

第七章 指向性噪音計樣態分類

7.1 樣態分類之目的與方法

指向性噪音計若要真正成為陸上運輸系統複合性音源分析的制度化工具，不能只停留在儀器功能介紹或單一案例展示，而必須建立一套可重複、可比較、可延伸至行政決策的「樣態分類」架構。所謂樣態分類，並不是把所有場址粗略貼上幾個名稱，而是依據音源型態、空間幾何、受體暴露、傳播路徑與行政目的等條件，把看似複雜的噪音場景整理成一組具有共同聲學特徵與共同量測邏輯的類型。這種分類方式的重要性，在於不同噪音場景的適用量測方法並不相同；若未先分類，便直接套用同一種測點、同一種陣列配置與同一種判讀邏輯，極容易出現結果不穩定、來源誤判或行政解釋困難等問題。[1][2][3]

從環境噪音標準與歐洲共同噪音評估方法的發展可以看出，量測與評估本身就建立在場景分類之上，例如立面暴露、自由場、障礙物繞射、多重反射、高度差與不同交通源類型，皆屬不同幾何與傳播條件下的聲學問題，不可能以單一簡化模型完全處理。[1][4][5] 另一方面，陣列式環境噪音研究也顯示，若能先對場景進行源別、方向性與事件特性分類，再結合波束成形、空間濾波與事件辨識，系統對主要聲源的識別能力與後續噪音貢獻估計會顯著提升。[6][7][8] 因此，本章所稱之樣態分類，其本質是一種介於「理論聲學」與「實務治理」之間的中介層：它讓量測者知道應該如何選點、如何配陣、如何同步、如何解讀，也讓主管機關知道何時可以將結果用於暴露說明、何時只能用於技術診斷、何時可以進一步支持複合性音源分離與責任歸屬。[1][3][6]

7.2 依音源型態分類

樣態分類的第一層，是依音源型態分類。從環境噪音學的角度，交通噪音雖常被統稱為線音源，但實際上其中包含多種尺度不同、輻射高度不同、時間特性不同的子音源。例如道路交通在低速時引擎、排氣與機械噪音較顯著，在中高速時輪胎—路面噪音逐漸成為主體；鐵道系統則包含輪軌接觸噪音、轉向架構件噪音、車體附屬設備噪音、集電弓與空氣動力噪音，以及橋梁或軌道結構輻射噪音等。[5][9][10] 因此，即使都屬「交通噪音」，其在指向性量測上仍可能表現為點狀熱點、帶狀連續熱區、移動狹帶源、上部高位源或結構性面源。

若樣態中以單一突出事件為主，例如異常改裝車排氣、橋面伸縮縫衝擊、列車煞車尖叫或匝道急加速車流，則指向性噪音計較容易捕捉明確方位與事件峰值，這類樣態偏向「事件主導型」。若樣態中主要為連續穩定車流或長列車通過，則聲場較接近時間平均化的線性整合音場，這類樣態偏向「連續主導型」。若場景同時存在高架道路、平面道路與鐵道，且各自時間結構不同、頻譜分布部分重疊，則屬「複合重疊型」，其分離難度通常顯著高於單一源場景。[3][5][7] 依音源型態分類的價值，在於它直接決定後續量測策略：事件主導型較重視時間同步與事件標記，連續主導型較重視穩定取樣與空間平均，而複合重疊型則更需要多測點與交叉驗證。[3][6][8]

7.3 依空間幾何條件分類

第二層分類，是依空間幾何條件分類。環境噪音並不是在抽象空間中傳播，而是在道路、橋梁、建築、邊坡、欄杆、隔音牆與立體交通設施交織的三維環境中傳播。ISO 9613-2 與 CNOSSOS-EU 均強調，聲音傳播結果會受到距離、地面效應、障礙物、繞射與反射影響；換言之，不同的空間幾何配置，本身就足以把相同音源轉變為不同聲場。[2][4][5]

從指向性量測角度，可將場址大致分為開放直視型、半遮蔽型、完全遮蔽型、立面近接型、橋下包覆型與高樓層俯視型等幾類。開放直視型的特徵，是測點與主要音源之間有穩定視線，反射面較少，最有利於建立清楚的來向判讀與基準樣態；半遮蔽型則可能有隔音牆、中央分隔島、護欄或部分建物造成局部視線切割，使直接音與繞射音並存；完全遮蔽型則常落在聲影區或建物後側，此時方向資訊容易受到繞射與多重反射扭曲。[2][3][11] 立面近接型是都市場域極常見的類型，外牆、窗台、陽台板與街廓幾何會顯著改變聲場；橋下包覆型則常伴隨梁體反射、柱體散射與地面二次反射，方向熱圖容易與實際音源位置產生偏移。[2][12] 高樓層俯視型則雖有較好視域，但同時也可能整合多條道路與多層軌道，使原本在地面可分辨的來源，在高處反而被統合成寬廣扇形聲場。[4][5] 由此可知，空間幾何條件不只是背景資訊，而是樣態分類的核心座標系。[2][4]

7.4 依受體暴露特性分類

第三層分類，是依受體暴露特性分類。世界衛生組織環境噪音指引與歐洲噪音評估制度皆顯示，噪音治理不能只看聲源排放，更應回到受體暴露與健康風險的概念；也就是說，量測與分類不應只問「哪裡最大聲」，還要問「人在哪裡真正長期承受影響」。[5][13] 因此，同一個音源場景，若其主要受體位於一樓臨路住家、二至四樓外牆、高樓層陽台、校園操場、醫院立面或屋頂設備層，所對應的量測樣態便不相同。

受體暴露特性可區分為地面行人暴露型、低樓層立面暴露型、中高樓層立面暴露型、陽台近接暴露型與非典型敏感受體型。地面行人暴露型較重視步行高度附近的聲壓場，且容易受鄰近商業音、機車事件音與人聲干擾；低樓層立面暴露型則兼具道路直接音與立面反射增益；中高樓層暴露型常顯現高架道路、鐵道上部音源或遠距交通設施的整合效應；陽台近接暴露型則更接近居住者主觀感受，但幾何條件較不標準化；非典型敏感受體型如學校操場、醫療空間或特殊公共設施，則往往需要在標準化量測與實際使用情境之間取得折衷。[1][4][5] 這一分類對指向性噪音計的意義在於：它決定結果要以技術影像為主，還是以受體解釋為主。若忽視受體暴露特性，則再精密的方向分析，也可能無法回答真正的治理問題。[4][13]

7.5 依傳播路徑複雜度分類

第四層分類，是依傳播路徑複雜度分類。聲音傳播若主要由單一路徑支配，量測與解讀相對單純；但若同時存在直接音、地面反射、立面反射、橋底反射、障礙

繞射與局部散射，則場域即屬高複雜度樣態。ISO 9613-2 與 CNOSSOS-EU 都清楚指出，聲音在戶外傳播時不只受距離控制，尚受地形、屏障、地表、邊緣與反射面影響。[2][4] 對指向性噪音計而言，傳播路徑愈複雜，來向影像與實際來源位置之間就愈可能出現偏移。

若場域近似單一路徑直接傳播，可稱為低複雜度樣態，最適合建立理想基準與模型校驗。若同時存在少量穩定反射或部分遮蔽，則屬中複雜度樣態，通常仍可在適當測點與多點佐證下取得可用結果。若場域具有強烈都市峽谷效應、橋下混響、建物轉角聚焦、玻璃立面高反射或多層結構重複反射，則屬高複雜度樣態，此時單測點方向判讀需極為保守，並宜轉向多測點、同步、事件比對或模型輔助分析。[3][6][12] 傳播複雜度分類的目的，正是讓量測者在一開始就知道：本場景是否適合直接做聲源歸責，或僅適合做樣態診斷與熱點描述。[2][3]

7.6 依行政應用需求分類

第五層分類，是依行政應用需求分類。技術上可量，不等於行政上可用；反之，行政上需要的問題，也不一定能由單一量測立即回答。ISO 1996-2 強調環境噪音量測須具代表性與可比較性，而歐洲人口暴露與戰略噪音圖制度則更進一步把量測、模型與政策目標串聯起來。[1][4][5] 因此，指向性噪音計的樣態分類還必須考慮最終用途。

行政用途至少可分為五類。第一類是基準建檔型，重點在建立未來可比較的標準資料。第二類是改善驗證型，重點在比較隔音牆、吸音設施、鋪面或交通管制前後差異。第三類是暴露說明型，重點在向民眾、議會或法院說明特定受體實際承受之聲學情境。第四類是爭議歸責型，重點在處理多系統、多機關、多業主間的噪音責任爭議。第五類是制度研發型，重點在累積複合性音源分離所需的訓練資料、幾何資料與樣態對照資料。[1][3][6] 同一個場址若其行政用途不同，適用樣態也會改變。例如作為改善驗證型時，最重要的是測點重現性；作為爭議歸責型時，則最重要的是多點同步與證據鏈完整性；作為制度研發型時，則更重視資料標記與樣態可擴充性。[3][6][8]

7.7 理想基準型樣態

理想基準型樣態，是指在開放、直視、反射較少、遮蔽有限且主要音源相對單純的條件下，所形成的基準量測場景。這類樣態的存在價值，不在於它最常見，而在於它最適合作為制度與方法的起點。依 FHWA 現地量測指引與 ISO 1996-2 的基本精神，標準化場址應盡可能避免不必要的局部反射與幾何不確定性，以確保資料在不同期次與不同團隊之間具可比性。[1][11]

在理想基準型中，指向性噪音計通常能較穩定地顯示主聲源之水平來向與通過事件軌跡，熱圖較容易與實際道路或軌道位置對應。這類場景最適合作為儀器校正、測點規範建立、樣態模板建立與模型比對的標準案例。[3][6][9] 然而，必須強調的是，理想基準型雖然在技術上最乾淨，卻未必最能代表真實都市受音情境；因此，它應作為方法學基準，而不是所有現地量測的唯一理想。[4][11] 若沒有這類

基準樣態，後續對高反射、高遮蔽或高整合暴露場景的解讀，將缺乏穩定的參考座標。[3][6]

7.8 近場高反射型樣態

近場高反射型樣態，指測點靠近建物立面、玻璃帷幕、擋土牆、隔音牆、騎樓頂板、橋側板或其他硬質界面，導致直接音與反射音同時強烈存在的場景。Morillas 等文獻回顧指出，環境噪音測點位置對結果有實質影響，尤其立面條件與幾何差異會造成顯著測值變動；部分研究亦顯示立面附近或都市峽谷中，聲壓位準可能因反射而被強化。[4] Applied Acoustics 亦有專文指出，測量麥克風位置本身會影響環境噪音評估結果，這對近場高反射樣態尤其具有警示意義。[14]

對指向性噪音計而言，近場高反射型最棘手之處，在於熱點與來向圖可能同時呈現實際音源方向與鏡像反射方向；若量測者未先辨識反射面位置，容易把強烈反射誤判為第二主音源或錯誤的主導來源。[3][6] 然而，這類樣態並非不能量，而是必須明確轉換目的：它較適合作為「受體真實近接聲場」的描述樣態，或作為立面暴露與反射效應研究樣態，而不宜單靠單點結果做直接歸責。[1][3][4] 若要提高可用性，應配置至少一個較遠離反射面的參考測點，並輔以現地幾何盤點與同步事件比對。[6][11]

7.9 高樓層整合暴露型樣態

高樓層整合暴露型樣態，是都市高密度區極具代表性的類型。當受體位於中高樓層時，原本在地面會被建物、隔音牆或地形遮蔽的高架道路、橋面與鐵道，可能重新進入直視範圍，使受體同時暴露於多個遠近交通系統。CNOSSOS-EU 在受體點高度與立面暴露概念上的制度化處理，正反映高度是環境噪音評估不可忽視的核心條件。[5] 此外，高樓層場景因視域擴大，也容易把多個來源整合成廣角聲場，使方向性圖像看似清楚，實則為多來源疊加結果。[4][5]

這類樣態對指向性噪音計既是機會，也是限制。機會在於高樓層通常較少受地面局部遮蔽與短程干擾影響，可以看見較完整的交通系統；限制則在於聲音來源之間的角距可能縮小，尤其當多條道路沿近似平行方向延伸時，陣列未必能穩定分開其貢獻。[3][6] 因此，高樓層整合暴露型樣態適合用於暴露說明、趨勢比較與高架系統影響辨識，但若涉及精細歸責，仍需搭配地面參考點、事件同步與必要之模型分析。[2][3][5] 從治理角度看，這類樣態尤其重要，因為高架交通設施周邊的居民爭議，往往正來自樓層差異所造成的暴露不均。[5][13]

7.10 極近場干擾型樣態

極近場干擾型樣態，是指測點極接近局部強聲源或非代表性干擾源，導致量測結果雖然訊號強、畫面清楚，卻失去對整體環境問題的代表性。例如靠近單一排氣管、局部空調設備、路側發電機、施工機具、警示器、路口號誌蜂鳴器，或把陣列直接架設在距車道極近的位置，皆可能使局部事件壓過原本欲分析的整體交通噪音。[1][11]

這類樣態的最大風險，在於「看起來很專業，實際上很偏」。由於聲源太近，角度解析與熱點對比往往異常鮮明，使人誤以為已找到真正主音源；但從環境噪音評估的角度看，此結果可能只是局部近場設備診斷，而非居民受音或系統貢獻分析。[1][3] 極近場干擾型樣態並非沒有用途，它非常適合設備異常檢測、故障定位與局部噪音熱點鑑別，但不宜直接外推為整體路段或整體運輸系統的代表數據。[3][9] 若場址不可避免存在極近場干擾，則應明確分離「局部源診斷點」與「環境代表點」，不得混用。[1][11]

7.11 橋下吸音設施比較型樣態

橋下吸音設施比較型樣態，是本書所特別強調的一類應用型樣態。橋下環境因具有橋底板、梁體、柱體、地面與側牆等多重界面，常形成強烈反射與局部混響，導致橋面交通噪音在橋下空間被放大、延遲或方向模糊。[2][12] 當地方政府或業主在橋下增設吸音板、吸音牆、包覆構件或局部聲學改善材料時，最關心的問題通常不是抽象的總量，而是「改善前後聲場樣態是否改變」、「反射熱點是否消失」、「殘餘主導來向是否轉移」。這正是指向性噪音計特別適合發揮的領域。[3][6]

在此樣態下，重點不只在比較分貝大小，更在比較聲場結構。若改善後熱點從橋底中央轉為橋面側向，代表吸音設施對橋底反射有效，但上部直接音仍主導；若改善後整體方向分布收斂，代表原先多重反射被削弱；若改善後地面與側向差異縮小，則可能表示橋下空間的聲學包覆性下降。[2][3] 這類樣態的最佳做法，通常是在改善前後維持相同測點、相同高度、相同事件條件，並至少配置橋下核心點、橋外參考點與側向背景點，以避免把交通流變化誤認為設施效果。[11][12] 從行政上看，橋下吸音設施比較型樣態非常適合作為工程驗證、驗收佐證與後續優化設計的依據。[3][11]

7.12 爭議歸責型樣態

爭議歸責型樣態，是複合性音源治理中最敏感也最具挑戰性的類型。此類場景通常同時存在兩個以上可能的責任來源，例如高架道路與平面道路、國道與地方道路、鐵道與道路、橋面交通與橋下機械設備，或不同管理機關所屬之設施彼此疊加。民眾的主觀感受往往非常明確，但若只用單一全向噪音計，很難說明究竟哪一個系統在何一時段、以何種方式構成主要貢獻。[1][3][6]

這正是指向性噪音計最常被期待介入、也最容易被過度期待的場景。從近年的環境噪音陣列研究可知，利用空間資訊、方向分布與事件分類，確實可以比傳統單點量測更有效地辨識主要來源，甚至估算部分來源對總量的貢獻。[6][7][8] 但同時也必須誠實承認，在多條平行線音源、近似角距、高反射與時間重疊的情況下，僅靠單一陣列並不足以保證法律意義上的精準歸責。[3][6] 因此，爭議歸責型樣態最合理的制度定位，不是把指向性噪音計神化為「唯一裁判」，而是把它作為多證據鏈中的關鍵一環，與多測點同步、交通事件紀錄、攝影影像、標準噪音指

標與必要之傳播模型共同構成判斷基礎。[2][3][6] 這種保守而嚴謹的定位，反而更有助於未來把指向性量測逐步納入正式複合性音源分離制度。[1][3]

7.13 樣態分類與測量方法選擇之對應關係

樣態分類若不能導出量測方法選擇，便只是命名遊戲。真正成熟的分類系統，必須能回答：哪一類樣態適合單點全向量測、哪一類需要陣列式指向量測、哪一類必須多點同步、哪一類宜結合模型、哪一類僅適合做診斷而不宜直接作行政歸責。

[1][2][3]

就對應關係而言，理想基準型樣態最適合作為標準化基線量測，可採單一指向性測點搭配參考全向測點，以建立方向與總量的對應。[1][6] 近場高反射型樣態則宜增加參考點與幾何盤點，並把結果定位為立面或近接聲場分析，而非單點歸責。

[4][14] 高樓層整合暴露型樣態適合採垂直分層測點與高低點配對，強調暴露差異與高架來源辨識。[5] 極近場干擾型樣態適合作為局部源診斷，若要與環境代表值連結，必須另設代表測點。[1][3] 橋下吸音設施比較型樣態則最適合前後對照設計與多點同步，重在比較聲場結構改變。[2][11] 爭議歸責型樣態則幾乎必然需要多測點同步、事件比對、影像佐證與必要的模型推估，否則難以支撐高強度行政使用。[2][3][6]

簡言之，樣態愈理想，方法可愈簡；樣態愈複雜，方法就必須愈組合化。這也意味著未來若要建立複合性音源分離之測量規範，不能只規定儀器等級與指標名稱，更必須把樣態識別納入程序前段。[1][2][6]

7.14 指向性噪音計於不同樣態下之適配性

綜合前述，指向性噪音計在不同樣態下的適配性，並非單純的「可用」或「不可用」，而是一種由高到低、由直接到輔助的光譜。於理想基準型、單一主導源型、橋下改善比較型與部分高樓層暴露型樣態中，指向性噪音計通常具有高適配性，因為其空間資訊能直接轉化為治理資訊，例如主導方向、熱點位置、改善前後結構差異與高架來源可視化。[3][6][9] 於近場高反射型與中度複合重疊型樣態中，其適配性屬中等，仍可提供有價值的方向與熱點資訊，但須依賴參考點、同步資料與幾何解釋，不能孤立使用。[3][4][6] 於極近場干擾型、完全遮蔽型與高爭議多源重疊型樣態中，其適配性則轉為條件式，亦即若沒有額外的多點、模型與事件控制，便不宜直接推導強結論。[2][3]

這種分級適配觀念，正是未來制度化的關鍵。Majjala 等人與 Murovec 等人的研究已指出，當環境噪音監測結合來源分類、方向性與自動化事件判別時，可顯著提升來源辨識與貢獻估計能力，但其前提仍是場景條件與資料品質足以支撐分類結果。[7][8] 換言之，指向性噪音計不是萬能量測器，而是對某些樣態特別有力、對某些樣態必須謹慎使用的高階工具。只有先建立樣態分類，再談方法選擇與證據強度，指向性量測才可能從研究展示走向行政實用，並進一步成為未來複合性音源分離、責任歸屬分析與智慧化噪音治理的重要基礎。[1][3][6]

文獻資料

- [1] International Organization for Standardization. (2007). *ISO 1996-2:2007 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination of environmental noise levels*. ISO.
- [2] International Organization for Standardization. (2024). *ISO 9613-2:2024 Acoustics—Attenuation of sound during propagation outdoors—Part 2: Engineering method*. ISO.
- [3] 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.
- [4] Morillas, J. M. B., Gozalo, G. R., González, D. M., Moraga, P. A., & Vílchez-Gómez, R. (2016). A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Science of the Total Environment*, *565*, 595–606.
- [5] European Commission. (2015). *Commission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC*. Official Journal of the European Union.
- [6] Murovec, J., Prezelj, J., & Batistič, L. (2018). Microphone array based automated environmental noise measurement system. *Applied Acoustics*, *140*, 287–296.
- [7] Maijala, P., Shuyang, Z., Heittola, T., & Virtanen, T. (2018). Environmental noise monitoring using source classification in sensors. *Applied Acoustics*, *129*, 258–267.
- [8] Murovec, J., Batistič, L., & Prezelj, J. (2023). Automated identification and assessment of environmental noise sources. *Heliyon*, *9*(2), e13181.
- [9] Kümmritz, S., Blaschke, J., & Giebel, T. (2021). Visualisation of train noise with acoustic cameras. In *Proceedings of the 27th International Congress on Sound and Vibration*.
- [10] Railway noise overview source. In *Railway Noise Pollution in Urban Environments*. Springer.
- [11] Federal Highway Administration. (2018). *Noise Measurement Field Guide (FHWA-HEP-18-066)*. U.S. Department of Transportation.

[12] Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Anfosso-Lédée, F. (2012/2014). *Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU) / The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping*. European Commission Joint Research Centre.

[13] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO.

[14] Zagubień, A., & Wolniewicz, K. (2021). Impact of measuring microphone location on the result of environmental noise assessment. *Applied Acoustics*, 172, 107662.