

# 複合性音源的診斷步驟及量測方法

## 一、引言

在現代工業生產、城市交通、建築環境以及機電系統中，噪音問題幾乎無所不在。然而，真實工程環境中所面臨的噪音問題，絕大多數並非來自單一的孤立聲源，而是由多個相互交疊、彼此干涉、頻率成分複雜的音源同時作用所形成的複雜聲場——此即所謂的**複合性音源 (Compound Sound Source / Multiple Noise Source)**。複合性音源的本質在於：當兩個或兩個以上的獨立聲源同時存在且其頻率範圍互相重疊時，所形成的合成聲場在頻域、空域與時域上均呈現出高度的複雜性，使得傳統單一音源的量測手段在此情境下嚴重失效，從而造成診斷困難、降噪措施無效等工程挑戰。

台灣環境部（前行政院環境保護署）在其「環境噪音測量方法（NIEA P201）」中，即明確規範了複合性音源的量測程序，強調「測量地點之整體音量屬複合性音量時，若各聲源音量相差值小於 10 dB，應測得各音源於測量時間之能量貢獻比例，再據以計算各音源之音量」，並要求參照「複合性音源鑑定分離作業要點」辦理。這說明複合性音源的診斷不僅是純粹的學術課題，更是具有法律執行力的工程規範要求 [1]。

從國際學術研究的角度來看，音源識別（Noise Source Identification, NSI）已發展為聲學與振動工程學中一個獨立且成熟的研究子領域。Ginn 與 Haddad [2] 指出，音源識別技術的核心目標在於識別物體上最重要的子音源之位置、頻率成分與聲功率輻射，從而透過各子音源的排名（Ranking）來確定設計修改能最有效改善整體噪音輻射的位置。面對複合性音源的挑戰，工程師必須系統性地運用一系列從簡單到複雜的量測方法，方能真正掌握各音源的物理本質並採取有效的降噪措施。

## 二、複合性音源的定義與本質特性

所謂複合性音源，是指在同一空間域內，由兩個或多個彼此在物理機制上具有不同激勵特性的聲源所共同形成的聲場環境。這些聲源可能在頻率上部分重疊，可能在空間上彼此接近，也可能通過共同的結構途徑相互耦合。台灣環保法規中亦採用「叢聚性音源」一詞來描述多個噪音源位於同一地點所共同形成之複雜聲場，強調其合成音量效應的特殊性 [1]。

在物理特性上，複合性音源具有以下幾個關鍵特徵：其一，**能量疊加的非線性**——由於分貝（dB）尺度本身的對數特性，兩個等強度音源疊加後的總聲壓級（Sound Pressure Level, SPL）僅增加約 3 dB，而非倍增；其二，**相干性 (Coherence)**

的複雜度——若各子音源之間存在相關性（如同一機械系統的不同振動部位），則其聲場疊加會出現相長或相消干涉效應，使得量測結果隨相位關係的不同而大幅變化；其三，**傳遞路徑的多樣性**——噪音不僅以空氣傳播（Airborne Noise）形式傳遞，更常透過固體結構（Structure-borne Noise）沿不同路徑傳遞至接收點，形成多路徑複合效應 [3]；其四，**時間非穩態性（Non-stationarity）**——許多複合性音源在時域上並非穩態，例如交通噪音中車輛的來去、機械設備的啟停等，都會造成聲場隨時間動態變化。

Wang 與 Crocker [4] 在其奠基性研究中指出，在多音源環境下應用相干性技術進行音源識別時，若各音源之間存在部分相關（Partially Coherent）的情況，則必須採用偏相干（Partial Coherence）分析方法，方能正確分離各音源的個別貢獻。這一認識奠定了現代複合性音源分析技術的理論基礎。

### 三、診斷前的準備工作與場勘規劃

在正式展開複合性音源的儀器量測之前，系統性的前置準備工作具有決定性的意義。一個缺乏充分場勘規劃的量測，不僅會浪費大量時間與資源，更可能因量測條件不當而產生嚴重的系統誤差，導致後續診斷結論完全偏離事實。

**初步問題界定**方面，工程師首先應向業主或受影響方詳細了解噪音的主觀特性——包括噪音發生的時間規律（是否為特定頻率的音調性噪音 [Tonal Noise]、是否具有衝擊性 [Impulsive Noise]）、噪音與特定設備運轉的關聯性，以及噪音問題造成的具體影響（如建築物內的振動感、特定頻率的蜂鳴聲等）。這些主觀描述往往是指引後續量測方向的重要線索。台灣 NIEA P201 規範中特別說明，若音源噪音具有音調特性，可透過 1/3 八音度頻譜分析（1/3 Octave Band Analysis）進行確認，即任一頻率之音量大於相鄰頻率音量平均值 5 dB 時，即判斷為音調性噪音 [1]。

**現場場勘**應詳細記錄所有潛在音源的位置、規格、運轉狀態與時間特性，並繪製場地平面圖，標注音源位置、接收點位置、主要反射面及遮蔽物等環境元素。量測點的選擇應遵循 NIEA P201 的基本規定：於室外測量時需距離任何反射物至少 3.5 公尺；評估建物外部噪音影響時，需距離建物牆面線 1 至 2 公尺；所有量測位置皆應距離地面或樓板 1.2 至 1.5 公尺 [1]。

**氣象條件評估**方面，噪音的傳播會受到風向、風速、溫度梯度、地面吸收等氣象因素的顯著影響，因此測量時需記錄天氣、風向、風速（以不超過每秒 5 公尺為宜）、溫度、相對濕度等氣象數據。強風不僅會產生風切雜音干擾量測，更會改變聲場的傳播特性。

**儀器校準計畫**應在量測前制定完整的儀器校準方案。依據 NIEA P201 的品質管制要求，測量前後噪音計均應以聲音校正器（Sound Calibrator）進行校正，校正結果呈現值與校正值之差值絕對值不得大於 0.7 dB，且兩次呈現值差之絕對值不得大於 0.3 dB。噪音計的法定檢定週期為兩年 [1]。

#### 四、複合性音源的系統性診斷步驟

複合性音源的診斷應遵循一套由粗到細、由全局到局部的系統性程序，可分為以下五個核心步驟：

##### 第一步驟：整體聲學環境評估與背景噪音建立

診斷工作的第一步是建立完整的整體聲學環境基線（Acoustic Baseline）。此階段的核心目標是量測在所有音源同時作用下的整體聲壓級分佈，並確定背景噪音（Background Noise）的水平。背景噪音是指除欲測音源以外的所有聲音的總和，必須在所有目標音源停止運作時獨立量測。當受測噪音（ $L_1$ ）與背景音量（ $L_2$ ）相差小於 10 dB 時，需按照修正表進行背景噪音修正；若差值小於 3 dB，則所量測結果不具有統計意義，建議另尋其他量測地點 [1]。

整體評估時，工程師應使用符合 IEC 61672-1 Class 1 等級的噪音計進行 A 加權聲壓級（ $L_A$ ）及等效持續聲壓級（ $L_{eq}$ ）的量測，並同步進行 1/1 及 1/3 八音度頻帶分析，以建立各頻率範圍的能量分佈圖。此步驟的目的並非精確識別各子音源，而是全面掌握問題的整體輪廓——確認問題主要發生在哪些頻率範圍、哪個方向能量最集中，以及問題是否具有時間規律性。

##### 第二步驟：音源定性分類與初步識別

在完成整體評估後，第二步驟的目標是對各潛在音源進行初步的定性分類。這一步驟通常採用較為經濟的手段，包括進行有系統的「操作排除測試（Partial Operation Method）」——即逐一停止各子系統的運作，通過比較停止前後聲壓級的變化，初步判斷各子音源的大致貢獻量。然而，Hou 等人 [5] 指出，此方法存在明顯的局限性：部分聲學貢獻可能來自於各設備之間結構自然頻率的共振耦合效應，因此停止某設備運轉後所觀測到的噪音降低量，並不一定等同於該設備在正常運轉時的真實聲功率貢獻。

同時，在此階段應初步確認各音源的物理性質——機械振動輻射音源、流體動力性噪音（如風機、泵浦）、電磁音源（如變壓器的磁致伸縮噪音）、摩擦激勵音源（如齒輪嚙合、軸承滾動接觸）等，因為不同性質的音源需要後續採用不同的量測策略。

### 第三步驟：精密音源識別與空間定位

此步驟是整個診斷過程中技術含量最高的環節，目的是精確確定各子音源的空間位置及其頻率特性。根據目標音源的頻率範圍、空間尺度及量測距離等條件，選擇適當的先進量測技術（詳見第五節）。Lanslots、Deblauwe 與 Janssens [6] 指出，技術選擇的關鍵因素包括：感興趣的頻率範圍下限與上限、量測陣列到測試對象的距離、以及所需要的空間解析度（Spatial Resolution）。

在此步驟中，對於低頻範圍（通常低於 1 kHz）的音源識別，以近場聲學全像術（Near-field Acoustic Holography, NAH）為最佳選擇；而對於中高頻範圍（1 kHz 以上）及較遠距離的外部音源識別，則以波束成形（Beamforming）技術更為適合。對於需要同時處理多個不相干音源的情境，偏相干分析（Partial Coherence Analysis）提供了識別各音源個別貢獻的有效手段 [4]。

### 第四步驟：各音源貢獻量的定量分析

音源的識別定位只是問題解決的一半，真正指導降噪工程設計的是各子音源在特定接收點（如人耳位置、法規規定量測點）的貢獻量（Contribution）的定量分析。此步驟需要回答的核心問題是：在接收點觀測到的總聲壓級中，每個子音源各貢獻了多少分貝？

Kim 等人 [7] 的研究表明，採用偏相干函數（Partial Coherence Function）法進行水下輻射噪音的貢獻量分析，能有效分離各子音源的個別貢獻，即便在各音源之間存在部分相關性的情況下亦然。此外，傳遞路徑分析（Transfer Path Analysis, TPA）是另一套被廣泛採用的定量分析框架，其核心思想是將接收點的響應分解為各激勵源通過各傳遞路徑的貢獻之和，從而不僅識別「哪個聲源」是主要貢獻者，更能確定「哪條路徑」是主要傳遞途徑 [8]。

對於車輛 NVH (Noise, Vibration and Harshness) 分析中的複合性音源問題，Huang 等人 [9] 採用小波變換（Wavelet Transform）與偏相干分析相結合的方法，成功識別出車輛內部噪音中結構傳播噪音（Structure-borne Noise）與空氣傳播噪音（Airborne Noise）的各自貢獻，發現結構傳播路徑所貢獻的噪音通常大於空氣傳播路徑，這一結論對於車輛降噪設計具有重要的指導意義。

### 第五步驟：驗證、確認與降噪有效性評估

診斷工作的最後步驟是對上述分析結論進行實驗驗證，並評估所提出降噪措施的預期有效性。驗證工作通常包括：以獨立的量測方法對第三、四步驟的結論進行交叉確認；製作小型修改原型（如在特定音源位置加裝隔振墊、吸音材料等），通過實際量測確認各音源貢獻量的分析結果是否與實際降噪效果相符；以及在降

噪措施實施後，重複執行整體聲學環境評估，以確認總聲壓級確實達到預期的降低量。

## 五、各主要量測方法的原理與應用

### 5.1 聲壓量測法 (Sound Pressure Measurement)

聲壓量測是最基本的聲學量測手段，也是所有複合性音源診斷工作的起點。採用符合 IEC 61672-1 [10] 標準的 Class 1 或 Class 2 聲壓計 (Sound Level Meter)，在預先規劃的網格點上逐點量測聲壓級，並繪製聲壓級分佈圖 (Contour Map)。然而，聲壓量測法有一個根本性的限制：聲壓是純量 (Scalar)，無法直接指示聲能的傳播方向，因此在多音源反射聲場環境下，所量測到的聲壓值包含了來自各方向的聲能疊加，難以直接用於識別特定音源的貢獻。Ginn 與 Haddad [2] 指出，聲壓量測法的主要優點是成本低廉，但其空間解析度受限於波長，且對背景噪音的影響特別敏感，在複合性音源環境中僅能提供粗略的定性判斷。

### 5.2 聲強量測法 (Sound Intensity Method)

聲強 (Sound Intensity) 是描述聲能傳播的向量 (Vector) 量，其定義為單位時間內通過垂直於傳播方向單位面積的聲能量，單位為  $W/m^2$ 。自 1980 年代以來，基於一對相位匹配麥克風的聲強探頭技術，以及依據此技術制定的國際標準 ISO 9614-1 (定點量測法) [11] 與 ISO 9614-2 (掃描量測法) [12] 的確立，使得聲強技術成為複合性音源診斷中最重要基礎工具之一。

聲強技術的核心優勢在於：其向量特性使得在背景噪音環境下仍能準確量測目標音源的聲功率，因為非相干的背景噪音所貢獻的平均聲強為零；同時，透過聲強的方向性，能夠直觀地可視化聲能的流向，識別複合聲場中的主要輻射面板 (Radiating Panel)。在工業應用中，Rawlinson [13] 展示了聲強技術在燃氣渦輪機工程診斷中的強大能力，透過 ISO 9614 方法建立的聲強圖，能夠在複雜的機械噪音環境中識別出主要的子音源並進行排名。

Batel 等人 [14] 則進一步介紹了選擇性聲強 (Selective Intensity) 技術——即計算與特定參考信號 (如某振動構件的加速度信號) 相干的聲強分量，從而在複合性音源環境中「過濾」出只與特定音源相關的聲能流動，大幅提升了音源識別的精確度。

### 5.3 聲功率量測法 (Sound Power Measurement)

聲功率 (Sound Power Level,  $L_w$ ) 是描述音源固有輻射能力的物理量，其值與量測距離無關，是對設備噪音進行絕對定量評估的最基本參數。ISO 3745:2012 [15]

規範了在消音室（Anechoic Chamber）或半消音室中以聲壓法量測聲功率的精密方法，其量測不確定度可達到  $\pm 0.5$  dB 量級，適用於低背景噪音條件下的精密音源比較。

在複合性音源診斷中，聲功率量測通常用於對已識別的各子音源進行獨立的絕對量化，從而在分貝能量尺度上建立各音源的相對重要性排名。當各子音源能夠被物理分離並在標準測試環境中獨立運轉時，聲功率量測是最可靠的定量手段。

#### 5.4 近場聲學全像術（Near-field Acoustic Holography, NAH）

近場聲學全像術（NAH）是一種基於波動方程全場重建的先進量測技術，其核心思想是通過在緊靠音源表面的測量平面（稱為全像面，Hologram Plane）上密集量測聲壓的幅度與相位資訊，再利用二維空間傅立葉變換（2D Spatial Fourier Transform）及 Helmholtz 波動方程的反傳播（Back-propagation）演算法，重建音源表面的聲壓場、質點振速場及聲強場的完整分佈 [16]。

NAH 技術的革命性意義在於：其重建解析度不受瑞利（Rayleigh）解析度準則的限制，這是因為全像面位於音源的**近場（Near Field）**，能夠擷取到含有亞波長空間資訊的消逝波（Evanescent Wave）成分。Wu [17] 詳細闡述了 NAH 在實際工程中的實施技術，指出 NAH 不僅能重建聲壓，更能計算質點速度（Particle Velocity）、聲強以及聲功率等完整的聲學物理量，從而在複合性音源的表面構成中進行精確的面板分離。

Hald [18] 則進一步發展了**空間聲場轉換技術（Spatial Transformation of Sound Fields, STSF）**，這是 NAH 技術最早的商業化實現形式，其特色在於引入了主成分分析（Principal Component Analysis）技術，使得 STSF 能夠處理多個互不相干音源共存的複雜聲場——這正是複合性音源診斷的核心挑戰所在。透過 STSF 的主成分分解，可以將複合聲場分解為若干個獨立的「成分聲場」，每個成分對應一個特定的激勵模式，從而實現對複合性音源的物理分離。

在此基礎上，**統計最優近場聲學全像術（Statistically Optimised Nearfield Acoustical Holography, SONAH）** [2] 進一步克服了傳統 NAH 的主要工程限制：SONAH 允許使用非均勻分佈的麥克風網格，並對量測面以外的聲源具有低敏感性，從而無需量測陣列完全覆蓋整個音源物體，大幅提升了工程可操作性。SONAH 還可配合雙層麥克風陣列（Double Layer Array）實現聲場分離（Sound Field Separation），有效去除反射聲場對測量的干擾，這在存在多個反射邊界的工業複合聲場環境中具有特別重要的意義。

#### 5.5 波束成形技術（Beamforming）

波束成形 (Beamforming) 是基於麥克風陣列 (Microphone Array) 的空間濾波技術，其基本原理是對陣列中各麥克風信號施加適當的時延 (Time Delay) 或相位補償，使陣列在特定方向 (焦點方向) 具有最大的接收靈敏度，而來自其他方向的聲音則被有效抑制。通過對各個可能的音源位置重複執行此聚焦運算，即可生成一幅顯示各方向聲能強度的**聲源圖 (Source Map)** [2]。

在複合性音源的應用場景中，波束成形技術的主要優勢是能夠在遠場 (Far Field) 及中高頻範圍內進行高效的音源識別，非常適合在噪音試驗台、風洞試驗 (Wind Tunnel) 或戶外環境中對多個分散音源進行同步可視化。Kumar 與 Hegde [19] 在球諧波域 (Spherical Harmonics Domain) 中的近場聲源定位與波束成形研究中，進一步將波束成形技術擴展至三維球面陣列，使其能夠全方向地掃描並識別複合音源環境中各方向的音源分佈。

然而，傳統的延遲疊加 (Delay-and-Sum, DAS) 波束成形存在主瓣 (Mainlobe) 寬度有限及旁瓣 (Sidelobe) 效應的問題，旁瓣的存在會在聲源圖中產生「鬼像 (Ghost Image)」，在複合性音源環境中可能被誤判為額外的真實音源。為解決此問題，Brooks 與 Humphreys [20] 於 2006 年提出了用於聲源圖像的去卷積方法 (**Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources, DAMAS**)。DAMAS 通過建立一個線性方程組，將波束成形輸出結果中的陣列點擴散函數 (Point Spread Function, PSF) 效應去除，從而重建各真實音源的物理強度分佈，其空間解析度可提升 3 至 10 倍，且能夠準確還原各音源的真實強度值。

Sijtsma [21] 進而提出了基於空間源相干性的 CLEAN-SC (CLEAN based on Spatial Source Coherence) 演算法，這一方法利用相干性作為判斷真實音源的準則，通過迭代「清除」已識別音源的空間分量，有效消除旁瓣效應，在複合性非相干音源的分離識別方面展現出卓越的性能，在航空聲學領域已成為標準的後處理工具。

Fiebig 與 Dąbrowski [22] 在工業廠房的複合噪音源診斷實例中，展示了聲學相機 (Acoustic Camera，即整合聲學圖像與光學圖像的麥克風陣列系統) 在實際工業環境中的應用。在聲學圖與照片疊加的可視化呈現下，工程師能夠直觀地從廠房全景圖中辨識出各個主要噪音源的位置，大幅縮短了複合性音源診斷所需的時間。

## 5.6 傳遞路徑分析 (Transfer Path Analysis, TPA)

傳遞路徑分析 (TPA) 是複合性音源診斷中處理結構傳播噪音 (Structure-borne Noise) 路徑問題的核心方法論框架，廣泛應用於汽車、軌道車輛、船舶等複雜機電系統的 NVH 分析。TPA 的基本思想是：將系統分解為「激勵源 (Source)」與「被動結構 (Passive Structure)」兩個子系統，通過量測各連接界面的力/力矩

激勵與對應的頻率響應函數 (Frequency Response Function, FRF)，將接收點 (如車室內耳朵位置) 的聲壓響應表示為各傳遞路徑貢獻量的線性疊加 [8]。

Vaitkus、Tcherniak 與 Brunskog [23] 的研究展示了振動聲學操作傳遞路徑分析 (Vibro-acoustic Operational Transfer Path Analysis, V-A OTPA) 在實際工程中的應用——這種方法的特點是直接在系統運轉條件下 (無需停機分解) 進行量測，通過基於工况信號的矩陣反演，計算各操作傳遞路徑的貢獻量，特別適用於難以在台架上進行分解量測的大型複雜系統。在複合性音源的分析框架中，TPA 不僅能回答「哪個聲源最重要」，更能進一步識別「該聲源通過哪條路徑傳遞至接收點」，從而為降噪措施提供最具針對性的工程指引。

Padilha 與 Arruda [24] 比較了多種 TPA 估計技術的精度，指出在存在複雜路徑耦合的情況下，基於奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 的正則化逆矩陣方法能夠提供比傳統直接矩陣求逆更穩健的結果，這在複合性音源的傳遞路徑貢獻量計算中尤為重要。

## 5.7 相干性分析法 (Coherence Analysis)

在複合性音源環境中，相干性分析 (Coherence Analysis) 提供了一種以信號處理為基礎的音源分離手段，無需特殊的空間陣列硬體，只需在各音源附近安裝參考傳感器 (加速度計、麥克風) 即可實施。其核心概念是：若接收點的聲壓信號與某音源的參考信號之間具有高相干性 (Coherence Function  $\gamma^2 \rightarrow 1$ )，則說明該音源對接收點有顯著的能量貢獻；反之，若兩者相干性極低，則該音源對接收點的直接貢獻可忽略。

然而，Wang 與 Crocker [4] 在 1983 年的奠基性研究中就已指出，在多音源環境下，若各音源之間本身存在相關性 (即它們共享同一激勵源)，則簡單的雙信號相干性分析會失效，此時必須採用偏相干分析 (Partial Coherence Analysis) 方法——即在計算某一音源與接收點的相干性時，先將其他相關音源的影響從信號中「偏除」，才能得到該音源的真實獨立貢獻量。

在汽車 NVH 的工程實踐中，Davis 與 Bennett [25] 提出了一種將聲模態分析 (Acoustic Modal Analysis) 與相干性音源識別方法相結合的新型技術，其核心創新在於利用聲模態資訊來預測各子音源對接收點的貢獻量，即便兩個音源在頻率上存在重疊，也能通過模態形狀的差異加以區分，這對於處理高度複合的機械聲學問題提供了新的思路。

## 5.8 操作模態分析 (Operational Modal Analysis, OMA)

操作模態分析 (OMA) 是一種在系統正常運轉條件下——而非傳統的激振器激勵條件下——識別結構動態特性 (模態頻率、阻尼比與模態形狀) 的技術, 對於複合性音源診斷中識別共振 (Resonance) 放大效應具有特殊的意義。Zahid、Ong 與 Khoo [26] 在關於 OMA 技術的系統性回顧研究中, 總結了隨機子空間識別 (Stochastic Subspace Identification, SSI)、頻域分解 (Frequency Domain Decomposition, FDD) 等主要 OMA 算法的應用場景, 並指出 OMA 對於解決旋轉機械中因固有頻率耦合所引發的複雜噪音問題具有重要的診斷價值——這正是複合性音源中所謂「各部件固有頻率間的共振耦合效應」的問題所在 [5]。

在複合性音源的診斷框架下, OMA 的應用邏輯如下: 若量測發現某些頻率的聲壓級在多個子音源同時運作時顯著高於各子音源單獨運作時的線性疊加值, 則可合理懷疑存在結構共振放大效應, 此時應引入 OMA 技術識別結構的模態特性, 並確定哪個模態頻率被哪個激勵源所激勵, 從而針對性地採取去調諧 (Detuning) 或增加阻尼 (Damping) 等措施。

## 5.9 陣列信號子空間法 (Subspace Array Signal Processing)

在遠場多音源定位的高解析度需求場景中, 以 MUSIC (Multiple Signal Classification) 與 ESPRIT (Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) 為代表的子空間法 (Subspace Methods) 提供了超越傳統波束成形的角度解析精度。Roy、Paulraj 與 Kailath [27] 所提出的 ESPRIT 算法, 通過利用陣列信號的旋轉不變性 (Rotational Invariance) 特性, 在不需要知道陣列流形 (Array Manifold) 完整資訊的條件下, 實現了對多個同頻率音源到達方向 (Direction of Arrival, DOA) 的高精度估計。

在複合性音源的實際應用中, 子空間法特別適合以下場景: 多個音源在頻率上高度重疊, 僅以傳統波束成形的波束解析度無法區分; 或者音源數量已知 (或可估計), 需要在特定頻率點上精確分離各音源的來向。然而, 子空間法也有其應用前提——各音源信號必須具有足夠的不相干性 (Incoherence), 若音源間高度相關, 則需要採用空間平滑 (Spatial Smoothing) 等預處理技術。Sheng 與 Hu [28] 在基於無線感測網路的多聲源定位研究中, 採用最大似然 (Maximum Likelihood) 估計框架, 結合聲能量量測, 在低信噪比條件下也能可靠地估計多個聲源的位置, 這一方法為工業環境複合噪音源的遠場診斷提供了新的工程參考。

## 六、量測儀器的規格要求與標準規範

複合性音源的精密診斷對量測儀器有嚴格的技术要求。核心儀器包括以下幾類:

聲壓計 (Sound Level Meter) 應符合 IEC 61672-1:2013 [10] Class 1 等級的要求, 以確保在 20 Hz 至 20 kHz 全頻率範圍內的量測精度。Class 1 聲壓計的頻率響

應允許誤差在 1 kHz 以下應小於  $\pm 1.5$  dB，在台灣則要求符合 CNS 7129 1 型噪音計規格。

聲強探頭 (Sound Intensity Probe) 應符合 IEC 61043 標準的要求，由兩支配對良好的麥克風組成，其相位誤差應控制在  $0.05^\circ$  以內(對應的「相位不匹配指數 p-i index」需小於一定限值)，以確保在 50 Hz 至 10 kHz 範圍內的量測誤差不超過  $\pm 1$  dB。ISO 9614-1 [11] 與 ISO 9614-2 [12] 分別規定了以定點量測法及掃描量測法量測噪音源聲功率的完整程序，是聲強技術量測程序的核心規範依據。

麥克風陣列系統 (Microphone Array System) 是 NAH 與波束成形技術的核心硬體，其設計參數 (陣列孔徑、麥克風間距、幾何排列方式) 直接決定了量測的頻率範圍與空間解析度。Hou 等人 [5] 指出，交叉型、環型及矩形等多種陣列幾何構型各有其旁瓣特性，工程師應根據具體量測需求選用最優化的陣列設計。

頻率分析儀 (Frequency Analyzer) 在複合性音源診斷中必不可少，應具備即時 FFT (Fast Fourier Transform) 分析及 1/1、1/3 八音度頻帶分析功能，量測頻率範圍至少應覆蓋 10 Hz 至 20 kHz。

## 七、台灣法規規範框架

台灣對複合性音源的管制與量測，主要依據以下法規文件建立完整的規範框架：

「**噪音管制法 (Noise Control Act)**」為最上位的法律依據，授權主管機關制定各類噪音源管制標準及量測方法。依據該法第九條，行政院環境保護署 (現環境部) 訂定並公告「**環境噪音測量方法 (NIEA P201)**」 [1]，作為環境噪音量測的標準操作程序。

「**環境噪音測量方法 (NIEA P201)**」歷經多次修訂 (.93C, .94B, .96C 等版本)，現行版本 (NIEA P201.96C) 明確規範了複合性音量的量測與計算方式：當整體量測音量屬複合性音量，且各交通系統之間音量相差數值小於 10 dB 時，須測得各交通系統音量於測量時間之能量貢獻比例，並參照「複合性音源鑑定分離作業要點」執行詳細的分離計算程序 [1]。

「**陸上運輸系統噪音管制標準**」則針對複合性噪音源制定了更嚴格的管制規定：若複合噪音源有 2 個所有人或使用人，其個別噪音管制標準應至少降低 3 dB；這一規定充分體現了法規對複合性音源的能量疊加效應的科學認識，具有重要的社會意義。

在國際標準層面，EU 環境噪音指令（Directive 2002/49/EC）關於環境噪音評估與管理的框架，以及 ISO 1996-1 與 ISO 1996-2 關於環境噪音的描述與量測方法標準，共同構成了台灣法規規範的國際參照基礎 [1]。

## 八、數據處理、不確定度評估與結果解讀

在複合性音源的量測數據分析中，**不確定度（Uncertainty）**評估是確保診斷結論科學可靠性的關鍵環節。量測不確定度的主要來源包括：儀器本身的量測精度（A 類不確定度）；量測條件（溫度、濕度、風速）的變化（B 類不確定度）；以及音源的時間非穩態性所導致的統計抽樣誤差。

在**頻率分析**方面，1/3 八音度頻帶分析能夠識別寬頻噪音（Broadband Noise）中的頻率分佈特性，而窄頻 FFT 分析則能識別特定設備在特定轉速下所激勵的離散頻率成分（如齒輪嚙合頻率、電機電磁噪音頻率等），這些離散頻率成分往往是複合性音源診斷中識別特定子音源的重要「指紋」。

## 九、結論

複合性音源的診斷是一項高度跨學科的專業工作，融合了物理聲學、數位信號處理、陣列天線理論、結構動力學及工程管理等多個領域的知識。面對複合性音源問題時，系統性的五步驟診斷流程——整體評估→定性分類→精密識別→定量分析→驗證確認——提供了可靠的工作框架。

在量測技術的選擇上，不存在任何一種「萬能」的方法，必須根據目標問題的頻率範圍、空間尺度及音源特性，選擇最適合的工具組合。聲壓與聲強量測提供了基礎的空間分佈資訊；近場聲學全像術（NAH/STSF/SONAH）是低頻複雜聲場重建的最佳工具；波束成形技術（包括 DAMAS 及 CLEAN-SC 後處理）在中高頻及遠場音源識別中具有無可替代的優勢；傳遞路徑分析（TPA）為結構傳播路徑的定量分析提供了完整框架；而相干性分析與操作模態分析（OMA）則在處理相關音源及共振放大問題時發揮關鍵作用。

隨著機器學習與深度神經網路技術的發展，未來的複合性音源診斷技術將進一步向自動化、智能化方向演進，能夠在更嘈雜、更複雜的環境下實現更快速、更精確的音源識別與分離。然而，無論技術如何演進，對聲學物理原理的深刻理解與系統性的工程診斷思維，始終是解決複合性音源問題的核心基礎。

## 參考文獻

- [1] 行政院環境保護署。(2010)。環境噪音測量方法 (NIEA P201.94B) (環署檢字第 0990036292 號公告)。行政院公報, 第 016 卷, 第 079 期, 頁 10548–10555。中華民國九十九年四月二十六日。  
[https://gazette.nat.gov.tw/EG\\_FileManager/eguploadpub/eg016079/ch07/type3/gov60/num49/OEg.pdf](https://gazette.nat.gov.tw/EG_FileManager/eguploadpub/eg016079/ch07/type3/gov60/num49/OEg.pdf)
- [2] Ginn, K. B., & Haddad, K. (2012). Noise source identification techniques: simple to advanced applications. In *Proceedings of Acoustics 2012, Hong Kong*. Brüel & Kjær. <https://hal.science/hal-00810618>
- [3] Plunt, J. (1999). Strategy for transfer path analysis (TPA) applied to vibro-acoustic systems at medium and high frequencies. In *Proceedings of the 17th International Seminar on Modal Analysis (ISMA)*. Gothenburg, Sweden.  
[http://www.gothenburgsound.se/files/HF-TPA-ISMA\\_1998.pdf](http://www.gothenburgsound.se/files/HF-TPA-ISMA_1998.pdf)
- [4] Wang, M. E., & Crocker, M. J. (1983). On the application of coherence techniques for source identification in a multiple noise source environment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 74(3), 861–872.  
<https://doi.org/10.1121/1.389863>
- [5] Hou, J., et al. (2022). A review for the noise source identification methods based microphone array. *Journal of Vibroengineering*, 24(5), 995–1011.  
<https://doi.org/10.21595/jve.2022.22362>
- [6] Lanslots, J., Deblauwe, F., & Janssens, K. (2010). Selecting sound source localization techniques for industrial applications. *Sound and Vibration*, 44(6).  
<https://www.researchgate.net/publication/288634025>
- [7] Kim, T. H., Choi, J. Y., Oh, J. S., & Kim, S. Y. (2016). Contribution analysis of underwater radiation noise source using partial coherence function. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 35(2).  
<https://doi.org/10.7776/ASK.2016.35.2.0>
- [8] Padilha, P. E. F., & de França Arruda, J. R. (2006). Comparison of estimation techniques for vibro-acoustic transfer path analysis. *Shock and Vibration*, 13(4–5), 301–312. <https://doi.org/10.1155/2006/901798>

- [9] Huang, H. B., Huang, X. R., Yang, M. L., Lim, T. C., et al. (2018). Identification of vehicle interior noise sources based on wavelet transform and partial coherence analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 109, 247–267. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.030>
- [10] International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61672-1:2013: Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/5708>
- [11] International Organization for Standardization. (1993). *ISO 9614-1:1993: Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9614:-1:en>
- [12] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 9614-2:1996: Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 2: Measurement by scanning*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9614:-2:en>
- [13] Rawlinson, R. D. (1992). Applications of sound intensity measurements to gas turbine engineering. In *ASME Turbo Expo 1992: Power for Land, Sea, and Air* (Paper 92-GT-396). ASME. <https://doi.org/10.1115/92-GT-396>
- [14] Batel, M., Marroquin, M., Hald, J., & Christensen, J. J. (2003). Noise source location techniques: simple to advanced applications. *Sound and Vibration*, 37(3), 24–38. <https://www.researchgate.net/publication/289453471>
- [15] International Organization for Standardization. (2012). *ISO 3745:2012: Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms*. ISO. <https://www.iso.org/standard/45362.html>
- [16] Jia, W., Chen, J., Yang, C., & Li, J. (2009). Study of sound source identification based on beamforming and patch near-field acoustic holography. *Journal of Computational Acoustics*, 17(4), 391–404. <https://doi.org/10.1142/S0218396X09003951>

- [17] Wu, S. F. (2010). Techniques for implementing near-field acoustical holography. *Sound and Vibration*, 44(2), 12–16.  
<http://www.sandv.com/downloads/1002wuxx.pdf>
- [18] Hald, J. (2001). Time domain acoustical holography and its applications. *Sound and Vibration*, 35(2), 16–25. <http://www.sandv.com/downloads/0102hald.pdf>
- [19] Kumar, L., & Hegde, R. M. (2016). Near-field acoustic source localization and beamforming in spherical harmonics domain. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(13), 3351–3361. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2543207>
- [20] Brooks, T. F., & Humphreys, W. M. (2006). A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 294(4–5), 856–879.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.046>
- [21] Sijtsma, P. (2007). CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6(4), 357–374.  
<https://doi.org/10.1260/147547207783359459>
- [22] Fiebig, W., & Dąbrowski, D. (2020). Use of acoustic camera for noise sources localization and noise reduction in the industrial plant. *Archives of Acoustics*, 45(3), 517–524. <https://doi.org/10.24425/aoa.2020.132487>
- [23] Vaitkus, D., Tcherniak, D., & Brunskog, J. (2019). Application of vibro-acoustic operational transfer path analysis. *Applied Acoustics*, 154, 201–212.  
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.04.024>
- [24] Padilha, P. E. F., & de França Arruda, J. R. (2006). Comparison of estimation techniques for vibro-acoustic transfer path analysis. *Shock and Vibration*, 13(4–5), 301–312. <https://doi.org/10.1155/2006/901798>
- [25] Davis, I., & Bennett, G. J. (2015). Novel noise-source-identification technique combining acoustic modal analysis and a coherence-based noise-source-identification method. *AIAA Journal*, 53(9), 2700–2714.  
<https://doi.org/10.2514/1.J053907>
- [26] Zahid, F. B., Ong, Z. C., & Khoo, S. Y. (2020). A review of operational modal analysis techniques for in-service modal identification. *Journal of the Brazilian*

*Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(398).

<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02470-8>

[27] Roy, R., Paulraj, A., & Kailath, T. (1986). Direction-of-arrival estimation by subspace rotation methods – ESPRIT. In *Proceedings of ICASSP 1986, 11*, 2495–2498. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1986.1168673>

[28] Sheng, X., & Hu, Y. H. (2005). Maximum likelihood multiple-source localization using acoustic energy measurements with wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(1), 44–53.

<https://doi.org/10.1109/TSP.2004.838930>