = A + B \times \log(v/v_{ref})$$

其中  $L$  為噪音級, $v$  為車速, $v_{ref}$  為參考速度, $A$  與  $B$  為常數, $B$  稱為速度指數,典型值為 20 至 40 dB/decade,即車速每增加一倍,噪音級增加 6 至 12 dB。速度指數的大小取



決於噪音生成機制的相對貢獻,對於胎紋衝擊與空氣泵浦為主的情況,速度指數較高;對於振動輻射為主的情況,速度指數較低。滾動噪音測試的常用速度為 80 km/h,這一速度的選擇基於多重考量:首先,80 km/h 是典型的城市快速道與郊區道路行駛速度,具有代表性;其次,在此速度下,輪胎噪音通常是車輛的主要外部噪音源,動力系統噪音的相對貢獻降低;第三,對於大多數測試場地,車輛從靜止加速至 80 km/h 再滑行透過測試區域的場地長度要求在合理範圍內(通常總長 300-500 公尺)。對於某些應用,如高速公路噪音評估,可能採用更高的測試速度如 100 km/h 或 120 km/h。

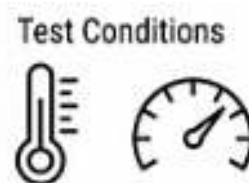
滑行操作對量測結果的影響需要透過車輛動力學分析來理解。車輛在滑行過程中受到空氣阻力與滾動阻力的作用,速度逐漸衰減,減速度大小取決於車輛的空氣阻力係數、迎風面積、質量、滾動阻力係數等參數。對於典型乘用車,在 80 km/h 滑

行時,減速度約為 0.5 至 1.0 m/s<sup>2</sup>,這意味著車輛透過 20 公尺的測試區域(約需 0.9 秒)時,速度下降約 0.5 至 1.0 km/h。這一速度變化對噪音級的影響通常小於 0.2 dB,在量測不確定性範圍內。為了進一步減小速度變化的影響,滾動噪音測試通常要求車輛以略高於目標速度(如 83-85 km/h)進入測試區域,使得透過測試區域中央時的平均速度接近目標值 80 km/h。速度需要透過精確的速度測量系統監測,常用方法包括 GPS 速度測量、光電速度測量(透過測量車輛透過兩個光電門的時間與距離計算速度)以及車載速度傳感器數據記錄。

滑行操作的實施對駕駛員技能有一定要求。駕駛員需要在恰當的位置執行滑行操作(引擎熄火或置於空檔),使得車輛以正確的速度透過測試區域。這需要駕駛員對車輛性能、滑行減速特性以及測試場地有充分的了解和經驗。實務上,通常需要進行多次練習以讓駕駛員掌握正確的操作時機與方式。一些現代測試系統採用自動化或半自動化的滑行控制,如在預定位置自動切斷引擎動力,或透過實時速度監測與視覺/聽覺提示輔助駕駛員控制滑行過程,這些技術手段能夠提高滑行操作的一致性與量測的重現性。

#### 4.3.2 測試條件 (Test Conditions)

滾動噪音量測的測試條件設置需要兼顧量測的準確性、重現性以及結果的實用價值。測試場地的要求與透過噪音量測基本相同,需要符合 ISO 10844 標準的測試道,周



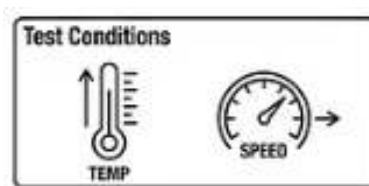
圍環境開闊,背景噪音低。路面狀態的控制 在滾動噪音測試中尤為重要,因為路面特性直接且顯著地影響輪胎噪音,不同路面的噪音級差異可達 5-10 dB 或更多。ISO 10844 標準規範了標準測試道路面的特性,包括表面紋理(MPD 為 0.2-1.0 mm)、聲學吸收係數、機械強度等,確保不同測試場地的路面具有相似的聲學性能,從而使不同場地的量測結果具有可比較性。然而,即使在 ISO 10844 規定的 MPD 範圍內,路面噪音性能仍可能有可察覺的差異,因此需要透過定期的路面聲學驗證測試(使用 SRTT 滾動量測)來監控路面狀態,確保其聲學性能保持在允許範圍內(Berge et al., 2023)[7]。

路面濕度對輪胎噪音有顯著影響,通常濕路面的輪胎噪音比乾燥路面高 2-5 dB,主要原因是輪胎與濕路面之間的水膜產生額外的飛濺噪音(splash noise)與抽吸噪音(suction noise)。因此,標準的滾動噪音測試要求路面為乾燥狀態,測試前應確認路面無積水、無明顯濕氣,對於有疑慮的情況,可透過路面濕度檢測儀或簡單的目視與觸摸檢查來判斷。若在測試期間降雨,應暫停測試並等待路面乾燥後再繼續。路

面清潔度也很重要,灰塵、泥沙、落葉等雜物會改變路面紋理並產生異常噪音,因此測試前應清掃路面,確保清潔。對於戶外測試道,定期清掃與維護是保持路面狀態一致性的必要措施。

車輛條件的控制重點在於輪胎與載重。輪胎是滾動噪音測試的核心要素,輪胎型號、尺寸、花紋、磨損狀態、氣壓、溫度等參數都會影響噪音特性。對於輪胎性能比較測試,應使用相同的車輛(或至少相同型號的車輛),以排除車輛結構對輪胎噪音的影響。測試輪胎應為新胎或已經過適當磨合(run-in)的輪胎,胎紋深度應在新胎深度的 75%以上,以確保花紋特徵完整並處於正常性能狀態。輪胎氣壓應按照製造商建議值設定,並在測試前後進行檢查與記錄,氣壓變化應在 $\pm 0.1$  bar 範圍內。輪胎溫度對噪音有影響,因為溫度改變橡膠的剛度與阻尼特性,因此輪胎需要經過預熱,通常要求以測試速度行駛至少 30 分鐘,使輪胎達到穩定的工作溫度(通常為 40-50°C,視環境溫度與行駛條件而定)。輪胎溫度可透過紅外線測溫儀在測試前後測量胎面中央與胎肩的溫度,確認溫度穩定且在合理範圍內。

車輛載重對滾動噪音的影響較為複雜,載重增加會提高輪胎的接地壓力與變形,通常導致噪音略有增加,但影響程度因輪胎類型而異,通常在 1-2 dB 範圍內。為了確保量測的重現性與可比較性,



滾動噪音測試通常規定標準載重條件,如駕駛員加上一定質量的壓艙物,或車輛空載但排除駕駛員質量影響(透過計算修正)。對於輪胎性能比較,應保持載重條件一致。對於路面評估,SRTT 的載重有標準規定,需嚴格遵循以確保量測的標準化。車輛懸吊系統的狀態也會影響輪胎動態特性與噪音,因此車輛應處於良好維護狀態,懸吊無異常磨損或故障,輪胎定位參數(前束角、外傾角等)在規範範圍內。

環境條件的要求與透過噪音測試相似,但由於滾動噪音級通常略低於加速透過噪音級,對背景噪音的要求可能更嚴格。氣溫要求通常為 5°C 至 40°C,與透過噪音測試一致。相對濕度要求 20%至 95%。風速是最關鍵的環境參數,因為滾動噪音測試通常在較高速度(如 80 km/h)進行,車輛產生的相對風速已達 22 m/s,外部風速的疊加效應更為顯著。標準通常要求測試時風速不超過 5 m/s,且風向應記錄,以評估橫風或逆風/順風對量測結果的可能影響。對於精密研究,可能要求更低的風速限值(如 3 m/s)以提高量測精度。背景噪音級應至少低於滾動噪音級 10 dB,以確保背景噪音的干擾可忽略。由於戶外環境的背景噪音具有時變性(如間歇的遠處交通

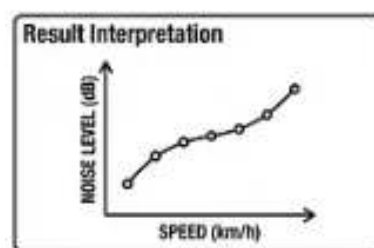
噪音、鳥叫、風噪等),需要在測試前後持續監測背景噪音,確認測試期間背景噪音級保持在可接受範圍內。

測試速度的選擇與控制是影響量測結果的關鍵因素。如前所述,80 km/h 是最常用的測試速度,但對於特定應用,可能需要其他速度。對於輪胎性能比較,通常採用單一速度(如 80 km/h)進行測試,以簡化程序並提高效率。對於研究應用,可能進行多速度測試(如 60、80、100 km/h),以獲得速度-噪音關係曲線並確定速度指數。速度控制的精度要求較高,通常要求透過測試區域時的平均速度在目標速度的 $\pm 1$  km/h 範圍內,這需要精確的速度測量系統與熟練的駕駛操作。現代測試系統通常採用光電速度測量,在測試區域兩端設置光電門,測量車輛透過兩個光電門的時間,結合已知的光電門間距計算平均速度。這一方法的精度可達 $\pm 0.1$  km/h,遠優於車載速度表的精度(通常為 $\pm 3$  至 $\pm 5$  km/h)。

測試重複性與統計要求與透過噪音測試相似,但可能更為嚴格,因為滾動噪音測試的主要目的是精確比較不同輪胎或路面的噪音性能,微小的差異(如 0.5 dB)也可能具有實際意義。標準的測試程序要求至少進行兩次獨立測試,對於正式的性能比較,通常進行四次或更多測試,以獲得足夠的統計可靠性。獨立測試之間應有適當的時間間隔,以讓車輛返回起點並恢復初始條件。對於輪胎測試,連續測試之間應讓輪胎冷卻一定時間(如 5-10 分鐘),避免累積的溫升影響結果。測試方向也是一個考量,車輛可以沿測試道的兩個方向進行測試,以平衡道路坡度、風向等方向性因素的影響。標準做法是在每個方向各進行兩次測試,取四次測試的平均值作為最終結果。

### 4.3.3 結果判讀 (Result Interpretation)

滾動噪音量測結果的判讀與解釋需要考慮多個層面的信息,包括量測值的絕對水平、與參考值的比較、變異性分析以及頻譜特徵分析等。量測結果的基本表達是 A 加權噪音值,通常記為  $L_{Amax}$ (滑行透過的最大噪音值)或  $L_{Aeq}$ (等效連續噪音值,對整個透過時段的能量平均)。對於輪胎噪音評估, $L_{Amax}$  是更常用的指標,因為它與透過噪音測試的指標一致,便於比較。典型乘用車輪胎在 80 km/h 滑行時的  $L_{Amax}$  通常在 68 至 76 dB(A)範圍,這一範圍反映了不同輪胎設計、尺寸、花紋類型的噪音性能差異。高性能輪胎(如運動型輪胎)通常具有較高的噪音級(74-76 dB(A)),因為其設計優先考慮抓地力與

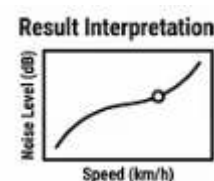


操控性能而非噪音;舒適型輪胎或特別設計的低噪音輪胎則可達到較低的噪音級(68-72 dB(A))。

量測值的比較與差異判斷需要考慮量測不確定性。如前所述,即使在良好控制的條件下,輪胎噪音量測的重現性標準差(repeatability standard deviation)通常為 0.3 至 0.5 dB,擴展不確定度(k=2)可達 0.6 至 1.0 dB。因此,兩個輪胎的噪音級差異需要達到約 1 dB 以上,才能認為是統計顯著的差異,反映了真實的性能差異而非量測誤差。對於差異小於 1 dB 的情況,需要透過增加測試次數、改善測試條件控制等方式提高統計檢定力(statistical power),或採用配對測試設計(paired test design)以減少系統性變異的影響。配對測試是指在相同的測試時段、相同的環境條件下,依次測試兩個輪胎並立即比較,這種設計能夠有效消除時變因素(如溫度漂移、背景噪音變化等)的影響,提高對小差異的檢測能力。

與法規限值或參考值的比較是結果判讀的常見需求。雖然滾動噪音測試本身不是法規要求的項目,但其結果可以與輪胎噪音法規(如 UNECE R117)的限值進行比較,以評估輪胎的法規符合性潛力。需要注意的是,R117 法規規定的測試方法與滾動噪音測試有所不同(R117 採用特定的測試道、載重條件與速度),因此滾動噪音測試結果不能直接用於法規符合性判定,但可作為參考指標。研究表明,在相似的測試條件下,滾動噪音級與 R117 測試結果通常有良好的相關性,兩者的差異在 1-2 dB 範圍內,這使得滾動噪音測試可用於輪胎性能的初步評估與篩選(Swiczko-Zurek et al., 2014)[12]。

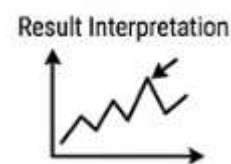
頻譜分析提供了噪音特性的詳細信息,對於理解噪音生成機制與識別改進方向具有重要價值。1/3 倍頻程頻譜顯示噪音能量在不同頻率範圍的分布,輪胎滾動噪音的典型頻譜特徵包括:在 500-800 Hz 範圍內通常有一個能量峰,這主要與輪胎



的低階振動模態(如徑向一階、二階模態)有關;在 800-2000 Hz 範圍內的能量主要來自胎紋衝擊與空氣泵浦機制,這一頻段對總體 A 加權噪音值的貢獻通常最大;在 2000-4000 Hz 範圍內的能量與黏滑機制、高階振動模態以及空氣泵浦的高頻成分有關;在 4000 Hz 以上的高頻能量通常較低,對 A 加權總級的貢獻有限(因為 A 加權對高頻有一定衰減)。不同輪胎設計在頻譜上的差異可以揭示其噪音控制策略,例如,採用變節距花紋設計(variable pitch tread design)的輪胎通常能夠有效降低胎紋衝擊的色調性成分,使頻譜更為平坦;採用吸音材料或特殊溝槽設計的輪胎可能在特定頻率範圍顯示噪音降低效果。

速度相關性分析對於外推不同速度下的噪音性能具有價值。透過在多個速度下進行滾動噪音測試,可以建立速度-噪音關係曲線並確定速度指數。如前所述,輪胎噪音通常遵循  $L = A + B \times \log(v)$  的對數關係,其中  $B$  為速度指數,典型值為 20 至 40 dB/decade。速度指數的大小反映了噪音生成機制的特性與輪胎設計的影響,高速度指數表示噪音隨速度增加較快,通常與空氣泵浦機制占主導地位有關;低速度指數則可能指示振動輻射機制較為重要。透過測定速度指數,可以外推到其他速度下的噪音級,這對於評估輪胎在實際使用速度範圍內的噪音性能具有實用價值。然而需要注意的是,速度-噪音關係在寬速度範圍內不一定嚴格遵循對數線性關係,特別是在低速(如 40 km/h 以下)或極高速(如 120 km/h 以上)時,關係可能出現偏離,因此外推應謹慎,最好在感興趣的速度範圍內直接測試驗證。

路面影響的評估是滾動噪音測試的另一重要應用。透過使用標準參考輪胎(SRTT)在不同路面上進行滾動噪音測試,可以比較不同路面的聲學性能,識別低噪音路面材料與結構。路面對輪胎噪音的影響可達 5-10 dB 或更多,這顯著大於輪胎設計



之間的差異(通常為 2-4 dB),因此路面選擇是交通噪音控制的重要途徑。低噪音路面(quiet pavement)通常具有以下特徵:適度的表面粗糙度(MPD 在 0.4-0.8 mm 範圍,既保證足夠的抗滑性能,又不產生過高的噪音);開放的孔隙結構(如多孔瀝青 pavement)能夠吸收空氣泵浦產生的聲能;均勻的紋理分布避免週期性激勵。透過系統性的路面噪音測試與分析,可以建立路面聲學性能資料庫,為道路建設與維護提供決策支持(Freitas et al., 2015)[18]。

結果的不確定性評估與表達是高品質量測報告的重要組成部分。量測結果應報告為平均值±擴展不確定度的形式,例如"73.2 ± 0.8 dB(A) (k=2)",其中 k=2 表示約 95%的信賴水平。不確定度的來源分析應包括隨機不確定性(由重複量測的標準差表徵)與系統不確定性(由儀器校準、環境修正、速度測量等引入)。對於比較性測試,相對不確定度(即兩個量測值差異的不確定度)通常小於絕對不確定度,因為許多系統性誤差在比較中會相互抵消。因此,在報告比較結果時,應明確指出是絕對值比較還是相對值比較,並給出相應的不確定度。

結果的解釋還需要考慮測試限制與適用性。滾動噪音測試在特定的測試條件(道路類型、速度、載重等)下進行,其結果嚴格來說僅代表該條件下的噪音性能,外推到其他條件時需要謹慎。例如,在 ISO 10844 標準路面上測得的低噪音性能,不一定在粗糙的混凝土路面或磨損的瀝青路面上也能保持;在 80 km/h 測得的性能,不

一定能準確反映 40 km/h 城市道路或 120 km/h 高速公路的情況。因此,結果的解釋應明確說明測試條件與適用範圍,避免不當的概括。對於需要評估寬範圍條件下性能的應用,應進行多條件測試,如多種路面、多個速度、不同載重等,以獲得全面的性能圖譜。

#### 4.4 近場噪音量測 (Close Proximity Noise Measurement)

近場噪音量測是指在緊鄰輪胎與路面接觸區域的位置進行噪音量測的方法,其核心特點是量測距離極短(通常數十公分以內),使得量測結果主要反映輪胎/路面交互作用產生的噪音,而較少受到聲波傳播路徑特性、環境反射以



及其他噪音源(如車輛動力系統)的影響。近場噪音量測方法的發展始於 1980 年代末期,當時研究者認識到,傳統的遠場透過噪音量測雖然能夠評估車輛整體噪音排放,但對於專門評估輪胎或路面的聲學性能存在局限:首先,遠場量測結果是多個噪音源疊加的結果,難以分離輪胎噪音的貢獻;其次,聲波傳播路徑與環境條件的變異性影響量測結果的重現性;第三,對於路面聲學性能評估,遠場量測的空間分辨率不足,難以識別路面局部特性的變化。近場量測方法的提出正是為了克服這些局限,實現對輪胎/路面噪音源的直接、精確評估。

近場噪音量測的基本原理基於近場聲學特性。在聲源附近的近場區域,聲場具有複雜的空間結構,聲壓與質點振速之間的相位關係與遠場不同,聲能密度較高。對於輪胎這樣的複雜聲源,其輻射聲場在近場呈現高度的空間非均勻性,不同位置的噪音值可相差數分貝甚至更多。然而,近場量測的優勢在於,由於量測位置非常接近聲源,來自聲源的直達聲(direct sound)遠強於反射聲(reflected sound)與其他噪音源的貢獻,使得量測結果主要反映該聲源本身的輻射特性。另外,近場量測對環境條件的敏感度較低,因為聲波從聲源到麥克風的傳播距離極短(通常 0.2 至 0.3 公尺),這一短距離內的大氣吸收、溫度梯度、風的影響都可忽略,量測的重現性較遠場量測更好。近場量測的主要挑戰在於標準化,由於近場聲場的空間變化大,麥克風的精確位置對量測結果有顯著影響,位置偏差數公分可能導致 1-2 dB 的量測差異,因此需要嚴格的麥克風定位規範以確保不同測試間的一致性。

近場噪音量測方法主要包括兩類:CPX 方法(Close ProXimity method)與 OBSI 方法(On-Board Sound Intensity method)。CPX 方法使用聲壓麥克風,量測輪胎附近的噪音值,主要用於路面聲學性能評估,已被國際標準 ISO 11819-2 採納。OBSI 方法使用聲強探頭,量測輪胎附近的聲強級,能夠更有效地抑制反射與背景噪音的干擾,

主要用於美國的路面噪音評估計畫。兩種方法在原理、實施方式與應用領域上各有特點,但都屬於近場量測的範疇,其量測結果具有較好的相關性。除了這兩種戶外近場量測方法,室內滾筒測試也常採用近場麥克風配置,將麥克風安裝在輪胎附近量測滾筒上滾動的輪胎噪音,這種配置結合了近場量測與室內測試的優勢,是輪胎研發的重要工具。

近場噪音量測的主要應用領域包括:路面聲學性能評估與認證,CPX 方法是歐洲廣泛採用的路面噪音評估工具,用於新建路面的驗收測試、在用路面的性能監測以及低噪音路面的研發與驗證;路面聲學特性調查與繪圖(acoustic mapping),CPX 拖車能夠以正常交通速度連續行駛並記錄沿路的噪音級,生成道路網絡的聲學性能地圖,識別高噪音路段並指導維護決策;輪胎噪音性能評估與比較,雖然近場方法主要用於路面評估,但透過在標準路面上測試不同輪胎,也能夠比較輪胎的噪音性能;噪音源機制研究,近場量測結合頻譜分析與時頻分析,能夠揭示輪胎/路面交互作用的動態過程與噪音生成機制,為降噪設計提供科學依據。

#### 4.4.1 CPX 方法 (CPX Method)

CPX 方法(Close ProXimity method)是一種使用拖車攜帶測試輪胎與近場麥克風系統,在道路上以恆定速度行駛並量測輪胎滾動噪音的方法。CPX 方法的基本配置包括:測試拖車,通常為單軸或雙軸拖車,由牽引車輛拖曳行駛;測



試輪胎,安裝於拖車軸上,通常採用標準參考輪胎(SRTT)以確保測試的標準化與可比較性;麥克風陣列,安裝在輪胎附近的固定位置,通常為輪胎前後各一支麥克風,距離輪胎接觸中心約 0.2 公尺,高度與輪胎軸心齊平或略低;聲學遮蔽結構,包圍輪胎與麥克風的半封閉或全封閉結構,用於隔離外部噪音干擾(如牽引車噪音、風噪、其他交通噪音等);數據擷取與記錄系統,連續記錄麥克風信號以及輔助數據如車速、GPS 位置、溫度等(Mioduszewski & Sorociak, 2023)[19]。

ISO 11819-2:2017 標準詳細規範了 CPX 方法的實施程序,確保國際間量測結果的一致性與可比較性。標準規定的測試輪胎為兩種特定的 SRTT:一種適用於乘用車(規格為 SRTT P1,尺寸為 205/55 R16),另一種適用於重型車輛(規格為 SRTT H1,尺寸為 315/80 R22.5)。這些 SRTT 經過嚴格的規格控制與性能驗證,不同批次的 SRTT 在標準路面上的噪音級差異應小於 0.5 dB[9]。麥克風位置有精確規定,標準配置為輪胎前方與後方各一支麥克風,距離輪胎接觸中心 0.20 公尺(允許偏差  $\pm 0.01$  公尺),高度距路面 0.30 公尺(允許偏差  $\pm 0.01$  公尺),麥克風軸向指向輪胎中

心。這一位置的選擇基於大量實驗研究,能夠有效捕捉輪胎噪音輻射並對路面特性變化敏感。前後兩支麥克風的配置能夠分別捕捉輪胎進入接觸區域(leading edge)與離開接觸區域(trailing edge)時的噪音特徵,這兩個位置的噪音生成機制略有不同,綜合兩支麥克風的數據能夠更全面地評估輪胎噪音(Li, 2022)[20]。

聲學遮蔽結構的設計是 CPX 系統的關鍵技術之一,需要在隔離外部噪音與保持聲學測量準確性之間取得平衡。遮蔽結構通常採用聲學泡沫材料或多層複合材料製作,形成包圍輪胎與麥克風的半封閉空間。遮蔽結構需要滿足以下要求:足夠的隔音性能,對於外部噪音(特別是牽引車噪音與風噪)的衰減應至少達到 10-15 dB,確保外部噪音不干擾輪胎噪音的量測;適當的聲學透明度,遮蔽結構內表面應具有足夠的吸音性能,以減少內部反射對量測的影響,但不應過度吸音以免改變輪胎噪音的自然輻射特性;機械穩定性,遮蔽結構需要牢固固定於拖車框架,在行駛過程中不產生振動噪音或與輪胎發生接觸;通風設計,封閉或半封閉結構會導致輪胎周圍空氣流動受限,可能造成溫度升高與壓力變化,因此需要適當的通風設計,但通風口的設計需避免形成氣動噪音源或降低隔音效果。現代 CPX 系統通常採用計算流體動力學(CFD)模擬與實驗優化相結合的方法來設計遮蔽結構,確保其聲學性能與氣動性能的最佳平衡。

CPX 測試的執程序相對簡單但需要嚴格的條件控制。測試車輛(牽引車加 CPX 拖車)以恆定速度行駛於待測路面上,連續記錄麥克風信號與相關參數。測試速度的選擇取決於道路類型



與測試目的,對於城市道路通常採用 50 km/h,對於郊區道路與快速道路採用 80 km/h,對於高速公路可採用 110 km/h。標準通常要求在至少兩個速度下進行測試,以獲得速度-噪音關係信息。速度控制的精度要求為目標速度的 $\pm 2$  km/h,這可透過車輛巡航控制系統(cruise control)或駕駛員經驗控制實現。測試路段的長度視測試目的而定,對於路面驗收測試,通常要求至少 100 公尺的連續測量;對於道路網絡調查,可連續行駛數公里至數十公里,獲得整條道路的聲學性能剖面。

路面條件的控制與記錄是 CPX 測試的重要環節。路面需為乾燥狀態,測試前應確認路面無積水、無明顯濕氣。路面溫度應在 5°C 至 50°C 範圍內,這一寬廣的溫度範圍反映了戶外測試的實際情況,但需要記錄溫度以便後續進行溫度修正。研究顯示,路面溫度對 CPX 量測結果有顯著影響,溫度每升高 10°C,噪音級通常下降約 0.1 至 0.3 dB,這主要是由於溫度影響輪胎橡膠的剛度與路面瀝青的性質(Sandberg, 2006)[21]。路面紋理在 CPX 測試中是最關鍵的因素,不同紋理特徵的路面噪音級

差異可達 10 dB 以上。CPX 方法能夠敏感地檢測路面紋理的微小變化,空間分辨率可達數公尺,這使得 CPX 成為路面聲學性能精細評估的理想工具。

數據處理與分析程序在 ISO 11819-2 標準中有詳細規定。原始數據為連續的聲壓時間序列,通常以高取樣率(如 48 kHz)記錄,同時記錄車速、GPS 位置等輔助信息。數據處理的第一步是計算短時等效噪音值(short-time equivalent sound pressure level),通常採用 1 秒或更短的時間窗口,計算每個時間窗口內的 LAeq,得到噪音值隨時間(或距離)變化的曲線。對於前後兩支麥克風,分別計算其噪音值時間序列,然後取能量平均得到綜合的 CPX 噪音級:

$$L_{CPX} = 10 \times \log[(10^{(L_{\text{leading}}/10)} + 10^{(L_{\text{trailing}}/10)}) / 2]$$

其中  $L_{\text{leading}}$  為前方麥克風測得的噪音值, $L_{\text{trailing}}$  為後方麥克風測得的噪音值。對於測試路段,可計算整段的平均 CPX 噪音級,或保留空間分布信息,生成噪音級隨位置變化的曲線或地圖。

溫度修正是提高 CPX 量測結果可比較性的重要步驟。ISO 11819-2 規定了溫度修正公式,將不同溫度下的量測結果修正到參考溫度 20°C:

$$L_{20} = L_{\text{measured}} + \alpha \times (T - 20)$$

其中 T 為路面溫度, $\alpha$  為溫度修正係數,其值取決於路面類型。對於密級配瀝青路面(dense asphalt), $\alpha$  約為-0.06 dB/°C;對於多孔瀝青路面(porous asphalt), $\alpha$  約為-0.10 dB/°C;對於混凝土路面, $\alpha$  約為-0.03 dB/°C。這些修正係數基於大量實驗數據統計得出,但具體值可能因路面材料配方與老化狀態而有所變化,因此標準建議對於特定的路面類型,最好透過專門的溫度影響實驗來確定適用的修正係數。

CPX 方法的量測不確定性主要來源包括:儀器不確定性(麥克風校準、數據擷取系統精度等),通常貢獻約 0.3 dB;麥克風位置不確定性,由於機械公差與安裝偏差,實際麥克風位置可能偏離標稱位置數毫米,這可能引入 0.2-0.5 dB 的不確定性;輪胎狀態變異性(胎壓、



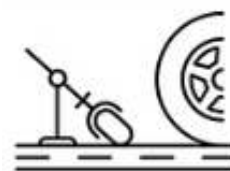
溫度、磨損狀態等),貢獻約 0.3-0.5 dB;速度控制不確定性,速度偏差±2 km/h 可能引入約 0.2 dB 的不確定性;路面狀態短期變異性(如微觀濕度、灰塵等),貢獻約 0.3 dB;溫度修正不確定性,修正公式本身的不確定性約 0.2-0.3 dB。綜合這些不確定性分量,CPX 方法的擴展不確定度(k=2)通常為 0.8 至 1.2 dB。這一不確定度水平顯著低於透過噪音測試(通常為 1.5 至 2.0 dB),反映了近場方法更好的重現性。對於相對比較(如比較同一測試時段內不同路段的 CPX 噪音級),許多系統性不確定

性可相互抵消,相對不確定度可降至 0.5 dB 以下,這使得 CPX 方法能夠檢測 1 dB 以下的路面性能差異。

CPX 方法的優勢包括:高空間分辨率,能夠連續測量並識別路面聲學性能的局部變化,這對於路面質量控制與問題診斷特別有價值;良好的重現性,由於近場量測對環境條件不敏感,不同時間、不同天氣條件下的量測結果一致性較好;測試效率高,可在正常交通速度下連續測量,短時間內可覆蓋大範圍道路網絡;直接評估路面特性,排除車輛因素的影響,使得量測結果能夠準確反映路面本身的聲學性能。CPX 方法的局限性包括:設備成本高,專用的 CPX 拖車系統造價昂貴,需要專業維護;需要專用輪胎(SRTT),這些輪胎供應有限且價格較高;量測結果為近場參數,與實際交通噪音(遠場傳播後的噪音)的關係需要透過轉換模型建立;對輪胎狀態敏感,SRTT 的磨損、溫度等狀態變化會影響量測結果,需要定期監測與更換輪胎。

#### 4.4.2 OBSI 方法 (OBSI Method)

OBSI 方法(On-Board Sound Intensity method)是使用車載聲強探頭量測輪胎附近聲強級的近場噪音量測方法,由美國聯邦公路管理局(FHWA)與相關研究機構在 1990 年代末期開發,主要用於美國國家道路系統的路面噪音評估計畫。OBSI 方



法的基本原理與 CPX 方法相似,都是在輪胎附近近場位置進行量測,但關鍵區別在於量測參數:CPX 使用聲壓麥克風量測噪音值,而 OBSI 使用聲強探頭量測聲強級。聲強(sound intensity)是單位面積上的聲能流動,是向量量,既有大小又有方向,聲強量測使用兩支緊密間隔的麥克風組成的聲強探頭,透過測量兩支麥克風間的聲壓差與相位差來計算聲強。聲強量測的主要優勢在於能夠有效抑制反射聲與背景噪音的干擾,因為聲強量測本質上是方向性量測,僅對特定方向(探頭軸向)的聲能流動響應,對於來自其他方向的聲波(如反射聲、環境噪音)以及駐波(standing wave)的響應較弱或為零。

OBSI 系統的配置包括:測試車輛,通常為標準的輕型卡車或 SUV,右前輪或右後輪作為測試輪位,安裝標準參考輪胎;聲強探頭,安裝於測試輪胎附近,典型位置為輪胎外側,距離輪胎接觸中心約 0.15 公尺,高度距路面約 0.10 公尺,探頭軸向指向輪胎接觸區域;數據擷取與分析系統,包括聲強分析儀、GPS 定位系統、速度測量系統、路面溫度測量系統等。OBSI 系統通常無需像 CPX 那樣的大型聲學遮蔽結構,因為聲強量測本身具有較強的抗干擾能力,但仍需要適當的麥克風保護結構以避免風噪與機械振動的影響(Ruhala, 2007)[22]。

OBSI 測試程序與 CPX 相似,車輛以恆定速度(通常為 60 mph,約 97 km/h)行駛於待測路面上,連續記錄聲強級與相關參數。美國的 OBSI 標準方法(AASHTO TP 76-13)詳細規定了測試條件與程序。測試速度固定為 60 mph,這一速度的選擇反映了美國州際公路與主要幹道的典型行駛速度。路面需為乾燥狀態,氣溫在 5°C 至 35°C 範圍內,路面溫度在 10°C 至 50°C 範圍內。測試輪胎為指定的 SRTT,規格與 CPX 使用的 P1 型 SRTT 相同或相似,需要經過嚴格的破胎(break-in)程序,通常要求以測試速度行駛至少 200 英里,以確保輪胎達到穩定的性能狀態。聲強探頭的定位精度要求很高,位置偏差±5 毫米可能引入 0.5 dB 的量測差異,因此需要使用精密的定位夾具與檢查程序(Zofka et al., 2017)[23]。

OBSI 量測的參數為聲強級(sound intensity level),以 dB(re 1 pW/m<sup>2</sup>)表示。聲強級的計算基於聲強探頭測得的聲壓差信號與平均聲壓信號,透過頻域處理得到各頻帶的聲強,再積分得到總聲強級或 A 加權聲強級。OBSI 量測結果通常以 1/3 倍



頻程聲強級頻譜形式呈現,涵蓋 400 Hz 至 5000 Hz 的頻率範圍,這一範圍包含了輪胎/路面噪音的主要能量。總體 OBSI 指標通常為 400-5000 Hz 頻帶的 A 加權聲強級總和,記為 OBSI\_Total。對於測試路段,計算整段的平均 OBSI 值,通常要求測試路段長度至少為 200 英尺(約 60 公尺),以獲得統計上穩定的平均值。

OBSI 方法與 CPX 方法的量測結果具有較好的相關性,但數值上存在系統性差異。研究顯示,對於相同的路面與測試條件,OBSI 聲強級(dB re 1 pW/m<sup>2</sup>)通常比 CPX 噪音值(dB(A))高約 40 至 50 dB,這一差異源於聲強與聲壓的物理量綱不同以及量測位置與方向的差異。儘管數值不同,兩種方法對於不同路面的相對排序通常是一致的,相關係數可達 0.85 以上,這表明兩種方法評估路面聲學性能的結果基本一致。然而,對於某些特殊路面類型(如多孔瀝青、表面紋理非常粗糙的路面),兩種方法的相對評估可能有所差異,這反映了聲壓量測與聲強量測對不同聲場特徵的敏感度不同。

OBSI 方法的優勢包括:抗干擾能力強,聲強量測對反射聲與背景噪音的抑制效果優於聲壓量測,特別是在複雜聲學環境(如交通密集區域、有建築物反射的路段)下,OBSI 能夠獲得更可靠的輪胎噪音數據;方向性信息,聲強是向量量,提供了聲能流動方向的信息,這對於理解噪音輻射特性與識別主要噪音源具有價值;量測精度高,在良好操作條件下,OBSI 的重現性標準差可達 0.3-0.5 dB,與 CPX 相當或略優。

OBSI 方法的局限性包括:設備複雜度高,聲強探頭與分析系統比普通聲壓測量系

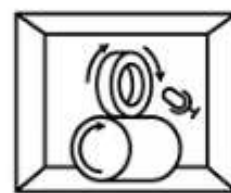
統更複雜,對儀器校準與相位匹配的要求更嚴格;對風噪敏感,雖然聲強量測能抑制某些干擾,但對於探頭表面的風噪仍然敏感,需要有效的防風保護;數據處理複雜,聲強計算涉及複雜的信號處理算法,對硬體與軟體的要求較高;應用較局限,OBSI 主要在美國發展與應用,國際標準化程度不如 CPX。

CPX 與 OBSI 方法的選擇取決於具體應用需求與地區偏好。在歐洲,CPX 方法因其國際標準化(ISO 11819-2)而成為主流,廣泛用於路面噪音法規遵循、低噪音路面認證等應用。在美國,OBSI 方法因其技術優勢與在美國道路網絡評估計畫中的應用而得到推廣。近年來,一些研究嘗試發展 CPX 與 OBSI 的轉換模型,以實現兩種方法量測結果的互通,促進國際間數據的比較與共享。Zofka 等人(2017)的研究透過在波蘭道路上同時進行 CPX 與 OBSI 測試,建立了兩種方法的統計轉換關係,為方法間的協調提供了基礎[23]。

#### 4.4.3 室內滾筒測試 (Indoor Drum Test)

室內滾筒測試是在實驗室環境中使用大型滾筒設施量測輪胎噪音的方法,其基本配置是將輪胎安裝並加載於一個大直徑的旋轉滾筒表面,滾筒旋轉驅動輪胎滾動,在輪胎附近近場位置安裝麥克風量測噪音。室內滾筒測試結合了近場量測與實驗室測試的優勢,能夠在高度可控的環境中精確評估輪胎噪音特性,是輪胎設計開發與研究的重要工具。滾筒測試方法的發展與輪胎噪音研究的歷史幾乎同步,早在 1970 年代,Ejsmont 等研究者就系統性開發了滾筒測試方法並驗證其與實車道路測試的相關性[8]。經過數十年的發展,現代滾筒測試設施已經演進為高度精密的測試平台,不僅能夠進行噪音量測,還能同步進行振動量測、力學特性測試以及聲源定位等先進分析。

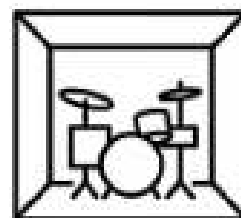
滾筒設施的核心組件是大型滾筒,通常為鋼製或混凝土製圓柱結構,直徑範圍從 1.5 公尺至 4.0 公尺,典型值為 2.5 至 3.0 公尺。滾筒直徑是影響測試代表性的關鍵參數,直徑越大,滾筒表面曲率越接近平坦路面,輪胎的變形模式與接觸特性越接近實際行駛情況。研究顯示,為了使滾筒曲率效應對噪音的影響小於 1 dB,滾筒直徑應至少為輪胎外徑的 3 倍以上。對於典型乘用車輪胎(外徑約 650 mm),滾筒直徑應至少為 2.0 公尺;對於較大的輪胎或要求更高精度的測試,需要更大直徑的滾筒。滾筒表面的處理方式對噪音特性有決定性影響,直接的光滑鋼製表面與實際路面的聲學特性差異很大,因此許多先進滾筒設施會在鋼製滾筒表面鋪設真實的路面材料(如瀝青混



凝土或水泥混凝土)或進行表面紋理加工(如噴砂、切槽等)來模擬路面特性(Clar-Garcia et al., 2016)[4]。

滾筒驅動系統需要提供精確可控的轉速,典型的驅動方式為電機驅動,透過變頻器控制實現寬範圍的速度調節,通常可覆蓋等效車速 20 至 200 km/h 的範圍。速度控制精度要求為 $\pm 0.5\%$ ,以確保量測條件的重現性。輪胎加載系統用於將輪胎壓向滾筒並施加規定的垂直載荷,典型的加載方式為液壓或氣壓加載,能夠精確控制載荷大小並保持穩定。載荷範圍通常為 200 至 10000 N,涵蓋從輕型乘用車到重型商用車輪胎的需求。輪胎安裝於可調節的懸臂或框架上,能夠調整輪胎與滾筒的對齊狀態(側傾角、前束角等)以模擬不同的行駛條件。

聲學測量系統在滾筒測試中通常採用近場麥克風配置,將麥克風安裝在輪胎附近固定位置,距離輪胎外表面或接觸區域約 0.1 至 0.3 公尺。麥克風數量與位置可根據測試目的靈活配置,典型的配置包括:單麥克風配置,在輪胎側面中央位置放置一支麥克風,這是最簡單的配置,適用於常規噪音級評估;



雙麥克風配置,在輪胎前方與後方(相對於滾動方向)各放置一支麥克風,類似於 CPX 方法,能夠區分進入與離開接觸區域的噪音特徵;多麥克風陣列配置,在輪胎周圍多個位置(如胎面、胎肩、胎壁等)放置麥克風,能夠識別不同區域的噪音輻射特性,這種配置常用於噪音源識別研究。聲學測量環境的控制也很重要,滾筒測試通常在專用的半無響室或噪音隔離室內進行,室內牆壁與天花板鋪設吸音材料以減少反射,地面可為剛性反射面或部分吸音處理,以模擬實際道路的聲學條件。

滾筒測試的操作程序包括:輪胎準備,將測試輪胎安裝於加載裝置,調整氣壓至規定值,進行目視檢查確認無異常;滾筒預熱,啟動滾筒旋轉至測試速度並保持一定時間(通常 5-10 分鐘),使滾筒與輪胎達到穩定的溫度狀態;輪胎加載,施加規定的垂直載荷,確認載荷穩定;噪音量測,在穩定運行條件下記錄麥克風信號,記錄時間通常為 10 至 60 秒,以獲得統計上穩定的平均值;速度掃描(可選),改變滾筒轉速進行多速度測試,獲得速度-噪音關係曲線。測試期間需要監測的參數包括滾筒轉速(對應等效車速)、輪胎載荷、輪胎氣壓、輪胎溫度、環境溫度與濕度、背景噪音級等,這些參數的記錄對於結果解釋與重現性驗證至關重要。

滾筒測試結果與道路測試結果的相關性是評估滾筒方法有效性的關鍵。大量研究對比了滾筒測試與道路測試(包括 CPX 測試與滑行測試)的結果,總體結論是兩者具有良好的相關性,但存在系統性差異。滾筒測試的噪音級通常比道路測試低 2 至

5 dB,這一差異的主要來源包括:滾筒曲率效應,即使使用大直徑滾筒,輪胎變形模式與實際路面仍有差異,導致噪音生成機制的微妙變化;滾筒表面與實際路面的差異,即使鋪設了路面材料,滾筒表面的聲學阻抗、紋理特性與實際道路仍有差別;邊界條件差異,滾筒測試中輪胎僅單輪加載且周圍為半無響環境,而實際車輛為多輪同時運行且周圍為開放環境,這些邊界條件的差異影響聲場特性與量測結果。為了建立滾筒測試與道路測試的轉換關係,許多研究進行了系統性的對比實驗,測試大量不同類型的輪胎,建立統計回歸模型。Swieczko-Zurek 等人(2014)的研究對比了三種不同滾筒設施與道路 CPX 測試的結果,發現雖然絕對值存在差異,但透過適當的修正因子(correction factor),滾筒結果可以合理地預測道路結果,修正後的均方根誤差(RMSE)可達 1.0 dB 以下[12]。

滾筒測試的優勢包括:環境條件高度可控,溫度、濕度、背景噪音等參數可精確調控,消除環境變異性對量測結果的影響;測試效率高,可快速更換輪胎樣品並進行連續測試,無需車輛往返加速與等待,大幅縮短測試週期;便於實施先進測試技術,室



內環境便於安裝複雜的測量儀器如多點振動傳感器、高速相機、聲學全息陣列等,實現多物理場同步測量;全天候測試能力,不受天候影響,可全年進行測試,保障研發進度;安全性好,無需在道路上進行高速測試,避免交通風險。滾筒測試的局限性包括:代表性限制,滾筒曲率與表面特性的差異使得測試結果與實際道路情況存在系統性偏差,絕對值不能直接用於法規符合性判定;設備投資大,大型滾筒設施與半無響室的建設成本高昂,通常僅大型輪胎企業或研究機構具備;滾筒表面維護,鋪設路面材料的滾筒表面會隨測試累積而磨損,需要定期檢查與更新,維護成本較高;測試條件受限,滾筒測試通常僅測試單一輪胎,難以模擬整車多輪同時運行的情況,對於評估車輛整體噪音性能有局限。

滾筒測試在輪胎研發中的應用非常廣泛,主要場景包括:設計方案快速篩選,在輪胎設計開發階段,可快速測試不同胎紋設計、橡膠配方、結構參數的噪音性能,識別最優方案而無需製作大量原型胎進行道路測試;參數敏感性分析,系統性改變單一設計參數(如胎紋深度、節距排列、溝槽寬度等)並量測噪音變化,建立參數-性能關係,指導設計優化;噪音機制研究,結合噪音量測與振動量測、高速攝影等技術,深入研究輪胎噪音生成的物理機制,如胎紋衝擊過程、空氣泵浦現象、振動模態的激發與輻射等;質量控制,對生產輪胎進行抽樣噪音測試,確保產品質量的一致性;溫度與磨損影響研究,在可控溫度條件下測試輪胎性能,或對同一輪胎進行長期磨

損測試並監測噪音變化,這些研究在道路測試中很難實施(Kowalski et al., 2013)[24]。

近年來,滾筒測試技術的發展趨勢包括:滾筒表面技術的改進,開發更逼真的路面模擬技術,如可更換的路面材料模塊、主動紋理控制技術等,以提高滾筒測試的代表性;多物理場集成測試,將噪音測試與力學測試(滾動阻力、抓地力等)、振動測試、溫度場測量等集成於單一平台,實現全面的輪胎性能評估;虛實結合測試,將滾筒實測數據與數值模擬(如有限元分析、邊界元分析)相結合,利用模擬彌補實測的局限(如外推到不同路面條件),提高測試的適用範圍;自動化與智能化,開發自動化的輪胎裝卸與測試流程,應用人工智慧技術進行數據分析與異常檢測,提高測試效率與質量(Azizi, 2020)[25]。

#### 4.5 聲強量測技術 (Sound Intensity Measurement)

聲強量測技術是一種能夠測量聲能流動方向與大小的聲學測量方法,在輪胎噪音研究中具有獨特的優勢,特別是在噪音源識別、噪音功率測定以及複雜聲學環境中的測量方面。聲強(sound intensity)定義為單位時間內透過單位面積的聲能,其數學表達式為聲壓與質點振速的乘積的時間平均:



$$I = \langle p(t) \times u(t) \rangle$$

其中  $p(t)$  為瞬時聲壓,  $u(t)$  為質點振速,  $\langle \rangle$  表示時間平均。聲強是向量量,具有大小和方向,方向為聲能流動的方向。這一特性使得聲強量測能夠區分來自不同方向的聲波,這是聲壓量測無法做到的。聲壓是標量量,僅有大小無方向,聲壓麥克風對來自任何方向的聲波都響應,因此在複雜聲場中(如存在多個聲源、存在反射等),聲壓量測結果是所有聲波的疊加,難以識別主要聲源的貢獻。

聲強量測的實施使用聲強探頭(sound intensity probe),其基本結構是兩支高度相似的聲壓麥克風以很小的間距(通常 6 至 50 毫米)並排安裝,兩支麥克風之間的連線定義了探頭的軸向。聲強量測的原理基於有限差分近似,質點振速可透過兩支麥克風位置之間的聲壓梯度近似:

$$u \approx -(1/\rho) \times \int (\partial p / \partial r) dt \approx -(1/\rho \Delta r) \times \int (p_2 - p_1) dt$$

其中  $\rho$  為空氣密度,  $\Delta r$  為麥克風間距,  $p_1$  和  $p_2$  為兩支麥克風測得的聲壓。聲強可透過兩支麥克風信號的互譜(cross-spectrum)計算,在頻域表達為:

$$I(f) = (1/\rho \Delta r) \times \text{Im}[G_{12}(f)]$$

其中  $G_{12}(f)$  為兩支麥克風信號的互功率譜密度,  $\text{Im}$  表示取虛部。這一計算方法由專用的聲強分析儀實時執行,輸出各頻帶的聲強值以及總聲強級。

聲強量測在輪胎噪音研究中的應用主要包括:噪音源識別與定位,透過在輪胎周圍多個位置進行聲強量測,根據聲強的大小與方向識別主要噪音輻射區域,例如區分胎面、胎肩、胎壁等不同部位的噪音貢獻;噪音功率測定,透過在包圍聲源的假想封閉面上進行聲強量測並積分,可以確定聲源的聲功率(sound power),這是聲源噪音輻射能力的本質量度,不受測量環境的影響;複雜環境中的測量,在存在反射或背景噪音的環境中,聲強量測能夠有效抑制干擾,測量目標聲源的淨聲能輸出;噪音傳播路徑分析,透過在不同位置測量聲強的大小與方向,可以追蹤聲能的傳播路徑,理解噪音如何從源頭傳播到受影響位置(Park & Kim, 2001)[26]。

聲強量測的實施需要滿足一些技術條件。首先是麥克風的相位匹配,兩支麥克風的頻率響應與相位響應必須高度一致,相位差應小於 0.1 度(在感興趣的頻率範圍內),否則會引入顯著的量測誤差。商用聲強探頭的麥克風都經過嚴格的匹配與配



對,並定期進行相位校準。其次是麥克風間距的選擇,這涉及測量頻率範圍與精度的權衡。較小的間距(如 6 mm)適用於高頻測量(可達 10 kHz),因為小間距能夠更準確地近似聲壓梯度,但小間距在低頻時兩支麥克風信號差異很小,信噪比低,量測精度下降。較大的間距(如 50 mm)適用於低頻測量(可低至 50 Hz),但在高頻時有限差分近似的誤差增大,且可能出現空間混疊(spatial aliasing)。實務上,通常根據感興趣的主要頻率範圍選擇適當的間距,或使用可變間距探頭進行寬頻測量。

聲強量測的誤差來源主要包括相位誤差、有限差分誤差以及環境因素影響。相位誤差是由麥克風相位不匹配或校準不準確引起的,會導致聲強計算偏差,特別是在反應場(reactive field,聲壓高但聲強低的區域)中,微小的相位誤差可能導致聲強測量完全失效。有限差分誤差是由於用離散的兩點聲壓差近似連續的聲壓梯度引起的,當麥克風間距與聲波波長相當時,這一誤差變得顯著。環境因素如溫度梯度、氣流擾動會影響聲強測量的準確性,需要透過適當的防風措施與環境控制來減小影響。聲強測量的質量可透過壓強指標(pressure-intensity index)來評估,這是量測位置的噪音值與聲強級之差:

$$\delta pI = L_p - LI$$

其中  $L_p$  為噪音值,  $L_I$  為聲強級。 $\delta pI$  值越小,表示該位置越接近自由聲場,聲強量測越可靠; $\delta pI$  值過大(如超過 10 dB)表示該位置為強反應場,聲強量測可能不可靠。在實際測量中應監測並記錄  $\delta pI$  值,以評估測量質量。

聲強量測在移動車輛上的應用面臨特殊挑戰,這正是 OBSI 方法發展的背景。在車輛行駛過程中進行聲強量測需要解決振動隔離、氣流干擾、快速數據處理等問題。現代 OBSI 系統採用減振支架固定聲強探頭,減少車輛振動對麥克風的影響;使用氣動防風罩保護探頭,減少相對風速產生的風噪;採用實時信號處理技術,在線計算聲強級並與 GPS 定位數據同步記錄。這些技術措施使得車載聲強量測成為路面噪音評估的有效工具。聲強量測的未來發展趨勢包括:三維聲強探頭的應用,傳統聲強探頭僅測量單一方向的聲強分量,三維探頭(由多個麥克風組成,能夠同時測量三個正交方向的聲強分量)能夠提供完整的聲強向量信息,更全面地描述聲場特性;聲強成像技術,結合聲強量測與聲學陣列技術,實現聲源的可視化與定量評估;聲強與振動聯合測量,同步測量結構振動與輻射聲強,建立振動-聲輻射的轉移函數,為噪音控制提供更直接的指導。

#### 4.6 聲源定位技術 (Sound Source Localization)

聲源定位技術是識別與定位噪音源空間位置的先進聲學測量方法,在輪胎噪音研究與控制中發揮著越來越重要的作用。傳統的噪音量測方法如單點聲壓測量或聲強測量,雖然能夠量化噪音的大小,但無法提供噪音源的精確空間分布信息,而這種



信息對於理解噪音生成機制、識別主要噪音貢獻區域以及制定針對性的降噪措施至關重要。聲源定位技術透過使用多個空間分布的麥克風(麥克風陣列)同時測量聲場,結合先進的信號處理算法,能夠重建聲源的空間分布,以可視化的形式(如聲源分布圖、熱力圖等)呈現噪音源的位置與強度,為噪音診斷與控制提供直觀、定量的工具。

聲源定位技術的發展經歷了從簡單到複雜、從低分辨率到高分辨率的演進過程。最早期的聲源定位方法基於簡單的到達時間差(time difference of arrival, TDOA)原理,透過測量聲波到達不同麥克風的時間差來推算聲源位置,這種方法適用於單一點聲源定位,但對於複雜的分布聲源或多個聲源並存的情況效果不佳。1980 年代發展起來的波束成形(beamforming)技術顯著提升了聲源定位的能力,特別是延遲求和波束成形(delay-and-sum beamforming)因其原理簡單、實施方便而得到廣泛應用。1990 年代,近場聲學全息(nearfield acoustic holography, NAH)技術的發展

為聲源定位帶來了革命性進步,NAH 能夠在極近距離(通常數倍波長內)實現極高空間分辨率的聲場重建,將可視化精度提升到厘米甚至毫米級。進入 21 世紀,計算能力的飛速提升與先進算法的發展,使得實時、大規模的聲源定位成為可能,商用的聲學照相機(acoustic camera)系統能夠實時顯示聲源分布的動態影像,將聲學測量提升到新的水平(Batel et al., 2003)[6]。

聲源定位在輪胎噪音研究中的應用場景包括:設計驗證與優化,在輪胎設計階段,透過聲源定位識別噪音輻射的主要區域(如特定的胎紋塊、溝槽、胎肩等),評估設計方案的噪音特性,指導結構優化;故障診斷,對於噪音異常的輪胎,聲源定位能夠快速識別異常噪音的具體位置,診斷問題原因(如製造缺陷、異物嵌入等);機制研究,透過高時空分辨率的聲源定位,觀察輪胎滾動過程中噪音源的動態演變,理解噪音生成的時空特徵與物理機制;降噪措施評估,定量比較降噪措施實施前後的聲源分布變化,評估措施的效果與作用機理;整車噪音分解,在車輛透過噪音測試中應用聲源定位,區分輪胎噪音與其他噪音源(動力系統、氣動噪音等)的相對貢獻,為整車噪音控制提供依據。

#### 4.6.1 麥克風陣列 (Microphone Array)

麥克風陣列是聲源定位技術的硬體基礎,由多個麥克風按照特定的空間構型布置組成,透過同步採集多點聲壓數據,為後續的信號處理與聲源重建提供原始輸入。麥克風陣列的設計涉及多個關鍵參數的選擇與優化,包括陣列構型、麥克風數量、陣列孔徑、麥克風間距等,這些參數直接影響聲源定位的性能指標如空間分辨率、測量頻率範圍、旁瓣水平、動態範圍等。



陣列構型是指麥克風在空間中的排列方式,常見的構型包括:線性陣列(linear array),麥克風排列在一條直線上,這是最簡單的構型,適用於一維聲源定位或作為二維陣列的基本單元,但其定位能力僅限於與陣列軸垂直的平面內,無法提供完整的二維或三維定位信息;平面陣列(planar array),麥克風分布在一個平面上,這是輪胎噪音測量最常用的構型,陣列平面通常平行於待測輪胎表面,能夠實現輪胎表面的二維聲源分布成像;球形陣列(spherical array),麥克風分布在球面上,能夠實現全方向的三維聲源定位,但製作與校準複雜,在輪胎噪音測量中較少使用。對於平面陣列,麥克風的具體分布方式也有多種選擇:規則網格(regular grid),麥克風按照矩形或六邊形網格均勻分布,優點是設計簡單、便於分析,缺點是容易產生較高的柵格旁瓣(grating lobes);隨機分布(random distribution),麥克風位置隨機或半隨機分

布,能夠有效抑制柵格旁瓣,改善空間分辨率,是現代聲學陣列的主流設計;對數螺旋分布(logarithmic spiral distribution),麥克風沿對數螺旋線分布,能夠在寬頻範圍內提供相對均衡的性能;輪形或 spoke 形分布,麥克風沿徑向輻射線分布,這種構型特別適用於輪胎噪音測量,陣列中心對齊輪胎接觸中心,能夠充分利用輪胎噪音的對稱性特徵(Nowak, 2023)[27]。

麥克風數量是影響陣列性能與成本的關鍵參數。更多的麥克風能夠提供更多的空間取樣點,改善空間分辨率、降低旁瓣水平、提高動態範圍,但也增加系統成本、複雜度與數據處理負擔。實務上,麥克風數量的選擇需要在性能需求與經濟可行性之間權



衡。對於輪胎噪音測量,典型的陣列包含 30 至 100 支麥克風,能夠在主要感興趣的頻率範圍(如 1-5 kHz)提供合理的空間分辨率(數厘米級)。一些高端系統採用更大規模的陣列,如 Brüel & Kjaer 的 wheel array 包含 108 支麥克風,專門為車輪噪音測量優化設計,能夠在寬頻範圍內提供優異的成像質量(Gade et al., 2015)[28]。

陣列孔徑(array aperture)是指陣列的物理尺寸,對於平面陣列,通常指陣列的直徑或對角線長度。陣列孔徑直接影響空間分辨率與低頻性能,根據衍射理論,陣列的空間分辨率極限(瑞利判據)約為:

$$\Delta r \approx \lambda \times R / D$$

其中  $\lambda$  為聲波波長, $R$  為聲源到陣列的距離, $D$  為陣列孔徑。這一公式顯示,更大的陣列孔徑能夠提供更高的空間分辨率,但受限於實際應用的幾何約束,陣列孔徑不能無限增大。對於輪胎噪音測量,陣列孔徑通常為 0.5 至 1.5 公尺,陣列與輪胎的距離通常為 0.5 至 2.0 公尺,在這種配置下,對於 2 kHz 的聲波( $\lambda \approx 0.17$  m),理論空間分辨率約為 0.1 至 0.3 公尺,實際可達到的分辨率取決於信噪比、算法等其他因素。麥克風間距影響陣列的高頻性能與空間混疊特性。根據空間取樣理論,為了避免空間混疊(spatial aliasing),麥克風間距應小於半波長:

$$d < \lambda / 2$$

這一條件限制了陣列能夠無混疊成像的最高頻率。對於均勻間距陣列,若間距為 0.05 公尺,最高無混疊頻率約為 3.4 kHz。對於隨機或非均勻分布陣列,空間混疊的影響較為複雜,通常表現為高頻時旁瓣水平升高與虛假聲源的出現,但不如均勻陣列那樣嚴重。實務上,陣列設計需要平衡高頻性能與麥克風數量,通常在陣列中央區域採用較密集的麥克風分布以提高高頻分辨率,在外圍採用較稀疏的分布以擴大陣列孔徑並改善低頻性能。

麥克風選擇與校準也是陣列系統的重要考量。陣列中的所有麥克風應具有相同或高度相似的頻率響應特性,靈敏度差異應小於 1 dB,相位差異應小於 1 度,以確保測量數據的一致性。商用陣列系統通常使用經過嚴格配對的測量麥克風,並提供完整的麥克風個體校準數據。陣列系統還需要精確的幾何校準,即精確測定每支麥克風的空間位置,位置誤差應小於 1 毫米,因為位置誤差會引入相位誤差,影響波束成形的精度。現代陣列系統通常採用精密的機械框架或光學測量技術來確保幾何精度。

數據擷取系統需要實現多通道同步採集,通道數等於麥克風數量,典型的陣列系統需要 32 至 128 通道的同步採集能力。取樣率需要足夠高以覆蓋感興趣的頻率範圍,對於輪胎噪音測量,通常採用 48 kHz 或更高的取樣率。通道間的時間同步精度要求很高,抖動(jitter)應小於 1 微秒,以避免引入相位誤差。現代數據擷取系統通常採用分布式架構,多個採集模塊透過高速網絡連接並採用精密的時鐘同步技術(如 IEEE 1588 精密時間協議),實現大規模通道的同步採集。

陣列系統在輪胎噪音測量中的應用配置包括:靜態配置,陣列安裝在固定位置,輪胎在滾筒上或拖車上經過陣列前方,進行靜態或準靜態測量,這種配置適用於實驗室環境或測試道的固定測量點;移動配置,陣列安裝在移動平台(如車輛或機器人平台)上,跟隨輪胎移動進行測量,這種配置適用於道路調查或動態測試;同步移動配置,陣列與輪胎保持固定的相對位置,同步移動並連續測量,這是實現移動參考座標系聲學全息的基礎配置。

#### 4.6.2 聲學全息 (Acoustic Holography)

聲學全息(acoustic holography)是一種基於波動方程的高分辨率聲場重建技術,能夠從在某一測量面(通常稱為全息面)上測得的聲壓數據,透過數學反演計算出聲源面或任意其他平面上的聲場分布,包括聲壓、質點振速、聲強等完整的聲場信息。



聲學全息的理論基礎是亥姆霍茲方程 (Helmholtz equation) 與傳播算子 (propagation operator),其基本思想是將測量面上的聲場視為聲源面輻射聲場經過空間傳播後的結果,透過反演傳播過程,可以推算出聲源面上的聲場分布。

近場聲學全息(Nearfield Acoustic Holography, NAH)是聲學全息最重要的應用形式,其核心特點是全息面非常接近聲源(通常在數倍波長以內),此時測量聲場包含豐富的倏逝波(evanescent waves)成分,這些成分攜帶了聲源的高空間頻率(即細節)信息,使得 NAH 能夠實現遠超傳統方法的空間分辨率,理論上可達亞波長級別。

NAH 的數學表述基於平面波譜展開,聲場在某一平面上的分布可表示為平面波的疊加:

$$p(x, y, z) = \iint A(k_x, k_y) \times \exp[i(k_x \times x + k_y \times y \pm k_z \times z)] dk_x dk_y$$

其中 $(k_x, k_y, k_z)$ 為波數向量分量, $A(k_x, k_y)$ 為平面波譜函數, $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ (對於傳播波)或 $k_z = i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}$ (對於倏逝波), $k$ 為波數。NAH 的實施步驟包括:在全息面上測量聲壓分布,通常使用麥克風陣列進行空間取樣;對測量數據進行二維傅立葉變換,得到全息面上的聲壓平面波譜  $P_h(k_x, k_y)$ ;應用傳播算子,計算聲源面上的聲壓平面波譜  $P_s(k_x, k_y) = P_h(k_x, k_y) \times G(k_x, k_y, \Delta z)$ ,其中  $G$  為傳播算子, $\Delta z$  為全息面到聲源面的距離;對聲源面波譜進行逆二維傅立葉變換,得到聲源面上的空間聲壓分布。

NAH 在輪胎噪音測量中的應用面臨特殊挑戰,主要是輪胎滾動的運動性。傳統 NAH 假設聲源靜止不動,但輪胎在測量過程中是滾動的,聲源與麥克風陣列之間存在相對運動。為了克服這一問題,發展了移動參考座標系聲學全息(moving frame



acoustic holography)技術,其核心思想是將測量座標系固定於移動的聲源(輪胎)上,而非固定於地面,在這一移動座標系中,聲源是靜止的,傳統的 NAH 理論可以應用。移動座標系 NAH 的實施需要特殊的測量配置,通常將麥克風陣列安裝在與輪胎同步移動的平台上,或者在測量數據中精確補償相對運動引起的都卜勒效應(Doppler effect)與相位偏移。Park 與 Kim (2001)發展了移動座標系 NAH 技術並成功應用於車輛透過噪音測量,能夠在車輛透過過程中重建輪胎與引擎的聲壓與聲強分布,揭示了不同運行條件下噪音源的變化特徵[26]。

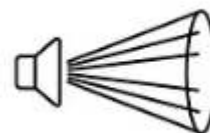
NAH 的優勢包括:超高空間分辨率,理論上可達亞波長級別,實務上在良好條件下可達  $\lambda/10$  至  $\lambda/5$ ,對於 1 kHz 聲波( $\lambda \approx 0.34$  m),空間分辨率可達 3 至 7 厘米,遠優於傳統遠場測量;完整的聲場信息,NAH 不僅重建聲壓分布,還能計算質點振速、聲強、聲功率等完整的聲場參數,為深入分析提供豐富信息;倏逝波捕獲,NAH 能夠捕獲並利用倏逝波信息,而這些信息在遠場已經衰減消失,無法被遠場方法獲取;反向傳播能力,NAH 可以將聲場從測量面反向傳播到聲源面,直接呈現聲源表面的振動與聲輻射特性。NAH 的局限性包括:測量距離受限,NAH 要求測量面非常接近聲源(通常數倍波長內),對於大型聲源或無法接近的聲源,這一要求難以滿足;高空間取樣密度要求,為了準確捕獲高空間頻率成分,需要非常密集的麥克風陣列,麥克風間距通常需要小於  $\lambda/4$  至  $\lambda/2$ ,對於高頻測量,這意味著需要大量的麥克風,

系統成本與複雜度大幅增加;對測量誤差敏感,NAH 的反演計算是數學上的不穩定問題(ill-posed problem),對測量噪音與誤差非常敏感,需要採用正則化(regularization)等技術來穩定計算,但這會降低空間分辨率;平面假設限制,傳統 NAH 基於平面波譜理論,適用於平面或近平面的聲源與測量面,對於曲面聲源(如輪胎),需要使用圓柱或球面 NAH 變體,但這些方法更為複雜。

等效源法(Equivalent Source Method, ESM)與邊界元法(Boundary Element Method, BEM)是 NAH 的重要替代或補充方法,它們不依賴於特定的幾何假設(如平面),能夠處理任意形狀的聲源,並且對測量距離的要求較 NAH 寬鬆。ESM 的基本思想是用一組虛擬的點源(或其他基本聲源如偶極子、四極子)來模擬真實聲源的聲輻射,透過最小化虛擬源輻射聲場與測量聲場的差異,確定虛擬源的強度,進而重建聲源的聲輻射特性。ESM 的優勢在於靈活性高、對測量距離與幾何形狀的適應性強,但需要選擇合適的虛擬源位置與數量,這通常需要經驗或優化算法。BEM 基於邊界積分方程,透過在聲源表面進行離散化,直接求解聲源表面的聲壓與法向振速分布,能夠處理複雜形狀與邊界條件,但計算複雜度較高,特別是對於大尺寸、高頻問題,計算資源需求很大。

#### 4.6.3 波束成形技術 (Beamforming Technology)

波束成形(beamforming)是一種基於陣列信號處理的聲源定位技術,透過對麥克風陣列測得的多通道信號施加適當的延遲與加權,形成指向特定方向或聚焦於特定空間點的聲學"波束",增強來自目標方向的聲波,抑制來自其他方向的聲波,從而實現聲源的空間定位與分離。波束成形技術源於雷達與聲納領域,在 1980 年代開始應用於聲學測量,因其原理直觀、實施相對簡單、計算效率較高而成為最廣泛應用的聲源定位方法之一。



延遲求和波束成形(Delay-and-Sum Beamforming, DSB)是最基本也是最常用的波束成形方法,其基本原理如下:假設需要探測空間中某一點(稱為聚焦點或掃描點)是否存在聲源,計算該點到陣列中各麥克風的距離,進而計算聲波從該點傳播到各麥克風的時間延遲;對各麥克風信號施加相應的時間延遲(或頻域中的相位調整),使得如果該點確實存在聲源,則經過延遲調整後的各麥克風信號同相疊加,互相增強;將延遲調整後的各麥克風信號求和(或求平方和、互功率譜和等統計量),得到該聚焦點的波束輸出;對感興趣空間區域內的所有點重複上述過程,生成整個區域的波束輸出分布圖,即聲源分布圖。DSB 的數學表述為(頻域形式):

$$B(r_f, f) = \sum [w_i \times P_i(f) \times \exp(-i \times k \times |r_f - r_i|)]$$

其中  $B$  為聚焦點  $r_f$  處的波束輸出,  $P_i(f)$  為第  $i$  支麥克風在頻率  $f$  的聲壓複數譜,  $r_i$  為第  $i$  支麥克風位置,  $k$  為波數,  $w_i$  為加權系數(可為均勻加權或採用窗函數加權以改善旁瓣性能)。波束輸出的模平方或功率譜密度常用作聲源強度的估計, 生成的聲源分布圖以顏色或等高線表示各空間點的聲源強度。

波束成形的性能指標包括: 空間分辨率(**spatial resolution**), 即區分相鄰兩個聲源的最小距離, 由陣列孔徑、頻率、聲源距離等因素決定, 典型值為數倍至數十倍波長; 主瓣寬度(**mainlobe width**), 波束輸出的峰值寬度, 反映了定位精度與分辨能力; 旁瓣水平(**sidelobe level**), 相對於主瓣, 旁瓣的強度水平, 旁瓣是波束成形不可避免的副產物, 代表來自非目標方向的聲波的殘餘響應, 較高的旁瓣會產生虛假聲源或降低動態範圍; 動態範圍(**dynamic range**), 能夠同時測量的最強與最弱聲源的強度比, 受限於旁瓣水平與測量噪音。

波束成形在輪胎噪音測量中的應用配置通常為: 將平面麥克風陣列放置在輪胎側方, 陣列平面平行於輪胎側面, 距離 0.5 至 1.5 公尺; 對輪胎滾動過程進行連續錄音, 通常持續數秒至數十秒; 選



擇感興趣的頻率範圍(如 1/3 倍頻程中心頻率 1 kHz 至 4 kHz), 對各頻帶獨立進行波束成形處理; 設定聚焦平面為輪胎表面或接觸區域所在平面, 對該平面進行二維掃描, 生成各頻帶的聲源分布圖; 將不同頻帶的結果疊加或選擇主要噪音頻帶的結果, 識別主要噪音輻射區域(Gombots, 2020)[29]。

先進波束成形方法的發展旨在克服傳統 DSB 的局限性, 提高分辨率、降低旁瓣、擴大動態範圍。主要的先進方法包括: 去卷積波束成形(**deconvolution beamforming**), 將波束成形的結果視為真實聲源分布與波束點擴散函數(**point spread function**)的卷積, 透過去卷積處理恢復真實聲源分布, 能夠顯著提高空間分辨率並降低旁瓣影響, 典型的去卷積算法包括 CLEAN 算法、CLEAN-SC 算法等; 自適應波束成形(**adaptive beamforming**), 根據實際測量數據自適應調整波束權重, 以最小化來自干擾方向的響應或最大化信噪比, 代表性方法包括最小方差無失真響應(**Minimum Variance Distortionless Response, MVDR**)波束成形、MUSIC 算法等, 這些方法在理想條件下能夠實現超分辨率, 但對測量誤差與模型失配較為敏感; 正則化波束成形(**regularized beamforming**), 在波束成形的優化問題中引入正則化項(如 L1 或 L2 懲罰項), 平衡定位精度與魯棒性, 抑制虛假聲源, 代表性方法包括函數波束成形(**Functional Beamforming**)、DAMAS 算法等。這些先進方法通常計算

複雜度較高,需要更強大的計算資源,但能夠提供更高質量的聲源定位結果,在高端聲學測量系統中得到應用。

波束成形的優勢包括:實施相對簡單,原理直觀,易於理解與實現;測量距離靈活,可在近場或遠場進行測量,對測量距離的要求較 NAH 寬鬆;實時性好,現代計算平台能夠實現實時或準實時的波束成形處理,支持動態聲源的實時監測;頻帶選擇性,可以對不同頻率範圍獨立處理,獲得頻率相關的聲源分布信息;可視化效果好,波束成形結果以直觀的聲源分布圖或疊加於光學影像的聲學熱力圖形式呈現,便於解釋與交流。波束成形的局限性包括:空間分辨率受限,受限於陣列孔徑與波長,分辨率通常為數倍波長,不如 NAH;旁瓣影響,旁瓣會產生虛假聲源或掩蓋弱聲源,降低動態範圍;定量精度有限,波束成形主要提供相對的聲源分布信息,對於聲源強度的定量估計精度不如聲強測量或聲學全息;相干噪音敏感,對於相干噪音(如反射聲、多徑傳播),波束成形的抑制能力有限,可能產生虛假聲源。

#### 4.7 量測不確定性與誤差分析 (Measurement Uncertainty and Error Analysis)

量測不確定性與誤差分析是確保輪胎噪音量測結果可靠性、可比較性以及合理解釋的基礎,在法規遵循判定、產品認證、科學研究等應用中具有關鍵意義。量測不確定性 (measurement uncertainty)是指量測結果的不確定程度,反映了



由於各種誤差來源的存在,真值可能落在的範圍。誤差(error)是指量測結果與真值之間的差異,可分為系統誤差(systematic error,具有恆定或可預測的偏差)與隨機誤差(random error,具有統計變異特性)。現代計量學強調不確定性的概念,因為在大多數情況下真值是未知的,不確定性提供了量測結果可信度的量化表達,而無需假設真值的存在。

輪胎噪音量測的不確定性來源眾多且複雜,可大致分為以下幾類:儀器不確定性 (instrument uncertainty),包括麥克風靈敏度校準的不確定性、頻率響應的不確定性、數據擷取系統的量化誤差與非線性失真、放大器增益的漂移等,這些不確定性通常由製造商提供或透過專業校準機構的校準報告確定,典型的麥克風系統綜合不確定性為 0.2 至 0.5 dB;環境變異性(environmental variability),包括氣溫、濕度、風速、氣壓、路面溫度等環境參數的變化對量測結果的影響,即使在規定的環境條件範圍內,這些參數的變化仍會引入不確定性,例如氣溫變化 10°C 可能引入 0.3 至 0.5 dB 的不確定性,風速變化對麥克風響應與聲波傳播的影響可引入 0.2 至 0.5 dB 的不確定性;測試條件變異性(test condition variability),包括車速控制誤差、輪胎狀

態(氣壓、溫度、磨損)變化、車輛載重誤差、駕駛操作差異等,這些因素對量測結果的影響因測試方法而異,對於透過噪音測試,速度控制誤差 $\pm 1$  km/h 可能引入約 0.2 dB 的不確定性,輪胎氣壓變化 $\pm 0.1$  bar 可能引入約 0.1 至 0.2 dB 的不確定性;測試場地變異性(test site variability),包括路面狀態(清潔度、濕度、溫度)變化、背景噪音波動、聲學邊界條件(反射物位置)變化等,對於戶外測試,這是重要的不確定性來源,不同測試道即使都符合 ISO 10844 標準,其聲學性能仍可能有 $\pm 0.5$  dB 的差異;數據處理不確定性(data processing uncertainty),包括信號處理算法的近似誤差、數值計算的舍入誤差、參數提取(如 LAmax 識別)的算法差異、修正模型(如溫度修正、背景噪音修正)的不確定性等,通常貢獻 0.1 至 0.3 dB 的不確定性。

不確定性評估的標準方法遵循 ISO/IEC Guide 98-3(GUM,測量不確定度表示指南)的原則,基本步驟包括:建立量測模型,明確定義被測量及其與輸入量的函數關係;識別不確定性來源,列舉所有可能影響量測結果的因素;評估各不確定性分量,



對於可透過統計分析評估的(如重複量測的標準差),採用 A 類評估方法;對於基於其他信息(如校準證書、經驗數據、理論模型)評估的,採用 B 類評估方法;計算合成不確定度(combined uncertainty),根據不確定性傳播律,將各不確定性分量合成為總不確定度,對於簡單的線性模型,若各分量相互獨立,合成標準不確定度為各分量標準不確定度的平方和的平方根;計算擴展不確定度(expanded uncertainty),將合成標準不確定度乘以包含因子(coverage factor,通常取  $k=2$  對應約 95%信賴水平),得到擴展不確定度,量測結果報告為"值 $\pm$ 擴展不確定度";進行靈敏度分析,評估各不確定性分量對總不確定度的相對貢獻,識別主要不確定性來源,為改進量測程序提供指導。

Berge 與 Gerhard (2023)對車輛噪音量測的不確定性進行了系統性研究,建立了詳細的不確定性預算(uncertainty budget),分析了 ISO 362 透過噪音測試各不確定性分量的貢獻[5]。研究結果顯示,主要不確定性來源包括:重複性(量測的統計變異性)約 0.3 至 0.5 dB,這是基於多次重複量測的標準差評估的;環境條件(主要是溫度與風速)約 0.2 至 0.4 dB;測試道路面狀態約 0.2 至 0.3 dB;車速控制約 0.1 至 0.2 dB;背景噪音修正約 0.1 至 0.2 dB(當修正量較大時不確定性增加);儀器校準約 0.2 至 0.3 dB。綜合這些分量,典型的透過噪音量測擴展不確定度( $k=2$ )為 0.8 至 1.2 dB(A),這一水平與其他國際研究結果一致。對於近場方法如 CPX,由於測試條件控制較好且對環境因素不敏感,不確定度可降至 0.6 至 1.0 dB。

量測不確定性對法規符合性判定的影響是一個重要的法規與技術問題。當量測結果接近法規限值時,考慮不確定性後可能導致符合性判定的改變。國際上對於如何處理不確定性有不同的方法:簡單比較法(**simple comparison**),直接將量測值與限值比較,不考慮不確定性,這是最簡單的方法但最不保守,存在誤判風險;防護帶法(**guard band**),設定一個嚴於法定限值的內部限值(防護帶),內部限值=法定限值- $k \times$ 不確定度,量測值需低於內部限值才判定為合格,這種方法對製造商較為嚴格,但能有效控制不合格產品誤判為合格的風險;共擔風險法(**shared risk**),考慮不確定性後,若量測值在限值 $\pm$ 不確定度範圍內(灰色區域),則需要採取進一步措施如增加測試次數、改善測試條件等來降低不確定性或做出更明確的判斷,這種方法在消費者風險與生產者風險之間尋求平衡。ISO 與 UNECE 等組織正在研究如何在車輛噪音法規中明確規定不確定性的處理方法,以提高法規執行的科學性與公平性。

誤差分析涉及識別與量化系統誤差,並採取措施進行修正或補償。系統誤差的主要來源包括:儀器系統誤差,如麥克風靈敏度的系統偏差(校準值與真值的差異)、頻率響應的偏離標稱特性、數據擷取系統的增益誤差等,這些誤差可透過精密校準識別並修正;方法誤差,如量測方法本身的近似或理想化假



設引入的誤差,例如遠場假設在非遠場條件下引入的誤差、平面波假設在球面波傳播中的誤差等,這些誤差通常難以直接測量,需要透過理論分析或數值模擬評估;環境條件系統偏差,如測試期間的平均溫度與參考溫度的系統性差異、測試道路面性能與標稱值的系統性偏離等,這些偏差可透過修正公式補償;數據處理誤差,如數值算法的截斷誤差、離散化誤差、窗函數引入的頻譜失真等,這些誤差可透過選擇更精確的算法或參數設置來減小。

系統誤差的識別方法包括:與參考標準比對,將量測結果與已知的參考標準或經過獨立驗證的量測值比較,系統性的偏差指示可能的系統誤差;國際比對實驗,參與多個實驗室的比對實驗,分析本實驗室結果與其他實驗室平均值的差異,識別系統性偏差;理論分析與數值模擬,透過理論模型或數值模擬預測量測方法的系統誤差,例如使用有限元法模擬輪胎噪音並用同樣的量測方法"虛擬測量",比較測得值與真值(模擬的真實聲場)的差異;靈敏度實驗,系統性改變某一參數並觀察量測結果的變化,識別該參數的系統性影響,例如系統性改變麥克風位置,觀察量測值的變化趨勢,識別位置誤差的系統性影響。

誤差修正的策略包括:校準修正,使用已知標準進行校準,確定儀器的系統偏差並建立修正曲線或修正因子,在量測中應用修正以消除系統誤差;環境修正,測量環境參數並應用修正公式,將量測結果修正到標準參考條件,例如溫度修正、氣壓修正、濕度修正等;方法修正,基於理論分析或實驗研究建立量測方法與參考方法之間的轉換關係,透過轉換修正消除方法間的系統差異,例如滾筒測試與道路測試的修正關係、CPX 測試與透過噪音測試的修正關係等;數據處理優化,採用更精確的算法或數據處理策略,減小數值誤差,例如使用更高階的插值方法、更精細的時頻分析參數、更適當的濾波器設計等。

量測質量保證(measurement quality assurance)體系是確保長期量測可靠性的系統性方法,包括:定期校準與驗證,按照規定的週期對儀器進行校準,對測試設施進行聲學



驗證,確保系統性能保持在規範範圍內;標準操作程序(Standard Operating Procedures, SOPs),建立詳細的測試程序文件,規範操作步驟、條件控制、數據處理等各環節,確保不同操作人員、不同時間的測試一致性;品質控制樣品(quality control samples),使用穩定性好的標準輪胎或參考輪胎定期進行測試,監測量測系統的長期穩定性與重現性,當品管樣品結果超出控制限時,提示系統可能存在異常需要調查;能力驗證(proficiency testing),參與外部組織的能力驗證計畫,定期測試標準樣品並與其他實驗室結果比較,客觀評估實驗室測試能力;文件與記錄管理,完整記錄測試條件、環境參數、異常情況、維護活動等信息,建立可追溯的測試檔案,支持結果的驗證與審核;持續改進,定期分析量測不確定性與誤差來源,識別改進機會,實施改進措施並評估效果,持續提升量測質量。

### 結論 (Conclusions)

本章的系統性分析顯示,輪胎噪音量測方法已由早期的經驗性與單點量測,發展為結合標準化程序、多物理量觀測與不確定性管理的成熟聲學技術體系。量測方法的選擇不僅影響量測結果本身,更直接決定其在法規遵循、工程研發與政策應用上的解釋力與適用性。遠場量測方法如透過噪音量測,在交通噪音管制與型式認證中仍具不可取代的地位,能夠提供具環境代表性的整體噪音評估;然而,其對於輪胎與路面本質噪音特性的解析能力有限,難以有效區分不同噪音源的貢獻。相較之下,近場量測方法如 CPX 與 OBSI,能在高度控制的條件下直接量測輪胎-路面交互作用所產生的噪音特性,對於輪胎設計優化、路面聲學性能評估及降噪措施成效驗證具有高度價值。然而,這類方法在量測結果與實際交通環境之代

表性、以及與法規透過噪音結果的轉換關係上，仍需透過系統性比對研究與校正機制加以補強。

本章亦凸顯量測不確定性在輪胎噪音評估中的關鍵角色。即使在高度標準化的測試條件下，輪胎噪音量測仍不可避免地受到儀器誤差、環境變異、程序差異與數據處理假設的影響。當量測結果接近法規限值或設計目標時，忽略不確定性將可能導致錯誤判定。因此，將不確定性分析納入量測與決策流程，已成為現代輪胎噪音量測不可或缺的一環。

以下是輪胎噪音量測方法的摘要說明：

#### 4.1 量測方法概述 (Overview of Measurement Methods)

輪胎噪音量測方法經歷了從簡單聲級計到多通道系統、頻譜分析以及聲源定位技術(麥克風陣列、全息、波束成形)的演進。量測方法主要分為：

- 戶外量測: 透過噪音(Pass-by)、滾動噪音(Coast-by)、近場噪音(CPX/OBSI)
- 室內量測: 滾筒測試

各方法在準確性、再現性、代表性和成本間需取得平衡。

#### 4.2 透過噪音量測 (Pass-by Noise Measurement)

##### 4.2.1 ISO 362 標準

- 最新版本: ISO 362:2015,與 UNECE R51 協調
- 測試軌道: 符合 ISO 10844(平均輪廓深度 MPD 0.2-1.0mm)
- 車輛準備: 標準輪胎(50%+胎紋深度)、指定胎壓、暖胎 30 分鐘或 20 公里、規定載重

##### 4.2.2 量測設置與程序

- 麥克風設置: 距車道中心線 7.5m,高度 1.2m
- 環境條件: 溫度 5-40°C,風速<5m/s,背景噪音需低於測試值 10dB
- 測試程序: 加速通過或等速通過,記錄最大聲壓級(LAmax)

##### 4.2.3 數據處理與分析

- 重複次數: 2-4 次,差異<1dB
- 頻譜分析: A 加權、1/3 八度頻帶分析
- 修正: 背景噪音修正、溫度修正
- 報告: LAmax 及完整頻譜數據

#### 4.3 滾動噪音量測 (Coast-by Noise Measurement)

#### 4.3.1 量測原理

專注於輪胎/路面噪音,透過脫開動力系統進行滑行測試。捕捉胎面衝擊、空氣泵浦、黏滑、振動輻射等噪音源。

#### 4.3.2 測試條件

- 速度: 典型 80km/h,偏差<1km/h
- 減速度: 0.5-1.0m/s<sup>2</sup>
- 輪胎準備: 暖胎至 40-50°C,胎壓±0.1bar,固定載重

#### 4.3.3 結果判讀

- 關鍵指標: LAmax 和 LAeq,通常 68-76dB(A)
- 頻譜分析: 識別噪音源頻率特徵

### 4.4 近場噪音量測 (Close Proximity Noise Measurement)

#### 4.4.1 CPX 方法 (Close Proximity Method)

- 配置: 拖車搭載兩個 SRTT 輪胎,麥克風距輪胎前/後 0.2m,高度 0.3m(±0.01m)
- 標準: ISO 11819-2
- 測試速度: 50、80、110km/h
- 隔音: 使用聲學屏蔽(隔離 10-15dB)
- 數據處理: 1 秒能量平均、計算 LCPX
- 溫度修正: 例如密實瀝青 -0.06dB/°C
- 不確定度: 0.8-1.2dB

#### 4.4.2 OBSI 方法 (On-Board Sound Intensity)

- 配置: 標準輪胎,聲強探頭距輪胎 0.15m,高 0.10m
- 測試速度: 60mph
- 分析: A 加權聲強級
- 優點: 與 CPX 高度相關,可安裝於標準車輛

#### 4.4.3 室內滾筒測試 (Indoor Drum Test)

- 滾筒直徑: 2.5-3.0m(至少為輪胎外徑 3 倍)
- 路面模擬: 可在滾筒表面模擬不同路面
- 麥克風位置: 距輪胎 0.1-0.3m
- 差異: 滾筒-路面噪音差異 2-5dB

### 4.5 聲強量測技術 (Sound Intensity Measurement)

使用雙麥克風探頭(間距 6-50mm)測量聲能流,適用於:

- 聲源識別: 確定噪音源位置
- 聲功率計算: 量化噪音能量
- 複雜聲場: 背景噪音環境下的測量

品質指標:  $\delta pI$ (壓力-強度指數) $<10\text{dB}$  為可靠

動態測試: 需振動隔離與風阻保護

#### 4.6 聲源定位技術 (Sound Source Localization)

##### 4.6.1 麥克風陣列 (Microphone Array)

- 配置: 30-100 個麥克風,間距 $<\lambda/2$ ,孔徑 0.5-1.5m
- 採樣: 48kHz,32-128 同步通道
- 應用: 輪胎噪音源空間分佈視覺化

##### 4.6.2 聲學全息 (Acoustic Holography - NAH)

- 要求: 測量面需接近聲源(數個波長內)
- 麥克風密度:  $\lambda/10$ - $\lambda/5$ ,實現高解析度聲場
- 優勢: 支援移動坐標分析(如輪胎滾動)

##### 4.6.3 波束成形技術 (Beamforming Technology)

- 主要方法: 延遲求和波束成形(DSB)
- 進階技術: CLEAN、MVDR、DAMAS(改善解析度與旁瓣抑制)
- 應用: 多聲源環境下的噪音源分離與定位

#### 4.7 量測不確定性與誤差分析 (Measurement Uncertainty and Error Analysis)

主要誤差來源:

1. 儀器誤差: 0.2-0.5dB
2. 環境因素: 0.2-0.5dB(溫度、風速、濕度)
3. 車輛控制/胎壓: 0.1-0.3dB
4. 數據處理: 0.1-0.3dB

綜合不確定度(k=2):

- 透過噪音: 0.8-1.2dB(A)
- CPX 測試: 0.6-1.0dB

灰色區域:

當測量值接近法規限值時,需特別注意不確定度影響。

誤差降低策略:

- 儀器定期校正
- 嚴格環境條件控制
- 標準化測試方法
- 數據處理修正(背景噪音、溫度等)

總結: 不同量測方法適用於不同目的 - 透過噪音用於法規認證、CPX/OBSI 用於路面/輪胎特性評估、聲源定位技術用於研發階段的噪音源識別。選擇適當方法需平衡精度、成本、再現性與代表性。

綜合而言，輪胎噪音量測方法的未來發展，將朝向三個主要方向邁進：其一，提升量測代表性，使測試條件更貼近實際交通使用情境，特別是在電動車與低噪音車輛逐漸普及的背景下；其二，加強不同量測方法間的關聯性與可轉換性，建立跨方法的一致性評估框架；其三，持續導入先進聲學量測技術，如麥克風陣列、聲學全息與移動參考座標分析，以支援更精細的噪音源解析與系統性降噪設計。本章所建立之量測方法整體觀，不僅為後續輪胎噪音機制分析與低噪音技術研究提供方法論基礎，也為交通噪音法規制定與智慧化噪音治理奠定了關鍵技術支柱。

**ISO 標準—量測對照**

類別	標準	測試類型	距離	速度	使用情境
法規噪音	<b>ISO 362</b>	Pass-by	7.5 m	50–80 km/h	車輛認證
路面噪音	<b>ISO 11819-1 (SPB)</b>	道路流量	7.5 m	按車流速度	道路噪音評估
輪胎近場	<b>ISO 11819-2 (CPX)</b>	近距離	0.2–0.3 m	50–110 km/h	輪胎/路面分析
車載強度	<b>OBSI (AASHTO)</b>	聲強	0.15 m	60 mph	北美道路噪音
室內滾筒	— (ISO 13325 / 3745)	滾筒	0.1–0.3 m	任意	輪胎研發、NVH
聲源定位	<b>ISO 9614 / 陣列方法</b>	聲強、全息	單位 cm	任意	研發、封閉場測試

**美國標準與 ISO 對照**

標準	國別	用途	備註
<b>AASHTO TP 112 (OBSI 方法)</b>	美國	車載聲強 (On-Board Sound Intensity)	與 ISO CPX 高度相關 (R≈0.9)
<b>SAE J1477</b>	美國	車內聲音強度、道路噪音分析	用於整車 NVH
<b>SAE J57 / J57A</b>	美國	滾筒測試噪音	與 ISO 362 室內等效方法

輪胎噪音量測相關 ISO 標準比較表

標準編號	標準名稱	測試目的	測試方式 ／設備	關鍵條件	測試輸出 ／指標	典型應用
ISO 362-1:2015 (協調 UNECE R51-03)	Road vehicles — Measurement of noise emitted by accelerating vehicles (加速通過噪音)	評估整車通過噪音 (包含動力噪音、輪胎噪音)	戶外加速通過 (Pass-by Noise)	麥克風 7.5 m/1.2 m、速度、暖胎、ISO 10844 測試道	L <sub>Amax</sub> 、頻譜、加速噪音值	車輛 homologation、法規噪音認證
ISO 362-3:2016	Road vehicles — Measurement of noise emitted by stationary vehicles (怠速噪音)	評估靜止車輛噪音 (排氣系統)	靜止車輛怠速量測	麥克風 0.5 m ~ 1.0 m、45°角度	L <sub>Aeq</sub> 、L <sub>Amax</sub>	臺灣改裝車取締、警察道路稽查
ISO 10844:2014	Test tracks — Specifications	標準化噪音測試路面	特定紋理深度、路面材質	MPD 0.2–1.0 mm、宏觀粗糙度控制	—	ISO 362、CPX、OBSI 標準測道
ISO 11819-1:2021	Statistical Pass-by Method (SPB)	評估道路路面對噪音的影響	統計通過噪音 (一般車流)	麥克風、流量 ≥100 輛、標準路面	LSPB	道路工程、路面改善前後比較
ISO 11819-2:2017	Close Proximity Method (CPX)	直接評估輪胎/路面噪音	CPX 拖車 + SRTT 輪胎	麥克風 0.2 m / 0.3 m、隔音殼、50–110 km/h	LCPX	路面噪音評估、輪胎比較、鋪面研發
ISO 13325:2019	Rolling Resistance — Test method for passenger car and truck tyres	測試滾動阻力 (可用於噪音/能耗關聯分析)	室內滾筒或平板系統	滾筒直徑、載重、氣壓控制	CRR / Rolling Resistance Coefficient	節能輪胎、輪胎分類
ISO 9295 (通用聲音量測)	Acoustics — Noise emitted by machinery	機械噪音測試	定點麥克風、聲功率方法	—	聲功率、L <sub>Aeq</sub>	工廠設備噪音基準，可套用到滾筒噪音室
ISO 3744 / 3745	Sound power measurement in free field	測試聲功率	半消音室、全消音室	—	L <sub>w</sub>	室內滾筒噪音室量測用
ISO 9614-1/2 (聲強)	Measurement of sound intensity	用於聲能流與聲源定位	雙麥克風探頭 (6–50 mm)	δpI < 10 dB、掃描測量	聲強級、聲功率、聲能流方向	CPX 開發、輪胎噪音源分布
ISO 13472-1 (路面吸音)	Measurement of sound absorption properties of road surfaces	測量路面吸音	管式法 (Impedance Tube)	樣本厚度、頻段	α(吸音係數)	吸音瀝青、低噪音路面設計
ISO 10534-2	Acoustics — Impedance tube method	測量材料吸音	阻抗管	多頻段、反射係數	α、Z、k	輪胎橡膠吸音特性研究
ISO 362 與 CPX/OBSI 差異	—	法規 vs 技術量測	Pass-by vs Near-field	不同速度、條件、距離	—	前者用於法規、後者用於研發

## ISO × UNECE × EU 輪胎噪音標準完整比較表

### 一、整體總覽表

標準 / 法規	管理對象	測試方式	測試速度	測試場地	指標	法規用途
ISO 362-1:2015	整車	Pass-by (加速)	50-80 km/h	ISO 10844 路面	LAmaz	技術測試、非法規
UNECE R51-03	整車	Pass-by (加速 + 定速)	50 km/h、70 km/h 等	ISO 10844	Lurban (複合噪音)	車輛噪音法規 (新車認證)
ISO 11819-1 (SPB)	道路	統計通過噪音	依車流	任意道路	LSPB	道路噪音指標、鋪面改善
ISO 11819-2 (CPX)	輪胎/路面	CPX 拖車近場	50/80/110 km/h	任意道路 (必須乾燥)	LCPX	研究開發、路面審查
UNECE R117	輪胎本身	Coast-by 滾動噪音	50-80 km/h	ISO 10844	Lnoise (dB)	輪胎噪音法規 (上市義務)
EU 2020/740 (標籤法)	輪胎 (消費者資訊)	法規參考 R117 測試值	—	—	外部噪音等級 A/B/C	零售端資訊揭露
AASHTO OBSI	輪胎/路面 (美國)	車載聲強	60 mph	道路本體	Intensity Level	美洲道路工程、研究

### 二、UNECE R51 × ISO 362 詳細比較 (整車噪音)

項目	ISO 362-1:2015	UNECE R51-03 (法規版)
性質	技術標準	強制法規 (車型認證)
測試項目	加速通過噪音	加速 + 定速 + PMR (功率質量比) 修正
車速	50-80 km/h	50、70 km/h (依車型)
評估指標	LAmaz	Lurban (複合噪音指標, 含修正)
路面	ISO 10844	同 ISO 10844
胎壓/胎紋深度	一般限制	嚴格: 胎紋深度 $\geq 1.6$ mm, 胎壓依原廠指定
背景噪音	需低 10 dB	相同但執法更嚴格
允許值	無	強制性: M1、N1、L 類別依車型定義
用途	技術測試、研發	車輛上市前必須符合

### 三、UNECE R117 × ISO 與 EU 標籤法比較 (輪胎噪音)

#### 3.1 UNECE R117 (輪胎噪音法規)

項目	內容
測試方法	Coast-by 測試 (ISO 13325/ISO 10844)
測試速度	50 km/h、80 km/h (依輪胎類別)
測試輪胎	新胎、特定輪胎分類 (C1/C2/C3)
測試場地	ISO 10844 標準路面
評估值	外部滾動噪音 Lnoise (dB(A))
法規結果	必須符合「噪音上限值」才能上市

噪音上限 (C1 乘用車輪胎) 例:

- A 類  $\leq 68$  dB

- B 類 ≤ 71 dB
- C 類 ≤ 74 dB (部分國家已淘汰 C 級)

### 3.2 EU Regulation 2020/740 (輪胎標籤法)

項目	說明
標籤項目	油耗、濕抓地、外部噪音
噪音呈現方式	A/B/C 等級 + dB(A) 實測值
噪音值來源	直接引用 UNECE R117 測試結果
用途	消費者購買指引、非技術用途

### 3.3 R117 × EU 2020/740 完整比較表

項目	UNECE R117	EU 2020/740
管制方式	噪音上限 (法規)	噪音等級 (資訊揭露)
是不是強制?	強制	商業標示必須附，但不影響上市
測試方法	Coast-by (ISO 10844)	不自行測試，沿用 R117 結果
測試速度	50、80 km/h	同 R117
輪胎分類	C1、C2、C3	同 R117
評估指標	Lnoise (dB)	A/B/C 級 + dB
用途	法規合規	消費者資訊
噪音上限	有	無上限 (但隱含市場淘汰機制)

### 四、ISO 11819 (SPB/CPX) × R117 × OBSI 比較 (輪胎/路面噪音)

標準	測試目的	測試方式	優點	限制
ISO 11819-1 SPB	道路噪音評估	多車輛通過	反映實際交通	車型與速度難控制
ISO 11819-2 CPX	輪胎/路面比對	拖車近場	高再現性、可比較性	不等同法規噪音
UNECE R117	輪胎噪音法規	Coast-by	標準化程度高	不反映高速/近場特性
AASHTO OBSI	道路工程 (美國)	車載聲強	與 CPX 高度相關	非 ISO、北美居多

### 五、ISO × UNECE × EU 三方角色定位 (政策、研發、法規)

性質	ISO 標準	UNECE 法規	EU 標籤
功能	技術定義、量測方法	管制噪音上限	消費者資訊
強制性	非強制	強制 (型式認證)	半強制 (上市資訊)
測試方式	SPB、CPX、Pass-by	Coast-by、Pass-by	不測試，引用 R117
適用對象	車輛、道路、輪胎研究	新車/新輪胎上市	販售輪胎
是否限值	無	有	無 (但分級)

## 參考文獻 (References)

- [1] Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (1986). Development of three methods for measurement of tire/road noise emission: coast-by, trailer and laboratory drum. *Noise Control Engineering Journal*, 26(1), 35-47. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1641213/FULLTEXT01.pdf>
- [2] Braun, M. E., Walsh, S. J., Horner, J. L., & Chuter, R. (2013). Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test: Literature review. *Applied Acoustics*, 74(11), 1241-1265. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.03.003>
- [3] Li, T. (2019). A review on physical mechanisms of tire-pavement interaction noise. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 3(2), 87-112. <https://doi.org/10.4271/10-03-02-0007>
- [4] Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Campillo-Davo, N., & Peral-Orts, R. (2016). A new methodology to assess sound power level of tyre/road noise under laboratory controlled conditions in drum test facilities. *Applied Acoustics*, 108, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.010>
- [5] Berge, T., & Gerhard, H. M. (2023). Implementation of measurement uncertainties into vehicle noise regulation. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 265(3), Article 62. [https://doi.org/10.3397/IN\\_2023\\_0062](https://doi.org/10.3397/IN_2023_0062)
- [6] Batel, M., Marroquin, M., Hald, J., Christensen, J. J., & Schuhmacher, A. (2003). Noise source location techniques-simple to advanced applications. *Sound and Vibration*, 37(3), 24-38.
- [7] Berge, T., Mioduszewski, P., Hałucha, M., & Bohatkiewicz, J. (2025). ISO test track influence on the EU tyre label noise value. *Applied Acoustics*, 217, Article 109822. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109822>
- [8] Ejsmont, J. A. (1982). *Tire/road noise: comparison of road and laboratory measurements and influence of some tire parameters on generation of sound*. Technical University of Gdańsk. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:674528/FULLTEXT01.pdf>

- [9] 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*. ISO. <https://www.iso.org/standard/39675.html>
- [10] 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>
- [11] Przysucha, B., Batko, W., & Szelaĝ, A. (2015). Analysis of the accuracy of uncertainty noise measurement. *Archives of Acoustics*, 40(2), 183-189. <https://doi.org/10.1515/aoa-2015-0021>
- [12] Swieczko-Zurek, B., Ejsmont, J., Klemets-Kettunen, A., & Ronkko, H. (2014). Comparison of road and laboratory measurements of tyre/road noise. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 249(5), 1088-1097.
- [13] International Organization for Standardization. (2021). *ISO 10844:2021: Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*. ISO. <https://www.iso.org/standard/80557.html>
- [14] Sohaney, R., Rasmussen, R., Seybert, A., & Donovan, P. (2012). New ISO test track specification for measuring tire and vehicle noise. *Sound & Vibration*, 46(8), 8-13. <http://www.sandv.com/downloads/1208soha.pdf>
- [15] United Nations Economic Commission for Europe. (2016). *ISO 362-3 Indoor-testing of pass-by noise* (GRB-64-07e). <https://unece.org/DAM/trans/doc/2016/wp29grb/GRB-64-07e.pdf>
- [16] Miloradović, D., Glišović, J., & Lukić, J. (2017). Regulations on road vehicle noise – Trends and future activities. *Mobility and Vehicle Mechanics*, 43(2), 13-30. <https://doi.org/10.24874/mvm.2017.43.02.02>
- [17] Braun, M. E. (2014). *Sound source contributions for the prediction of vehicle pass-by noise* [Doctoral dissertation, Loughborough University]. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/Sound\\_source\\_contributions\\_for\\_the\\_prediction\\_of\\_vehicle\\_pass-by\\_noise/9214709](https://repository.lboro.ac.uk/articles/Sound_source_contributions_for_the_prediction_of_vehicle_pass-by_noise/9214709)

- [18] Freitas, E., Tinoco, J., Soares, F., Costa, J., Cortez, P., & Pereira, P. (2015). Modelling tyre-road noise with data mining techniques. *Archives of Acoustics*, 40(4), 547-560. <https://doi.org/10.1515/aoa-2015-0054>
- [19] Mioduszewski, P., & Sorociak, W. (2023). Acoustic evaluation of road surfaces using different Close Proximity testing devices. *Applied Acoustics*, 204, Article 109251. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109251>
- [20] Li, D. (2022). *Advancement of close-proximity (CPX) measurement methodology for tyre/road noise* [Doctoral dissertation, Hong Kong Polytechnic University]. <https://theses.lib.polyu.edu.hk/handle/200/11676>
- [21] Sandberg, U. (2006). *Possibilities to replace outdoor coast-by tyre/road noise measurements with laboratory drum measurements: background document for milestone decision by SILENCE*. VTI notat 50-2006. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:674005/FULLTEXT01.pdf>
- [22] Ruhala, R. (2007). Evaluation of close-proximity methods for tire/pavement noise measurements. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2007(1), 1-10.
- [23] Zofka, E., Zofka, A., & Mechowski, T. (2017). Pavement noise measurements in Poland. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 236, Article 012103. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/236/1/012103>
- [24] Kowalski, K. J., Dare, T., & McDaniel, R. S. (2013). Research on a laboratory technique for tire-pavement noise assessment of asphalt mixes. *Archives of Civil Engineering*, 59(4), 477-493. <https://doi.org/10.2478/ace-2013-0031>
- [25] Azizi, Y. (2020). Measurement methods of tire/road noise. In *Automotive Tire Noise and Vibrations* (Chapter 5, pp. 127-156). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818409-7.00005-2>
- [26] Park, S. H., & Kim, Y. H. (2001). Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(5), 2326-2339. <https://doi.org/10.1121/1.1406500>
- [27] Nowak, J. J. (2023). *Sound source identification for tire-pavement interaction* [Master's thesis, TU Wien]. <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/190802>

- [28] Gade, S., Hald, J., Gomes, J., Dirks, G., & Ginn, B. (2015). Recent advances in moving-source beamforming. *Sound & Vibration*, 49(4), 8-13.  
<http://www.sandv.com/downloads/1504gade.pdf>
- [29] Gombots, S. (2020). *Acoustic source localization at low frequencies using microphone arrays* [Doctoral dissertation, TU Wien].  
<https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/16267>