

第十二章 指向性噪音計於複合性音源之典型應用樣態

第十二章所處理的核心問題，不只是「哪一個音源比較大聲」，而是當道路、鐵路、高架、匝道、橋下反射面、都市高樓立面與背景音同時存在時，量測結果究竟代表什麼、行政責任應如何歸屬、以及未來若要進一步走向複合性音源分離，又應如何配置案例、參數與驗證流程。國際上對環境噪音的描述、量測與評估，早已從單一音源思維，轉向兼顧健康暴露、標準化量測、共同預測模型與複合暴露反應的整合架構。例如世界衛生組織已將道路交通噪音與鐵路噪音分別納入健康風險建議值，歐盟則以《環境噪音指令》與共同噪音評估方法（Common Noise Assessment Methods in Europe, CNOSSOS-EU）建立道路、鐵路與其他環境噪音可比較的共同框架；而國際標準化組織（ISO）則在環境噪音量測、殘餘音（residual sound）與不確定度表達上，提供了可供訴訟、裁罰與工程驗證使用的方法基礎。[1][2][3][4]

12.1 高速公路平面段與高架段並存樣態，最典型的困難在於同一條運輸走廊中，同時存在不同幾何高度、不同遮蔽條件與不同傳播路徑的車流音。平面段的車輛噪音通常較易受地表吸收、中央分隔島、沿線建築與近地面遮蔽影響；高架段則因聲源抬升，視線路徑更直接，遠距傳播更明顯，且對高樓層受體的貢獻往往顯著增加。因此在實務上，若僅以單一點位的整體等效音量（ L_{Aeq} ）直接判讀，很容易低估高架段對中高樓層或遠側受體的主導性。依據 CNOSSOS-EU 與 Nord2000 等模式的共同精神，複合路段分析不能只看總量，必須回到聲源高度、受體高度、路徑遮蔽、地表效應與氣象條件逐項拆解，必要時以分段線音源建模、分頻帶傳播與立面受音分析，才能辨識「平面段近場主導」與「高架段遠場主導」之分界。[2][4][5][6]

在這種樣態下，量測策略不宜只在地面單點長時間守候，而應同步考慮垂直向的受音差異。高架噪音常在二樓以上逐步顯現其優勢，而平面車流在低樓層或近道路第一排受體則可能仍占主導。若未建立垂直剖面資料，行政爭議時常會出現一種錯誤推論，即以地面量到的數值去推估高樓層暴露，或反過來以高樓層受音主張全部責任都來自高架段。這兩種推論都忽略了複合性音源在空間上的高度非均質性。故本樣態之最佳實務，應採「地面—中層—高層」三層級受體配置，並配合車流組成、車速與重車比例同步蒐集，以建立平面與高架段的相對貢獻矩陣，此矩陣未來亦可作為陣列麥克風或指向性量測結果之交叉驗證基準。[3][5][6][7]

12.2 高速公路與平面道路複合樣態，與前述平面—高架並存最大的不同，在於兩者不僅高度可能不同，更重要的是交通行為特性明顯不同。高速公路主線常呈現高流量、高速、相對穩定的連續性噪音；平面道路則常混有號誌起步、機車穿插、重型車加速、煞車與局部鳴按喇叭等事件性成分。因此兩者雖然在長時間平均值上可能接近，但在統計音量分布、時段變化與頻譜結構上卻經常不同。此時若只

看單一 LAeq，容易將平面道路的高事件性尖峰與高速公路的穩態底噪混為一談，造成民眾主觀感受與儀器數值不一致的爭議。世界衛生組織與近年的複合交通噪音研究皆指出，煩擾感不必然與單一平均音量完全對應，音源性質、事件感、可預期性與暴露情境都會改變居民反應。[1][8][9][10]

因此，在高速公路與平面道路複合樣態中，典型應用不是簡單求出「誰比較大聲」，而是區分「誰決定長時間暴露」、「誰引發即時陳情」、「誰造成最不利時段」。高速公路通常較影響全日或夜間長期暴露指標，平面道路則可能在特定號誌週期、夜間違規改裝車輛、清晨貨運進出或交叉口加減速時段形成陳情熱點。若行政目的在於健康風險評估，應重視長時間暴露；若目的在於陳情處理與責任歸屬，則需再加入事件性音量、百分位音量、聲音影像與交通事件同步紀錄。這也是為何複合性音源分離未必只靠一種儀器完成，而必須讓模式、統計、現地錄音與影像同步構成證據鏈。[3][4][7][10]

12.3 高速公路與匝道複合樣態，則進一步把「速度變化」推到核心。主線高速車流的噪音排放，可近似視為穩態線音源；匝道進出段則因車輛加速、減速、換檔、爬升與曲線轉向而產生更強烈的變動性。對重型車而言，匝道上坡或併入主線時的動力噪音與輪胎／路面噪音比例也可能改變。CNOSSOS-EU、FHWA TNM 與各類交通噪音預測方法雖都能處理道路流量、車速與車種差異，但在匝道這種幾何複雜區位，模型品質特別依賴路段切分與輸入資料精細度。若將整個交流道區域粗略視為單一路段，往往會掩蓋匝道在局部敏感受體前形成的高貢獻現象。[4][5][7]

這類樣態在爭議上常出現「居民認為最吵的是匝道，但主管機關用主線平均數據回應」的落差。原因不在於居民一定正確或主管機關一定錯誤，而在於兩者談的是不同尺度的噪音現象。居民感受到的，常是匝道近場的局部尖峰與事件組合；而主線模型反映的，則是大範圍平均暴露。故在匝道複合案件中，最重要的不是只增加量測次數，而是改變分析單元：將主線、減速段、加速段、匝道曲線段與匯入點分別建模；量測時則於視覺可辨識的事件窗內標示車流軌跡。未來若導入指向性量測或陣列聲學影像，其價值亦主要在於強化區域性責任判讀，而不是取代整體長時間暴露模型。[5][7][11]

12.4 高架橋下吸音設施比較樣態，是複合性音源研究中極具代表性的幾何聲學議題。許多實務案件以為橋下或高架底板只是結構體，實際上它往往是強烈的反射面，會把車流音重新導向周邊人行道、側向建物或橋下活動空間。台灣學者針對高架橋底反射噪音的研究指出，橋底反射可能造成最高約 8 dB(A)的附加影響，且橋底材質本身並非唯一關鍵，橋高、幾何配置與接收點位置同樣重要。這意味著橋下吸音設施的效益，不能以一般側向隔音牆思維直接套用，而必須評估其是

否真正削弱鏡面反射路徑、是否改善橋下混響、以及是否改變側向受體的總接收能量。[12]

高架橋下吸音設施比較樣態的價值，在於它常被用作「工程改善前後驗證案例」。若只比對改善前後單點 LAeq 而未控制車流條件，可能把交通量變化誤判為吸音成效；若只看橋下近場，則可能忽略改善措施是否把能量轉移到橋外或上方。故本樣態宜採多點位、多剖面與至少一組對照點的設計，並輔以頻譜分析，因為吸音材料通常對中高頻較敏感，若改善後僅中高頻下降而低頻未動，往往更能支持「來自反射控制」而非「單純車流變少」的解釋。這種橋下吸音比較案例，對未來複合性音源分離極具方法學意義，因為它提供了一個人為改變單一路徑條件的準實驗場景，可用來驗證模型與量測能否正確抓到「被削弱的是哪一條傳播鏈」。[5][6][12][13]

12.5 道路與鐵路複合樣態，是陸上運輸系統複合性音源中最具政策敏感性的場景之一。道路噪音多為高頻寬、流動性高且近似連續的交通底噪；鐵路噪音則帶有明確通過事件、輪軌接觸特徵、結構與設備噪音成分，於高速條件下還可能出現更明顯的空氣動力噪音。文獻指出，道路與軌道噪音在形成機制上有相似之處，例如都與接觸粗糙度誘發振動有關，但其時程結構、事件辨識性與居民煩擾特徵並不相同。[9][14]

在複合暴露反應方面，歐洲多項研究指出，道路與鐵路並非單純能量相加後就可完整解釋總煩擾，實際上會出現交互作用、主導源轉換與情境依賴的總煩擾模型問題。部分研究顯示，當鐵路音源相對道路高出一定幅度時，其對整體煩擾的影響會明顯加重；另有近年研究發現，城市中兩種甚至三種交通源並存時，經典總煩擾模型有些表現較佳，但並非任何城市皆可直接套用。這告訴我們，在道路與鐵路複合樣態中，行政上若僅用「總音量高低」判定責任，將難以回應居民對特定事件源的主觀指認。[8][10][15]

因此，本樣態的典型應用，一是作為「責任歸屬支援案例」，二是作為「複合性音源分離演算法驗證案例」。前者需要列車通過時標、道路流量同步資料、至少一段無列車時窗的背景道路樣本，以及受體端的分頻與事件對齊分析；後者則可進一步導入陣列麥克風、波束形成（beamforming）與聲源定位方法，以檢驗在道路持續存在的條件下，系統是否仍能穩定辨識列車通過事件及其主要輻射部位。不過必須強調，陣列方法較適合做「來源可視化與相對辨識」，若要作為行政處分依據，仍需回到標準化等效音量、量測不確定度與模式交叉驗證，否則容易因演算法參數或反射干擾而引發新的爭議。[3][11][16]

12.6 都市高樓層長期暴露樣態，代表複合性音源治理已從地面工程問題，轉變為垂直城市暴露問題。高樓層並不必然較安靜，特別是在鄰近高架道路、橋梁、鐵

路或狹長街谷（street canyon）環境時，反射、繞射與視線路徑開展常使中高樓層暴露維持甚或上升。近年的高樓住宅研究指出，高樓居民對道路與鐵路噪音的暴露—反應關係具有特殊性，且鐵路噪音對高樓住宅居民的煩擾未必比道路噪音低；另有建築聲學研究指出，街谷對側建築反射可使某些受體位置噪音增加相當顯著。[17][18][19]

因此，都市高樓層長期暴露樣態最重要的觀念，是不能用地面邊界思維代替立面暴露思維。許多現行陳情案件之所以陷入拉鋸，原因就在於主管機關或開發單位只提供地面近界量測，而居民實際受苦的是高樓臥室、陽台或朝向特定運輸走廊的立面受音。從健康風險與都市治理角度看，高樓層暴露樣態要求我們把受體由「地面點」升級為「垂直立面帶」，並考慮晝夜差異、開窗情境、反射面密度與建築排列。這也是未來複合性音源分離技術最有應用潛力的場景之一，因為高樓立面上常能形成來自不同高度音源的可辨識方向差，若能結合立面陣列、分層量測與模式反演，將有望改善現有只看地面總量的侷限。[1][2][17][18]

12.7 爭議型案件與責任歸屬樣態，指的是即使量到超標或明顯擾民，仍無法直接回答「究竟應由哪一個管理主體負主要責任」的案件。這種案件最常見於高速公路、地方道路、平面鐵路、高架鐵路、交流道與都市建築密集區並存的地帶。其爭議不只是技術問題，更是制度問題，因為不同設施可能分屬不同主管機關、不同法規體系與不同改善工具。此時若沒有一套嚴謹的歸屬分析架構，容易出現各單位皆承認總音量存在，卻都主張自身貢獻有限的「責任稀釋」現象。[3][4][7]

真正可操作的責任歸屬，不應建立在單次量測的印象判斷，而應建立在三層證據。第一層是標準化整體暴露證據，用以確認受體是否處於實質不利暴露。第二層是分來源或分時窗證據，用以判斷不同音源在不同時段、不同頻段、不同方向下的相對貢獻。第三層則是改善可行性證據，即哪一個管理主體最有能力對該主導貢獻採取有效措施。換言之，責任歸屬不能只問「誰製造聲音」，還要問「誰在控制上最有實質能力」。這種思考方式與 FHWA、FTA 等官方手冊對爭議型或非常規噪音分析要求額外說明與技術備忘錄的精神是一致的。[7][11]

12.8 背景音修正爭議樣態，是實務上最容易被誤用，也最容易成為訴願或訴訟焦點的部分。依 ISO 1996 系列，環境噪音評估中需區分特定音（specific sound）、殘餘音（residual sound）與背景音概念，且背景或殘餘音之量測本身必須符合特定條件，不能任意以某一段較安靜時窗替代。尤其在複合運輸環境中，當道路本身已構成持續底噪，再要求對鐵路或匝道事件做「背景音扣除」時，若未清楚界定欲扣除的是什麼，便可能把本來屬於另一管理主體的環境底噪錯誤刪除，或反過來把應保留之殘餘暴露不當視為可扣減項。[3][17]

更重要的是，背景音修正從來不是愈扣愈好。當特定音與背景音差距不足時，修正後結果的不確定度會迅速增加。ISO 1996-2 明確要求量測結果應報告不確定度，通常以擴充不確定度表達；這表示在複合性音源案件中，若背景修正本身高度敏感，就不能把修正後單一數字當成毫無誤差的法律真值。專業上較穩健的作法，是同時呈現未修正整體暴露、殘餘音估計、修正邏輯與不確定度範圍，再說明修正對結論是否具有決定性影響。如此方能避免把背景音修正從科學工具誤變成結論導向的操作工具。[3][20]

12.9 最不利條件測量樣態，則是把量測目的從「描述平均日常」轉向「捕捉最容易出現爭議或衝擊的情境」。在交通噪音與固定軌道噪音的官方方法中，最不利條件通常不同於最大車流量，而是對受體最不利的交通組合、車速、車種比例、路況與傳播條件。例如 FHWA 明確指出，道路設計年噪音分析常以最吵時段的交通條件作為預測基礎，而不見得是全天每一時段都同等重要；ISO 9613-2 則說明，其工程法預測對應的是有利傳播條件下的戶外聲壓位準估算。[5][6][7]

對複合性音源案件而言，最不利條件測量尤其關鍵，因為爭議常不是發生在平均狀態，而是發生在某些疊加條件。例如深夜重車比例偏高、匝道加速與高架主線同時出現、列車通過碰上道路車流峰值、逆溫或下風傳播增強、或橋下反射造成局部峰值。若量測只選取交通平穩、風場普通、事件錯開的時段，就可能嚴重低估居民最痛苦的真實情境。故最不利條件測量的真正意義，不是追求誇大，而是以制度上可重現的方法，合理捕捉足以代表風險上界的場景，並說明這些場景在年度中出現的頻率與政策意義。[1][3][5][6]

12.10 基準案例、驗證案例與極限案例之配置邏輯，則是整個複合性音源研究與制度建置最關鍵的章節。若未建立案例層級，任何新的量測技術、分離演算法或責任歸屬框架，都很容易因選到太複雜或太單純的場景而失去可比較性。所謂基準案例，應是幾何清楚、主要音源類型明確、交通資料齊全、可重複量測且適合模式校準的場景，例如單一路廊但兼有平面與高架段的典型位置。驗證案例，則應加入一定程度的複雜性，例如道路與鐵路並存、橋下反射、匝道交織或局部高樓立面受音，用來驗證前述模型與方法在較真實城市環境中的穩健性。極限案例則是專為挑戰方法邊界而設，包含多源同時作用、背景音高度不穩、幾何遮蔽與反射並存、受體位於高樓或狹長街谷、且行政責任可能跨多個主管機關之案件。[2][4][6][10]

此三層案例配置的邏輯，與國際標準化方法追求可追溯、可比較、可重現的精神完全一致。沒有基準案例，就難以知道模型或儀器是否校準正確；沒有驗證案例，就無法判斷方法離開理想情境後是否仍可靠；沒有極限案例，則無法誠實揭露方法的失效邊界。對未來複合性音源分離而言，真正需要的不是單一神奇工具，而是一套「案例—量測—模式—不確定度—治理決策」相互連動的技術治理架構。

從世界頂尖噪音治理的角度來看，最成熟的制度從來不是宣稱已能完美分離所有來源，而是能清楚說明在什麼場景下可高可信度分離、在什麼場景下只能做相對貢獻推估、又在什麼場景下必須回到保守治理與跨機關協調。這種對方法能力與邊界的誠實揭示，本身就是專業性的重要一環。[3][5][7][11][20]

綜合而言，陸上運輸系統複合性音源之典型應用樣態，不應被理解為若干零散案例的拼貼，而應被視為一套由幾何、交通行為、傳播路徑、受體型態、背景音條件與治理責任共同構成的分類學。高速公路平面段與高架段並存樣態，揭示高度差與視線傳播對責任判讀的影響；高速公路與平面道路複合樣態，說明平均暴露與事件擾動可能來自不同來源；高速公路與匝道複合樣態，顯示局部速度變化對近場爭議的重要性；高架橋下吸音設施比較樣態，提供工程改善與路徑控制的準實驗平台；道路與鐵路複合樣態，則直接把複合暴露反應與跨主管機關責任問題推到最前線；都市高樓層長期暴露樣態，使噪音治理從平面走向垂直城市；爭議型案件與責任歸屬樣態、背景音修正爭議樣態與最不利條件測量樣態，則進一步說明複合性音源研究不是純學術問題，而是標準、證據與制度如何彼此銜接的治理問題。最終，基準案例、驗證案例與極限案例的配置邏輯，將成為未來發展複合性音源分離工具、建立量測標準草案與支援行政決策的關鍵基礎。[1][2][3][4][5][6][7][10]

文獻資料

- [1] World Health Organization. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.
- [2] European Parliament and Council of the European Union. (2002). *Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise*. Official Journal of the European Communities.
- [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] European Commission. (2015). *Commission Directive (EU) 2015/996 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC (CNOSSOS-EU)*. Official Journal of the European Union.
- [5] Federal Highway Administration. (2011, rev. guidance accessed 2026). *Highway traffic noise: Analysis and abatement guidance*. U.S. Department of Transportation.
- [6] Kragh, J., Plovsing, B., Storeheier, S. A., Jonasson, H., & others. (2006). *Traffic noise prediction with Nord2000*. Danish Road Institute / related Nordic reports.
- [7] Federal Transit Administration. (2018). *Transit noise and vibration impact assessment manual* (FTA Report No. 0123). U.S. Department of Transportation.
- [8] Lercher, P., Botteldooren, D., de Greve, B., Dekoninck, L., & Rüdissler, J. (2007). *The*

effects of noise from combined traffic sources on annoyance: The case of interactions between rail and road noise. Proceedings of Inter-Noise 2007.

[9] López Arteaga, I. (2019). *Rolling noise in road and rail transportation systems.* Proceedings of Inter-Noise 2019.

[10] Marquis-Favre, C., Morel, J., Premat, E., Lambert, J., & other coauthors. (2021). Combined road traffic, railway and aircraft noise sources: Total annoyance models and urban transportation noise assessment. *Applied Acoustics*.

[11] Zhang, X. (2019). *Implementations of microphone arrays for railway noise source identification* (Doctoral dissertation, University of Southampton).

[12] Lin, C.-C., Chen, K.-F., & coauthors. (2018). Impact and control of reflected noise from an overpass bottom. *Applied Sciences*, 8(10), 1908.

[13] CEDR. (2017). *Technical report 2017-02: Noise barriers.* Conference of European Directors of Roads.

[14] Transit Cooperative Research Program. (1997). *TCRP Report 23: Wheel/rail noise control manual.* Transportation Research Board.

[15] Lechner, C., Schnaiter, D., & others. (2019). Combined effects of aircraft, rail, and road traffic noise on total noise annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3504.

[16] Lauterbach, A., Ehrenfried, K., Jaecker-Cüppers, M., & others. (2010). Microphone array measurements on high-speed trains in wind tunnels. Proceedings of BeBeC.

[17] International Organization for Standardization. (2016). *ISO 1996-1: Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1: Basic quantities and assessment procedures.* ISO.

[18] Park, S. H., Brown, A. L., Kang, J., & others. (2025). Railway and road traffic noise annoyance of residents in high-rise apartments. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*.

[19] Feriani, S. J., & colleagues. (2025). Impact of building façade design on road and rooftop traffic noise reflections in urban canyons. *Applied Acoustics*.

[20] Rasmussen, B., & others. (2023). Proposals, suggestions and considerations for the revision of ISO 1996-2. Proceedings of the Forum Acusticum 2023.