

## 第五章 指向性噪音計音源分離技術

第五章所討論的核心，並不是單純把「哪裡比較亮」的聲學影像再說得更複雜，而是要釐清指向性噪音計在面對複合性音源時，究竟能完成哪些任務、不能完成哪些任務、在哪些條件下可作為工程診斷工具、又在何種條件下可進一步轉化為具備行政說理價值的輔助證據。從國際文獻的發展來看，麥克風陣列、波束形成（beamforming）、高解析反卷積、近場聲學全像（Near-field Acoustic Holography, NAH）與自動化聲源辨識，原本多發展於航空聲學、機械設備診斷與實驗室聲學，但近十餘年已逐步被引入鐵路通過噪音、車輛通過噪音、都市環境噪音與長期監測場景之中。這種技術移轉的結果，並不是把交通噪音完全變成可被精準切割的理想信號，而是讓原本只能得到整體音量的環境量測，開始具備「方向辨識、來源分群、相對貢獻推估與事件解釋」的能力。[1][2][3][4]

就 5.1 音源分離之基本任務與分析目的而言，首先必須強調，音源分離不是只有一種任務。對學術研究而言，音源分離常追求的是盡可能精確地重建個別音源的空間位置、頻譜特性與聲功率分布；對工程改善而言，往往只需要知道哪一個部位、哪一條路徑或哪一種事件是主要貢獻者；對環境治理與行政實務而言，更務實的目標通常是辨識主導來源、釐清複合來源的相對關係，以及判斷改善措施應優先落在何處。這三種任務對方法的要求並不相同。若把研究用途的方法直接移植到行政用途，而不區分其任務層級，便極易發生方法能力被誇大、結果被過度解讀的問題。近年的環境噪音自動識別研究即明確指出，真正有價值的系統不是只產出一個分類標籤，而是能估算個別來源對總音量的貢獻，並將其放在可追溯的處理流程中。[5][6]

因此，音源分離在指向性噪音計上的基本任務，可以概括為四個層次。第一個層次是來源方向辨識，也就是回答聲音大致從哪個方向入射。第二個層次是空間分布成像，也就是將來源在觀測平面或觀測區域上視覺化。第三個層次是來源相對貢獻估計，亦即在多來源並存時，判斷哪些來源較可能主導某時段或某頻帶的能量。第四個層次才是接近嚴格意義的分離，也就是將混合聲場中的不同來源成分盡可能拆解為彼此可區分的物理或訊號子來源。從實務角度看，交通噪音場景常常只能穩健做到前二至前三層，而很少能像理想實驗室一樣，對所有延伸性來源完成絕對精準的第四層切割。這種任務分級觀念，正是後續方法選擇與證據力判斷的基礎。[1][4][5]

5.2 方向辨識與空間濾波原理，是所有指向性音源分離技術的共同起點。所謂空間濾波，本質上就是利用多支麥克風在空間中的分布，使來自某一目標方向的聲波在時間校正後得以相干疊加，而其他方向的聲波則因相位不同而被抑制。這種處理在數學上與傳統頻率濾波類似，只不過被濾除的不是某個頻率帶，而是某些空間方向或空間區域。近期對麥克風陣列方法的綜述指出，基於陣列的聲源識別

方法之所以能從簡單定位發展到複雜分離，關鍵就在於空間濾波把「場」的資訊導入量測，使原本只有時間與頻率的訊號，多了一個方向維度。[7][8]

然而，方向辨識並不同來源分離。當場景中僅有少數彼此夾角較大的點音源時，空間濾波往往能相當清楚地辨識方向；但在道路、高架與軌道這類延伸性線音源場景中，不同來源常共享近似方向、相近高度，甚至還會透過反射形成額外的虛擬入射方向。此時方向辨識只能告訴我們某一角域內有顯著能量，卻未必足以把同角域內的多個來源切開。因此，方向辨識在交通複合音源場景中，較穩健的定位應是「分離的前處理」而非「分離的最終答案」。這也是為什麼環境噪音自動識別研究往往把來源方向當作強特徵之一，但仍需再結合統計分群、心理聲學特徵或其他訊號處理步驟，才可能推進到來源貢獻估計。[5][9]

5.3 延遲加總法（Delay-and-Sum Beamforming），是最經典也最具代表性的波束形成方法。其原理在於，假設某一目標方向的聲波抵達不同麥克風時會產生已知延遲，則將各通道訊號依此延遲加以校正後再求和，來自目標方向的訊號便會增強，而非目標方向的訊號則因無法完全對齊而被削弱。這種方法概念清楚、運算相對簡單，且在移動源與現場應用上具有高度實用性，因此被廣泛應用於車輛通過噪音、列車通過噪音與一般聲學成像。關於車輛通過噪音的研究指出，延遲加總法不僅可定位主要噪音源，亦可在適當條件下估算來源強度；鐵路移動源量測研究也明確表明，針對行進中的列車，DAS 仍是實務上常用且可操作的方法基礎。[3][10][11]

但 DAS 的缺點也非常清楚。首先，它的空間解析度受到陣列孔徑與頻率的嚴格限制，主瓣通常較寬，容易使相鄰來源融合在一起。其次，DAS 產生的成像圖常伴隨明顯旁瓣，這些旁瓣可能將原本不存在的能量投影到其他位置，尤其在多源場景中特別容易誤導判讀。第三，對延伸性來源而言，DAS 通常給出的是一個較寬廣的能量區，而不是銳利的單點。因此，DAS 非常適合做初步定位、方向追蹤與動態場景的快速觀察，但若研究目的已進入來源分離、相鄰來源辨識或來源強度更精細的估計，則往往需要進一步搭配高解析或反卷積方法。[10][12][13]

5.4 高解析反卷積技術（CLEAN-SC、DAMAS），正是為了克服傳統 DAS 主瓣寬、旁瓣高與圖像模糊問題而發展出來。CLEAN-SC 的基本思想，是不再把傳統波束圖直接當成真實來源分布，而是視其為真實來源經由系統點擴散函數（point spread function）「模糊」後的結果，再透過基於空間來源相干性的方式，逐步剝離主要來源及其旁瓣影響。Sijtsma 的原始論文即指出，CLEAN-SC 的優點在於不再完全依賴理想化的理論點擴散函數，而是利用實測資料中的空間相干性來改善去卷積結果，因而在複雜源分布下通常比單純 CLEAN 更穩健。[13][14]

DAMAS (Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources) 則採取另一條路徑。Brooks 與 Humphreys 的原始工作提出，波束形成圖可被視為真實來源分布與陣列響應之間的卷積結果，因此可建立一組線性方程組來反推真實來源分布。其主要優點是能更明確地考慮不同掃描點之間的相互影響，理論上可顯著削弱旁瓣與提高位置、強度估計的準確度。文獻普遍認為，相較於 DAS，DAMAS 在多源與近鄰源場景中具有更好的解析效果，但計算量也更高，且仍建立在來源近似不相關等假設之上。[12][15]

從實務觀點看，CLEAN-SC 與 DAMAS 都不是「自動變真相」的魔法。它們本質上都是在既有陣列資料品質與幾何條件下，嘗試把波束圖去模糊化。若原始量測已受風噪、混疊、近場不符假設、反射干擾或來源高度相干等因素影響，則再高級的反卷積也無法憑空產生不存在的資訊。近年的比較研究亦指出，不同反卷積方法在位置偵測、源強估計與計算效率之間各有取捨，且面對三維掃描區、寬頻源或高度複雜源分布時，表現可能明顯不同。因此，在交通噪音應用中，CLEAN-SC 與 DAMAS 較適合被定位為「提升圖像可分辨度與相對貢獻辨識能力」的方法，而非直接作為無條件的法定真值產生器。[16][17]

5.5 近場聲學全像 (Near-field Acoustic Holography)，與波束形成雖常被同列為聲源成像技術，但其理論出發點並不完全相同。NAH 的原始思想是利用近場測得的壓力場，透過逆傳播或等效源重建，回推聲源表面或鄰近區域的聲場分布，特別是重建傳統遠場測量看不到的衰減波 (evanescent waves)。Maynard、Williams 與 Lee 在 1980 年代的奠基研究即指出，近場聲學全像之所以重要，正因其能在相當程度上恢復源面附近的細部資訊，空間解析度可優於傳統遠場波束形成，尤其在低頻與近場問題上具有獨特價值。[18][19]

相較之下，傳統波束形成較擅長遠場或中遠場的方向掃描，解析度隨頻率提升而改善；NAH 則特別適合近距離量測、低中頻分析與結構表面輻射區域的高解析重建。比較研究普遍指出，NAH 在低頻與近場解析上優於一般波束形成，而波束形成在高頻、較大觀測區與較不受限的量測配置下較具優勢。對交通噪音而言，NAH 最直接的應用不一定是整條道路的遠距來源分離，而更可能是近距離分析車體表面、局部結構、隔音構件或軌道設備之輻射熱點與傳遞路徑。[4][20][21]

也因此，若從陸上運輸系統複合音源的角度看，NAH 比較像是精密局部診斷工具，而非整體都會走廊分離工具。它特別適合回答「車體哪個部位輻射最強」、「近場面板或橋底哪一區段再輻射顯著」、「某構件改善前後局部聲場如何變化」等問題；但對遠距離、長線性、高度重疊的多源交通場景，NAH 的量測條件往往較難滿足。因此，未來若將其納入指向性噪音計體系，較適當的角色是與波束形成形成高低頻、遠近場互補，而非彼此取代。[19][20]

5.6 波束形成與時頻分析之整合，則是近年交通與環境噪音應用中非常重要的發展方向。因為交通噪音很少是完美平穩的單頻或窄頻信號，它常同時具有寬頻底噪、短暫事件、速度變化、車種切換與複合來源重疊。若只在整段時間上做單一頻域波束形成，容易把瞬時事件平均掉；反之，若只做時間波形觀察，又難以把方向資訊整合進來。相關研究指出，將子視窗（sub-windowing）與時間域或時頻域波束形成結合，能更細緻地追蹤非定常來源的方向與演變，對環境噪音導向分析具有突破性意義。[9][22]

在實務操作上，時頻整合的真正價值在於，它使分析者不必再把整個複合場景視為一個無法拆解的大團塊，而可以依不同時間窗、頻帶窗與事件窗進行局部分離。例如，在道路與鐵路並存場景中，可先用時間標記抓出列車通過窗，再於該窗內用波束形成辨識列車主導方向，同時以其前後無列車時窗估計道路背景。在匝道與主線並存場景中，也可透過短時窗分離重車加速事件與穩定主線底噪。這種時頻分析與空間成像的結合，比單純要求一次把所有聲音全都切開，更符合交通複合音源的物理本質。[3][9][10]

5.7 自動化音源辨識與機器學習輔助分類，是指向性噪音計由研究工具轉向長期治理工具的關鍵轉折。近年的環境噪音研究顯示，若僅依賴人工閱讀頻譜與熱圖，面對長時間監測資料幾乎無法規模化處理；但若將空間濾波後的訊號、方向特徵、心理聲學特徵與統計分群或機器學習模型結合，便有可能自動計算個別來源對總噪音的貢獻。Murovec 等人的研究正是代表性例子：其系統透過空間濾波、非監督學習與心理聲學特徵，嘗試自動評估個別環境噪音源對總音量的貢獻，顯示方向特徵在環境噪音辨識中特別有用。[5][6][23]

但必須強調，AI 在此並不是用來取代聲學物理，而是補足大量資料中的模式辨識工作。真正可靠的機器學習輔助分類，應建立在已經具備方向、時頻與場景資訊的前提下，而不是僅憑單一黑箱音檔分類就宣稱完成來源分離。對交通噪音而言，較穩健的作法是讓 AI 負責事件偵測、來源類型初分、異常時窗標記與長期統計，再由波束形成、Class 1 法定量測、交通流資料與必要的人員複核完成最終判讀。這種分工模式也較符合未來行政與工程實務對可解釋性的要求。[5][6]

5.8 指向性量測與 Class 1 噪音計合成音量分離法，是交通噪音制度應用中極為重要的橋接概念。指向性量測擅長提供方向與來源分布資訊，但其輸出不一定天然等同於法定環境噪音指標；相反地，Class 1 噪音計在法規上具高度標準化與可比性，卻缺乏空間來源辨識能力。因此，較成熟的實務方向不是二選一，而是將兩者整合。具體而言，可由 Class 1 噪音計負責輸出法定 LAeq、Lmax 或相關判定值，再由指向性量測提供相同時段內的方向性權重、來源比例或事件分類，進而將總量以合理的物理與統計方式分配到不同來源群組。ISO 1996-2 對環境噪音

測定與不確定度提出的要求，也提醒我們任何分離後的結果若要有實務意義，仍必須回扣到標準化聲壓位準框架下理解。[24][25]

這裡最值得注意的是，所謂「合成音量分離」不宜被誤解為把一張熱圖直接轉成若干精確分貝。較穩健的作法是，在統一時間基準下，先得到高品質的總量真值，再利用指向性結果推估各來源的相對占比或特定事件增量，最後以能量守恆與不確定度揭露方式回推分來源結果。如此一來，分離結果既不會脫離法定量測，又能比單純總量更接近實際來源結構。這種方法尤其適合道路與鐵路並存、主線與匝道交疊等場景，因為在這些情境中，完全脫離法定總量談分離，往往難以被行政與工程單位接受。[5][24]

5.9 指向性量測與模式模擬之交叉校估，則是讓音源分離結果從「現地觀察」提升為「可外推治理知識」的必要步驟。近年的研究已開始將移動列車的麥克風陣列量測結果轉化為模擬環境中的測量式聲源模型，說明陣列量測不僅能定位來源，還可作為模型參數化的依據。這對交通治理極具意義，因為單次量測只能回答當時當地的情況，而模式模擬則可進一步推估不同受體、高度、屏障方案或交通條件下的潛在變化。當指向性量測與模式互相校核時，前者可以檢查模型假設是否合理，後者則可檢驗量測觀察是否具有整體場景一致性。[2][26]

在道路與鐵路複合情境下，這種交叉校估尤其重要。若量測顯示某一高架方向經常在夜間成為主導來源，而模型卻預測其貢獻有限，便表示源項、幾何或反射處理可能有誤。反之，若模型長期穩定指向某一路廊為主導，而指向性量測卻反覆出現不同方向峰值，則可能代表現地存在模型未納入的事件源或反射機制。未來若我國要發展複合音源分離制度，真正成熟的技術路徑必然不是只靠量測或只靠模型，而是二者互為校估。[2][24]

5.10 連續性道路線音源之分離困難，是本章必須坦白揭示的關鍵。道路交通與一般工業機台不同，其聲源不是靜止的單點，而是由大量移動車輛、不同車道、不同車種與不同速度共同構成的時變線音源。Ballesteros 等人雖證明波束形成可應用於車輛通過噪音的來源辨識，但這類應用通常建立在單車通過或可明確分辨的通過事件上；當場景改為多車並行、多車道連續流、鄰近主線與匝道同時存在時，問題便急劇複雜化。[3][10]

其物理困難主要有三。第一，來源之間高度重疊，且常在陣列視角中形成相近方向。第二，來源本身並非點狀，而是沿路徑延伸且持續更新位置。第三，環境中常存在路面反射、橋底反射、建築反射與風場擾動，使直接音與間接音混合。這些條件意味著，對連續性道路線音源而言，最現實的分離目標往往不是把每一車道精準切開，而是分辨主要道路系統、主線與匝道、平面與高架，或特定事件與

背景底噪之間的相對關係。若企圖把所有連續車流都拆解到過細尺度，反而容易產生超出方法能力的假精確。[3][5][10]

5.11 軌道與道路複合音源之分離策略，相對而言比多車道連續道路稍有機會，因為軌道來源通常具有較明顯的通過事件、固定軌跡與可對時特性。歐洲 TRANSIT 計畫即明確以「分離移動列車之來源並將車輛與軌道貢獻區分開來」作為目標，發展改良陣列技術與通過噪音特徵化方法。相關研究顯示，列車通過事件可利用時間標記、位置追蹤與移動源波束形成進行對齊，再於列車事件窗內分析下部輪軌、上部空氣動力或特定構件來源。相較之下，道路背景則可透過列車前後時窗估計，或以長時段穩態資料建模。[2][11][27]

因此，軌道與道路複合場景的合理策略，不是嘗試用單一步驟把兩者完全分開，而是採「事件型來源先切出、持續型背景再估算」的分層方法。先以列車時刻、感測器觸發或時頻異常檢測標示軌道事件，再用波束形成或移動源成像辨識其主導方向與來源部位；其餘非事件時窗則視為道路主導背景，必要時再以方向性資訊細分平面與高架道路。這種策略兼顧了軌道來源的事件性優勢與道路背景的連續性特徵，也比要求一次性全域盲分離更符合實際可操作性。[2][3][11]

5.12 背景音量修正與不修正之判斷原則，則是音源分離走向制度應用時必須最謹慎的環節之一。ISO 1996-2 與相關回顧研究都提醒，環境噪音量測中的殘餘音、背景音與特定音概念必須被清楚區分，而且背景修正本身具有明顯不確定度，尤其當整體與背景差值不大時，修正後結果的穩健性會快速下降。對指向性音源分離而言，問題更複雜：當某一聲音來自另一可管制交通來源時，它究竟應被視為應扣除的背景，還是應被視為複合場景中的另一主要來源？這不是純技術問題，而是制度與管理問題。[24][25][28]

較合理的判斷原則是：若某聲音屬於與目標來源無關的外在背景，例如風噪、自然聲或偶發施工聲，且可明確獨立辨認，則可考慮依標準規則處理；若該聲音本身即屬另一可管理的交通來源，例如鄰近平面道路相對於高架道路、或道路系統相對於軌道系統，則較不宜直接當作「可扣除背景」，而應優先視為複合來源之一部分，透過分層分析或分來源估算處理。換言之，背景修正適用於排除無關干擾，不宜被濫用來抹除另一主要管制來源的存在。這個原則對未來複合音源制度化尤其重要。[24][25]

5.13 音源分離結果之證據力與實務可採性，關鍵不在於圖像是否漂亮，而在於結果是否可重現、可解釋、可與其他證據交叉驗證。從目前文獻發展來看，波束形成、CLEAN-SC、DAMAS 與環境噪音自動識別都已證明具有相當研究與工程應用價值，但距離「單獨作為行政真值」通常仍有一段距離。原因不在於方法無效，而在於交通複合場景中的來源延伸性、非正常性、反射性與不確定度仍高，若沒

有輔助的 Class 1 總量真值、交通資料、場景幾何與模式模擬，單靠一種陣列輸出圖往往很難滿足嚴格的實務要求。[5][12][24]

因此，較成熟的實務可採性架構，應將音源分離結果分成三類。第一類是工程診斷用結果，用於判斷哪個部位或方向值得優先改善，其證據門檻可以較偏向技術合理性。第二類是治理輔助用結果，用於陳情解釋、改善優先順序與跨機關協調，此時需搭配標準量測與交通資料。第三類才是高度正式的爭議處理或行政說理用結果，此時除需揭露方法、限制與不確定度外，還必須說明為何在該案場景下，此分離結果足以作為相對穩健的判斷依據。若能如此分級，便能避免將所有音源分離結果一概神化或一概否定。[5][24]

5.14 指向性噪音計音源分離之適用範圍與限制，最終可歸納為一個務實結論：它非常適合用來辨識方向、顯示來源分布、支援局部診斷、強化事件解釋與協助複合場景的相對貢獻判讀；但對高度連續、幾何接近、反射嚴重且多來源同步存在的線音源場景，其分離能力仍受到物理與統計條件明顯限制。也就是說，指向性噪音計最不適合被宣稱為「一機完成所有複合交通來源之絕對分割」的萬能工具，卻非常適合作為把傳統環境噪音量測由總量管理推進到來源解釋的關鍵中介工具。[1][2][5][24]

若從未來複合性音源分離制度發展來看，本章真正的結論應是：麥克風陣列、波束形成、CLEAN 去卷積、近場聲學全像與 AI 辨識並非彼此競爭的孤立方法，而是一條逐層深化的技術鏈。DAS 提供快速、穩健的方向與分布觀察；CLEAN-SC 與 DAMAS 改善空間解析與多源可分辨性；NAH 強化近場與低頻細節重建；時頻分析提供處理非定常事件的能力；AI 與自動辨識則使大量資料處理與長期監測成為可能。當這些方法再與 Class 1 噪音計、交通流資料與模式模擬結合時，指向性噪音計才真正有機會由實驗室聲學工具，逐步轉化為陸上運輸系統複合音源治理的實務工具。[2][5][18][24]

## 文獻資料

[1] López Arteaga, I., et al. (2022). *The TRANSIT project: Innovation towards train pass-by noise source characterization and separation tools*.

[2] Kron, T., et al. (2025). *Measurement-based sound source modeling of moving railway sources using microphone arrays*. Forum Acusticum 2025.

[3] Ballesteros, J. A., et al. (2015). Noise source identification with beamforming in the pass-by of a car. *Applied Acoustics*, 93, 106–119.

[4] Hald, J. (2022). *Four decades of near-field acoustic holography*. DTU / review paper.

- [5] Murovec, J., Prezelj, J., & Bizjak, M. (2023). Automated identification and assessment of environmental noise sources' contribution to total noise levels. *Heliyon*, 9(1), e12919.
- [6] Murovec, J., Čurović, L., Novaković, T., & Prezelj, J. (2019). Environmental noise event classification based on self-organizing map using psychoacoustic features and spatial filtering. *ICA 2019 Proceedings*.
- [7] Hou, J., Zeng, L., Zhao, D., & Zhong, Y. (2022). A review for the noise source identification methods based microphone array. *Journal of Vibroengineering*, 24(5).
- [8] McCowan, I. (2001). *Microphone arrays: A tutorial*. IDIAP Research Report.
- [9] Prezelj, J., et al. (2022). Sub-windowing for time domain beamforming. *Applied Acoustics*, 196, 108914.
- [10] Ginn, B., Gomes, J., & Hald, J. (2013). Recent advances in rail vehicle moving source beamforming. *Inter-Noise 2013 Proceedings*.
- [11] Gomes, J., et al. (2014). Localizing noise sources on a rail vehicle during pass-by. In *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Springer.
- [12] Brooks, T. F., & Humphreys, W. M. Jr. (2006). A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. NASA Technical Report.
- [13] Sijtsma, P. (2007). CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6(4), 357–374.
- [14] Goudarzi, A. (2023). B-CLEAN-SC: CLEAN-SC for broadband sources. *Journal of the Acoustical Society of America*.
- [15] Wang, J., et al. (2019). Comparison of deconvolution algorithms of phased microphone array for sound source localization. UTIAS / conference paper.
- [16] Funke, S., et al. (2014). SODIX in comparison with various deconvolution methods. *BeBeC Proceedings*.
- [17] Lobato, T. H. G., et al. (2021). Beamforming vs. near-field acoustic holography. *DAGA 2021 Proceedings*.
- [18] Maynard, J. D., Williams, E. G., & Lee, Y. (1985/1983). Near-field acoustic holography: Theory of generalized holography and the development of NAH. *Journal of the Acoustical Society of America* / NASA conference publication.
- [19] Deblauwe, F., Jansen, K., & Robin, M. (2007). Extending the usability of near-field acoustic holography and beamforming by using focalization. *ICSV14 Proceedings*.
- [20] ISO. (2017). *ISO 1996-2: Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 2: Determination of sound pressure levels*.
- [21] Morillas, J. M. B., et al. (2016). A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. *Science of the Total Environment*, 565, 595–606.
- [22] National Instruments. (2013). *Using acoustic beamforming for pass-by noise*

*source detection*. Application Note.

[23] Imagine Project / SNCF. (2002). *Rail sources state of the art*.

[24] ISO. (2017). *ISO 1996-2* and related uncertainty guidance on environmental noise measurement.

[25] Brüel & Kjær. (2014). *ISO 1996, effects of instrument class and residual sound*. Technical note.

[26] Lechner, C., et al. (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.

[27] HS2 / Sica, G., et al. (2019). Pass-by noise assessment of high-speed units by means of hybrid methodologies. *IWRN13 Proceedings*.