

第六章 指向性噪音計測點選擇

6.1 測點選擇之核心原則

指向性噪音計之測點選擇，不能只理解為「把儀器放在哪裡比較方便」，而應理解為一種兼具聲學幾何、傳播機制、行政目的與後續可比性的整體設計。環境噪音量測標準普遍強調，測得之音壓位準若要作為法規判讀、情境比較、模型校正或改善前後成效驗證的依據，測點必須先滿足代表性、再現性與可追溯性三項要求。[1][2] 對指向性量測而言，這個要求比全向性量測更嚴格，因為陣列或波束成形（beamforming）不僅量到「多大聲」，還試圖回答「聲音從哪裡來、以何種角度來、在何處最具主導性」；一旦測點幾何關係設定錯誤，後續方向判定、熱點影像與音源貢獻解釋都可能失真。[1][3][4]

因此，測點選擇的核心原則應包含四層思考。第一，必須明確界定量測目的，是要表徵音源排放、居民暴露、背景基線，還是複合音源分離；不同目的對高度、距離、遮蔽容忍度與同步量測需求完全不同。[1][5][6] 第二，必須界定幾何關係，包括測點與道路或軌道之水平距離、與路面或軌面之相對高差、與建物立面之相對位置，以及是否處於直視區或聲影區。[1][2][5] 第三，必須界定傳播條件，也就是地面效應、反射面、橋底、邊坡、護欄、隔音牆與都市峽谷等因素是否正在改變聲波入射角與能量分布。[2][5][7] 第四，必須界定行政應用情境，使不同期次、不同地點、不同儀器取得的資料仍可互相比較，而不會因測點主觀選取造成結論偏差。[1][3][8]

6.2 音源端測點、受體端測點與背景測點

在指向性量測架構中，最常見但也最常被混淆的三類測點，分別是音源端測點、受體端測點與背景測點。音源端測點的功能，在於盡量接近主要發聲區，取得較高訊噪比與較清楚的角度資訊，常用於辨識輪軌接觸、車輪扁平、橋面伸縮縫衝擊、排氣系統、煞車尖叫或特定車道的異常車流事件。[3][4][9] 這類測點重視的是方向解析力與事件可分辨性，而不是直接代表居民實際暴露。[3][9] 受體端測點則是站在居住者、學校或敏感建物的位置思考，其目的在於回答「人真正受到多少影響」，因此更重視立面前、樓層高度、陽台或外牆附近的人射音場，以及是否符合暴露評估的標準幾何設定。[1][6][8] 背景測點則不是拿來證明主音源不存在，而是用來建立不受主交通事件直接支配時的底噪條件，藉此輔助分離連續背景、局部非代表性干擾與事件性峰值。[1][4][10]

真正成熟的複合音源研究，通常不會只設一種測點，而會把三者組成互相校核的觀測網。音源端測點可提高空間定位能力，受體端測點可保留行政與健康風險意義，背景測點則提供事件剔除、權重修正與基線比對的依據。[1][4][6] 若只設音源端測點，容易得到漂亮的聲學影像，卻無法說明居民端貢獻量；若只設受體端測點，則容易面臨多個線音源疊加、方向重疊與立面反射干擾，使主責音源判讀

困難；若沒有背景測點，則複合性場域中來自風、蟲鳴、局部機械設備、旁側道路或臨時施工的干擾，就可能被誤認為主要交通系統本身。[1][3][4]

6.3 測點與道路、軌道、高架橋之相對距離

距離是影響指向性量測最根本的幾何參數之一。對單一移動音源而言，距離改變的不只是能量衰減，還包含入射角擴張、近場與遠場特性轉換，以及不同子音源在陣列上可否被視為可分離目標。[2][3] 過近時，局部構件如輪胎、排氣管、車輪、鋼軌接頭或橋面局部衝擊聲可能過度突出，使結果偏向設備診斷而非環境暴露；過遠時，整體音場則傾向整合化，來自不同車道、不同軌道甚至不同高程的聲源角度差變小，陣列分離能力反而下降。[3][9] 因此，測點距離不應只追求「越近越清楚」或「越遠越代表實際居民」，而要依量測目的設定分層距離。[1][3]

道路量測方面，美國聯邦公路總署的實務指引將許多現地基準量測設在離地約 1.5 公尺，並要求避開近距反射面與不具代表性的局部噪音干擾，以確保資料可用於現況驗證與模型校正。[5] 鐵道系統方面，ISO 3095 的標準通過位置 A 等幾何配置，使通過噪音得以在固定距離與固定高度下取得可重現結果；公開可得的 ISO 3095 資料顯示，典型通過量測位置為距軌道中心線 7.5 公尺、距軌頂 1.2 公尺，若需評估上部音源則可增設較高位置。[9][11] 在列車聲學相機案例中，研究團隊同時把大陣列設在約 13.2 公尺處作整列車音源影像，小陣列設在約 7.5 公尺處分析輪軌接觸，再以 1.2 公尺高的單支麥克風記錄通過位準，正顯示不同距離應對不同解析需求。[9]

高架橋環境則更複雜。因橋面高度提高，聲源與測點之間的斜距、俯仰角與橋腹反射皆發生變化；若測點只用地面水平距離描述，往往低估實際幾何差異。[2][7] 在高架段下方或側方量測時，橋底板與梁體不僅可能形成額外反射，也可能改變陣列對上部與下部音源的視角，導致同一個車流事件在不同測點被解讀為不同主導音源。[2][3] 因此，對高架道路與高架鐵道，不應只記錄「距道路幾公尺」，而應同時記錄水平距離、垂直高差、斜距與入射仰角，否則後續比較常會出現名義上相同距離、聲學上卻完全不同的錯誤。[2][3][7]

6.4 測點與道路系統之相對高度

高度在交通噪音量測中不是附帶條件，而是結構性條件。因為交通噪音並非單點發聲，而是沿線分布的輪胎路面、引擎、排氣、車體擾流、輪軌接觸、橋梁輻射與附屬機電共同形成之多高度、多方向聲場，所以同一條道路或軌道在不同量測高度上，常會出現可觀的頻譜與能量差異。[2][7][10] 歐盟 CNOSSOS-EU 的人口暴露評估即明確以住宅建築立面前、距地表 4 公尺的受體點作為基本幾何基準，這並非任意取值，而是為了把暴露分析建立在可比較的標準受體高度上。[6]

然而，4 公尺高度適合暴露評估，不必然等同於最適合指向性分離。美國聯邦公路總署在多數現地檢核中常以 1.5 公尺高度作為基本麥克風高度，反映較接近一般戶外站立受體與現地操作穩定性。[5] 鐵道通過噪音的標準位置又常以 1.2 公尺高於軌頂作為基準，用來保證不同車輛與線路條件下的可比性。[9][11] 由此可知，高度並沒有單一「最佳值」，而是取決於量測目的：若要對接法規暴露與建物立面，4 公尺附近的重要性較高；若要校驗一般地表接收音場或作道路現況檢核，1.5 公尺常較實用；若要對接鐵道標準通過噪音或輪軌源分析，則應回到對應標準高度。[5][6][9]

更重要的是，高度改變會同步改變遮蔽與視線條件。原本在一樓被隔音牆、中央分隔島、護欄或邊坡部分遮蔽的路段，在高樓層或頂樓可能轉為完全直視；原本以地面測點判斷屬於橋底反射主導的場域，到了二樓外牆前可能轉為橋面直接音主導。[2][7] Morillas 等研究也指出，立面附近的聲場隨高度可能出現非直觀變化，甚至可能出現隨高度上升而音量增加的情形，顯示若忽略高度效應，將嚴重影響暴露估計與控制措施設計。[4] 因此，指向性噪音計在高密度都市場域中，宜採高度分層思維，而非只用單一高度代表整棟建物或整個社區。[4][6][7]

6.5 頂樓、陽台、建物外牆與自由場測點差異

頂樓、陽台、外牆前與自由場，是四種性質明顯不同的量測環境。頂樓測點通常具有較寬廣的視域，較容易直接看見多條道路、多層高架或多股軌道，因此有利於辨識遠距高架或上層橋面之主導方向，但也更容易同時接收遠處多源疊加，使局部責任歸屬變得模糊。[2][3] 陽台測點則接近實際居住暴露，對民眾感受最具說服力，但欄杆、女兒牆、天花板與側牆會改變反射與繞射條件，若未詳實記錄幾何，常造成與標準自由場或立面前基準不可直接比較。[1][4] 外牆前測點可對接立面暴露評估，尤其適合與歐洲人口暴露或建築立面受音分析銜接；但此類測點天然受立面反射影響，不能直接與遠離建築反射面的自由場測點混為一談。[1][6] 自由場測點則重在減少附近大反射面干擾，較適合作為模型校正、不同時期比較與工程效果基線，但不一定等同真實住戶在陽台或窗外所感受到的聲環境。[1][5]

因此，這四種測點沒有誰高誰低，只有目的是否相符。若行政爭點是「居民在住宅外牆前承受多少交通噪音」，那麼立面前測點與樓層分層測點就比遠處自由場更具說服力。[6][8] 若技術爭點是「哪一個音源構件最值得優先改善」，則近場自由視域或頂樓視域較大的指向性測點反而更有解析價值。[3][9] 真正嚴謹的做法，不是只選一種，而是明確標示每個測點所代表的聲學意義：頂樓代表高視域主導方向，陽台代表實居暴露，外牆前代表立面受音，自由場代表可比較之標準化場域。[1][3][6]

6.6 遮蔽區、聲影區與直視區之判讀

遮蔽區、聲影區與直視區的判讀，是測點選擇中最容易被忽略、卻最容易左右結論的關鍵。直視區是指測點與主要音源之間具有清楚視線與主要傳播路徑，不存在足以切斷主傳播線的障礙；遮蔽區則是傳播線被護欄、隔音牆、橋體、建物、邊坡或其他構造部分阻擋；聲影區則通常指障礙物後方聲能顯著降低、繞射主導的區域。[2][7] 從 ISO 9613-2 的戶外傳播觀點來看，反射、地面效應與繞射都會改變受點聲級，而屏障存在與否，更會直接改變音場的主導機制。[2] 這表示一個測點若位於聲影區，即使量到的總音量不低，也不代表它適合做主音源方位判讀，因為此時受點能量可能是多重反射與繞射疊加，而非直接入射。[2][3]

對指向性噪音計而言，遮蔽與直視的差別尤其重要。直視區測點較容易穩定辨識主要來向，適合作為音源定位與主責音源比較；遮蔽區測點則適合檢驗隔音設施、建築遮蔽或地形修正後的殘餘音場，但若拿來直接推論「哪條道路最吵」或「哪一股軌道貢獻最大」，常會高估旁路反射與低估被遮蔽主源。[2][3] 在複合高架與平面道路並存的場域，尤其要避免把橋墩後、建築轉角後或橋下深處的測點，誤當成代表整體受音或整體主導音源的標準點。[2][7] 正確做法是先以現地視線分析、簡易剖面圖或模型判讀確認測點屬於直視、半遮蔽或全遮蔽，再決定其用途，而不是量完才事後解釋。[2][5][7]

6.7 反射面、建築立面與橋底環境之影響

任何鄰近的大型反射面，都可能把原本單純的方向資訊複雜化。FHWA 的現地量測指引即提醒，在某些量測配置下，應確認車道或麥克風附近沒有足以造成額外反射的表面；其聲學邏輯非常明確：若反射路徑過強，所量到的不再是單一直接音場，而是包含鏡像路徑的混合場。[5] Morillas 等人的回顧也指出，ISO 1996-2 在規範性文字中對測點與立面距離有要求，但其他幾何因素在實務上同樣會影響結果，而文獻中已觀察到相當大的變異。[4] 換言之，若量測者只記得「離牆幾公尺」，卻忽略對街立面、陽台板、騎樓頂板、護欄、橋腹、聲屏障內側或擋土牆的反射，則資料極可能表面合規、實際失真。[4][5]

都市建築立面最常造成兩種問題。第一種是立面增益，也就是外牆前音量高於自由場，這對暴露評估有意義，但對不同測點直接比較不利。[1][4] 第二種是角落與凹槽效應，也就是建築轉角、退縮面、陽台凹槽或窗台附近形成局部聚焦或反覆反射，導致某些頻帶或某些方位被不成比例地放大。[4] 橋底環境則常同時具有硬質底板、梁體陰影、柱體散射與地面再反射等特徵，使得橋下測點極可能出現低頻殘響感較強、中高頻方向不穩定、時間延遲成分增加的現象。[2][7] 在這種場域，若仍以單測點單角度直接判定來源，往往會把橋底反射熱點誤認為真實音源位置。[2][3] 因此，在橋下或立面鄰近場域使用指向性噪音計時，最重要的不是「儀器很先進」，而是量測前是否先完成反射幾何盤點。[3][4][7]

6.8 高架段、平面段、匝道段與橋下段之差異

高架段、平面段、匝道段與橋下段在聲學上不是同一種道路。平面段通常較接近經典地面線音源，可用地面效應、距離衰減與建物遮蔽邏輯處理；高架段則因聲源抬升、橋面結構輻射、側向視域擴大與隔音牆高度相對改變，常使較遠樓層受點也直接暴露於音源視線之下。[2][7] 匝道段則因曲率、加減速、坡度與車道配置變動，容易產生不同於主線的引擎負荷噪音、輪胎尖銳摩擦聲與不穩定事件峰值；這類場域的測點若只設在單一固定距離，往往難以完整代表不同車流狀態。[5][7] 橋下段則最不適合用簡化線音源直觀處理，因其音場常同時包含橋面直接音、橋底反射、柱體散射與旁側道路再疊加，方向性判讀必須格外保守。[2][3]

因此，測點策略也必須分段化。高架段宜同時設置側向高樓層暴露點與地面參考點，以避免只看地面就低估高樓直視暴露。[6][7] 平面段可用較標準化的距離與高度配置建立橫斷面比較。[5] 匝道段則應在加速、減速與曲線外側三類區域中選取能代表動態差異的點位，必要時搭配事件同步影像辨識。[5][7] 橋下段則宜至少配置一個橋外直視參考點、一個橋下核心點與一個側向背景點，藉此判斷橋底混響對總量與方向判讀的扭曲程度。[2][3] 只有承認不同路段具有不同聲學本質，測點才會真正服務於治理，而不只是形式上的「都有量」。[2][5][7]

6.9 多測點配置與同步量測設計

複合性音源分離的關鍵，不在於單一測點儀器有多昂貴，而在於多測點是否具備同步、互補與交叉驗證能力。Murovec 等人指出，陣列式環境噪音監測若能結合主導方向判識、非相關事件剔除與事件分類，可降低人工作業並提升結果可靠性。[10] 這說明多測點設計的價值，不只是增加樣本數，而是讓不同位置的資料在時間上彼此對照，區分何者屬於共同事件、何者屬於局部干擾、何者屬於特定方位之主導源。[10] 在鐵道案例中，雙陣列同步配置一個著重整體列車影像、一個著重輪軌局部，再配合標準通過麥克風記錄整體位準，就是典型的多層級同步設計。[9]

對都市道路或複合高架系統而言，多測點配置至少應回答三件事：同一事件是否在不同測點同時出現、其主導方向是否一致、其強度衰減是否符合幾何預期。[2][3] 若三者一致，則可較有把握地判定特定路段或軌道為主責來源；若時間一致但方向不同，往往代表反射、遮蔽或多源疊加；若方向一致但強度分布異常，則可能暗示局部構造放大、近場局部源或背景干擾混入。[2][3][10] 因此，同步量測設計不應只同步開始時間，而應同步設備時鐘、攝影影像、交通事件紀錄、車種判識與必要之氣象條件。[5][10] 少了時間同步，複合音源分離就會從科學分析退化為經驗猜測。[5][10]

6.10 測點選擇之代表性、可比性與行政適用性

測點如果不能代表問題，就不適合作為政策依據；測點如果不能跨期比較，就不

適合作為趨勢依據；測點如果不能對接行政語言，就不適合作為處分或工程決策依據。代表性意味著測點必須反映該區域主要受音特徵，而不是刻意挑選最安靜或最吵的極端角落。[1][5] 可比性意味著不同期次量測必須維持相同或可換算的幾何條件，包括高度、距離、立面關係、儀器模式與資料處理方法。[1][5][6] 行政適用性則意味著測點應能清楚回答主管機關最在意的問題，例如是否代表居民外牆前暴露、是否能驗證改善工程、是否能支撐模型校正、是否能用於責任歸屬或民眾溝通。[1][6][8]

指向性噪音計的特殊價值，在於可作為未來複合性音源分離的工具，但前提仍是測點設計要能承接傳統行政需求。換言之，指向性量測不應把自己孤立成「研究型附加工具」，而應在測點層次上同時保留對 LAeq、事件峰值、立面暴露與標準位置的銜接能力。[1][3][9] 這樣的資料才有機會被用於法規修正、監測制度升級、噪音地圖校正與改善工程排序，而不是停留在一次性的展示影像。[3][6][8]

6.11 測點選擇常見錯誤與修正方式

測點選擇最常見的第一類錯誤，是把方便到達的位置誤當成代表位置，例如只因人行道寬敞、屋頂好架設或陽台好借用，就忽略其是否處於不正常反射區、局部遮蔽區或異常高視域區。[4][5] 第二類錯誤，是只記錄平面距離，不記錄高差、斜距、立面距離與周邊反射面，導致後續資料無法重建，也無法比較。[1][4] 第三類錯誤，是把受體點、音源診斷點與背景點混為一談，用同一組數值同時支持不同結論。[1][10] 第四類錯誤，是未做同步校時與事件標記，使多測點資料名義上很多、實際上不能交叉驗證。[5][10] 第五類錯誤，則是把遮蔽區或橋下點的方向結果直接解釋成主責音源位置，而未先排除反射與繞射影響。[2][3]

修正方式並不神秘，但需要紀律。第一，任何測點都應附現地照片、平剖面簡圖、相對高度與周邊結構說明。[5] 第二，對立面點與自由場點必須分開標示，不得混用。[1][4] 第三，對高架、橋下、轉角與陽台等複雜點位，應先做視線與反射風險判讀，再決定其用途。[2][7] 第四，凡以複合音源分離為目的者，原則上應有多測點與同步設計，而非只靠單一漂亮熱圖下結論。[3][10] 第五，所有測點都應以「如果一年後重測，另一組人能否在同樣位置複現」為最低標準；能複現，才有行政價值。[5][8]

6.12 都市高密度環境之測點選擇策略

都市高密度環境是指向性量測最具挑戰、也最有必要發展制度化測點策略的場域。這類環境常同時存在高架道路、平面道路、捷運或鐵道、交叉口、建築峽谷、騎樓空間、立面反射、局部商業設備與大量機車事件聲，導致單一測點往往難以代表整個街廓。[4][6][7] 在此情境下，最佳策略不是追求單點完美，而是建立分層、分功能的測點架構：以立面前標準受體點掌握暴露，以自由視域診斷點掌握主導

方向，以背景點掌握非代表性干擾，再以必要的高樓層點掌握垂直暴露差異。
[1][4][6]

在操作上，都市高密度區建議採取「橫向一系列、垂直一系列、背景一系列」的三列式思維。橫向一系列，是沿道路或軌道法向方向布設近、中、遠三層點，用以看出衰減、遮蔽與方位變化；垂直一系列，是在一樓、約四公尺高度與較高樓層設點，用以看出樓層暴露差異與高架直視效應；背景一系列，則是選取不直接面向主要音源、但仍屬同一街廓聲景之位置，用以辨識局部設備噪音與非交通底噪。[4][6][7] 若再加上同步攝影、事件標記與交通流資料，則指向性噪音計不僅能作為量測工具，更可逐步成為未來複合性音源分離、責任歸屬分析與都市噪音治理精準化的重要基礎工具。[3][10] 這也正是本章對測點選擇最核心的結論：測點不是量測的附屬品，而是整個指向性噪音治理方法論的起點。[3][4][10]

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] Federal Highway Administration. (2018). *Noise Measurement Field Guide (FHWA-HEP-18-066)*. U.S. Department of Transportation.

[6] 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.

- [7] European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise. (2006). *Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure (Version 2)*. European Commission.
- [8] World Health Organization Regional Office for Europe. (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. WHO.
- [9] 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*. International Institute of Acoustics and Vibration.
- [10] Murovec, J., Prezelj, J., & Batistič, L. (2018). Microphone array based automated environmental noise measurement system. *Applied Acoustics*, 140, 287–296.
- [11] International Organization for Standardization. (2013). *ISO 3095:2013 Railway applications—Acoustics—Measurement of noise emitted by railbound vehicles*. ISO.