

第九章 指向性噪音計之儀器系統與技術需求

9.1 指向性噪音計之硬體組成

指向性噪音計若要成為可用於陸上運輸系統複合性音源分析的正式工具，其硬體架構不能只理解為「一塊有很多麥克風的板子」，而必須理解為由聲學感測、同步擷取、時間控制、資料儲存、環境保護與後端演算共同構成的完整量測系統。從 IEC 61672-1 對聲級計的定義可知，完整儀器本身就可以包含電腦、記錄器、印表或其他構成完整量測功能的必要裝置，且可設計為有人員操作或無人值守的自動連續量測型態；這一概念對指向性系統同樣適用，只是其硬體複雜度更高，因為它不只要量測聲壓位準，還要保存多通道訊號、空間資訊與同步資料。Chiariotti 等對波束成形的回顧亦指出，聲源定位系統的有效性，與陣列、前端訊號鏈、取樣與演算法共同相關，而非僅取決於單一元件。[1][2]

因此，一套可用於環境噪音的指向性儀器系統，至少應包含多通道麥克風陣列、低噪訊前端、同步取樣記錄器、時間同步模組、設備狀態監測模組、必要之攝影或環境感測元件、供電系統、耐候外殼與後處理分析平台。若要支撐長時間環境監測，還需加入通訊模組、遠端健康監測與自動事件觸發機制；若要與法規體系連結，則更必須外加符合 IEC 61672-1 之第 1 類聲級計作為總量基準，而不能單靠陣列熱圖作為全部證據。[1][2][3]

9.2 麥克風陣列幾何形式

麥克風陣列幾何形式決定了空間解析度、旁瓣控制、可用頻帶與實務架設方式，因此它不是外觀問題，而是測量方法的一部分。Chiariotti 等整理的文獻指出，陣列幾何會直接影響波束圖形 (beam pattern)、旁瓣、主瓣寬度與成像誤差，不同應用因此發展出線形、圓形、螺旋形、隨機非均勻形、平面星形與球形等幾何配置。[2] 對交通噪音而言，Bjelić 等在《The Journal of the Acoustical Society of America》提出的交通噪音陣列幾何最佳化研究，明確指出交通噪音頻帶寬廣，陣列設計需同時兼顧「大孔徑」與「鄰近麥克風距離不能過大」這兩個彼此拉扯的條件，因此常需採用不規則非均勻幾何來抑制旁瓣並拓展可用頻帶。[4]

這一結論對陸上運輸複合音源特別重要。若目標是辨識高架道路、平面道路與橋下反射的相對主導方向，陣列不宜只追求高頻精細成像而忽略中低頻穩定性；若目標是近場設備診斷，則可接受較小孔徑與較高頻帶優勢。換言之，陣列形式沒有單一最佳答案，但交通噪音分析通常不適合用過度簡化且均勻排列的小型陣列，因其旁瓣與解析度限制較容易在複合性場域產生誤導。[2][4]

9.3 記錄器、同步模組與取樣頻率設定

指向性量測的核心，不只是多支麥克風，而是多通道「同步」麥克風。若各通道之間存在時間漂移、取樣不同步或資料遺失，則後續到達時間差、相位差與波束成形結果都會受到破壞。IEC 61672-2 在聲級計型式試驗中已明確指出，多通道設備應按各通道分別適用測試，顯示多通道一致性本身就是測試重點；IEC

61672-3 亦以定期測試確保儀器性能持續符合規格。[3][5] 雖然這兩項標準主要對象是聲級計，而非聲學相機，但其背後原理同樣適用於指向性系統：只要是多通道量測，通道一致性與時間一致性就必須被視為基本品質要求。

取樣頻率設定則應由分析頻帶與資料量共同決定。波束成形文獻普遍指出，取樣頻率會限制可分析頻率範圍，而陣列孔徑與麥克風間距又會進一步限制有效頻帶，因此取樣頻率不能脫離陣列幾何單獨設定。[2] 對道路、鐵道與橋梁交通噪音而言，若需處理 1/3 八音度或較高頻帶熱點，則系統必須具備足夠取樣率與穩定的多通道同步能力；若同時要長時段監測，還須兼顧儲存與傳輸負荷。這也是為何專業級系統多以外部時鐘、統一資料匯流與嚴格同步記錄器為核心，而不是單純以多個獨立錄音裝置拼接。[2][3][5]

9.4 附屬感測器之整合需求

指向性噪音系統若要提升現地可判讀性，往往需要與附屬感測器整合。最常見的是光學攝影模組，因為聲學熱圖若沒有同步影像疊合，量測者很難把熱點與實際橋面、車道、列車車體、立面或障礙物位置一一對應。Kümmritz 等針對列車聲學相機的研究，即是透過聲學相機將噪音源位置與實際列車部位視覺化對應，以辨識轉向架、車體與其他局部來源。[6] 在環境監測研究中，低成本城市聲學監測裝置也常整合環境感測與通訊模組，目的就在於讓聲學資料能與天候、設備狀態與現地條件同步判讀。[7][8]

除影像外，風速、溫濕度、雨滴狀態、定位資訊、設備傾角與供電狀態也都值得納入。原因不在於資料越多越好，而在於交通噪音的現地量測極易受風噪、降雨、設備位移與環境改變影響；若沒有附屬感測器輔助，後續很難區分究竟是音源樣態改變，還是設備條件改變。對長期自動監測而言，設備健康資訊甚至與聲學資料同等重要，因為它決定後續資料能否被信任。[7][8]

9.5 與 Class 1 噪音計之搭配架構

在目前可驗證的國際標準架構下，指向性設備仍不宜被視為單獨取代第 1 類聲級計的法規主體設備。IEC 61672-1 明確規範第 1 類與第 2 類聲級計的性能要求，而 IEC 60942 亦明確規範現地用聲校正器的等級，其中第 1 類與第 2 類可供現地使用，且第 1 類對應較嚴格的性能要求。[1][9] 這表示在環境噪音正式量測中，若需要與法規值、既有監測制度或工程驗收結果銜接，最穩妥的做法仍是以 Class 1 噪音計提供總量、統計與校正基準，再由指向性設備提供空間與來源輔助資訊。

這種雙層架構的優點，在於證據鏈完整。Class 1 噪音計可以穩定提供 LAeq、Lmax 或其他標準指標，指向性設備則用來回答「這段總量主要來自何方向、哪一類熱點、是否出現反射假象、改善前後聲場結構是否改變」。在複合性音源分析中，若兩者同步，便能建立「總量—方向—事件」的對照關係；若缺少 Class 1 基準，則指向性結果雖然直觀，但不易直接納入正式法規語言。[1][2][9]

9.6 指向性設備之精度等級問題

目前環境聲學領域最大的制度缺口之一，就是指向性設備尚缺乏如 IEC 61672-1 那樣明確、普遍採用的性能分級制度。現有可驗證的國際標準能清楚界定聲級計與校正器的等級、型式試驗與定期測試要求，但對多通道聲學相機、陣列定位系統與波束成形環境監測設備，尚未形成同等成熟的法規化分類體系。[1][3][5] 這並不表示指向性設備不可靠，而是表示其「可靠性證明方式」目前主要仰賴研究驗證、系統校驗、案例比對與標準儀器同步量測，而非單一國際分級章節。因此，在制度語言上，較合理的表述不是直接宣稱某陣列設備等同 Class 1 指向性噪音計，而是清楚說明其可提供何種解析能力、在何種頻帶有效、其時間同步方式為何、與標準聲級計如何銜接、在何種樣態下適用或不適用。這樣的表述更符合現況，也更利於未來建立性能門檻。從方法學角度看，未來若要推動正式規範，至少應建立多通道相位一致性、方向解析度、旁瓣控制、動態範圍、耐候穩定性與 Class 1 總量偏差可接受範圍等技術指標。[2][3]

9.7 現地量測之耐候與抗干擾要求

交通環境中的指向性量測，通常不在實驗室，而在道路邊、高架橋旁、橋下空間、開放立面或屋頂，因此耐候與抗干擾能力是實務可行性的核心。Mydlarz 等在低成本城市聲學監測裝置研究中即指出，都市環境條件多變，若要取得可校準且可長期使用的分貝資料，設備設計必須面對戶外環境挑戰，包括保護、穩定供電與資料傳輸。[7][8] FHWA 的現地量測指引也反覆強調風、天候、反射面與現場安全對量測品質的重要性。[10]

對指向性系統而言，耐候問題還比單點聲級計更嚴格。因為陣列往往有更多聲孔、更多接頭、更多通道與較大受風面，只要其中部分通道受潮、受風或鬆動，就可能破壞整體波束成形結果。抗干擾方面，除了傳統的風噪與雨噪，還包括電磁干擾、網路傳輸中斷、攝影模組失步、支架振動與局部遮擋。換言之，對現地指向性設備的要求，不只是「能錄到聲音」，而是要在複雜戶外條件下持續維持多通道一致性與機械穩定性。[7][8][10]

9.8 長期自動監測與即時辨識系統

長期自動監測與即時辨識，是指向性系統未來最有潛力的應用方向之一。IEC 61672-1 本身已承認聲級計可設計為無人值守、自動與連續量測的形式，[1] 而近年的環境噪音研究則進一步將多通道感測、來源分類與自動辨識結合。Murovec 等提出的麥克風陣列自動環境噪音監測系統，即利用陣列提高訊噪比與方向性資訊，以協助自動化偵測與評估環境噪音來源；其後續研究亦朝向自動識別與評估環境噪音源發展。[11][12] Majjala 等則利用來源分類強化環境噪音監測，使監測結果更接近「知道是什麼聲音造成了這個位準」，而不只是知道位準變化本身。[13]

這些研究顯示，未來的指向性噪音系統不應只是一台會畫熱圖的設備，而應是一套能夠長期留置、即時觸發、分類事件、辨識疑似來源並與標準聲級資料同步整

合的平台。對陸上運輸噪音治理而言，這類系統特別適合用於熱點路段長期監測、夜間異常事件追蹤、橋下改善效果持續檢驗，以及作為複合性音源分離資料庫的前端採集工具。不過，是否能即時辨識，不只取決於演算法，也取決於前端硬體是否具備足夠同步性、穩定性與現地抗干擾能力。[11][12][13]

9.9 低成本 MEMS 系統與專業級設備之差異

低成本 MEMS（微機電）系統近年快速發展，已成為城市噪音監測網絡的重要技術方向。Picaut 等的文獻回顧指出，MEMS 麥克風因尺寸小、可靠度相對高且成本低，已成為低成本環境噪音感測器的重要核心元件；但該文也同時強調，大規模部署低成本感測器仍面臨校準、長期穩定性、耐候性、資料品質與標準一致性等挑戰。[14] Mydlarz 等則指出，低成本城市感測裝置的目標並不是立即取代所有法規型設備，而是提供長期、廣布、連續的聲學資料；其論文特別提到，該系統的設計重點之一是透過 MEMS 麥克風校準，使其達到 type/class 2 等級的可靠分貝資料，而不是直接宣稱具備法定高階設備的全部能力。[7][8]

因此，低成本 MEMS 與專業級設備的差異，不只是價格，而是用途定位。前者適合大規模布建、熱點篩選、長期趨勢觀察、初步事件觸發與都市聲景感知；後者則較適合法規對接、精密聲學分析、多通道高一一致性成像與高爭議案件佐證。近年也有業界與研究界嘗試縮小兩者差距，甚至提出向 Class 1 精度靠攏的 MEMS 噪音監測終端構想，但就目前可驗證的主流文獻與標準脈絡來看，低成本 MEMS 系統仍較適合作為專業級系統的前端補充，而不是全面替代。[14][15]

9.10 儀器校驗、維護與法規可用性

儀器是否能被法規或正式行政程序採信，關鍵不只在規格表，而在校驗與維護紀錄是否完整。IEC 60942 已對校正器的性能等級作出規範，IEC 61672-2 則提供型式評估測試方法，IEC 61672-3 則提供定期測試程序，以確保聲級計在使用期間仍符合其應有性能。[3][5][9] 這一套標準化思維對指向性系統極具啟發性：即便目前尚無完整的指向性設備分級標準，也應建立至少相當於「出廠性能確認、現地前後檢核、定期功能驗證、異常維修後再確認」的管理制度。

在法規可用性上，較穩妥的策略仍是將指向性系統定位為與標準聲級計並行之輔助高階設備。如此一來，法規值、校正值與週期性維護可依 IEC 61672 與 IEC 60942 的成熟架構處理，而指向性系統則另外建立通道一致性、熱點重現性、同步狀態與後處理留痕等內部品保程序。這種做法既不會高估現況，也能在實務上逐步累積未來立法或規範修正所需的技術證據。[1][3][5]

9.11 未來設備規格建議與技術門檻

若未來要把指向性噪音計真正納入陸上運輸系統複合性音源分析與行政應用體系，設備規格建議不應只停留在「麥克風越多越好」或「畫面越漂亮越好」。根據現有標準與文獻，較合理的技術門檻至少應包括五個方向。其一，總量基準必須能與 IEC 61672-1 第 1 類聲級計穩定同步，並具備 IEC 60942 校正鏈結。

[1][9] 其二，多通道系統應有明確的同步與通道一致性檢核機制，且在長時段運作下仍能維持相位與時間穩定。[2][3] 其三，陣列幾何應對應交通噪音頻帶與場域尺度，而非任意採用消費型幾何。[2][4] 其四，戶外設備應具備足夠耐候、抗風、抗遮擋與遠端健康監測能力，以支撐長時段留置。[7][8][10] 其五，系統應支援事件化資料結構、熱圖與頻譜同步輸出，以及與來源分類或自動辨識模組整合，才能真正走向長期監測與智慧治理。[11][12][13]

從治理角度看，未來的技術門檻不只是硬體性能門檻，也是證據門檻。也就是說，一套設備若要被視為「可用於複合性音源分離」，至少應能回答其在何種樣態下有效、何種樣態下不宜單獨使用、與標準總量偏差如何控制、熱點重現性如何驗證，以及其資料如何保存以供追溯。只有把這些問題制度化，指向性噪音計才可能從專案性工具，逐步發展為可納入正式環境噪音管理架構的下一代技術平台。

[1][2][11]

文獻資料

[1] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-1:2013 Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications*. IEC.

[2] Chiariotti, P., Martarelli, M., & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization: Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 422–448.

[3] International Electrotechnical Commission. (2013/2017). *IEC 61672-2:2013 and IEC 61672-3:2013 on pattern-evaluation and periodic testing of sound level meters*. IEC.

[4] Bjelić, M., Stanojević, M., Šumarac-Pavlović, D., & Mijić, M. (2017). Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5), 3101–3104.

[5] International Electrotechnical Commission. (2017). *IEC 60942:2017 Electroacoustics—Sound calibrators*. IEC.

[6] Kümmitz, S., Blaschke, J., & Giebel, T. (2021). Visualisation of train noise with acoustic cameras. In *Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration*.

[7] Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2017). The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices. *Applied Acoustics*, 117, 207–218.

[8] Mydlarz, C., Salamon, J., & Bello, J. P. (2016). *The implementation of low-cost urban acoustic monitoring devices* (preprint). arXiv.

[9] Federal Railroad Administration. (2011). *Handbook for Railroad Noise Measurement and Analysis* (DOT/FRA/RRS-09/10-IH). U.S. Department of Transportation.

[10] Federal Highway Administration. (2018). *Noise Measurement Field Guide*

(FHWA-HEP-18-066). U.S. Department of Transportation.

[11] Murovec, J., Prezelj, J., & Batistič, L. (2018). Microphone array based automated environmental noise measurement system. *Applied Acoustics*, *140*, 287–296.

[12] Murovec, J., Batistič, L., & Prezelj, J. (2023). Automated identification and assessment of environmental noise sources. *Heliyon*, *9*(2), e13181.

[13] Maijala, P., Zhao, S., Heittola, T., & Virtanen, T. (2018). Environmental noise monitoring using source classification in sensors. *Applied Acoustics*, *129*, 258–267.

[14] Picaut, J., Can, A., Fortin, N., Ardouin, J., & Lagrange, M. (2020). Low-cost sensors for urban noise monitoring networks—A literature review. *Sensors*, *20*(8), 2256.

[15] Kuczynski, J., & Barwicz, B. (2024). Advancing urban noise monitoring: Bridging cost and Class 1 accuracy performance in smart city applications. Conference/technical paper.