

第二章 精進陸上運輸系統複合性音源量測之核心概念

若欲真正理解陸上運輸系統之複合性音源量測，首先必須回到最根本的問題：噪音並不是單純「分貝大小」的問題，而是聲音在空間、時間、頻率與傳播路徑上共同作用的結果。傳統環境噪音管理制度之所以常以單一測點、單一指標或單一時段作為判定基礎，乃是因為在制度建立初期，首要任務是確保量測結果具備可比較性與法規適用性。ISO 1996-1 即明確指出，環境噪音之描述與評估，應建立在基本聲學量、評估程序以及長期暴露下之社區反應判讀之上，且聲源可以是單一來源，也可以是不同來源之組合；ISO 1996-2 則進一步說明，作為環境噪音評估基礎之聲壓位準，可以由直接量測、由量測外推之計算，或純粹由計算取得。[1][2] 這代表國際標準從一開始就承認環境噪音並非總是單一來源，也承認現實世界中的噪音評估常需面對多來源疊加與場景轉換的問題。

然而，陸上運輸系統與一般工業定點噪音最大的不同，在於它同時具有移動性、延展性、重複性與場域依賴性。道路交通噪音、鐵道通過噪音、高架橋與平面道路交會噪音、匝道加減速噪音、橋下反射疊加噪音，乃至都市街谷中的多重反射與遮蔽，皆使受體端接收到的聲場不再是單純的自由場擴散，而是含有直接音、反射音、繞射音、背景音與事件音相互交錯的複合結果。世界衛生組織在《歐洲區域環境噪音指引》中明確指出，交通噪音，包括道路、鐵路與航空噪音，皆與睡眠干擾、心血管風險、生活品質下降及長期健康效應相關；其關切重點並非只有瞬間峰值，而是長期暴露與不同時段累積之健康風險。[3] 美國聯邦公路總署與聯邦運輸管理局在道路與大眾運輸噪音評估文件中，也都不斷強調實地量測常呈現「複合環境噪音」特性，亦即現場量得之噪音往往包含公路、地方道路、周邊活動與其他社區噪音共同作用的結果。[4][5] 換言之，若不將陸上運輸系統之聲學本質說清楚，則後續一切關於音源分離、責任判定、改善策略與制度應用的討論，都容易流於過度簡化。

2.1 陸上運輸系統噪音之基本聲學特性

陸上運輸系統噪音之第一個基本特性，是它具有「沿路徑延展的音源幾何特性」。與單一固定機械設備相比，道路與鐵道不是孤立點，而是沿一定長度展開之運行系統。Caltrans 的技術資料便明確指出，高速公路可視為在特定路徑上由多個局部噪音源構成，因此可近似為線音源；而局部固定設備則更接近點音源。[6] 在理想自由場下，局部點音源的聲壓位準隨距離加倍約衰減 6 dB，反映的是球面擴散；理想線音源則更接近圓柱擴散，距離加倍約衰減 3 dB，但這種規律只是在特定距離範圍與幾何條件下的工程近似，真實道路交通往往會因車流密度、車種混合、道路高程與地表吸收條件而出現偏離。[6][7][8] 因此，陸上運輸噪音自一開始就帶有「從幾何理想化到現地複雜化」的雙重性格。

第二個基本特性，是它高度依賴頻譜結構而非僅依賴總音量。道路交通噪音並非單一頻率之純音，而是輪胎與路面作用、引擎與傳動系統、排氣系統、車體氣動噪音、煞車與路面接縫衝擊等多種成分的混合體。鐵道噪音亦然，ISO 3095 對鐵路應用之外部噪音量測說明中，便明確列舉滾動噪音、衝擊噪音、牽引噪音、氣動噪音、轉彎噪音、煞車噪音與喇叭聲等不同物理來源。[9] 這意味著，同樣是 70 dB(A) 的測值，其造成困擾的機制可能完全不同：低頻主導的重型車通過、含明顯調性成分的軌道噪音、或高頻尖銳之煞車摩擦聲，在主觀感受與結構傳播上都可能有顯著差異。近年的運輸噪音量測綜述亦指出，交通噪音之量測需求已不再局限於單一指標，而愈來愈重視時域、頻域與時頻域的整合分析，因為唯有如此，才能對真實的交通音場做出較可靠的描述。[10]

第三個基本特性，是其顯著的時間變異性。若車流量穩定、車速變化小，整段道路在較長時間窗內可呈現近似連續性噪音；但從較短時間尺度觀察，每一輛車的通過仍是事件性過程。聯邦運輸管理局手冊之所以強調二十四小時複合量測與特定事件數量，是因為軌道系統或道路系統的噪音效應，往往同時包含長時段平均暴露與短時段事件干擾兩個層次。[5] 對複合音源分析而言，這個特性極為重要。因為一個場址在白天可能呈現穩定背景型道路噪音，但在夜間卻可能由零星重型車、高速車輛或列車通過事件主導；若只取整體均值，便容易掩蓋真正引發陳情與干擾的關鍵時刻。WHO 的環境噪音指引之所以將 L_{den} 與夜間指標特別區分，正反映了不同時段人群敏感性與健康風險並不相同。[3][11]

第四個基本特性，是傳播路徑極度受到場域幾何條件控制。ISO 9613-2 說明戶外聲音傳播預測時，必須考慮幾何擴散、大氣吸收、地表效應、屏障衰減與其他修正項，顯示從音源到受體之間的聲音，不是直線無損傳遞，而是不斷與外界環境互動。[12] 在都市高密度區域，建築立面反射、橋體底板反射、聲影區形成、開口洩漏與多重繞射，均會使同一來源在不同樓層、不同陽台與不同街角呈現截然不同的聲場。這也是為何相同道路在地面測點與高樓層立面測點，可能量得不同主導頻譜與不同時間型態。對複合運輸系統而言，真正需要理解的不是單一數值，而是「聲音如何在複雜空間中被重新組裝」。

2.2 點音源、線音源、面音源與複合音源之差異

環境聲學中對點音源、線音源與面音源的區分，並不是純理論遊戲，而是量測設計與治理判讀的起點。點音源通常指空間尺度相對於觀測距離可忽略之局部來源，如單一排風機、固定機組或局部衝擊設備；線音源則指沿長度方向分布且可近似連續展開之來源，如繁忙道路、鐵道或長距離高架運輸系統；面音源則常用於描述大面積分布之輻射來源，如大型廠房立面、成排機組集合或廣場活動區。[6][13] 英國相關環境噪音指引亦特別提醒，在理解現地聲學環境時，必須先判斷來源究竟較接近點、線或面，因為這會直接影響測點選擇、傳播判讀與近遠場考量。[14]

換言之，音源型態不是名詞分類而已，而是關係到「應如何看待其衰減規律與空間代表性」的核心前提。

但在陸上運輸噪音中，更常見的其實不是純粹點、純粹線或純粹面，而是複合音源。所謂複合音源，並非只是多個來源同時存在，而是多個來源在時間、空間與頻率上互相覆蓋，致使受體端難以僅由一支全向性聲級計判別各自貢獻。例如高架快速道路可呈現長距離線音源特性，橋下通風或伸縮縫局部區段又可能表現出顯著局部點源化現象；若旁側再有平面道路、捷運或一般鐵路經過，則同一受體端實際面對的是多層級、多方向、多頻譜的混合暴露。ISO 1996-1 提到聲源可以是獨立存在，也可以是各種組合，正是對此現實的制度承認。[1] 因此，複合音源的真正難題，不在於知道現場有很多聲音，而在於如何建立一套可操作的分類與分離思維。

在理想化推論中，點音源常較適合以局部主導、球面擴散與明確視距關係處理；線音源較適合用交通流、單位長度聲功率與沿線暴露概念處理；面音源則較需以整體輻射面積與方向性處理。但複合運輸場景之所以困難，是因為它會在不同尺度上呈現不同的「等效形態」。遠距離看，一條繁忙快速道路可近似線音源；近距離看，特定車道上一輛重車通過卻又是一個明顯事件點源；從高樓俯視看，整個高架結構群又可能呈現某種延展面源特性。也就是說，音源型態具有尺度相依性。若量測者忽略這件事，便可能錯把局部事件當成整體結構，或反過來用整體平均掩蓋局部尖峰。這正是後續指向性量測需要介入的地方。

2.3 主音源、次音源與背景音量之關係

主音源、次音源與背景音量三者之關係，是複合性音源量測中最容易被口語化、卻也最容易被誤解的議題。一般實務上常說「主要是高架道路在吵」、「其實背景底噪就很高」、「偶爾列車才是最擾人的來源」，這些描述都有其直觀性，但若未經明確定義，便很難轉化為具證據力的技術判讀。ISO 1996 系列標準處理環境噪音時，重點在於對受體端聲壓位準進行描述與評估，而非直接替使用者決定何者必然是主音源。[1][2] 這意味著，在複合場景中，「主」與「次」不是固定身分，而是必須依據時間窗、頻率範圍、事件強度、方向性與治理目的來界定。

若從聲學上更精確地說，主音源是對特定受體位置、特定評估時段或特定事件判讀中貢獻度最高，且最影響總體量測結果或主觀感受的來源；次音源則是確實存在且有貢獻，但在該時段或該事件下並未形成主導性；背景音量則是排除目標音源後仍持續存在之環境音底，可能包括遠方車流、風聲、社區活動聲、設備低鳴或其他非目標來源。問題在於，背景音量並不等於「不重要的聲音」。在某些案件中，背景音量雖然平穩，卻足以墊高整體 LAeq，使局部事件在能量疊加上顯得不那麼突出；但從居民感受來看，真正引發不滿的可能仍是少數高顯著性事件。

WHO 指引與相關健康研究反覆強調，平均暴露很重要，但夜間事件與睡眠干擾也同樣重要。[3][11] 因此，主次音源與背景音量之關係，本質上是「能量主導性」與「感受主導性」的雙重問題。

在傳統全向性量測中，背景音修正常是一項敏感程序。因為一旦背景音與目標音源在時序上無法清楚分離，則所謂「修正後結果」便可能受限於假設條件。FHWA 也特別指出，既有現場量測通常是公路交通與其他環境噪音的複合結果，因此實地測值之詮釋必須結合現場情境，而不能機械化地把所有測值直接視為單一交通源之結果。[4] 換句話說，背景音不是只要減掉就好，關鍵在於能否說明：背景是否穩定、是否與目標來源統計獨立、是否在主要頻段重疊、是否在關鍵時刻遮蔽了目標事件。這也正是指向性量測與時間同步紀錄在未來會愈來愈重要的原因。

2.4 連續性噪音與事件性噪音之測量差異

連續性噪音與事件性噪音的差異，並不只是「一個持續、一個短暫」而已，而是代表兩種完全不同的量測邏輯。連續性噪音較適合以等效音量、統計音量與較長時間平均來描述，其關注的是長時間暴露水準、背景壓力與整體安寧品質；事件性噪音則更重視峰值、單次暴露、重複頻率、發生時段與事件辨識，因為其干擾機制常來自突發性、可辨識性與心理驚擾效應。FTA 的手冊即指出，二十四小時評估指標之所以重要，是因為它能同時反映事件數量與夜間敏感性；這代表在公共運輸噪音中，單純看平均值並不足夠，還必須關心事件如何在全天時序中分布。[5]

對道路交通來說，當車流量高且時距短時，噪音在受體端容易呈現準連續狀態；但在夜間、郊區或局部支線道路，少數高噪車輛通過就可能成為主導事件。對鐵道而言，列車通過本質上就是典型事件，但若班次密集，整體環境又會呈現某種周期性連續暴露。這意味著，量測者若選錯時間窗，便可能把事件音平均化，或把背景型噪音誤判為事件主導。近年的交通噪音事件偵測研究顯示，在真實都市環境中，若要可靠辨識道路事件，必須考慮交通流狀態、都市基礎設施與演算法參數，因為同一條道路在不同控制條件下，事件的「可辨識性」會有顯著差異。[15] 因此，量測差異不只是指標差異，更是資料切分與判讀邏輯的差異。

對複合性音源量測而言，這裡的關鍵啟示是：不能以單一指標統治所有場景。LAeq 適合描述總體暴露，但未必能揭露關鍵瞬時擾動；Lmax 可反映峰值，但未必能代表長期負荷；事件數量可說明干擾頻度，但若缺乏音源辨識，又難知是哪一類運具造成。這也是為何未來複合性音源分析，必須把「平均—事件—頻譜—方向」四組資訊合併閱讀。

2.5 指向性量測在交通噪音治理中的角色

當傳統量測方法足以回答「這裡有多吵」，卻不足以回答「究竟誰造成、何時造成、從哪裡來、該優先改善什麼」時，指向性量測的治理角色便浮現出來。指向性量測的價值，不在於否定全向性聲級計，而在於補上全向性量測的空間盲區。麥克風陣列與相關方法可以藉由多通道資料，推估聲音來向與能量分布，從而提供主導方向、主要輻射區域與事件時刻之額外資訊。Applied Acoustics 的研究指出，相位陣列與波束形成可用於移動車輛通過噪音之音源辨識，標準化方法通常無法直接辨識主要噪音源，而波束形成除了定位外，亦有助於進行源強度描述。[16] 此一進展對交通噪音治理的實際意義非常明確：只有知道噪音從哪個結構區段、哪種車型、哪一個時間條件下突出，工程改善與制度管制才有可能精準。

更進一步地說，指向性量測在治理上至少具有四項功能。第一是歸責輔助功能，在複合道路、道路與鐵道並存、高架與平面重疊之場景中，可提供「哪個方向、哪一條路徑、哪一類事件」較可能主導的技術依據。第二是工程診斷功能，可協助辨識橋下反射熱點、局部接縫異常、隔音設施洩漏段或特定車輛構件之主要輻射區。第三是長期監測功能，相關研究已開始把麥克風陣列應用於自動環境噪音監測，包含自動排除無關事件、辨識主導方向與進行事件分類，以降低人工判讀成本並提升可靠性。[17] 第四則是行政說理功能，亦即在陳情、爭議與改善方案審查時，提供比單一測值更具解釋力的音場證據。指向性量測之所以重要，正是因為治理從來不是只有數字，還包括對數字來源與意義的說明。

2.6 從全向性量測到指向性量測之技術演進

從全向性量測到指向性量測的技術演進，並不是「舊技術落後、新技術取代」的線性故事，而是「量測目的擴張」所推動的方法演化。全向性量測之所以能長期成為制度核心，是因其計量體系成熟、儀器規格清楚、與環境噪音限值關係直接；IEC 61672 所規範的聲級計，正是為了讓聲壓位準之量測在不同場域中維持高度一致性。相對地，指向性量測興起的背景，是交通系統日益複雜、治理不再滿足於單一受體暴露值，而是要求辨識來源、預測改善成效與建立更細緻的決策支援。FHWA 的一系列資料即顯示，道路噪音分析已長期結合實測與模型，而結果品質高度依賴輸入資料與場景重建之精確度。[18][19] 這說明環境噪音技術的方向，一直是從「量到數值」走向「理解場景」。

在此演進過程中，波束形成是一個重要節點。它使多通道麥克風陣列從單純同步收音，進一步變成可重建空間能量分布的工具。但傳統延遲加總法在空間解析度、旁瓣污染與低頻分辨能力上存在限制，因此後續又發展出 CLEAN-SC、DAMAS 及各種混合時頻域方法，以改善複雜環境中的辨識能力。[16][20] 鐵道與車輛研究亦持續指出，若要對移動音源進行可靠識別，必須處理都卜勒效應、反射干擾與運動軌跡同步問題。[21][22] 因而，從全向性到指向性，不只是多裝幾支麥克風而已，而是整體資料科學、幾何建模與聲學反演能力的同步進化。

2.7 本書對「指向性噪音計」之操作性定義

基於上述理論與國際發展脈絡，本書對「指向性噪音計」之操作性定義，宜採取較嚴謹而務實的界定方式。它不宜被狹義理解為某一單一品牌、某一特定幾何排列之麥克風陣列，亦不宜被誤解為只要能輸出彩色熱圖的設備都可稱之。較適切的操作性定義應為：所謂指向性噪音計，是指一種以多通道空間取樣、方向性分析、事件同步與聲級整合為核心，能在環境噪音場景中對目標音源之來向、相對位置、主要能量區域或方向性貢獻進行判讀，並可與傳統 Class 1 聲級量測或其他可追溯聲學資料結合，用以支援複合性音源分離、噪音治理診斷與行政說理之量測系統。此一定義特別強調五件事：第一，它是量測系統，不只是感測器；第二，它必須有方向性資訊；第三，它須能與聲級資料整合，而非脫離法規量值體系；第四，它的主要用途之一是複合性音源判讀；第五，它重視治理可用性，而非僅限於研究展示。這樣的定義既與 ISO 1996 對環境噪音量值體系相容，也與當前陣列自動監測、事件分類與交通音源辨識之研究方向相接軌。[1][2][17]

更具體地說，本書所稱之指向性噪音計，不等於要取代聲級計，而是要把全向性與指向性兩種證據鏈接合起來。全向性聲級計回答的是「總量」；指向性分析回答的是「來源結構」；若再結合交通流、列車時刻、視訊紀錄或場景模型，則進一步可以回答「事件歸屬」與「改善優先序」。在這個意義下，指向性噪音計其實更接近一種「從量測工具走向治理工具」的概念。它不是要讓既有制度失效，而是要讓既有制度在面對高密度、複合化、爭議化的陸上運輸噪音場景時，獲得更強的解釋力與可操作性。

綜上所述，第二章之核心概念可以歸結為一個關鍵判斷：陸上運輸系統噪音並不是單一穩定、均勻、易於歸因的環境聲，而是一種在幾何上延展、在頻譜上混合、在時間上變動、在傳播上受場域強烈重塑的複合聲學現象。正因如此，傳統以全向性總量量測為核心的制度雖仍不可或缺，卻已不足以完整支撐複合音源分離、精準治理與爭議說理之需求。未來若要真正精進陸上運輸系統複合性音源量測，關鍵不在於拋棄傳統方法，而在於建立一套能把音源型態、背景關係、事件特徵、方向資訊與法規量值整合起來的技術框架。這正是本書後續各章將要持續展開的理論基礎與方法出發點。

文獻資料

[1] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 1996-1:2016 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1: Basic quantities and assessment procedures*. ISO.

[2] International Organization for Standardization. (2017). *ISO 1996-2:2017 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination*

of sound pressure levels. ISO.

[3] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region.* WHO.

[4] Federal Highway Administration. (2017). *Highway traffic noise analysis and abatement guidance.* U.S. Department of Transportation.

[5] Federal Transit Administration. (2018). *Transit noise and vibration impact assessment manual* (Report No. 0123). U.S. Department of Transportation.

[6] California Department of Transportation. (n.d.). *Quieter pavement acoustic measurement and performance.* Caltrans.

[7] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 9613-2:1996 Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors—Part 2: General method of calculation.* ISO.

[8] British Standards Institution. (2019). *BS 4142:2014+A1:2019 Methods for rating and assessing industrial and commercial sound.* BSI.

[9] International Organization for Standardization. (2013). *ISO 3095:2013 Acoustics—Railway applications—Measurement of noise emitted by railbound vehicles.* ISO.

[10] Khan, D., et al. (2023). Measurement and analysis of transport noise and vibration: A review of techniques, case studies, and future directions. *Measurement*, 223, 113746.

[11] World Health Organization. (2022). *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment: Chapter 11 Environmental noise.* WHO.

[12] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 9613-2:1996 Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors—Part 2: General method of calculation.* ISO.

[13] Moore, J. E. (1987). *Design for good acoustics and noise control.* Palgrave Macmillan.

[14] Institute of Environmental Management and Assessment. (2014). *Guidelines for environmental noise impact assessment.* IEMA.

[15] Baclet, S., & Rumpler, R. (2025). Performance of a generalised algorithm for the detection of noise events from road traffic in a real urban area: A simulation study. *Applied Acoustics*, 228, 110337.

[16] Ballesteros, J. A., Sarradj, E., Fernandez, M. D., & Ballesteros, M. J. (2015). Noise source identification with beamforming in the pass-by of a car. *Applied Acoustics*, 93, 106 – 119.

[17] Murovec, J., Gerbec, M., & Jambrošić, K. (2018). Microphone array based automated environmental noise monitoring. *Applied Acoustics*, 140, 323 – 334.

[18] Federal Highway Administration. (2015). *Recommended best practices for the use of the FHWA Traffic Noise Model (TNM).* U.S. Department of Transportation.

[19] Federal Highway Administration. (2018). *Techniques for reviewing TNM model runs and associated noise modeling reports.* U.S. Department of Transportation.

- [20] Ye, J., et al. (2025). Application of ROSI + CLEAN-SC algorithm on the improvement of spatial resolution in beamforming. *Applied Acoustics*.
- [21] Zhang, J., et al. (2023). A hybrid time and frequency domain beamforming method for moving train noise source identification. *Applied Acoustics*.
- [22] Pinel, L., et al. (2023). Application to in situ vehicle pass-by noise. *Forum Acusticum 2023 Proceedings*.