

第四章 指向性噪音計之理論基礎

第四章所要建立的，不只是若干零散的聲學名詞說明，而是一套足以支撐指向性量測、麥克風陣列判讀與未來複合性音源分離的理論骨架。若沒有穩固的理論基礎，指向性噪音計很容易被誤解為只是「會指方向的噪音計」；但從嚴格的聲學與量測科學角度來看，它其實是把傳統聲壓量測、波動傳播、空間取樣、陣列訊號處理與不確定度評估整合在一起的複合型系統。國際標準與環境聲學文獻已明確指出，聲環境評估的核心基礎仍建立在聲壓位準、等效連續音壓位準與聲傳播工程法之上，而指向性量測的創新，則是在這個基礎上增加了方向辨識、空間解析與來源分離的能力。換言之，指向性噪音計不是脫離傳統噪音量測的另一套孤立工具，而是建立在傳統聲學基本量之上，再向空間維度延伸的量測技術。
[1][2][3][4]

就 4.1 聲壓、聲能、聲功率與聲強之基本概念而言，最先必須釐清的是，環境噪音量測中最直接被麥克風接收的物理量是聲壓（sound pressure），也就是聲波通過介質時相對於靜態大氣壓之微小壓力擾動。聲壓本身是一個瞬時量，因此實務上常透過均方根值、時間加權與頻率加權轉換為聲壓位準，再進一步形成等效音量、最大音量或統計音量等指標。IEC 61672 所規範的聲級計，正是建立在這種對聲壓訊號進行標準化加權與時間處理的原理上。與聲壓不同，聲能（sound energy）描述的是聲波傳遞的能量總量；聲功率（sound power）則是音源每單位時間向外輻射的聲能率，屬於音源本身特性，理論上不因受體距離改變而改變；聲強（sound intensity）則是單位面積上的聲功率流率，既有大小也有方向，因而成為由純量聲壓進入向量聲場描述的關鍵橋樑。ISO 9614 系列即以聲強法作為決定聲功率的重要標準方法，這也說明在指向性量測的更高層次應用中，若能從單純聲壓場進一步掌握聲能流動方向，便更有機會理解複合聲源的空間行為。
[5][6][7][8]

這四個基本量之間的關係，對指向性量測尤其重要。傳統一支麥克風主要量得某點之聲壓變化，因此它對「這裡有多大聲」非常敏感，卻未必能直接回答「聲音從哪裡來」；聲強概念則提醒我們，真正與方向性密切相關的，不只是壓力本身，而是能量如何穿越空間。也正因如此，很多指向性量測技術雖然表面上仍以多支麥克風量測聲壓為基礎，但其目標其實是透過不同位置間的壓力差、相位差與時間差，反推出能量傳播方向與來源位置。從未來複合性音源分離的角度看，這種由聲壓走向聲場、由純量走向向量與方向性解釋的轉變，正是指向性噪音計理論基礎的第一個關鍵跨越。
[5][8][9]

4.2 指向性（Directionality）之物理意義，則可理解為某一感測系統、音源或傳播場在不同方向上表現並不不同的特性。對音源而言，指向性表示它在不同方位角與仰角的輻射能力不同；對接收系統而言，指向性表示它對不同方向入射聲波的

敏感度不同。IEC 61672 的說明已指出，聲級計的麥克風頻率響應本身便與聲音從主要方向或隨機方向入射有關，這意味著「方向」從來不是高階陣列技術才出現的概念，而是所有實際聲學量測都必須面對的物理條件。指向性噪音計之所以特殊，在於它不是被動接受設備自身有限的方向響應，而是主動透過多點空間取樣與演算法，合成一個或多個「虛擬方向性接收器」，使系統可選擇性強化某方向聲音並抑制其他方向干擾。[10][11][12]

從物理本質來看，指向性並不神祕，它反映的其實是波動場在空間中的非均勻性。若聲場中所有方向、所有位置的分布完全一致，則談論方向幾乎沒有意義；但現實中的交通噪音、橋下反射、列車通過、建築遮蔽與高架結構輻射，都會使不同方向之波前、相位、振幅與頻譜內容出現差異，因此方向性成為可觀測的物理特徵。指向性量測的任務，就是把這些原本混雜在聲場中的空間差異放大成可判讀資訊。也因此，指向性不是單純「指到最吵的地方」而已，而是將聲場的空間非均質性轉化為可分析的技術訊號。[11][12][13]

4.3 聲源方向、到達時間差與相位差原理，是指向性量測最核心的訊號處理基礎。當一個平面波或近似平面波自某方向傳至陣列時，位於不同空間位置的麥克風不會在完全相同時刻接收到同一波前，而會產生到達時間差（time difference of arrival, TDOA）。若入射波近似穩定且頻率足夠高，這種時間差可進一步表現在相位差（phase difference）上；對於窄頻訊號而言，相位差是方向估計的重要依據，對於寬頻訊號而言，則常以延遲求和（delay-and-sum）或更複雜的波束形成方式整合不同頻率成分。麥克風陣列理論的教學文獻明確指出，陣列處理的本質便是利用聲波傳播速度有限與多感測點空間分布，將來自某方向的訊號相干疊加，而把其他方向的訊號部分相消。[11][14][15]

然而，到達時間差與相位差的運用並非沒有條件。首先，若頻率太低而陣列孔徑太小，各麥克風間相位差可能不足，方向辨識能力便會顯著下降；其次，若頻率太高而麥克風間距過大，則可能出現空間混疊（spatial aliasing），使系統把不同方向誤判為相同方向；再者，在近場條件下，波前並非平面而較接近球面，各點之延遲與振幅關係較複雜，不能直接用遠場平面波模型處理。這些問題說明，方向估計從來不是只要有多支麥克風就能自然完成，而必須嚴格受限於陣列幾何、頻率範圍、訊號頻寬與近遠場假設是否成立。對未來複合性音源分離而言，若忽略這些基礎條件，則任何看似精美的方向圖都可能失去物理可信度。[11][16][17]

4.4 空間解析度與角度分辨能力，則是指向性噪音計能否把相鄰聲源視為兩個來源而非一團模糊能量的關鍵指標。一般而言，波束形成後所形成的主瓣寬度（main lobe width）越窄，系統的角度分辨能力越好；旁瓣（side lobes）越低，則越不容易把其他方向的能量誤映到主方向。近年的陣列設計研究反覆強調，陣列幾何、孔徑大小、麥克風數量與頻率目標都會影響主瓣寬度與旁瓣表現。簡言之，空間

解析度不是一個抽象形容詞，而是由波長與陣列尺度共同決定的物理限制：同一個陣列對高頻通常較容易分辨方向，對低頻則較困難；大孔徑陣列通常比小孔徑陣列有較佳角度解析能力，但也更不利於便攜與現場操作。[16][18][19]

這一點對交通噪音場景尤其關鍵。道路、高架橋、鐵道與匝道並不是彼此距離很遠的理想點音源，而常是延伸性、相鄰性極高的線音源或分布式音源。在這種條件下，指向性量測即使能顯示出某一大致方向，也未必足以精確分辨兩條相距很近的道路系統。故空間解析度必須從「看得見熱點」提升到「能否分辨相鄰來源」來理解。未來若要把指向性噪音計用於陸上運輸系統的複合音源鑑別，其理論門檻往往不在於有沒有方向圖，而在於角度分辨能力是否足以支撐來源分群與責任歸屬。[18][19][20]

4.5 近場（Near Field）與遠場（Far Field）差異，則是所有指向性量測都不能迴避的基礎問題。遠場通常指觀測距離相對於聲源尺寸與波長都足夠大，使波前可近似為平面波，振幅衰減與方向關係相對簡化；近場則表示觀測點仍位於聲源附近，波前具有明顯曲率，且可能同時存在反應性近場（reactive near field）與輻射近場（radiating near field）效應。近場聲學與陣列處理文獻指出，在近場條件下，不能只估方向，往往還必須同時考慮距離與球面波效應，否則定位與成像將產生系統性偏差。這對聲學相機、橋下量測、車輛近距離通過與列車部位診斷尤其重要，因為此類場景往往並不符合簡化的遠場假設。[21][22][23]

近場與遠場的差異，也會直接影響指向性量測的解釋方式。若在遠場中觀測交通走廊，可較合理地將某一方向主導能量視為來自特定走廊或高架路段；但若量測點靠近車體、橋底、隔音牆節點或建築反射面，則量到的可能不只是主來源的直接音，還混有反射音、繞射音與結構附近的複雜干涉場。此時方向圖上出現的高值，未必就是單純的「音源位置」，而可能是某條傳播路徑或局部再輻射區域。因此，近遠場差異不只是數學模型差異，更關係到行政或工程判讀時，是否把某個亮點誤認為必須直接治理的原始音源。[21][22]

4.6 反射、繞射、散射與遮蔽效應，是指向性量測在戶外與都市環境中最容易面對、也最容易被低估的傳播問題。ISO 9613-2 明確說明，戶外聲傳播的工程法預測必須考量距離衰減、大氣吸收、地面效應、障壁遮蔽與其他修正項，顯示真實聲場從來不是單一路徑直線傳播。反射（reflection）會使聲波在硬質立面、橋底或隔音牆表面重新導向；繞射（diffraction）會使聲波繞過障礙物邊緣傳至幾何陰影區；散射（scattering）則使聲能因粗糙表面、複雜邊界或湍流而向多方向重新分配；遮蔽（shielding）則會削弱直達路徑能量，使量測點接收結構更依賴繞射與反射成分。[1][24]

對指向性量測而言，這些效應的重大意義在於：系統看見的方向，未必永遠等於原始音源所在方向，而可能是經過一次或多次反射後的有效入射方向。舉例而言，在橋下或都市街谷中，陣列可能接收到由橋底或對向立面反射而來的強能量束；若未結合場景幾何判讀，便可能誤將反射面當成原始音源。這也是為何真正成熟的指向性量測，不應只依賴熱圖本身，而必須結合地形、建築、道路高程與材料條件一併解釋。從未來複合音源分離角度看，反射、繞射與散射不是附帶誤差，而是模型中必須正視的物理組成部分。

4.7 交通線音源之擴散性與高重疊特性，則說明為何陸上運輸系統比一般工業單機設備更難用指向性方法處理。道路交通、高架主線、平面道路、匝道及鐵道，本質上常可近似為延伸性線音源或分布式多點音源的集合，而非孤立點音源。當多輛車同時存在、速度不同、車種不同、位置持續變動時，整體聲場不是單一穩定波前，而是大量事件、連續底噪與移動源疊加的結果。這種擴散性與高重疊性會削弱指向性量測中「一個峰值對應一個音源」的直觀關係，因為同一方向可能同時包含多個移動來源，不同方向又可能經反射後在陣列上形成相似模式。這也是交通噪音指向性量測與室內單一設備定位最大的不同。[11][19]

更重要的是，線音源的高重疊性意味著許多情況下指向性量測更適合做「相對主導方向辨識」而非「絕對精確分離」。若兩條道路在幾何上非常接近，或高架與平面路段在受體視角下僅有很小夾角，則即使陣列可顯示某一方向能量較高，也不代表已完成法律意義上的來源切割。故在交通複合音源研究中，理論上最穩健的做法，是把指向性量測視為與交通流資料、幾何模型與受體端法定音量互補的工具，而不是單獨承擔全部分離任務。這一點正是將來制度應用時必須誠實揭示的科學前提。[1][11][19]

4.8 指向性量測之統計與不確定度概念，則提醒我們，任何方向判讀、來源成像或貢獻估計都不是毫無誤差的「真值」。ISO 1996-2 已明確要求，作為環境噪音評估基礎之聲壓位準測定，應考量量測與取樣的不確定度，必要時以擴充不確定度表達。對指向性量測而言，不確定度來源通常更複雜，除了麥克風本體校正、頻率響應與時間同步誤差外，還包括陣列幾何誤差、環境風噪、演算法參數、頻帶選擇、窗函數設定、背景源波動與操作者後處理判讀差異。統計上，若要宣稱某一方向為主導來源，至少必須證明該方向的能量峰值不是短暫隨機起伏、不是單次偶然事件，也不是由旁瓣、混疊或反射造成的假峰。[4][15]

因此，指向性量測在研究與實務上都不宜只輸出單張圖，而應輸出時間平均後的方向穩定性、頻帶一致性、事件重複性與必要的不確定度範圍。這種統計思維對未來複合性音源分離尤為重要，因為真正有治理意義的結論往往不是「某一秒鐘看到哪裡最亮」，而是「在大量時窗中哪一個方向反覆成為主導」、「在不同頻帶下是否呈現一致模式」、「在背景條件改變時結果是否仍穩定」。若無這種統

計與不確定度觀念，指向性量測極易流於圖像直覺，而失去作為專業證據的嚴謹性。[4]

4.9 指向性量測之物理限制與誤差來源，則是本章最重要的保留條件。首先，任何麥克風陣列都受限於孔徑、頻率與取樣定理，不可能在所有頻率上同時具有極高解析能力。其次，戶外交通場景的風噪、湍流、地面反射、建築反射與移動源非定常性，都會使理想陣列模型與真實訊號之間出現落差。再者，波束形成本身會生成主瓣與旁瓣，若演算法或陣列配置不佳，便容易把非主方向能量投影到錯誤位置。研究與工程文獻都指出，陣列設計若未與目標頻率、場景距離與來源分布相匹配，則即使硬體數量增加，也未必換來可靠判讀。[16][18][19][20]

此外，指向性量測在複合交通環境中還面臨兩個更深層的限制。第一，物理上高度相關或幾何上過近的來源，本來就可能超出系統可分辨範圍，這不是演算法不夠聰明，而是波動場本身提供給感測器的可辨資訊有限。第二，反射與再輻射路徑可能使「來源位置」與「治理對象」並不完全重合。例如橋底亮點可能代表應治理的反射面，而不是原始車流本身；某建築立面熱點可能是入射路徑結果，而非該建築自己成為聲源。換言之，指向性量測的圖像不應被視為自動等同責任歸屬圖，而必須在聲學、幾何與制度語境中共同解讀。這也是為何本章強調理論基礎的重要性：唯有充分理解聲壓、聲強、波前、解析度、近遠場與傳播效應，才不會把指向性量測誤用為超出其物理能力的工具。[21]

總結而言，第四章所建立的理論基礎可以濃縮為一個核心判斷：指向性噪音計之所以有機會成為未來複合性音源分離的重要工具，不是因為它神奇地跳脫了傳統聲學，而是因為它把傳統聲壓量測延伸到空間方向、時間差、相位差與能量流動的層次；但它之所以不能被無限制神化，也正是因為這一切延伸都仍受波動物理、陣列幾何、近遠場條件與環境傳播效應所嚴格限制。對陸上運輸系統而言，真正成熟的應用方向，應是在理解其物理限制的前提下，把指向性量測與法定 Class 1 量測、交通資料、場景模型與統計驗證結合，讓它成為強化來源辨識與治理說理的工具，而不是脫離聲學基本原理的圖像化裝飾。[1][4][11][15]

資料來源：

[1] International Organization for Standardization. (2024). *ISO 9613-2: Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors—Part 2: Engineering method for the prediction of sound pressure levels outdoors*. ISO.

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

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

- [4] McCowan, I. (2001). *Microphone arrays: A tutorial*. IDIAP Research Report.
- [5] International Organization for Standardization. (2002). *ISO 9614-3: Acoustics—Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity—Part 3: Precision method for measurement by scanning*. ISO.
- [6] International Organization for Standardization. (1993). *ISO 9614-1: Acoustics—Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity—Part 1: Measurement at discrete points*. ISO.
- [7] Institute of Acoustics. (2019). *Sound intensity basics. Acoustics Bulletin*.
- [8] Brüel & Kjær. (2021). *The fundamentals of sound intensity*. Brüel & Kjær Primer.
- [9] Brüel & Kjær. (2004). *Technical Review No. 1: Beamforming*. Brüel & Kjær.
- [10] International Electrotechnical Commission. (2002). *IEC 61672-1:2002 Electroacoustics—Sound level meters*. IEC.
- [11] Greco, D., et al. (2023). A feasibility study for a hand-held acoustic imaging camera. *Applied Sciences*, 13(19), 11110.
- [12] STMicroelectronics. (2021). *UM2214: Getting started with AcousticBF real-time beam forming middleware*. STMicroelectronics.
- [13] Gößwein, J. A., et al. (2017). Stereophonic microphone array for the recording of acoustical environments. *Applied Sciences*, 7(6), 541.
- [14] Segers, L., et al. (2019). CABE: A cloud-based acoustic beamforming emulator for microphone array design and optimization. *Sensors*, 19(18), 3906.
- [15] Hong, X., et al. (2026). An iterative fast microphone array design method for acoustic beamforming. *Sensors*, 26(5), 1696.
- [16] Wang, X., et al. (2023). Design of planar differential microphone array beamformers with small inter-element spacing. *Sensors*, 23(7), 3733.
- [17] Hansen, M. W., et al. (2016). Localizing near and far field acoustic sources with distributed microphone arrays. Aalborg University working paper.
- [18] Moisseev, R., Itzhak, G., & Cohen, I. (2024). Array geometry optimization for region-of-interest near-field beamforming. ICASSP paper.
- [19] Bérengier, M. C. (2003). Outdoor sound propagation: A short review on analytical and numerical approaches. *Acta Acustica united with Acustica*.
- [20] Weyna, S. (2003). Identification of reflection, diffraction and scattering effects with sound intensity methods. *Archives of Acoustics*.
- [21] Microflown Technologies. (n.d.). *Near field acoustics*. Technical e-book.
- [22] Blanc-Benon, P., et al. (2005). Outdoor sound propagation modelling in complex environments. NATO technical proceedings.