

第三章 國際上指向性噪音計研究背景

若從國際交通噪音研究的長時段發展來看，所謂「指向性噪音計」並不是一種單純替代傳統聲級計的新型儀器，而是環境噪音量測體系在面對複合性音源、移動性音源、長期暴露評估與歸責需求時，逐步催生出來的一種方法整合結果。傳統環境噪音制度長期以全向性量測為核心，著重於受體點的等效音量、統計音量與法規比較值，這一體系至今仍是國際法規與工程審查的根本基礎。例如歐盟《環境噪音指令》將環境噪音治理建立在暴露評估、資訊公開、預防與減量及安寧區保護四大支柱上；ISO 1996-2 則明確將環境噪音評定建立於直接量測與由量測外推之計算程序；美國聯邦公路總署則透過交通噪音模型（Traffic Noise Model, TNM）及其最佳實務指引，將量測、校核與預測模型結合為道路噪音管理的重要制度骨架。[1][2][3][4] 這代表國際制度原本並不是為了「看見音源」而設計，而是為了「量化暴露」與「比較標準」而建構。

然而，當交通噪音問題從單一道路、單一鐵道或單一工業源，逐漸轉變為都市高密度、多反射、多樓層、複合高架與平面並存之空間情境後，僅靠單點全向性聲壓量測，雖然仍足以回答「此處有多吵」，卻愈來愈難回答「究竟是誰在造成主要噪音」。也正因如此，國際研究逐步將麥克風陣列（microphone array）、波束形成（beamforming）、聲學照相（acoustic imaging）與高解析反卷積等方法導入交通噪音研究，試圖從原本偏向結果導向的暴露評估，進一步走向原因導向的音源辨識。相關研究指出，波束形成能透過多支麥克風量測聲壓訊號並於後處理中重建空間能量分布，快速生成聲源分布圖；但同時也提醒，傳統聲學照相較擅長視覺化主要音源，未必直接等同於嚴格法規意義下之可追溯定量量測，因此其定位與定量之間仍存在方法學與計量學的分界。[5][6]

第 3.1 節所討論的指向性量測技術國際發展歷程，若加以精細梳理，大致可分為三個階段。第一階段是傳統聲學量測時代，其核心任務在於建立共同可比的聲壓量測規範，重視麥克風自由場修正、時間權重、頻率權重、等效音量與統計音量等基礎參數，此一時代的目標是讓不同國家、不同工程與不同案件能以共通尺度比較。第二階段是聲學成像與陣列定位技術逐步成熟的時代，特別是在航空、汽車與工業產品開發中，陣列技術開始被用來定位主要噪音輻射部位，並由實驗室逐漸延伸至移動載具通過情境。第三階段則是智慧監測與資料治理時代，指向性量測不再只是單次測試或研發工具，而是與邊緣運算、物聯網、長期監測、事件分類及城市治理平台結合，形成兼具監測、辨識與決策支援功能的新世代聲學系統。[5][7][8]

第 3.2 節之所以必須討論傳統聲級計與指向性量測設備之分工演變，是因為國際經驗顯示，二者不是替代關係，而是層級不同、證據功能不同的互補關係。傳統聲級計之優勢，在於其計量可追溯性、法規普遍接受性與與既有環境噪音標準之

直接對接能力；指向性設備之優勢，則在於其對空間分布、方向性、主導音源位置及多源交錯事件的辨識能力。以車輛通過噪音研究為例，研究者早已指出，既有的標準化通過噪音量測方法多半只能得到時間歷程、頻譜或整體音量，卻難以直接指出主要噪音來自車體哪一區域；因此，相位陣列麥克風對移動車輛噪音源辨識具有顯著必要性。[7] 但另一方面，ISO 1996-2 之制度核心依然是以環境聲壓位準之決定作為評定基礎，亦即指向性設備若要進入法規與行政程序，仍須與 Class 1 等級聲級計或等效可溯源量測體系形成整合，而不能僅以熱圖或彩色影像取代法定數值。[2][7]

第 3.3 節關於麥克風陣列、聲學照相與指向性噪音計之關係，必須先從概念上澄清：麥克風陣列是一種硬體佈設方式，聲學照相是一種以視覺化呈現聲源空間資訊的結果型態，而指向性噪音計若作為一種新型環境量測概念，則應被理解為把陣列量測、方向判讀、聲源定位、時間同步、必要之聲級整合與行政可採性要求一併納入的方法系統。換言之，陣列不是目的，聲學照相也不是目的，真正的核心在於能否從複合音場中建立有方向、有時序、有頻譜、有量值且可說明不確定度的音源判讀鏈。既有研究指出，波束形成通常以交叉頻譜矩陣為基礎進行頻域聚焦，而許多進階方法如 Clean-SC、逆問題法、廣義互相關（generalized cross-correlation）等，都是為了改善主瓣寬度、旁瓣污染與低頻分離能力；這也說明國際研究重點已從單純「看到聲源」走向「看得更準、分得更清、算得更穩」。[5][6]

第 3.4 節所涉歐美在交通噪音音源辨識之研究進展，最值得注意的是，歐洲與北美雖共享先進量測技術，但制度驅動邏輯不盡相同。歐洲較強調以區域暴露、人口健康與行動計畫為主軸，歐盟《環境噪音指令》要求成員國進行噪音圖資繪製與資訊公開，並持續推動高暴露區的減量策略；歐洲環境署二〇二五年報告更指出，依成員國在二〇二二年之通報資料，約有一點一二億人口暴露於超過《環境噪音指令》門檻之道路、鐵路與航空長期噪音，而若依世界衛生組織較嚴格之健康建議值估計，實際暴露於不健康運輸噪音的人口約達一點五億人。[1][8][9][10] 在此背景下，歐洲研究更有動機發展能細緻辨識車輪軌道、設備噪音、氣動噪音與道路鋪面交互作用的技術，以支撐更精準的源頭減噪政策。

相較之下，美國在道路與大眾運輸噪音領域，長期以模型預測、工程審查與法定程序穩定性為主要關注。FHWA 明確指出 TNM 已透過多年驗證證明具有良好預測能力，但結果品質仍高度依賴輸入資料品質與正確操作；這意味著美國實務上雖然高度重視量測，但量測多半肩負模型校核、基準建立與工程決策支援功能，而不是直接把聲學照相視為法規主工具。[4] 不過，在研究層面，歐美都逐步走向以陣列技術處理移動車輛與列車通過噪音。歐洲鐵路研究即指出，列車通過噪音本質上是軌道與車體噪音的疊加，其中滾動噪音常占主導，但牽引設備與高速氣動噪音在特定條件下亦可能顯著；因此新一代研究正嘗試從現地試驗中分離各類聲功率與指向特性，以支援模擬、設計與認證。[11]

第 3.5 節若聚焦日本在道路與軌道複合噪音分離之技術發展，則可看出其特色在於「模型化思維特別強、源頭分解傳統特別深、工程與制度之耦合特別緊」。日本聲學學會發布之 ASJ RTN-Model 2023，係二〇二五年刊載於《Acoustical Science and Technology》之整體性道路交通噪音預測模型報告，內容涵蓋道路交通音源聲功率、傳播計算與預測精度等重要面向。[12] 這顯示日本並非僅著眼於現場量測，而是把量測結果系統化地轉化為可反覆使用的預測框架。另一方面，日本鐵道噪音研究極早就將新幹線噪音分解為輪軌滾動、集電弓與上部結構氣動噪音、橋梁結構輻射與其他車體相關來源，並且與車輛設計規範連動。日本國土交通省技術規範甚至直接要求新幹線車輛結構應考量高速運轉之重大噪音防制，例如改善集電弓與使車體形狀更平順，這不是純粹環境末端治理，而是把噪音控制前移至車輛系統設計階段。[13][14]

更重要的是，日本的社會聲學研究也使複合噪音問題不再只是工程議題，而是健康與感受評價議題。日本學者近年持續累積道路噪音與鐵路噪音之暴露—困擾關係資料，並指出不同運具類型、振動伴隨條件與生活型態條件，會影響受體主觀困擾程度。這一研究傳統對臺灣的真正啟示在於：複合音源分離不能只追求物理上的 dB 分解，還應考慮哪一來源在心理聲學與社會接受度上更具「主導性」。換言之，對治理者而言，真正有意義的不是只知道某一來源佔了多少分貝，而是知道哪一來源最容易引發抱怨、失眠、爭議與政策壓力。[10][15]

第 3.6 節所稱智慧城市與長期自動監測系統之新興需求，則代表指向性量測技術的角色正在快速擴張。過去的環境噪音量測多半是短期、專案式與人工主導；現在則逐漸轉向長期、聯網、半自動甚至自動分類之監測模式。歐洲環境署與世界衛生組織對交通噪音健康風險的持續強調，實質上提升了城市治理對長期資料連續性、空間覆蓋率與事件可追溯性的要求。[8][9][10] 同時，近年的智慧城市監測研究與系統型文獻也指出，無線聲學感測網路、低成本戶外聲學節點、邊緣推論與即時都市聲音分類，正在把噪音監測從「每年一次量測」推向「分鐘級事件辨識與雲端決策支援」。[16][17] 在這樣的趨勢下，未來的指向性噪音計不應被想像成單機式儀器，而更像是一種能接入城市資料平台的指向性感測模組。

第 3.7 節所論之國際標準、研究論文與應用市場之互動關係，是理解此領域成熟度的關鍵。標準決定最低可比性，論文推進方法上限，市場則決定哪些技術能落地成為常用工具。以 ISO 1996-2 為例，其提供的是環境噪音評定的共同語言；以 FHWA TNM、ASJ RTN-Model 2023 這類官方或準官方模型為例，其作用在於把大量量測知識轉化為工程與審查可操作的制度工具；至於波束形成、Clean-SC、時域與頻域聲學成像等研究，則在不斷提升空間解析度、降低旁瓣誤判、改善移動音源與反射環境下的辨識能力。[2][4][5][6][12] 而當市場上的聲學照相設備愈來愈普及，研究者便更有機會以商用儀器進行跨場域驗證；反過來說，若缺

乏標準化與可追溯量值鏈，再先進的設備也可能只停留在展示層次。這正是「指向性噪音計」概念必須被嚴格界定的原因。

第 3.8 節關於指向性噪音計在法規、工程與監測三領域之定位，應明確區分三種不同證據需求。在法規領域，核心需求是可追溯、可重製、可說理，因此指向性量測的角色較適合作為輔助歸責、現場狀況說明、背景音源排除與行政判斷補強，而不宜在缺乏整合規範時單獨取代法定聲級量測。在工程領域，指向性量測的價值最高，因為工程需要知道應優先改善哪一個構件、哪一段構造、哪一種行車條件下的主要輻射面；此時，聲學照相、陣列量測與模式校估可以形成非常有力的設計優化工具。在長期監測領域，指向性技術則扮演事件分類、異常偵測、主導音源辨識與資料縮減的關鍵角色，有助於讓龐大的聲學資料真正具備治理意義。換言之，法規重「證據穩定」、工程重「問題定位」、監測重「長期辨識」，三者雖均可受惠於指向性技術，但採用方式不可混為一談。[2][4][5][16][17]

第 3.9 節若作國際研究現況之綜合評述，可以得到一個相當明確的結論：目前國際上並不存在一套已完全定型、可直接套用於所有環境噪音法規場景的「單一型指向性噪音計標準」，但已存在一條十分清楚的演進路徑，亦即由全向性合規量測出發，逐步疊加空間資訊、方向資訊、事件資訊與模型資訊，朝向更有治理辨識力的複合量測體系前進。近年的運輸噪音量測綜述文獻亦指出，現有研究的主要缺口正在於複雜真實場域下之方法限制、主觀與客觀指標之整合，以及未來研究與技術發展方向之重新界定。[18] 從這個角度看，所謂指向性噪音計的真正價值，不在於宣稱它可以一次性解決所有問題，而在於它為傳統制度打開了一條從「測得整體音量」邁向「理解音場組成」的技術通道。

第 3.10 節對臺灣陸上運輸噪音治理之啟示，則可以歸納為五個層次。第一，臺灣現行道路、鐵道與高架複合場景極多，若仍完全依賴單點全向性量測，將持續面臨情歸責困難、工程改善焦點不明及跨機關協調缺乏共同技術語言的問題。第二，應建立「Class 1 聲級計+指向性設備+交通流與事件同步資料」的整合量測架構，避免把熱圖誤當法定數值，也避免只看法定數值而無法說明來源。第三，應以日本與歐洲經驗為借鏡，建立道路、鐵道、高架橋、匝道、橋下空間、都市高樓外牆等本土典型樣態資料庫，逐步形成臺灣版複合音源判讀標準。第四，應將指向性量測導入工程審查、改善前後驗證與爭議案件行政說理，而不僅侷限於研究計畫展示。第五，應把智慧城市長期監測需求納入制度設計，讓未來噪音治理從單次稽查逐步走向長期趨勢監控、事件辨識與精準減噪。這些方向都不應被理解為全盤推翻現行制度，而是以國際研究趨勢為基礎，對臺灣現有環境噪音體系進行「可追溯、可分離、可解釋」的漸進式升級。[1][2][4][8][12][13][18]

整體而言，國際上對指向性量測技術的研究背景，已清楚顯示出一條從傳統環境聲級評定走向複合音源辨識的技術主線。這條主線不是要否定既有法規量測，而

是要補上既有法規量測在複合交通場景下的盲區。對臺灣而言，若能把國際標準的嚴謹性、歐洲健康暴露治理的尺度、日本源頭分解與模型化的深度，以及智慧城市長期監測的資料治理思維整合起來，則「指向性噪音計」將不只是研究工具，更可能成為未來陸上運輸複合噪音治理的重要制度支點。

參考文獻

- [1] European Commission. (n.d.). *Environmental Noise Directive*. European Commission.
- [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] European Union. (2002). *Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise*. EUR-Lex.
- [4] Federal Highway Administration. (2015). *Recommended Best Practices for the Use of the FHWA Traffic Noise Model (TNM)*. U.S. Department of Transportation.
- [5] Castellini, P., D’Emilia, G., Gabrielli, A., & Natale, E. (2008). Acoustic beamforming: Analysis of uncertainty and metrological performances. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(2), 489–498.
- [6] Padois, T., Berry, A., Boudard, P. L., & Cron, B. (2021). Acoustic imaging with conventional frequency domain beamforming and generalized cross correlation: A comparison study. *Applied Acoustics*, 178, 107949.
- [7] 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.
- [8] European Environment Agency. (2025). *Environmental noise in Europe 2025*. EEA.
- [9] European Environment Agency. (2025). *Environmental noise in Europe 2025: Summary for policymakers*. EEA.
- [10] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO.
- [11] Malkoun, A., et al. (2023). Railway pass-by noise using improved separation methods. *Forum Acusticum 2023 Proceedings*.
- [12] Okada, Y., Anai, K., Itiki, T., Yamauchi, K., Yasuda, Y., & Yokota, T. (2025). Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2023”: Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. *Acoustical Science and Technology*, 46(4), 365–429.
- [13] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan. (2006/compiled edition online). *Technical Regulatory Standards on Japanese Railways*. MLIT.
- [14] On, S., & Akutsu, K. (2008). Measurement and analysis of railway noise in Japan. *DAGA Proceedings*.

- [15] Yokoshima, S., et al. (2021). Representative exposure–annoyance relationships due to transportation noise in Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10935.
- [16] Alías, F., & Alsina-Pagès, R. M. (2019). Review of wireless acoustic sensor networks for environmental noise monitoring in smart cities. *Journal of Sensors*, 2019, 7634860.
- [17] Pascale, A., et al. (2023). Road traffic noise monitoring in a smart city: Sensor and model-based approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 125, 103979.
- [18] 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.