

行政院環境保護署 107 年度
「環境噪音源防制技術與室內音量品質之研究」
專案研究計畫

目 錄

	頁次
第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 計畫目標	1-2
1.3 工作內容	1-2
1.4 工作流程	1-3
第二章 彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範 與現行作法相關文獻	2-1
2.1 主動噪音控制簡介及發展歷史	2-1
2.1.1 主動噪音控制的提出與早期發展	2-2
2.1.2 主動噪音控制系統概述	2-4
2.1.2.1 主動噪音控制系統	2-4
2.1.2.2 決定控制效果的各种因素	2-7
2.2 主動噪音控制相關應用技術	2-9
2.2.1 自適應的主動噪音控制	2-9
2.2.2 管道的主動噪音控制	2-10
2.2.3 三維（自由）空間的主動噪音控制	2-12
2.2.4 封閉空間的主動噪音控制	2-13
2.2.5 主動吸音研究	2-15
2.2.6 討論	2-17
2.3 自然通風窗實施主動聲音傳播控制	2-17
2.3.1 近年各國主動控制隔音窗之進展	2-18
2.3.2 日本	2-19
2.3.3 新加坡	2-20
2.3.4 香港	2-21
2.3.5 中國	2-22

2.3.6 法國	2-23
2.3.7 韓國	2-23
2.3.8 德國	2-24
2.3.9 西班牙	2-25
2.3.10 討論	2-25
第三章 彙整研析各類型通風隔音窗理論模型設計參數 與數值模擬資料	3-1
3.1 自然通風主動隔音窗的理論模型	3-1
3.1.1 引言	3-1
3.1.2 自然通風窗的低頻音傳播模型	3-2
3.1.2.1 模型建立	3-3
3.1.2.2 初級音場	3-4
3.1.2.3 次級音場	3-10
3.1.3 主動噪音控制方法	3-13
3.1.4 小結	3-14
3.2 自然通風主動隔音窗的數值模擬研究	3-14
3.2.1 引言	3-14
3.2.2 理論模型音場計算影響因素與模型驗證	3-15
3.2.2.1 模態階數對音場計算的影響	3-17
3.2.2.2 空間 V_1 截面面積對音場計算的影響	3-18
3.2.2.3 模型驗證	3-20
3.2.2.4 模型適用範圍	3-23
3.2.3 主動降噪的數值模擬研究	3-26
3.2.3.1 單通道主動降噪系統	3-26
3.2.3.2 雙通道主動降噪系統	3-31
3.2.4 小結	3-32
第四章 陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源 進行調查與量測	4-1
4.1 室內噪音相關研究與歷史回顧	4-1
4.1.1 預測研究回顧	4-1
4.1.2 管制歷史回顧	4-4

4.2 彙整研析不同國家住宅區音量品質相關指標、標準或建議值	4-6
4.2.1 世界衛生組織	4-6
4.2.2 中國大陸	4-10
4.2.3 新加坡	4-12
4.2.4 日本	4-13
4.2.5 韓國	4-14
4.2.6 美國加州	4-15
4.2.7 英國	4-18
4.2.8 紐西蘭	4-20
4.2.9 歐盟	4-21
4.2.10 小結	4-24
4.2.11 住宅區之室內外音量差	4-29
4.2.12 窗戶之開關與室內環境品質	4-35
4.3 進行住宅區室內外噪音量測研究	4-38
4.3.1 住宅區室內外噪音量測規劃說明	4-38
4.3.2 住宅區室內外噪音量測結果	4-40
4.3.3 陸上運輸系統噪音管制標準之檢討	4-47
4.4 彙整國內既有陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量(含低頻音)歷年量測成果數據	4-49
4.5 彙整各量測點之室內外噪音源分布及頻譜(含低頻)分析資料	4-63
4.5.1 室內噪音源分布及頻譜資料之調查及分析說明	4-63
4.5.2 室內噪音源分布及頻譜資料之量測結果說明	4-64
第五章 彙整研析國際現行各類型交通運輸系統噪音(含高速公路及航空噪音)管制法規、指標及防制作法	5-1
5.1 高速公路噪音指標及法規限值	5-1
5.1.1 歐盟	5-1
5.1.2 美國	5-9
5.1.3 日本	5-10
5.1.4 中國大陸	5-11
5.1.5 澳洲新南威爾斯	5-12
5.1.6 臺灣	5-13

5.2 高速公路噪音防制及管制作法	5-13
5.2.1 規劃和施工階段之溝通	5-13
5.2.2 減音措施	5-17
5.2.3 噪音防制精進作法之討論及建議	5-30
5.3 航空噪音指標及法規限值	5-32
5.4 航空噪音防制及管制作法	5-47
5.4.1 與天氣有關的噪音影響	5-47
5.4.2 管制措施	5-49
5.4.3 各機場航空噪音超過噪音標準的罰則與實際執行作法	5-55
5.4.4 噪音防制精進作法之討論及建議	5-61
5.5 辦理交通運輸系統噪音改善與精進作法說明會議	5-64
第六章 實際進度及查核重點	6-1
6.1 實際進度	6-1
6.2 查核重點	6-1
第七章 結論及建議	7-1
7.1 結論	7-1
7.2 建議	7-2

附件目錄

- 附件一、評選會會議紀錄暨回覆說明
- 附件二、第 1 次工作進度報告會議紀錄暨回覆說明
- 附件三、期中報告會議紀錄暨回覆說明
- 附件四、期末報告會議紀錄暨回覆說明
- 附件五、噪音計之 QA 及 QC 相關資料
- 附件六、說明會議會議紀錄

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 1.4-1 整體工作流程圖	1-3
圖 2.1-1 主動噪音控制技術的原理示意圖	2-1
圖 2.1-2 P. Lueg 美國專利的原理圖釋頁	2-2
圖 2.1-3 Convor 主動消音實驗系統原理	2-3
圖 2.1-4 單通道自適應主動噪音控制系統示意圖	2-4
圖 2.1-5 前饋式控制系統之典型結構示意圖	2-5
圖 2.1-6 回饋式控制系統之典型結構示意圖	2-6
圖 2.1-7 複合式（前饋+反饋）主動控制系統之典型結構示意圖	2-7
圖 2.1-8 主動控制中決定降噪量的因素	2-8
圖 2.2-1 主動聲遮罩（AAS）的基本原理圖	2-13
圖 2.2-2 虛擬隔音牆工作原理示意圖	2-14
圖 2.2-3 國外主動吸音原理示意圖	2-16
圖 2.2-4 一種新的主動吸音方法布置示意圖	2-16
圖 2.3-1 日本：(a) AAS 基本概念；(b) AAS 單元示意圖	2-19
圖 2.3-2 新加坡：(a)開敞通風窗 ANC 系統示意圖；(b)8 AAS 單元開敞通風窗 ANC 系統	2-20
圖 2.3-3 香港：配置傢俱試驗室照片	2-22
圖 2.3-4 中國：(a)試驗設置照；(b)原型自然通風 ANC 窗；(c)ANC 啟動（紅色實線）或關閉（綠色虛線）時誤差麥克風處的音壓位準	2-22
圖 2.3-5 法國：(a)主動通風窗配置示意圖；(b)主動通風窗配置試驗台照片	2-23
圖 2.3-6 韓國主動通風窗系統試驗設置：(a)試驗設置照片；(b)主動噪音控制系統略圖	2-24
圖 2.3-7 德國：(a)聲傳播試驗室平面圖；(b)斜窗搭配適應式噪音阻隔器配置照片	2-24
圖 2.3-8 西班牙：(a)主動通風窗略圖；(b)主動噪音控制系統略圖	2-25
圖 3.1-1 自然通風窗示意圖：(a)3D 示意圖；(b)截面圖	3-3
圖 3.1-2 自然通風窗之低頻音傳播模型的截面圖	3-4

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 3.2-1 窗戶和房間內用於研究計算精度的軌跡線示意圖	3-16
圖 3.2-2 當 $q_y = q_z = 5$ ，圖 3.2-1 軌跡線上總音壓級隨 q_f 的變化曲線	3-17
圖 3.2-3 當 $q_y = q_z = 5$ ，圖 3.2-1 軌跡線上音壓級隨 q_f 的變化曲線	3-18
圖 3.2-4 當 $q_f = 7$ 時，圖 3.2-1 軌跡線上總音壓級隨 $q_y \times q_z$ 的變化曲線	3-19
圖 3.2-5 當 $q_f = 7$ 時，圖 3.2-1 軌跡線上音壓級隨 q_y 和 q_z 的變化曲線	3-19
圖 3.2-6 使用配置 1 時，軌跡線上音壓級的對比	3-20
圖 3.2-7 使用配置 2 時，軌跡線上音壓級的對比	3-21
圖 3.2-8 使用配置 1 時，軌跡線上音壓相位的對比	3-21
圖 3.2-9 使用配置 2 時，軌跡線上音壓相位的對比	3-22
圖 3.2-10 由理論模型和 FEM 模型計算之窗戶和房間內的平均音壓級	3-23
圖 3.2-11 當入射平面波的法線方向向量為 $[1, 1, 0]$ 且頻率為 300 Hz 時， 由理論模型和 FEM 模型計算所得軌跡線上的音壓級曲線	3-25
圖 3.2-12 當入射平面波的法線方向向量為 $[1, 1, 0]$ 且頻率為 300 Hz 時， 由理論模型和 FEM 模型計算所得軌跡線上的音壓相位曲線	3-25
圖 3.2-13 數值模擬分析中主動降噪系統的配置示意圖	3-27
圖 3.2-14 使用單通道主動降噪系統獲得的新增降噪量曲線	3-29
圖 3.2-15 250 Hz 時，空間 V_5 內中間線所在 $y_5 - z_5$ 平面 ($x_5 = 1.5\text{m}$) 上 的音壓級分布圖	3-30
圖 3.2-16 使用如圖 3.2-13(c) 中所示雙通道主動降噪系統所獲得的新增 降噪量曲線	3-32
圖 4.2-1 現有的氣流窗口類型示意圖	4-35
圖 4.2-2 兩種操作模式的雙氣流窗示意圖	4-36
圖 4.2-3 供氣流窗口及雙氣流窗口通風窗示意圖	4-36
圖 4.3-1 住宅區室內外噪音及頻譜資料測量狀況示意圖	4-38
圖 4.4-1 不同室內位置於「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)	4-53
圖 4.4-2 不同室內位置於「開(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)	4-53
圖 4.4-3 不同窗戶(門)樣式於「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔 音量)	4-54

圖目錄

	頁次
圖 4.4-4 不同窗戶（門）樣式於「開（門）窗」之室內外 L_{eq} 音量差（隔音量）	4-54
圖 4.4-5 不同室內位置於「關（門）窗」之室內外 L_{max} 音量差（隔音量）	4-55
圖 4.4-6 不同室內位置於「開（門）窗」之室內外 L_{max} 音量差（隔音量）	4-55
圖 4.4-7 不同窗戶（門）樣式於「關（門）窗」之室內外 L_{max} 音量差（隔音量）	4-56
圖 4.4-8 不同窗戶（門）樣式於「開（門）窗」之室內外 L_{max} 音量差（隔音量）	4-56
圖 4.4-9 「關（門）窗」之室內外 L_{eq} 全頻及低頻音量差（隔音量）	4-57
圖 4.4-10 「開（門）窗」之室內外 L_{eq} 全頻及低頻音量差（隔音量）	4-57
圖 4.4-11 「關（門）窗」之室內外 L_{eq} 音量線性回歸	4-58
圖 4.4-12 「開（門）窗」之室內外 L_{eq} 音量線性回歸	4-58
圖 4.4-13 「關（門）窗」之室內外 L_{max} 音量線性回歸	4-59
圖 4.4-14 「開（門）窗」之室內外 L_{max} 音量線性回歸	4-59
圖 4.4-15 不同室內位置於「關（門）窗」之室內外 L_{eq} 及 L_{max} 音量差（隔音量）	4-60
圖 4.4-16 不同室內位置於「開（門）窗」之室內外 L_{eq} 及 L_{max} 音量差（隔音量）	4-60
圖 4.4-17 不同室內位置於「開關（門）窗」之室內 L_{eq} 音量	4-61
圖 4.4-18 不同室內位置之室外 L_{eq} 音量	4-61
圖 4.4-19 不同室內位置於「開關（門）窗」之室內 L_{max} 音量	4-62
圖 4.4-20 不同室內位置之室外 L_{max} 音量	4-62
圖 4.5-1 純音判定條件示意圖	4-63
圖 4.5-2 環保署 106 年專案研究計畫之住宅區開（門）窗的室內外同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖	4-65
圖 4.5-3 本計畫之住宅區開（門）窗的室內外同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖	4-68
圖 5.1-1 歐盟 CEDR 成員國所使用之噪音指標比例	5-4

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 5.1-2 歐盟 CEDR 成員國之 L_{Aeq} 指標的時段比例	5-4
圖 5.1-3 歐盟 CEDR 成員國之新國道的噪音限制狀況	5-4
圖 5.1-4 歐盟 CEDR 成員國之國道的日間 L_{Aeq} 室外噪音限值	5-5
圖 5.1-5 歐盟 CEDR 成員國之新國道的 L_{Aeq} 室內噪音限值	5-5
圖 5.2-1 丹麥公路專案環境影響評估公開會議	5-13
圖 5.2-2 丹麥哥本哈根之修（改）建高速公路的新隔音牆	5-14
圖 5.2-3 荷蘭公開會議上使用之互動式噪音方案（噪音模擬器）	5-15
圖 5.2-4 丹麥公路專案展覽會的噪音海報	5-16
圖 5.2-5 丹麥使用低噪音路面的講習班	5-16
圖 5.2-6 挪威向居住在國道沿線居民發送的摺頁冊範例	5-17
圖 5.2-7 國外高速公路之各種型式隔音牆實例照片	5-18
圖 5.2-8 高速公路交通噪音之不同音源貢獻圖	5-21
圖 5.2-9 多孔隙彈性路面於不同車速下相對於粗糙的表面粒料（SD11r） 及密級配路面（DAC12r）之減音量	5-21
圖 5.2-10 多孔隙瀝青混凝土 PAC 鋪面改善之減音效果示意圖	5-22
圖 5.2-11 荷蘭在公路上使用多孔瀝青是一項國家政策準則	5-22
圖 5.2-12 丹麥哥本哈根一個新的低噪音路面的實例	5-22
圖 5.2-13 國內橡膠瀝青鋪面應用推展進程	5-24
圖 5.2-14 橡膠瀝青成效優於一般瀝青之示意說明	5-25
圖 5.2-15 台 61 線西濱快速道路橡膠瀝青段降噪效果評估	5-25
圖 5.2-16 國道 1 號高速公路橡膠瀝青段降噪效果評估	5-26
圖 5.2-17 歐盟道路主管會議（CEDR）成員國針對既有和新道路的減音 措施類型之比例	5-29
圖 5.2-18 歐盟道路主管會議（CEDR）成員國為減輕既有和新道路噪音 而使用的減音措施數目之比例	5-29
圖 5.4-1 溫層逆轉將折射聲波並將它們分布成圓柱形	5-48
圖 5.5-1 說明會議照片	5-66

表 目 錄

	<u>頁次</u>
表 2.1-1 主動噪音控制系統的分類	2-4
表 3.2-1 驗證模型的幾何尺寸	3-16
表 3.2-2 圖 3.2-13(b)之次級音源和誤差麥克風的座標值以及在 150、 250、350 和 450 Hz 時主動降噪系統的新增降噪量	3-28
表 3.2-3 圖 3.2-13(c)之次級音源和誤差麥克風的座標值以及在 150、 250、350 和 450 Hz 時主動降噪系統的新增降噪量	3-31
表 4.2-1 世界衛生組織 WHO 之特定環境的噪音指引值	4-9
表 4.2-2 中國大陸《聲環境質量標準》之室外環境噪音 L_{eq} 限值	4-10
表 4.2-3 新加坡建設局之室內環境音量品質要求	4-13
表 4.2-4 日本環境省之面臨交通動脈流量地區之室外噪音標準	4-13
表 4.2-5 韓國環境部之環境噪音管制標準	4-15
表 4.2-6 美國洛杉磯市各噪音源種類及其執法部門	4-16
表 4.2-7 美國舊金山市及沙加緬度市之居住單元室內噪音標準	4-17
表 4.2-8 英國 BS 8233 : 2014 之居住單元室內噪音指引	4-18
表 4.2-9 紐西蘭首都威靈頓各噪音源種類及其執法部門	4-20
表 4.2-10 歐洲標準化委員會之室內 A 加權音量的設計例	4-23
表 4.2-11 不同國家或組織之室內音量彙整表	4-26
表 4.2-12 住宅區於開窗下之室內外音量差	4-32
表 4.2-13 單層玻璃及雙層玻璃之室內外音量差	4-32
表 4.2-14 不同窗戶啟閉型態之室內外噪音量的差異及其測量次數	4-33
表 4.2-15 開關窗之聲學傳播文獻摘錄	4-33
表 4.2-16 國內外相關研究之室外和室內 L_{eq} 音量差異之結果比較	4-34
表 4.3-1 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果彙整表	4-40
表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表	4-41
表 4.3-3 國外鐵路噪音最大音量 L_{Amax} 管制標準	4-48
表 4.4-1 交通噪音影響與改善之各部會負責事項內容（初擬）	4-51
表 4.4-2 環保署 106 年研究專案（20 點次）及 107 年研究專案（6 點次） 測量結果彙整表	4-52

表 目 錄

	<u>頁次</u>
表 5.1-1 歐盟 CEDR 成員國之建物室外噪音的限值、目標和指引	5-6
表 5.1-2 歐盟 CEDR 成員國之建物室內噪音的限值、目標和指引	5-8
表 5.1-3 美國聯邦公路局小時 A 加權噪音量之消減標準	5-9
表 5.1-4 日本之環境質量標準	5-10
表 5.1-5 日本噪音控制法之標準	5-10
表 5.1-6 中國大陸之環境噪音 L_{eq} 限值	5-12
表 5.1-7 澳洲新南威爾斯之住宅用地的道路交通噪音評估標準	5-12
表 5.1-8 陸上運輸系統噪音管制標準之第五條高速公路管制標準	5-13
表 5.2-1 不同車速及不同鋪面型式之噪音減量	5-20
表 5.2-2 國內橡膠瀝青鋪面路段工程實績資訊	5-24
表 5.2-3 各國之高速公路噪音指標	5-30
表 5.3-1 航空噪音對社區影響之指標制訂與考慮因素	5-43
表 5.3-2 總噪音載荷計算加權係數	5-45
表 5.3-3 平均噪音指標中 C 的修正值	5-46
表 5.3-4 國內外機場的噪音指標及限值標準	5-46
表 5.4-1 世界 595 個國際機場之噪音管制措施採用的次數	5-53
表 5.4-2 各國際組織之航空噪音政策與措施比較	5-54
表 5.4-3 我國機場目前之航空噪音管制措施	5-54
表 5.4-4 國外各機場航空噪音超過標準之罰則與實際執行作法一覽表	5-56
表 5.4-5 可行之未來三年航空噪音管制策略與行動方案分析表	5-61
表 5.4-6 主要國家不同航空噪音指標管制範圍比較表	5-64
表 6.1-1 計畫工作執行進度表	6-2
表 6.2-1 實際進度及查核點說明	6-3

第一章 前言

1.1 計畫緣起

行政院環境保護署（以下簡稱環保署）於民國 96 年至 97 年間，已完成圖書館 25 所及醫院 45 所等公共場所室內音量研究工作，並初步建議各種室內音量容許值。圖書館公共服務區的 $L_{eq(1h)}$ 為 50 dB(A)；醫院公共服務區的 $L_{eq(1h)}$ 為 60 dB(A)。98 年至 101 年更完成 39 處陸上運輸系統場站室內音量研究工作，並初步建議我國陸上運輸系統車站大廳、聯絡道及月台室內音量容許值：大廳（等候區）或聯絡道為營運時段的 $L_{eq(1h)}$ 平均值，良好為 70 dB(A)，優良為 65 dB(A)；月台 $L_{eq(事件)}$ 良好為 80 dB(A)，優良為 75 dB(A)。

另於 106 年完成 20 點次之住宅區室內外音量品質的研究工作，參考世界各國室內音量建議指標與音量容許、標準值，完成室內音量建議值及相關測量方法及指標。國外住宅區室內之音量品質評估大多採用 L_{Aeq} 作為評估指標，僅少數有採用 L_{Amax} 作為指標，如：世界衛生組織（WHO）、英國曼徹斯特市。環保署 106 年現地測量之開關窗的 L_{eq} 結果與國外文獻之結果相近，關（門）窗之平均隔音量初估約有 20 分貝；開（門）窗之平均隔音量約有 10 分貝。 L_{eq} 建議值：日間 55 dB(A)；夜間 45 dB(A)；早晚則取日間及夜間之平均值為 50 dB(A)。 L_{max} 建議值：60 dB(A)（參考 WHO，比夜間 L_{eq} 值高出 15 dB(A)）。

而隨著環境噪音問題的日益嚴重，降低噪音的方法顯得越來越重要，噪音可以採用兩種基本方法予以降低：被動式（Passive）噪音控制與主動式（Active）噪音控制。近來民眾對生活品質要求提高，寧適健康的住宅生活空間成為普遍需求，為改善居住環境品質，實有必要針對環境噪音源防制技術進行研究，研提可行改善技術，以供環保署未來擬訂管制策略及管理措施之參考。

本年度期盼藉由此計畫：彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻，針對陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源進行調查與量測，並彙整歷年量測執行成果與比較研析，供環保署後續擬定管制政策、達成改善民眾居住環境品質、維護國民健康與生活永續發展之目標及室內音量自主管理參考。爰此，環保署乃提出 107 年度「環境噪音源防制技術與室內音量品質之研究」專案研究計畫（以下簡稱本計畫）。

1.2 計畫目標

- 一、彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻。
- 二、針對陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源進行調查與量測，並彙整歷年量測執行成果與比較研析。
- 三、彙整研析各類交通運輸系統噪音改善成效，依我國現況特性與參考國際作法，研提適用國內環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法，協助本署召開相關研商說明會議。

1.3 工作內容

- 一、彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻
 - (一)蒐集國際上現行環境噪音主動控制系統、原理及相關應用技術（至少 5 種類別），並進行彙整研析事宜。
 - (二)彙整國際上採用自然通風窗實施主動聲音傳播控制的技術規範與施行作法（至少 8 個國家），並進行優劣比較與研析事宜。
 - (三)彙整研析各類型通風隔音窗理論模型設計參數與數值模擬資料，並進行各種特性優劣比較。
- 二、針對陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源進行調查與量測，並彙整歷年量測執行成果與比較研析
 - (一)進行陸上運輸系統沿線住宅區環境噪音量測（至少 5 站次），包括開窗與關窗條件及衰減狀況等不同室外及室內量測工作。
 - (二)彙整國內既有陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量（含低頻音）歷年量測成果數據（至少 10 處次），並完成彙整各量測點之室內外噪音源分布及頻譜（含低頻）分析資料。
 - (三)研析各種陸上運輸系統沿線住宅區噪音源分布與量測結果比較，並針對各類型不同樣態住宅區環境噪音提出改善方案與建議。
- 三、彙整研析各類交通運輸系統噪音改善成效，並依我國現況特性與參考國際作法，研提適用國內環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法，協助本署召開相關研商說明會議
 - (一)蒐集國際現行各類型交通運輸系統噪音（含高速公路及航空噪音）管制法

規與指標（至少 10 個國家）。

(二)彙整研析各國交通運輸系統噪音（含高速公路及航空噪音）超出管制標準限值作法，並依國內現況與生活特性，研提適用我國環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法。

(三)辦理交通運輸系統噪音改善與精進作法說明會議（為時半天，至少 1 場次），說明會議人數預計 20 人，提供茶水、便當及場地租金。

1.4 工作流程

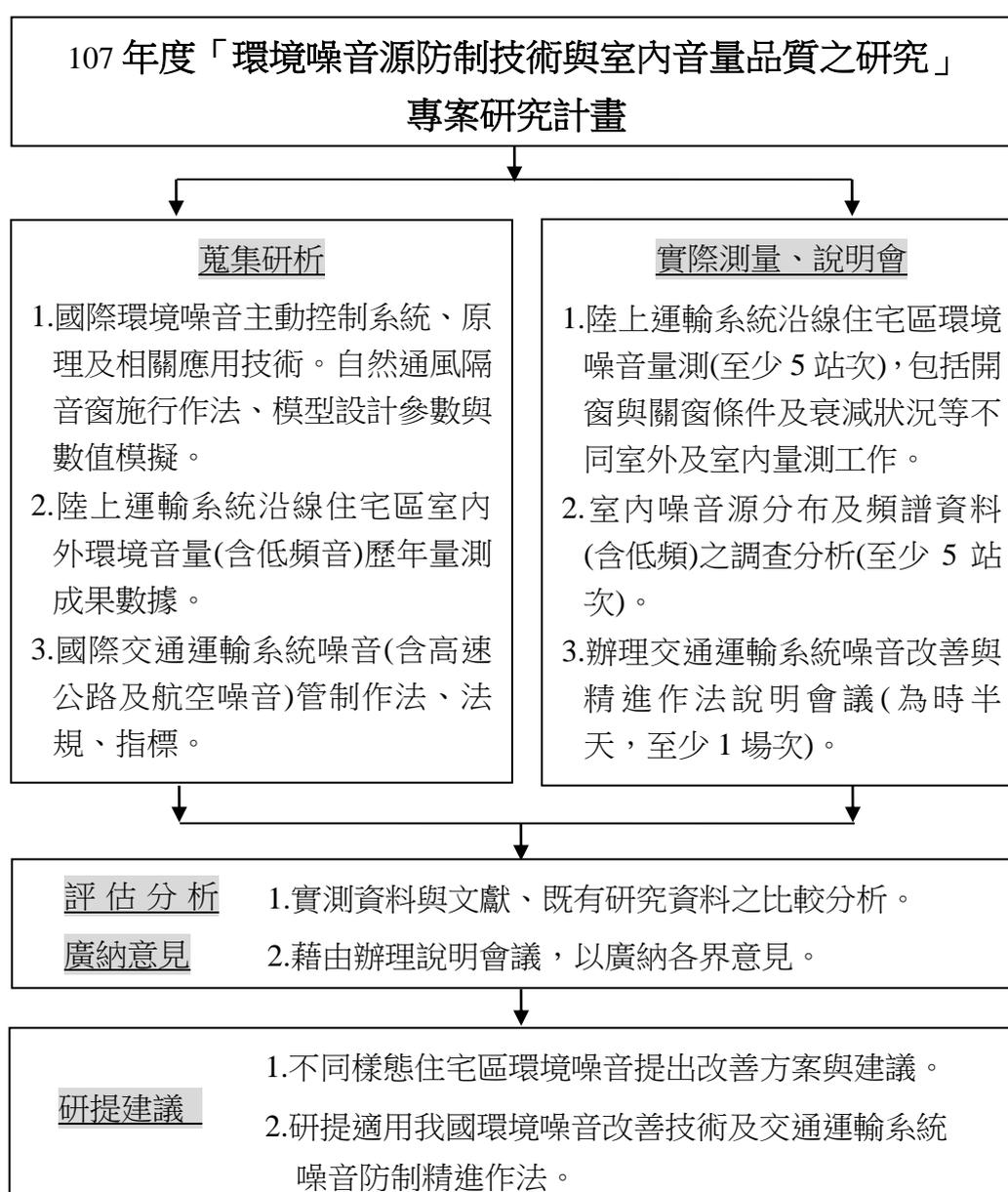


圖 1.4-1 整體工作流程圖

第二章 彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻

2.1 主動噪音控制簡介及發展歷史

一般而言，消除或者降低噪音通常採用三種降噪措施，即在音源處降噪、在傳播過程中降噪和在人耳處降噪；但是這幾種方式都是被動的，實際使用過程中往往呈現出低頻降噪效果差等缺點。由於低頻噪音波長大，衍射性強，傳播過程中衰減慢，吸音體體積需要足夠大或隔音材料面密度足夠大才能有效降低低頻噪音，因此傳統的吸、隔音等措施之低頻降噪能力有限（洪宗輝等，2004；何琳等，2007；Vér and Beranek, 2005）^[1]。為了主動地消除噪音，人們發明了「主動噪音控制（Active Noise Control, ANC 或稱有源控制）」這一技術。

圖 2.1-1 所示為主動噪音控制技術的基本原理示意圖。可以認為所有的聲音都由一定的頻譜和能量組成。從接收噪音源著手，透過電聲處理，運算出反相的波，並通過內置音訊處理電路進行放大和重放，相互反相的聲音將會疊加，噪音的振幅將會大幅衰減，從而降低了噪音^[2]。一般稱呼被控制的音源為初級音源；人為產生音源為次級音源，相消性干涉以達到減音之目的。

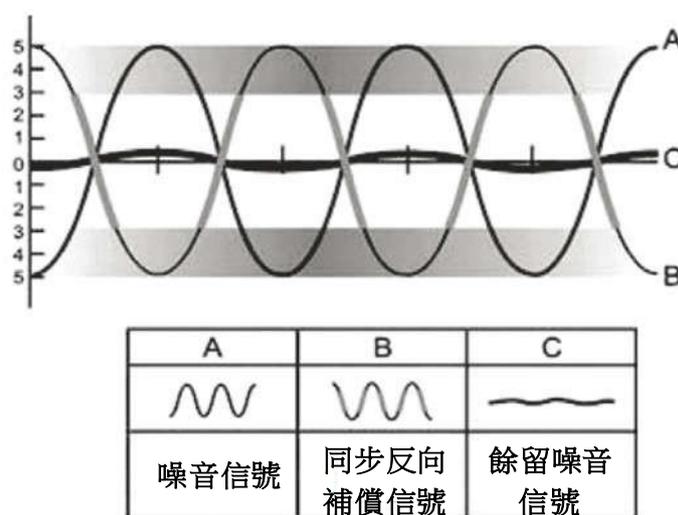


圖 2.1-1 主動噪音控制技術的原理示意圖^[2]

目前主動噪音控制技術已經在實際生活中得到應用，但是受制於成本、性能等各方面因素限制，其應用範疇還比較局限。常見的應用範圍包括：主動降噪耳機、隔音牆的低頻插入損失 (Omoto and Fujiwara, 1993; Omoto et al., 1997; Guo and Pan, 1998b; Niu et al., 2007; Liu and Niu, 2008)、降低在管道中傳播的低頻音 (Tang and Cheng, 1998; Romeu et al., 2001)、降低電力變壓器的低頻噪音 (Hesselmann, 1978; Qiu et al., 2002) 和降低汽車艙體、飛機機艙和房間等封閉空間內的噪音等 (Nelson and Elliott, 1992; Elliott, 2001; Bai and Chang, 1996)。[1][2]

2.1.1 主動噪音控制的提出與早期發展

主動噪音控制的概念最早由德國物理學家 Paul Lueg 提出，他在 1933 年和 1936 年分別申請了德國和美國專利 (Lueg, 1933, 1936)。1936 年的美國專利《消除聲音振盪的處理方法》(Process of Silencing Sound Oscillations) 中提到，以往消除聲音振盪的處理方法是調整振盪的相位，也就是利用音波的干涉現象。然而這類方法只對振盪源進行操作，以純機械的型式實現相位疊加。Paul Lueg 在這份專利中提出新的方法，使用時與振盪源無關，而是透過麥克風採集聲音振盪的相關資訊，再通過揚聲器 (喇叭) 以反相位的型式重放^[3]。

Lueg 的專利原理如圖 2.1-2 所示。對於單頻噪音，例如：管道 T 內有一個已知頻率的單頻音源 A，產生音波 S_1 往下游傳播。麥克風 M 位於音源和揚聲器 L 之間。麥克風接收到的音波以電信號的型式經過放大器 V 送給揚聲器，產生音波 S_2 。透過調整揚聲器與麥克風之間的距離，可以使得音波 S_2 的相位與音波 S_1 相位相反，從而達到消音之目的。對於非正弦的任意形狀的噪音，必須將揚聲器和麥克風儘可能靠近，使得到達兩者音波的形狀和時間基本相同。再透過改變揚聲器極性等方式，實現音波的反相位，從而在一定區域內達到消音之目的。

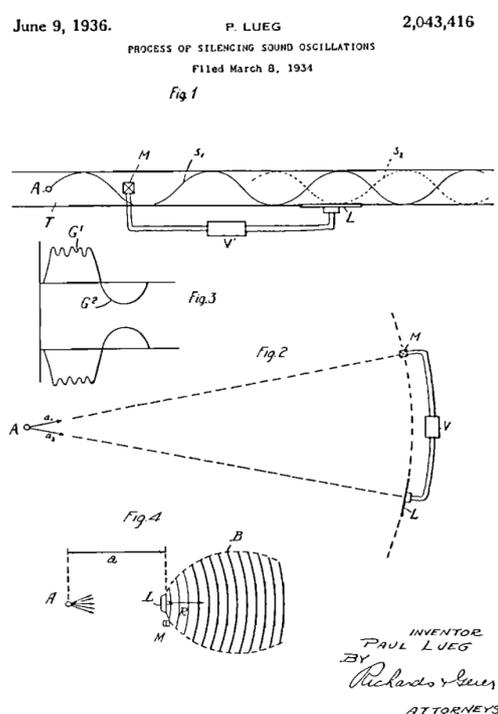


圖 2.1-2 P. Lueg 美國專利的原理圖釋頁^[3]

1953 年 Olson 發表了關於主動噪音控制的文章。文中把主動噪音控制系統命名為電子吸音器，利用回饋控制方法實現了噪音控制，他成功製作出了實際的控制系統，並取得了一定的降噪效果^[2]。在 Olson 研究電子吸音器的同時，通用電氣公司的 W. B. Convor 嘗試了利用主動方法控制變壓器輻射噪音，如圖 2.1-3 所示。Convor 的實驗採用了一個 15,000 kVA 的變壓器，由數隻揚聲器作為「反音源（次級音源）」靠近變壓器表面控制變壓器輻射噪音。實驗結果表明：在變壓器的正面，可以獲得 10 dB 左右的降噪量，而在極角 30 度以後，噪音反而被加強了。由於這個原因，該方案在 1956 年被放棄了，代之以被動噪音控制方法。不過，因為變壓器噪音以低頻音為主，且具有明顯的週期性，這對發揮主動噪音控制技術非常有利，促使後來的人們不斷加以研究^[4]。以今天的眼光來看，Olson 電子吸音器和 Convor 實驗系統中所涉及的音場屬於三維空間自由音場，無論在音場分析還是在系統實現上，在當時條件都不成熟的情況下，完成起來過於困難。

20 世紀 60 年代以來，隨著電子技術的發展和聲學理論研究的進步，主動噪音控制技術獲得了極大的發展。70 年代英國劍橋大學的 Swinbanks、倫敦大學的 Leventhall、法國的 Mangiante 等分別對管道中的主動噪音控制進行了研究，並取得了重大的進展。80 年代以來，隨著大型積體電路、數位電路、信號處理和微電子技術的發展，主動降噪技術也取得了長足的發展。英國 Essex 大學開發出採用微處理器線上控制的「Essex 主動降噪系統」；英國劍橋大學的 Ross 發表了關於寬頻主動降噪控制系統的專門演算法；美國貝爾實驗室的 Burgess 基於電腦模擬對用於管道降噪的自適應（自我調整）噪音控制系統進行了研究。1992 年世界上第一部主動噪音控制的專著在倫敦出版^[2]。

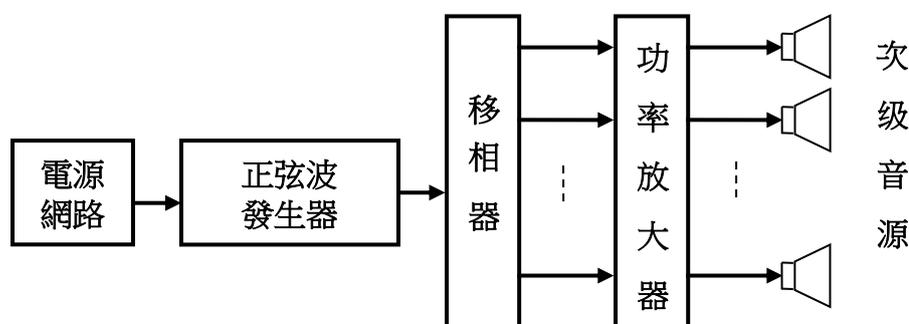


圖 2.1-3 Convor 主動消音實驗系統原理^[4]

2.1.2 主動噪音控制系統概述

2.1.2.1 主動噪音控制系統

典型的單通道自適應主動噪音控制系統如圖 2.1-4 所示（以自由音場為例）。如果去掉誤差感測器，將控制器傳遞函數固定，則該系統就成為非自適應主動噪音控制系統。一個主動噪音控制系統包括兩部分：控制器和電聲部分（圖 2.1-4 中，包括：參考感測器、次級音源和誤差感測器）。控制器部分有類比和數位之分，類比電路一般只適合完成單通道、非自適應控制器。而數位電路的功能要強得多，可以實現多通道、自適應控制器，它包括：信號處理器（內含自適應演算法）及其周邊電路。電聲部分主要包括：次級音源（電聲器件、振動作動器）、參考感測器（對前饋控制方式而言）和誤差感測器。

主動噪音控制系統的分類方法達數十種之多，涉及的分類因素也很複雜，具體情況列示如表 2.1-1。表 2.1-1 中每一列任選一項，從左到右排列，就可構成一種類型的主動噪音控制系統。例如：可以構成這樣一種系統：採用近場誤差傳感策略、基於集中式的聲控制方式的自適應前饋數位式多通道主動噪音控制系統。實際中，下列系統的分類需要特別關注。

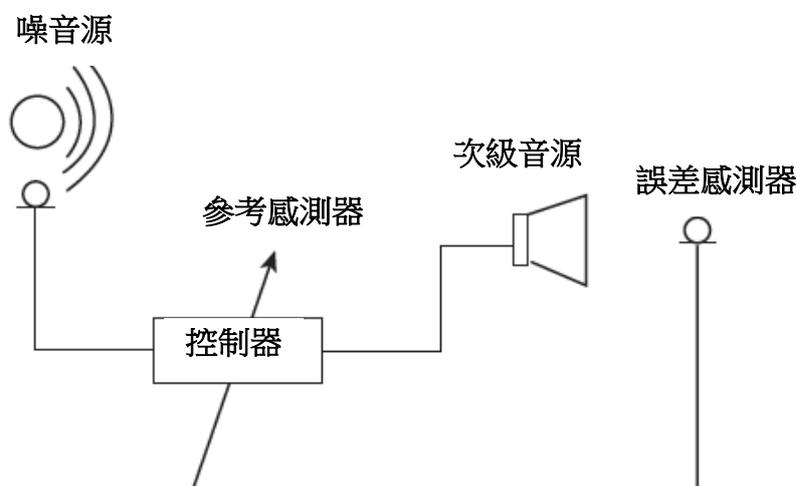


圖 2.1-4 單通道自適應主動噪音控制系統示意圖^[4]

表 2.1-1 主動噪音控制系統的分類^[4]

控制方式				次級音源類型		誤差傳感策略	
自適應	前饋	模擬	單通道	分散式	聲控制	聲傳感	遠場
							近場
非自適應	回饋	數字	多通道	集中式	力控制	結構傳感	位移

一、類比系統和數位系統

這兩種系統的控制器分別由類比電路和數位電路構成。類比系統構造簡單，成本低廉，但它只能完成傳遞函數簡單的單通道控制器，系統特性不能適應環境的變化。數位系統多由數位信號處理器完成特定演算法，通常是自適應的，適合完成多通道和時變環境下的主動噪音控制，可靠性好，但它的價格相對較高，電路結構複雜。

二、前饋式控制系統、回饋式控制系統及複合式

(一)前饋式控制系統^[2]

前饋式主動噪音控制系統又稱開環式噪音控制系統，其典型結構如圖 2.1-5 所示。這種系統一般需要被控制的初級音場的聲音資訊，通常稱為參考信號。參考信號送到前饋式控制器，經過控制器處理後，產生一個相應的控制信號，驅動揚聲器輸出該聲音信號產生次級音場，進而和實際通過物理途徑中傳來的原始聲波信號相疊加，誤差麥克風檢測初級音場和次級音場的疊加所形成的誤差信號，送到控制器中，控制器根據特定的演算法調整次級音源信號的強度。

前饋式主動噪音控制的優點是麥克風接收的是純噪音，並不接收喇叭發出的聲音，所以系統是一個開環，不會引起任何的閉環振盪和嘯叫，因此可以獨立地調試電路，使降噪的效果達到最佳。但噪音經過揚聲器並在揚聲器內多次反射，其大小和相位已發生變化，麥克風採集到的噪音與揚聲器內的噪音將有很大的不同，且外部噪音的方向性很強，難以使用同一電路滿足來自不同方向的噪音的降噪要求，這些都是在前饋式系統的設計中需要克服的問題。

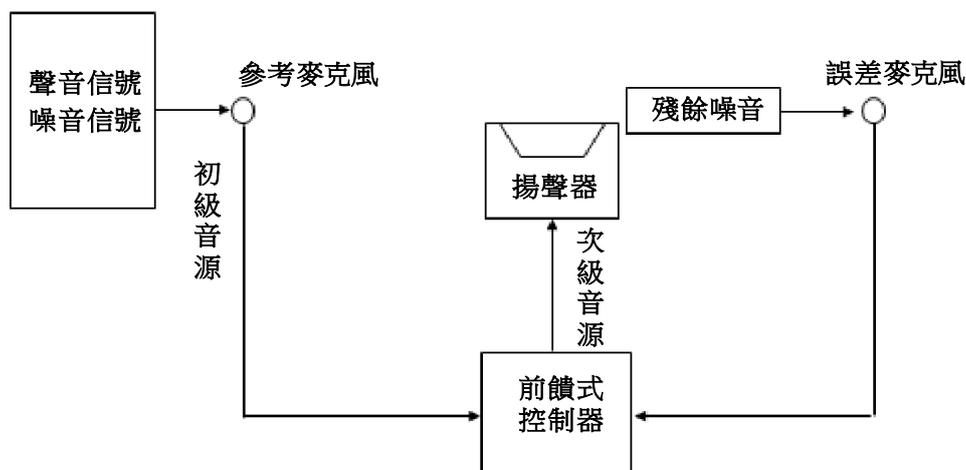


圖 2.1-5 前饋式控制系統之典型結構示意圖^[2]

(二)回饋式控制系統^[2]

回饋式主動噪音控制系統又稱閉環式噪音控制系統，它比前饋式系統少了一個參考麥克風，其典型結構如圖 2.1-6 所示。雖然系統構成上得以簡化，但是應用範圍也大大縮小。回饋結構的主動噪音控制系統不需要預先得到聲音資訊，而是透過控制器調整誤差信號，從而降低噪音。由於是回饋系統，當放大器的增益加大到一定程度時，系統將變得很不穩定，產生高頻嘯叫或低頻振盪，為了維持控制系統的穩定，一般會要求控制器和誤差麥克風的位置十分接近，這就限制了回饋式主動噪音控制系統的應用範圍。

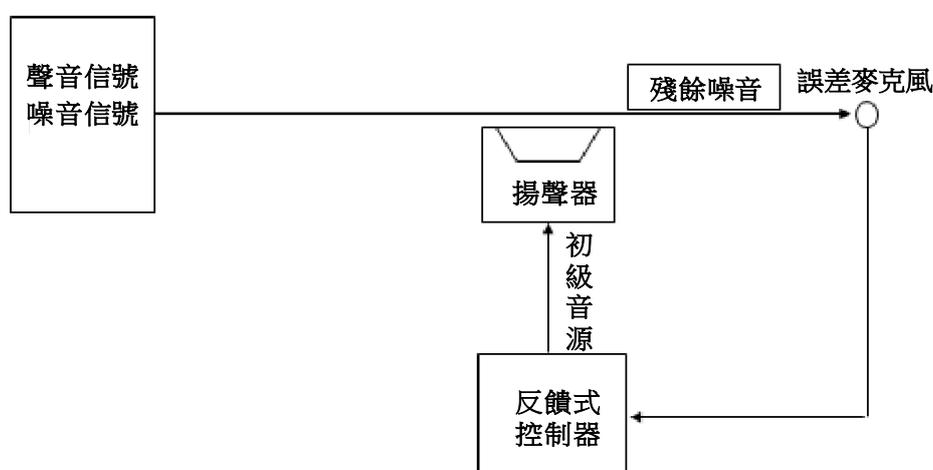


圖 2.1-6 回饋式控制系統之典型結構示意圖^[2]

這兩種系統的差別在於前饋系統需要獲得參考信號，控制器由前饋濾波器完成。而回饋系統因無法得到參考信號，整個系統由誤差感測器同時檢測參考信號和誤差信號。一般而言，只要可能，人們寧願採用前饋系統。因為它的穩定性比回饋系統要好得多。

(三)複合式控制系統^[2]

複合式結合了前饋式及回饋式的結構，其典型結構如圖 2.1-7 所示。次級音源發出的信號將由參考麥克風和誤差麥克風共同決定。前饋式系統可以減弱參考麥克風檢測到的與初級噪音相關的噪音，回饋式系統則對窄帶噪音十分有效，兩者結合使用，可以增強主動噪音控制系統的靈活性，從而比使用單一結構獲得更好的降噪效果，但缺點是系統實現複雜、成本也非常高。

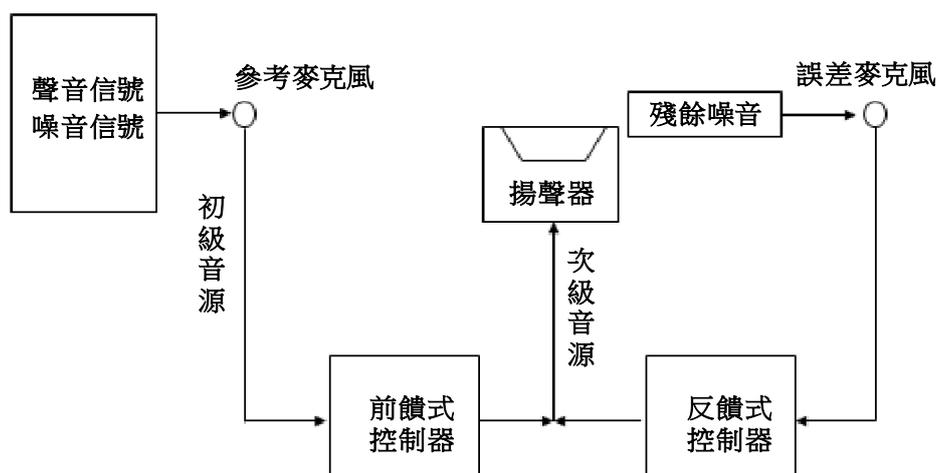


圖 2.1-7 複合式（前饋+反饋）主動控制系統之典型結構示意圖^[2]

三、單通道系統和多通道系統

單通道系統中僅包含一個次級音源和一個誤差感測器，而多通道系統則包含兩個以上的次級音源和誤差感測器。多數情況下，多通道系統對擴大消音空間，提高降噪量是必須的，但隨著通道數的增多，控制器演算法的複雜程度將大幅度地增加，這對保持系統的即時性和穩定性都十分不利。

2.1.2.2 決定控制效果的各种因素

如圖 2.1-8 所示，決定最終降噪量的因素來自 4 個方面：(1)系統可能取得的最大降噪量由次級音源的布放（位置及個數）確定，這種降噪量稱為理論降噪量。對簡單初級音源和規則聲學空間，可以透過解析計算獲得；(2)對實際系統來說，需要確定一個可以實現的控制目標。理論上的控制目標通常是聲功率最小，由於聲功率通常無法用感測器實際檢測，實際中常用有限點的音壓平方和代替，由此得到的降噪量稱為基於控制函數的降噪量，顯然它比理論降噪量要低；(3)假定自適應控制演算法能夠收斂到穩定狀態，但所得到的降噪量並不等於基於控制函數的降噪量，它與演算法的穩態性能有關，依賴於控制器結構、演算法類型及控制器參數，如：收斂係數、濾波器長度、信號處理器字長等；(4)對於前饋系統來說，參考信號品質對實際降噪量將產生重要影響。具體地說，參考信號與初級噪音信號的相關性越高，自適應演算法就越接近於它的理想狀態。於是，實際降噪量就越接近由控制目標和演算法穩態性能共同決定的降噪量。

一個實際的主動控制系統是否能取得好的控制效果，關鍵有以下因素。

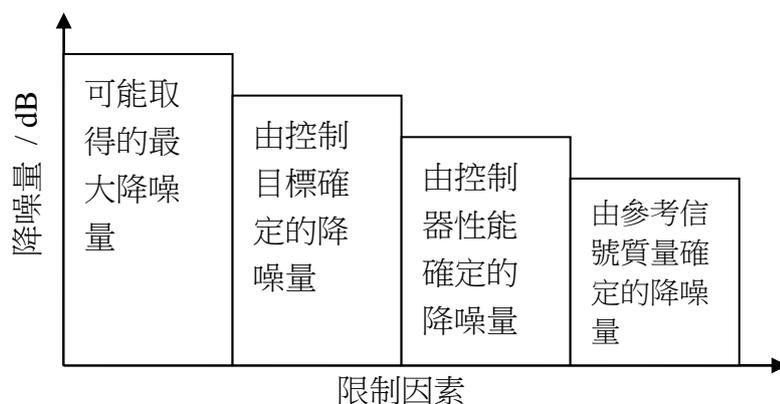


圖 2.1-8 主動控制中決定降噪量的因素^[4]

一、初級音源的類型和特徵

對於主動噪音控制，最合適的噪音源是集中參數噪音源（能簡化為點音源最好），它可以用儘可能少的次級音源獲得最大降噪量。對於主動力控制，初級結構的振動模態愈少愈好，這樣可以減少次級力源的數量，對優化布放位置也大有好處。從控制的角度來看，如果初級噪音是單頻噪音、離散線譜噪音或窄帶噪音，則控制系統更容易收斂到穩定狀態，而寬頻噪音的控制則要難得多。

二、次級音源和誤差感測器的位置和個數

為了獲得全局空間噪音能量的降低，最好的次級音源布放是它能夠從空間和時間上完全複製初級音場，也就是使次級音場成為初級音場的「鏡像」，而誤差感測器應儘量使實際的控制目標逼近理論上的控制目標。

三、參考信號及其品質

如果能夠獲得參考信號，我們就可以構造前饋控制器，反之，就只能採用回饋控制器。一般說來，前饋控制器結構簡單，易於保持穩定；回饋控制器的最大問題是容易造成系統不穩定，因此，回饋控制是最後一項選擇。好的參考信號應該儘量少受到噪音「污染」，與誤差感測器處的初級噪音保持最大程度的相關。

四、自適應演算法及控制器硬體

寬頻噪音的抵消效果、系統穩定性、控制器的複雜程度均與自適應演算法的類型有關。好的自適應演算法應該兼顧收斂性、魯棒性（robustness 穩(強)健性）和計算量三方面，控制器硬體設置以能夠即時地、準確地完成自適應演算法

為目標。主動控制的基本原理不但適用於噪音控制，而且可應用於控制振動、音場、電磁場等諸多方面，而新的應用領域正在不斷地發展和探索中。

2.2 主動噪音控制相關應用技術

20 世紀 90 年代以前，主動噪音控制中的次級源均為音源（一般為揚聲器）。因此，這種主動控制的方式又稱為主動聲控制，在有些文獻中被稱為「以聲消聲」。主動聲控制的應用場合一般包括：(1)管道音場；(2)自由音場（如：曠野中的變壓器噪音、電站噪音、交通噪音、抽風機、鼓風機等機械設備向空中輻射的噪音等）；(3)封閉空間音場（如：飛機、船舶艙室、車廂、辦公室、工作間中的噪音音場）。主動聲控制研究在 20 世紀 80 年代中期至 90 年代中期達到高潮，以英國南安普敦大學聲與振動研究所（ISVR）的 P. A. Nelson、S. J. Elliott 等人的研究最為出色。他們的研究以抵消螺旋槳飛機艙室噪音為主要應用背景。除此之外，還研究了封閉空間音場中存在結構-聲腔耦合的情況下主動控制規律、聲波通過彈性結構透射進入聲腔的主動控制、雙層結構主動隔音、分布音源控制結構聲輻射等^[4]。

2.2.1 自適應的主動噪音控制

20 世紀 80 年代以前，主動噪音控制系統中的控制電路均採用類比電路。隨著研究的深入以及研究領域的擴大，人們在應用這種電路時碰到了越來越多的困難，主要原因在於：(1)待抵消的噪音（初級噪音）特性幾乎總是時變的；(2)控制系統（控制器、初級感測器和誤差感測器）傳遞函數、消音空間中的一些非可控參數（如：介質物理參數等）經常隨時間發生變化（以上兩點要求控制器傳遞函數具有時變特性，而類比電路難以勝任）；(3)對於複雜的初級音源，以及謀求擴大消音空間時均要求採用多通道系統（指系統中包含多個次級音源和誤差感測器），這種控制器的傳遞函數十分複雜，用類比電路無法實現^[4]。

因此，需要一種具有自動追蹤初級噪音之統計特性，控制器特性可隨時間而變化的自適應主動控制系統。20 世紀 80 年代初，C. F. Ross 和 A. Roure 等人提出了具有「自適應」功能的主動控制系統。但這種「自適應」與目前指稱的自適應在基本原理和系統實現上均有根本差異。真正意義上的自適應主動控制是在自適應濾波理論得到充分發展以後提出來的。我們現在所說的自適應主動噪音控制系

統一般指的是將 B. Widrow 等人提出的自適應噪音抵消器 (Adaptive Noise Canceller) 用於主動噪音控制時構成的系統。

自適應主動噪音控制系統的核心是自適應濾波器和相應的自適應演算法。自適應濾波器可以按某種事先設定的準則，由自適應演算法調節其本身的系統特性以達到所需要的輸出。1981 年，J. C. Burgress 首次將自適應濾波理論應用於主動噪音控制，並對系統的構成及演算法作了電腦模擬研究，提出了著名的濾波-x LM5 演算法。

自適應主動噪音控制的主要研究內容包括：(1)控制方式（前饋控制和回饋控制）的選擇；(2)次級音回饋的影響及其解決辦法；(3)次級通路（主要指由次級源到誤差感測器之間的音傳遞通路）傳遞函數對系統性能的影響；(4)次級通路傳遞函數的自適應建模；(5)單通道自適應主動控制演算法瞬態和穩態性能分析；(6)多通道自適應演算法性能分析及快速實現；(7)不同目標函數下自適應演算法的改進；(8)自適應濾波的硬體實現。

上述研究內容完全是從信號與系統的觀點來處理控制器的相關問題。近年來，人們嘗試用經典或現代控制的方法研究主動控制問題，所構造的控制器能夠適應廣泛的外部環境，不僅僅限於自適應方式。讓人感興趣的是，這種方法對研究主動回饋控制也是方便和有利的。

2.2.2 管道的主動噪音控制

對於平面波音場的主動控制，如簡單地採用 Leug 專利中的辦法，可以發現會存在如下問題：(1)次級音源向管道下游發出音波的同時，將向管道上游傳輸音波，使得初級感測器在拾取待抵消信號時，同時拾取了次級音源回饋信號，造成系統的不穩定。這種現象稱為次級音回饋 (Acoustic Feedback)；(2)受電子線路頻率響應不理想的影響，消音頻帶受到限制；(3)管道中的氣流對降噪量的影響…等。為了解決這些問題，逐步發展了單極、偶極和多極管道主動噪音控制系統^[4]。

一、單極系統

單極系統指系統中僅包含一個次級音源，Leug 專利中的系統就是一個最簡單的單極系統。由於次級音回饋的影響，這個系統的穩定性極差，基本沒有實用價值。比較有代表性的單極系統包括 Chelsea 單極系統和緊耦合單極系統。

Chelsea 單極系統設計了電子網路補償次級音回饋，使得系統穩定性得到很大改善。不過，困難在於如何製成完全符合要求的補償電路。緊耦合單極系統中的初級感測器位於次級音源正前方，使得補償電路傳遞函數為-1。這樣，次級音源發出的音波成為初級噪音的「鏡像」。緊耦合單極系統的最大優點在於結構簡單，便於實現。不過，它對管道中的高階簡正波以及次級音源頻響特性的不理想非常敏感，這使得實際應用中難於控制系統的穩定性。

二、偶極系統

消除次級音回饋的另一種辦法是構造具有指向性的次級音源。這樣，次級音源就只向管道下游輻射音波。典型的偶極系統有兩種，一種系統用兩支特性相同的揚聲器作次級音源，初級感測器位於兩次級音源中間。這樣，在理想情況下，次級音回饋便被消除了。另一種偶極系統同樣用兩支特性相同的揚聲器作次級音源，不過在第一支揚聲器前插入移相器，使得在第二支揚聲器以左的音場中，兩支揚聲器產生的音波相位相反而抵消。此時兩支揚聲器組合成為一個單指向性次級音源。

三、多極系統

多極系統包含三個以上的次級音源，典型的有 Jessel 吸音器和 Swinbanks 多極系統。Jessel 吸音器用一個單極子和一個偶極子組成具有單指向性的次級音源。Swinbanks 多極系統非常複雜，它的次級音源陣一般由兩個以上的環形音源構成，每個環形音源又包含 4 支揚聲器。這樣安排次級音源之目的在於獲得單指向性，以消除次級音回饋。

由於一維管道中的音場模型較為簡單，利於觀察現象並分析物理機理，因而許多研究都從一維管道開始，並逐步拓展到三維空間。當音場頻率低於管道的截止頻率時，管道中僅有平面波傳播，此時可用單極子控制源將初級噪音向控制源上游反射，在控制源下游形成靜區 (Eriksson and Allie, 1988)。然而，被反射回上游的噪音將干擾參考麥克風，導致「次級音回饋問題」，此時可以用偶極子或者多極子音源作為控制音源來吸收初級噪音，而不是反射初級噪音 (Swinbraks, 1973; Poole and Leventhall, 1976; Eghtesadi and Leventhall, 1983) [1]。

如果管道中傳播的噪音包含高階模態，為進行有效控制，需要使用至少與模態數相同的控制通道數。另外，不同的控制策略也將影響控制效果，Zander 等比較了 5 種不同的控制策略：(1)使一個點的音壓幅度平方最小；(2)使管道中多點的

音壓幅度平方和最小；(3)使控制源下游多點的音壓幅度平方和最小；(4)使初級音源和次級音源的總輸出功率最小；和(5)使向次級音源下游傳播的音能量最小，結果表明使用最後一種控制策略時的控制效果最好（Zander and Hansen, 1993）^[1]。

數位電路系統與自適應控制技術的引入給管道主動消音器帶來了新的活力，取得了越來越好、越來越接近實用的實驗結果。目前在給定的管道音場條件下，得到了 20 Hz~1,000 Hz 頻率範圍內的靜態 20 dB 左右、動態 12 dB 以上的降噪量。目前的工作主要致力於汽車排氣消音器與集中空調送氣管道消音器中的應用^[5]。

2.2.3 三維（自由）空間的主動噪音控制

在對三維空間主動降噪的三極子次級音源和次級系統的信號饋給方式進行系統實驗研究的基礎上，使用時延、相移和放大器構成的前饋給控制類比電路，在 80 Hz~400 Hz 的頻率範圍內，得到了消音室 16 dB 以上、混響室 12 dB 以上的全空間八音階頻帶之降噪量。使用閉環數位電路進行的局部空間主動降噪實驗，也得到 500 Hz 以下頻帶 10 dB 以上的降噪效果^[5]。

自由空間的主動噪音控制可分為全空間降噪和局部降噪兩類控制方法。針對初級音源的控制可實現全空間降噪。Kempton 和 Martin 等將初級音源在一個或多個聲學中心進行泰勒級數或球諧函數展開，在這些聲學中心使用多極反相音源達到控制音場之目的（Kempton, 1976；Martin and Roure, 1997, 1998）。Hesselman 等將次級音源放置於初級音源旁邊，使初級音源和次級音源構成軸向四極子，達到降低遠場音壓之目的（Hesselman, 1978）。Nelson 等透過降低初級音源和次級音源的總輸出功率來達到控制音場之目的。他們發現為實現有效控制，初級音源和次級音源的距離應該小於噪音波長的 1/2（Nelson and Elliott, 1986）。在很多情況下，次級音源無法放在初級音源附近，因此可以選擇在局部區域產生靜區。^[1]

常見的局部靜區實現方式是將主動降噪技術與傳統的隔音牆結合。Ise 等將次級音源放置在隔音牆的邊緣，透過最小化隔音牆邊緣的音壓級來增加隔音牆的插入損失（Ise et al., 1991）。為達到有效控制，誤差麥克風的間距須小於波長的 1/2；次級音源越靠近初級音源，控制效果越好（Omoto and Fujiwara, 1993; Omoto et al. 1997）。Shao 等發現使用弧線形布放的次級音源陣列，可獲得比使用直線形次級音源陣列更好的控制效果（Shao et al., 1997）。除了與傳統隔音牆相結合，主動控制系統也可單獨使用。將次級音源陣列和誤差麥克風陣列布放於兩個平行平面

上，降低誤差麥克風處的音壓，可在誤差麥克風所在平面的背面產生大範圍的靜區，這樣的主動降噪系統被稱為主動式隔音牆（Active Noise Barrier, ANB）（Hodgson et al., 2003）。Guo 等指出當 ANB 系統中的誤差麥克風間距和次級音源間距為最優值時，可以獲得最大的靜區且初級音源和次級音源的總輸出功率最小（Guo et al., 1997b）。Epain 和 Friot 利用惠更斯原理，將 30 個誤差麥克風和 30 個控制音源分別布放在半徑為 0.3m 和 0.6m 的球形區域表面，透過降低誤差麥克風處的音壓來產生由誤差麥克風所包圍的球形靜區（Epain and Friot, 2007）。^[1]

根據惠更斯原理，多個點源之間的距離遠小於波長時，透過調節它們的幅度和相位可以合成任意形狀的波陣面。可以將一個參考信號麥克風和一個控制信號揚聲器組合構成一個噪音控制單元，多個單元相鄰布置在如：窗戶、窗簾之類的介面上。聲音通過這種聲學邊界時將會被削弱，這種系統被稱為主動聲遮罩（Active Acoustic Shielding, AAS），即所謂的通風隔音窗，如圖 2.2-1 所示。實驗表明在 500 Hz 和 2 kHz 的較寬頻率範圍內之降噪量可達 10 dB^[6]。

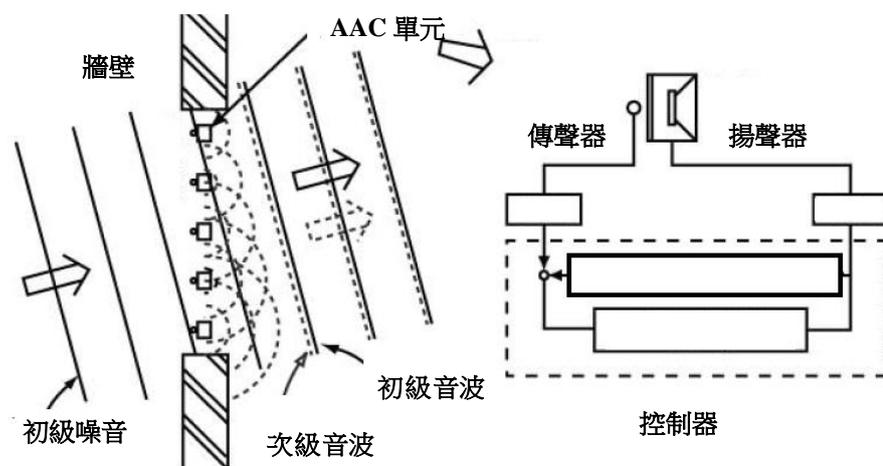


圖 2.2-1 主動聲遮罩（AAS）的基本原理圖^[6]

2.2.4 封閉空間的主動噪音控制

80 年代，人們集中更多的精力在封閉空間噪音場的主動控制。1988 年，馬大猷先生利用有界空間音場的響應總存在類似於矩形空間中三面相交的牆角這樣的特徵點，指出在這些點可以接收到和激發出所有的音場方式，而且音場在這些點的回應又總是極大，所以控制系統應該與這些點建立聯繫，把混響音場的簡正方式回應與控制系統作為一個整體考慮。以此為指導，建立了一套回饋控制系統，

並從理論上說明了只要能夠穩定地增大反饋回路控制電路的增益，就相當於增加了各個簡正方式的阻尼音場的回應就能得到抑制，實現封閉空間降噪。透過在系統中引入了一種數位自適應識別與補償電路，得到了 200 Hz 以下、帶寬 8 dB 左右的減音量。

按控制區域來劃分，封閉空間的主動噪音控制可以分為全空間控制和局部控制。當封閉空間尺度較小或噪音頻率較低時，空間內的模態密度較低，此時只要保證次級音源產生的模態能耦合初級音源產生的模態，便可獲得全域降噪，且初級音源與次級音源的距離對降噪效果影響不大（Nelson et al., 1985, 1988, 1990；Bullmore et al., 1987；Elliott et al., 1987；Joplin and Nelson, 1990）。然而在高模態密度的情況下，為獲得全域降噪，次級音源與初級音源的距離必須小於波長的 1/2（Nelson et al., 1987; Joseph, 1990），或將次級音源放置於牆角處以激發出足夠多的模態（馬大猷，1991, 1993；田靜，1996）^[1]。

虛擬隔音牆（Virtual Sound Barrier, VSB）是一種主動噪音控制系統，透過麥克風陣列和揚聲器陣列在嘈雜的環境中製造一個特定大小的安靜區域，如圖 2.2-2 所示。它就像一個聲學屏障，隔離了聲波，卻仍能保持空氣和光線的流通。它可應用到工業、醫學、室內等情形，降低一個或多個人頭附近的噪音等級。X. Qiu 等人在普通房間內實現了一個 16 通道的主動隔音牆系統，能在一個 0.2m 高、半徑為 0.2m 的圓柱體內達到 500 Hz 以內平均超過 10 dB 的降噪量^[7]。

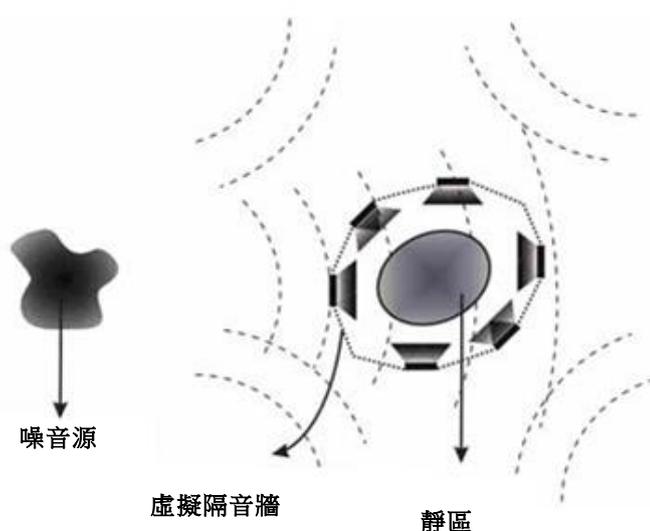


圖 2.2-2 虛擬隔音牆工作原理示意圖^[7]

封閉空間的主動控制應用主要在於汽車車內噪音主動控制。車內噪音的主動控制技術最早始於 1980 年代，英國的 Nelson 等人在封閉空間主動降噪理論研究和技術方面做了大量工作。1983 年，挪威的 T.Berge 在柴油車駕駛室內採用主動噪音控制。1984 年美國通用汽車公司的 J.Oswald 提出了第一個主動控制系統，用自我調整（自適應）主動降噪方法對柴油車的駕駛室進行研究。1988 年英國 Southampton 大學的 P.A.Nelson 和 S.J.Elliott 等人在 BAE748 雙發動機 48 座螺旋槳推進器飛機的機艙內進行了一次主動降噪研究領域規模最大、環境最複雜、技術水準最高的實驗，實驗結果充分證明了主動降噪技術應用於實際工程，尤其是封閉空間內的低頻噪音控制是完全可行的。英國 Lotus 汽車公司和日本 Nissan 公司等汽車公司在 1990 年前後開始在部分汽車上裝備主動降噪系統。1999 年美國 VAL 實驗室的 Jerome Couche 和 Chris Fuller 對福特汽車由發動機和路面引起的噪音進行了系統研究。2002 年西班牙巴倫西亞工業大學的 A.Gonzalez 和 M.Ferrer 等人不僅研究了前饋主動控制系統對汽車發動機噪音的控制效果，還研究了人們在降噪前後的心理反應。^[2]

2.2.5 主動吸音研究

主動消音就是根據兩個音波相消性干涉或聲輻射抑制的原理，透過抵消音源（次級音源）產生與被抵消音源（初級音源）的音波大小相等，相位相反的音波輻射，相互抵消，從而達到降低噪音之目的。它是對入射音波進行控制，而有別於主動消音的主動吸音方法是對反射音波進行控制，使入射音波的反射係數很小或接近於零，形成「黑洞」現象，從而使得吸音係數達到最大。研究主動吸音具有很實際的意義，是考慮潛艇等隱形化所必須研究的課題^[8]。

國外學者 D. Guicking、C. R. Fuller、D. Thenail 等人從 20 世紀 80 年代末、90 年代初對主動吸音進行了研究。D. Guicking、C. R. Fuller、D. Thenail 等人的研究是用一個揚聲器發出入射音波，在揚聲器的前方布置另外一個揚聲器，兩個揚聲器之間布置兩個麥克風作為感測器，兩個麥克風連接到聲阻抗控制器，使得主動吸音體表面的阻抗與空氣的阻抗相等，形成「黑洞」現象，入射音波不反射，從而達到主動吸音之目的。其基本原理如圖 2.2-3 所示。

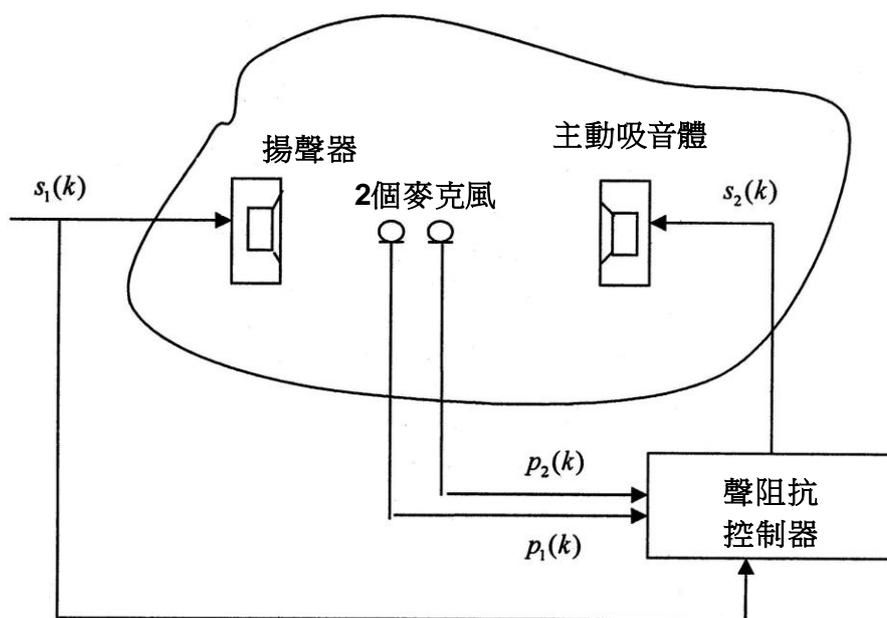


圖 2.2-3 國外主動吸音原理示意圖^[8]

Jaehwan Kim 和 Joong-Kuen Lee 在 21 世紀初提出了一種新的主動吸音方法，主動吸音方法布置如圖 2.2-4 所示。

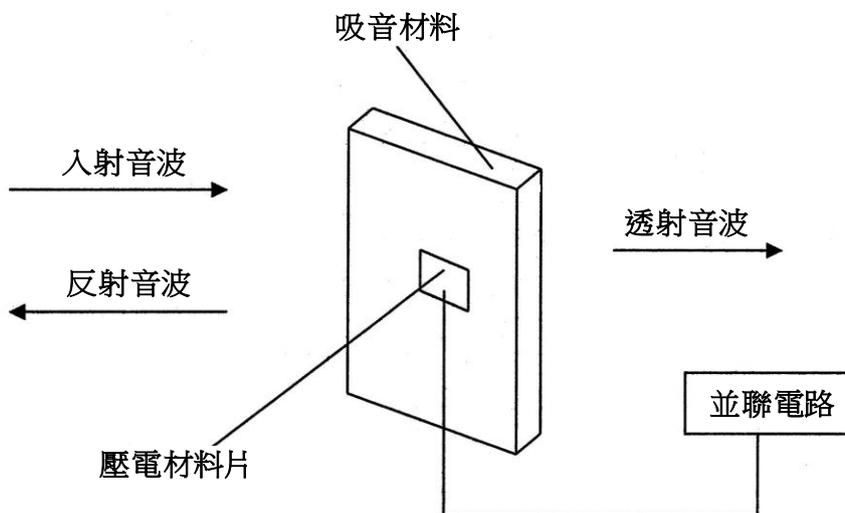


圖 2.2-4 一種新的主動吸音方法布置示意圖^[8]

在上圖的主動吸音布置圖中，當中高頻音波入射時，依靠吸音材料進行被動吸音，而當低頻音波入射時，吸音材料彎曲變形，引起壓電材料片的壓電效應，壓電材料片表面形成電荷，該電荷通過並聯電路被消耗，使得入射音波的聲能轉化為電能，從而達到主動吸音之目的。

2.2.6 討論

主動降噪技術作為重要的噪音消除手段，具有很多被動降噪無法媲美的優勢，也決定了這項技術在噪音控制領域的光明前景。隨著經濟技術的發展，人民生活水準的提高，噪音污染將得到更多的重視，主動降噪技術將會獲得更多應用。

同時也需要看到，一方面對於汽車、火車乃至更為複雜的噪音背景，主動降噪技術仍然有很多待研究的課題和待提升的空間；另一方面高昂的成本仍然制約著這項技術的推廣和應用，如何在更低的成本下實現更加契合使用場景的降噪效果將伴隨著這項技術的發展全程。

總之，隨著技術的發展和市場的成熟，主動降噪技術的適用範圍將越來越寬泛，性能將越來越優異，使用將越來越智慧便捷，能耗將越來越低；也將會有更多的消費者能夠以親民的價格享受新技術帶來的便利。同時伴隨著智慧終端機的發展，主動降噪技術可能會迎來新的機遇和契機。

可以暢想在不久的將來，在人們生產、生活的各個環節中，主動降噪技術將會給人們營造出更多無污染的純淨空間：在汽車、火車、飛機等交通工具中；在建築、製造業的現場與辦公室中；在溫馨寧靜的臥室、醫院病房中；在戴上耳機享受曼妙音樂的旅程中，主動降噪技術將會帶給使用者全新的體驗。^[2]

2.3 自然通風窗實施主動聲音傳播控制

隨著城市化發展的加快及經濟生活水準的提高，城市交通量變大，隨之而來的是越來越嚴重的交通噪音污染，令人煩躁的噪音會嚴重影響生活品質，甚至引發疾病（Kempen et al., 2010; Hong et al., 2010）。為降低進入建築物內部的交通噪音，目前常用的方法是在道路兩邊設置隔音牆，但隔音牆對音影區的平均降噪量一般只有約 10 dB~15 dB；而對於高樓層建築，隔音牆幾乎沒有降噪效果（Watts, 1996; Godinho et al., 2001; 賈猛虎, 2005; 王季卿, 2007）。對於外界噪音主要是通過窗戶進入建築物內部這種情況，增加窗戶隔音量可有效降低室內噪音。最簡單和直接的辦法是使用多層玻璃窗戶且將窗戶完全關閉，可以獲得約 40 dB~50 dB 的降噪量（Fuller, 2007）。在實際情況中，常須將窗戶打開以滿足正常的通風需求，此時外界噪音亦可通過開著的窗戶進入室內，因此降噪效果大幅降低。通風隔音窗指一種既能夠滿足室內通風需求，又能夠有效降低室內噪音的窗戶。按照通風方式不同，又可分為機械式強制通風和自然通風兩大類^[1]。

2.3.1 近年各國主動控制隔音窗之進展

針對通風窗噪音控制的問題，學界與業界做過許多嘗試，希望能發展出一種既具良好減音性能，又能充分通風提供新鮮空氣的適宜通風窗系統。早在 1973 年，Ford 和 Kerry 便針對通風窗開口對隔音量的影響做了研究。他們發現，雙層玻璃部分開啟時，隔音效果比同樣部分開啟的單層玻璃好 10 dB(A)，且雙層玻璃即使開啟 100mm，其隔音能力仍與單層玻璃關閉時差不多^[9]。1998 年，Field 和 Fricke 證明，不同長度的 1/4 波長諧振器可用於建築外部的通風開口，以減少廣泛頻率範圍的噪音傳進建築物。在某些 1/3 八音階頻帶，此一方法的減音效果約為 7 dB^[10]。

2005 年，Kang 和 Brocklesby 研發出一種交錯式窗系統 (Staggered Window System)。在這套窗系統中，間隔式雙層玻璃窗的窗扇開啟呈交錯狀，以建立自然通風路徑和防止直接音傳播，同時沿著通風路徑裝設透明微孔吸音板，以降低外部噪音^[11]。他們發現，此一方法可有效降低頻率 500 Hz 至 8,000 Hz 的外部噪音。然而在低頻範圍，交錯式窗系統的減音性能便不甚令人滿意。2009 年，Yuya 等人藉由優化輸入/輸出開口位置和輸入範圍，提出了一種隔音平開窗 (Casement Windows) 模型^[12]。

2013 年，Tong 和 Tang 在半消聲室中，利用 1:4 縮小比例模型，研究建築牆面裝設靜壓式通風窗對非平行線性音源之插入損失 (Insertion Losses)。他們發現，此一方法的插入損失約為 5 dB~18 dB，實際數值則視不同的取向狀況而定^[13]。二年後，他們又在香港一條交通繁忙的幹道附近，利用與香港一般公共住宅同尺寸的兩間同式模型試驗室，進行全尺寸現場測量，其中一間裝設靜壓式通風窗，另一間則裝設傳統的側吊式平開窗。他們並比較了 4 種不同的房間內部擺設情況。試驗結果顯示，以靜壓式通風窗取代側吊平開窗所達成的隔音效益約為 7.1 dB(A)~9.5 dB(A)^[14]。

在低頻範圍，被動式通風窗的隔音性能通常很差。為解決此一問題，學界提出主動式噪音控制 (ANC) 技術。2002 年，Zhang 等人提出檢驗參考信號 (Reference Signals) 與誤差信號 (Error Signals) 之相干性的模型^[15]。2005 年，Ise 在一個開啟的通風窗上設置 16 個獨立的單通道 ANC 系統，以反射傳入的外部噪音。在 200 Hz 至 700 Hz 的範圍內，此一方法在誤差傳感器上達到超過 10 dB 的減噪效果^[16]。2011 年，Qiu 等人報告了當時 ANC 自然通風窗的研究進展^[17]。

全世界許多研究人員都曾做過或正在從事相關領域的研究。下文概述 8 個國家或地區近年來的相關研究，以說明當前的進展方向。

2.3.2 日本

過去近十年裡，日本鳥取大學（Tottori University）Masaharu Nishimura 教授和他的團隊一直在研發主動聲屏蔽（Active Antenna System, AAS）系統。2008 年起，他們幾乎每年都在國際噪音控制工程會議（Internoise Conferences）報告研究進展^[18]。AAS 系統包含許多排成陣列的同式 AAS 單元。圖 2.3-1 顯示 AAS 應用於開啟通風窗以控制聲傳播的基本概念和 AAS 單元示意圖。

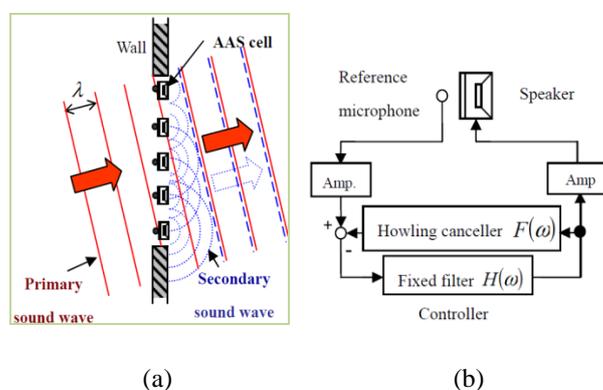


圖 2.3-1 日本：(a) AAS 基本概念；(b) AAS 單元示意圖^[18]

每個 AAS 單元都是一個簡單的前饋式主動控制系統，在儘可能接近次級音源的前方，都設有一個參考麥克風（Reference Microphone）。控制濾波器（Control Filter） $H(\omega)$ 為離線設計，作用為消除 AAS 單位前方的聲波，嘈雜聲補償濾波器（Howling Compensation Filter） $F(\omega)$ 的作用則在降低從次級音源回傳至參考麥克風的聲反饋（Acoustical Feedback）。由於參考麥克風和次級音源近於並列，同一控制濾波器應可控制來自不同方向的入射聲^[19]。研究團隊將一個包含 4 個 AAS 單元的小型 AAS 通風窗（250mm×250mm）裝設於消聲室的門上。測量結果顯示，AAS 通風窗可有效降低 500 Hz 至 2,000 Hz 範圍內的隨機入射噪音傳播。這項研究的挑戰是，面對實務上的大型通風窗，將需要裝設大量 AAS 單元，因此需要發展新的分散式控制器及相關演算法^[20]。目前研究團隊正利用 FPGA（Field-Programmable Gate Array，現場可程式化閘陣列）來發展控制硬體，以縮短系統延遲時間。

2.3.3 新加坡

新加坡有兩個團隊正在進行通風窗實施主動聲傳播控制的相關研究，其經費來源分別為新加坡國家發展部（MND）和國家研究基金會（NRF）。一個團隊由新加坡南洋理工大學（NTU）的 Woon Seng Gan（顏允聖）博士領導，專注於開敞通風窗多通道 ANC 系統的發展。另一個團隊則由新加坡科技研究局（A*STAR）所屬材料及工程研究院（IMRE）的 Kui Yao 博士領導，專注於針對 ANC 及被動噪音緩解，發展透明壓電膜揚聲器（Piezoelectric Film Speakers）和高性能多孔材料^[21-25]。圖 2.3-2 顯示根據聲類別選擇的開敞通風窗 ANC 系統、在 NTU 建造的 8 AAS 單位開敞通風窗 ANC 系統及 IMRE 針對 ANC 研發的透明壓電膜揚聲器。NTU 團隊與日本的 Masaharu Nishimura 教授和英國的 Steven Elliott 教授合作，在 AAS 系統之分散式多通道前饋 ANC 演算法方面，投入相當多的心力^[21-25]。

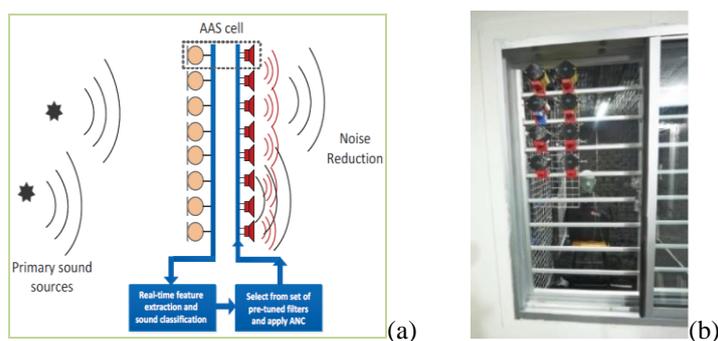


圖 2.3-2 新加坡：(a)開敞通風窗 ANC 系統示意圖^[21]；
(b)8 AAS 單元開敞通風窗 ANC 系統^[25]

根據目前最新進展報導，南洋理工大學研發噪音消除設備，未來只需安裝在窗戶上，無需關窗就能把噪音減半，讓住戶享有寧靜又通風的室內空間，從而減少使用冷氣。上述噪音消除設備採用「主動噪音控制（Active Noise Control）」科技，產生與噪音頻率相同，但相位卻是相反的聲波，借由兩種聲波產生抵消噪音的作用。目前這種科技也使用在一些品牌的轎車音箱和抗噪耳機，研究團隊加以改造，讓它適用於規模更大的空間。這個設備目前還處於原型階段，相信是全球首個在完全打開窗戶的情況下也能減低噪音的設備。^[35]

根據初步設計，該設備體積像一個迷你藍牙音箱，一般房屋單位的窗戶，安裝 24 個噪音消除設備就能有效地減少 50% 的外部噪音進入室內。目前，製造一個噪音消除設備的費用需要新加坡幣 15 元至 20 元，不過負責這項研究的南大電機

與電子工程學院以及資訊通訊科技中心主任顏允聖說，日後大批生產將會降低成本價。這個四人研究團隊花了三年時間才成功研發出原型，目前已花了 50 萬元，主要是花在聘用研究員方面。研究團隊接下來也會與政府機構合作，繼續改進設備，有望兩三年後在商業和住宅區展開測試。除了力求讓設備更輕巧和更符合經濟效益，團隊日後也會與窗戶製造商合作，把噪音消除設備融入窗戶，讓窗口更美觀。^[35]

此外，該設備未來也能識別不同的噪音，確保不是所有聲音都被消除，例如：警報聲。同時，設備日後也可能連接到手機應用，讓住戶隨意選擇想消除的反覆性噪音，如：繁忙的街道、地鐵軌道以及附近建築工地發出的噪音。此項目是與英國南安普敦大學(University of Southampton)和日本鳥取大學(Tottori University)共同研發，由土地與宜居國家創新挑戰計畫(Land and Liveability National Innovation Challenge, 簡稱 L2NIC)資助。L2NIC 是由國家發展部與國立研究基金會於 2013 年推出，為獲選的科研項目提供資助，以助新加坡更好地應對人口增長及土地有限的挑戰，協助打造更宜居的生活環境。^[35]

2.3.4 香港

香港理工大學(HKPU) Shiu-Keung Tang 教授針對近年為承受嚴重交通噪音之城市高樓研發自然通風噪音控制裝置的進展，進行了檢討。他的研究發現，由於城市混響現象，突出設計(如：陽台、窗楣和簷片)通常效果不大^[26]。靜壓式通風窗和其他有利交錯空氣進出的類似雙壁靜壓結構，是很有用的自然通風致能噪音控制設計。他們採用 ANC 來改善靜壓式通風窗的減音效果^[27]。研究團隊並進行一系列試驗，以瞭解建置 ANC 系統將如何影響靜壓式通風窗的聲傳播。在他們進行的 3 通道 ANC 試驗中，主音源是放置於音源室地板上的 6 吋揚聲器，次級噪音控制揚聲器則被固定於接近通風窗室外開口處。研究團隊並探討了次級噪音控制揚聲器相對於靜壓箱的取向與位置，和接收室內混響對主動噪音控制性能的影響。圖 2.3-3 顯示在配置傢俱的試驗室內進行靜壓式通風窗現場全尺寸聲傳播試驗的照片和試驗設置。

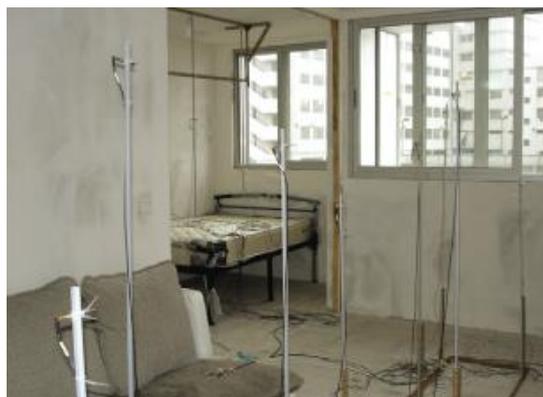


圖 2.3-3 香港：配置傢俱試驗室照片^[27]

2.3.5 中國

中國南京大學的研究團隊 2010 年開始研究應用 ANC 技術於靜壓式通風窗的可行性^[28]。圖 2.3-4 顯示研究團隊在現場試驗時的設置和原型窗^[29]。原型窗安裝於一個玻璃房（2.0m 長×2.5m 寬×2.5m 高）。玻璃房的內牆鋪有吸音材料，以降低房間內部的混響現象。整個原型平開窗（1.1m 寬×0.6m 高）分為左、中和右三部分。原型窗有兩層玻璃，間隔 0.1m。中間部分無法開啟，左右兩部分則可交錯開啟，以建立自然通風路徑。中間窗分為上下兩個部分，每個部分可被視為分離的通風道。原型窗採用兩個分離的單通道 ANC 系統，每個通風道的參考麥克風設在通道入口處，控制揚聲器則設在通道出口處。誤差麥克風設在原型窗的右邊牆壁上。2.3-4(c)顯示開啟或關閉 ANC 時誤差麥克風處的音壓位準。圖中顯示所獲得的寬帶控制超過 12 dB，有效頻率高達 800 Hz。

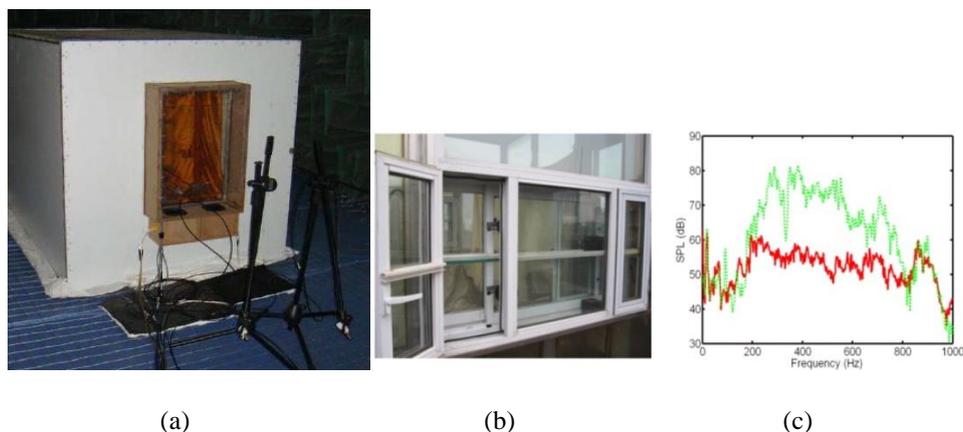


圖 2.3-4 中國：(a)試驗設置照片^[29]；(b)原型自然通風 ANC 窗；(c)ANC 啟動（紅色實線）或關閉（綠色虛線）時誤差麥克風處的音壓位準^[28]

2.3.6 法國

法國的 TechnoFirst 公司與法國環境暨能源管理署 (EEMA) 合作 (2011 年開始)，研發一種自然通風主動雙層玻璃窗^[30]。研究團隊針對兩種配置進行研究。在第一種配置中，他們將揚聲器整合於窗框內，藉由通風窗開口直接消除入射聲，此種配置的噪音控制有效頻率範圍為 500 Hz 以下。第二種配置是一套 ANC 靜壓式通風窗系統，其有效噪音消滅頻率範圍高達 1,700 Hz。圖 2.3-5 顯示主動通風窗 (Active Window) 及主動通風窗配置的試驗台照片。

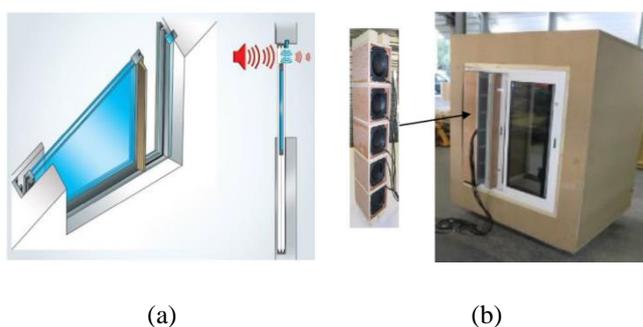


圖 2.3-5 法國：(a)主動通風窗配置示意圖；
(b)主動通風窗配置試驗台照片^[30]

2.3.7 韓國

韓國科學技術院 (KAIST) Youngjin Park 教授的研究團隊針對建築物內部空間未裝設傳感器和控制音源的開啟通風窗，建議一套 ANC 系統^[31]。研究團隊在一個比例模型房間 (1.45m×1.2m×1.2m) 內裝設開啟通風窗 (0.3m×0.3m)，進行比例模型試驗。模型外部設置 8 個揚聲器，柱形通風道從揚聲器延伸至控制音源的位置。

如圖 2.3-6(a)所示，控制音源均勻分布於通風窗的邊緣。圖 2.3-6(b)顯示主動噪音控制系統略圖。這套系統採取一種前饋控制機制，無須為實用性裝設誤差傳感器。噪音控制器的控制係數係運用 Rayleigh 積分方程和格林函數 (Green's function) 離線理論計算得出。

主動通風窗系統的減音性能藉由方向性外部噪音得到驗證。驗證過程中，入射聲的方向係利用參考傳感器的接收信號估算得出。試驗結果顯示，所建議的系統在 400 Hz 至 1,000 Hz 頻率範圍內，平均噪音消滅可達到 10 dB。

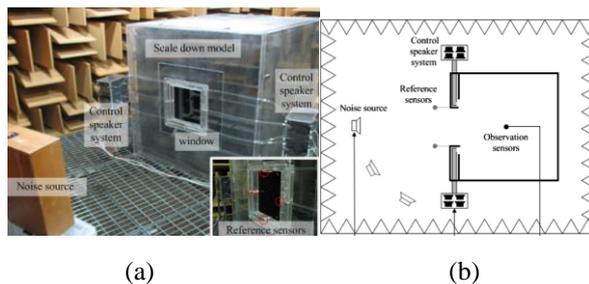


圖 2.3-6 韓國主動通風窗系統試驗設置：(a)試驗設置照片；
(b)主動噪音控制系統略圖^[31]

2.3.8 德國

德國漢堡聯邦國防軍大學 (Helmut Schmidt University of Germany) Delf Sachau 教授和他的團隊執行一項由德意志銀行 (DBU) 出資的產學聯合計畫，運用適應式噪音阻隔器，改善居家及工作環境的品質^[32]。如圖 2.3-7 所示，一套多通道前饋 ANC 系統 (包含：1 個參考傳感器、8 個次級音源和 14 個誤差傳感器) 被用來阻隔噪音經由開啟斜窗傳入室內。

在消聲室中，通風窗的尺寸為 0.91m×0.91m，主音源是一個設置於距離窗戶約 3m 的揚聲器。研究團隊針對不同的系統元件配置做試驗。結果發現，誤差傳感器位置對於噪音控制表現非常重要。在 100 Hz 至 1,000 Hz 的頻率範圍內，這套系統的平均寬頻減音可達 13 dB。

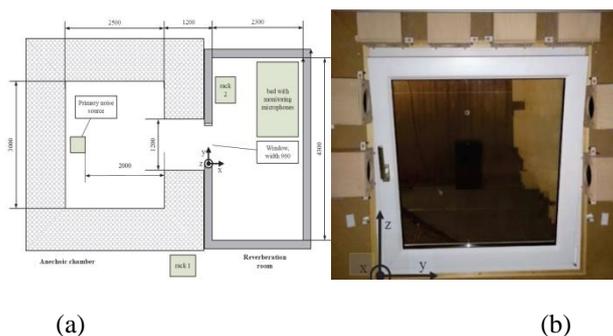


圖 2.3-7 德國：(a)聲傳播實驗室平面圖；
(b)斜窗搭配適應式噪音阻隔器配置照片^[32]

2.3.9 西班牙

西班牙加泰羅尼亞理工大學 (Universitat Politècnica de Catalunya) Romeu 教授和他的團隊於 2014 年對有限開啟底鉸鏈窗實施主動聲傳播控制進行試驗^[33]。

研究團隊利用單入單出系統 (single-input single-output system) 來消減飛機越過機場附近一棟民宅時，經由外牆部分開啟通風窗開口傳入的聲傳播。他們發現，在低頻範圍內 (100 Hz 至 125 Hz 之 1/3 八音階頻帶)，運用主動消音可有效降低噪音約 3 dB。

此一設計可大幅恢復因通風窗部分開啟而造成的隔音效果損失。在某些頻率上，誤差信號與參考信號的相干性不佳，加上折疊鉸鏈窗開口處的複雜幾何關係，限制了這套系統的性能。圖 2.3-8 顯示民宅中試驗通風窗和房間的位置，以及主動通風窗和 ANC 系統的略圖。

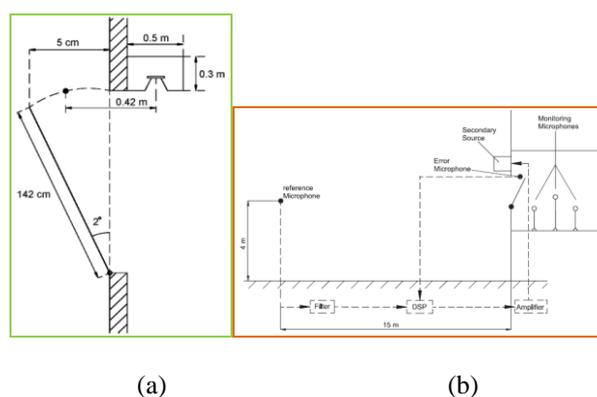


圖 2.3-8 西班牙：(a)主動通風窗略圖；(b)主動噪音控制系統略圖^[33]

2.3.10 討論

近年來自然通風窗實施主動聲傳播控制研究的進展大致可分為兩類。第一類為直接控制通風窗開口聲傳播，亦即在通風窗開口處或其邊緣裝設次級音源，以控制開口處的聲傳播。日本及新加坡研發的 AAS 通風窗、法國的主動通風窗配置、韓國、德國及西班牙的相關研究，都屬於這一類。AAS 通風窗將次級音源裝設在開啟式通風窗 (Opening Windows) 的通風路徑上，以大型通風窗為適用目標。其他研究則是將次級音源裝設在通風窗開口處或其邊緣，以小型開口為適用目標，例如：小型通風窗的開口或部分開啟的通風窗。這類系統的優點為安裝簡易和高通風率。然而，這類系統在中頻至高頻範圍性能不佳，且潛在成本偏高。

第二類則是 ANC 靜壓式通風窗。這類系統在開啟式通風窗改裝的靜壓式結構上採用 ANC。香港及中國的相關研究和法國的主動迷宮結構，都屬於這一類。ANC 靜壓式通風窗在系統中同時採用被動和主動噪音控制方法。其中，靜壓箱 (Plenum Chambers) 在中頻至高頻範圍發揮減音效果，同時提供相當程度的自然通風。ANC 元件可以衰減經由靜壓箱傳播的低頻噪音元素。靜壓箱將原來的三維自由空間聲場問題轉化為單維聲通道問題或低階聲腔問題。因此，ANC 應用不僅更能有效減音，成本也較低。然而，這類系統的缺點為結構複雜，且換氣率略有減損。

目前為止，針對良好隔音自然通風窗的問題，業界尚無成熟而實用的解決方案。許多問題仍有待解決，才能推出可望成功商品化的 ANC 自然通風窗產品。首先，控制音源的尺寸需要縮小，且需要具合理良好低頻響應性能的輕巧而有效的揚聲器系統。其次，主動控制系統的堅固性和性能須要提升，以使得系統在各種情況下（例如：強風、豪雨和雷陣雨），均能發揮良好的減音性能。最後，控制音源和系統的成本須要降低，以利量產市場和建築業的接受度。由於因果性的要求，前述兩類系統都必須做到短延遲 AD/DAS (直連式儲存 Direct Attached Storage) 和強大 DSP (數位訊號處理 Digital Signal Processing) 或 FPGA (現場可程式邏輯閘陣列 Field Programmable Gate Array)。為達降低成本要求，可能需要特殊設計晶片。

就第一類的 AAS 系統而言，所面臨的挑戰是大型通風窗需要許多通道，導致實際應用的可行性降低。未來的研究方向可以聚焦於發展密實的分散式多適應性 ANC 控制器，以及了解多向入射聲系統的機制和物理性。在某些應用中，將次級音源裝在通風窗開口中央，執行上可能會有困難，因此，僅在通風窗開口邊緣裝設次級音源，似乎是較為務實的做法。研究發現，當次級音源裝設於開口邊緣時，全面有效控制噪音會面臨有頻率上限的問題，因此，可能有必要為 ANC 通風窗裝設窗格，將大型通風窗分割為若干較小的窗格，如此便可將次級音源裝設在窗格的邊框上。目前，ANC 靜壓式通風窗似乎是最實用的解決方案。它們的性能已得到驗證，多套原型系統已成功示範。儘管仍需要更多試驗才能做出更成熟的產品，但這套系統的真正挑戰仍在於行銷和成本。

本計畫蒐集近 5 年來自然通風窗實施主動聲傳播控制的進展。ANC 靜壓式通風窗能以合理的成本提供寬頻噪音控制，是最接近需求的應用。將 ANC 直接應用於通風窗或其開口雖仍須要進一步研究，但在這類通風窗上設計窗格或許是個解決方案^[34]。

第三章 彙整研析各類型通風隔音窗理論模型設計參數與數值模擬資料

3.1 自然通風主動隔音窗的理論模型

本研究運用耦合空間理論，先建立低頻音在自然通風窗中傳播的模型，然後引入主動（有源）噪音控制方法，以獲得自然通風主動隔音窗的完整理論模型。

3.1.1 引言

為研究空間內的音場分布和聲音衰減等，常用方法有幾何聲學法（Kuttruff, 1973）、波動理論法（Morse and Blot, 1994）、音線追蹤法（Pu et al., 2011）和統計能量分析法（Heckl, 1992）等。幾何聲學法適用於中高頻音場計算，且空間尺寸須遠大於聲波波長。在波動理論法中，音場被看作是正交模態的疊加。當空間形狀是方形、三角柱形或者圓柱形時，波動方程式存在封閉解。當空間形狀不規則時，無法得到波動方程式的封閉解，此時一般透過數值方法求解波動方程式。音線追蹤法和統計能量分析法透過數值方法來預測聲音在複雜形狀空間的傳播與衰減過程（Kuttruff, 2009；Meissner, 2007）。

本研究所述自然通風窗是指將雙層玻璃窗戶的內外開口錯置，使窗戶內外開口和窗戶內部形成一個 S 形通道。噪音和氣流都將通過這個 S 形通道從建築物外部進入建築物內部。為實施主動降噪，首先需得到窗戶和房間內的音場分布，包括：音壓幅度和相位。幾何聲學法、音線追蹤法和統計能量分析法都未考慮聲音的干涉，這樣計算所得音場缺少相位資訊，因此它們無法滿足本研究需求。有限元（Finite Element Method, FEM）和邊界元（Boundary Element Methods, BEM）等數值計算方法，計算量大，當計算頻率稍高時（例如：本研究的 600 Hz），甚至存在無法收斂的情況，故也不能完全滿足本研究的需求。

因此，本研究採用波動理論法對窗戶和房間內的音場進行求解。窗戶和房間都簡化成規則的矩形空間，窗戶通過內開口與房間進行耦合，因而窗戶和房間可以當作耦合空間進行處理。利用耦合空間的聲學理論，可以對其音場進行求解（Mittra and Lee, 1971；Åbom, 1990）。

首先需要定義該耦合空間的激勵源，即通過窗戶外開口進入窗戶內部的噪音源。該問題可歸納為有限大空間與無限大自由場的耦合，一種常用的方法是使用

虛擬音源。Kropp 和 Bérillon 透過將建築物陽臺的開口分割成多個矩形單元，將每個單元視為一個虛擬音源，研究了當建築物外部存在一個點音源時，陽臺內的音場分布 (Kropp and Bérillon, 1998)。Ögren 和 Forssén 透過將城市街道與頂部天空的交界面分割成矩形虛擬音源，研究了城市街道內的聲傳播 (Ögren and Forssén, 2004)。Nishimura 等採用了一種更為簡單的方法，他將窗戶外開口視為一個振動活塞，且把窗戶當作封閉空間進行處理，以此來求得窗戶內部音場 (Nishimura et al., 2009)。

由於本研究不考慮建築物外部的噪音變化情況，因此使用一個半無限長的波導管來模擬外部空間。當該波導管的截面面積和窗戶外開口的截面面積相等時，此方法與 Nishimura 的方法類似。當該波導管的截面面積無限大時，該模型與 Kropp 和 Bérillon 所研究的情況類似。所以此方法可看作是 Kropp 和 Nishimura 所用方法的折衷。不同於虛擬音源法需要考慮多個音源，本研究的近似方法只需要考慮一個音源，因而在保證計算精度的前提下，其計算量比虛擬音源法要低；而在相當的計算量下，其計算精度高於 Nishimura 的簡化模型。

本研究使用模態展開法求解自然通風窗和房間所等效成的 5 空間耦合系統內的音場 (Mittra and Lee, 1971; Åbom, 1990; Lee and Lee, 2007; Li and Hanson, 2005; Jean, 2009; Glav et al., 2004)，此方法曾被廣泛用於分析消音器的插入損失 (Åbom, 1990; El-Sharkawy and Nayfeh, 1978; Glav et al., 2004)。首先將每個空間內的音場用模態疊加的型式給出，然後利用激勵源條件、空間邊界條件和相鄰空間的音壓和體積速度連續性條件，經推導得到當激勵源為平面波或者點音源時，表徵該耦合空間內音場的線性方程組。透過求解該方程組，便可得該耦合空間內音場分布。

最後，利用理論模型計算出初級音場和次級音源至誤差麥克風（傳聲器）的傳遞函數，將其應用於主動噪音控制方法中以求出次級音源的最優源強，進而求得優化的次級音場。將其與初級音場相加，得到控制後的總音場，至此便建立了自然通風主動隔音窗的完整理論模型。

3.1.2 自然通風窗的低頻音傳播模型

所述之自然通風窗如圖 3.1-1 所示。外界噪音和氣流可以從窗戶外開口 (Source Side Opening, SSO) 進入窗戶內部，然後通過窗戶內開口 (Receiver Side Opening, RSO) 進入室內，如圖 3.1-1(b) 中虛線箭頭所示。

3.1.2.1 模型建立

自然通風窗近似模型的截面如圖 3.1-2 所示。RSO 和 SSO 分別被視為一個小空間，整個系統被近似成一個由 5 個空間耦合的結構。由於窗戶和道路之間的距離通常都等於或大於幾個波長，且在低頻範圍內 ($\leq 600 \text{ Hz}$)，窗戶開口的最長邊邊長通常都在不超過一個波長，因此為簡便起見，從空間 V_1 入射的聲波 P_0 假定為正入射的平面波。

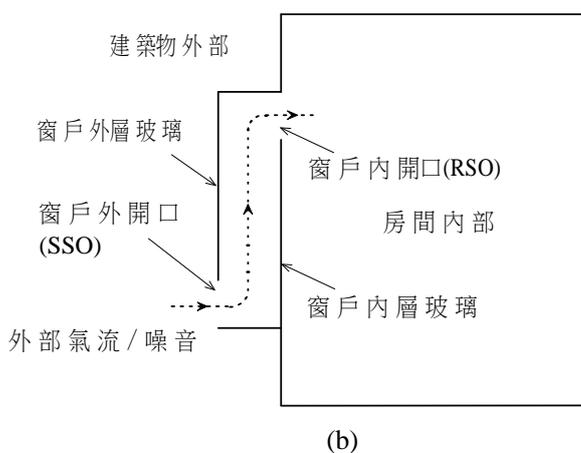
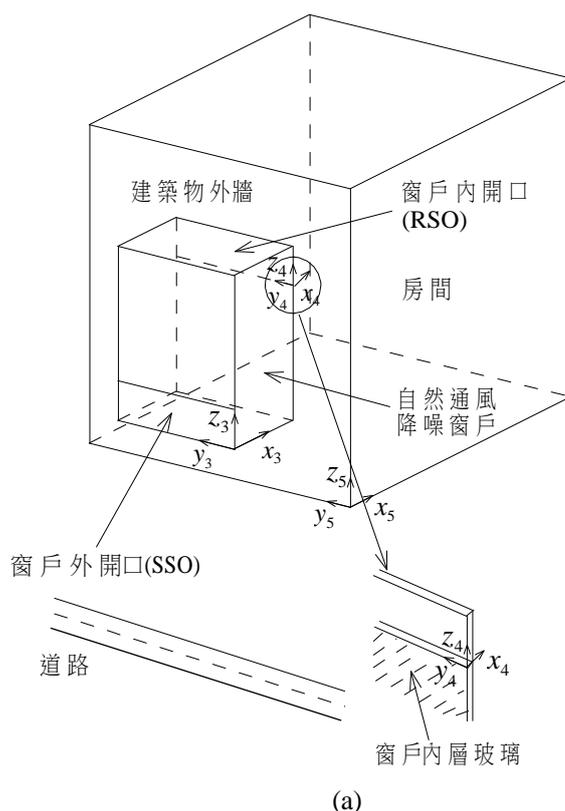


圖 3.1-1 自然通風窗示意圖：(a)3D 示意圖；(b)截面圖
(圖中帶箭頭的虛線即為外部氣流和噪音進入建築物內部的路徑)

將圖 3.1-2 中假設的半無限長波導管、SSO、窗戶內部空間、RSO 和房間依次標記為空間 V_1, V_2, V_3, V_4 和 V_5 。為使下面的公式推導過程更為簡潔，在每個空間內建立一個對應的坐標系。坐標系 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 在圖 3.1-2 標出，坐標系 (x_3, y_3, z_3) 、 (x_4, y_4, z_4) 和 (x_5, y_5, z_5) 在圖 3.1-1(a) 中標出。需要注意的是，這 5 個坐標系並不是相互獨立的。將經過每個坐標系原點的 y - z 平面分別標記為平面 A、B、C、D 和 E。平面 F 與房間後牆重合，如圖 3.1-2 所示。每個空間沿 x 軸、 y 軸和 z 軸的長度分別用符號 L_x 、 L_y 和 L_z 表示。在整個音場求解過程中，所有空間的壁面都假設為聲學剛性。

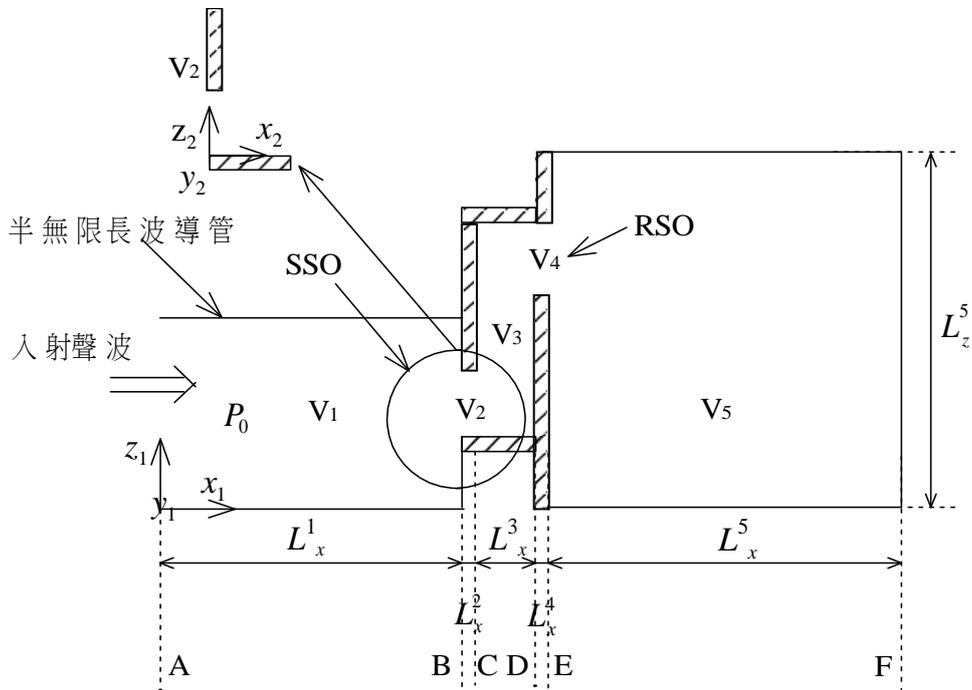


圖 3.1-2 自然通風窗之低頻音傳播模型的截面圖

3.1.2.2 初級音場

將每個空間內的音場都以模態疊加的方式給出。對於第 l 個矩形空間，其內部某點 (x_l, y_l, z_l) 處的音壓運算式為（省略時間因數 $\exp(j\omega t)$ ）

$$p_l^p = p_l^i + p_l^r = \sum_{m_l=0}^{\infty} \sum_{n_l=0}^{\infty} \phi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) \begin{bmatrix} P_{i_l}^{m_l n_l} \exp(-jk_{x_l}^{m_l n_l} x_l) \\ + P_{r_l}^{m_l n_l} \exp(jk_{x_l}^{m_l n_l} x_l) \end{bmatrix}, \quad (l=1, 2, \dots, 5) \quad (3.1.1)$$

式中： p_l^i 和 p_l^r 分別為空間 V_l 內，沿 x 正方向和負方向傳播的聲波。 $P_i^{m_l n_l}$ 和 $P_r^{m_l n_l}$ 是空間 V_l 內模態 (m_l, n_l) 的模態幅度。 $\phi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l)$ 是空間 V_l 內模態 (m_l, n_l) 的特徵函數。對於剛性壁面的矩形空間 V_l ，其運算式為：

$$\phi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) = \cos\left(\frac{m_l \pi}{L_y^l} y_l\right) \cos\left(\frac{n_l \pi}{L_z^l} z_l\right) \quad (3.1.2)$$

式中： L_y^l 和 L_z^l 分別為空間 V_l 的寬度和高度。

當 $P_i^{m_l n_l}$ 和 $P_r^{m_l n_l}$ 為實數時， P_l^i 和 P_l^r 的傳播方向與 x 軸重合。但是在大多數情況下， $P_i^{m_l n_l}$ 和 $P_r^{m_l n_l}$ 是複數，因此 P_l^i 和 P_l^r 的傳播方向並不會與 x 軸重合，而是有一個夾角。每個空間內總音場都是由 P_l^i 和 P_l^r 相加而得，因此總音場的傳播方向可沿 x 方向（例如：空間 V_1 ）或者 z 方向（例如：空間 V_3 ）。

波數 $k_{x_l}^{m_l n_l}$ ， $k_{y_l}^{m_l}$ ， $k_{z_l}^{n_l}$ 和 k 的關係滿足：

$$k^2 = (\omega/c)^2 = (k_{x_l}^{m_l n_l})^2 + (k_{y_l}^{m_l})^2 + (k_{z_l}^{n_l})^2, \quad k_{y_l}^{m_l} = \frac{m_l \pi}{L_y^l}, \quad k_{z_l}^{n_l} = \frac{n_l \pi}{L_z^l} \quad (3.1.3)$$

式中： ω 為角頻率， c 為聲速。

式 (3.1.1) 中未知的模態幅度 $P_i^{m_l n_l}$ 和 $P_r^{m_l n_l}$ 將由入射條件、平面 F 處的剛性邊界條件和相鄰空間耦合口處的連續條件所決定 (Morse and Ingard, 1968)。其中入射條件為：

$$(p_l^i = P_0) \Big|_{S_1}, \quad \text{在 } x_l = 0 \text{ 處} \quad (3.1.4)$$

這裡 $|_S$ 表示該式在面 S 上有效。 P_0 為空間 V_1 內入射平面波的幅度。 S_1 為空間 V_1 的截面。平面 F 處的剛性邊界條件為：

$$(v_5^i + v_5^r = 0) \Big|_{S_5}, \quad \text{在 } x_5 = L_x^5 \text{ 處} \quad (3.1.5)$$

式中： S_5 為空間 V_5 的截面。 v_5^i 和 v_5^r （這裡 $l=5$ ）是空間 V_l 內沿著 x 正方向和負方向的法向質點速度，由公式 $v = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt$ ，可推導出為：

$$v_l^i = \frac{1}{\rho c} \sum_{m_l=0}^{\infty} \sum_{n_l=0}^{\infty} K_{x_l}^{m_l n_l} P_i^{m_l n_l} \phi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) \exp(-jk_{x_l}^{m_l n_l} x_l) \quad (3.1.6a)$$

$$v_l^r = -\frac{1}{\rho c} \sum_{m_l=0}^{\infty} \sum_{n_l=0}^{\infty} K_{x_l}^{m_l n_l} P_r^{m_l n_l} \phi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) \exp(jk_{x_l}^{m_l n_l} x_l) \quad (3.1.6b)$$

式中： $K_{x_l}^{m_l n_l} = k_{x_l}^{m_l n_l} / k$ 是無量綱的波數。 ρ 是空氣密度。與式 (3.1.1) 類似，每個空間內的法向質點速度可以由 v_l^i 和 v_l^r 相加而得。

在相鄰空間的耦合口處，對應的音壓與質點速度連續條件可以寫為：

$$(p_1^i + p_1^r = p_2^i + p_2^r) \Big|_{S_{12}} \quad \text{和} \quad (v_1^i + v_1^r = v_2^i + v_2^r) \Big|_{S_{12}} \quad (3.1.7a, b)$$

$$(p_2^i + p_2^r = p_3^i + p_3^r) \Big|_{S_{23}} \quad \text{和} \quad (v_2^i + v_2^r = v_3^i + v_3^r) \Big|_{S_{23}} \quad (3.1.8a, b)$$

$$(p_3^i + p_3^r = p_4^i + p_4^r) \Big|_{S_{34}} \quad \text{和} \quad (v_3^i + v_3^r = v_4^i + v_4^r) \Big|_{S_{34}} \quad (3.1.9a, b)$$

$$(p_4^i + p_4^r = p_5^i + p_5^r) \Big|_{S_{45}} \quad \text{和} \quad (v_4^i + v_4^r = v_5^i + v_5^r) \Big|_{S_{45}} \quad (3.1.10a, b)$$

式中： S_{ij} 為空間 V_i 和空間 V_j 的耦合口。

為求解以上問題，需要將式 (3.1.1) 和式 (3.1.6) 中的模態疊加進行截斷，最後所有空間的模態數之和為：

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (3.1.11)$$

式中： Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 和 Q_5 分別為對應空間的模態數。

特徵函數 $\varphi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l)$ 的正交性為：

$$\int_{S_1} \varphi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) dS = 0, \quad \text{除} \quad m_l = n_l = 0 \quad (3.1.12)$$

$$\int_{S_1} \varphi_l^{m_l n_l}(y_l, z_l) \times \varphi_l^{m_l' n_l'}(y_l, z_l) dS = \Lambda_{m_l n_l, m_l' n_l'} \quad (3.1.13)$$

上面兩式中的積分區域均為對應空間的整個截面。 $\delta_{m_l n_l, m_l' n_l'}$ 為 Kronecker 函數。

$$\Lambda_{m_l n_l, m_l' n_l'} = \int_{S_1} (\varphi_l^{m_l' n_l'}(y_l, z_l))^2 dS \quad (3.1.14)$$

為模態 (m_l', n_l') 所對應特徵函數的範數。

將式 (3.1.4) 兩邊同時乘於 $\varphi_1^{m_l' n_l'}(y_1, z_1)$ 並將其於空間 V_1 的截面 S_1 上進行積分，可得：

$$\sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} P_{i_1, x_1}^{m_1 n_1} \langle \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \varphi_1^{m_1' n_1'}(y_1, z_1) \rangle_{S_1} = P_0 \langle \varphi_1^{m_1' n_1'}(y_1, z_1) \rangle_{S_1} \quad (3.1.15)$$

式中： $\langle \rangle_{S_1}$ 表示將尖括弧內的運算式在下標所示區域內進行積分。由式 (3.1.12) 可得，只有當 $m_1' = n_1' = 0$ ，式 (3.1.15) 的右邊式子才不等於 0，因此對於式 (3.1.15) 的左邊式子，以下等式成立：

$$P_{i_1, x_1}^{m_1 n_1} = 0, \quad \text{除} \quad m_1 = n_1 = 0 \quad \text{之外} \quad (3.1.16)$$

式 (3.1.16) 表明，在空間 V_1 中，只有 $(0, 0)$ 模態存在，即假設的正入射平面波。

將式 (3.1.5) 兩邊同時乘於 $\varphi_5^{m_5 n_5'}$ (y_5, z_5) 並將其的空間 V_5 的截面 S_5 進行積分，可得：

$$\sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} K_{x_5}^{m_5 n_5} \left(P_{i_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} - P_{r_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} \right) < \varphi_5^{m_5 n_5} (y_5, z_5) \varphi_5^{m_5 n_5'} (y_5, z_5) > S_5 = 0 \quad (3.1.17)$$

式 (3.1.17) 描述了平面 F 處的剛性邊界條件。

將式 (3.1.7a) 兩邊同時乘於 $\varphi_1^{m_1 n_1'}$ (y_1, z_1) 並將其的空間 V_1 和空間 V_2 的耦合口 (S_{12}) 上進行積分，可得：

$$\begin{aligned} \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} \left(P_{i_1, x_1=L_x^1}^{m_1 n_1} + P_{r_1, x_1=L_x^1}^{m_1 n_1} \right) < \varphi_1^{m_1 n_1} (y_1, z_1) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) > S_{12} = \\ \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} \left(P_{i_2, x_2=0}^{m_2 n_2} + P_{r_2, x_2=0}^{m_2 n_2} \right) < \varphi_2^{m_2 n_2} (y_2, z_2) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) > S_2 \end{aligned} \quad (3.1.18)$$

式 (3.1.18) 描述了在空間 V_1 和空間 V_2 耦合口處的音壓連續條件。

為了描述平面 B 處的質點速度連續條件，除了由式 (3.1.7b) 對空間 V_1 和 V_2 耦合口處進行描述之外，還需要對空間 V_2 在平面 B 處的牆面上的質點速度進行描述，即：

$$v_{w,1}^B = v_1^B = 0 \quad (3.1.19)$$

這樣，空間 V_1 和 V_2 處的非均勻邊界條件就完整地由式 (3.1.7a)、(3.1.7b) 和 (3.1.19) 進行了描述。將式 (3.1.7b) 和 (3.1.19) 兩邊同時乘於 $\varphi_1^{m_1 n_1'}$ (y_1, z_1)，然後將其分別在在面 S_{12} 和 ($S_1 - S_{12}$) 上進行積分，可得：

$$\int_{S_{12}} (v_1^i + v_1^r) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS = \int_{S_{12}} (v_2^i + v_2^r) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS \quad (3.1.20)$$

$$\int_{S_1 - S_{12}} (v_1^i + v_1^r) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS = \int_{S_1 - S_{12}} v_{w,1}^B \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS \quad (3.1.21)$$

將式 (3.1.20) 和 (3.1.21) 相加，可得：

$$\int_{S_1} (v_1^i + v_1^r) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS = \int_{S_{12}} (v_2^i + v_2^r) \varphi_1^{m_1 n_1'} (y_1, z_1) dS \quad (3.1.22)$$

將質點速度 v_1^i 、 v_1^r 、 v_2^i 和 v_2^r 用式 (3.1.6) 寫出並代入式 (3.1.22)，可得：

$$\begin{aligned} \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} K_{x_1}^{m_1 n_1} \left(P_{i_1, x_1=L_x^1}^{m_1 n_1} - P_{r_1, x_1=L_x^1}^{m_1 n_1} \right) < \varphi_1^{m_1 n_1} (y_1, z_1) \varphi_1^{m_1' n_1'} (y_1, z_1) > S_1 = \\ \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} K_{x_2}^{m_2 n_2} \left(P_{i_2, x_2=0}^{m_2 n_2} - P_{r_2, x_2=0}^{m_2 n_2} \right) < \varphi_2^{m_2 n_2} (y_2, z_2) \varphi_1^{m_1' n_1'} (y_1, z_1) > S_2 \end{aligned} \quad (3.1.23)$$

式 (3.1.23) 描述了在平面 B 處的體積速度連續條件。對於式 (3.1.8)、(3.1.9) 和 (3.1.10)，可以用相同的方法得到與式 (3.1.18) 和 (3.1.23) 類似的方程式，因此此處將直接給出結果，不再贅述詳細的推導過程。

對於式 (3.1.8a)，平面 C 處的音壓連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} \left(P_{i_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} + P_{r_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} \right) < \varphi_2^{m_2 n_2} (y_2, z_2) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_2 = \\ \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \left(P_{i_3, x_3=0}^{m_3 n_3} + P_{r_3, x_3=0}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_{23} \end{aligned} \quad (3.1.24)$$

對於式 (3.1.8b)，平面 C 處的體積速度連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned} \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} K_{x_2}^{m_2 n_2} \left(P_{i_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} - P_{r_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} \right) < \varphi_2^{m_2 n_2} (y_2, z_2) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_2 \\ = \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} K_{x_3}^{m_3 n_3} \left(P_{i_3, x_3=0}^{m_3 n_3} - P_{r_3, x_3=0}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3 \end{aligned} \quad (3.1.25)$$

對於式 (3.1.9a)，平面 D 處的音壓連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \left(P_{i_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} + P_{r_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_{34} \\ = \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} \left(P_{i_4, x_4=0}^{m_4 n_4} + P_{r_4, x_4=0}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_4 \end{aligned} \quad (3.1.26)$$

對於式 (3.1.9b)，平面 D 處的體積速度連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} K_{x_3}^{m_3 n_3} \left(P_{i_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} - P_{r_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3 \\ = \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} K_{x_4}^{m_4 n_4} \left(P_{i_4, x_4=0}^{m_4 n_4} - P_{r_4, x_4=0}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_4 \end{aligned} \quad (3.1.27)$$

對於式 (3.1.10a)，平面 E 處的音壓連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} \left(P_{i_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} + P_{r_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} \right) \langle \varphi_4^{m_4 n_4}(y_4, z_4) \varphi_5^{m_5 n_5'}(y_5, z_5) \rangle S_4 \\
 & = \sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} \left(P_{i_5, x_5=0}^{m_5 n_5} + P_{r_5, x_5=0}^{m_5 n_5} \right) \langle \varphi_5^{m_5 n_5}(y_5, z_5) \varphi_5^{m_5 n_5'}(y_5, z_5) \rangle S_{45}
 \end{aligned} \tag{3.1.28}$$

對於式 (3.1.10b)，平面 E 處的體積速度連續條件可以表達為：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} K_{x_4}^{m_4 n_4} \left(P_{i_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} - P_{r_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} \right) \langle \varphi_4^{m_4 n_4}(y_4, z_4) \varphi_5^{m_5 n_5'}(y_5, z_5) \rangle S_4 = \\
 & \sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} K_{x_5}^{m_5 n_5} \left(P_{i_5, x_5=0}^{m_5 n_5} - P_{r_5, x_5=0}^{m_5 n_5} \right) \langle \varphi_5^{m_5 n_5}(y_5, z_5) \varphi_5^{m_5 n_5'}(y_5, z_5) \rangle S_5
 \end{aligned} \tag{3.1.29}$$

式 (3.1.15)、式 (3.1.17)、式 (3.1.18) 和式 (3.1.23) 至式 (3.1.29) 組成了一個線性方程組，可以完整地描述出窗戶和房間內的音場。該方程組共有 4 組未

知數，分別為 $P_{i_l, x_l=0}^{m_l n_l}$ 、 $P_{i_l, x_l=L_x^l}$ 、 $P_{r_l, x_l=0}^{m_l n_l}$ 和 $P_{r_l, x_l=L_x^l}^{m_l n_l}$ 。由關係式：

$$P_{i_l, x_l=L_x^l}^{m_l n_l} = P_{i_l, x_l=0}^{m_l n_l} \exp(-jk_{x_l}^{m_l n_l} L_x^l) \text{ 和 } P_{r_l, x_l=L_x^l}^{m_l n_l} = P_{r_l, x_l=0}^{m_l n_l} \exp(jk_{x_l}^{m_l n_l} L_x^l) \tag{3.1.30}$$

可將未知數減少為 $P_{i_l, x_l=0}^{m_l n_l}$ 和 $P_{r_l, x_l=0}^{m_l n_l}$ 。將以上方程組寫成矩陣型式，可得：

$$AP = C \tag{3.1.31}$$

式中： A 是 $2Q_0 \times 2Q_0$ 的係數矩陣，其運算式為：

$$A = \begin{bmatrix}
 \boxed{Q_1 \times Q_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \text{式(3.1.15)} & & & & \\
 \boxed{(Q_1 + Q_2) \times 2(Q_1 + Q_2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \text{式(3.1.18) 和式(3.1.23)} & & & & \\
 0 & \boxed{(Q_2 + Q_3) \times 2(Q_2 + Q_3)} & 0 & 0 & 0 \\
 \text{式(3.1.24) 和式(3.1.25)} & & & & \\
 0 & 0 & \boxed{(Q_3 + Q_4) \times 2(Q_3 + Q_4)} & 0 & 0 \\
 \text{式(3.1.26) 和式(3.1.27)} & & & & \\
 0 & 0 & 0 & \boxed{(Q_4 + Q_5) \times 2(Q_4 + Q_5)} & 0 \\
 \text{式(3.1.28) 和式(3.1.29)} & & & & \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \boxed{Q_5 \times Q_5} \\
 \text{式(3.1.17)} & & & &
 \end{bmatrix} \tag{3.1.32}$$

P 是未知模態係數向量，大小為 $2Q_0$ ，其運算式為：

$$P = \left[P_{i_1, x_1=0}^{m_1 n_1}, P_{r_1, x_1=0}^{m_1 n_1}, P_{i_2, x_2=0}^{m_2 n_2}, P_{r_2, x_2=0}^{m_2 n_2}, P_{i_3, x_3=0}^{m_3 n_3}, P_{r_3, x_3=0}^{m_3 n_3}, P_{i_4, x_4=0}^{m_4 n_4}, P_{r_4, x_4=0}^{m_4 n_4}, P_{i_5, x_5=0}^{m_5 n_5}, P_{r_5, x_5=0}^{m_5 n_5} \right]^T \tag{3.1.33}$$

式中上標 T 表示轉置。 C 是一個大小為 $2Q_0$ 的向量，它的運算式為：

$$C = \left[P_{0,1}^{00}, \dots, P_{0,1}^{M_1'N_1'}, 0, \dots, 0 \right]^T, P_{0,1}^{m_1'n_1'} = P_0 \langle \varphi_1^{m_1'n_1'}(y_1, z_1) \rangle S_1 \quad (3.1.34)$$

式中： M_1' 和 N_1' 分別是 m 和 n 的最大值。當空間 V_1 內的人射平面波幅度 P_0 確定時，未知的模態係數便可以由上述方程組確定。當係數矩陣 A 不奇異並且可逆時，可得：

$$P = A^{-1}C \quad (3.1.35)$$

求得式 (3.1.31) 的解之後，將 $P_{i_1}^{m_1'n_1'}$ 和 $P_{r_1}^{m_1'n_1'}$ 代入式 (3.1.1) 便可得到每個空間內的音場。

3.1.2.3 次級音場

為實施主動降噪，需將次級音源放到窗戶內。用作次級音源的揚聲器尺寸通常遠小於低頻噪音的波長，為簡便起見，將次級音源當作點音源進行處理。由點音源激勵而得的各空間內部音場的求解過程與 3.1.2.2 節中平面波入射時音場求解過程類似。以只有一個次級音源的情況為例，當把次級音源放置於空間 V_3 時，空間 V_1 內部音場僅包含沿 x 負方向傳播的聲音，其內部某點 (x_1, y_1, z_1) 處的音壓運算式為：

$$P_1^S = P_1^r = \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} \varphi_1^{m_1'n_1'}(y_1, z_1) P_{r_1}^{m_1'n_1'} \exp(jk_{x_1}^{m_1'n_1'} x_1) \quad (3.1.36)$$

將次級音源的坐標記為 (x_3^S, y_3^S, z_3^S) ，則空間 V_3 內部的音場可以寫為：

$$\begin{aligned} P_3 &= P_3^p + P_3^q = (P_3^i + P_3^r) + P_3^q \\ &= \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \varphi_3^{m_3'n_3'}(y_3, z_3) \left(P_{i_3}^{m_3'n_3'} \exp(-jk_{x_3}^{m_3'n_3'} x_3) + P_{r_3}^{m_3'n_3'} \exp(jk_{x_3}^{m_3'n_3'} x_3) \right) \\ &\quad + \frac{-j\omega\rho q_c}{2L_y^3 L_z^3} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3'n_3'}(y_3, z_3) \varphi_3^{m_3'n_3'}(y_3^S, z_3^S)}{k_{x_3}^{m_3'n_3'} D_{yz}(m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3'n_3'} |x_3 - x_3^S|) \end{aligned} \quad (3.1.37)$$

式中： q_c 為次級音源的源強，且：

$$D_{yz}(m_3, n_3) = \frac{1}{D_y(m_3)D_z(n_3)} \quad (3.1.38)$$

當 $m_3 = 0$ 時， $D_y(m_3) = 1$ ，當 $m_3 \neq 0$ 時， $D_y(m_3) = 2$ 。 $D_z(n_3)$ 的取值與 $D_y(m_3)$ 類似。

式 (3.1.37) 中 P_3^p 模擬從平面 C 和 D 傳出的聲音，其運算式與平面波入射時是一樣的。 P_3^q 模擬從控制音源傳出的聲音，其運算式與將一個點音源放置於無限長矩形波導管中的音場運算式相同 (Morse and Ingard, 1968)。與 P_3^q 對應的質點速度運算式為：

$$v_3^S = \text{sgn}(x_3^S - x_3) \frac{j q_c}{2L_y L_z} \times \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3^S, z_3^S)}{D_{yz}(m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3 n_3} |x_3 - x_3^S|) \quad (3.1.39)$$

式中： $\text{sgn}(\)$ 為符號函數。

當激勵源為次級音源時，空間 V_2 、 V_4 和 V_5 內的音場運算式與平面波入射時是相同的，也即式 (3.1.1)。為了求得次級音場，需要 9 組邊界條件和連續條件，分別為式 (3.1.5)、式 (3.1.7)、式 (3.1.8)、式 (3.1.9) 和式 (3.1.10)。次級音場的求解過程與 3.1.2.1 節中初級源的求解過程類似，因而此處將直接給出推導得到的線性方程組，不再贅述詳細推導過程。

由平面 B 處的音壓連續條件，可得：

$$\begin{aligned} & \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} P^{m_1 n_1} \langle \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \rangle S_{12} \\ & = \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} (P_{i_2, x_2=0}^{m_2 n_2} + P_{r_2, x_2=0}^{m_2 n_2}) \langle \varphi_2^{m_2 n_2}(y_2, z_2) \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \rangle S_2 \end{aligned} \quad (3.1.40)$$

由平面 B 處的體積速度連續條件，可得：

$$\begin{aligned} & - \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} K_{x_1}^{m_1 n_1} P^{m_1 n_1} \langle \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \rangle S_1 \\ & = \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} K_{x_2}^{m_2 n_2} (P_{i_2, x_2=0}^{m_2 n_2} - P_{r_2, x_2=0}^{m_2 n_2}) \langle \varphi_2^{m_2 n_2}(y_2, z_2) \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \rangle S_2 \end{aligned} \quad (3.1.41)$$

由平面 C 處的音壓連續條件，可得：

$$\begin{aligned} & \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} (P_{i_2, x_2=L_x}^{m_2 n_2} + P_{r_2, x_2=L_x}^{m_2 n_2}) \langle \varphi_2^{m_2 n_2}(y_2, z_2) \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \rangle S_2 \\ & = \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} (P_{i_3, x_3=0}^{m_3 n_3} + P_{r_3, x_3=0}^{m_3 n_3}) \langle \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \rangle S_{23} \\ & \quad + \frac{-j\omega\rho q_c}{2L_y L_z} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3 n_3}(y_3^S, z_3^S)}{k_{x_3}^{m_3 n_3} D_{yz}(m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3 n_3} x_3^S) \\ & \quad \times \langle \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \varphi_3^{m_3 n_3}(y_3, z_3) \rangle S_{23} \end{aligned} \quad (3.1.42)$$

由平面 C 處的體積速度連續條件，可得：

$$\begin{aligned}
& \sum_{m_2=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} K_{x_2}^{m_2 n_2} \left(P_{i_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} - P_{r_2, x_2=L_x^2}^{m_2 n_2} \right) < \varphi_2^{m_2 n_2} (y_2, z_2) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_2 \\
& = \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} K_{x_3}^{m_3 n_3} \left(P_{i_3, x_3=0}^{m_3 n_3} - P_{r_3, x_3=0}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3 \\
& + \frac{j\rho c q_c}{2L_y^3 L_z^3} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3 n_3} (y_3^S, z_3^S)}{D_{yz} (m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3 n_3} x_3^S) \\
& \times < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3
\end{aligned} \tag{3.1.43}$$

由平面 D 處的音壓連續條件，可得：

$$\begin{aligned}
& \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \left(P_{i_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} + P_{r_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_{34} \\
& + \frac{-j\omega\rho q_c}{2L_y^3 L_z^3} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3 n_3} (y_3^S, z_3^S)}{k_{x_3}^{m_3 n_3} D_{yz} (m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3 n_3} [L_x^3 - x_3^S]) \\
& \times < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_{34} \\
& = \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} \left(P_{i_4, x_4=0}^{m_4 n_4} + P_{r_4, x_4=0}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_4
\end{aligned} \tag{3.1.44}$$

由平面 D 處的體積速度連續條件，可得：

$$\begin{aligned}
& \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} K_{x_3}^{m_3 n_3} \left(P_{i_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} - P_{r_3, x_3=L_x^3}^{m_3 n_3} \right) < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3 \\
& + \frac{-j\rho c q_c}{2L_y^3 L_z^3} \sum_{m_3=0}^{\infty} \sum_{n_3=0}^{\infty} \frac{\varphi_3^{m_3 n_3} (y_3^S, z_3^S)}{D_{yz} (m_3, n_3)} \exp(-jk_{x_3}^{m_3 n_3} [L_x^3 - x_3^S]) \\
& \times < \varphi_3^{m_3 n_3} (y_3, z_3) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_3 \\
& = \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} K_{x_4}^{m_4 n_4} \left(P_{i_4, x_4=0}^{m_4 n_4} - P_{r_4, x_4=0}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_3^{m_3' n_3'} (y_3, z_3) > S_4
\end{aligned} \tag{3.1.45}$$

由平面 E 處的音壓連續條件，可得：

$$\begin{aligned}
& \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} \left(P_{i_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} + P_{r_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_5^{m_5' n_5'} (y_5, z_5) > S_4 \\
& = \sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} \left(P_{i_5, x_5=0}^{m_5 n_5} + P_{r_5, x_5=0}^{m_5 n_5} \right) < \varphi_5^{m_5 n_5} (y_5, z_5) \varphi_5^{m_5' n_5'} (y_5, z_5) > S_{45}
\end{aligned} \tag{3.1.46}$$

由平面 E 處的質點速度連續條件，可得：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{m_4=0}^{\infty} \sum_{n_4=0}^{\infty} K_{x_4}^{m_4 n_4} \left(P_{i_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} - P_{r_4, x_4=L_x^4}^{m_4 n_4} \right) < \varphi_4^{m_4 n_4} (y_4, z_4) \varphi_5^{m_5' n_5'} (y_5, z_5) > S_4 \\
 & = \sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} K_{x_5}^{m_5 n_5} \left(P_{i_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} - P_{r_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} \right) < \varphi_5^{m_5 n_5} (y_5, z_5) \varphi_5^{m_5' n_5'} (y_5, z_5) > S_5 \quad (3.1.47)
 \end{aligned}$$

由平面 F 處的剛性邊界條件，可得：

$$\sum_{m_5=0}^{\infty} \sum_{n_5=0}^{\infty} K_{x_5}^{m_5 n_5} \left(P_{i_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} - P_{r_5, x_5=L_x^5}^{m_5 n_5} \right) < \varphi_5^{m_5 n_5} (y_5, z_5) \varphi_5^{m_5' n_5'} (y_5, z_5) > S_5 = 0 \quad (3.1.48)$$

將式 (3.1.40) 至式 (3.1.48) 寫成與式 (3.1.31) 類似的矩陣型式，求解該方程組後，便可得到各空間內的次級控制音場。

3.1.3 主動噪音控制方法

在實施主動降噪時，將誤差麥克風處的音壓平方和選為主動降噪系統的代價函數 (Qiu et al., 2005; Niu et al., 2007; Zou et al., 2007)：

$$J = \sum_{i=1}^{N_e} |P_{ei}|^2 + \beta q_s^H q_s \quad (3.1.49)$$

式中： P_{ei} 為第 i 個誤差麥克風處的音壓。 N_e 為誤差麥克風的個數。 β 為次級源源強的權重係數，其數值大於零時麥克風處的音壓幅度平方和不一定能達到最小值，但增加了系統的穩定性。上標 H 表示矩陣的 Hermitian 轉置 $q_s = [q_1, q_2, \dots, q_{N_c}]^T$ 為次級音源源強矩陣，其最優值為 (Nelson and Elliott, 1992)：

$$q_{os} = -\left(Z_{se}^H Z_{se} + \beta I \right)^{-1} Z_{se}^H P_{pe} \quad (3.1.50)$$

式中： N_c 為次級源的個數。 I 為單元陣。 $P_{pe} = [p_{pe1}, p_{pe2}, \dots, p_{peN_c}]^T$ 為誤差麥克風處初級音場的音壓。 Z_{se} 是從次級源到誤差麥克風的傳遞函數，其運算式為：

$$Z_{se} = \begin{bmatrix} Z(r_{s_1 e_1}) & \cdots & Z(r_{s_{N_c} e_1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z(r_{s_1 e_{N_c}}) & \cdots & Z(r_{s_{N_c} e_{N_c}}) \end{bmatrix} \quad (3.1.51)$$

式中： $r_{s_i e_j}$ 和 $Z(r_{s_i e_j})$ 分別為從第 i 個次級音源到第 j 個誤差麥克風的位置向量和傳遞函數。如果第 i 個次級音源 (源強為 q_{s_i}) 在第 j 個誤差麥克風處產生的音壓為 $p_{s_i e_j}$ ，則有 $Z(r_{s_i e_j}) = p_{s_i e_j} / q_{s_i}$ 。

主動降噪系統的降噪效果定義為引入主動降噪系統之後，在監測點處的平均音壓級的新增降噪量（Extra Attenuation, EA），也即當主動降噪系統運行和關閉時，監測點處的平均音壓級之差：

$$EA = SPL_{without} - SPL_{with} \quad (3.1.52)$$

式中：平均音壓級定義為：

$$SPL_{averaged} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{N_1} |p_{oi}|^2}{N_1 p_{ref}^2} \quad (3.1.53)$$

式中： p_{oi} 為第 i 個監測點處的音壓。 N_1 為監測點的個數。 $p_{ref} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 是參考音壓。

3.1.4 小結

上述研究將建築物外部空間等效為一個半無限長的矩形波導管，整個系統視為由該等效波導管與 SSO、窗戶內部、RSO 和房間組成的 5 空間聲學耦合系統。利用模態展開法，得到了當激勵源為正入射平面波或者空間內點音源時，該耦合系統內的音場，建立了自然通風主動隔音窗的完整理論模型。

上述研究的主要貢獻和創新點在於：透過將建築物外部自由空間等效為半無限長的波導管，將錯置型自然通風隔音窗等效成一個 5 空間耦合系統，運用模態展開法和耦合空間理論建立了自然通風主動隔音窗的分析模型。

3.2 自然通風主動隔音窗的數值模擬研究

本研究首先探討了等效波導管截面面積和模態截止頻率對自然通風窗低頻音傳播模型計算精度的影響，運用有限元方法驗證了該理論模型的有效性，然後利用 3.1 節提出的自然通風窗低頻音傳播模型，對不同配置下主動降噪系統的降噪性能進行了數值模擬研究。

3.2.1 引言

在 3.1 節提出的自然通風窗低頻音傳播模型中，每個空間內的音場都用無窮多個模態疊加的形式給出，但是在數值計算中，必須對此模態疊加進行截斷。常用方法為選取某一固定頻率，在模態疊加中僅考慮特徵頻率低於此固定頻率的模態（Kropp and Bérillon, 1998; Glav et al., 2004）。本研究也採用此方法確定模態截斷

頻率對音場計算精度的影響。另一個影響音場計算精度的因素是等效波導管的截面面積，當它與 SSO 截面面積相等時，空間 V_1 和 V_2 的耦合口處為均勻邊界條件，此時聲波將無反射地從空間 V_1 傳入空間 V_2 。當等效波導管的截面面積與 SSO 截面面積不相等時，空間 V_1 和 V_2 耦合口處為不連續邊界條件，此時將有部分聲波被反射回空間 V_1 （杜功煥等, 2001）。因此，本研究將探討等效波導管截面面積對自然通風窗和房間內音場計算的影響。確定了模態截斷頻率和等效波導管截面面積之後，運用有限元方法對自然通風窗進行建模，將有限元模型的計算結果與理論模型的計算結果進行對比，以此來驗證理論模型的有效性。最後，將該理論模型應用於窗戶的主動降噪。

在實施主動降噪時，次級音源和誤差麥克風的布放方式將影響降噪效果。Bullmore 等發現在一個二維閉空間內，當次級音源和誤差麥克風位於房間角落時，可有效地避開模態節點線，獲得較好的降噪效果（Bullmore et al., 1987）。Guo 等發現在自由場內，當次級音源和誤差麥克風都位於最優間距時，可以產生最大的靜區且最低限度地增加整個系統的輸出聲功率（Guo et al., 1997b）。Zou 等發現為在擴散場內產生有效的局部靜區，誤差麥克風之間的距離存在上限，而次級音源與誤差麥克風之間的距離存在下限（Zou et al., 2007）。Tarabini 等利用分散式主動降噪系統來控制透過牆傳播的聲音。他們發現控制效果主要受到次級音源和誤差麥克風之間的距離和次級音源指向性的影響（Tarabini and Roure, 2008）。

本研究首先針對單通道（只包含一個次級音源和一個誤差感測器）主動降噪系統進行研究，利用理論模型計算出窗戶和房間內的初級和次級音場，將它們應用於主動降噪中，透過數值模擬研究了次級音源和誤差麥克風的布放位置對房間內降噪效果的影響；然後透過優化的雙通道（包含二個以上的次級音源和誤差感測器）主動降噪系統，研究了多通道主動降噪系統的降噪性能。

3.2.2 理論模型音場計算影響因素與模型驗證

為驗證 3.1 節的理論模型，首先分析模態截取階數和空間 V_1 截面面積對音場計算的影響。模態截取的原則是選取上限頻率 f_u ，在式（3.1.1）中僅考慮特徵頻率低於 f_u 的模態。令 f_u 與所考慮頻率 f 的關係為 $f_u = q_f f$ 。計算中所使用的模型尺寸為表 3.2-1 中的配置 1。

以窗戶和房間中間剖面上的兩條軌跡線上的總音壓級與音壓級分布來研究 q_f 和空間 V_1 截面面積對音場計算的影響，如圖 3.2-1 所示。在以下計算中，均令 $q_y = q_z$ 。此處音壓平方和以 dB 型式給出，也即：

$$Lp_i = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{N_i} |p_i|^2}{p_{ref}^2} \quad (3.2.1)$$

式中： p_i 為軌跡線上第 i 點處的音壓， N 為在軌跡線上選取的點的個數（相鄰點之間間距為 0.01m）。 $p_{ref} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 為參考音壓。

表 3.2-1 驗證模型的幾何尺寸

空間	配置 1			配置 2		
	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)	L_x (m)	L_y (m)	L_z (m)
V_1	—	4.25	1.00	—	7.50	1.50
V_2	0.01	0.85	0.20	0.01	1.50	0.30
V_3	0.29	0.85	1.27	0.40	1.50	2.00
V_4	0.01	0.85	0.20	0.01	1.50	0.30
V_5	3.00	4.00	3.00	2.50	2.00	3.20

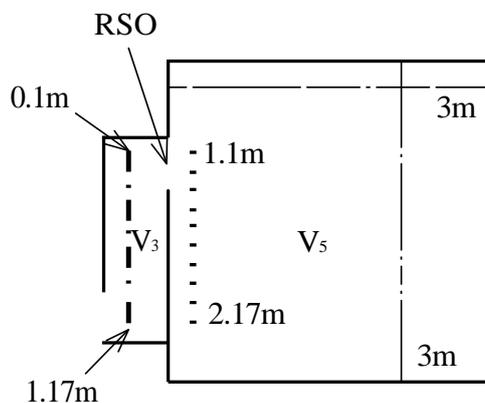


圖 3.2-1 窗戶和房間內用於研究計算精度的軌跡線示意圖

(圖中座標對應於配置 1)

3.2.2.1 模態階數對音場計算的影響

圖 3.2-2 和圖 3.2-3 分別給出了當 $q_y = q_z = 5$ ， q_f 取不同值時圖 3.2-1 所示軌跡線上的總音壓級與音壓級變化曲線。可以看到當 q_f 大於或等於 7 之後，軌跡線上的總音壓級與音壓級便已經基本收斂。這表明，當模擬中所考慮的最高模態頻率為計算頻率的 7 倍時，可滿足本研究計算精度的要求。如果選取更高的模態截止頻率，計算時所用到的模態數量將急劇增加，這將極大地增加計算量，而對計算精度的提高並不明顯。例如：當 $q_f = 20$ 時（計算伺服器的 CPU 為雙核 2.4 GHz、記憶體為 4 GB），如果音場頻率為 100 Hz，此時所需計算的模態總數 $Q_0 = 1979$ ，計算所需時間為 86 s，占用實體記憶體 2 GB。如果音場頻率為 300 Hz，此時所需計算的模態總數為 17252，除了使用 4 GB 的實體記憶體，即使再配給以 21 GB 的虛擬記憶體，依然因為記憶體不足而無法進行計算，故此處對 $q_f > 10$ 的模態截止頻率不做討論，且在本研究所有模擬中，均取 $q_f = 7$ 。

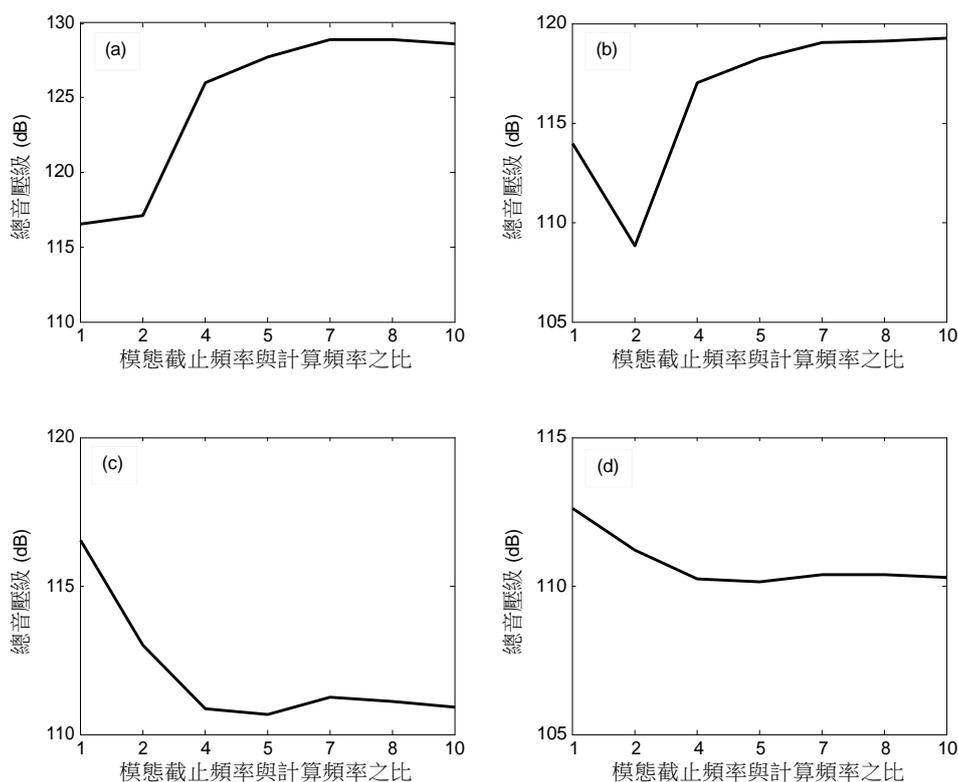


圖 3.2-2 當 $q_y = q_z = 5$ ，圖 3.2-1 軌跡線上總音壓級隨 q_f 的變化曲線
(a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

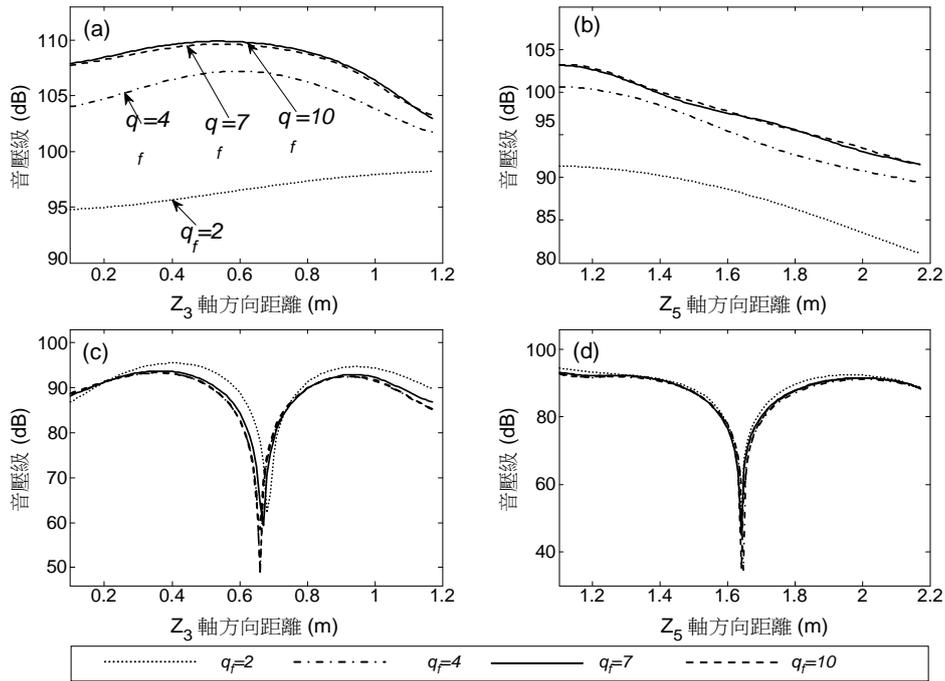


圖 3.2-3 當 $q_y = q_z = 5$ ，圖 3.2-1 軌跡線上音壓級隨 q_f 的變化曲線
 (a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

3.2.2.2 空間 V_1 截面面積對音場計算的影響

空間 V_1 的中心點與空間 V_2 的中心點重合，且：

$$L_y^2 = q_y L_y^1, L_z^2 = q_z L_z^1 \quad (q_y = q_z = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.2.2)$$

圖 3.2-4 給出了圖 3.2-1 所示軌跡線上的總音壓級隨空間 V_1 和 SSO 截面面積之比 $q_y \times q_z$ 的變化曲線。可以看到隨著 $q_y \times q_z$ 的變大，軌跡線上的總音壓級逐漸收斂，且 $q_y \times q_z = 25$ 與 $q_y \times q_z = 100$ 時的取值幾乎相等。另外，當 $q_y \times q_z$ 變大時，軌跡線上的音壓平方和變化並不大，這是由於空間 V_1 截面積不同時，軌跡線上的音壓級變化不大，如圖 3.2-5 所示。

圖 3.2-5 給出了軌跡線上的音壓級在 q_y 和 q_z 取不同值時的變化情況。可以看到當 q_y 和 q_z 取不同值時，兩條軌跡線上的音壓級收斂性很好，僅在 SSO 附近有很小的偏差，如圖 3.2-5(a)和(c)所示 1.17m 處。當 q_y 和 q_z 取值為 1 和 2 時，SSO 處音壓級較之 $q_y = q_z = 10$ 時的音壓級，偏差為 0.3 dB 左右。而當 q_y 和 q_z 取值為 5 時，SSO 處音壓級與 $q_y = q_z = 10$ 時的音壓級接近，偏差在 0.1 dB 之內。因此在本研究所有模擬中，均令 $q_y = q_z = 5$ 。

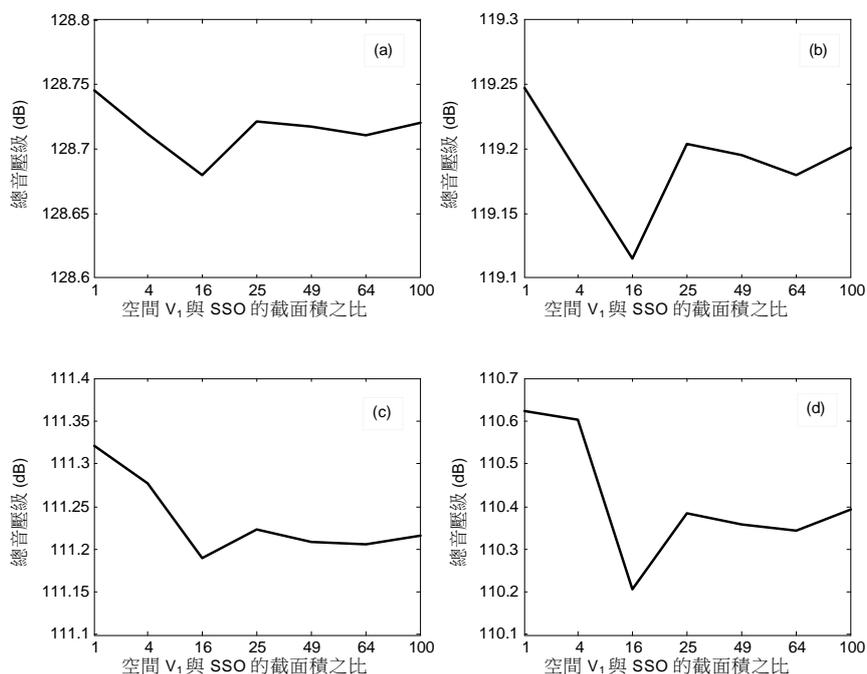


圖 3.2-4 當 $q_f = 7$ 時，圖 3.2-1 軌跡線上總音壓級隨 $q_y \times q_z$ 的變化曲線
 ((a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

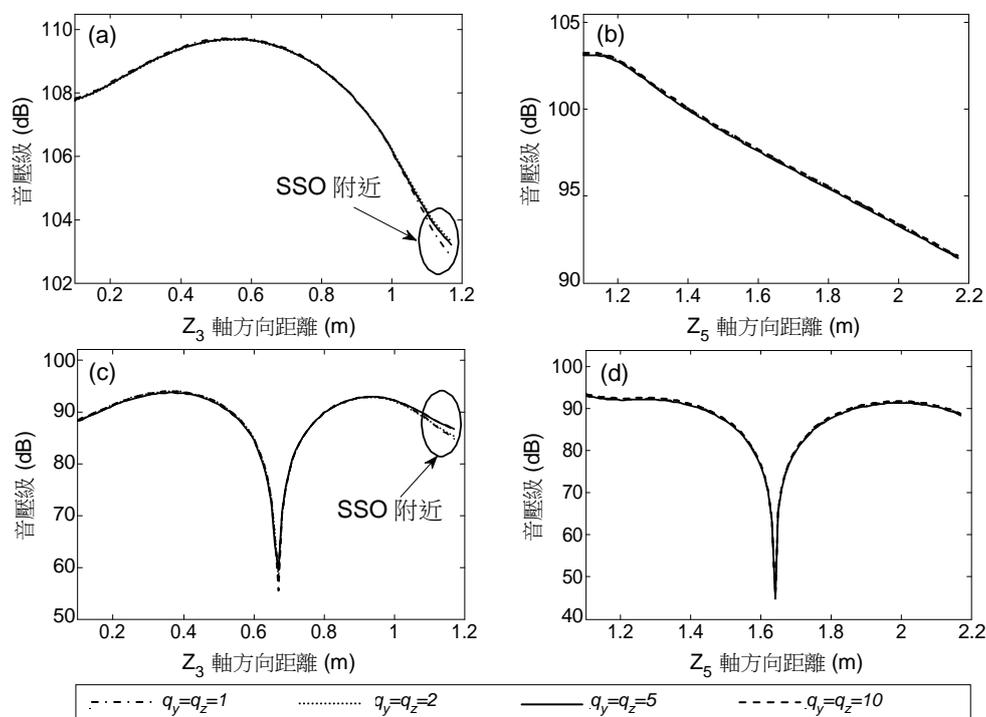


圖 3.2-5 當 $q_f = 7$ 時，圖 3.2-1 軌跡線上音壓級隨 q_y 和 q_z 的變化曲線
 ((a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

3.2.2.3 模型驗證

本節使用有限元方法來驗證 3.1.2.2 節和 3.1.2.3 節中所提出的自然通風窗低頻音傳播模型的正確性。在有限元模型中，所有空間的壁面都設為剛性。平面 A 處的邊界條件設為平面波輻射邊界條件 (Plane wave radiation boundary) (COMSOL, 2008)。本研究選擇兩種不同配置的模型進行驗證，對應的尺寸如表 3.2-1 所示。

圖 3.2-6 和圖 3.2-7 分別給出了在配置 1 和配置 2 下，當激勵源為幅度為 1Pa 的正入射平面波時，圖 3.2-1 所示軌跡線上 (配置 2 對應的座標為 0.1m 至 1.9m 和 0.9m 至 2.7m) 的音壓級在 100 Hz 和 300 Hz 時的情況。可以看到理論模型和有限元模型的計算結果誤差在 1 dB 之內，滿足本研究的計算要求。

圖 3.2-8 和圖 3.2-9 分別給出了在配置 1 和配置 2 下，圖 3.2-1 所示軌跡線上的音壓相位在 100 Hz 和 300 Hz 時的情況。可以看到理論模型和有限元模型計算所得結果吻合得很好。

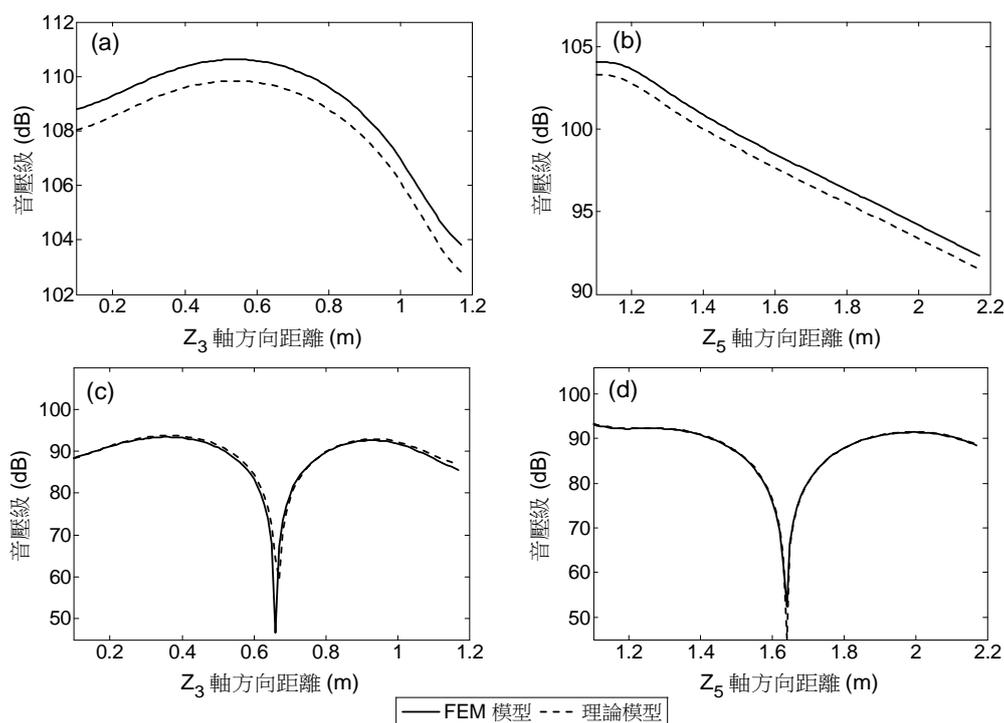


圖 3.2-6 使用配置 1 時，軌跡線上音壓級的對比

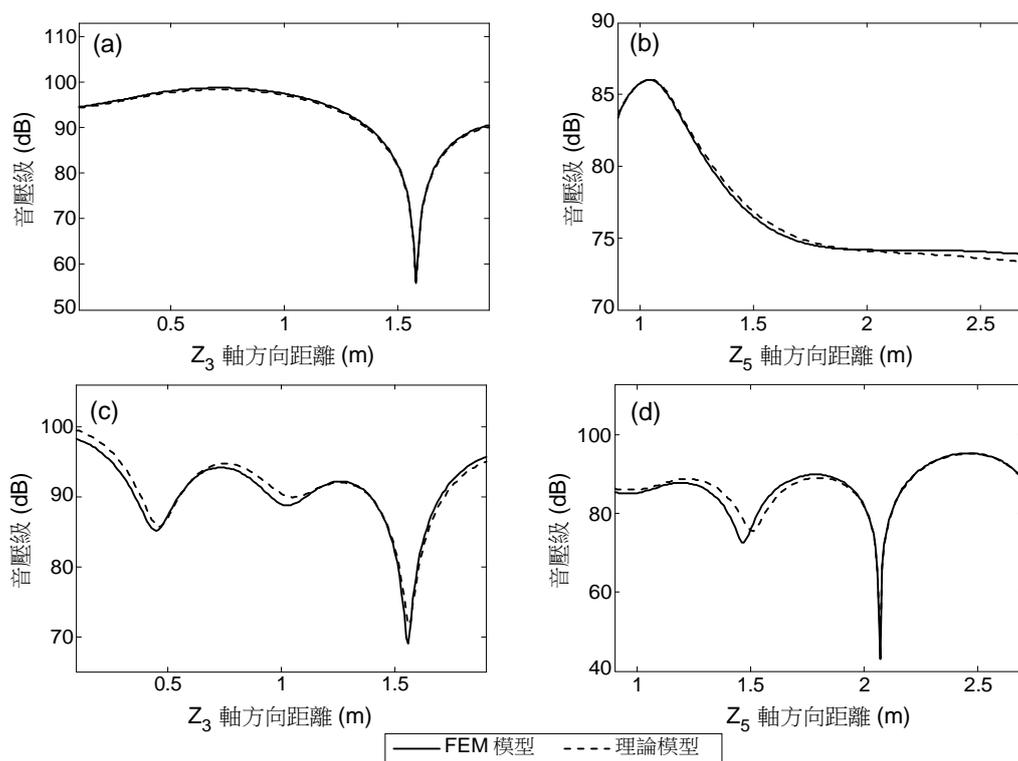


圖 3.2-7 使用配置 2 時，軌跡線上音壓級的對比

(a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

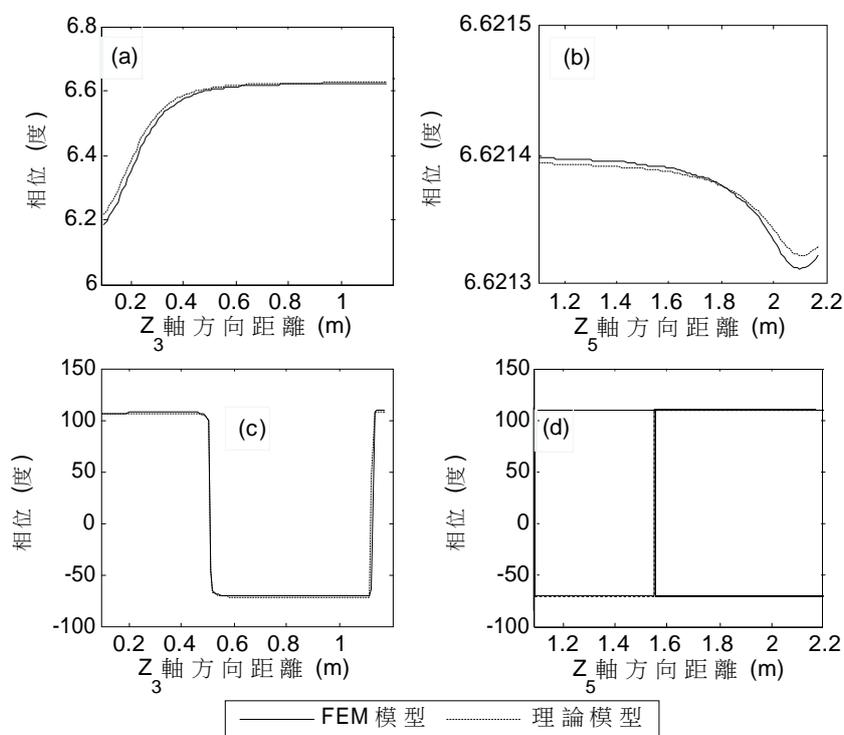


圖 3.2-8 使用配置 1 時，軌跡線上音壓相位的對比

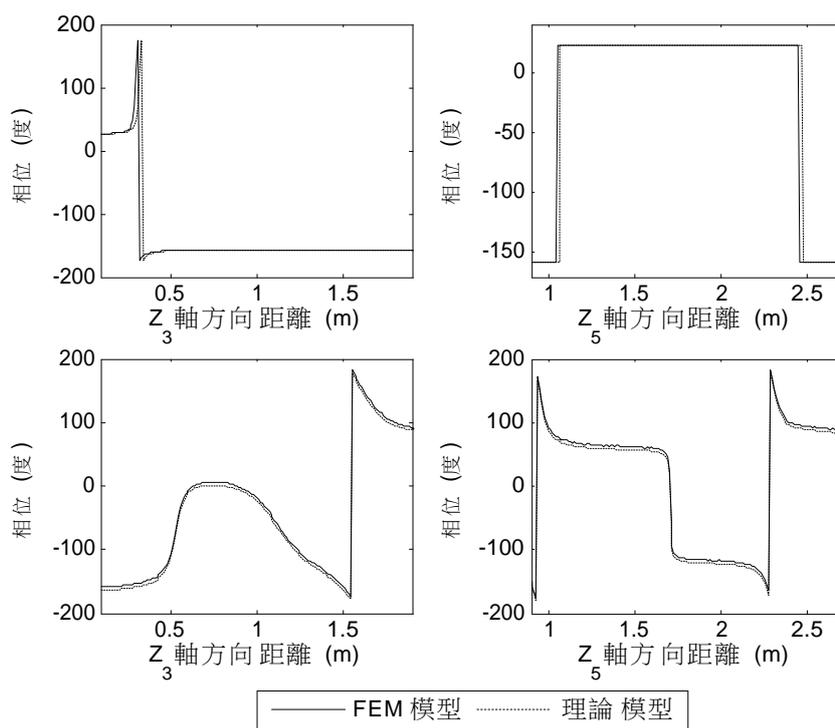


圖 3.2-9 使用配置 2 時，軌跡線上音壓相位的對比

(a)窗戶內，100 Hz；(b)房間內，100 Hz；(c)窗戶內，300 Hz；(d)房間內，300 Hz)

除了對比軌跡線上的音壓級之外，也對比了窗戶和房間內的平均音壓級（監測點均勻分布於空間內，相鄰監測點間距為 0.05m）。為驗證次級音場計算模型，將一個點音源放置於空間 V_3 且其座標為 (0.140m, 0.425m, 0.100m)。計算頻率取為 100 Hz 至 300 Hz，步長為 10 Hz。對於高於 300 Hz 的情況，在目前的模型尺度下，如果在有限元模型中使用直接法進行計算，現有的計算條件（PC 機，雙核 2.4 GHz、記憶體為 4 GB）較難滿足其對記憶體的需求（網格單元的最大邊長取為所研究頻率對應波長的 1/10）。如果使用反覆運演算法進行計算，存在無法收斂的情況（例如：500 Hz），故此處不做討論。

圖 3.2-10(a)和(b)分別給出了當激勵源為正入射平面波時，窗戶和房間內的平均音壓級隨頻率的變化曲線，可以看出由這兩種方法計算所得結果的誤差在 1 dB 之內。圖 3.2-10(c)和(d)分別給出了當激勵源為點音源時，窗戶和房間內的平均音壓級隨頻率的變化曲線，可以看出由這兩種模型計算所得結果吻合得很好，誤差範圍在 0.01 dB 至 1.39 dB 之內。由以上分析，可確認本研究提出的理論模型的計算結果和有限元法基本一致。

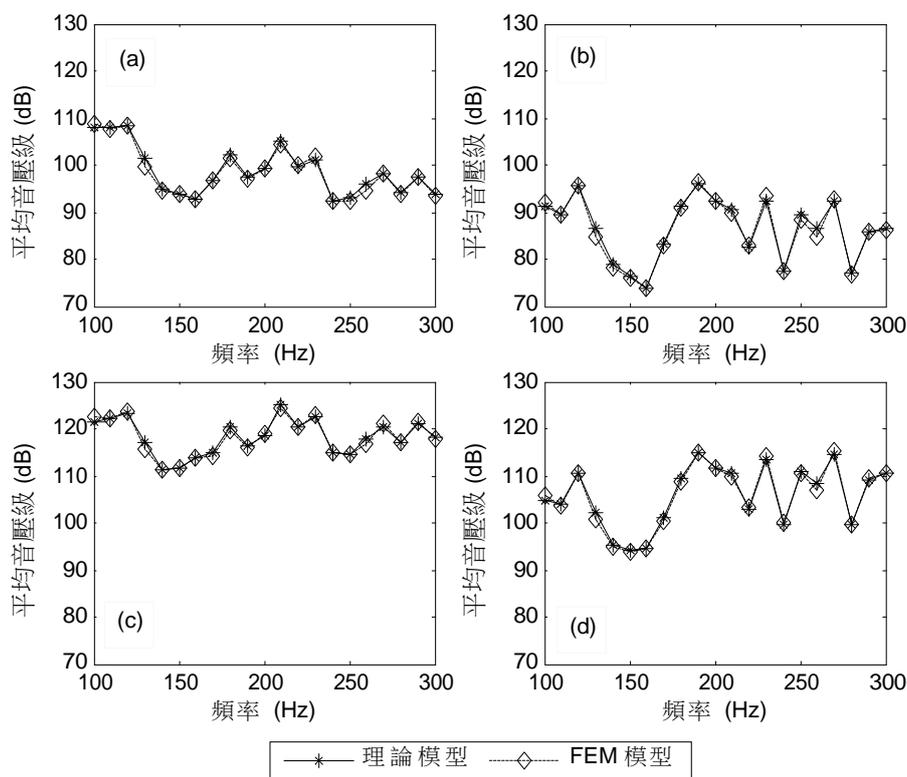


圖 3.2-10 由理論模型和 FEM 模型計算之窗戶和房間內的平均音壓級
 (a)平面波入射，窗戶內；(b)平面波入射，房間內；
 (c)點音源激勵，窗戶內；(d)點音源激勵，房間內)

3.2.2.4 模型適用範圍

以上分析都是針對正入射的平面波進行的，此處將討論平面波斜入射時的情況。對於方向餘弦為 $\cos\alpha$ 、 $\cos\beta$ 和 $\cos\gamma$ 的斜入射平面波，式 (3.1.4) 可以改寫為：

$$\left(p_1^i = p_0 e^{j(-kx_1 \cos\alpha - ky_1 \cos\beta - kz_1 \cos\gamma)} \right) \Big|_{S_1}, \text{ 在 } x_1 = 0 \text{ 處} \quad (3.2.3)$$

這裡只需要得到與式 (3.1.15) 類似的方程式即可，其餘方程式與平面波正入射時相同。將式 (3.2.3) 兩邊同時乘於 $\varphi_1^{m_1 n_1'}(y_1, z_1)$ 並將其的空間 V_1 的截面 (S_1) 上進行積分，可得：

$$\begin{aligned} & \sum_{m_1=0}^{\infty} \sum_{n_1=0}^{\infty} P_{i_1, x_1=0}^{m_1 n_1} \langle \varphi_1^{m_1 n_1}(y_1, z_1) \varphi_1^{m_1' n_1'}(y_1, z_1) \rangle_{S_1} \\ &= P_0 \langle e^{jk y_1 \cos\beta - k z_1 \cos\gamma} \varphi_1^{m_1' n_1'}(y_1, z_1) \rangle_{S_1} \\ &= P_0 \int_0^{L_y} e^{-jk y_1 \cos\beta} \cos\left(\frac{m_1 \pi}{L_y} y_1\right) dy_1 \int_0^{L_z} e^{-jk z_1 \cos\gamma} \cos\left(\frac{m_1' \pi}{L_z} z_1\right) dz_1 \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

以 y_1 方向為例，等號右邊的積分等於：

$$\int_0^{L_y^1} e^{-jk_{y_1} \cos \beta} \cos\left(\frac{m' \pi}{L_y^1} y_1\right) dy_1 \quad (3.2.5)$$

$$= \frac{L_y^1 e^{-jk_{y_1} \cos \beta} \left[\pi m' \sin\left(m' \pi / L_y^1\right) - jk L_y^1 \cos \beta \left(m' \pi y_1 / L_y^1\right) \right] \Big|_0^{L_y^1}}{-\left(k L_y^1 \cos \beta\right)^2 + \left(\pi m'\right)^2}$$

z_1 方向的積分亦可依此類推而得。

剩下的線性方程組求解過程與 3.1.2.2 節正入射時是一樣的，因而不贅述。

圖 3.2-11 給出了使用配置 2，當入射平面波的波陣面法線方向向量為 $[1, 1, 0]$ 且頻率為 300 Hz 時，由理論模型和有限元模型計算所得圖 3.2-1 所示軌跡線上的音壓級曲線。可以看到，雖然兩種方法計算所得音壓級曲線趨勢相似，但偏差較大，最高達 5 dB 左右。另外對於房間內軌跡線上的音壓級，波峰波谷甚至存在偏移。對應的相位曲線如圖 3.2-12 所示，可以看到由兩種方法計算所得的相位結果偏差較大。由於在有限元計算軟體使用者手冊和示例程式中僅給出平面波正入射的說明，而未說明斜入射所需要的具體參數設置 (COMSOL, 2008)，因而此處給出的有限元計算結果僅為初步結果，尚需進一步驗證其正確性。

當音場頻率增加時，計算過程中所需要的模態數量也將急劇增加，這將占用較多的計算資源，因此本模型只適用於低頻計算，有效計算頻率上限與模型尺度有關。以配置 1 為例，使用一台雙核 2.4 GHz、4 GB 記憶體電腦，計算頻率可以達到 600 Hz。

另外，本研究所提出的理論模型具有以下特點：(1) 在處理有限大空間與無限大自由場耦合的問題上，不同於虛擬音源法需要考慮多個音源，本研究所使用的半無限長波導管方法只需要考慮一個音源（平面波），因而在保證計算精度的前提下，其計算量比虛擬音源方法計算量要小；(2) 在 Nishimura 等提出的近似模型中，開口被當作剛性密閉壁面來考慮。由於未考慮窗戶與外部空間的耦合，因此其計算精度將受限，尤其是在開口處和開口面積相對於窗戶較大時的情況。在本研究所提出的近似模型中， $q_y = q_z = 1$ 和 $q_y = q_z = 10$ 時所得結果偏差不大，因此當取 $q_y = q_z = 1$ 時，其計算量比 Nishimura 等提出的近似模型計算量略高（即增加了空間 V_1 的計算量），但是由於考慮了窗戶與外界空間的耦合，其計算精度將比 Nishimura 等提出的近似模型的精度要高，尤其是在窗戶外開口 SSO 處。

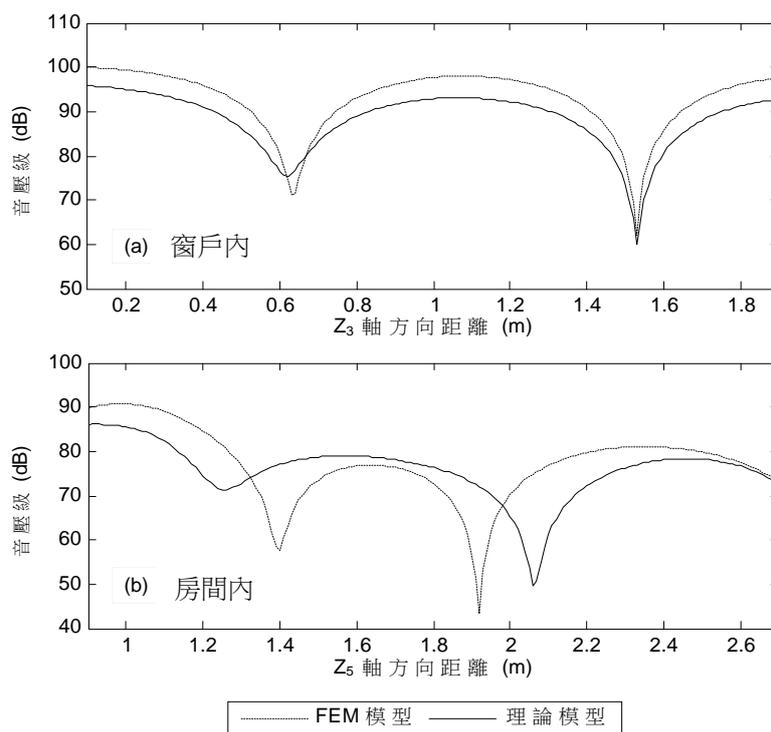


圖 3.2-11 當入射平面波的法線方向向量為 $[1, 1, 0]$ 且頻率為 300 Hz 時，由理論模型和 FEM 模型計算所得軌跡線上的音壓級曲線

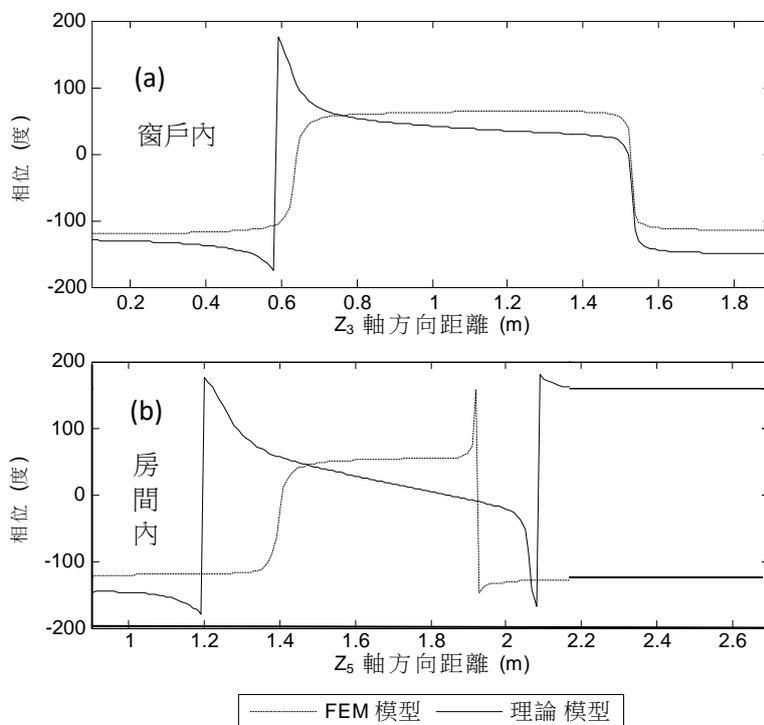


圖 3.2-12 當入射平面波的法線方向向量為 $[1, 1, 0]$ 且頻率為 300 Hz 時，由理論模型和 FEM 模型計算所得軌跡線上的音壓相位曲線

本研究所提出的近似模型中，由於外部空間被等效成半無限長的波導管，因而不能得到外部空間的實際音場。另外，由於僅考慮平面波正入射，因此該近似模型不適用於一些複雜的實際情況，例如：由城市街道兩側的建築物造成的多重反射或者散射聲入射等情況；或者是 SSO 開口面積相對於波長較大時而造成的 SSO 處入射聲波為非均勻的情況。

3.2.3 主動降噪的數值模擬研究

為進行主動降噪的數值模擬，使用 3.1.2.2 節和 3.1.2.3 節的模型計算出初級音場 P_{pe} （如令 $P_0 = 1$ ）和矩陣 Z_{se} （如令次級音源源強為 $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ ）；然後將 P_{pe} 和 Z_{se} 代入式 (3.1.50) 計算出最優次級音源源強 q_{os} ；最後再次使用 3.1.2.3 節的模型計算出最優次級音場，將其與初級音場 P_{pe} 相加即可得到主動控制後的總音場。將此總音場與初級音場進行對比，即可得到主動降噪系統的降噪效果。

在數值模擬過程中，模型尺寸為表 3.2-1 中的配置 1。初級音場由平面波從空間 V_1 正入射來建立。次級音源都當作放置於空間 V_3 的點音源來處理。誤差麥克風放置於 RSO 附近。監測點均勻分布於空間 V_5 內，相鄰監測點的間距為 0.05m ，此取值可以滿足 600 Hz 以下系統降噪量的分析需求。本研究只探討單通道和雙通道主動降噪系統。考慮到實際應用的可行性，誤差麥克風處的降噪量限定為 20 dB ，這可以透過調節式 (3.1.50) 中的 β 來實現。

3.2.3.1 單通道主動降噪系統

當 $N_c = N_e = 1$ 時，次級音源和誤差麥克風可能的布放位置如圖 3.2-13(a)和(b)所示，可以看到次級音源可以放在窗戶的底部（用字母 B 標記）、中間（M）或者是頂部（T）。每組水平位置又包括 2 個位置，分別為中間位置（C）和右邊位置（R）。誤差麥克風（E）可以放置於 RSO 底部或者頂部水平邊緣的中間位置。次級音源和誤差麥克風的位置代號如圖 3.2-13(b)所示。表 3.2-2 給出了每個位置對應的座標值。

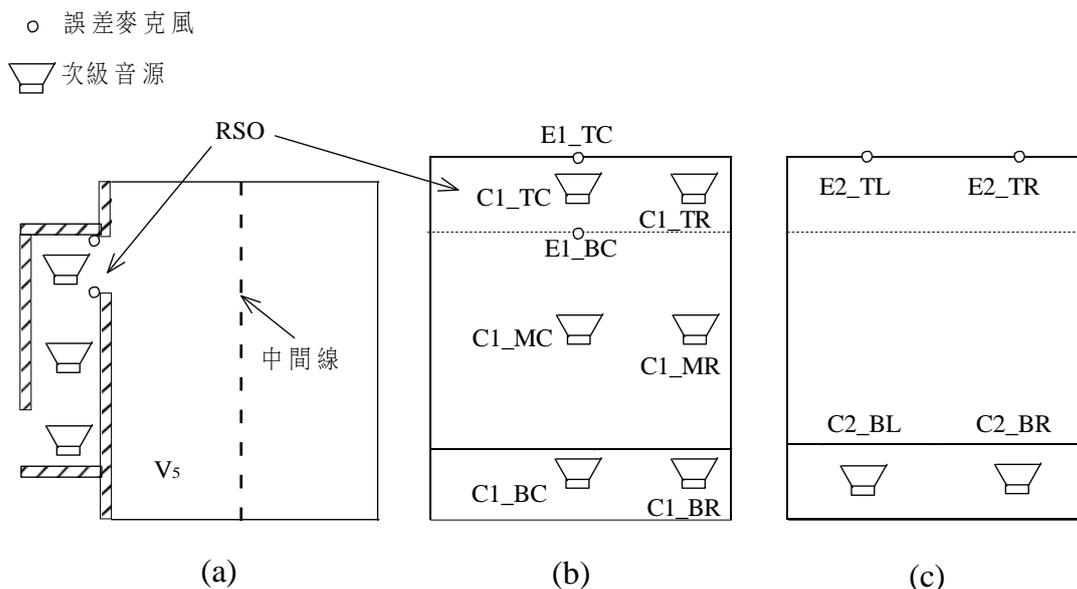


圖 3.2-13 數值模擬分析中主動降噪系統的配置示意圖

(a)截面圖；(b)單通道主動降噪系統的前視圖；(c)雙通道主動降噪系統的前視圖)

圖 3.2-14 給出了在以上配置下，由主動降噪系統獲得的新增降噪量曲線。當次級音源位於窗戶的右邊時，新增降噪量從 100 Hz 到 200 Hz 為 20 dB 左右。從 210 Hz 到 600 Hz，新增降噪量急劇下降至 20 dB 以下，如圖 3.2-14(a)和(c)所示。當次級音源位於窗戶的底部中間位置時 (C1_BC)，有效降噪頻段為 100 Hz 至 390 Hz，且此時新增降噪量保持在 20 dB 左右，如圖 3.2-14(b)所示。當次級音源位於窗戶的中部中間位置時 (C1_MC)，有效降噪頻段比次級音源位於位置 C1_BC 時要窄，為 100 Hz 至 340 Hz，如圖 3.2-14(d)所示。當次級音源位於窗戶的頂部時，新增降噪量隨頻率波動較大，並且噪音控制效果不是很好，如圖 3.2-14(e)和(f)所示。值得注意的是，在某些頻段，總音場甚至被放大，也就是新增降噪量為負值。由以上分析可得，對於單通道主動降噪系統，系統的最優配置為將次級音源放置於窗戶的底部中間位置。誤差麥克風位於位置 E1_TC 和 E1_BC 時所獲得的新增降噪量差別不大。

表 3.2-2 圖 3.2-13(b)之次級音源和誤差麥克風的座標值以及在 150、250、350 和 450 Hz 時主動降噪系統的新增降噪量

(其資料格式為：當誤差麥克風在(頂部水平邊緣)/(底部水平邊緣)時。其中 C1 表示一個次級音源；字母 B、M 和 T 分別代表窗戶底部、中間和頂部位置。字母 R 和 C 分別代表窗戶右邊和中間位置。字母 E 代表誤差麥克風)

配(位)置	座標值			新增降噪量(dB)			
	x_3 (m)	y_3 (m)	z_3 (m)	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
C1_BR	0.1400	0.2125	0.1000	19.4/19.7	-6.0/-6.0	-5.8/-5.9	8.2/9.6
C1_BC	0.1400	0.4250	0.1000	20.4/19.8	20.0/19.8	16.3/31.4	8.8/12.3
C1_MR	0.1400	0.2125	0.6350	14.0/14.2	-13.2/-13.2	-6.1/-6.3	1.4/-0.6
C1_MC	0.1400	0.4250	0.6350	21.0/21.9	22.1/27.8	1.8/5.4	9.3/12.8
C1_TR	0.1400	0.2125	1.1700	0.3/-4.6	-4.2/0.5	1.9/1.9	5.9/5.9
C1_TC	0.1400	0.4250	1.1700	5.1/12.3	-2.8/13.0	0.3/1.2	8.8/-18.0
E1_BC	0.2800	0.4250	1.0700	-	-	-	-
E1_TC	0.2800	0.4250	1.2700	-	-	-	-

資料說明：以配置 C1_BC 為例，在 250 Hz 時，當誤差麥克風分別位於 RSO 頂部和底部水平邊緣時，新增降噪量分別為 20.0 dB 和 19.8 dB。

自然通風窗戶中單通道主動降噪系統主要的降噪機理為音場匹配，也就是當次級音場和初級音場的分布相似時，只要降低誤差麥克風處的音壓，其他地方的噪音也可以得到有效的控制，反之則無法進行有效控制。以空間 V_5 內中間線所在 $y_5 - z_5$ 平面為例 ($x_5 = 1.5$ m，即圖 3.2-13(a)中所標中間線)，圖 3.2-15 給出了在 250 Hz 時，該平面內初級音場和優化後的次級音場音壓級分布情況（次級音源位於位置 C1_BR 或者 C1_BC）。可以看到，當次級音源位於位置 C1_BC 時，次級音場與初級音場匹配得很好。當次級音源位於位置 C1_BR 時，次級音場的形狀與初級音場的形狀差別較大。數值模擬結果表明，其他平面上的結果與中間線所在平面上的結果類似，在此不一一列舉。因此，在 250 Hz 時，當次級音源位於位置 C1_BC 時，噪音可以得到有效的控制，如圖 3.2-14(b)所示，而當次級音源位於位置 C1_BR 時，噪音得不到有效的控制，如圖 3.2-14(a)所示。

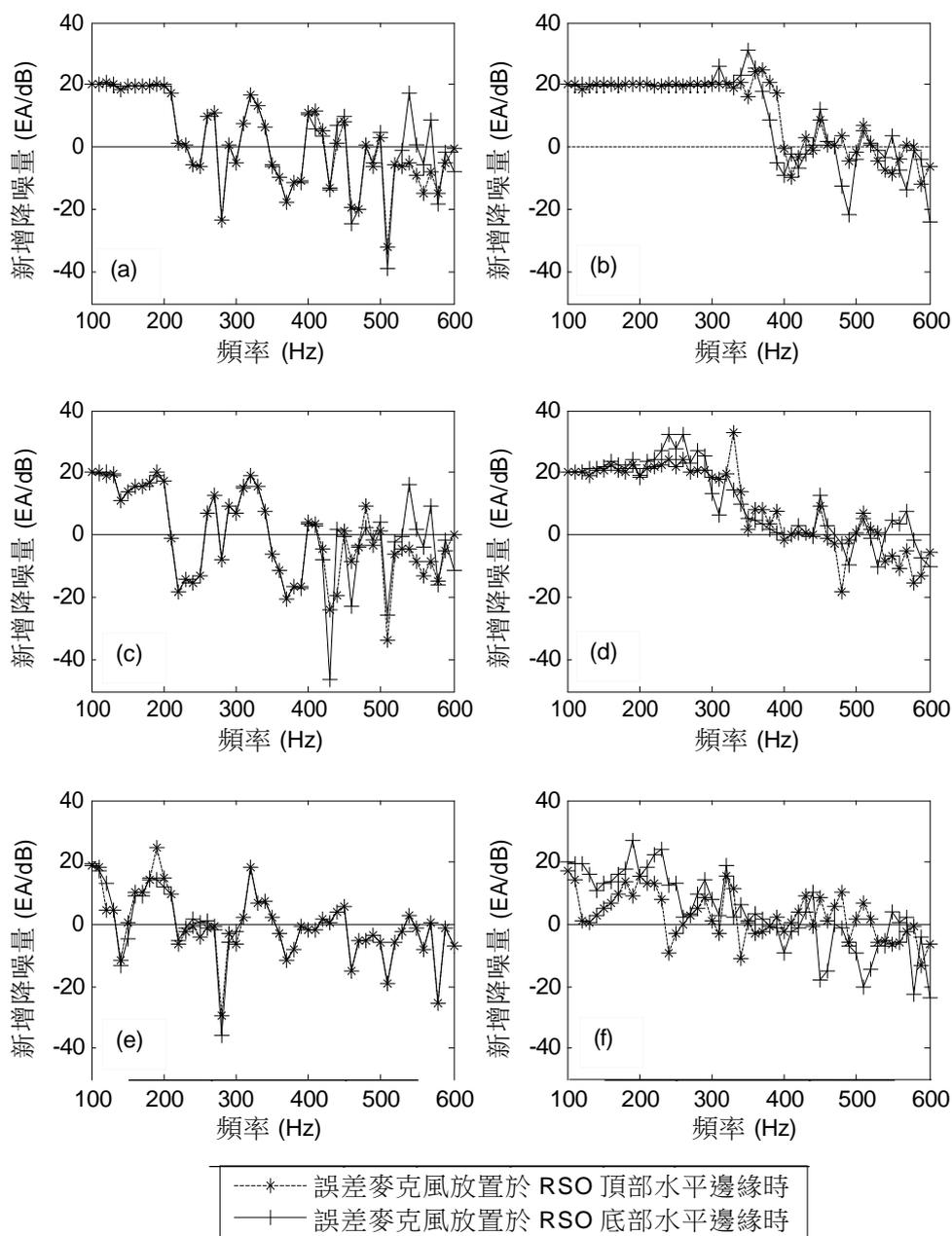


圖 3.2-14 使用單通道主動降噪系統獲得的新增降噪量曲線
 (次級音源分別位於位置：(a) C1_BR；(b) C1_BC；(c) C1_MR；(d) C1_MC；
 (e) C1_TR；或者(f) C1_TC)

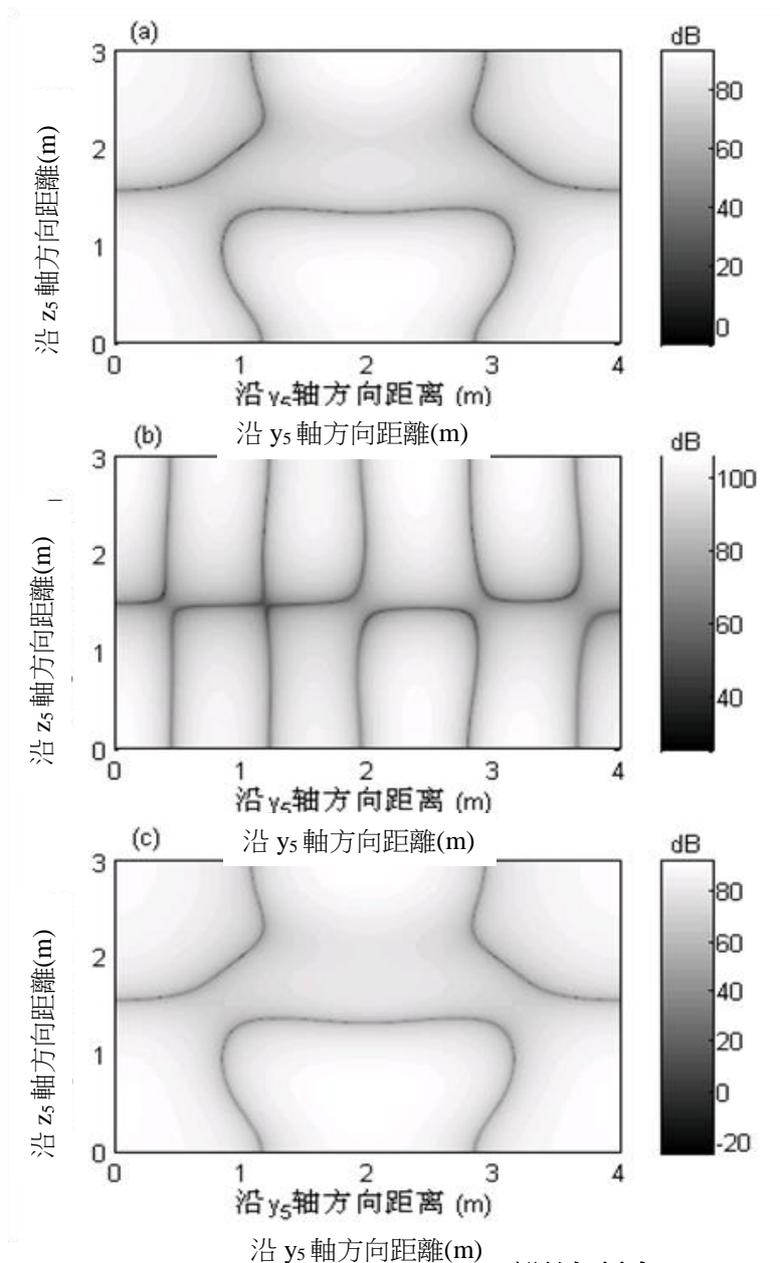


圖 3.2-15 250 Hz 時，空間 v_5 內中間線所在 y_5-z_5 平面 ($x_5=1.5m$) 上的音壓級分布圖

(a)初級音場；(b)次級音源位於位置 C1_BR 時的次級音場；
(c)次級音源位於位置 C1_BC 時的次級音場)

3.2.3.2 雙通道主動降噪系統

本節透過最優配置下的雙通道主動降噪系統研究多通道主動降噪系統在自然通風窗中的降噪效果。將次級音源均勻地布放於窗戶底部，而誤差麥克風被均勻

地布放於 RSO 的頂部水平邊緣，如圖 3.2-13(c)所示。表 3.2-3 給出了次級音源和誤差麥克風的座標。

圖 3.2-16 給出了使用雙通道主動降噪系統時獲得的新增降噪量曲線。可以看到，系統的有效降噪頻段為 100 Hz 到 410 Hz，此時新增降噪量保持在 20 dB 左右。

在 420 Hz 至 600 Hz 頻率範圍內，雖然新增降噪量隨著頻率變化而變化，但其數值基本上為正數，也即房間內噪音在一定程度上被降低。這說明雙通道主動降噪系統在此頻段內的性能要優於單通道主動降噪系統。與自由場類似，為了對噪音進行有效的控制，需要在一個波長內布放 2 個~3 個誤差麥克風（Zou et al., 2007）。可以觀察到，新增降噪量在 600 Hz 附近為負數。可能的原因是，當頻率變高時，波長變短，RSO 處的音場隨著位置不同變化加大，導致誤差麥克風位於音場節點的可能性也變大，因此即使誤差麥克風處的音壓被控制而降低，RSO 平面其他地方的音壓有可能變大，這將嚴重影響主動降噪系統的降噪性能。

表 3.2-3 圖 3.2-13(c)之次級音源和誤差麥克風的座標值以及在 150、250、350 和 450 Hz 時主動降噪系統的新增降噪量

（其中 C2 表示兩個次級音源；字母 B 代表窗戶底部位置。字母 R 和 C 分別代表窗戶右邊和中間位置。字母 E 代表誤差麥克風。）

配(位)置	座標值			新增降噪量(dB)			
	x_3 (m)	y_3 (m)	z_3 (m)	150 Hz	250 Hz	350 Hz	450 Hz
C2_BR	0.1400	0.2125	0.1000	20.3	20.0	19.8	4.2
C2_BL	0.1400	0.6375	0.1000				
E2_TR	0.2800	0.2125	1.2700				
E2_TL	0.2800	0.6375	1.2700	-	-	-	-

資料說明：以配置 C2_BR 和 C2_BL 為例，在 250 Hz 時，新增降噪量為 20.0 dB。

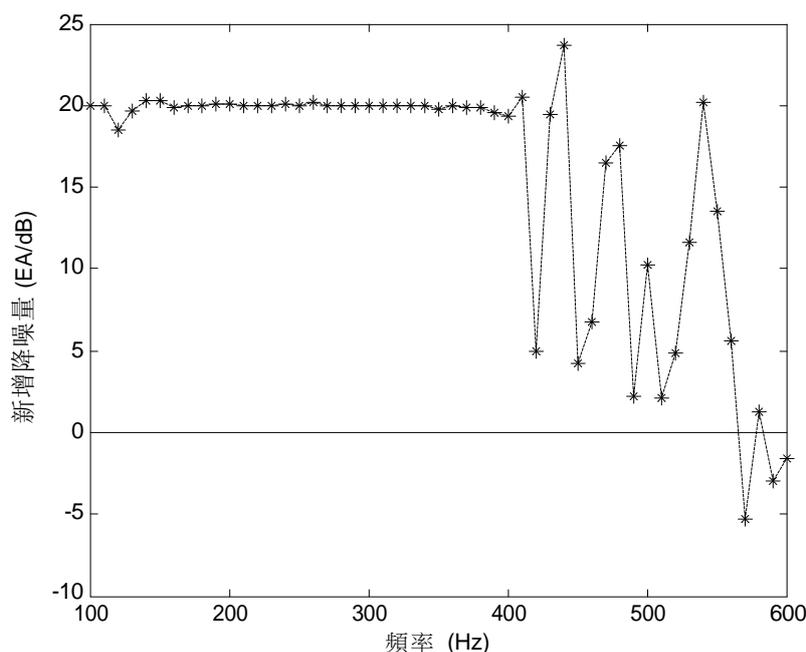


圖 3.2-16 使用如圖 3.2-13(c)中所示雙通道主動降噪系統所獲得的新增降噪量曲線

3.2.4 小結

本研究首先探討了等效波導管截面面積與模態截取階數對音場計算結果的影響，發現當波導管截面面積為 SSO 截面面積的 25 倍，模態截斷頻率為音場頻率的 7 倍時，可滿足本研究的計算精度要求；然後運用有限元方法對自然通風窗進行建模，將理論模型與有限元方法的計算結果進行了對比，結果表明兩者吻合得很好。

接著以單通道主動降噪系統為例，透過數值模擬研究了次級音源與誤差麥克風的布放位置對降噪效果的影響。最後以優化的雙通道主動降噪系統為例，研究了多通道系統的控制效果。

結果表明：當使用單通道系統時，次級音源最優配置為將其放置於窗戶底部中間位置，此時系統的有效降噪頻率上限為 390 Hz。當初級音場被有效控制時，監測點處的新增降噪量與誤差麥克風處的噪音衰減量是相同的。

當使用雙通道系統時，系統的有效降噪頻率上限為 410 Hz，另外在高於 410 Hz 的頻率處，初級音場始終可以得到一定程度上的衰減。這說明使用多通道系統可以增加系統的降噪效果。

第四章 陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源進行調查與量測

4.1 室內噪音相關研究與歷史回顧

4.1.1 預測研究回顧^[1,2]

室內噪音相關預測方法源於室內聲學、建築聲學的預測分析方法，最初有關於建築聲學的認識僅限於認識和實踐經驗，直到 1900 年 W.C.Sabine 發表了關於「迴響」的論文，詳細分析了封閉立方體室內的吸音與定義房間「迴響時間」之間的重要關係，提出了著名的 Sabine 公式。這是室內聲學、建築聲學研究史開創性的里程碑，其中迴響的概念與 Sabine 公式直到現在仍然是室內聲學經典理論的基礎，迴響時間這一參數至今仍是室內噪音預測中最重要的參數之一。

自 Sabine 之後到 20 世紀 50 年代前，與室內音品相關的建築聲學研究主要集中在 4 個方面：(1)改進迴響時間的計算；(2)改進測試技術；(3)研究材料的吸音性能；及(4)探索最佳迴響時間。20 世紀 20 年代末到 30 年代初，有人將統計學方法用於迴響時間的計算並獲得了成功，其中最著名的是 C.Eyring 公式。1932 年 V.O.Knudsen 出版《建築聲學》一書，著重從室內音品和隔音兩個方面來研究建築聲學；研究室內音品圍繞的是最佳迴響時間指標，而研究隔音則是以「品質定律」為基礎，逐漸更多地側重於室內噪音的控制。P.M.Morse 於 1936 年出版《振動與聲》，主要用波動理論來分析室內音傳播的規律，提出了密閉空間的簡正模式和簡正頻率等重要概念，並解釋了低頻音在密閉空間內音場分布的不均勻性和隨時間衰減的不規則，Morse 的理論成為後來室內波動聲學研究與發展的基礎。《建築聲學》和《振動與聲》兩書的出版代表著建築聲學已成為一門系統性學科，這些與建築聲學相關的早期研究也是現代室內噪音預測方法的基礎。

從 20 世紀 50 年代起，室內聲學中提出了對聲脈衝相應的研究。1951 年，H.Haas 發現從聽覺上可以分辨具有一定強度延時大於 35 ms 的聲音，但其方向仍在未經延時的音源方向，只有延時大於 50 ms 時，第二音源才能被聽到，此即為著名的「Haas 效應」，它的出現使迴響時間不再是評估室內音品的唯一指標。

在所有提出的音品指標中，有一類是從時域上求出音能比，即把直達音以及在 50 ms 內到達的反射音稱為早期音，而把餘下的反射音稱為迴響音，並定義出早

期音與迴響音的音能比。這類指標包括：1950 年 L.L.Beranek 和 T.J.Schultz 提出的迴響音能對早期音能的比值（後來兩人將該比值的對數的 10 倍定義為「行進活躍度 R」）；1953 年 R.Thiele 提出清晰度 D 這一指標；1969 年，L.Cremer 與 Kürer 建議並提出「能量重心到達時間」的指標概念，稱為「重心時間」。

另一類指標是與迴響時間相類似的用於描述穩定音能衰變規律的指標，其中最重要的是 V.L.Jordan 於 1975 年提出的指標：「早期衰變時間」(EDT)，該指標定義為根據穩定音能衰減 10 dB 的衰變率推出的迴響時間；這類指標均與迴響時間相關，並不能作為單獨的指標進行評估。

到 20 世紀 60 年代末，人們認識到側向反射音能對於聽覺空間感的重要性。這是室內聲學研究的一個重大進展，意味著室內反射音的研究從時域發展到三維空間。這方面最早於 1966 年由 Schroeder 等人在紐約菲哈莫尼音樂廳內測量發現；緊接著，H.Marshall 發現第一個反射音若來自側向則對音品有好處；M.Barron 與 P.Damaske 於 60 年代末至 70 年代初進行了相關系統研究，其證實早期側向反射音與良好的音樂空間感有關。以此為基礎，科學家進一步提出若干與空間感有關的物理指標，較重要的是由 V.L.Jordan、M.Barron 分別提出的「側向能量因數」(LEF) 和由 Gottlob 於 1973 年提出的「雙耳相關係數」(IACC)。LEF 定義為早期側向音能 (5 ms~80 ms) 占早期總音能的比重；IACC 是雙耳之間聲音信號差異性的衡量指標，其確定方法為使用 2 個麥克風在聽者耳道入口處測量音場，再用對應的計算程式計算測量聲音不一致的程度，IACC 越低則空間感越好。這一階段出版了一系列重要的建築聲學著作，包括：1950 年 V.O.Knudsen 與 C.M.Harris 的《建築中的聲學設計》；1954 年 L.L.Beranek 的《聲學》；1949~1961 年 L.Cremer 的《室內聲學的科學基礎》。

同一時期，室內聲學（不局限於噪音）的數位預測、模擬技術逐步發展，最早有 1958 年 C.J.Allred 和 A.Newhouse 發表的用蒙特卡羅法計算音線在介面上碰撞機率的文章；1968 年挪威的 A.Krokstad 等人首次發表關於用音線追蹤法 (Rays Tracing Technique, RTT) 模擬室內音場的文章。室內音場電腦數字模擬技術在 20 世紀 70 年代開始蓬勃發展，1972 年 B.M.Gibbs 和 D.K.Jones 發表了利用虛音源法 (Image Source Method, ISM) 模擬室內音場的論文，此後該領域沿著兩個方向進行發展：一是利用電腦試驗來研究室內聲學，對經典理論加以驗證；二是致力於預測模擬技術實用化，用於指導室內聲學設計。

20 世紀 80 年代，Hodgson^[3]、Jovicic^[4]、Lindqvist^[5]和 Kurze^[6]等人使用 ISM 計算了大型廠房空間內的音場分布，並發現這類空間內的音場分布不滿足擴散場條件，經典室內聲學理論不再適用；1982 年，A.Kulowski 詳細討論了 RTT 的使用誤差^[7]，而 J.Borish^[8]在 1984 年則將之前的簡單 ISM 推廣至室內具有任意多面體的情形。

1987 年，Kirszenstein^[9]基於 ISM 開發出一種電腦模型，考慮了音源輻射的指向性，用於矩形房間內的音場分析與模擬；R.N.S.Hammad^[10]使用 ISM 提出的電腦模型則既可用於預測任意個音源在矩形或立方體房間內的音場分布，也可用於房間的側牆或天花板出現傾斜的情況。

1989 年，A.M.Ondet 和 J.L.Barbry 開發出基於 RTT 的室內音場預測程式 RAYCUB^[11]；之後 M.Hodgson^[12]、H.A.Akil^[13]和 R.M.Windle^[14]在各自工作中分別使用該程式進行預測計算，結果表明 RAYCUB 具有當時同類軟體中最高的準確度。

到了 90 年代，S.M.Dance 在室內音場電腦預測計算模型等方面做了大量工作^[15,16]，並以 RAYCUB 為基礎開發出加入音源指向性的程式 RAYCUB-DIR 和加入 Kurze 聲繞射模型^[17]的程式 RAYCUB-DIR REDIR^[18]。同時，以相干虛源法（Coherent Image Source Method, CISM）模型為核心，S.M.Dance 發展了計算程式 CISM 用於計算非擴散密閉空間內的音場分布，並加以了驗證^[19]。

1992 年，丹麥技術大學聲學技術實驗室的 G.M.Naylor^[20]提出了一種新的計算軟體 ODEAN 用於室內音場的預測計算。ODEAN 的演算法中將類比分成早期反射音和後期反射音兩部分進行，綜合吸收了 ISM 和 RTT 的優點，同時考慮了音的波動性，並引入了散射反射的理論模型，至今應用很廣。

到了 1995 年，A.Farina 在 RTT 基礎上優化出三角錐追蹤法（Pyramid Tracing Technique, PTT），並對應開發有計算模型 RAMSETE^[21]，該方法很大程度上簡化了 RTT 的音線優選運算，節省了更多的運算資源。

90 年代末至今，室內音場電腦數字模擬領域著重考慮擴散問題和室內音場的聽覺模擬（Auralisation）研究。1996 年，Y.W.Lam^[22]對比了三種散射、反射模型應用於室內音場電腦數字模擬，指出由於表面的有限尺度引起的散射更多的反映在低頻部分，而由表面的不規則性引起的散射則更多的反映在高頻部分。而聽覺模擬的基本原理是將一個在消音室內錄製的信號（音樂或語言信號）輸入一個數位濾波器進行調製，而該濾波器具有與所研究房間相同的脈衝回應，用數學來描

述即為將原始聲信號與脈衝回應進行卷積運算，調製之後的聲信號再使用揚聲器重放，則聽者可預聽到房間的聲學效果。為儘可能逼真，數位濾波器不僅需類比房間本身的聲學特性，還要模擬人的頭部和外耳對聲信號的影響，即要包括人頭和外耳的傳遞函數，此部分可透過對人工頭的測量得到。

綜上所述，雖然室內噪音相關的預測方法在這 100 多年裡從無到有，並有了巨大的進展，形成了波動聲學、幾何聲學、統計聲學等理論分析方法，音線法、虛源法、有限元素、統計能量分析等數值模擬方法，提出了迴響時間、早期音能比、早期衰變時間等一系列描述室內噪音場的參量，能夠對室內噪音進行初步的預測，但還不存在一個能完全準確預測室內噪音的方法。室內音源的時空複雜性和室內聲學結構的多樣性導致完全準確預測需要巨大的計算和儲存量，包括大量的、準確的輸入參數。

4.1.2 管制歷史回顧

對室內噪音的管制，起初乃源於對環境噪音、社區噪音（Community Noise）的認識與管制。

現代工業與交通的發展引發的噪音污染從 20 世紀 50 年代末開始逐漸受到人們的重視，在 60 年代末到 70 年代初，一些開發國家開始制定法令法規對噪音污染進行限制。德國先後在 1965 年～1971 年頒布有《建築噪音法》、《噪音技術導則》與《飛機噪音法》^[23]，並於 1974 年開始頒布《聯邦噪音輻射防治法》及其配套的若干實施細則，包括：割草機、建築機械、交通設施、運動設備等的噪音輻射標準^[23]；美國於 1968 年頒布「The Aircraft Noise Abatement Act」（《飛機噪音減輕法》）^[24]，並於 1970 年成立噪音減輕和控制辦公室（ONAC），同年頒布「The Occupational Safety and Health」（《職業安全和健康法案》）^[24]，緊接著於 1972 年由國會通過了「The Noise Control Act」（《噪音控制法》）^[24]，其修正法「Quiet Communities Act」（《寧靜社區法》）^[24]在 1978 年頒布實施。

1972 年，第一屆國際噪音會議（The INTER-NOISE Congress）在美國華盛頓召開，之後至今每年在世界各地舉辦一次，其為一齊聚國際噪音控制領域專家的盛會；1974 年，環境聲學這一術語在第八屆國際聲學會議（International Conference of Acoustic）上被正式使用，研究方向包括：研究聲音的產生、傳播和接收，及其對人體產生的生理、心理效應；研究改善和控制音環境品質的技術和管理措施；

這兩起重要事件表示著噪音控制與研究領域的學術化與國際化。

幾乎同一時期，室內噪音相關的評估與管制開始出現。1957年，L.L.BeraneK 制定 NC 曲線用於評估室內的語言干擾及舞臺演出的音響效果^[25]，並於 1971 年修改為 PNC (Preferred Noise Criterion) 曲線^[26]；同一時期相類似的 NR 曲線、BNC (Balanced Noise-Criterion) 曲線也由 L.L.BeraneK 提出^[27]。之後 NC 曲線、NR 曲線被國際標準化組織 (ISO) 推薦用於室內場合穩定背景噪音的評估，並可參考作為室內的背景噪音限值。1974 年美國環保局發表文章《在留有適當安全餘量前提下為保護公眾健康和福利所需的環境噪音水準》^[24]，其中提出了人員活動不致受到干擾、造成煩惱所要求的室內噪音水準，並對應不同室內區域給出了不同要求。1971 年英國標準《聲學.測量由電腦和辦公裝置發出的高頻噪音》(BS G 212-1971) 對室內電腦噪音限值與測量方法做出規定。20 世紀 80 年代，國際上室內噪音的管制體系開始形成，主要體現在室內噪音限值標準和室內用品噪音輻射標準兩個層次標準體系的形成與完善。1981 年德國通過標準《干擾噪音影響下工作場所的語言清晰度》(DIN 33410-1981) 對辦公室內各種語言清晰度要求對應的干擾噪音級進行了規定；而 1987 年澳大利亞標準「Acoustics - Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors」(《建築內部推薦的設計聲級與迴響時間》，AS 2107-1987) 和 1988 年中國制定的《民用建築隔音設計規範》(GBJ118-88) 則提出了各種室內場所內的音壓級及迴響時間要求。

1984 年中國標準《家用電器噪音聲功率級的測定》(GB/T 4214-1984) 給出了家用電器噪音測量方法；而中國標準《家用電冰箱噪音測量方法及限值》(JB 4017-1985)、德國標準《電熱水器.額定容量為 1000 升以內.低噪音結構的條件》(DIN 44899-6-1986)、英國標準《測定和檢驗機械和設備固定噪音傳播值的統計方法》(BS 6805-1987)、法國標準《聲學.電腦和商業設備發出的噪音申報值》(NF S31-112-1988) 以及 ISO 制定的《聲學.測量由電腦和辦公裝置發出的高頻噪音》(ISO 9295-1988) 與《聲學.電腦和辦公設備的申報噪音發射值》(ISO 9296-1988) 等等則對應各類室內設備提出了噪音限值與測量標準。

到 20 世紀 90 年代至今，國際上室內噪音的管制體系逐步趨於完善，這期間制定的相應法規標準具代表性的有：ISO 標準「Cinematography-Background acoustic noise levels in theatres, review rooms and dubbing rooms」(《電影技術.影院.審片室和配音室中的背景噪音級》ISO 9568-1993)、英國建築規範「The Acoustic design of

schools」(《學校聲學設計》，British Building Bulletin 93) 和英國標準「Sound insulation and noise reduction for buildings」(《建築隔音與降低噪音》，BS 8233:1999)。世界衛生組織 (WHO) 在 1995 年發布「Community Noise」(《社區噪音》)，並在此基礎上於 1999 年發布「Guidelines for Community Noise」(《社區噪音指南》)，對多種室內場合提出噪音限值建議指標與管制指南。

總而言之，室內噪音的管制重點目前仍是社會管理與噪音控制相結合的管制體系。如何對室內噪音進行有效的管制是一個目前值得研究的問題，其中包括：標準的制定、各個噪音源的鑒別、新噪音源引入的規則和流程等，這涉及到心理聲學、建築聲學、噪音控制等許多領域。

4.2 彙整研析不同國家住宅區音量品質相關指標、標準或建議值

4.2.1 世界衛生組織^[28]

一、簡介

世界衛生組織 (World Health Organization, 以下簡稱 WHO) 於 1999 年公布「社區噪音指南 (Guidelines for Community Noise)」並列出了環境噪音指引值 (Guideline Values)，這些基本上是噪音暴露引起的健康影響的值。對於每種環境和情況，指引值都會考慮已識別的健康影響，並根據影響健康的最低噪音量 (臨界健康影響, Critical Health Effect) 而訂定。

二、具體影響：睡眠障礙的影響

電生理學和行為學方法已經證明室內連續性和間歇性噪音都會導致睡眠障礙。背景噪音越強烈，它對睡眠的影響就越大。對睡眠的可測量影響始於約 30 dB 的 L_{Aeq} 的背景噪音量。生理影響包括睡眠階段模式的變化，尤其是快速動眼期睡眠 (Rapid Eye Movement Sleep, REMS) 睡眠比例的降低。還發現了主觀效果，例如：入睡困難、感知的睡眠品質以及頭痛和疲勞等不良後遺症。敏感群體主要包括：老年人、輪班工作者及身體或精神障礙患者。

在噪音為「連續性」的情況下，如果要避免對睡眠產生負面影響，則在室內之均能音量不應超過 30 dB(A)。當噪音由大部分「低頻」聲音組成時，WHO 建議使用更低的指引值，因為即使在低音壓級下，低頻噪音 (例如：來自通風系統) 也會擾亂休息和睡眠。

如果噪音具有「不連續性」，則使用 L_{Amax} 或 SEL (噪音暴露量, Sound Exposure

Level) 來指示噪音誘發喚醒的概率，已經在 45 dB 或更低的單一 L_{Amax} 暴露下觀察到此現象。因此，重要的是限制 L_{Amax} 超過 45 dB 的噪音事件之數量。因此，指引值應基於 30 dB 的 $L_{Aeq,8h}$ 和 45 dB 的 L_{Amax} 的組合。為了保護敏感人群，當背景音量較低時，優選更低的指引值。間歇性噪音事件引起的睡眠干擾隨著最大音量而增加，即使總均能音量相當低，具有高的最大音量之少量噪音事件也會影響睡眠。因此，為避免睡眠干擾，「社區噪音指南 (Guidelines for Community Noise)」應以均能音量、 L_{Amax} / SEL 及噪音事件數表示。

三、特定環境：住宅

在住宅中，噪音的關鍵影響是睡眠、煩惱及語音干擾。為了避免睡眠干擾，臥室的指引值對於「連續性」噪音為 30 dB 的 L_{Aeq} ，對於「單一」噪音事件為 45 dB 的 L_{Amax} 。根據噪音源的性質，較低的噪音量可能很煩人。應在儀器設置為“快特性”時，測量最大音壓級。

為了保護大多數人在白天不被「嚴重」煩擾，陽台、露台及戶外生活區域的穩定、連續性噪音的音壓級不應超過 55 dB 的 L_{Aeq} 。為了保護大多數人在白天不會受到「適度」的煩惱，室外音壓級不應超過 50 dB 的 L_{Aeq} 。這些值是基於煩惱度研究，但歐洲大多數國家採用 40 dB 的 L_{Aeq} 作為新開發項目的最大允許噪音量 (Gottlob 1995)。實際上，應儘可能將較低的值視為所有新開發項目的最大允許音壓級。

在夜間，生活空間室外牆面的音壓級不應超過 45 dB 的 L_{Aeq} 和 60 dB 的 L_{Amax} ，以便人們可以在臥室窗戶打開時睡覺。這些值是透過假設窗口「部分打開」時，從室外到室內的噪音降低為 15 dB 而獲得的。

四、WHO 指引值

表 4.2-1 中的 WHO 指引值是根據特定環境而訂。當針對給定環境識別出多種不良健康影響時，指引值被設置在最低不利健康影響 (臨界健康影響) 的噪音量。噪音對健康的不良影響是指與噪音接觸有關的生理、心理或社會功能的任何暫時或長期惡化。指引值表示影響所列環境中暴露數量最多的受體之音壓級。

「白天 (Daytime)」和「夜間 (Night-Time)」的 L_{Aeq} 時段基準分別為 16 小時和 8 小時；「晚上 (Evenings)」則沒有單獨的時段基準，但通常其指引值應比白天 12 小時低 5 dB~10 dB。根據活動情況，建議其他時段基準用於學校、學前

班及遊樂場。

有關噪音對健康的不利影響，以現有知識足以提出以下的噪音指引值：

- (一)煩惱。
- (二)語音清晰度和通信干擾。
- (三)信息提取的干擾。
- (四)睡眠障礙。
- (五)聽力受損。

不同的健康影響與特定環境相關，並且針對每種環境提出了噪音的指引值。

這些是：

- (一)住宅，包括：臥室和戶外生活區。
- (二)學校及幼兒園，包括：睡覺和室外遊樂場的房間。
- (三)醫院，包括：病房和治療室。
- (四)工業、商業購物及交通區域，包括：公共場所、室內和室外。
- (五)室內和室外的儀式、節日及娛樂活動。
- (六)透過耳機播放音樂及其他聲音。
- (七)來自玩具、煙火和槍械的脈衝音。
- (八)戶外公園及保護區。

僅基於能量總和（例如： L_{Aeq} ）來表示環境噪音的噪音測量或指標是不夠的，因為不同的健康影響需要不同的描述。因此，重要的是顯示噪音波動的最大值並與噪音事件的數量相結合，需要對夜間噪音暴露進行單獨表示。對於室內環境，殘響時間也是一個重要因素。如果噪音包含大部分的低頻成分，則應使用更低的指引值。

表4.2-1 世界衛生組織WHO之特定環境的噪音指引值^[28]

Specific environment	Critical health effect(s)	L _{Aeq} [dB]	Time base [hours]	L _{Amax,fast} [dB]
Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening	55	16	-
	Moderate annoyance, daytime and evening	50	16	-
Dwelling, indoors	Speech intelligibility and moderate annoyance, daytime and evening	35	16	
Inside bedrooms	Sleep disturbance, night-time	30	8	45
Outside bedrooms	Sleep disturbance, window open (outdoor values)	45	8	60
School class rooms and pre-schools, indoors	Speech intelligibility, disturbance of information extraction, message communication	35	during class	-
Pre-school Bedrooms, indoors	Sleep disturbance	30	sleeping-time	45
School, playground outdoor	Annoyance (external source)	55	during play	-
Hospital, ward rooms, indoors	Sleep disturbance, night-time	30	8	40
	Sleep disturbance, daytime and evenings	30	16	-
Hospitals, treatment rooms, indoors	Interference with rest and recovery	#1		
Industrial, commercial, shopping and traffic areas, indoors and Outdoors	Hearing impairment	70	24	110
Ceremonies, festivals and entertainment events	Hearing impairment (patrons:<5 times/year)	100	4	110
Public addresses, indoors and outdoors	Hearing impairment	85	1	110
Music through headphones/ Earphones	Hearing impairment (free-field value)	85 #4	1	110
Impulse sounds from toys, fireworks and firearms	Hearing impairment (adults)	-	-	140 #2
	Hearing impairment (children)	-	-	120 #2
Outdoors in parkland and conservation areas	Disruption of tranquillity	#3		

#1: as low as possible;

#2: peak sound pressure (not L_{Amax, fast}), measured 100 mm from the ear;

#3: existing quiet outdoor areas should be preserved and the ratio of intruding noise to natural background sound should be kept low;

#4: under headphones, adapted to free-field values.

4.2.2 中國大陸^[29]

中華人民共和國國家標準《聲環境質量標準》(GB 3096—2008)為國家環境品質標準，由環境保護部國家質量監督檢驗檢疫總局發布，本標準由縣級以上人民政府環境保護行政主管部門負責組織實施。按有關法律規定，以上標準具有強制執行的效力，自2008年10月1日起實施，本標準係代替《城市區域環境噪音標準》(GB 3096—93)和《城市區域環境噪音測量方法》(GB/T 14623—93)。於附錄C並提出了聲環境功能區監測和噪音敏感建築物監測的要求，其中有關室內噪音限之規範，係規定將門窗皆打開之狀況下，將室外標準減10 dB(A)作為室內音量標準。各類聲環境功能區適用表4.2-2規定的環境噪音均能音量限值並將相關內容摘錄如下。

表 4.2-2 中國大陸《聲環境質量標準》之室外環境噪音 L_{eq} 限值^[29]

音量單位：dB(A)

聲環境功能區類別	時段	
	日間	夜間
0 類	50	40
1 類	55	45
2 類	60	50
3 類	65	55
4 類	4a 類	70
	4b 類	70

註：1.4b類聲環境功能區環境噪音限值，適用於2011年1月1日起環境影響評價文件通過審批的新建鐵路（含新開廊道的增建鐵路）幹線建設專案兩側區域。

2.在下列情況下，鐵路幹線兩側區域不通過列車時的環境背景噪音限值，按日間70 dB(A)、夜間55 dB(A)執行：(a)穿越城區的既有鐵路幹線；(b)對穿越城區的既有鐵路幹線進行改建、擴建的鐵路建設項目。既有鐵路是指2010年12月31日前已建成運營的鐵路或環境影響評價文件已通過審批的鐵路建設專案。

3.各類聲環境功能區夜間突發噪音，其最大音量超過環境噪音限值的幅度不得高於15 dB(A)。

根據《中華人民共和國環境噪音污染防治法》，「日間」是指06:00至22:00之間的時段；「夜間」是指22:00至次日06:00之間的時段。縣級以上人民政府為環境噪音污染防治的需要（如：考慮時差、作息習慣差異等）而對日間、夜間的劃分另有規定的，應按其規定執行。

按區域的使用功能特點和環境品質要求，聲環境功能區分為以下5種類型：

- 0類聲環境功能區：指康復療養區等特別需要安靜的區域。
- 1類聲環境功能區：指以居民住宅、醫療衛生、文化教育、科研設計、行政辦公為主要功能，需要保持安靜的區域。

- 2 類聲環境功能區：指以商業金融、集市貿易為主要功能，或者居住、商業、工業混雜，需要維護住宅安靜的區域。
- 3 類聲環境功能區：指以工業生產、倉儲物流為主要功能，需要防止工業噪音對周圍環境產生嚴重影響的區域。
- 4 類聲環境功能區：指交通幹線兩側一定距離之內，需要防止交通噪音對周圍環境產生嚴重影響的區域，包括：4a 類和 4b 類兩種類型。4a 類為高速公路、一級公路、二級公路、城市快速路、城市主幹路、城市次幹路、城市軌道交通（地面段）、內河航道兩側區域；4b 類為鐵路幹線兩側區域。

附錄 C（規範性附錄）噪音敏感建築物監測方法

C.1 監測目的

瞭解噪音敏感建築物戶外（或室內）的環境噪音量，評價是否符合所處聲環境功能區的環境質量要求。

C.2 監測要求

監測點一般設於噪音敏感建築物戶外。不得不在噪音敏感建築物室內監測時，應在門窗全打開狀況下進行室內噪音測量，並採用較該噪音敏感建築物所在聲環境功能區對應環境噪音限值低 10 dB(A) 的值作為評價依據。

對敏感建築物的環境噪音監測應在周圍環境噪音源正常工作條件下測量，視噪音源的運行工況，分晝、夜兩個時段連續進行。根據環境噪音源的特徵，可優化測量時間：

(a) 受固定噪音源的噪音影響

- 穩態噪音測量 1 min 的均能音量 L_{eq} 。
- 非穩態噪音測量整個正常工作時間(或代表性時段)的均能音量 L_{eq} 。

(b) 受交通噪音源的噪音影響

- 對於鐵路、城市軌道交通（地面段）、內河航道，晝、夜各測量不低於平均運行密度的 1h 均能音量 L_{eq} ，若城市軌道交通（地面段）的運行車次密集，測量時間可縮短至 20min。
- 對於道路交通，晝、夜各測量不低於平均運行密度的 20min 均能音量 L_{eq} 。

(c) 受突發噪音的影響

- 以上監測對象夜間存在突發噪音的，應同時監測測量時段內的最大音量 L_{max} 。

C.3 監測結果評價

以晝間、夜間環境噪音源正常工作時段的 L_{eq} 和夜間突發噪音 L_{max} 作為評價噪音敏感建築物戶外（或室內）環境噪音水準，是否符合所處聲環境功能區的環境質量要求的依據。

4.2.3 新加坡^[30]

隨著新加坡繼續發展其住宅、商業和交通基礎設施，建築和其他相關工作引起的噪音影響是不可避免的。國家環境局（National Environment Agency, NEA）根據噪音限值來管制「施工現場」和「工業運營」的噪音量，還制定了「車輛噪音排放」標準，即共有 3 種類之室外噪音管制標準，但未包括室內噪音之管制。

國家環境局（NEA）為新車和既有車輛設定了噪音排放標準；陸路交通管理局（Land Transport Authority, LTA）規範對車輛的修改。超過噪音管制標準通常是由於對車輛進行非法的改裝。此外，陸路交通管理局（LTA）要求車輛在授權的車輛檢查中心進行強制性定期檢查，以便更新道路稅，同時確保它們不會被非法改裝並且不會產生過大的噪音。

陸路交通管理局（LTA）、交通警察和國家環境局（NEA）定期聯合執法，打擊非法改裝車輛，包括：通過陸路入境檢查站進入新加坡的外國摩托車。此外，還向馬來西亞當局報告了非法改裝和非本國高噪音車輛的執法行動。

於建築物室內音量方面，新加坡建設局（Building and Construction Authority）於 2012 年 10 月發布最新第三版之「建築物環境永續規範（The Code for Environmental Sustainability of Buildings, 3rd Edition）」。本規範之目的是為建築物的規劃、設計和建造制定環境友善做法，這將有助於減輕建築結構對環境的影響。本規範規定了建築物的最低環境永續標準和行政要求。它在很大程度上採用了新加坡建築與營造署綠色標章（Building and Construction Authority Green Mark）的準則作為評估建築開發環境績效的方法。而 BCA Green Mark 為綠色建築分級系統以評估建築物環境衝擊與績效。該方法由國家環境局（NEA）認可與支持，提供一綜合性架構以評估新建築與現有建築的總環境績效，以促進建築物的永續設計、營造及操作實務。評估準則涵蓋重點：能源效率、水效率、環境保護、室內環境品質及其他綠色特點與創新。

表 4.2-3 為有關建物內部噪音量之環境品質要求，以 A 加權均能音量作為評估

指標，日間（上午 6 點至晚上 10 點）為 55 dB(A)；夜間（晚上 10 點至翌日早上 6 點）為 45 dB(A)。

表4.2-3 新加坡建設局之室內環境音量品質要求^[30]

目標	設計考量到住宅單元內潛在的噪音量須保持在適當的程度。
適用性	一般適用於所有建築開發。
要求	<p>如果建築物設計達到規定的建物內部噪音量，則可以得到 1 分的積分：</p> <ul style="list-style-type: none"> •55 dB（上午 6 點至晚上 10 點）L_{eqA} •45 dB（晚上 10 點至翌日早上 6 點）L_{eqA} <p>對於靠近交通繁忙、高架公路或高速公路的道路的開發項目，有必要由聲學顧問進行詳細的分析。只有在實施聲學顧問的建議時，才能對積分進行評分。</p>

資料來源：新加坡建設局 2012 年 10 月公布之 The Code for Environmental Sustainability of Buildings, 3rd Edition，第 93 頁。

本建築物環境永續規範並非旨在減少有關當局管理的其他適用法律、法規或政策中包含的安全、健康、環境或相關要求。如果本規範的要求與影響建築物設計和建造的其他法律之間存在衝突，則優先權應由有關當局確定。

4.2.4 日本^[31]

環境省（Ministry of the Environment Government of Japan）制定噪音環境品質標準（Environmental quality standards for noise, Environment Agency Notification No. 64, September 30, 1998），而對於每種區域類型和時間類別，縣政府應指定每種區域類型應用的區域。

其中規定不管該區域是面臨 2 線道或多線道之地區，只要該地區鄰接道路具有交通動脈流量（Arterial Traffic）則其標準值須提高 5 dB(A)，其標準如表 4.2-4 所示。而其附註提到，若評價室內噪音，則於室內最受室外噪音影響的一側關上窗戶時，其室內標準為日間 45 dB(A)；夜間為 40 dB(A)，即建築物牆面關窗之隔音量假設為 25 dB(A)。

表4.2-4 日本環境省之面臨交通動脈流量地區之室外噪音標準^[31]

Standard values	
Daytime	Nighttime
70 dB or less	65 dB or less

Note : Standards for indoor noise transmitted from the outside (45 dB or less for daytime, and 40 dB or less for nighttime) can be applied for the respective residences whose windows are judged as usually closed on the sides most affected by noise.

4.2.5 韓國^[32]

韓國的噪音相關法律包括：(1)基本環境政策法（Basic Environmental Policy Act）；(2)噪音和振動控制法（Noise and Vibration Control Act）；(3)住房建設促進法（Housing Construction Promotion Act）；(4)航空法（Aviation Act）；和(5)工業健康與安全法（Industrial Health and Safety Act），並根據所要求的目標制定了標準。韓國的社區噪音標準（Community Noise Standards）於 2010 年進行了修訂。社區噪音標準是根據受社區噪音影響的地區而制定的，目標區域分為：住宅區、綠地區、噪音管理區的村/住宅開發/度假開發區、自然保護區和學校/綜合醫院/公共圖書館和其他區域。

環境部（Ministry of Environment）於 2010 年修訂之社區噪音標準，其標準如表 4.2-5 所示。其中針對擴音器（Loudspeakers）有制定室內音量標準，其住宅區之室內標準為日間 55 dB(A)；早晚為 50 dB(A)；夜間為 45 dB(A)。標準中的“同一棟樓”是指屋頂、柱子或牆壁由一個主體組成的建築物。

其他國家透過制定樓板衝擊噪音、管道設備噪音和建物外部噪音的內部標準來規範公寓環境噪音的影響。韓國有公寓內的樓層間噪音和噪音的測量和評估標準；但是，沒有建立管道設備噪音的評估方法和標準。

韓國管制公寓的樓層間噪音（Inter-floor Noise），係由居民或用戶活動引起的噪音，可分為由其他居民或用戶的移動引起的「直接衝擊噪音（Direct Impact Noise）」，以及由傳聲裝置引起的「空氣傳播噪音（Airborne Transmitted Noise）」。對於直接衝擊噪音，日間（06：00～22：00）的 1 分鐘均能音量為 43 dB(A)；夜間（22：00～06：00）的均能音量為 38 dB(A)；最大噪音量分別為 57 dB(A)和 52 dB(A)。對於空氣傳播噪音，分別為 5 分鐘均能音量為 45 dB(A)和 40 dB(A)（環境部和國土交通省(Ministry of Environment & Ministry of Land, Infrastructure and Transport)，2014）。

國土交通省制定了樓板間噪音標準，對新建公寓的輕度衝擊噪音限制值為 58 dB；重度衝擊噪音限制為 50 dB。還管制包括公寓地板的板坯的厚度，並設定 201mm 的目標值。公寓樓板衝擊噪音的中斷結構鑒定和管理標準建立了四層（Four-Floor）衝擊噪音性能等級，並指定了一個認證機構，同時考慮了反向 A 加權樓層間（Reverse A-weighted Inter-Layer）衝擊噪音量（國土交通省，2013）。

表4.2-5 韓國環境部之環境噪音管制標準^[32]

音量單位：dB(A)

目標區域	噪音源		早晚 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	日間 (07:00~18:00)	夜間 (22:00~05:00)
住宅區；綠地； 村區行政區域；住宅和度假 開發區；自然環境保護區；學 校、醫院、公共圖書館等區域	擴音器	室外	below 60	below 65	below 60
		如果在室內產生了 室外噪音 (If the outdoor noise is generated indoors)	below 50	below 55	below 45
	工廠		below 50	below 55	below 45
	商業	在同一棟樓裡 (In the same building)	below 45	Below 50	below 40
		其他	below 50	below 55	below 45
	營建		below 60	below 65	below 50
其他區域	擴音器	室外	below 65	Below 70	below 60
		如果在室內產生了 室外噪音 (If the outdoor noise is generated indoors)	below 60	below 65	below 55
	工廠		below 60	below 65	below 55
	商業	在同一棟樓裡 (In the same building)	below 50	below 55	below 45
		其他	below 60	below 65	below 55
	營建		below 65	below 70	below 50

資料來源：Kyoosang Kim, “Sources, Effects, and Control of Noise in Indoor/Outdoor Living Environments”, Journal of the Ergonomics Society of Korea, April 2015. 取自參考文獻 Ministry of Environment (Korea), Environmental Enforcement Ordinance No. 587, Regulation of standards for community noise, 2010.

4.2.6 美國加州

一、洛杉磯^[33]

1988 年的加州隔音標準 (The California Noise Insulation Standards of 1988 (California Building Code Title 24, Section 3501 et seq.)) 確定了住宅間 (建築物內的單元間) 和建物外部噪音傳遞控制措施。它要求除了獨立的單戶住宅之外, 在多住宅使用設施的任何可居住的房間內, 外部噪音源傳遞至內部的噪音量降至 45 分貝或更低, 例如: 酒店、汽車旅館、宿舍、長期護理設施和公寓, 以及其他住宅。測量基於日/夜平均音量 (Day/Night Average Sound Level, L_{dn}) 或社區噪音等效音量 (Community Noise Equivalent Level, CNEL)。 L_{dn} 和 CNEL 都利用平均而非單一噪音暴露事件。因此, 一天中單列火車的通過音量將在 24 小時內被平均, 導致可忽略不計的暴露。

隔音標準中確定的重要噪音源包括: 高速公路、鄉村公路、城市街道、鐵路、快速公交線路、機場和工業區。在這些用途附近規劃的噪音敏感使用計畫, 需要

設計成防止重大外部噪音的影響。申請人必須提交由聲學工程師準備或在聲學工程師監督下進行的聲學分析，表明在每個擬議的可居住房間內將達到 45 分貝或更低的內部噪音量。將隔音結合到建築結構中，要求窗戶「不可打開或保持關閉及提供空調」，以及任何其他方法。

1973 年 1 月 24 日，第 144.331 號法令生效，並在洛杉磯市政法典中增加了第十一章，名為「噪音管制」。本章授權禁止所有不必要的、過度的和惱人的噪音來源，其過去受限於警察權力限制。執法責任由警察局（Police Department）和建築與安全部門（Department of Building and Safety）分擔。在此期間，執法工作表明需要進一步明確執法責任，納入新的噪音測量程序，並在部門內建立投訴執法專業知識。市議會於 1982 年 3 月 29 日修訂了「噪音條例（Noise Ordinance）」，納入了新的噪音測量程序，協調了相互衝突的噪音量限制，並更明確地界定了有關市政部門的執法責任，並對違法行為進行了處罰。

現將「噪音條例（Noise Ordinance）」的執行責任交給警察局、建築及安全部、動物管制部（Department of Animal Regulation）及街道服務局（Bureau of Street Services）等。警察局負責執行涉及人為產生或控制噪音的噪音條例違規行為，這些行為被視為對和平的騷擾。各噪音源種類及其執法部門整理如表 4.2-6 所示。

表4.2-6 美國洛杉磯市各噪音源種類及其執法部門^[33]

執法部門	噪音種類
警察局（Police Department）	1.營建（Construction Noise） 2.垃圾和垃圾收集（Rubbish and Garbage Collection） 3.車輛裝卸（交貨）（Vehicle loading or unloading (Deliveries)） 4.夜總會發出的噪音（Noise Emitting from Nightclubs）
街道服務局（Bureau of Street Services）	燃氣鼓風機（Gas Leaf Blower）
建築與安全部（Department of Building and Safety）	固定設備（Fixed Equipment）
動物管制（Animal Regulations 聯繫當地動物收容所）	動物投訴（Animal Complaints）
聯邦航空管理局（Federal Aviation Administration, FAA）	飛機投訴（Aircraft Complaints）
空中支援部（Air Support Division）	LAPD 直昇機（Los Angeles Police Department, LAPD）
電影洛杉磯（Film LA）	電影集（Movie Sets）
當地的警察局（Local Police Station）	任何其他噪音投訴

資料來源：http://www.lapdonline.org/special_operations_support_division/content_basic_view/1031

二、舊金山市^[34]

San Francisco Police Code Article 29: Section 2909 (d) (December 2014 Guidance) 有關噪音之管制標準 (表 4.2-7)：於固定之居住室內音源 (生活或睡覺區域)，除了有不同主管機關之外 (公共衛生署或舊金山警局)，其管制標準為日間 07:00~22:00 之 L_{Aeq} 不能超過 55 dB(A)；夜間 22:00~07:00 之 L_{Aeq} 不能超過 45 dB(A)。針對固定機械設備 (Fixed mechanical equipment) 主管機關為公共衛生署 (Department of Public Health, DPH)；電子視聽音源 (Electronic audiovisual sources) 則為舊金山警局 (San Francisco Police Department, SFPD)。

進行室內噪音測量時，分為二種情況：(1)在帶有機械通風的住宅中，關閉窗戶時進行音量測量；(2)在依靠窗戶和其他非機械設計進行通風的住宅中，在窗戶打開 25%的情況下進行音量測量。

三、沙加緬度市^[35]

沙加緬度市環境管理部 (Environmental Management Department) Sacramento County Code, Chapter 6.68(The County Noise Ordinance)針對公寓住宅、市政廳、兩人或多人居住單元有室內音量標準值 (Interior Noise Standards)，採用的評估指標為 L_{Aeq} ，其規定為(1)在 22:00~07:00 期間：每小時內噪音超過 45 dB(A)的累計時間不超過 5 分鐘；(2)每小時內噪音超過 50 dB(A)的累計時間不超過 1 分鐘；(3)任何時刻噪音都不能超過 55 dB(A)，詳如表 4.2-7 所示。

表4.2-7 美國舊金山市及沙加緬度市之居住單元室內噪音標準^[34, 35]

地區	美國舊金山市(San Francisco)	美國沙加緬度市(Sacramento)
資料來源	<ul style="list-style-type: none"> ● DPH(Department of Public Health 公共衛生署) – Fixed mechanical equipment(固定機械設備) ● SFPD(San Francisco Police Department 舊金山警局) – Electronic audiovisual sources(電子視聽音源) 	Environmental Management Department (環境管理部門)
法令	San Francisco Police Code Article 29: Section 2909 (d) (December 2014 Guidance)	Sacramento County Code, Chapter 6.68(The County Noise Ordinance)
類別	Regulatory Codes and Standards(管制標準)	Interior Noise Standards(標準值)
適用場所或對象	Fixed Residential Interior Noise(Interior living or sleeping area)固定之居住室內音源(生活或睡覺區域)	In any apartment, condominium, townhouse, duplex or multiple dwelling unit(公寓住宅、市政廳、兩人或多人居住單元)
指標	L_{Aeq}	L_{Aeq}

地區	美國舊金山市(San Francisco)	美國沙加緬度市(Sacramento)
噪音值	07:00~22:00 期間，不能超過 55 dB(A) 22:00~07:00 期間，不能超過 45 dB(A)	(1)在 22:00~07:00 期間：每小時內噪音超過 45 dB(A)的累計時間不超過 5 分鐘； (2)每小時內噪音超過 50 dB(A)的累計時間不超過 1 分鐘； (3)任何時刻噪音都不能超過 55 dB(A)。

資料來源：1.“San Francisco Police Code Article 29: Regulation of Noise Guidelines for Noise Control Ordinance Monitoring and Enforcement.”, CITYWIDE NOISE GUIDANCE December 2014.
2.“Sacramento County Code, Chapter 6.68”, The County Noise Ordinance.

4.2.7 英國

一、建築物聲隔離及噪音減量之國家指引 (BS 8233: 2014 Guidance on Sound Insulation and Noise Reduction for Buildings) [36]

表 4.2-8 之指引值是結構音和空氣音噪音源的總和，而樓板噪音 (Ground borne noise) 應單獨評估。這些音量係基於 WHO 的指引值，並假設每日的外部噪音為正常變動。若當地條件不遵循這種典型模式的情況下，例如：在夜間 23:00 至翌日 03:00 之間營業的商家 (如：Pub) 應該以更短的時段評估，如：可使用 $L_{Aeq, 1hour}$ 。

定期的單一噪音事件 (飛機或火車) 可能導致睡眠障礙，因此可以相對於 SEL 或 $L_{Amax,F}$ 設置指引值。如果要依靠關閉的窗戶來滿足這些指引值，則需要有一個適當的替代通風裝置，不會影響外牆的隔音或產生的噪音量。若認為相關行為活動之發展是必要或可取的，則內部目標音量可放寬高達 5 dB。

表4.2-8 英國BS 8233 : 2014之居住單元室內噪音指引^[36]

Activity(活動)	Location(地點)	07:00 to 23:00	23:00 to 07:00
Resting(休息)	Living room(客廳)	35 dB $L_{Aeq, 16hour}$	—
Dining(用膳)	Dining room/area (餐廳/區域)	40 dB $L_{Aeq, 16hour}$	—
Sleeping (daytime resting) 睡覺 (日間休息)	Bedroom(臥室)	35 dB $L_{Aeq, 16hour}$	30 dB $L_{Aeq, 16hour}$

資料來源：BS 8233: 2014 Guidance on Sound Insulation and Noise Reduction for Buildings.

二、曼徹斯特市議會 (Manchester City Council) [36]

規劃與噪音技術指導 (Planning & Noise Technical Guidance, December 2015) 提及：曼徹斯特市議會已對住宅物業採用以下內部噪音指導：

(一)臥室(夜間 23:00~07:00)30 dB 的 L_{Aeq} (個別噪音事件通常不應超過 45 dB 的 $L_{Amax,F}$ 之音量 15 次)

(二)客廳（日間 07:00~23:00）35 dB 的 L_{Aeq} 。

(三)花園和露台（日間）55 dB 的 L_{Aeq} 。

採用這些指導值的原因如下：

- 國家 BS 8233：2014 認為這些音量是休息/睡眠條件的良好指引。
- WHO 文件「社區噪音指引（Guidelines for Community Noise）」建議內部 L_{Aeq} 為 30 dB，以獲得最佳睡眠條件（日間內部房間不超過 35 dB(A)）。
- 根據安裝品質、材料、噪音頻譜和建築構件的劣化/磨損，隔音方案的性能通常低於規定的性能。如果構建元素的性能不如預期（現場性能），則高設計規格會引入「安全餘裕（Safety Margin）」。
- 玻璃的性能規格通常不考慮通風孔對隔音的不利影響。即使是“聲學”通風口也會降低牆面隔音的性能，因為它們本身會包含一個空氣交換的自由開放區域。
- 城市噪音量普遍上升，未來可以合理地適應這些指引。
- 這些指導支持地方當局的企業目標，以防止健康不良影響和改善當地人民的健康和福祉。

三、利奇菲爾德區議會（Lichfield District Council）^[37]

噪音及振動之環境衛生技術規劃政策（Environmental Health Technical Planning Policy : Noise & Vibration, Version 2, November 2013）提到建築物外部及內部噪音之準則：設計文件通常指定建築物內可接受的噪音量。如果需要指定外部噪音量，建議在內部指引值上增加 10 dB。該調整係基於「部分打開」窗口的假設減音量。另外也提到室內音量建議值，亦依據 WHO 指引值而訂定。

四、蘇格蘭倫弗魯郡（Renfrewshire Council）^[38]

如果有家庭噪音問題，可以向理事會的噪音執法小組投訴。一名官員將對投訴者的抱怨進行調查，並且如果噪音是由反社會行為引起的並且被發現超過允許的管制標準，則可根據 2004 年「反社會行為（蘇格蘭）法」（Antisocial Behaviour (Scotland) Act 2004）向犯罪者發出警告通知。未遵守警告通知可能會導致發出 100 英鎊的定額罰款通知。在噪音投訴服務時間之外的某些情況或時間，警方也可以處理噪音投訴。

4.2.8 紐西蘭

一、紐西蘭標準 NZS 6801:2008 聲學-環境噪音測量^[39]

以下規則 (Rules) 僅適用於住宅活動和相關開發，並應按照紐西蘭標準 NZS 6801:2008 聲學-環境噪音測量進行測量 (NZS 6801:2008 Acoustics – Measurement of Environmental Sound)，並根據 NZ 6802:2008 聲學-環境噪音進行評估 (NZ 6802:2008 Acoustics – Environmental Noise)。

在任何建築許可 (在建築物或住宅活動之允許活動的情況下)、建築物的資源許可或住宅活動的申請時，在任何可居住的房間內達到以下性能標準的聲學設計：

(一)除臥室或工作室外，所有可居住房間於任何時間的平均音量不超過 45 dB 之 L_{eq} 。

(二)在臥室和工作室，於日間 07:00~22:00，平均音量不超過 45 dB 之 L_{eq} ；於夜間 22:00~07:00，平均音量不超過 35 dB 之 L_{eq} (15 分鐘)。

(三)如果門窗必須保持關閉以達上述音量值，則應按照紐西蘭建築規範 (Building Code) 提供機械通風。

二、紐西蘭首都：威靈頓^[40]

市議會負責處理特定的噪音問題。某些類型的噪音，例如：嘈雜的汽車和工作場所的噪音，由其他組織根據不同的規定進行管制。各噪音源種類及其執法部門整理如表 4.2-9 所示。

表4.2-9 紐西蘭首都威靈頓各噪音源種類及其執法部門^[40]

執法部門	噪音種類
市議會 (Council)	1. 吵雜的派對和立體聲 (Loud Party and Stereos) 2. 房子和建築之警報聲 (House and Building Alarms) 3. 營建活動 (Construction Activity) 4. 街頭藝人和酒吧 (Buskers and Bars) 5. 影響居民的工業或商業用途 (Industry or Commercial Uses Affecting Residents) 6. 狗吠聲 (Barking Dogs)
當地交通安全科 (Local Traffic Safety Branch)	交通噪音 (Traffic Noise)
職業安全與健康 (Occupational Safety and Health)	工作場所噪音 (Workplace Noise)

資料來源：<https://wellington.govt.nz/services/environment-and-waste/noise-control/make-a-complaint>

4.2.9 歐盟

一、丹麥^[41]

當局在過去 15 年至 20 年間的努力集中在確保新房屋的噪音滋擾不超過 55 分貝的限制。這符合丹麥自 1980 年代初開始實施之規劃法和建築法（The Danish Planning Act and the Building Act）的規定。在道路交通噪音滋擾超過 55 分貝的情況下，不能設置新的住宅區；而對於現有市區的房屋建築，交通噪音在牆面外最多可達 55 分貝，室內可達 30 分貝。在建造新道路時，將努力保持 55 分貝的限值。

丹麥環保署關於居住區道路交通噪音的 1984 年指引將進行更新。將會研究這些指引是否可以確保在建造新道路與現有道路延伸相關的現有房屋的道路噪音得到更好的保護。在這方面進行研究，以說明在某些規劃情況下是否適合引入現有住房的建議限值以及夜間噪音，另外必須根據歐盟指令進行噪音地圖之繪製。

二、瑞典^[42]

與其他歐洲城市相比，哥德堡市（Göteborg city）因交通所帶來的噪音干擾相對較小。儘管如此，哥德堡市很多民眾確實居住在受噪音嚴重影響的地區。此外，預計在各種環境中之噪音指引值需要數年才能完成。

在受交通噪音影響的情況下，瑞典議會已經確定了建造新住宅樓或基礎設施（如：公路和鐵路）的指引值。因此，目前關於住宅建築的指引值是：

- 室內 30 dB(A)之均能音量；
- 夜間（22:00~06:00）室內最大音量 45 dB(A)；
- 外牆 55 dB(A)之均能音量；
- 靠近住宅的室外區域之最大音量為 70 dB(A)。

議會還確定了「現有」建築物和道路的指引值。這些是：

- 室內受電車或鐵路交通噪音影響之最大音量為 55 dB(A)；
- 外牆受道路交通噪音影響之均能音量為 65 dB(A)。

目標是到 2007 年，任何住宅建築都不會超過這些指引值。儘管採取了大量措施來減少城市交通量，例如：透過在城市中心以外修建道路，惟哥德堡市中心仍難以滿足指引值，在中心街道上的住宅建築有很大一部分在窗戶外面的噪音量超過 65 dB(A)。目前正在使用各種方式來減少民眾家中的交通噪音干擾。兩種方法為更換窗戶（以降低室內噪音量）及創造所謂的“寧靜”外牆（Silent Facade）。

(一)更換窗戶

自 1992 年以來，哥德堡市的交通和公共交通管理局已經補貼了位處高度交通噪音影響的住宅更換窗戶。為了獲得補貼，必須滿足某些要求，而這些要求多年來已經發生了變化。通常要求室外噪音量超過 65 dB(A)，而室內噪音量超過 35 dB(A)。雖然補貼的幅度也不同，但它通常涵蓋了更換窗戶所需成本的 25%。

通常屋主已經更換了帶有三層玻璃窗的窗戶，以減少道路交通引起的室內噪音影響。據估計，居住在交通噪音較高地區的約 3,000 人因此擁有更好的室內家庭環境，更換窗戶之總費用約為 140 萬歐元，其中約 60 萬歐元為補貼。

(二)寧靜外牆 (Silent Facade)

在交通噪音量特別高的地區，方法是住宅街區必須至少有一個“寧靜”外牆。這意味著在住宅建築物的一個牆壁（如：面向後院或庭院的一側）上根本沒有噪音是可接受的。沒有噪音包括：交通噪音以及通風和製冷系統。這些系統的噪音存在指引值，包括：

- 從 22:00~07:00 的 40 dB(A)之均能音量；
- 從 07:00~18:00 的 50 dB(A)之均能音量（在正常的日子裡）；
- 從 18:00~22:00 的 45 dB(A)之均能音量（公眾假期從 07:00~18:00）；
- 從 22:00~07:00 的 55 dB(A)之最大音量。

為了在可能存在多個通風和製冷系統的住宅建築物中滿足這些指引值，目前正在進行針對個別系統的更嚴格要求之工作。

三、歐盟^[43]

歐洲標準化委員會 (European Committee for Standardization) 2006 年 11 月對於綠建築提出歐洲標準草案 (The Draft European Standard, 本文檔不是歐洲標準) prEN 15251:2006: E, 名為「Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (室內環境輸入參數，用於設計和評估建築物的能源性能，包括：室內空氣品質、熱環境、照明和聲學)」。

其附錄 E「Indoor system noise criteria of some spaces and buildings (某些空間和建築物的室內系統噪音準則)」有列出 A 加權音量之設計例，對於住宅客廳及臥室之設計值最高分別為 40 dB(A)及 35 dB(A)，亦屬較嚴格，詳如表 4.2-10 所示。

表4.2-10 歐洲標準化委員會之室內A加權音量的設計例^[43]

Building	Type of space	Sound pressure level [dB(A)]	
		Typical range	Default design value
Residential	Living room	25 to 40	32
	Bed room	20 to 35	26
Child care institutions	Nursery schools	30 to 45	40
	Day nurseries	30 to 45	40
Places of assembly	Auditoriums	30 to 35	33
	Libraries	28 to 35	30
	Cinemas	30 to 35	33
	Court rooms	30 to 40	35
	Museums	28 to 35	30
Commercial	Retail shops	35 to 50	40
	Department stores	40 to 50	45
	Supermarkets	40 to 50	45
	Computer rooms, large	40 to 60	50
	Computer rooms, small	40 to 50	45
Hospitals	Corridors	35 to 45	40
	Operating theatres	30 to 48	40
	Wards	25 to 35	30
	Bedrooms night-time	20 to 35	30
	Bedrooms daytime	25 to 40	30
Hotels	Lobbies	35 to 45	40
	Reception rooms	35 to 45	40
	Hotel rooms (during	25 to 35	30
	Hotel rooms (during daytime)	30 to 40	35
Offices	Small offices	30 to 40	35
	Conference rooms	30 to 40	35
	Landscaped offices	35 to 45	40
	Office cubicles	35 to 45	40
Restaurants	Cafeterias	35 to 50	40
	Restaurants	35 to 50	45
	Kitchens	40 to 60	55
Schools	Classrooms	30 to 40	35
	Corridors	35 to 50	40
	Gymnasiums	35 to 45	40
	Teacher rooms	30 to 40	35
Sport	Covered sports stadiums	35 to 50	45
	Swimming baths	40 to 50	45
General	Toilets	40 to 50	45
	Cloakrooms	40 to 50	45

資料來源：European Committee for Standardization, prEN 15251:2006: E, “Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics”, November 2006.

4.2.10 小結

經前述之文獻資料蒐集及分析，彙整國外之室內音量相關的規定如表 4.2-11 所示並摘錄如下。

- 一、世界衛生組織（WHO）採用之指標為 L_{Aeq} 及 $L_{Amax,fast}$ ，其「開窗」指引值係根據影響健康的最低噪音量（臨界健康影響，Critical Health Effect）而訂定，故其音量值較為嚴苛，例如：臥室夜間為 30 dB(A)；室內居所日間為 35 dB(A)。其假設開窗時，室外音量會衰減 15 dB(A)。
- 二、中國大陸國家標準《聲環境質量標準》採用之指標為 L_{Aeq} ，其「門窗全打開」標準值係根據該噪音敏感建築物所在聲環境功能區對應的室外環境噪音標準，將室外標準減 10 dB(A) 的值作為室內音量之評價依據。
- 三、新加坡建設局《建築物環境永續規範》採用之指標為 L_{Aeq} ，其室內音量指引值為日間 55 dB(A)（上午 6 點至晚上 10 點）；夜間 45 dB(A)（晚上 10 點至翌日早上 6 點）。
- 四、日本環境省《噪音環境品質標準》採用之指標為 L_{Aeq} ，其「關窗」標準值係評價鄰接道路具有交通動脈流量之室內噪音時，則於室內最受室外噪音影響的一側關上窗戶時，其室內標準為日間 45 dB(A)；夜間為 40 dB(A)。即建築物牆面關窗之隔音量假設為 25 dB(A)。
- 五、韓國環境部《社區噪音標準》採用之指標為 L_{Aeq} ，針對擴音器（Loudspeakers）有制定室內音量標準，其住宅區之室內標準為日間 55 dB(A)；早晚為 50 dB(A)；夜間為 45 dB(A)。
- 六、美國加州《隔音標準》採用之指標為 L_{dn} 及 CNEL，其「關窗」標準值係可居住房間內要求達到 45 分貝或更低的內部噪音量。將隔音結合到建築結構中，要求窗戶「不可打開或保持關閉及提供空調」，以及任何其他方法。
- 七、美國舊金山市《Police Code Article 29》採用之指標為 L_{Aeq} ，於室內音量測量時，視通風設計，測量時可關窗或打開窗 25%，其標準值為固定之居住室內音源（生活或睡覺區域）：(1) 在 07:00~22:00 期間，不能超過 55 dB(A)；(2) 在 22:00~07:00 期間，不能超過 45 dB(A)。
- 八、美國沙加緬度市《County Code, Chapter 6.68》採用之指標為 L_{Aeq} ，其標準值公寓住宅、市政廳、兩人或多人居住單元：(1) 在 22:00~07:00 期間：每小時內噪音超過 45 dB(A) 的累計時間不超過 5 分鐘；(2) 每小時內噪音超過 50 dB(A) 的累計時間不超過 1 分鐘；(3) 任何時刻噪音都不能超過 55 dB(A)。

九、英國國家指引《BS 8233: 2014》採用之指標為 L_{Aeq} ，其值係基於 WHO 的指引值而訂定。

十、英國曼徹斯特市《規劃與噪音技術指導》採用之指標為 L_{Aeq} 及 $L_{Amax,fast}$ ，其值係參考國家 BS 8233: 2014 及 WHO 指引值（開窗）而訂定。

十一、紐西蘭國家標準《NZS 6801:2008》採用之指標為 L_{Aeq} ，其「可開窗或關窗」標準值係在任何建築許可（在建築物或住宅活動之允許活動的情況下）、建築物的資源許可或住宅活動的申請時，在任何可居住的房間內達到以下性能標準的聲學設計：(1)除臥室或工作室外，所有可居住房間於任何時間的平均音量不超過 45 dB 之 L_{eq} 。(2)在臥室和工作室，於日間 07:00~22:00，平均音量不超過 45 dB 之 L_{eq} ；於夜間 22:00~07:00，平均音量不超過 35 dB 之 L_{eq} （15 分鐘）。(3)如果門窗必須保持關閉以達上述音量值，則應按照紐西蘭建築規範（Building Code）提供機械通風。

十二、歐盟國家對於住宅室內之音量值多參考 WHO，WHO 於 2009 年曾特別針對歐洲地區發布夜間噪音指引，故歐盟國家之室內音量值亦較為嚴苛。

由上述之說明知，多數國家均採取「 L_{Aeq} 」作為評估指標，WHO 之健康指引值於實務上而言算相當之嚴苛。而新加坡、韓國、美國舊金山市及沙加緬度市，其規範之日間音量約 55 dB(A)；夜間音量約 45 dB(A)，比較貼近一般室內實際居住情況之聲音品質。

而行政院環境保護署 106 年度「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」專案研究計畫期末報告，建議可從另一角度思考，即於室內進行「開窗」量測，假設「開窗」室內外之音量平均約衰減 10 dB(A)，則可推估牆面線外之音量。除無需另訂室內音量標準，亦可解決現行噪音陳情量測須將噪音計外伸牆面線外，而可於民眾真正生活居住地點量測之情形。即另訂一室內外之換算值（本研究假設「開窗」室內外之平均音量約差 10 dB(A)），由室內測再換算成室外測值，而以原有之室外標準釋判。此亦與中國大陸國家室內標準之規定雷同。

另有關噪音稽查方面，亞洲國家（如：中國大陸、新加坡、日本及韓國）多由環境部門來執行，亦結合警察單位聯合稽查，例如：新加坡採陸路交通管理局（LTA）、交通警察和國家環境局（NEA）定期聯合執法，打擊非法改裝車輛，此與國內之環警聯合稽查改裝噪音車輛類似。而歐美國家處理陳情案之執法部門分類較細，由各部門根據不同的規定進行管制。

表 4.2-11 不同國家或組織之室內音量彙整表

國家或組織	名稱	主管單位	指標	室內音量值					標準或指引值	條件
				Specific environment	Critical health effect(s)	L _{Aeq} [dB]	Time base [hours]	L _{Amax,fast} [dB]		
1. 世界衛生組織 (WHO)	Guidelines for Community Noise(1999)	—	L _{Aeq}	Outdoor living area	Serious annoyance, daytime and evening Moderate annoyance, daytime and evening	55 50	16 16	- -	指引值	開窗
				L _{Amax}	Dwelling, indoors	Speech intelligibility and moderate annoyance, daytime and evening	35	16		
			Inside bedrooms		Sleep disturbance, night-time	30	8	45		
			Outside bedrooms		Sleep disturbance, window open (outdoor values)	45	8	60		
			2. 中國大陸	《聲環境質量標準》(GB 3096-2008)	環境保護部國家質量監督檢驗檢疫總局	L _{Aeq}	監測點一般設於噪音敏感建築物戶外。不得不在噪音敏感建築物室內監測時，應在門窗全打開狀況下進行室內噪音測量，並採用較該噪音敏感建築物所在聲環境功能區對應環境噪音限值低 10 dB(A) 的值作為評價依據			
3. 新加坡	The Code for Environmental Sustainability of Buildings, 3rd Edition(2012 年 10 月)	建設局	L _{Aeq}	如果建築物設計達到規定的建物內部噪音量，則可以得到 1 分的積分： ● 55 dB(A) (上午 6 點至晚上 10 點) ● 45 dB(A) (晚上 10 點至早上 6 點)					指引值	未說明
4. 日本	噪音環境品質標準 (1998 年 9 月)	環境省	L _{Aeq}	於鄰接道路具有交通動脈流量 (Arterial Traffic) 之標準值的附註提到，若評價室內噪音，則於室內最受室外噪音影響的一側關上窗戶時，其室內標準為日間 45 dB(A)；夜間為 40 dB(A)。即建築物牆面關窗之隔音量假設為 25 dB(A)					標準值	關窗
				交通動脈流量地區之室外噪音標準						
				Daytime	Nighttime					
				70 dB or less		65 dB or less				

國家或組織	名稱	主管單位	指標	室內音量值	標準或指引值	條件
5. 韓國	Environmental Enforcement Ordinance No. 587, Regulation of standards for community noise, 2010	環境部	L_{Aeq}	擴音器 (Loudspeakers) 有制定室內音量標準，其住宅區之室內標準為日間 55 dB(A)；早晚為 50 dB(A)；夜間為 45 dB(A)	標準值	未說明
6. 美國加州	The California Noise Insulation Standards of 1988 (California Building Code Title 24, Section 3501 et seq.)	California And Federal Legislation	L_{dn} CNEL	<ul style="list-style-type: none"> 在每個擬議的可居住房間內要求達到 45 分貝或更低的內部噪音量。 將隔音結合到建築結構中，要求窗戶「不可打開或保持關閉及提供空調」，以及任何其他方法。 	標準值	關窗
7. 美國舊金山	San Francisco Police Code Article 29: Section 2909 (d) (December 2014 Guidance)	<ul style="list-style-type: none"> DPH(Department of Public Health 公共衛生署) – Fixed mechanical equipment(固定機械設備) SFPD(San Francisco Police Department 舊金山警局) – Electronic audiovisual sources(電子視聽音源) 	L_{Aeq}	固定之居住室內音源(生活或睡覺區域)： <ol style="list-style-type: none"> 在 07:00~22:00 期間，不能超過 55 dB(A) 在 22:00~07:00 期間，不能超過 45 dB(A) 	標準值	視通風設計，可關窗或打開窗 25%
8. 美國沙加緬度市	Sacramento County Code, Chapter 6.68(The County Noise Ordinance)	環境管理部門	L_{Aeq}	公寓住宅、市政廳、兩人或多人居住單元： <ol style="list-style-type: none"> 在 22:00~07:00 期間：每小時內噪音超過 45 dB(A)的累計時間不超過 5 分鐘； 每小時內噪音超過 50 dB(A)的累計時間不超過 1 分鐘； 任何時刻噪音都不能超過 55 dB(A)。 	標準值	未說明

國家或組織	名稱	主管單位	指標	室內音量值				標準或指引值	條件
				Activity (活動)	Location (地點)	07:00~23:00	23:00~07:00		
9.英國	BS 8233: 2014 Guidance on Sound Insulation and Noise Reduction for Buildings	國家指引	L _{Aeq}	Resting(休息)	Living room(客廳)	35 dB L _{Aeq, 16hour}	—	指引值	基於 WHO 指引值
				Dining(用膳)	Dining room/area (餐廳/區域)	40 dB L _{Aeq, 16hour}	—		
				Sleeping(daytime resting)睡覺(日間休息)	Bedroom(臥室)	35 dB L _{Aeq, 16hour}	30 dB L _{Aeq, 16hour}		
10.英國曼徹斯特市 (Manchester City)	Planning & Noise Technical Guidance, December 2015	市議會	L _{Aeq} L _{Amax}	(1)臥室(夜間 23:00~07:00) 30 dB 的 L _{Aeq} (個別噪音事件通常不應超過 45 dB L _{Amax,F} 之音量 15 次) (2)客廳(日間 07:00~23:00) 35 dB 的 L _{Aeq} 。 (3)花園和露台(日間) 55 dB 的 L _{Aeq} 。				參考國家 BS 8233: 2014 及 WHO 指引值 (開窗)	
11.英國利奇菲爾德 (Lichfield)	Environmental Health Technical Planning Policy : Noise & Vibration, Version 2, November 2013	區議會	L _{Aeq}	建築物外部及內部噪音之準則：設計文件通常指定建築物內可接受的噪音量。如果需要指定外部噪音量，建議在內部指引值上增加 10 dB。該調整係基於「部分打開」窗口的假設減音量。室內音量建議值，亦依據 WHO 指引值而訂定				指引值	開窗
12.紐西蘭	NZS 6801:2008 Acoustics – Measurement of Environmental Sound	國家標準	L _{Aeq}	在任何建築許可（在建築物或住宅活動之允許活動的情況下）、建築物的資源許可或住宅活動的申請時，在任何可居住的房間內達到以下性能標準的聲學設計： (1)除臥室或工作室外，所有可居住房間於任何時間的平均音量不超過 45 dB 之 L _{eq} 。 (2)在臥室和工作室，於日間 07:00~22:00，平均音量不超過 45 dB 之 L _{eq} ；於夜間 22:00~07:00，平均音量不超過 35 dB 之 L _{eq} （15 分鐘）。 (3)如果門窗必須保持關閉以達上述音量值，則應按照紐西蘭建築規範（Building Code）提供機械通風。				標準值	可開窗或關窗
13.歐洲標準化委員會	The Draft European Standard	歐洲標準草案	L _{Aeq}	住宅客廳及臥室之設計值最高分別為 40 dB(A)及 35 dB(A)。				草案	未說明

資料來源：本計畫整理。

4.2.11 住宅區之室內外音量差

一、世界衛生組織（WHO）^[28]

於 1999 年公布之社區噪音指引（Guidelines for Community Noise）提到開窗（Slightly Open）之室內外音量約衰減 15 dB(A)，另夜間牆體外 1m 處之均能音量不超過 45 dB(A)，由此得到夜間之臥室均能音量指引值為 30 dB(A)。

二、澳洲昆士蘭（Queensland）州政府及布里斯本（Brisbane）市議會^[44]

昆士蘭（Queensland）州政府之「噪音控制指導規劃（Planning for Noise Control Guideline, PNCG）」及布里斯本（Brisbane）市議會之「噪音影響評估計畫政策（Noise Impact Assessment Planning Scheme Policy, NIAPSP）」提出了噪音通過開窗（Open Windows）之允許修正值。上述二項規定所提出的修正是對開窗的噪音降低為 5 dB(A)，而昆士蘭州政府對於部分開窗為降低 10 dB(A)。這些允許的噪音衰減校正不限於特定的噪音類型或音源，因此能夠應用於影響住宅的任何入射噪音源，例如：從穩態機械設備噪音到脈衝工業噪音源（如：錘擊）。

三、“Noise Reduction through Facades with Open Windows”^[44]

Mitchell Ryan 等人於 2011 年提出研究論文，針對不同牆面材質、房間類型及開窗面積…等進行開窗下之室內外音量實測，開窗之 L_{eq} 隔音量約 5.4 dB(A)（空房）~14.7 dB(A)不等，其結果詳如表 4.2-12 所示。另外與 L_{eq} 結果相比， L_{max} 測試的結果也不太一致，最可能是因為 L_{eq} 結果在一段時間內被平均，而 L_{max} 結果僅對每個住所的樣本數進行平均。然而， L_{max} 降低仍然超過具有開放窗口門面之預測的 5 dB(A)減音量。

四、“WHO Night Noise Guidelines for Europe”^[45]

世界衛生組織（WHO）對於歐盟之夜間噪音指引報告內提到（Passchier-Vermeer et al. (2002)）：實測臥室窗戶之室內外音量差，室外及室內之平均差異約 21 dB，且單層玻璃窗和雙層玻璃窗僅略有不同（該調查沒有包括專門隔離噪音的住宅），其結果詳如表 4.2-13 所示。

五、“Differences between Outdoor and Indoor Sound Levels for Open, Tilted, and Closed Windows (2018)”^[46]

用於健康影響研究的噪音暴露預測模型通常用於估計外部自由音場的噪音量。但是，為了評估住宅內的噪音量，室內音量的估計是必要的。迄今為止，

關於室內和室外噪音量之間的差異以及影響外部噪音衰減之因素的現場數據很少。這是室內噪音量預測不確定性的主要原因，並可能導致健康評估中的暴露錯誤分類。本研究由瑞士聯邦環境辦公室（The Federal Office for the Environment, FOEN）資助，旨在確定不同窗戶位置的室內和室外之間的音量差，以及這種聲阻尼如何與建築特性相關。為此，在 102 名接觸道路交通噪音的瑞士居民的樣本中進行了測量。記錄室外和室內之音量，於客廳（起居室）和臥室進行。分為三種測量情況：開窗、傾斜窗及關窗。對於每種情況，收集附加參數的數據，例如：朝向音源、地面（樓板）和房間的方向以及隔音特性。在此基礎上，建立了線性回歸模型。室外及室內之中位數音壓級的差值在開窗時為 10 dB(A)、傾斜窗為 16 dB(A)及關窗為 28 dB(A)。對於開放式和傾斜式窗戶，影響室外及室內差異的最相關參數是窗戶的位置、房間的類型和體積以及建築物的年齡。對於關閉的窗戶，相關的參數是外部的聲音強度、窗戶框架的材料、窗戶墊圈的存在以及窗戶的數量。

由於本研究之目的是確定室內和室外之間的音量差異，但不是為了建立具有代表性的長期噪音暴露，因此決定採用簡短但具代表性的測量時間，以儘量減少測量時室內噪音的影響。因此，每個方案的測量時間為 3 分鐘。在測量過程中，非常注意並儘量減少來自建築物內部的任何聲音。如果內部存在噪音干擾或者除了道路交通噪音之外還有不需要的音源，則停止測量並重複測量。沒有在一天中的特定時間進行測量，但根據住戶的作息時間，通常在晚上進行測量。納入測量之條件須住家附近高度位於道路邊，並且外牆面的最高 L_{den} 必須 ≥ 50 dB(A) 以確保室內有足夠的室外噪音。測量在不同樓層的公寓進行，超過 80% 的測量位於 1 樓到 3 樓，其餘 20% 的測量是在 4 樓和 7 樓之間進行的。總共在 102 棟建築物的 157 個房間進行了測量，其中約 80% 在公寓樓內，20% 是單戶住宅。

此研究共進行 157 個房間的測量，包括：(1)開窗 115 點次；(2)傾斜窗（開口角度通常約 5 度~10 度）116 點次；及(3)關窗 76 點次，詳如表 4.2-14 所示。開窗之室內外音量差約 1.7 dB(A)~17.3 dB(A)，中位數±標準偏差約 10.0 dB(A)±2.9 dB(A)；傾斜窗約 8.7 dB(A)~21.7 dB(A)，中位數±標準偏差約 15.8 dB(A)±2.7 dB(A)；關窗約 16.2 dB(A)~38.0 dB(A)，中位數±標準偏差約 27.8 dB(A)±4.4 dB(A)。

六、“Open/Closed Window Research”^[47]”

由此研究報告之文獻蒐集，測量開放式窗戶的隔音量通常被認為約 10

dB(A)~15 dB(A)；關閉窗戶之隔音量約 20 dB(A)左右，其結果詳如表 4.2-15 所示。

七、其他研究（表 4.2-16）^[46]

（一）開窗或傾斜窗（即微開窗）

1.在澳洲進行的實地研究中，開窗的平均音量差異約為 11 dB(A)^[44]。

2.德國 DLR-Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin 進行的兩項研究（DLR 是德國國家航空航天研究中心）報告了類似的值，開窗範圍約 10 dB(A)~13 dB(A)，取決於噪音源的類型。在同樣的兩項研究中，也測試了傾斜的，即稍微打開的窗戶。雖然 2006 年的測量結果分別對道路和航空噪音得到微開窗約 14 dB(A) 和 15 dB(A) 的差異，但後續 2010 年研究得出的道路和鐵路噪音之微開窗平均值約為 18 dB(A)~19 dB(A)。

3.飛機噪音：Jansen 等人以及瑞士聯邦環境辦公室（FOEN）建議假設傾斜窗戶的室內外之音量差異約 15 dB(A)。

4.飛機噪音：Maschke 等人根據揚聲器實驗得出傾斜窗口位置約有 12 dB(A) 的平均音量差異。

5.歐洲環境局在其「噪音暴露評估指南」中總結了這些結果，其中建議對於開窗約 5 dB(A)~10 dB(A) 的衰減；微開窗約 10 dB(A)~15 dB(A) 的衰減。

（二）關窗

1.Pabst 針對飛機噪音給出了從 24 dB(A)~35 dB(A) 範圍內之關窗的差異。這項研究還表明，根據飛機的類型（高達±3 dB dB(A)），同一個窗口可以有不同的音量衰減。

2.前面提到的德國國家航空航天研究中心（DLR）研究，根據音源和外牆類型在關窗的情況下得到之平均隔音效果，範圍約從 26 dB(A)~30 dB(A)。

3.Scamoni 等人分析了 334 個位置的數據集，室內外關窗的平均音量差約為 31 dB(A)，數值範圍從最小差值 18 dB(A) 到最大差值 42 dB(A)。

4.作保守的估計，瑞士聯邦環境辦公室（FOEN）建議假設約 25 dB(A) 的室內外量差異，以便估計居民反應的覺醒概率（the probability of awakening）。

八、小結

隔音量變化的原因與建築物特性、外牆類型、房間大小、房間混響時間、室外噪音源、窗戶型態…等有關。綜整國外之文獻資料蒐集分析，「開窗」之室內外音量差約 5 dB(A)~15 dB(A)，其中又以「空屋」約 5 dB(A) 為最小（表 4.2-12）；

「微開窗」約 10 dB(A)~15 dB(A)；「關窗」之音量差則約 20 dB(A)~30 dB(A)。

表4.2-12 住宅區於開窗下之室內外音量差^[44]

住宅 Residence	牆正面 Facade	房間類型 Room Type	開窗面積 Open Window Area (m ²)	正面暴露面積 Exposed Facade Area(m ²)	窗戶高 Window Height (base)(m)	與音源距離 Distance to Noise (m)	隔音量 Reduction L _{eq} dB(A)
Gloucester(A)	Timber(木材)	Living Room(客廳)	1.6	4.1	2.0	8	8.0
Gladstone	Timber(木材)	Empty Room(空房)	1.5	12.2	3.4	60	5.4
Gloucester(B)	Timber(木材)	Games Room(遊戲房)	0.5	6.9	3.5	12	12.2
Raymont	Timber(木材)	Bathroom(浴室)	0.9	6.1	4.0	12	7.5
Moola	Timber/Concrete (木材/水泥)	Living Room(客廳)	1.5	7.1	0.5	13	13.8
Edinburgh	Brick Veneer (磚貼面)	Living Room(客廳)	1.0	9.4	1.0	12	6.1
Thirteenth	Brick Veneer (磚貼面)	Bedroom(臥室)	0.2	15.0	1.5	12	14.7
Lynelle	Brick Veneer (磚貼面)	Bedroom(臥室)	0.7	9.1	1.0	12	10.8
Central	Double Brick (雙磚)	Living Room(客廳)	0.9	12.8	1.0	13	14.7
Kenmore	Double Brick (雙磚)	Nursery(幼兒園)	0.3	8.2	1.6	12	12.3
Kessels	Double Brick (雙磚)	Living Room(客廳)	0.7	13.8	1.0	12	12.4

資料來源：Mitchell Ryan, Michael Lanchester, Stephen Pugh, Noise Reduction through Facades with Open Windows, Paper Number 37, Proceedings of ACOUSTICS 2011, 2-4 November 2011, Gold Coast, Australia.

表4.2-13 單層玻璃及雙層玻璃之室內外音量差^[45]

夜間時段之室內外平均隔音量 Average difference at night	單層玻璃 Single-glazed window	雙層玻璃 Double-glazed window
dB	21.3	22.2

資料來源：Night Noise Guidelines for Europe. WHO Regional Office for Europe 2009.

表4.2-14 不同窗戶啟閉型態之室內外噪音量的差異及其測量次數^[46]

Window Position	$\Delta 10s L_{Aeq}(out-in)$				Number of Measurements
	Median (25%, 75% Quantile)	Min	Max	SD	
open	10.0 (8.1, 11.5)	1.7	17.3	2.9	115
tilted	15.8 (14.0, 17.2)	8.7	21.7	2.7	116
closed	27.8 (25.4, 30.8)	16.2	38.0	4.4	76
all					307

註：標準偏差SD(standard deviation)。資料來源：Barbara Locher et al., “Differences between Outdoor and Indoor Sound Levels for Open, Tilted, and Closed Windows”, Int. J. Environ. Res. Public Health 2018, 15, 149; doi:10.3390/ijerph15010149.

表4.2-15 開關窗之聲學傳播文獻摘錄^[47]

資料來源	重點摘要
PPG 24 (1994)	任何型式的窗戶當部分打開時，將提供10 dB(A)~15 dB(A)之隔音量。
WHO (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ● 對於部分打開的窗口，假設牆外之音量減少15 dB。 ● 如果窗口占牆面積的10%，牆和開窗的組合之聲音降低不超過10 dB。
BS 8233 (1999)	對於提供快速通風和夏季冷卻的窗戶，假設提供10 dB~15 dB衰減。
BRE Digest 338 (1988)	<ul style="list-style-type: none"> ● 部分打開的窗口具有15 dB之平均音量差(100 Hz~3,150 Hz)。 ● 窗戶打開總面積的10%，基本的噪音降低約為10 dB，無論何種類型的窗戶或牆面建築占據其餘的90%。
DoE Design Bulleting 26(1972)	<ul style="list-style-type: none"> ● 窗口大開：減少5 dB(A)。 ● 窗口部分打開：減少10 dB(A)~15 dB(A)。 ● 窗口關閉：減少18 dB(A)~20 dB(A)。
Nelson – Transportation Noise (1987)	<ul style="list-style-type: none"> ● 單個窗口打開：隔音為5 dB~15 dB。(理論值) ● 單個窗口關閉：隔音為20 dB~25 dB。(理論值)
Mackenzie & Williamson DoE Report (1972–73)	<ul style="list-style-type: none"> ● 垂直滑動窗戶打開0.027 m²(夏季夜間通風)，提供16 dB(A)的音量降低。(實驗室研究) ● 垂直滑動窗戶打開0.36 m²(白天夏季通風)，提供11 dB(A)的音量降低。(實驗室研究)
Kerry and Ford (1973 –74)	<ul style="list-style-type: none"> ● 水平滑動窗戶打開25 mm，提供14 dB平均音量降低。(現場研究) ● 水平滑動窗戶打開200 mm，提供9 dB的平均音量降低。(現場研究)
Lawrence and Burgess (1982 – 83)	垂直滑動窗戶打開總外牆之9%，提供10 dB的音量降低。(現場研究)
Hopkins (2004)	道路交通噪音通過打開之窗口，音量減少8 dB~14 dB。(現場研究)
EN 12354-3:1999	<ul style="list-style-type: none"> ● 部分打開之任何類型的窗口：10 dB~15 dB。 ● 單層玻璃窗關閉(4mm玻璃)：22 dB~30 dB。

資料來源：NANR116: ‘OPEN/CLOSED WINDOW RESEARCH’ SOUND INSULATION THROUGH VENTILATED DOMESTIC WINDOWS, Department for Environment, Food and Rural Affairs, Zone 4/G17, Ashdown House, 123 Victoria Street, London SW1E 6DE, April 2007.

表4.2-16 國內外相關研究之室外和室內 L_{eq} 噪音量差異之結果比較^[44、46、48]

研究人(單位)	音源 種類	Window Position dB(A)			研究人(單位)	音源 種類	Window Position dB(A)		
		open	tilted	closed			open	tilted	closed
DLR 2010	Freight Trains	11.3 (4)	18.6 (10)	30.1 (13)	Scamoni 2014	Reference Road			31.2 (334)
	Trains Passenger	11.9 (4)	18.0 (10)	29.7 (13)	Ryan 2011	Road	10.7 (11) 5.4(空房)~ 14.7		
	Road	11.6 (4)	17.7 (10)	30.1 (13)	Maschke 2010	Aircraft		12	
DLR 2006	Road	13.4 (4)	13.7 (32)	27.0 (15)	FOEN 1998	Aircraft		15	25
	Aircraft	10.0 (4)	15.3 (32)	25.6 (15)	Jansen 1995	Aircraft		15	
歐洲環境局		5~10	10~15						
Barbara Locher 等 2018	Road	10.0 (115) 1.7~17.3	15.8 (116) 8.7~21.7	27.8 (76) 16.2~38.0	Pabst 2009	Aircraft			24~35
環保署 106 研究專案	一般道路	6.0 (1)		17.7 (1)	環保署 106 研究專案	道路系統 (有民眾居住)	9.4 (5) 5.9~12.6		19.3 (5) 14.8~29.7
	軌道系統 (有民眾居住)	9.3 (9) 6.1~14.5		17.7 (9) 9.4~27.4		道路系統 (空屋或近完工 新屋)	7.1 (4) 5.3~9.3		22.0 (5) 18.1~27.8
	軌道系統 (空屋或近完工 新屋)	2.7 (1)		13.4 (1)					

註：括號中的值為分析位置的數量。DLR：德國航空航天中心。FOEN：瑞士聯邦環境辦公室。

4.2.12 窗戶之開關與室內環境品質

因窗戶之開關部分，除了噪音外，亦涉及光線及空氣之穿透，甚至於內外污染物之傳輸，故加以蒐集相關文獻並彙整如下。

一、光線：開窗對於視覺舒適度、通風、採光等有正面之效益，尤其善用晝光不但可為建築物節省能源，而且能使室內有更舒適的光度。若與人工照明系統配合得宜，使用晝光可以大大地減少人工照明系統的用電量。另一方面，由於減少使用人工照明系統亦減少來自它們的熱量，所以空調系統的負荷也相應降低^[49]。外殼隔熱設計涉及開窗面積的大小，在國外的外殼隔熱性能規範中，許多也對開窗率加以限制，對於越大的開窗面積，給予越嚴格的傳熱係數與遮陽係數限制，此一目的是希望縮小建築物開口部的面積，使得從玻璃傳進的日射熱得及熱傳導降低。國內甚至有研究指出：「外殼節能設計最重要的因素在於開窗率，它影響空調負荷的比重占高達五成以上，因此降低開窗面積率是空調節能最重要的手段。在確保適當的自然採光，並免除心理封閉感的條件下，建築立面設計應要避免全面玻璃的大開窗型式。住宅類建築的開窗率應維持在 30% 以下，而其他大型建築的開窗率應在 40% 以下。」另一方面，亦有相關理論對於開窗議題提出不同之觀點，認為較大之開窗率，對於建築亦有其他的優點，例如：減緩構造蓄熱、因應全球暗化、二氧化碳減量及增加採光通風^[49]。

二、空氣：傳統窗戶和氣流窗口之間的主要區別在於兩層玻璃之間存在自由或強制對流，稱為氣流腔 (Airflow Cavities)。氣流窗有四種主要操作模式：供氣、排氣、室內氣簾和室外氣簾 (圖 4.2-1)。供氣窗口將空氣從外部吸入內部空間；排氣窗口將空氣從內部空間抽出到外部空間。室內和室外空氣簾分別具有從內到內以及從外到外的氣流路徑。氣流由自然、混合或強制效應所驅動^[50]。

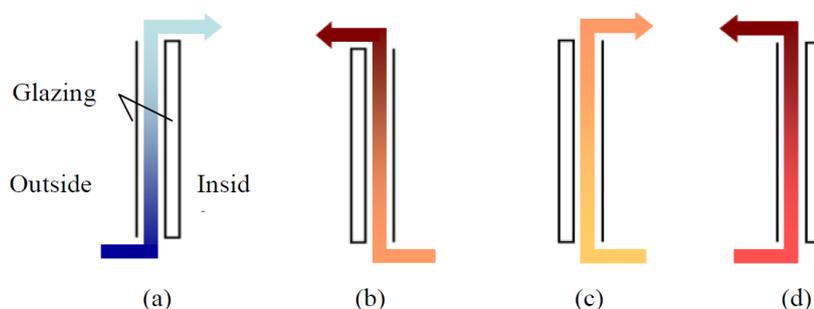


Figure 1. Existing airflow window types: (a) supply mode, (b) exhaust mode, (c) indoor air curtain and (d) outdoor air curtain.

圖 4.2-1 現有的氣流窗口類型示意圖^[50]

(J.R. Gosselin et al., 2008) 提出了一種用於住宅建築的新型雙氣流窗(圖 4.2-2)，用室內空氣排出室外空氣。由於兩個流動流之間的逆流熱交換，調節室外空氣所需的能量減少。經過實驗驗證的計算流體動力學(CFD)模擬已被用於優化窗口設計並估計窗戶系統的益處。結果表明，10 L/s 的小流量和 9 mm 的小腔寬度可以獲得最佳的窗口性能。在本研究的條件下，窗口的熱回收效率從 20% 到 56% 不等。在此範圍內，在冬季條件下，太陽能的利用可以使效率提高 20%。雙窗口的性能優於現有的單個氣流窗口。雖然該研究顯示了在潮濕條件下凝結的可能性(Risk of Condensation)，但雙氣流窗口具有節約能源和改善室內空氣質量的巨大潛力^[50]。

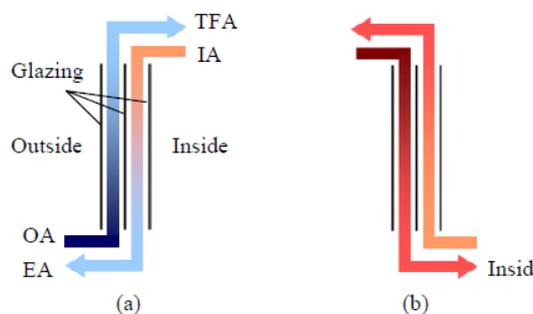


Figure 2. Two operating modes: (a) supply and (b) exhaust; note that TFA = tempered fresh air, IA = indoor air, OA = outdoor air and EA = exhaust air.

圖 4.2-2 兩種操作模式的雙氣流窗示意圖^[50]

國外研究 (Kai Ming Li et al., 2012) 使用供氣流窗口 (Supply Airflow Window) 及雙氣流窗口 (Dual Airflow Window) 隔音，從而節約能源並改善室內空氣品質，如圖 4.2-3 所示。由於適合能量交換，通風窗戶有望在建築物中節約能源。它們還改善了室內空氣品質，因新鮮的室外空氣通過供氣扇引入室內，室內污染物通過單獨的排氣扇排出室外。研究結果表明，雙氣流窗在寒冷或極寒的氣候區表現更好，在炎熱潮濕的氣候區節能的潛力有限^[51]。

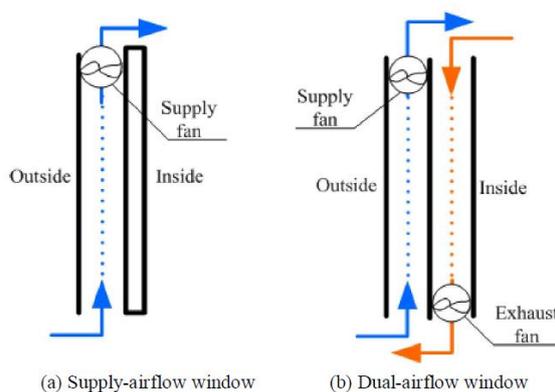


圖 4.2-3 供氣流窗口及雙氣流窗口通風窗示意圖^[51]

三、內外污染物

為了減輕室外噪音影響，建築物通常將門窗關閉，這會影響建築物居住者的健康和工作效率，因為需要足夠的室外新鮮空氣供應以稀釋室內污染物。室內空氣品質（Indoor Air Quality, IAQ）與室內污染物釋放率和室內/室外空氣交換率有著直接相關性（Jokl, 2000）。美國環保署報告提及通風不足會增加室內污染物濃度（見 <http://www.epa.gov/iaq/ia-intro.html>）。較差的室內空氣品質與呼吸系統疾病、過敏、哮喘和病態建築綜合症（Sick Building Syndrome）有關（Luo, 2007）。因此，須透過開發綠色建築材料和引入更好的通風策略，以減少不符合標準的室內空氣品質問題（Luo, 2007）^[51]。

建築物居住者不斷產生二氧化碳（CO₂），然而，二氧化碳濃度在室外通常是穩定的。因此，CO₂ 濃度是評估室內空氣品質與通氣率（Ventilation Rate）之間關係的良好指標（Leephaakpreeda, 2001）。美國採暖、製冷與空調工程師學會（The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, ASHRAE）建議可接受的室內二氧化碳濃度標準低於 1,000 ppm（Seppanen, 1999）。

（Peter STRØM-TEJSEN et al., 2014）研究室內環境的物理測量，顯示開關窗兩種條件之間的顯著差異。在關閉窗口條件下，平均 CO₂ 濃度為 2,585 ppm；在開窗條件下平均 CO₂ 濃度為 660 ppm，測量溫度僅有微小差異^[52]。

打開窗戶對評估的空氣新鮮度有顯著的正面影響。在開窗條件下較低的相對濕度導致更多的唇和皮膚乾燥，但鼻腔乾燥較少，可能是因為所有空氣污染物的濃度降低。在開放窗口條件下，主觀評估入睡能力顯著增加，這是由活動紀錄數據支持的結果。格羅寧根睡眠質量量表（Groningen Sleep Quality Scale）顯示受試者在窗戶打開時有睡得更好的傾向。受試者報告感覺不那麼困，並且在打開窗戶睡覺後能夠更好地集中注意力^[52]。

4.3 進行住宅區室內外噪音量測研究

本研究之住宅室外及室內音量品質測量工作係屬環保署科技研究計畫之工作項目，因建築物室內噪音係屬內政部營建署職掌，並非環保署主管業務，惟測量結果及建議仍可供相關單位參考，以利住宅區聲音環境品質之改善。

4.3.1 住宅區室內外噪音量測規劃說明

依甄選須知，本項工作為進行陸上運輸系統沿線住宅區環境噪音量測（至少 5 站次），包括開（門）窗與關（門）窗條件及衰減狀況等不同室外及室內量測工作。透過量測數據及 106 年專案研究計畫所建議之室內音品建議值來瞭解及檢討現行噪音源端之管制標準有無改善空間。以下就測量前之規劃進行說明，包括：(1)測量目的及狀況；(2)測點篩選；(3)測量方法；(4)測量時間及指標；及(5)測量儀器。

一、測量目的及狀況

擬定之測量狀況如圖 4.3-1 之示意，主要在於瞭解建築物於「開（門）窗及關（門）窗」之隔音量（即穿透損失）及室內外音量衰減等情形。

- (一)瞭解建築物「窗戶（門）打開」之穿透損失及對室外噪音的衰減狀況。
- (二)瞭解建築物「窗戶（門）關閉」之穿透損失及對室外噪音的衰減狀況。

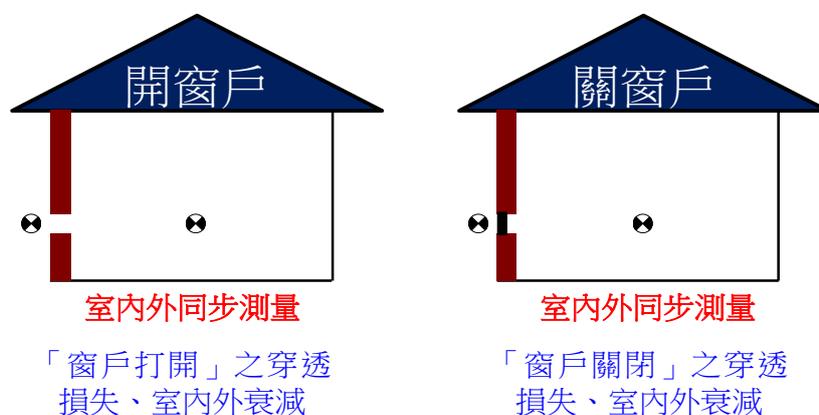


圖 4.3-1 住宅區室內外噪音及頻譜資料測量狀況示意圖

註：●表「室內外同步測量」之受音點。

二、測點篩選

考量住宅區之室外噪音來源眾多，為縮小研究範圍以利測量對象能更為明確，本計畫係採先篩選後測量之方式辦理，篩選原則如下所列。

- (一)位置：曾發生噪音陳情之地點、路段或車流繁忙路段，俾具代表性。

(二)對象：一般道路或陸上運輸之「道路系統或軌道系統」。考量近來鐵路屢受民眾陳情噪音問題，故本年度將以台鐵作為主要測量對象。

(三)數量：共 6 點次（合約為 5 點次）並統計分析其結果。

三、測量方法

參考下述研究案及既有之測量方法規範：

(一)住宅區室內

- 1.環保署 96 年、97 年圖書館及醫院等公共場所室內音量研究工作。
- 2.環保署 98 年至 101 年陸上運輸系統場站室內音量研究工作。
- 3.環保署 106 年度「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」專案研究計畫。

(二)住宅區室外

- 1.《陸上運輸系統噪音測量方法 NIEA P206.90B》：民國 103 年 12 月 8 日環署檢字第 1030103428 號公告。自民國 104 年 3 月 15 日生效。
- 2.《環境噪音測量方法 NIEA P201.96C》：民國 105 年 11 月 25 日環署檢字第 1050095238 號公告。自民國 106 年 3 月 15 日生效。

四、測量時間及指標

參考環保署 106 年度「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」專案研究計畫，故本計畫所採之測量時間及指標如下。

(一)一般道路及陸上運輸道路系統：5 分鐘之均能音量 L_{Aeq} 及最大音量 L_{Amax} ，快特性。應判斷噪音變動情況而決定最適擷取時距，惟須注意其至少包含一個代表性週期噪音發生。

(二)陸上運輸軌道系統：噪音事件之均能音量 $L_{Aeq(事件)}$ 及最大音量 $L_{Amax(事件)}$ ，慢特性。將各班次列車之數據採能量平均處理。其音量擷取之方式依《陸上運輸系統噪音管制標準》等相關規定辦理。

五、測量儀器

採用日本廠牌 RION，型號 NL-32(52)噪音計。噪音計之 QA 及 QC 相關資料請參閱附件五。

4.3.2 住宅區室內外噪音量測結果

本計畫住宅區室內外的各點次噪音測量結果彙整如表 4.3-1 所示，詳細紀錄資料請參閱表 4.3-2，並將結果說明如後。

一、開（門）窗隔音量： L_{eq} 全頻隔音量約 6.0 dB(A)~14.1 dB(A)，算數平均值約 10.6 dB(A)； L_{max} 約 5.4 dB(A)~13.5 dB(A)，算數平均值約 11.1 dB(A)。

二、關（門）窗隔音量： L_{eq} 全頻隔音量約 13.1 dB(A)~19.8 dB(A)，算數平均值約 16.8 dB(A)； L_{max} 約 12.0 dB(A)~18.9 dB(A)，算數平均值約 16.3 dB(A)。

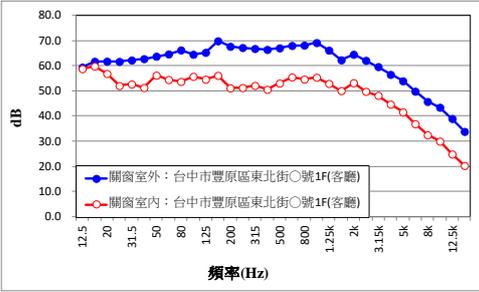
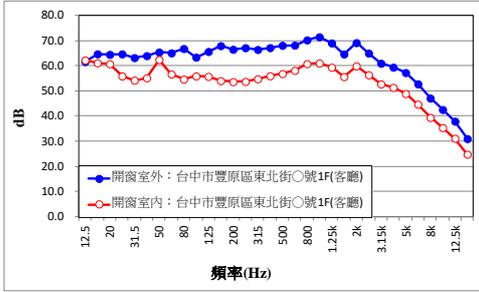
表 4.3-1 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果彙整表

測量類別	測點名稱	室內位置	外牆樣式	窗戶樣式	開窗率約	關（門）窗全頻隔音量dB(A)		開（門）窗全頻隔音量dB(A)		備註
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	
台鐵 (路堤段)	1.台中市豐原區東北街○號1F	客廳	二丁掛	左右拉窗鋁框(單片透明玻璃,約4mm)	24.0%	13.1	12.0	9.7	9.8	窗戶僅能拉一側;列車音量較低
	2.台中市豐原區圓環北路二段○巷○號1F	雜物間	鐵皮	左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)	44.6%	18.5	18.9	12.4	13.1	窗戶僅能拉一側
	3.台中市后里區圳寮路○巷○號1F	書房	上漆水泥	左右拉窗木框(單片壓花玻璃,約3mm)	33.0%	16.9	15.6	9.8	11.6	窗戶僅能拉一側;列車音量較高
	4.台中市大甲區金華路○號1F	辦公室	二丁掛	左右拉窗鋁框(單片透明玻璃,約4mm)	41.9%	17.1	17.3	11.6	13.5	窗戶僅能拉一側
	5.台中市大甲區中山路一段○巷○號○號1F	客廳	水泥	左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)	38.4%	19.8	18.4	14.1	13.4	窗戶僅能拉一側
台鐵 (高架段)	1.台中市豐原區東北街○巷○號2F	客廳	方磚	左右拉門鋁框(單片透明玻璃,約6mm)	25.7%	15.1	15.3	6.0	5.4	客廳玻璃門為左右皆拉開;列車音量較低
算數平均值					34.6%	16.8	16.3	10.6	11.1	

註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾。

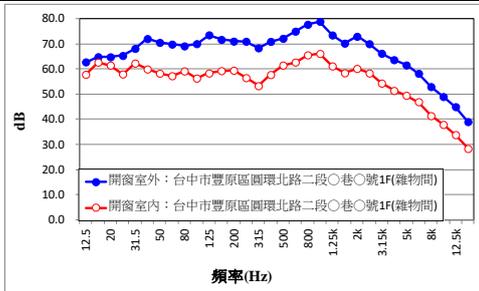
2.開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。

表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (1/6)

基本資料									窗戶(門)狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市豐原區東北街○號1F	107 09.01 (週六)	台鐵(路堤段)	客廳	麥克風離地約1.2m高, 離窗戶(牆面)約1.5m遠	1.96	0.47	24.0%	左右拉窗鋁框(單片透明玻璃, 約4mm)						
牆體狀況			關(門)窗之室內外同步測量結果dB(A)						開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)					
長度約 (m)	樣式	距軌道胸牆約 (m)	室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量 (1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
12.1	二丁掛	25.8	76.0	78.3	62.9	66.3	13.1	12.0	78.2	80.8	68.5	71.0	9.7	9.8
														
台中市豐原區東北街(台鐵路堤段)									左右拉窗鋁框(單片透明玻璃, 約4mm)					
														
室外測點：離窗戶(牆面)約1.5m									室內測點：客廳(離窗戶約1.5m)					
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					

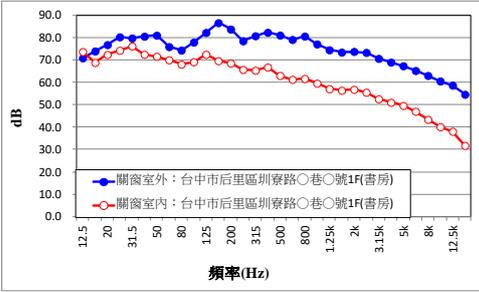
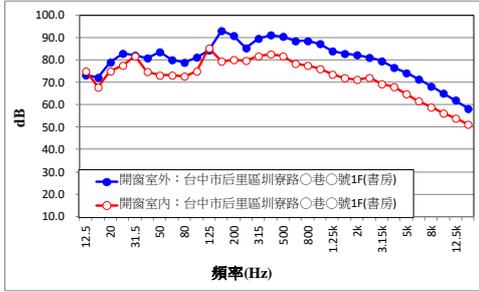
- 註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。
2. L_{eq} 係為列車事件音量，非小時均能音量 $L_{eq,1h}$ ，故其值較高。

表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (2/6)

基本資料									窗戶(門)狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市豐原區圓環北路二段○巷○號1F	107 09.01 (週六)	台鐵 (路堤段)	雜物間	麥克風離地約1.2m高，離窗戶(牆面)約1.5m遠	0.83	0.37	44.6%	左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)						
牆體狀況			關(門)窗之室內外同步測量結果dB(A)						開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)					
長度約(m)	樣式	距軌道胸牆約(m)	室外(1)		室內(2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		全頻隔音量(1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
11.1	鐵皮	5.6	83.7	86.3	65.2	67.4	18.5	18.9	84.1	87.3	71.7	74.2	12.4	13.1
														
台中市豐原區圓環北路二段(台鐵路堤段)					左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)									
														
室外測點：離窗戶(牆面)約1.5m					室內測點：雜物間(離窗戶約1.5m)									
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									

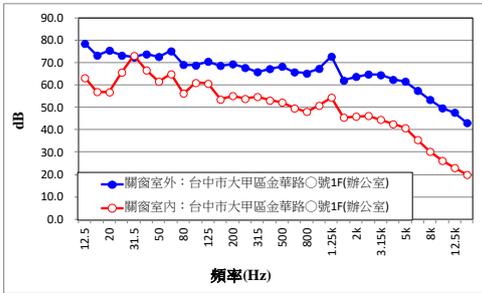
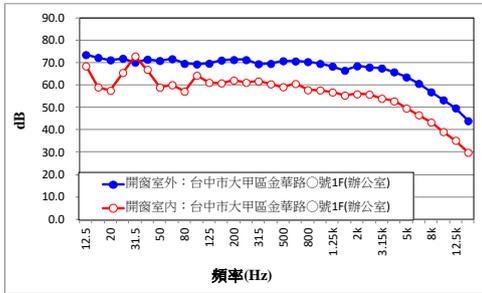
註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。
2. L_{eq}係為列車事件音量，非小時均能音量L_{eq,1h}，故其值較高。

表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (3/6)

基本資料					窗戶(門)狀況									
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市后里區圳寮路○巷○號1F	107 09.01 (週六)	台鐵(路堤段)	書房	麥克風離地約 1.2m高，離窗戶(牆面)約 1.5m遠	1.97	0.65	33.0%	左右拉窗木框(單片壓花玻璃,約3mm)						
牆體狀況		關(門)窗之室內外同步測量結果dB(A)					開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)							
長度約 (m)	樣式	距軌道胸牆約 (m)	室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量 (1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
8.7	上漆水泥	1.6	87.5	90.1	70.6	74.5	16.9	15.6	96.3	99.0	86.5	87.4	9.8	11.6
														
台中市后里區圳寮路(台鐵路堤段)					左右拉窗木框(單片壓花玻璃,約3mm)									
														
室外測點：離窗戶(牆面)約1.5m					室內測點：書房(離窗戶約1.5m)									
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									

- 註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。
2. L_{eq} 係為列車事件音量，非小時均能音量 $L_{eq,1h}$ ，故其值較高。

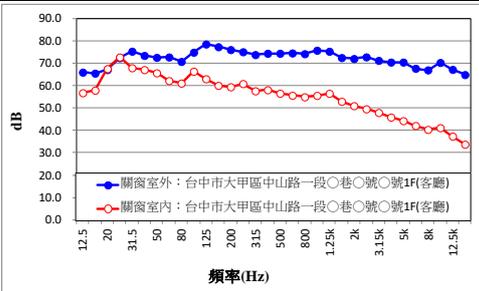
表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (4/6)

基本資料					窗戶(門)狀況									
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市大甲區金華路○號1F	107 09.09 (週日)	台鐵(路堤段)	辦公室	麥克風離地約 1.2m高, 離窗戶(牆面)約 1.5m遠	1.17	0.49	41.9%	左右拉窗鋁框(單片透明玻璃,約4mm)						
牆體狀況		關(門)窗之室內外同步測量結果dB(A)					開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)							
長度約 (m)	樣式	距軌道胸牆約 (m)	室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量 (1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
6.5	二丁掛	12.6	77.7	79.4	60.6	62.1	17.1	17.3	79.5	83.8	67.9	70.3	11.6	13.5
														
台中市大甲區金華路(台鐵路堤段)					左右拉窗鋁框(單片透明玻璃,約4mm)									
														
室外測點：離窗戶(牆面)約1.5m					室內測點：辦公室(離窗戶約1.5m)									
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									

註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。

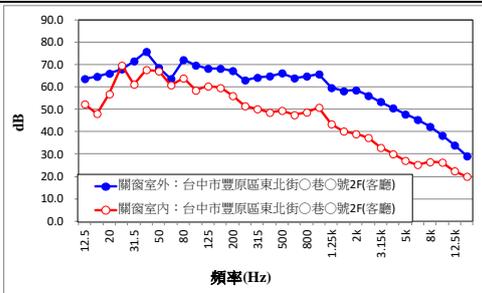
2. L_{eq}係為列車事件音量，非小時均能音量L_{eq,1h}，故其值較高。

表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (5/6)

基本資料					窗戶(門)狀況									
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市大甲區中山路一段○巷○號○號1F	10709.09(週日)	台鐵(路堤段)	客廳	麥克風離地約1.2m高,離窗戶(牆面)約1.5m遠	0.86	0.33	38.4%	左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)						
牆體狀況		關(門)窗之室內外同步測量結果dB(A)					開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)							
長度約(m)	樣式	距軌道胸牆約(m)	室外(1)		室內(2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		全頻隔音量(1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
7.5	水泥	3.0	84.7	87.2	64.9	68.8	19.8	18.4	85.6	90.4	71.5	77.0	14.1	13.4
														
台中市大甲區中山路一段(台鐵路堤段)					左右拉窗鋁框(單片霧面玻璃,約3mm)									
														
室外測點：離窗戶(牆面)約1.5m					室內測點：客廳(離窗戶約1.5m)									
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									

註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。
 2. L_{eq}係為列車事件音量，非小時均能音量L_{eq,1h}，故其值較高。

表 4.3-2 本計畫之住宅區室內外噪音測量結果表 (6/6)

基本資料									窗戶(門)狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率 %約 (B/A)	樣式						
台中市豐原區東北街○巷○號2F	107 09.09 (週日)	台鐵(高架段)	客廳	麥克風離地約 1.2m高，離窗戶(牆面)約 1.5m遠	7.13	1.83	25.7%	左右拉門鋁框(單片透明玻璃,約6mm)						
牆體狀況		關(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)							開(門)窗之室內外同步測量結果 dB(A)					
長度約 (m)	樣式	距軌道胸牆約 (m)	室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量(1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		全頻隔音量 (1)-(2)	
			L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}	L _{eq}	L _{max}
16.3	方磚	19.2	72.3	76.0	57.2	60.7	15.1	15.3	73.0	75.5	67.0	70.1	6.0	5.4
														
台中市豐原區東北街(台鐵高架段)									左右拉門鋁框(單片透明玻璃,約6mm)					
														
室外測點：離窗門(牆面)約1.5m									室內測點：客廳(離窗門約1.5m)					
														
關窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)									開窗：室內外之頻譜比較圖(不加權)					

註：1.測量時已儘量排除背景噪音之干擾，開窗及關窗各測量3列次並取其能量平均值。

2. L_{eq} 係為列車事件音量，非小時均能音量 $L_{eq,1h}$ ，故其值較高。

4.3.3 陸上運輸系統噪音管制標準之檢討

國外之軌道系統的均能音量指標多用採日間及夜間之時段平均音量，與國內《陸上運輸系統噪音管制標準》採用之小時均能音量 $L_{Aeq,1h}$ 不同，且依過去環保局陳情案件，鐵路系統超標主要係平均最大音量 $L_{max,mean,1h}$ ，故蒐集有採用最大音量 L_{Amax} 為標準之國家並與國內標準進行比較分析，詳如表 4.3-3 所示。

國外除了日本新幹線之室外最大音量 L_{Amax} 標準為 75 dB(A)（採用單一測點，距離軌道中心線 25m，離地 1.2m 高）之外，其餘國家之室外最大音量標準介於 80 dB(A)~87 dB(A)（依現有鐵路線或現有線路的重新開發、新鐵路線而有所不同）；室內最大音量 L_{Amax} 標準則為 45 dB(A)~55 dB(A)。

目前國內《陸上運輸系統噪音管制標準》之平均最大音量標準係依管制區而有不同的標準，其室外標準為第一類及第二類管制區為 80 dB(A)，第三類及第四類管制區為 85 dB(A)，此與國外室外最大音量 L_{Amax} 標準相近；環保署 106 年專案研究計畫之室內最大音量建議值為 60 dB(A)，則較國外標準為寬鬆。

表 4.3-3 國外鐵路噪音最大音量 L_{Amax} 管制標準

國家	現有鐵路線或現有線路的重新開發 dB(A)	新鐵路線 dB(A)	備註
一、澳洲(Australia)			
1.新南威爾斯州 (New South Wales)	85	80	
2.維多利亞省 (Victoria)	85	80	
3.南澳大利亞州 (South Australia)	85	80	
4.昆士蘭省 (Queensland)	<ul style="list-style-type: none"> ● 規劃位準 (逐步實現) 87 * ● 臨時位準 (現在要實現) 95 * 	規劃位準 87 *	*24 小時內最高 15 個 L_{Amax} 的算術平均值
5.塔斯馬尼亞州 (Tasmania)	<ul style="list-style-type: none"> ● 規劃位準 87 ● 臨時位準 95 	87	
二、歐洲國家(European countries)			
1.丹麥(Denmark)	n/a	85	
2.挪威(Norway)	n/a	<ul style="list-style-type: none"> ● 80 ● 45~55 (室內) 	
3.瑞典(Sweden)	n/a	45 (室內)	
三、亞洲(Asia)			
1.香港(Hong Kong)	n/a	85 (夜間)	
2.日本(Japan)	n/a	<ul style="list-style-type: none"> ● 70 (住宅區) * ● 75 (工業區及商業區) 	評估方法為上下行連續通過 20 班列車產生之噪音最大值，取其較大之前 10 個做能量平均。測點據軌道中心線 25m，離地 1.2m 高。1975 年公告之新幹線鐵道噪音之環境基準，噪音評估指標係以最大值為基準，要求住宅區之音量最大值不超過 70 dB(A)仍很困難，故於 1985 年另公告「暫行基準」，暫時將住宅區域之噪音環境基準定為 75 dB(A)。

資料來源：“Rail Infrastructure Noise Guideline”, State of NSW and Environment Protection Authority, May 2013.

4.4 彙整國內既有陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量(含低頻音)歷年量測成果數據

一、研究緣起

台灣地區由於地狹人稠、都市土地的密集使用與生活方式之改變，故新住宅之建設越來越靠近交通噪音源，而已建成的住宅可能會有新的噪音影響。因此，瞭解住宅室內外的音量、門窗的噪音衰減及建築隔音特性越顯得重要。本研究著重於建築物室內外音量之差異，主要是透過住宅案例，進行噪音現況之測量及分析，包括：不同室內位置、開(門)窗及關(門)窗、門窗種類、門窗開口大小及噪音源種類等。

二、研究成果

106 年度(20 點次)及 107 年度(6 點次)之住宅區室內外的各點次噪音測量結果彙整，詳如表 4.4-2 及圖 4.4-1~圖 4.4-20 所示並將結果說明如後。由於道路音源或軌道音源都屬中高頻率為主的噪音，因此，分析上不區分音源類別。

(一)關(門)窗隔音量

經實際測量，隔音量超過 20 dB(A) (圖 4.4-3 及圖 4.4-7) 主要為：(1)金屬門窗框架材料；及(2)採用隔音等級更高之玻璃樣式；一般住家當門窗關閉時，多數之隔音量不足 20 dB(A)，因大多採用厚度約 3 mm~5 mm 的單層玻璃居多，加上施工門窗縫隙的密度大小等之影響，故隔音量小於實驗室之 STC (Sound Transmission Class) 隔音等級。進一步回歸分析同步測得之室內音量及室外音量(圖 4.4-11 及圖 4.4-13)，相關係數不足 0.5，表示兩變數(室內外音量)之間具有低度的線性相關，即受透射過門窗的途徑介質(門窗框及玻璃)影響較大。由上述初步結果顯示，影響室內外關(門)窗音量差異之因素，主要與門窗戶框架材料及玻璃樣式等有關。依據測量之初步結果，關(門)窗之平均隔音量約近 20 dB(A)。

聲音透過空氣作為傳遞介質，良好的隔音氣密窗及好的施工品質，應可充分阻隔聲音傳遞至室內，惟低頻音亦會透過窗戶以外的其他建築結構傳遞至室內或室外，且低頻音之波長較長，故需要面密度較大之結構體才能有效阻隔其傳遞。基於上述可能影響原因，由 106 年及 107 年測值分析於關(門)窗條件之下(圖 4.4-9)，全頻音之隔音量幾乎皆高於低頻隔音量，即對於全頻音的隔音效果較佳。

(二)開(門)窗隔音量

經實際測量，隔音量超過 10 dB(A) (圖 4.4-2 及圖 4.4-6) 主要為：(1)室內空間大；(2)雜物多(衣物堆疊)；(3)柔性物質多(如：編號 15 遊戲房)，因較大房間內部具有較低的聲級及因室內吸音而音量較低，而導致室內外之音量差異較大；一般住家當門打開時，多數之隔音量不足 10 dB(A)，因大多客廳玻璃門為左右拉開或前後推開(相較一般窗戶僅能拉一側有所不同)，其開口部較大，故其隔音量較低。若屬空屋(無人居住)，則空屋的迴音(多重反射)可能造成室內音量較大，而導致開(門)窗之隔音量較低，一般空屋開(門)窗之隔音量約 5 dB(A)。

進一步回歸分析同步測得之室內音量及室外音量(圖 4.4-12 及圖 4.4-14)，相關係數接近 0.9，表示兩變數(室內外音量)之間具有高度的線性相關，即受透射過門窗的途徑介質(門窗框及玻璃)影響較小。由上述初步結果顯示，影響室內外開(門)窗音量差異之因素，主要與室內空間大小、吸音能力及門窗的打開位置等有關。依據測量之初步結果，關(門)窗之平均隔音量約近 10 dB(A)。

因都會區易產生低頻噪音設備(如：冷卻水塔、空調系統、抽排風機、抽水馬達等)數量較多，加上過度開發，使得緊臨交通要道、高架橋旁的居家環境增加，因此，這些機械動力設備在運轉時，或交通工具所發出的共振聲響，都會沿著房屋的梁、柱、樓板、牆面等建築物本體結構傳遞至民眾居所。另外，若建物的結構體材質過薄、水泥灌漿不實或牆面存有裂縫...等，也都是造成低頻聲響加劇或隔音效果不佳的可能原因。基於上述可能之影響因素，由 106 年及 107 年測值分析於開窗條件之下(圖 4.4-10)，全頻音及低頻音之室內外隔音量並無一定之規律性，故門窗僅是影響隔音效果的因素之一。

(三)與室內音量建議值之比較

若以日間室內 L_{eq} 及 L_{max} 之建議值(參考 106 年專案研究計畫)分別為 55 dB(A)及 60 dB(A)而言，計算符合上述室內音量日間建議值之比例(編號 4 不納入計算)，其中軌道系統之 L_{eq} 係為列車事件音量，非小時均能音量 $L_{eq,1h}$ ，故其值較高，詳如表 4.4-2 及圖 4.4-17~圖 4.4-20 所示並說明如下。關(門)窗時，室內 L_{eq} 符合日間建議值之比例約 48.0%，室內 L_{max} 符合之比例約 52.0%，即約有半數可符合室內音量建議值。

(四)各類型不同樣態住宅區環境噪音提出改善方案與建議

交通噪音影響與改善之各部會負責事項內容，彙整如表 4.4-1 所示。不論

門窗是否關閉，最有效之改善方案即將室外音源強度降低，包括：音源端噪音減量及控制噪音傳播途徑，此部分一般係由營運管理機關（構）辦理改善，若屬受體端則改善方案建議如下。

1.關閉門窗

當住宅屬長時間關閉門窗之樣態，建議可從強化門窗框架材料及採用隔音等級更高之玻璃樣式改善。因室外噪音透射過門窗的途徑主要是門窗縫隙，因此，要獲得高隔音量須改善門窗縫隙的密合度以提高門窗隔音量。

當改善門窗縫隙的密合度後，才能藉由選擇不同種類的玻璃以提高隔音量。在相同的玻璃厚度下，隔音量大小為隔音膠合玻璃 > 一般膠合玻璃 > 複層玻璃 > 單片玻璃。膠合玻璃的隔音效果優於複層玻璃，其原因為複層玻璃中的間隙太小，故無法有效發揮隔音效果，惟膠合玻璃中的薄膜卻可有效降低噪音。另若要達到更好的隔音效果，可採用厚度更佳之玻璃，惟須注意窗戶的結構設計以及強度是否能承受如此厚度的重量。

如果門窗必須保持關閉以達室內音量建議值，則參考國外如紐西蘭之作法，建議住家應採取建築物之機械通風（Mechanical Ventilation），即利用通風機械（風扇、送風機、抽風機等）所產生的動力促使室內外的空氣交換和流動。

2.打開門窗

當住宅屬長時間打開門窗之樣態，建議可從門窗的打開位置著手改善。由實測結果知，一般窗戶左右拉開至最大（全開）時，隔音量仍約有 10 dB(A)左右；或是窗戶上部有通風口，亦可打開上部通風口保持通風，而將窗戶下部保持關閉（如：編號 8 及編號 14 之廚房飯廳(有排煙窗)）。

表4.4-1 交通噪音影響與改善之各部會負責事項內容（初擬）

類別		主管機關
音量管制 與健康	1.住宅「室外」噪音管制標準	行政院環境保護署
	2.住宅「室內」噪音管制標準	內政部營建署
	3.室內音量品質與環境健康	衛生福利部國民健康署
防制及改善 措施	1.噪音源之減音降噪	陸上運輸系統營運管理機關（構）
	2.住家空氣調節及通風設備	內政部營建署
	3.「現地」隔音門窗隔音性	經濟部標準檢驗局

表4.4-2 環保署106年研究專案（20點次）及107年研究專案（6點次）測量結果彙整表

編號	樓層	測量類別	室內位置	開(門)窗率 (%)	窗戶(門)樣式	關(門)窗 (dB(A))						開(門)窗 (dB(A))					
						室外		室內		隔音量		室外		室內		隔音量	
						L _{eq}	L _{max}										
1	1F	機場捷運(高架段)	客廳	26.2	拉窗金屬框(單片玻璃)	70.8	73.3	52.3	55.6	18.5	17.7	67.9	70.3	58.0	60.0	9.9	10.3
2	1F	機場捷運(高架段)	客廳	29.4	拉窗金屬框(壓花毛玻璃)	74.8	78.2	65.4	69.1	9.4	9.1	68.6	72.7	59.9	63.3	8.7	9.4
3	3F	國道二號(路堤段)	寢室(空屋)	25.4	拉門金屬框(單片玻璃)	67.9	71.8	47.4	52.7	20.5	19.1	67.4	73.2	62.1	66.9	5.3	6.3
4	1F	台鐵(路堤段)	寢室(室內狗吠)	23.5	拉窗金屬框(單片玻璃)	81.9	89.1	63.3	71.0	18.6	18.1	87.1	90.5	83.8	87.6	3.3	2.9
5	1F	台鐵(路堤段)	書房	22.2	拉窗金屬框(單片玻璃)	81.7	83.6	54.3	56.2	27.4	27.4	83.0	85.9	75.4	80.0	7.6	5.9
6	1F	台鐵(路堤段)	浴廁	25.0	拉窗金屬框(單片方格玻璃)	85.4	88.4	67.8	70.0	17.6	18.4	85.2	88.2	75.4	77.7	9.8	10.5
7	2F	國道一號(路堤段)	客廳(空屋)	28.4	拉門金屬框(單片玻璃)	65.2	66.0	47.1	52.3	18.1	13.7	64.7	67.2	59.2	60.5	5.5	6.7
8	1F	高鐵(路堤段)	廚房飯廳(有排煙窗)	31.2	拉窗金屬框(單片玻璃)	72.6	73.8	59.7	61.8	12.9	12.0	70.9	73.1	63.2	65.1	7.7	8.0
9	1F	高鐵(路堤段)	樓梯間	40.5	推門金屬框(單片玻璃)	80.1	81.2	66.7	73.5	13.4	7.7	78.6	79.9	75.9	78.4	2.7	1.5
10	3F	建國高架(快速道路)	客廳(空屋, 空間大)	24.0	拉門金屬框(複層玻璃)	68.2	71.0	40.4	46.3	27.8	24.7	67.5	70.5	58.2	60.2	9.3	10.3
11	2F	台鐵(高架段)	客廳	59.0	推門金屬框(白膜膠合玻璃)	69.0	70.3	54.2	57.8	14.8	12.5	66.3	67.1	60.2	61.4	6.1	5.7
12	1F	捷運(路堤段)	寢室(雜物多)	33.3	拉窗木框(壓花毛玻璃)	77.9	79.2	55.3	59.2	22.6	20.0	78.5	80.2	64.0	69.6	14.5	10.6
13	1F	大度路(平面快速道路)	客廳(雜物多)	44.4	拉窗金屬框(壓花毛玻璃)	69.6	78.6	53.5	59.0	16.1	19.6	69.8	78.1	57.9	64.8	11.9	13.3
14	1F	捷運(高架段)	廚房飯廳(有排煙窗)	47.8	拉窗金屬框(壓花毛玻璃)	73.9	75.1	61.2	65.2	12.7	9.9	74.0	75.3	64.3	68.1	9.7	7.2
15	1F	國一(路堤段)、五楊高架	遊戲房	16.7	推窗金屬框(膠合玻璃)	76.7	78.9	47.0	48.4	29.7	30.5	76.7	78.5	64.1	64.5	12.6	14.0
16	1F	國一(路堤段)、五楊高架	寢室	52.9	拉窗金屬框(雙層壓花毛玻璃)	72.3	74.8	53.3	54.7	19.0	20.1	71.8	74.5	61.8	64.7	10.0	9.8
17	1F	國一(路堤段)、五楊高架	寢室	50.0	拉窗金屬框(膠合玻璃)	76.0	78.6	54.3	55.1	21.7	23.5	76.5	79.8	68.1	68.4	8.4	11.4
18	1F	國一(路堤段)、汐五高架	寢室(空間小)	50.0	拉窗金屬框(單片方格玻璃)	75.5	79.6	60.7	62.2	14.8	17.4	75.9	81.7	69.4	70.6	6.5	11.1
19	1F	國一(路堤段)、汐五高架	交誼廳(空間大)	43.7	推門金屬框(單片玻璃)	71.8	74.0	55.0	56.2	16.8	17.8	70.8	73.5	64.9	67.3	5.9	6.2
20	1F	一般道路	客廳(雜物多)	100.0	推門金屬框(單片玻璃)	71.2	76.1	53.5	55.9	17.7	20.2	69.9	77.1	63.9	66.7	6.0	10.4
21	1F	台鐵(路堤段)	客廳	24.0	拉窗金屬框(單片透明玻璃)	76.0	78.3	62.9	66.3	13.1	12.0	78.2	80.8	68.5	71.0	9.7	9.8
22	1F	台鐵(路堤段)	雜物間	44.6	拉窗金屬框(單片霧面玻璃)	83.7	86.3	65.2	67.4	18.5	18.9	84.1	87.3	71.7	74.2	12.4	13.1
23	1F	台鐵(路堤段)	書房(室外音量大)	33.0	拉窗木框(單片壓花玻璃)	87.5	90.1	70.6	74.5	16.9	15.6	96.3	99.0	86.5	87.4	9.8	11.6
24	1F	台鐵(路堤段)	辦公室	41.9	拉窗金屬框(單片透明玻璃)	77.7	79.4	60.6	62.1	17.1	17.3	79.5	83.8	67.9	70.3	11.6	13.5
25	1F	台鐵(路堤段)	客廳(空間大)	38.4	拉窗金屬框(單片霧面玻璃)	84.7	87.2	64.9	68.8	19.8	18.4	85.6	90.4	71.5	77.0	14.1	13.4
26	2F	台鐵(高架段)	客廳	25.7	拉門金屬框(單片透明玻璃)	72.3	76.0	57.2	60.7	15.1	15.3	73.0	75.5	67.0	70.1	6.0	5.4
符合 106 年研究專案之室內音量日間建議值 L _{eq} 55 dB(A) 及 L _{max} 60 dB(A) 比例% (編號 4 不納入計算)						-	-	48.0	52.0	-	-	-	-	0.0	4.0	-	-

註：1.開(門)窗率(%)=(開(門)窗面積/窗戶(門)總面積)×100%；隔音量=室外測值-室內測值，室外及室內之測值為同步測量結果。

2.軌道系統之L_{eq}係為列車事件音量，非小時均能音量L_{eq,1h}，故其值較高。

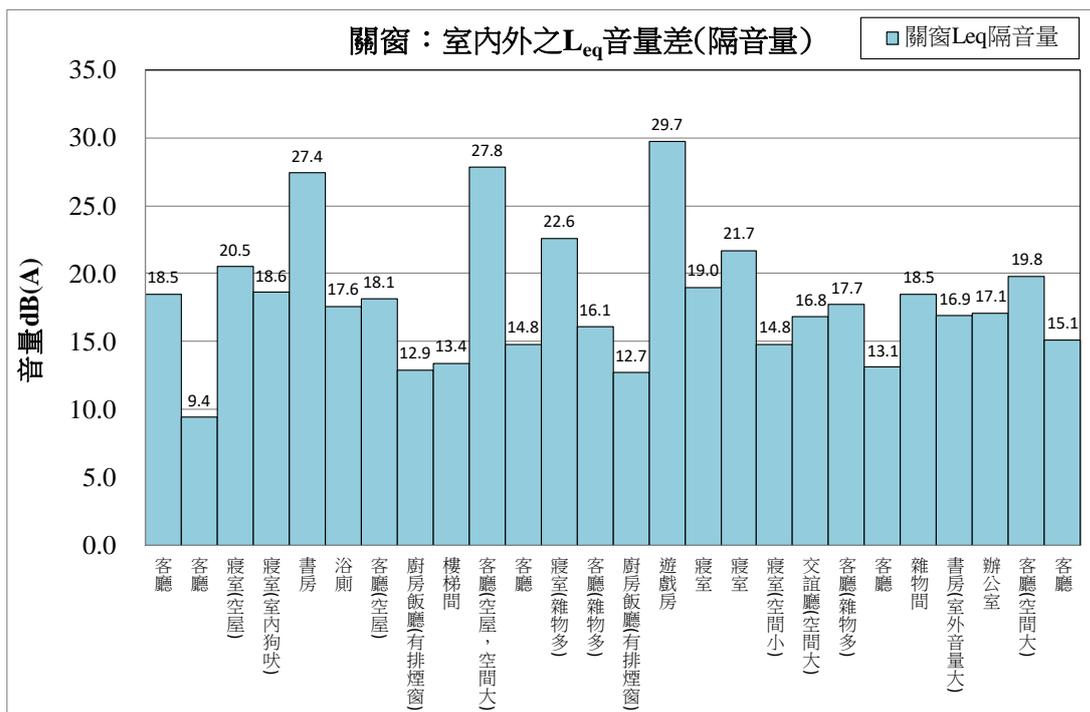


圖4.4-1 不同室內位置於「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)

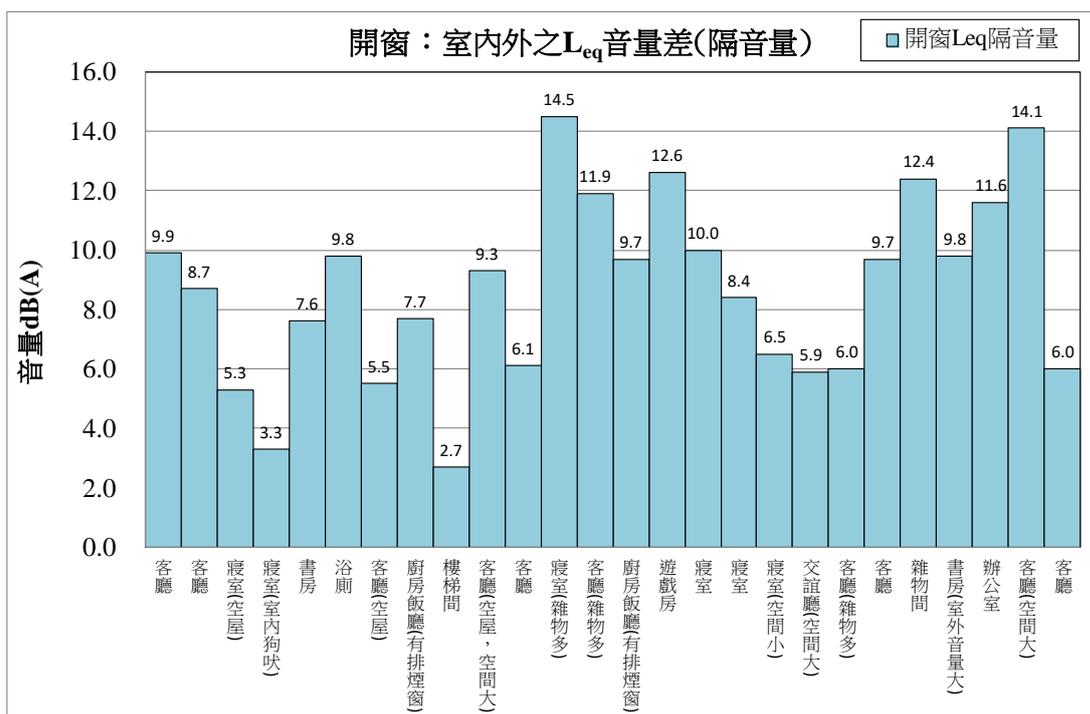


圖4.4-2 不同室內位置於「開(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)

圖4.4-1~圖4.4-20資料來源：106年度「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」專案研究計畫(20點次)；107年度「環境噪音源防制技術與室內音量品質之研究」專案研究計畫(6點次)。

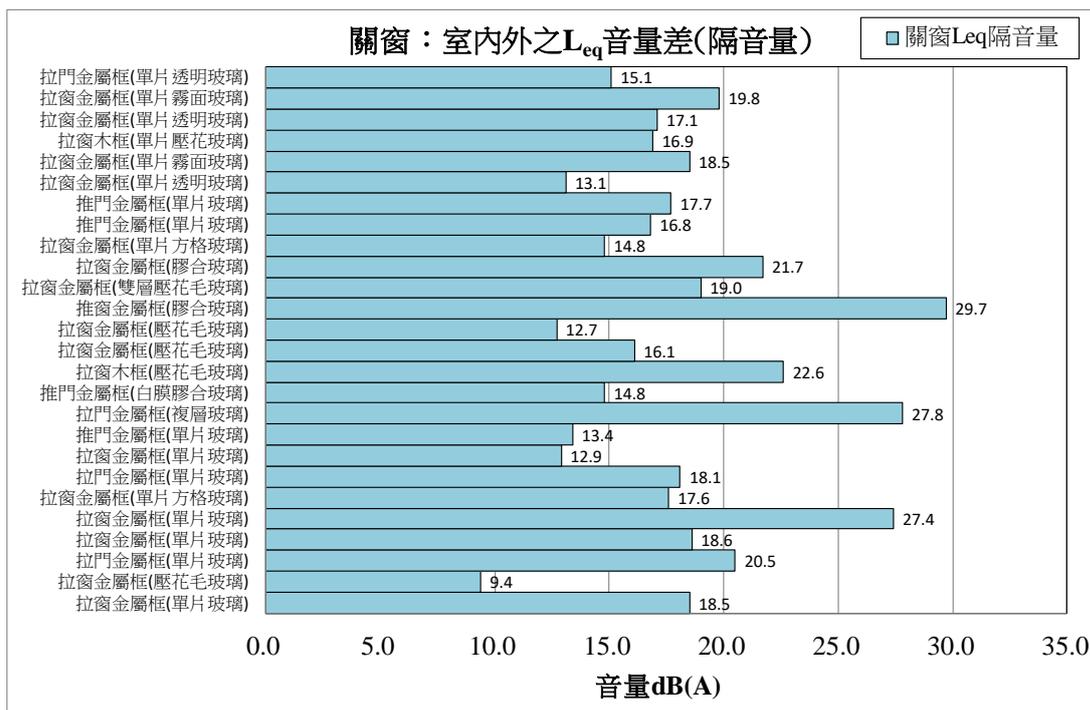


圖4.4-3 不同窗戶(門)樣式於「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)

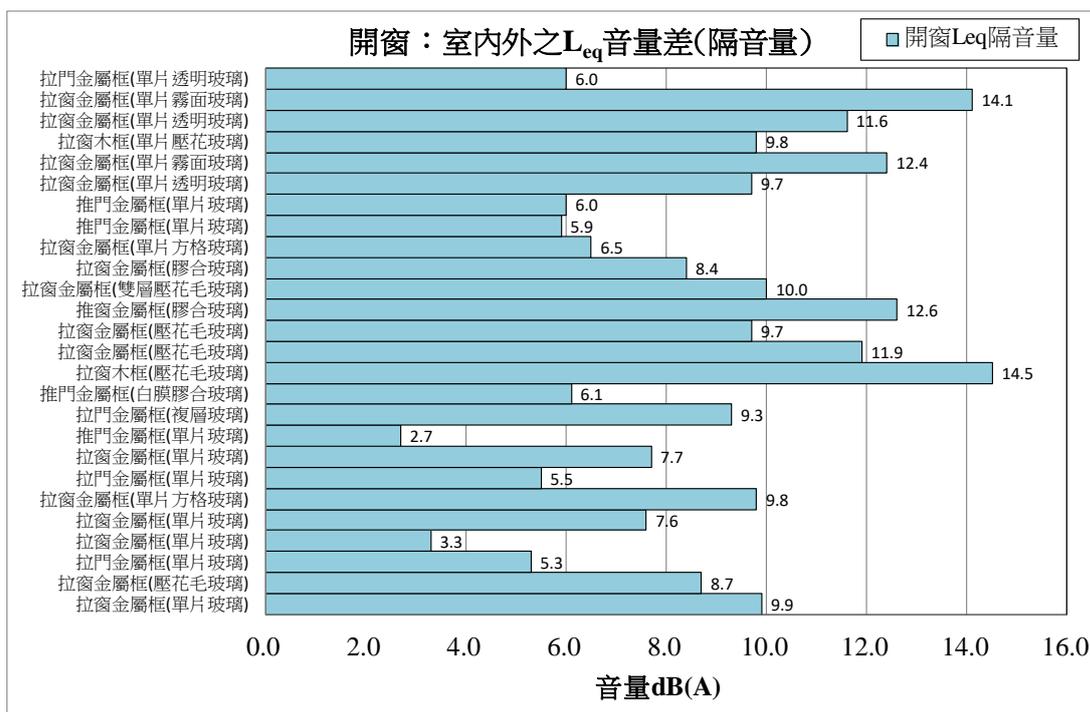


圖4.4-4 不同窗戶(門)樣式於「開(門)窗」之室內外 L_{eq} 音量差(隔音量)

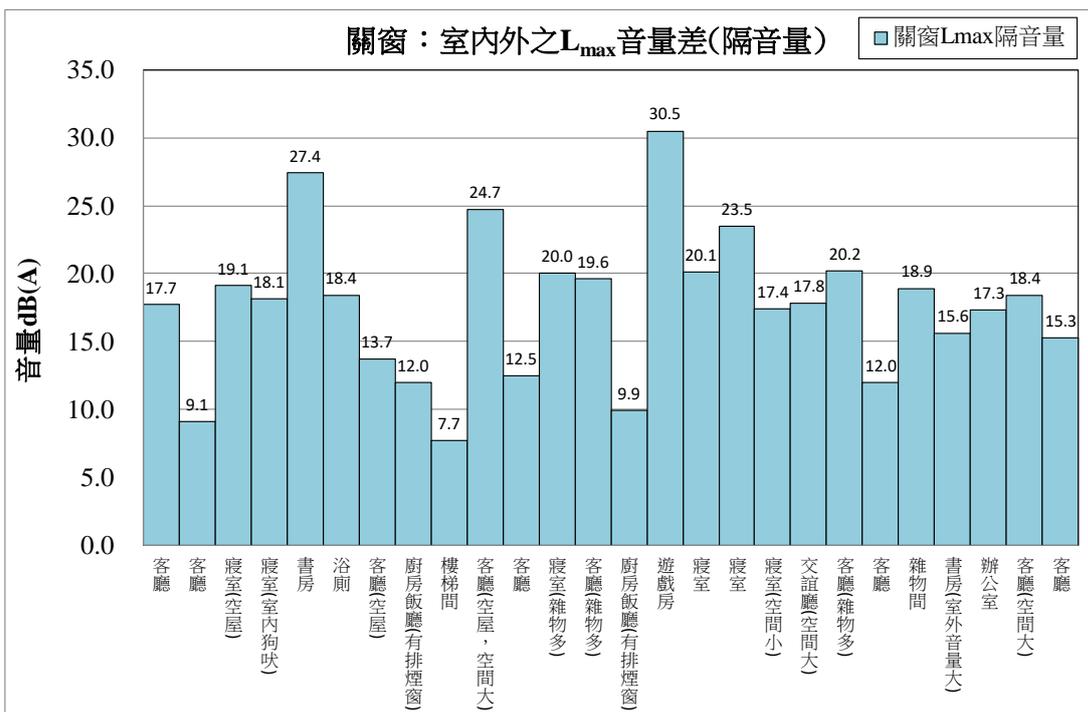


圖4.4-5 不同室內位置於「關(門)窗」之室內外 L_{max} 音量差(隔音量)

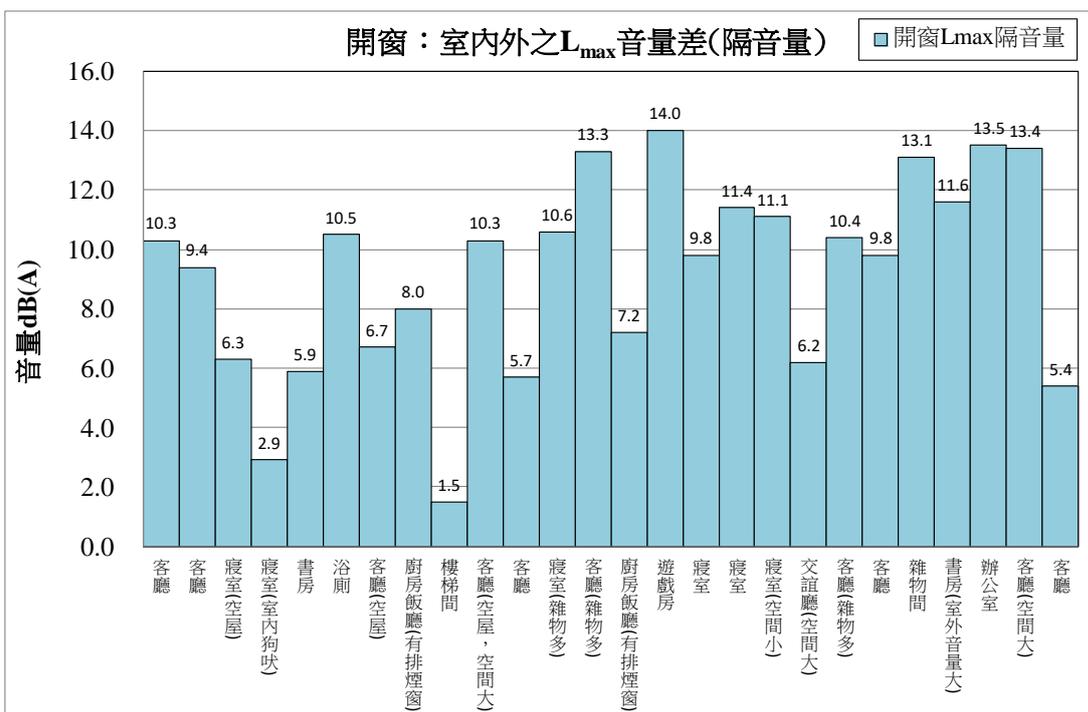


圖4.4-6 不同室內位置於「開(門)窗」之室內外 L_{max} 音量差(隔音量)

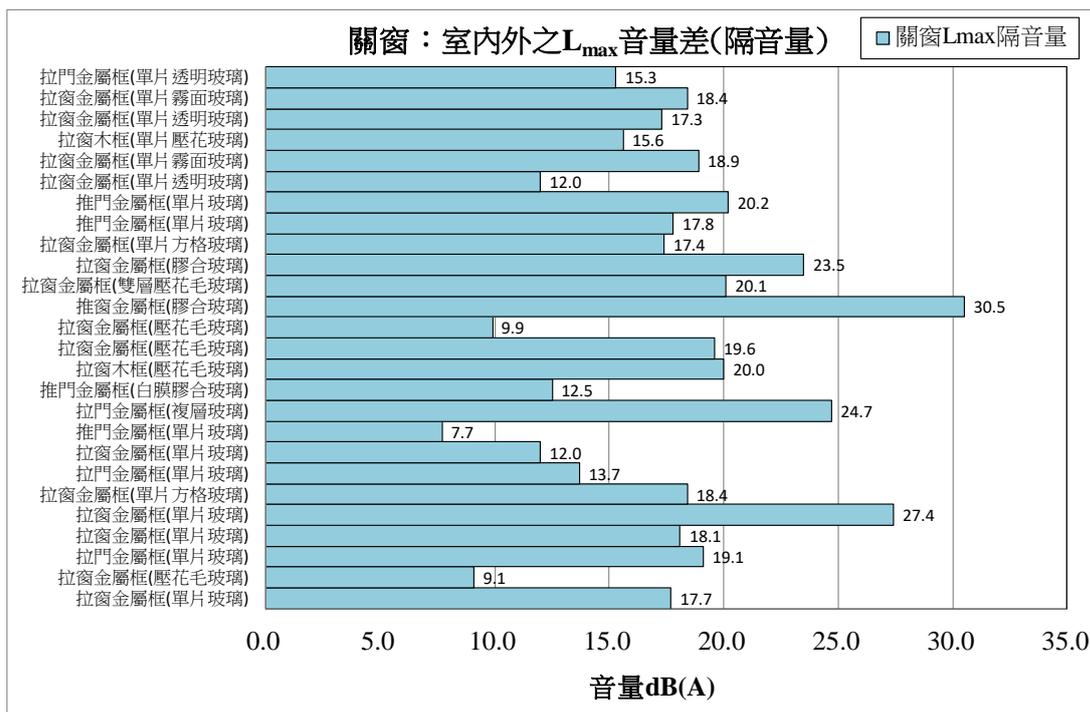


圖4.4-7 不同窗戶(門)樣式於「關(門)窗」之室內外 L_{max} 音量差(隔音量)

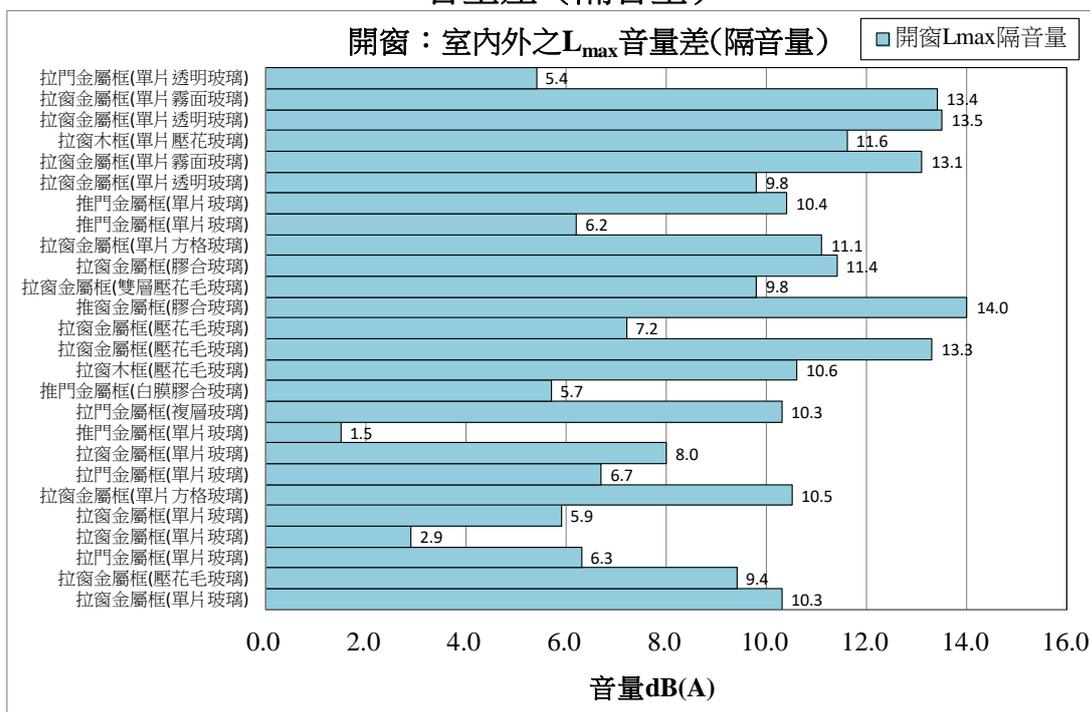


圖4.4-8 不同窗戶(門)樣式於「開(門)窗」之室內外 L_{max} 音量差(隔音量)

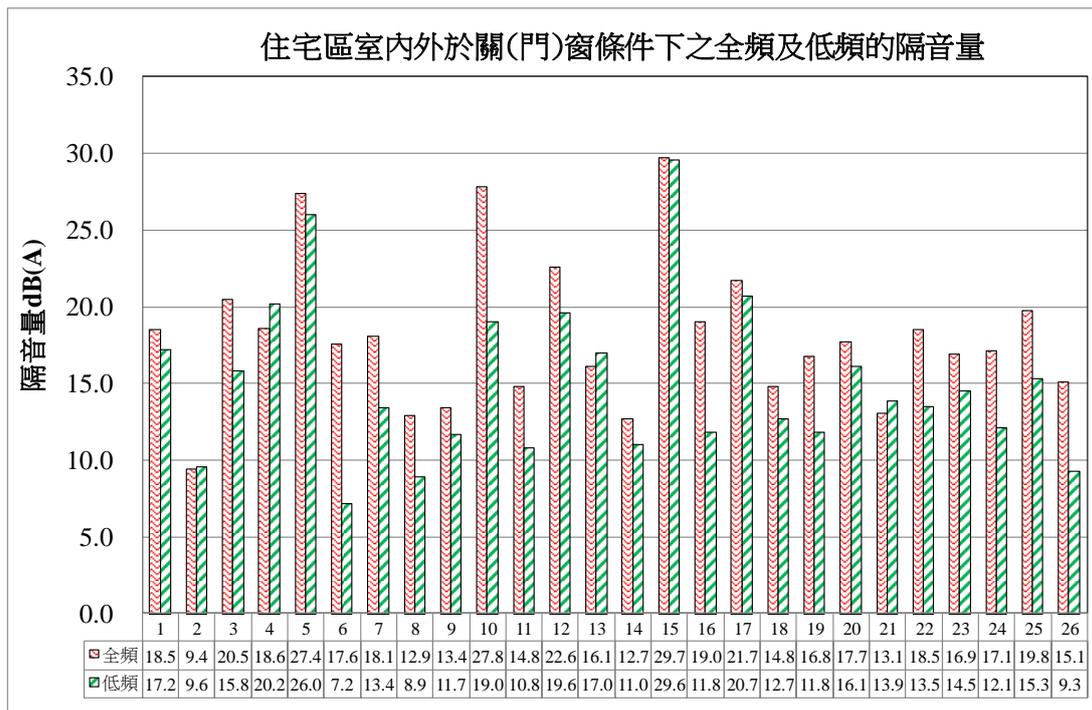


圖4.4-9 「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 全頻及低頻音量差(隔音量)

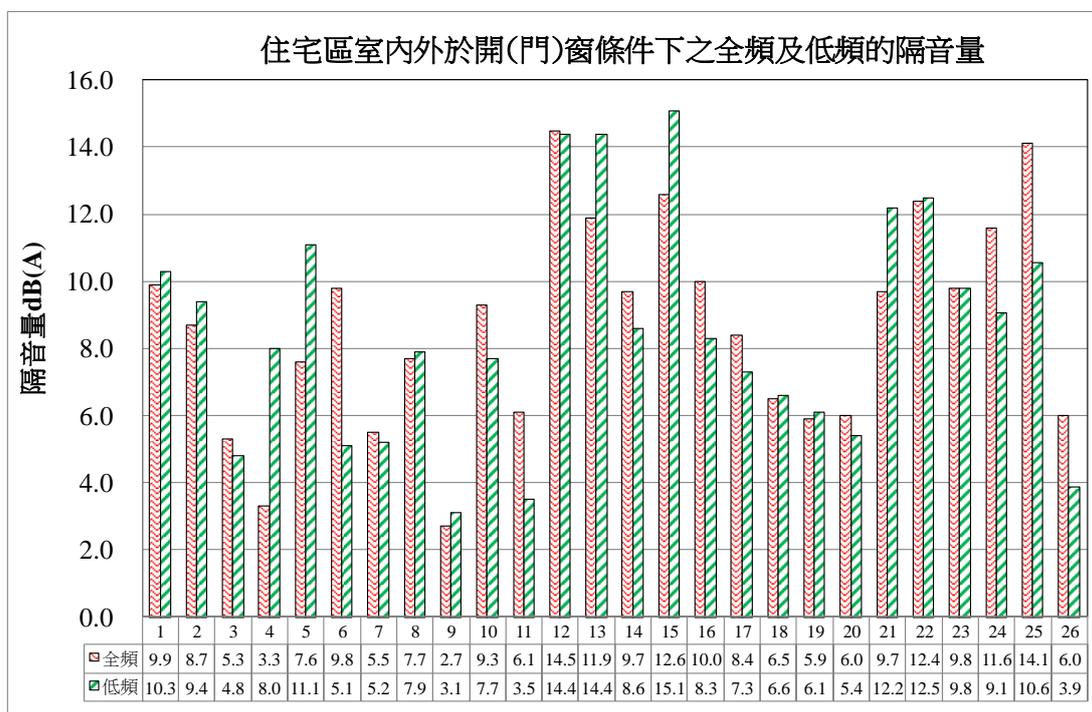


圖4.4-10 「開(門)窗」之室內外 L_{eq} 全頻及低頻音量差(隔音量)

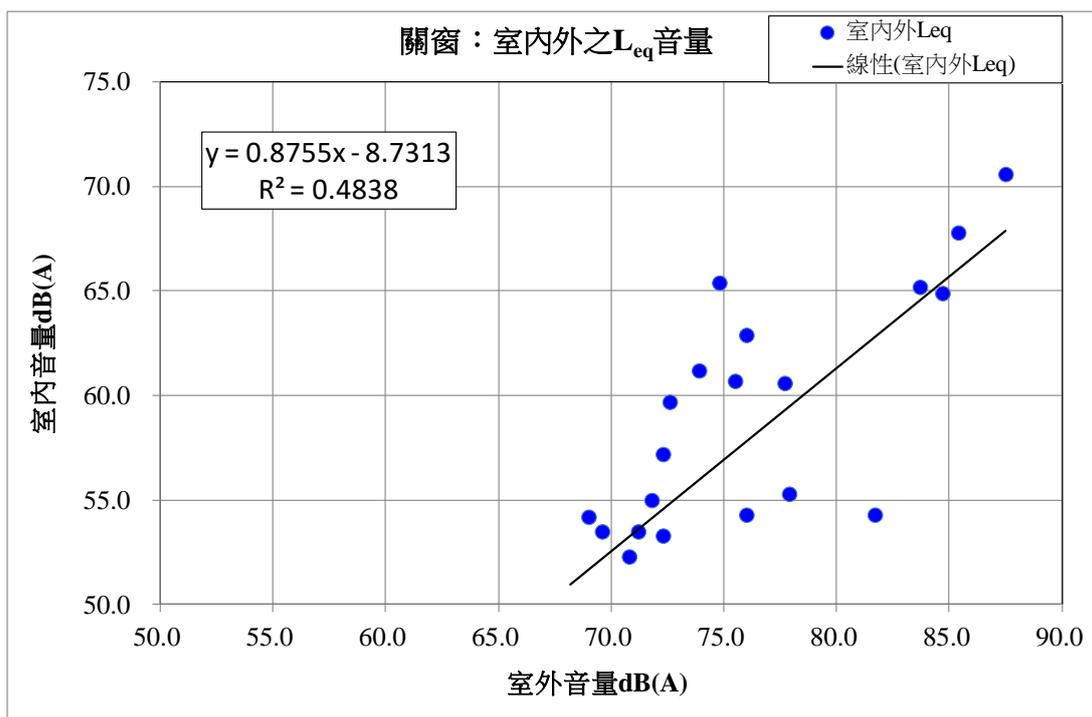


圖4.4-11 「關（門）窗」之室內外 L_{eq} 音量線性回歸

註：不納入空屋測值及室內狗吠之測值。

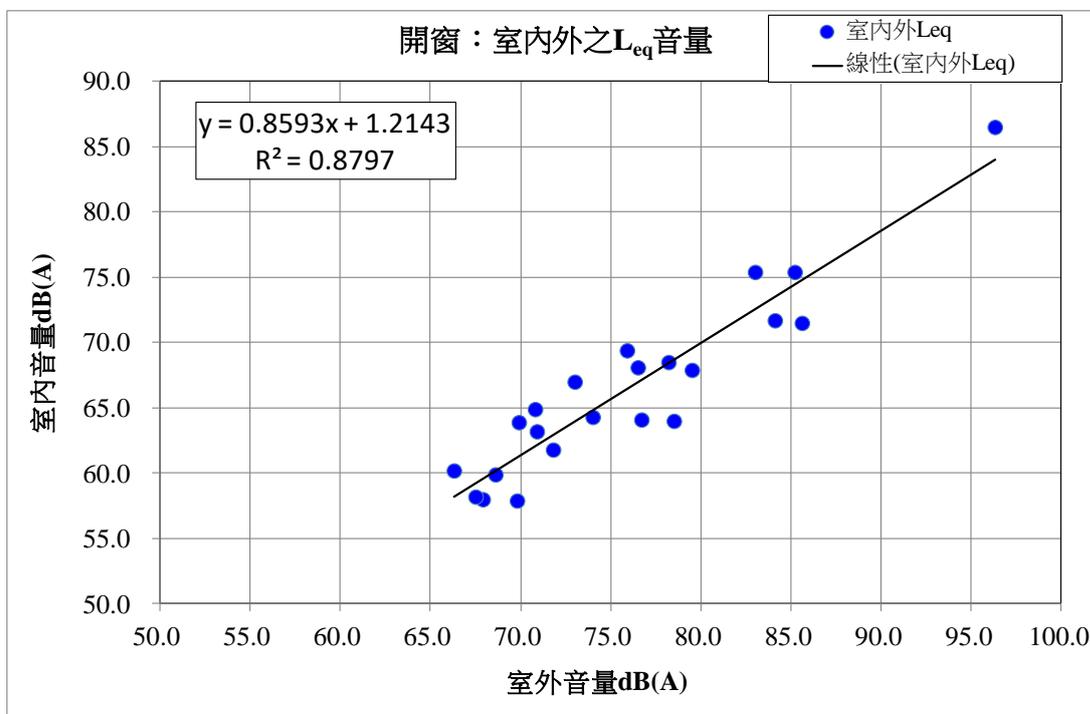


圖4.4-12 「開（門）窗」之室內外 L_{eq} 音量線性回歸

註：不納入空屋測值及室內狗吠之測值。

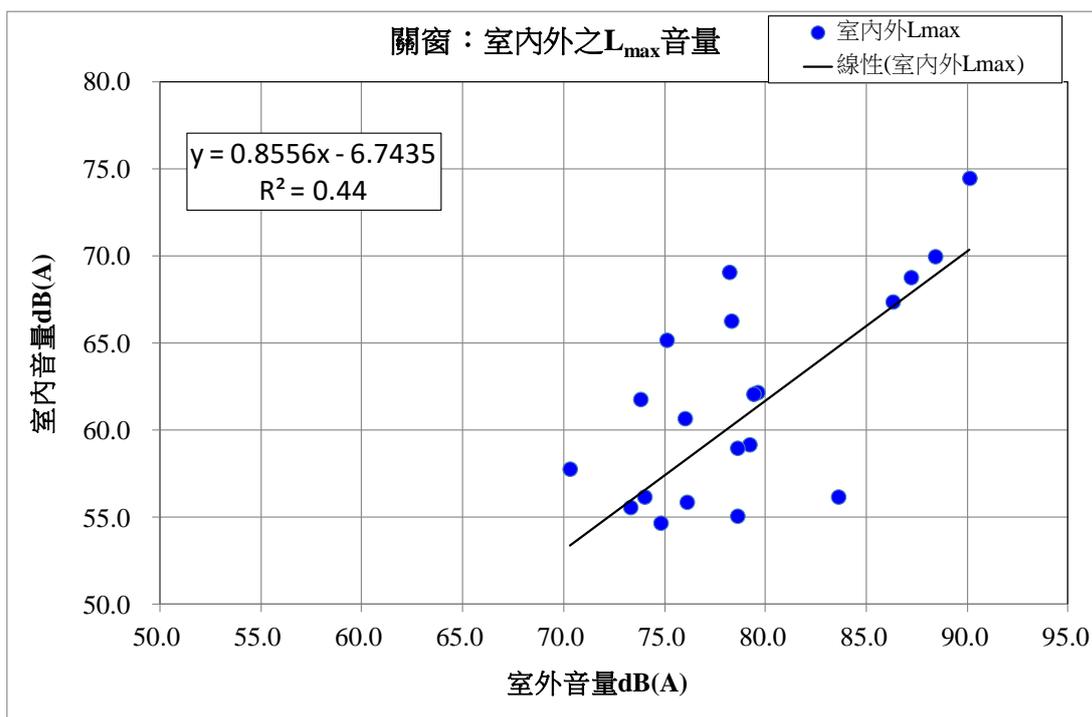


圖4.4-13 「關（門）窗」之室內外 L_{max} 音量線性回歸

註：不納入空屋測值及室內狗吠之測值。

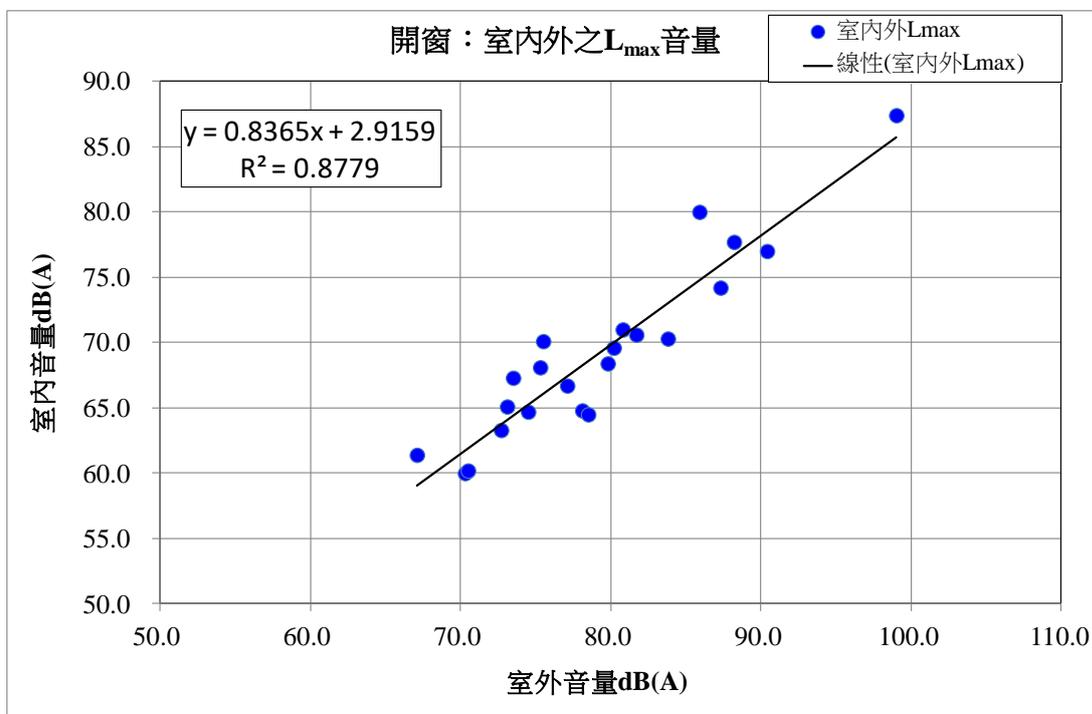


圖4.4-14 「開（門）窗」之室內外 L_{max} 音量線性回歸

註：不納入空屋測值及室內狗吠之測值。

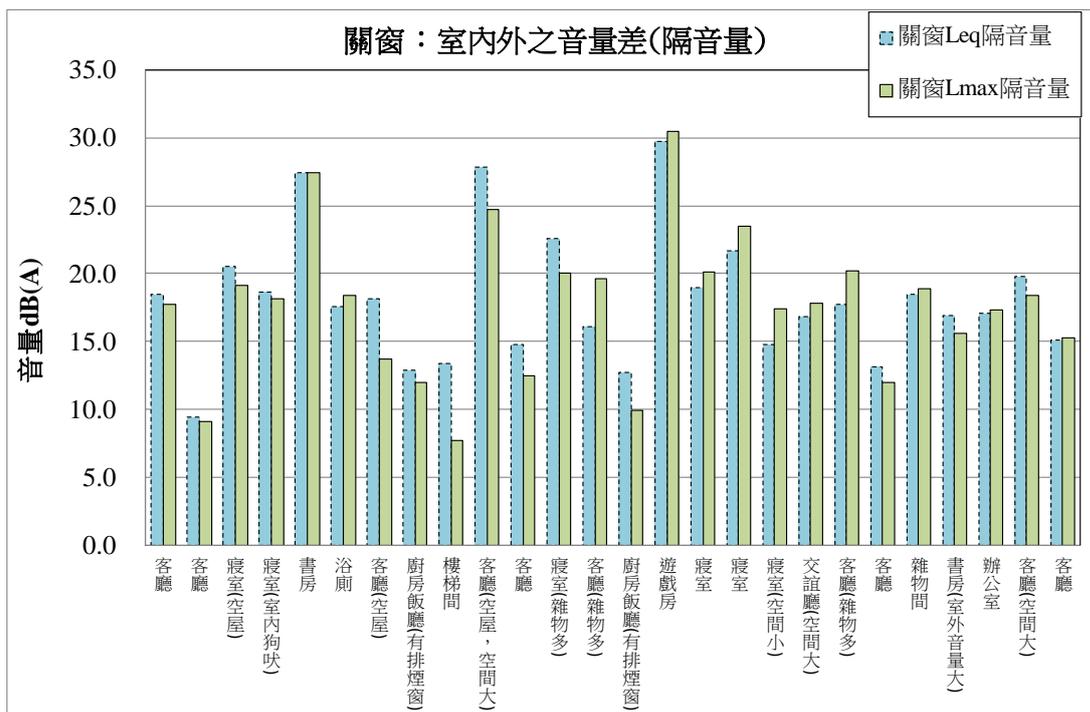


圖4.4-15 不同室內位置於「關(門)窗」之室內外 L_{eq} 及 L_{max} 音量差(隔音量)

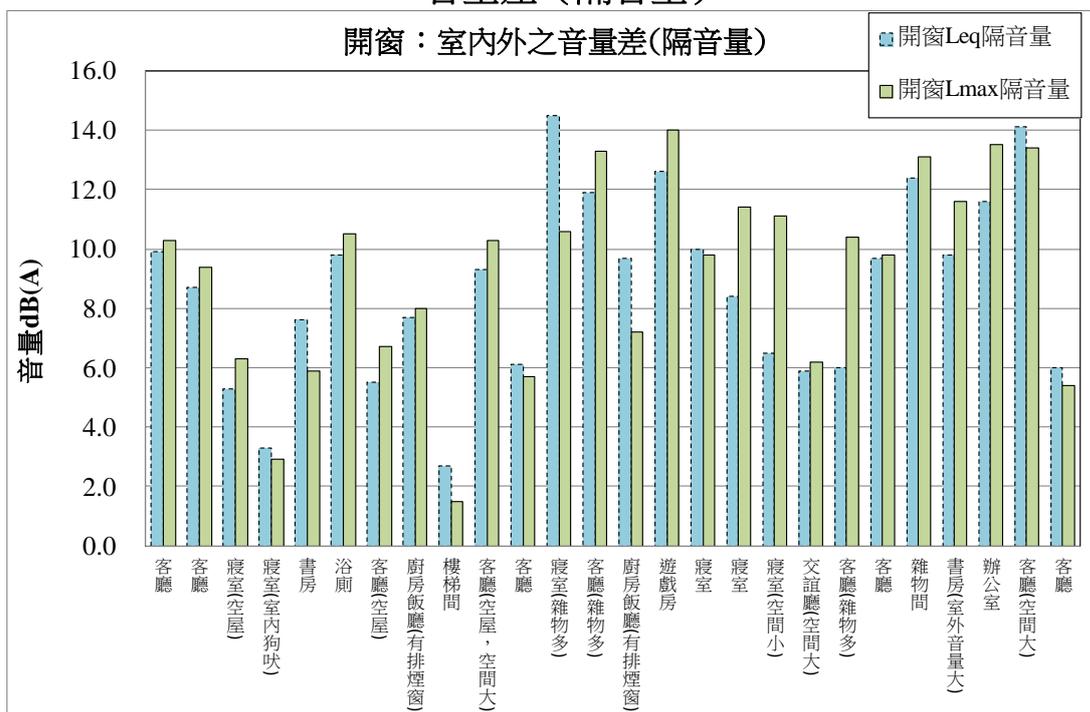


圖4.4-16 不同室內位置於「開(門)窗」之室內外 L_{eq} 及 L_{max} 音量差(隔音量)

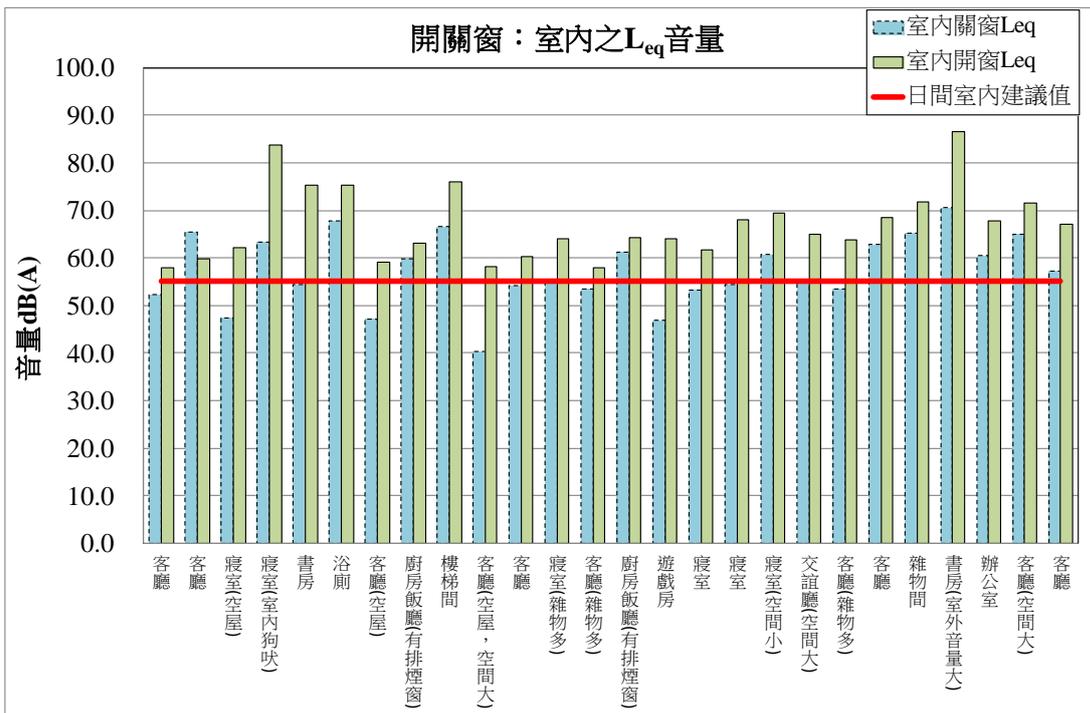


圖4.4-17 不同室內位置於「開關(門)窗」之室內 L_{eq} 音量

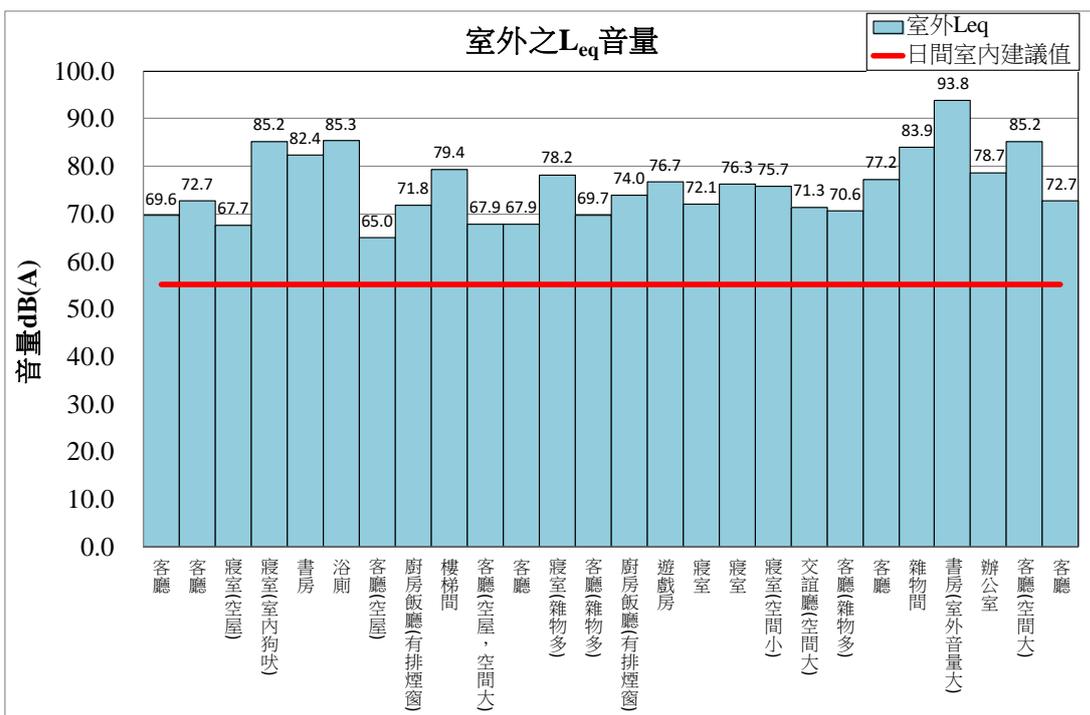


圖4.4-18 不同室內位置之室外 L_{eq} 音量

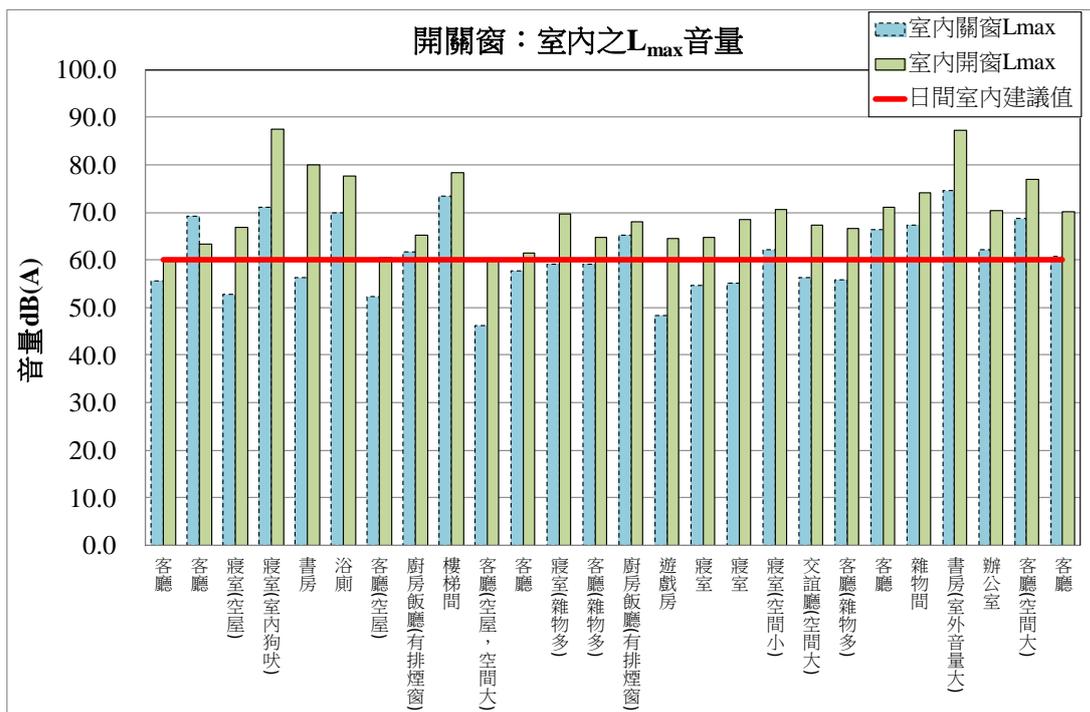


圖4.4-19 不同室內位置於「開關(門)窗」之室內 L_{max} 音量

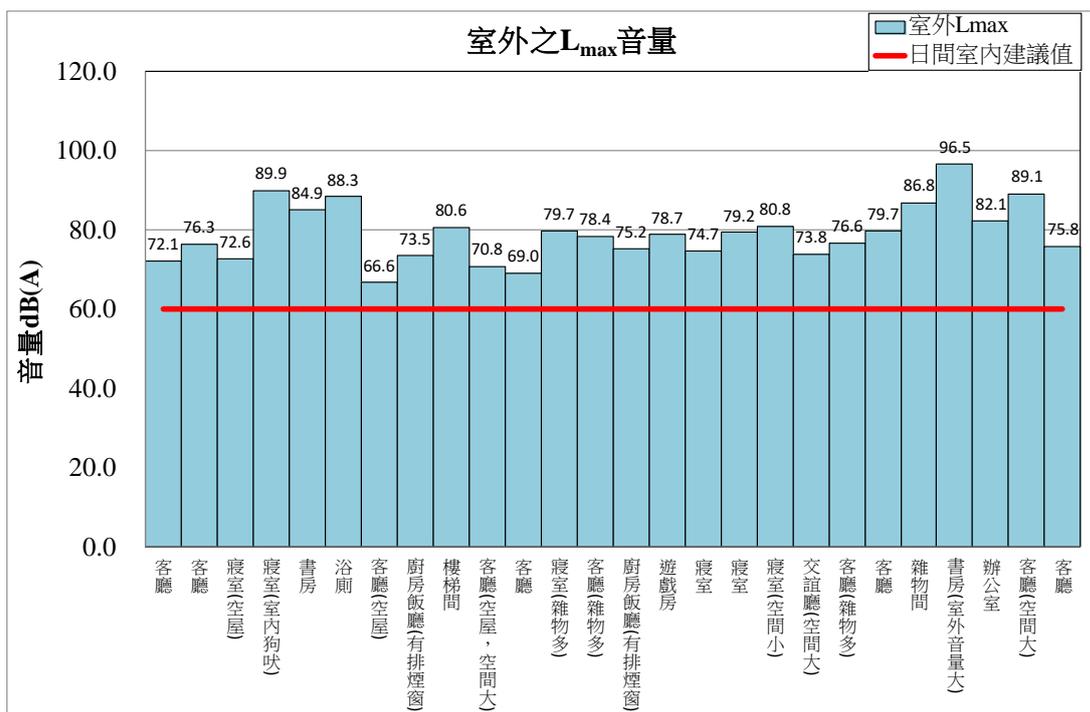


圖4.4-20 不同室內位置之室外 L_{max} 音量

4.5 彙整各量測點之室內外噪音源分布及頻譜(含低頻)分析資料

本項工作執行重點在於現場調查、測量並彙整住宅區室內環境之噪音源分

布、環境音量及頻譜資料，以瞭解目前住宅區室內音量品質及噪音源類型，俾作為住宅區室內音量改善方法之參考。

4.5.1 室內噪音源分布及頻譜資料之調查及分析說明

本計畫之室內噪音頻譜調查分析的規劃雷同於「4.3.1 住宅區室內外噪音量測規劃說明」，茲簡述如下。

- 一、於計畫執行期間選定之住宅區「室內外之測點同步」進行。
- 二、採用日本廠牌 RION，型號 NL-32(52)噪音計。
- 三、以不加權測量 1/3 八音階頻譜，以利若欲做不同加權之分析需求。
- 四、時間：以逐秒值記錄方式，每測點皆持續 5 分鐘（或至少 3 筆噪音事件）之頻譜測量。

由於低頻噪音很多是來自於轉動機械的噪音源，例如：冷卻水塔、空調機等，這類轉動機械的噪音音量會集中在某些主要頻率上，尤其在夜深人靜、背景噪音較低時，由於噪音音量會集中在主要頻率，聽起來更加清晰，更容易讓人感受到它的存在。這類轉動機械主要頻率 Hz 數與機械轉速以及風扇葉片數有關。德國 DIN 45680 (Measurement and assessment of low-frequency noise immissions in the neighbourhood) 提出若

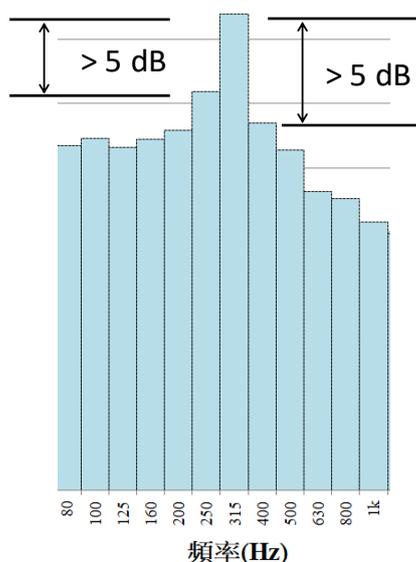


圖 4.5-1 純音判定條件示意圖

某一個 1/3 八音階頻率之音量較前後相鄰頻率的音量高出 5 dB，則噪音源有純音之特性，其判定條件如圖 4.5-1 之示意。依據德國 DIN 45680 之純音判定條件做為找出室內低頻噪音主要頻率方法，本計畫將各測點之 1/3 八音階各頻率音量和前後頻率音量比較，檢視是否有高出 5 分貝的主要頻率存在。

4.5.2 室內噪音源分布及頻譜資料之量測結果說明

- 一、106 年度「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」專案住宅區室內外各測點之「開（門）窗室內外同步」的 1/3 八音階不加權頻譜比

較如圖 4.5-2 所示。由圖示可看出室外噪音源通過「開（門）窗」傳遞至室內時，不論是軌道系統或道路系統，約 200 Hz 以上之室內外音頻線型相似；而低於 200 Hz 的低頻部分，室內外音頻之線型變化有較大的差異，特別於室內之音頻線型有較大的起伏，顯示於室內有低頻噪音源之干擾。

統計 106 年分析測量之 20 點次，於 20 Hz~200 Hz 之低頻範圍出現純音之比例計有 30.0%（6 點次/20 點次），特別是於有民眾居住之測點，室內低頻音出現純音的比例更高。

二、107 年度「環境噪音源防制技術與室內音量品質之研究」專案研究計畫

本計畫測量 6 點次之「開（門）窗室內外同步」的 1/3 八音階不加權頻譜比較如圖 4.5-3 所示，其結果與前述 106 年專案之研究結果相似。約 200 Hz 以上之室內外音頻線型相似；而低於 200 Hz 的低頻部分，室內外音頻之線型變化有較大的差異，特別於室內之音頻線型有較大的起伏，顯示於室內有低頻噪音源之干擾。

雖於測量過程已關閉室內噪音源（如：風扇、冷氣機…等）並已儘量排除背景噪音之干擾，惟一般居家的室內環境，容易存在有牆面或其他窗戶所傳入之音源；此外，室內的迴音與其他發音體亦會使室內有出現音源干擾之情形。統計所測量之 6 點次，有 3 點次於低頻範圍出現純音之現象（比例 50%）。

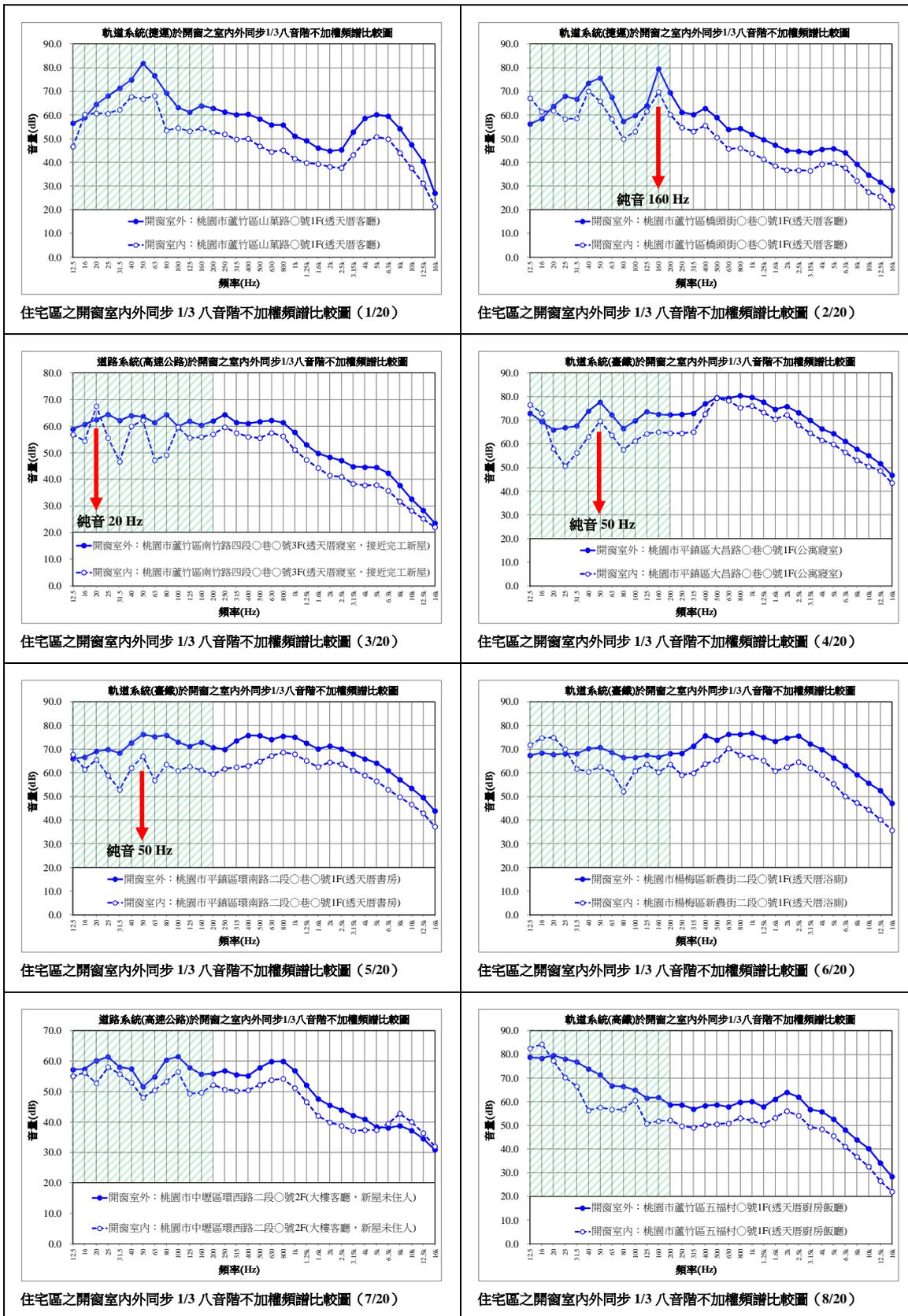


圖 4.5-2 環保署 106 年專案研究計畫之住宅區開（門）窗的室內外

同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖 (1/3)

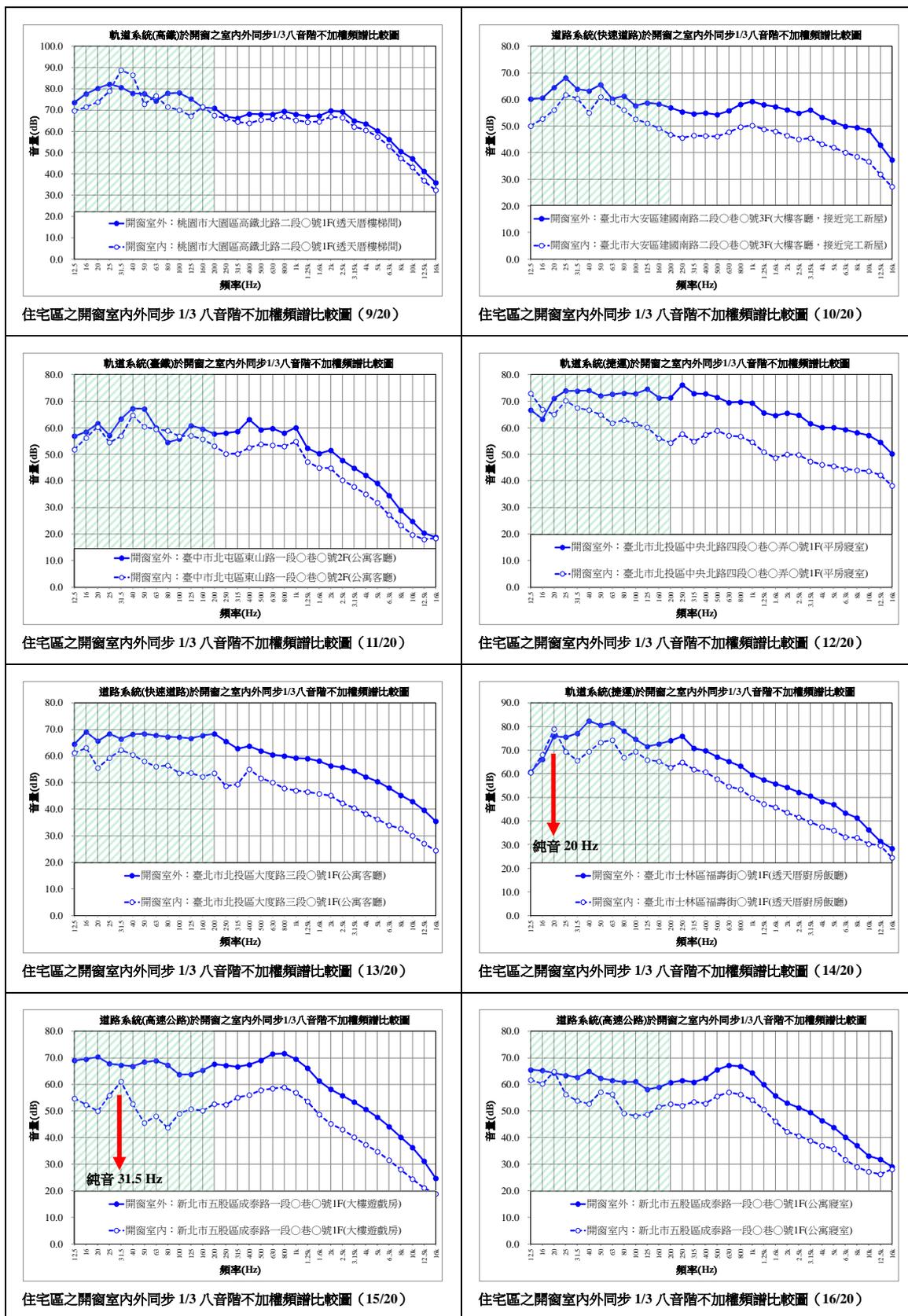


圖 4.5-2 環保署 106 年專案研究計畫之住宅區開（門）窗的室內外

同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖 (2/3)

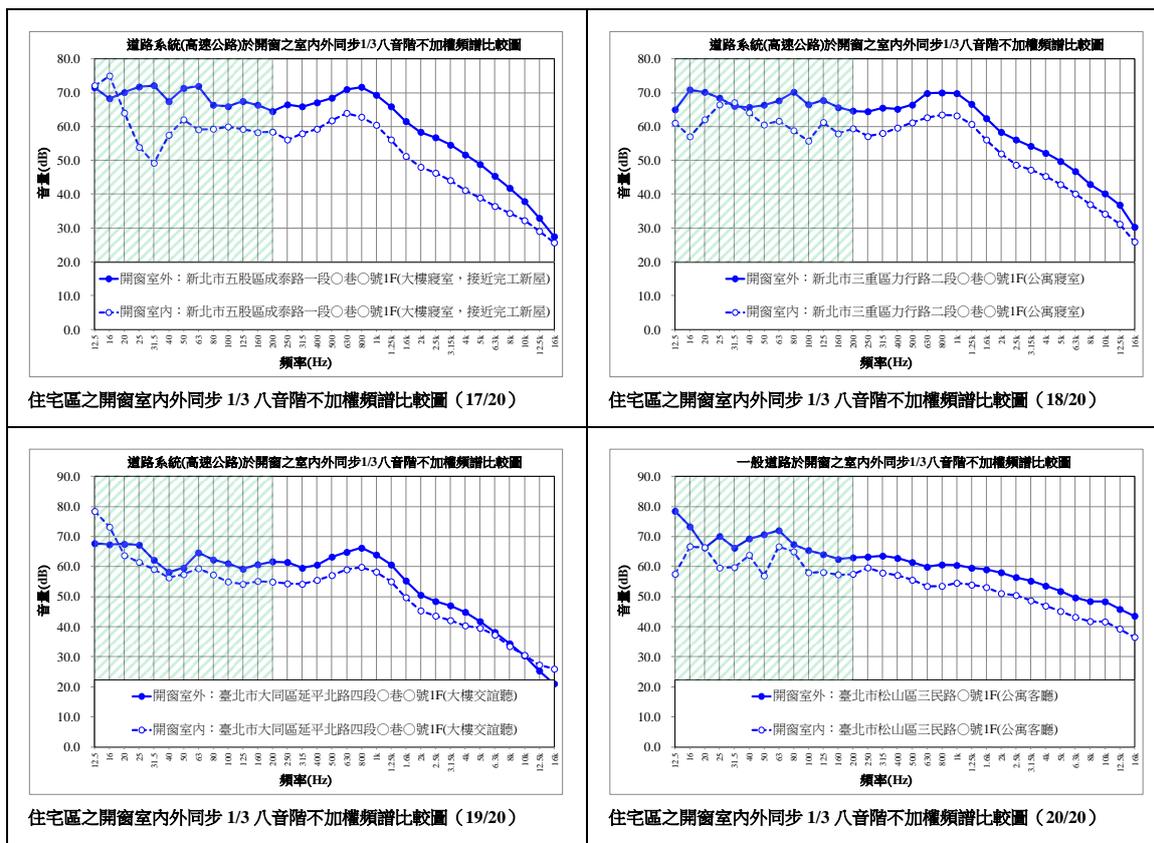


圖 4.5-2 環保署 106 年專案研究計畫之住宅區開（門）窗的室內外同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖 (3/3)

資料來源：106 年專案之 20 點次，本計畫蒐集整理並分析繪製。

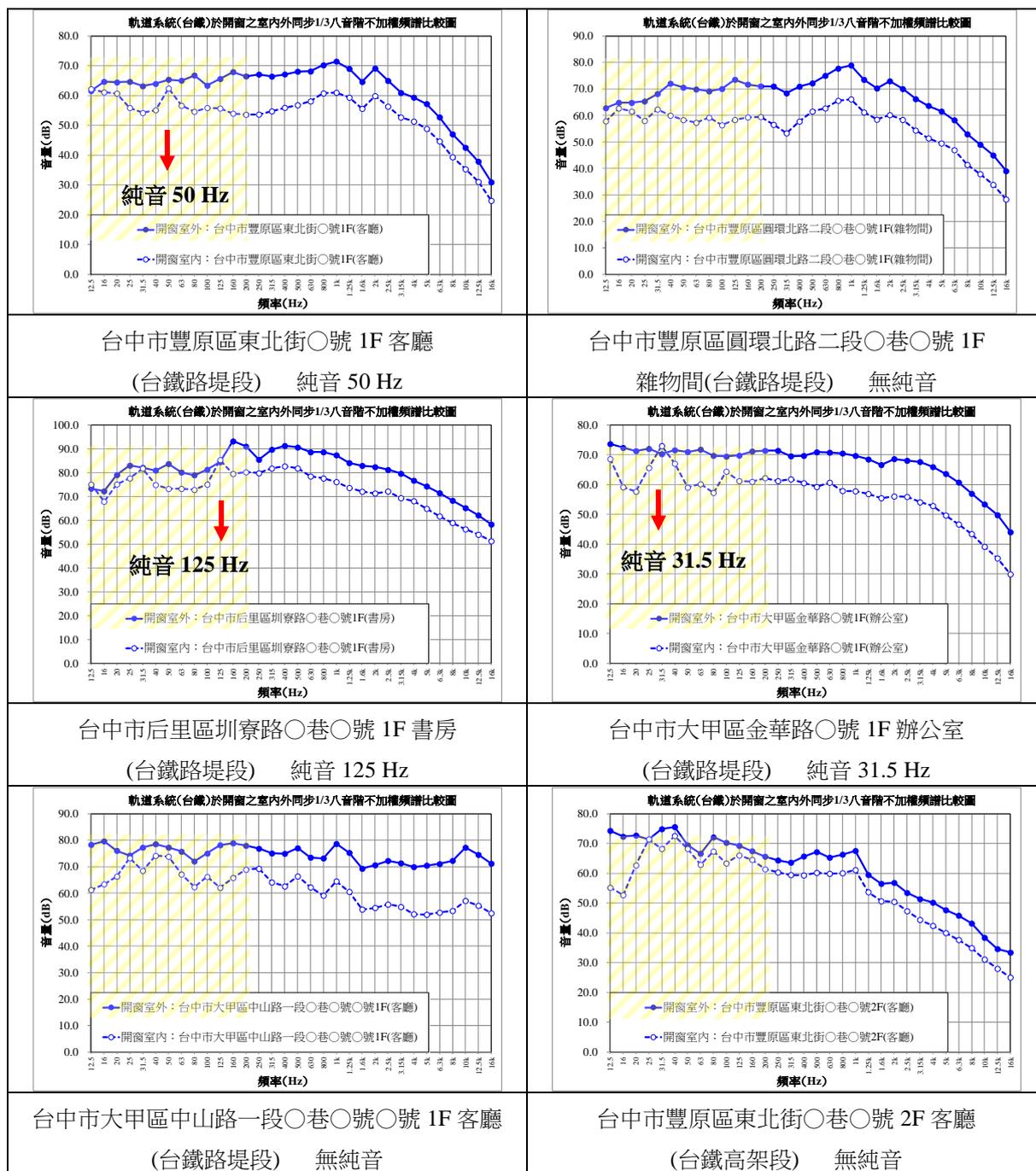


圖 4.5-3 本計畫之住宅區開（門）窗的室內外同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖

第五章 彙整研析國際現行各類型交通運輸系統噪音（含高速公路及航空噪音）管制法規、指標及防制作法

本章重點蒐集並討論了包括各國之：高速公路及航空噪音的噪音指標、噪音限值、立法、政策和準則等資料，俾作為研提適用我國環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法之參考。

5.1 高速公路噪音指標及法規限值

5.1.1 歐盟^[1]

歐盟環境法體系包括：歐盟基礎條約、歐盟簽署或參加的國際環境條約、歐盟機構制定的歐盟法規（包括：條例、指令和決定）、其他具有法律規範性的文件、其他相關法律淵源等。歐盟環境法的體系包括成文法和判例法，但以成文法為主，包括：憲法性規範、條例、指令、決定、決議、標準等成文法律形式。其中以指令為主，包括：國家級環境法、歐盟級環境法和國際級環境法。可以認為：國家級環境法是歐盟環境法與國內環境法的交叉；國際級環境法是歐盟環境法與國際環境法的交叉。歐盟環境法作為介於傳統國內法與傳統國際法之間的法律，既具有國內環境法的某些特點，也具有國際環境法的某些特點，它是國內環境法和國際環境法的結合。^[2]

本計畫蒐集之歐盟的噪音管制等相關議題，它的基礎是 21 個歐洲道路主管會議 CEDR（The Conference of European Directors of Roads, CEDR）成員國所提供的答覆，因歐盟成員國眾多，故將以較多篇幅加以介紹。

一、噪音指標及時段定義

一些指標用於定義音量限制並計算和測量噪音量。大多數噪音指標使用一整天的特定時段來計算或測量噪音。例如：在 2002 年的歐盟噪音指令（European Noise Directive, END），這些時段是：

- 日間（ L_{day} ）：從 07:00～19:00；
- 晚上（ $L_{evening}$ ）：從 19:00～23:00（成員國可能縮短晚上時段 1 個或 2 個小時並且相應地延長日間和(或)夜間時段）；
- 夜間（ L_{night} ）：從 23:00～07:00。

晚上有額外 5 dB 和夜間額外 10 dB 的音量增量，此 3 個時段的組合構成歐盟噪音指令於評估和管理環境噪音的 L_{den} 指標，其計算式如 (5.1.1) 式所示。

$$L_{den} = 10 \log_{10} \frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \quad (5.1.1)$$

一般情況下，均能噪音指標 L_{Aeq} 並沒有考慮到晚上和夜間的「dB 校正」。歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國中使用最廣泛的噪音指標是 L_{Aeq} ，其比例約 58%；然而，一些國家根據歐盟噪音指令使用 L_{den} 噪音指標，其比例約 28%，如圖 5.1-1 所示。一些成員國目前已提議從 L_{Aeq} 改為 L_{den} 指標。

需要注意的是，使用 L_{Aeq} 指標計算或測量噪音的時段有很大的不同，如圖 5.1-2 所示。簡而言之，有 4 種可能性：

- (一)最簡單的是基於 24 小時平均的一整天之 $L_{Aeq}:L_{Aeq,24h}$ ，其比例約 18%。
- (二)最複雜的是在 L_{Aeq} 的基礎上，將完整的一天分為三個時段：日間、晚上及夜間，其比例約 29%。有時在一天、晚上和夜間的開始和結束之間有細微的差別。
- (三)第三種可能性只有 2 個時段，即日間和夜間，其比例約 35%。
- (四)在最後一種可能性中，一些歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國使用一整天的特定時段，例如：08:00~20:00 期間，其比例約 18%。

由於歐洲國家之 L_{Aeq} 指標有不同的定義，同樣的噪音量會導致不同的 L_{Aeq} 值。例如：一個國家的 55 dB(A) 的 L_{Aeq} 的噪音量會在另一個國家的 dB(A) 中產生同樣的結果。在 L_{Aeq} 的定義中使用不同的時段也使 L_{Aeq} 和 L_{den} 之間的關係複雜化。事實上， L_{Aeq} 和 L_{den} 噪音量之間的關係沒有歐洲標準。例如：在丹麥和法國^[3]他們使用等式 $L_{den} = L_{Aeq} + 3$ ；然而在荷蘭，他們使用等式 $L_{den} = L_{Aeq} - 2$ 。這意味著 50 dB 的 L_{den} 是 52 dB(A) 的 L_{Aeq} 在某個歐洲國家；但 47 dB(A) 的 L_{Aeq} 在其他國家。

二、室外噪音限值

為確定國家公路沿線是否存在噪音問題，應將計算或測量的噪音量與立法、政策或準則中概述的噪音限值進行比較。對於噪音敏感的建築物，主要是住宅，這些噪音限值有很大差異，如圖 5.1-4 及表 5.1-1 所示。

幾乎所有歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國都有日間和夜間的室外 L_{Aeq} 噪音限值。對於新建的國家道路， L_{Aeq} 的室外噪音限值為 50 dB(A)~67 dB(A) 不

等。最常見的室外限值是 L_{Aeq} 於 06:00/07:00~18:00/22:00 為 55 dB(A)。對於現有國道的修(改)建, L_{Aeq} 室外噪音限值與新國道基本相同。

並非所有歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國都有法定現有國道的 L_{Aeq} 室外噪音限值。在現有國家道路上存在室外噪音限值的情況下, 這些限值往往與新的國家道路或現有國道的修(改)建相同。在沒有合法的室外噪音限值的情況下, 一些國家有政策目標。大多數 CEDR 成員國還有夜間的 L_{Aeq} 室外噪音限值, 通常這些夜間限值为低於日間時段 10 dB(A)。夜間的 L_{Aeq} 噪音限值为 45 dB(A)~55 dB(A), 最常見的室外 L_{Aeq} 夜間限值为 22:00~06:00 為 45 dB(A)。一些國家使用 L_{den} 作為其噪音限值的指標。對於新建的國家道路, 室外噪音限值基於 L_{den} 指標, 其範圍從 48 dB~60 dB。新國道最常見的 L_{den} 室外限值为 55 dB。

在若干成員國中, 在某些情況下, 噪音標準值可跟其他限值做交換。例如: 在市中心, 噪音限值可以高於標準值; 在新的住房區, 噪音限值可以降低。

三、室內噪音限值

半數歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國不僅有室外噪音限值, 而且有室內噪音限值, 如圖 5.1-5 及表 5.1-2 所示。在大多數情況下, 對於房屋內所有的房間都是適用的。在一些國家, 室內限值的應用僅限於臥室。

針對新建國道, L_{Aeq} 的室內限值为 27 dB(A)~45 dB(A)。夜間 L_{Aeq} 的室內限值为低於日間時段 5 dB(A)~10 dB(A)。在修(改)建既有國家道路的情況下, 室內噪音限值在某些情況下高於新的國道; 但在大多數情況下, 它們是相同的。這種情況也適用於既有的國家道路。

在一些國家, 於某些情況下, 噪音標準值被交換為更高的噪音限值。在國家公路沿線新建房屋的情況下, 室內噪音限值可以低於標準。

CEDR 成員國對敏感地區的噪音暴露有排放限值, 這些限值的地位可以不同, 可採取立法、政策或準則的形式。從法律角度看, 這些可能性有很大的不同。立法意味著有法定義務, 人們可以上法庭, 要求國道管理局 (National Road Administrations, NRAs) 或政府尊重此排放限值。然而, 政策和準則或多或少表明了國道管理局或政府在某些噪音限值範圍內的努力。國道管理局和政府承諾盡最大努力遵守這種噪音限值; 然而, 他們不能被迫履行法院的政策或準則。

CEDR 噪音小組進行的調查表明, 在多數 CEDR 成員國, 噪音限值具有法律地位, 如圖 5.1-3 所示。而在大多數北歐國家, 準則的地位或多或少類似於立法。

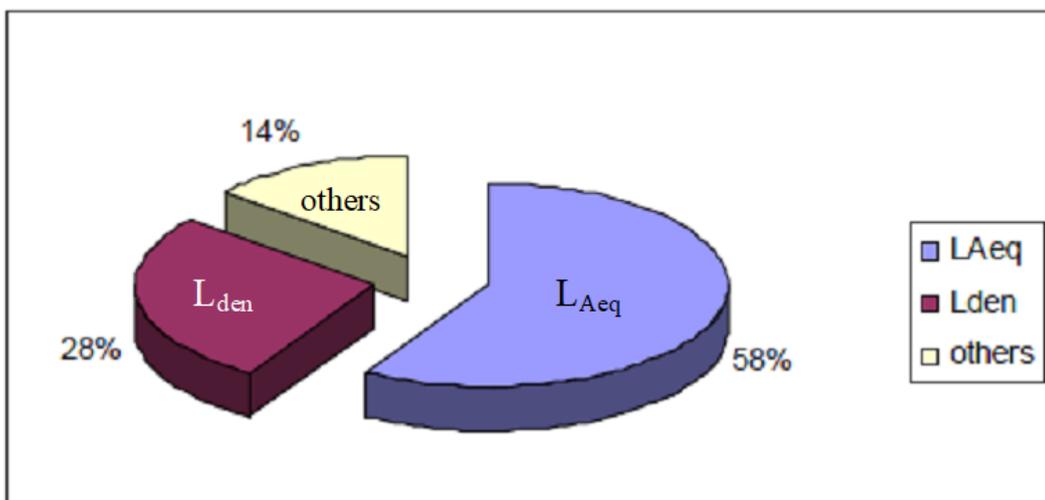


圖 5.1-1 歐盟 CEDR 成員國所使用之噪音指標比例^[1]

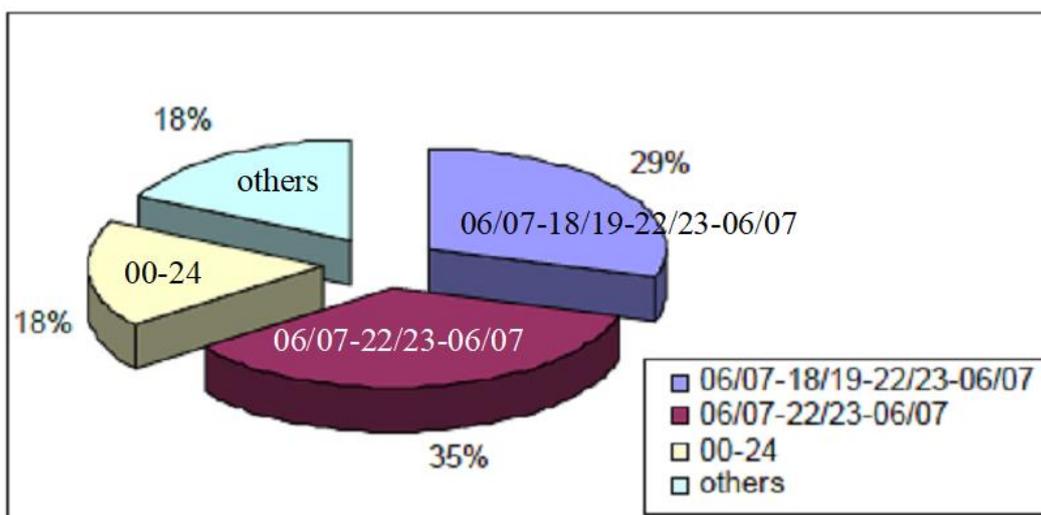


圖 5.1-2 歐盟 CEDR 成員國之 LAeq 指標的時段比例^[1]

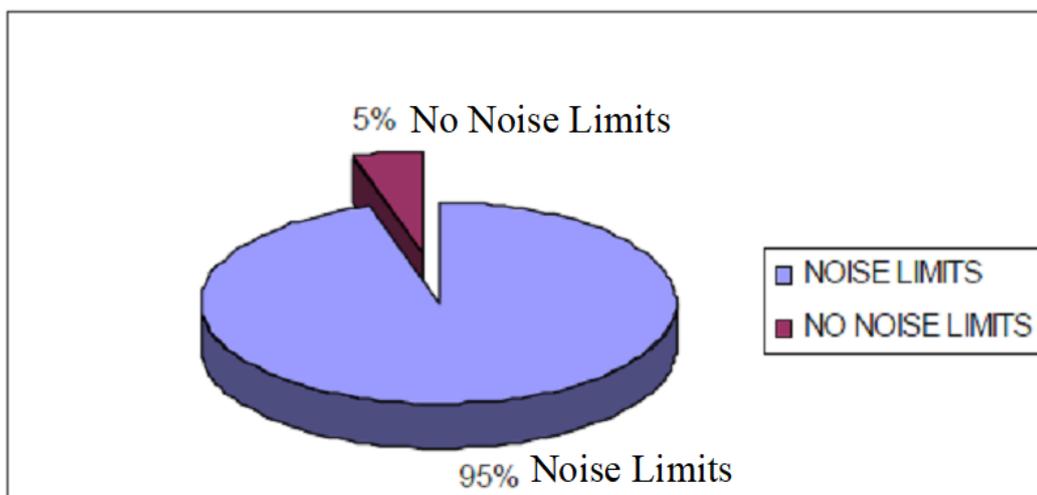


圖 5.1-3 歐盟 CEDR 成員國之新國道的噪音限制狀況^[1]

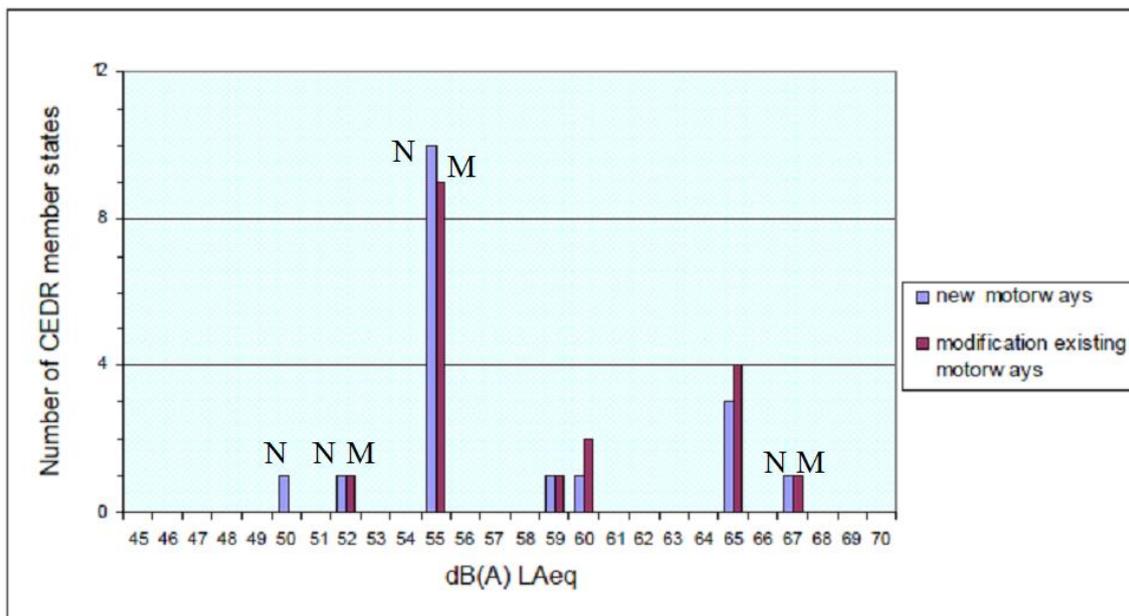


圖 5.1-4 歐盟 CEDR 成員國之國道的日間 L_{Aeq} 室外噪音限值^[1]

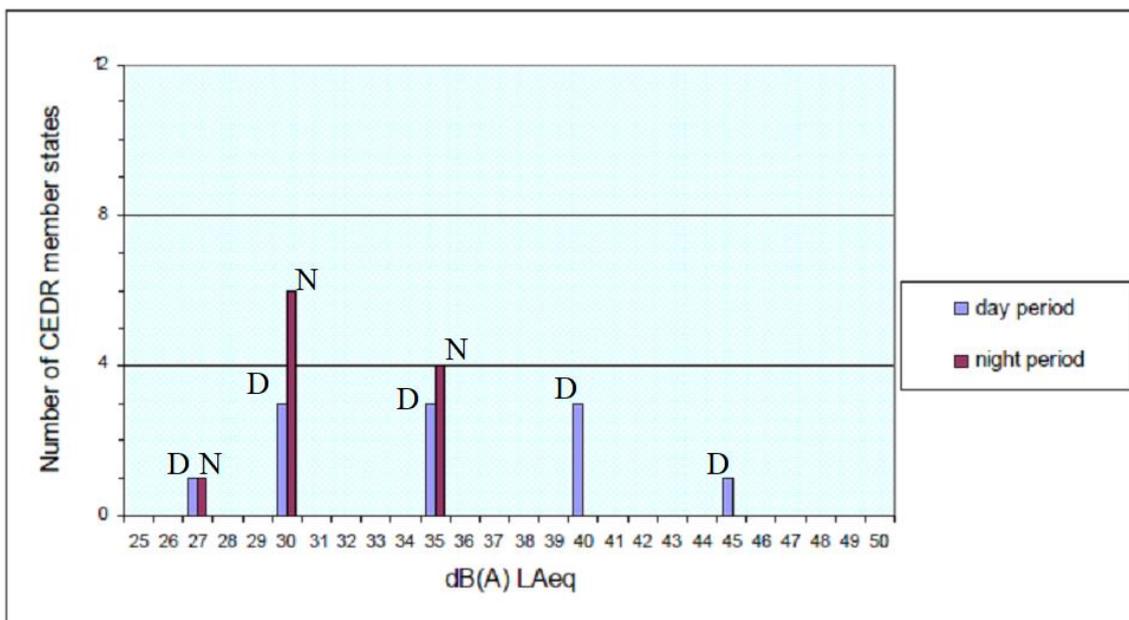


圖 5.1-5 歐盟 CEDR 成員國之新國道的 L_{Aeq} 室內噪音限值^[1]

表 5.1-1 歐盟 CEDR 成員國之建物室外噪音的限值、目標和指引^[1]

國家	新國道	修(改)建既有國道	既有國道	國名縮寫
Austria: day	55 dB(A) L_{Aeq} (06-19)	60 dB(A) L_{Aeq} (06-19)	60 dB L_{den} (1)	AT
Austria: night	45 dB(A) L_{Aeq} (22-06)	50 dB(A) L_{Aeq} (22-06)	50 dB(A) L_{Aeq} (22-06)	AT
Belgium (NL): day	65 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	65 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	65 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	BE
Denmark: full day	50 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (2)	50 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (2)	65 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	DK
Denmark: full day	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (3)	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (3)	65 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	DK
Estonia: day	60 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (07-23)	60 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (07-23)	no limits	EE
Estonia: night	55 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (23-07)	55 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (23-07)	no limits	EE
Finland: day	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	FI
Finland: night	50 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (6)	50 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (6)	50 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (6)	FI
France: day	60 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (7)	60 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (10)	for instance: 68 dB(A)	FR
France: night	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (7)	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (11)	for instance: 62 dB(A)	FR
Germany: day	59 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (13)	59 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (13)	70 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (15)	DE
Germany: night	49 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (14)	49 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (14)	60 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (16)	DE
Greece: day	67 dB(A) L_{Aeq} (08-20)	67 dB(A) L_{Aeq} (08-20)	67 dB(A) L_{Aeq} (08-20)	GR
Iceland: full day	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	65 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	no limits	IS
Ireland	60 dB(A) L_{den} (17)	60 dB(A) L_{den} (17)	no limits	IE
Italy: day	65 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (18)	65 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (18)	70 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (19)	IT
Italy: night	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (18)	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (18)	60 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (20)	IT
Latvia: day	55 dB(A) L_{Aeq} (07-19) (21)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-19) (21)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-19) (21)	LV
Latvia: evening	50 dB(A) L_{Aeq} (19-23) (21)	50 dB(A) L_{Aeq} (19-23) (21)	50 dB(A) L_{Aeq} (19-23) (21)	LV
Latvia: night	45 dB(A) L_{Aeq} (23-07) (21)	45 dB(A) L_{Aeq} (23-07) (21)	45 dB(A) L_{Aeq} (23-07) (21)	LV
Lithuania: day	65 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (21)	65 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (21)	65 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (21)	LT
Lithuania: even.	60 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (21)	60 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (21)	60 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (21)	LT
Lithuania: night	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (21)	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (21)	55 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (21)	LT
Luxembourg	to be determined	to be determined	to be determined	LU
Netherlands: f.day	48 dB L_{den} (preferred limit)	53 dB L_{den} (preferred limit)	65 dB L_{den} (23)	NL
Netherlands: f.day	58 dB L_{den} (highest limit)	68 dB L_{den} (highest limit)	65 dB L_{den} (23)	NL
Norway: full day	55 dB(A) L_{den} (24)	55 dB(A) L_{den} (24)	no limits	NO
Poland: day	55 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (25)	55 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (25)	55 dB(A) L_{Aeq} (06-22) (25)	PL
Poland: night	45 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (25)	45 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (25)	45 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (25)	PL
Portugal: day	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22) (28)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22) (28)	55 dB(A) L_{Aeq} (07-22) (28)	PT
Portugal: night	45 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (29)	45 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (29)	45 dB(A) L_{Aeq} (22-07) (29)	PT
Spain: day	not yet fixed	not yet fixed	not yet fixed	ES
Spain: night	not yet fixed	not yet fixed	not yet fixed	ES
Slovenia: full day	55 dB(A) L_{den} (30) (31)	55 dB(A) L_{den} (30) (31)	55 dB(A) L_{den} (30) (31)	SI
Sweden: full day	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (33)	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (33)	55 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (33)	SE

備註：

1. In AT: L_{den} periods are 06-19, 19-22, and 22-06
2. In DK: in recreational areas in the open country (holiday house areas, green areas and camp sites)
3. In DK: in residential areas or public institutions (hospitals and schools)
4. In EE: in new planning areas, 55 dB(A)
5. In EE: in new planning areas, 45 dB(A)
6. In FI: when planning new housing areas, 45 dB(A)
7. In FR: for dwellings in moderate noise climate zone (<65 dB(A) daytime and <60 dB(A) night-time)
8. In FR: in other cases, 65 dB(A) L_{Aeq} (06-22)
9. In FR: in other cases, 60 dB(A) L_{Aeq} (22-06)
10. In FR: when traffic noise before modification is lower than limit for new roads, otherwise 65 dB(A)
11. In FR: when traffic noise before modification is lower than limit for new roads, otherwise 60 dB(A)
12. In FR: national noise policy on 'hot spots': above certain noise levels with different indicators
13. In DE: for housing areas; for urban centres, village areas, and mixed areas: 64 dB(A)
14. In DE: for housing areas; for urban centres, village areas, and mixed areas: 54 dB(A)
15. In DE: for housing areas; for urban centres, village areas, and mixed areas: 72 dB(A)
16. In DE: for housing areas; for urban centres, village areas, and mixed areas: 62 dB(A)
17. In IE: L_{den} periods are 07-19, 19-23, and 23-07
18. In IT: for motorways and main roads in zone of 250 m (competence area)
19. In IT: for motorways and main roads in zone of 100 m (A-zone); in B-zone (150 m) 65 dB(A)
20. In IT: for motorways and main roads in zone of 100 m (A-zone); in B-zone (150 m) 55 dB(A)
21. In LV and LT: also maximum noise levels (5 dB(A) higher)
22. In NL: L_{den} periods are 07-19, 19-23, and 23-07
23. In NL: for existing roads policy goal
24. In NO: L_{den} periods are 07-19, 19-23, and 23-07
25. In PL: for one-family dwellings; in case of multi-family houses 5 dB(A) higher
26. In PL: in town centres, 65 dB(A) L_{Aeq} (06-22)
27. In PL: in town centres, 55 dB(A) L_{Aeq} (22-06)
28. In PT: in noise-sensitive zones, otherwise 65 dB(A) L_{Aeq} (07-22)
29. In PT: in noise-sensitive zones, otherwise 55 dB(A) L_{Aeq} (22-07)
30. In SI: L_{den} periods are 06-18, 18-22, and 22-06
31. In SI: for quiet regions; other regions have higher limits
32. In SI: there are limits for $L_{Aeq,day}$ (06-18) 55 dB(A), evening (18-22) 50 dB(A) and night (22-06) 45 dB(A)
33. In SE: there is a limit for $L_{AFmax,outdoor}$ (70 dB(A))

表 5.1-2 歐盟 CEDR 成員國之建物室內噪音的限值、目標和指引^[1]

國家	新國道	修(改)建既有國道	既有國道	國名縮寫
Austria	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	AT
Belgium (NL)	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	BE
Denmark: full day	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (1)	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (1)	no indoor limits	DK
Estonia: day	40 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (07-23)	40 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (07-23)	40 dB(A) $L_{pA,eq,T}$ (07-23)	EE
Estonia: night	30 dB(A) $L_{pA,max}$ (23-07)	30 dB(A) $L_{pA,max}$ (23-07)	30 dB(A) $L_{pA,max}$ (23-07)	EE
Finland: day	35 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	35 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	35 dB(A) L_{Aeq} (07-22)	FI
Finland: night	30 dB(A) L_{Aeq} (22-07)	30 dB(A) L_{Aeq} (22-07)	30 dB(A) L_{Aeq} (22-07)	FI
France	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	FR
Germany	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	DE
Greece	35 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	35 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	35 dB(A) L_{Aeq} (00-24)	GR
Iceland	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (3)	40 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (4)	?	IS
Ireland	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	IE
Italy	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	IT
Latvia: day	40 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	40 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	40 dB(A) L_{Aeq} (07-19)	LV
Latvia: evening	35 dB(A) L_{Aeq} (19-23)	35 dB(A) L_{Aeq} (19-23)	35 dB(A) L_{Aeq} (19-23)	LV
Latvia: night	30 dB(A) L_{Aeq} (23-07)	30 dB(A) L_{Aeq} (23-07)	30 dB(A) L_{Aeq} (23-07)	LV
Lithuania: day	45 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (5)	45 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (5)	45 dB(A) L_{Aeq} (06-18) (5)	LT
Lithuania: even.	40 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (5)	40 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (5)	40 dB(A) L_{Aeq} (18-22) (5)	LT
Lithuania: night	35 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (5)	35 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (5)	35 dB(A) L_{Aeq} (22-06) (5)	LT
Luxembourg	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	LU
Netherlands: f.day	33 dB L_{den}	43 dB L_{den}	(6)	NL
Norway	30 dB(A) L_{den}	30 dB(A) L_{den}	42 dB(A) L_{ekv}	NO
Poland	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	PL
Portugal	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	PT
Slovenia: day	40 dB(A) L_d	40 dB(A) L_d	40 dB(A) L_d	SI
Slovenia: night	35 dB(A) L_n (7)	35 dB(A) L_n (7)	35 dB(A) L_n (7)	SI
Spain	no indoor limits	no indoor limits	no indoor limits	ES
Sweden	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (8)	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (8)	30 dB(A) L_{Aeq} (00-24) (8)	SE

備註：

1. In DK: building regulations require an indoor limit at 30 dB(A) when new houses are build
2. In EE: in new planning areas, 35 dB(A)
3. In IS: for flats only and for summer cottages areas, 45 dB(A)
4. In IS: for flats only and for summer cottages areas, 45 dB(A)
5. In LT: also maximum noise levels (10 dB(A) higher)
6. In NL: in practice there is an outdoor policy goal that implicates an indoor goal of about 45 dB L_{den}
7. In SI: the night level means the highest hourly level in the night period
8. In SE: there is a limit for $L_{AFmax,indoor}$ (45 dB(A))
9. In SE: in cases where indoor noise levels >10 dB(A) above indoor guidelines, action must be taken

5.1.2 美國^[4]

噪音指標用於描述噪音的時變性質。美國採用之評估指標為 A 加權之 L_{10} 和 L_{eq} 。前者是噪音量超過全天最吵小時 10% 的時間之音量，後者是恒定的平均噪音量。 L_{10} 是一個統計指標項，對大多數人來說是很容易確定和理解的。雖然 L_{eq} 指標對經驗不足的人來說更難理解，但它具有超過 L_{10} 的優點，即對於小容量巷道更加可靠，並允許將來自不同來源的噪音量直接相加，以便納入噪音分析。對於相同的條件下，典型交通狀況下的 L_{eq} 通常比 L_{10} 小約 3 dB(A)。

如果存在下列任一情況，則會發生交通噪音影響：

一、預計的交通噪音量接近或超過表 5.1-3 所示的噪音消滅標準 (Noise Abatement Criteria, NAC)。

二、預計的交通噪音量大幅超過現有噪音區域中的級別。

對於某一地區現有噪音量的大幅增加並無規定的定義。大多數州高速公路機構使用 10 dB(A) 或 15 dB(A) 之噪音增量，以定義在現有噪音量「大幅度增加」。

美國《噪音控制法》要求美國環保局 (EPA) 研究制定適用於公路交通運輸的噪音控制標準，並授權聯邦公路局 (FHWA) 實施。聯邦公路局 (FHWA) 《減少高速公路交通噪音及施工噪音程序》(Procedures for Abatement of Highway Traffic Noise and Construction Noise) (23 CFR 772 號檔) 中明確指出了高速公路交通噪音標準，此標準引自 23 U.S.C.109(i) 號標準，詳如表 5.1-3 所示。從表中可以看出，美國環保局及聯邦公路局對高速公路交通噪音的標準是按照高速公路附近 (或穿過區域) 聲敏感點性質而定的。

表 5.1-3 美國聯邦公路局小時 A 加權噪音量之消滅標準^[4]

區域類型	$L_{eq(h)}$ dB(A)	$L_{10(h)}$ dB(A)	活動類別的描述
A	57(外部)	60(外部)	提供公共服務並對聲環境質量要求很高的區域
B	67(外部)	70(外部)	野餐區、娛樂區、操場、體育場所、公園、住宅、旅館、飯店、學校、教堂、圖書館和醫院
C	72(外部)	75(外部)	不包括 A 和 B 類的開發土地、財產及活動
D	—	—	未開發土地
E	52(內部)	55(內部)	公寓、汽車旅館、飯店、公共會議室、學校、教堂、圖書館、醫院、禮堂

資料來源：美國聯邦公路局。註：項目可以使用 $L_{10(h)}$ 或 $L_{eq(h)}$ (但不能同時使用)。

5.1.3 日本^[5]

1967 年日本頒布了《環境污染控制基本法》，1968 年通過了《噪音控制法》和有關噪音的環境質量標準決議。對於道路交通噪音使用兩個標準。環境質量標準用於道路新建或擴建，噪音防制也採用此標準，環境質量標準是為了保護健康應該遵守的噪音量，詳見表 5.1-4 所示。

表 5.1-4 日本之環境質量標準^[5]

類別的描述	白天 dB(A)	清晨、傍晚 dB(A)	夜間 dB(A)
雙車道公路旁的住宅區	55	50	45
多車道公路旁的住宅區	60	55	60
雙車道公路旁的混合區	65	60	55
多車道公路旁的混合區	65	65	60

註：白天、夜間、清晨和傍晚的時間界限由地方政府規定如下：

開始	結束
白天：07:00(08:00)	18:00、19:00(20:00)
夜間：21:00、22:00(23:00)	05:00(06:00)
清晨：05:00(06:00)	07:00(8:00)
傍晚：18:00、19:00(20:00)	21:00、22:00(23:00)

噪音控制法中規定的允許噪音量是個標準，在超過該標準時，地方政府可以要求公共安全委員會採取交通對策，詳見表 5.1-5 所示。

表 5.1-5 日本噪音控制法之標準^[5]

類別的描述	白天 dB(A)	清晨、傍晚 dB(A)	夜間 dB(A)
單車道公路旁的 I 區	55	50	45
多車道公路旁的 II 區	60	55	50
雙車道公路旁的 I 區和 II 區	70	65	55
多車道公路旁的 I 區和 II 區	75	70	60
單車道公路旁的 III 區和 IV 區	70	65	60
雙車道公路旁的 III 區和 IV 區	75	70	65
多車道公路旁的 III 區和 IV 區	80	75	65

表 5.1-5 中各區的劃分如下：I—對居住安靜要求高的地區；II—居住密度大的地區；III—混合區（住宅、小作坊和工廠）；IV—工業區。高速公路一般是多車道公路，由表 5.1-5 可知：日本高速公路沿線住宅區的允許噪音量白天為 75 dB(A)，夜間為 60 dB(A)。

5.1.4 中國大陸^[6]

為貫徹《中華人民共和國環境保護法》和《中華人民共和國環境噪音污染防治法》，保護環境，保障人體健康，防治環境噪音污染，批准《聲環境質量標準》為國家環境品質標準，並由中華人民共和國環境保護部與國家品質監督檢驗檢疫總局聯合發布。標準名稱、編號如下：聲環境質量標準（GB 3096—2008），按有關法律規定，以上標準具有強制執行的效力，自 2008 年 10 月 1 日起實施。

本標準是對《城市區域環境噪音標準》（GB 3096—93）和《城市區域環境噪音測量方法》（GB/T 14623—93）的修訂，與原標準相比主要修改內容如下：

- 擴大了標準適用區域，將鄉村地區納入標準適用範圍；
- 將環境品質標準與測量方法標準合併為一項標準；
- 明確了交通幹線的定義，對交通幹線兩側 4 類區環境噪音限值作了調整；
- 提出了聲環境功能區監測和噪音敏感建築物監測的要求。

本標準於 1982 年首次發布，1993 年第一次修訂，本次為第二次修訂。

用 A 加權網路測得的音壓級，用 L_A 表示，單位 dB(A)。等效連續 A 聲級（Equivalent Continuous A-Weighted Sound Pressure Level）簡稱為等效聲級，指在規定測量時間 T 內 A 聲級的能量平均值，用 $L_{Aeq,T}$ 表示（簡寫為 L_{eq} ），單位 dB(A)。除特別指明外，本標準中噪音限值皆為等效聲級。

根據《中華人民共和國環境噪音污染防治法》，「日間」是指 06:00 至 22:00 之間的時段；「夜間」是指 22:00 至次日 06:00 之間的時段。縣級以上人民政府為環境噪音污染防治的需要（如：考慮時差、作息習慣差異等）而對日間、夜間的劃分另有規定的，應按其規定執行。

按區域的使用功能特點和環境品質要求，聲環境功能區分為以下 5 種類型：

- 0 類聲環境功能區：指康復療養區等特別需要安靜的區域。
- 1 類聲環境功能區：指以居民住宅、醫療衛生、文化教育、科研設計、行政辦公為主要功能，需要保持安靜的區域。
- 2 類聲環境功能區：指以商業金融、集市貿易為主要功能，或者居住、商業、工業混雜，需要維護住宅安靜的區域。
- 3 類聲環境功能區：指以工業生產、倉儲物流為主要功能，需要防止工業噪音對周圍環境產生嚴重影響的區域。

- 4 類聲環境功能區：指交通幹線兩側一定距離之內，需要防止交通噪音對周圍環境產生嚴重影響的區域，包括：4a 類和 4b 類兩種類型。4a 類為高速公路、一級公路、二級公路、城市快速路、城市主幹路、城市次幹路、城市軌道交通（地面段）、內河航道兩側區域；4b 類為鐵路幹線兩側區域。各類聲環境功能區適用表 5.1-6 規定的環境噪音等效聲級限值。

表 5.1-6 中國大陸之環境噪音 L_{eq} 限值^[6]

單位：dB(A)

聲環境功能區類別	時段	
	日間 (06:00 至 22:00)	夜間 (22:00 至次日 06:00)
0 類	50	40
1 類	55	45
2 類	60	50
3 類	65	55
4 類	4a 類	70
	4b 類	70

註：1.4b類聲環境功能區環境噪音限值，適用於2011年1月1日起環境影響評價文件通過審批的新建鐵路（含新開廊道的增建鐵路）幹線建設專案兩側區域。

2.在下列情況下，鐵路幹線兩側區域不通過列車時的環境背景噪音限值，按日間70 dB(A)、夜間55 dB(A)執行：(a)穿越城區的既有鐵路幹線；(b)對穿越城區的既有鐵路幹線進行改建、擴建的鐵路建設項目。既有鐵路是指2010年12月31日前已建成運營的鐵路或環境影響評價文件已通過審批的鐵路建設專案。

3.各類聲環境功能區夜間突發噪音，其最大聲級超過環境噪音限值的幅度不得高於15 dB(A)。

5.1.5 澳洲新南威爾斯^[7]

表 5.1-7 列出適用於特定類型的專案、道路類別和土地用途之住宅的評估標準。在表 5.1-7 中，高速公路、主幹道和次幹道被組合在一起並有相同的 L_{Aeq} 標準。

表 5.1-7 澳洲新南威爾斯之住宅用地的道路交通噪音評估標準^[7]

道路類別	計畫型式/土地使用	評估準則dB(A)	
		日間 (7 a.m.–10 p.m.)	夜間 (10 p.m.–7 a.m.)
高速公路、主幹道和次幹道	1.受「新的」高速公路、主幹道和次幹道噪音影響的現有住宅	$L_{Aeq, (15 \text{ hour})}$ 60 (外部)	$L_{Aeq, (9 \text{ hour})}$ 55 (外部)
	2.受「再發展的」高速公路、主幹道和次幹道噪音影響的現有住宅		
	3.受土地用途發展所引致的高速公路、主幹道和次幹道之額外交通影響的現有住宅		

5.1.6 臺灣^[8]

我國於民國 99 年 1 月 21 日公告陸上運輸系統噪音管制標準（中華民國 102 年 9 月 11 日行政院環境保護署環署空字第 1020077145 號令、交通部交路字第 10200265061 號令會銜修正發布第二條、第三條條文）。評估指標採係用 A 加權之小時均能音量 $L_{eq,1h}$ ，只要全日有任何 1 個小時超過標準即視為未符合規定，須依法進行相關噪音改善工作，其中第五條 高速公路之管制標準如表 5.1-8 所示。

表 5.1-8 陸上運輸系統噪音管制標準之第五條高速公路管制標準^[8]

音量單位：dB(A)

管制區	時段與音量	小時均能音量($L_{eq,1h}$)管制標準		
		早、晚	日間	夜間
第一類、第二類		70	74	67
第三類、第四類		75	76	73

5.2 高速公路噪音防制及管制作法^[1]

以下針對歐盟道路主管會議（CEDR）成員國針對既有及新建道路所採取之減音措施進行說明，以瞭解目前國外可行之防制及管制措施，俾作為我國之參考。

5.2.1 規劃和施工階段之溝通

一、介紹

在公路交通量快速增長的時候，噪音日益成為一個公共會議上更重要的問題。一般而言，大多數歐盟道路主管會議（CEDR）成員國舉行了與道路方案規劃和強制性環境影響評估過程有關的公開會議，如圖 5.2-1 所示。



圖 5.2-1 丹麥公路專案環境影響評估公開會議^[1]

一般情況下，國道管理局（NRAs）在規劃新道路或現有道路必須修（改）建時，必須向公眾諮詢。此外，如須制訂消減噪音措施以符合某些噪音標準，亦須進行諮詢。因此，重要的是要以易於理解的方式向公眾傳達資訊。

國道管理局（NRAs）通常會根據模型計算來預測噪音的影響，這可以被描述為「聲學景觀（Acoustic Soundscape）」^[1]。另一方面，居民的出發點是感知到的景觀，即噪音量會因居民日間或平日的在家時間而有所不同。一個良好的溝通策略的挑戰是連結這些不同類型的音景（Soundscapes）。以下將說明如何建立一個將這兩項基本原則聯繫起來的溝通策略。根據調查，國道管理局（NRAs）似乎要使用噪音地圖來描述預測的噪音量，請參見下面的描述。

二、解決公眾問題

調查問卷顯示，大多數歐洲道路主管會議（CEDR）成員國就噪音問題與公眾進行協商。幾乎所有成員國都表示，在建造新的道路或隔音牆之前，他們會徵詢公眾意見。只有 3 個成員國不向公眾提供噪音資訊，只有在需要時，1 個成員國才會這樣做。若干成員國提到了歐盟關於環境影響評估的指示，其中規定對特定情況下的噪音影響進行評估。

例如：在丹麥哥本哈根，有人提議將環形高速公路從 4 車道擴大到 6 車道。高速公路運載每天約 12.5 萬輛車，並有約 3 萬所住宅鄰近高速公路。在諮詢過程中，噪音問題是市民最關注的事項。為解決噪音問題，政府同意興建 18 km 的隔音牆（圖 5.2-2），並在整個計畫的範圍內，採用低噪音路面。此外，在建築物牆面外被認為有超過 60 分貝之噪音量的住宅，為安裝隔音設施提供了財政補助。



圖 5.2-2 丹麥哥本哈根之修（改）建高速公路的新隔音牆^[1]

在規劃進行到下階段時，設立了鄰里論壇（Neighbourhood Forums）並邀請了房屋所有者和其他居民代表參加。論壇之目的是向居民提供有關正在進行的計畫案的資訊。出席者還應邀參加了計畫案管理狀況的資訊會議。居民還有機會

提出問題並指出計畫案需要解決的問題。此外，還向所有約 3 萬居民發送了一份關於該計畫案的一般資訊的電子報。

三、介紹/呈現

對調查問卷作出答覆的所有歐洲道路主管會議（CEDR）成員國都指出，與某一特定專案有關的噪音影響已在公眾會議上向公眾提出。許多成員國使用文字說明描述和噪音地圖的組合，而其他則有使用「聲音樣本（Sound Examples）」的實例。例如：在荷蘭使用「噪音模擬器（Noise Simulator）」向公眾提供噪音，以顯示道路交通噪音的影響，並最終顯示減低噪音的效果（例如：使用隔音牆），如圖 5.2-3 所示。



圖 5.2-3 荷蘭公開會議上使用之互動式噪音方案（噪音模擬器）^[1]

法國則表示：在會議室播放的「聲音樣本（Sound Examples）」不足以代表是公路邊居民的實際體驗情況。法國還表示最好使用類似的情況，例如：將受計畫道路專案影響的民眾帶到目前與計畫專案有類似的配置和交通量的地區，以便民眾能夠在現實生活中體驗噪音的影響。

在葡萄牙，噪音的影響以書面形式傳達給大眾。然而，也試圖給出一些例子，例如：顯示音樂和噪音之間的差異；或者舉例說明來自道路交通、火車和飛機的噪音，並舉例說明測量單位。這表明儘管聲音的能量是相同的，但不同的音量並沒有以同樣的方式惹惱聽眾（居民）。葡萄牙還展示了高噪音量造成的煩惱，這樣做的方法是顯示高噪音量的區域，並突出顯示實施計畫解決方案的好處。

幾乎所有歐洲道路主管會議（CEDR）成員國都使用噪音地圖（有時與圖畫和照片相結合）在公開會議或口頭聽證會上呈現噪音影響。在這種情況下，幾乎所有成員國都表示，在規劃階段提出噪音影響說明使公眾有機會影響該專案。在丹麥和瑞典，一個計畫案在規劃和設計階段多次向公眾提出，如圖 5.2-4 及圖 5.2-5 所示。

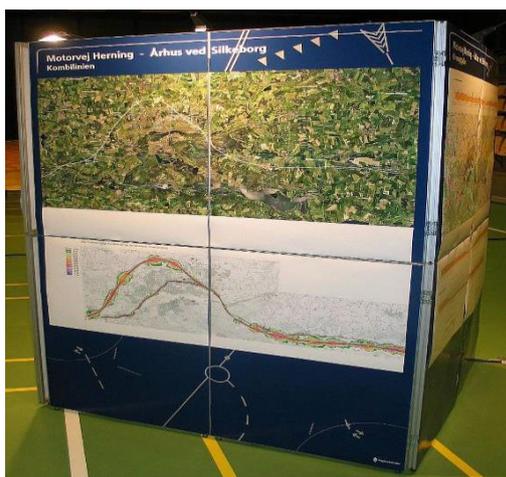


圖 5.2-4 丹麥公路專案展覽會的噪音海報^[1]



圖 5.2-5 丹麥使用低噪音路面的講習班^[1]

四、既有道路

根據從歐洲道路主管會議（CEDR）成員國收到的答覆，似乎在新道路和既有道路上對噪音問題進行了不同的處理。關於既有道路，若干成員國說明在維護期間不實施噪音消滅。不過，如在既有道路上有需要消滅噪音的規定，噪音量會以書面形式及噪音地圖呈現給民眾知道，此與新道路規劃階段所採取的做法相近。在瑞典，國家公路管理局在與公眾交流方面更加積極主動，通常會向公眾發出信件並概述在道路上進行的工程。在某些情況下，會將噪音評估計畫給予所有可能受到道路工程影響的業主。

在挪威，挪威公路管理局編制了一份摺頁冊，介紹居住在接近道路交通噪音附近的居民之權利，以申請減少噪音措施，如圖 5.2-6 所示。這些摺頁冊之目的是幫助那些正在建造靠近道路的新房子的民眾或目前居住在接近既有道路的民眾。此外，該摺頁冊亦可供現時與規劃的道路接近的居民使用。

所有摺頁冊均記載有有關道路交通噪音的資料，以及有關噪音的法規及指引。摺頁冊也發給向市政府索取資料的居民，所有摺頁冊都可以在挪威道路管理網站上找到，它們通常也在公開會議上分發。



圖 5.2-6 挪威向居住在國道沿線居民發送的摺頁冊範例^[1]

5.2.2 減音措施

除了減低噪音的鋪面外，現時亦有廣泛的切實可行的道路交通噪音消減措施，包括：限制土地用途、源頭規劃（改變道路方向，以儘量減低交通噪音）、交通管理、牆面隔音和基礎設施等措施，如設置隔音牆等。隔音牆是目前應用最廣泛的道路交通噪音減音措施。

一、隔音牆

隔音牆根據材料的選擇和隔音牆的設置位置，它有可能對周圍地區產生嚴重影響，因此，隔音牆的視覺品質是一個關鍵因素，考慮隔音牆將如何影響社區和道路使用者的觀點是非常重要的。某些隔音牆可能是針對周圍環境而設計的，例如圖 5.2-7 之(4)；有些可能執行多個功能，如圖 5.2-7 之(5)所示。

二、交通管理

改變城鎮或城市的交通流量也可能降低區域內的噪音量。例如：愛爾蘭都柏林市議會於 2006 年 2 月對都柏林的 5 軸重型車輛實行禁令，這個觀點被社區普遍地接受^[9]，儘管這可能是由於噪音量稍微降低以及感受到重型車輛在該區域不存在所造成的。其他措施，例如：車速限制、環形交通樞紐或減少道路的寬度，可能都有助於降低整體的道路交通噪音。

		
<p>(1)丹麥作為隔音牆的植物土堤</p>	<p>(2)混凝土隔音牆的實例(註 1)</p>	
		
<p>(3)義大利城市環境中複雜排列的隔音牆</p>	<p>(4)奧地利維也納有風景壁畫的隔音牆</p>	
		
<p>(5)使用太陽能電池板建造的隔音牆(註 2)</p>	<p>(6)荷蘭使用的 T 頂噪音牆設計實例</p>	
		
<p>(7)奧地利維也納之彎曲隔音牆的實例</p>	<p>(8)荷蘭之彎曲隔音牆的實例(註 3)</p>	

圖 5.2-7 國外高速公路之各種型式隔音牆實例照片^[1] (1/2)

- 註：1.可以藉由植被在頂部的生長而得到美感改善，但可能會影響到減音的能力。
 2.減輕噪音同時可產生電力供道路使用。
 3.部分封閉了道路，可為附近有敏感受體的地區提供額外的噪音緩解。



圖 5.2-7 國外高速公路之各種型式隔音牆實例照片^[1] (2/2)

- 註：1.上面建造了隔音牆，注意隔音牆的垂直對齊方式。
 2.隔音牆尺寸根據位置的不同而有所不同。

三、低噪音路面

(一)國外現況

道路交通噪音主要來源於輪胎與路面的相互作用，這意味著改變路面的類型也可以降低噪音量，如圖 5.2-8~圖 5.2-12 所示。在興建新道路或維修既有道路時，可引入指引、法例或建議，以推廣減低噪音的鋪面。在 20%的歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國中，低噪音路面被列入準則、策略或具有類似地位的文件中。在一些成員國中，正在就發展這種指導進行工作。國道管理局 (NRAs) 的政策是使用多孔隙瀝青 (Porous Asphalt) 作為標準路面，特別是在最高時速為

120 km/h 的國家道路上。在某些國家，兩層的多孔瀝青預留用於在沒有其他解決方案可解決之嚴重噪音問題的地區使用。

由國內外文獻知 PAC 鋪面具有良好減音功效，藉由換新路面面層降低車輛輪胎噪音並可減少車輛跳動及振動；透水性、抗滑性、防眩…等性能佳，增加用路人之安全；若屬橋面設計，可同時藉由路面重鋪拉順伸縮縫與路面間高低差，進一步降低伸縮縫噪音或路面不平引起之振動聲；由美國之實驗亦可降低反射音之影響程度。美國俄亥俄州運輸部（ODOT）曾藉由實際量測並配合公路地下道模式（Highway Underpass Model, HUM）模擬涵洞中直接音及反射音對附近區域之貢獻度，並模擬吸音材料設置前後之音量。研究中亦建議，使用低噪音鋪面亦可有效降低反射音（Herman, L.A., Seshadri, S.R., Pinckney, E. Placement of sound-absorbing materials to control traffic noise reflections at a highway underpass. Transportation Research Record, 1670, 69-75, 1999.）。

日本實驗不同車速及不同鋪面型式之噪音減量詳如表 5.2-1 所示，由表中可看出隨著車速增大，多孔瀝青混凝土鋪面之減音量有增加之趨勢，故計畫路段之車速若較快，從鋪面改善應可得到助益。

表 5.2-1 不同車速及不同鋪面型式之噪音減量

Table 6. Results of CPX-like noise measurements at three speeds.

Pavement type and location	Noise reduction in dB (overall A-weighted values)		
	40 km/h	50 km/h	60 km/h
DAC 0/20 in Zama City (12 years old)	-6.3	-6.8	-6.2
DAC 0/13 in Atsugi City (new)	ref	ref	ref
PA 0/13 in Atsugi City (new)	3.5	3.4	4.3
PERS in Zama City (new)	8.6	9.5	9.9

資料來源：”DVS-DRI SUPER QUIET TRAFFIC - international search for pavement providing 10 dB noise reduction”, DANISH ROAD INSTITUTEREPORT 178 - 2009

註：1.密級配瀝青路面（Dense Asphalt Concrete, DAC）。

2.多孔性瀝青路面（Porous Asphalt, PA）。

3.多孔彈性路面（Porous Elastic Road Surface, PERS）。

4. Zama City：日本神奈川縣座間市；Atsugi City：日本神奈川縣厚木市。

對於適當維護之車輛，當車速高於約 50 km/h 時，輪胎鋪面噪音為一主導 (Dominant) 噪音源，如圖 5.2-8 所示^[10]。另輪胎係直接與鋪面接觸，故在國內外文獻均未針對不同噪音來源進行各別之減音量分析，皆以單一噪音減量呈現。

柔性路面添加橡膠材料可使路面產生柔性化 (Flexibility)，主要貢獻為降低輪胎衝擊路面所產生之衝擊噪音。在瀝青中添加柔性材料已成為世界各國所推薦降低行車噪音方案之一，添加之柔性材料若為廢輪胎材料，亦可同時解決行車噪音、環境衛生及公共安全等問題。此外，柔性化降低噪音路面可同時搭配材料多孔隙化，以大幅增加減噪功效。路面柔性化可藉由添加柔性材料至瀝青混凝土而達成，典型材料即使用廢輪胎再生製成之橡膠顆粒或粉末^[11]。

多孔彈性路面 (Porous Elastic Road Surface, PERS) 與作為參考的傳統瀝青路面相比，可以大幅降低噪音。在 PERS 和其他鋪面上測量的噪音之間的差異取決於速率，這在表 5.2-1 及圖 5.2-9 中更清楚地顯示。在約 80 km/h 的速率下，與粗糙的表面粒料相比，PERS 的平均差異為 10 dB(A)；與密級配瀝青混凝土相比為 12 dB(A)。預期使用 PERS 可使輪胎鋪面噪音降低約 10 分貝，並且在路面齡期老化時的測量結果表明，堵塞不會降低其聲學功能，為在低噪音路面上的獨特之處。因此，PERS 似乎是一種非常有前途的路面選擇，可以大幅減少交通噪音，但它要求解決目前的耐久性和齡期問題^[12]。

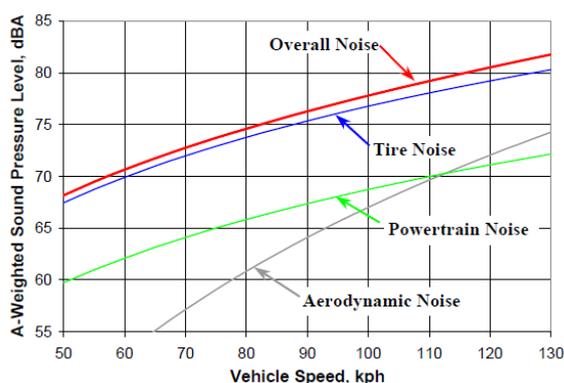


圖 5.2-8 高速公路交通噪音之不同音源貢獻圖^[10]

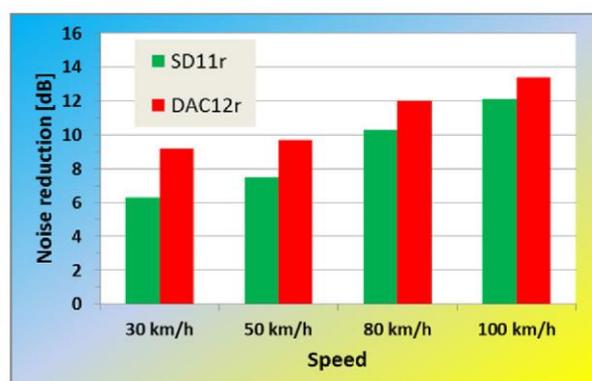


圖 5.2-9 多孔隙彈性路面於不同車速下相對於粗糙的表面粒料 (SD11r) 及密級配路面 (DAC12r) 之減音量^[12]

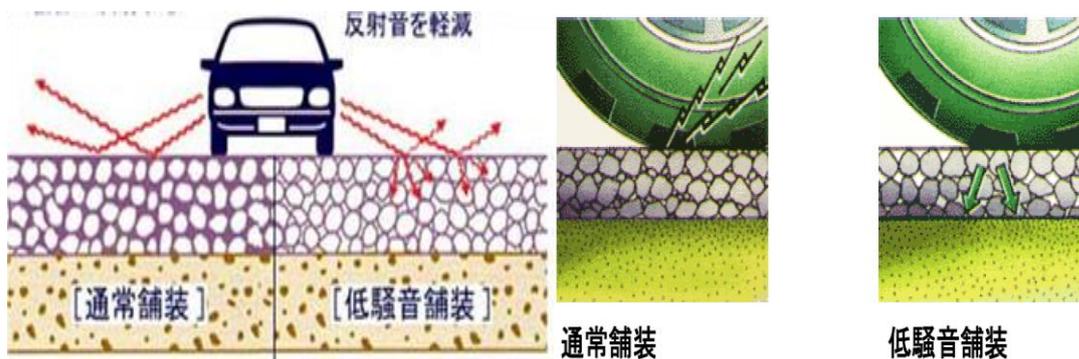


圖 5.2-10 多孔隙瀝青混凝土 PAC 鋪面改善之減音效果示意圖^[11]

資料來源：交通部臺灣區國道高速公路局民國99年12月
「高速公路噪音潛勢分析與防制措施之研究」。



圖 5.2-11 荷蘭在公路上使用多孔瀝青是一項國家政策準則^[1]
(在 2008 年，約 80% 的路網使用多孔瀝青)



圖 5.2-12 丹麥哥本哈根一個新的低噪音路面的實例^[1]

(左邊的低噪音路面音量約低於右邊密級配瀝青路面 6 dB(A))

(二)國內現況

而有關國內低噪音路面使用現況說明如下。交通部高速公路局北區養護工程分局（原名：交通部臺灣區國道高速公路局北區工程處）已於民國 101 年於楊梅路段試辦孔隙率約 20%，厚度 2cm~3cm 之 PAC 低噪音鋪面。經實際換鋪 PAC 測試後，瞭解其成效及相關界面處理，並可確保行車安全情形下，後續將 PAC 用於陳情路段降低噪音之措施，藉以更進一步減輕高速公路沿線居民所承受之噪音影響。相關之減音成效測量結果說明如下。

1. 「國道 6 號多孔隙瀝青混凝土鋪面成效評估（陳建旭，2011）」，實驗約有 3.0 dB(A)~5.0 dB(A)不等。

2. 交通部臺灣區國道高速公路局民國 99 年 12 月「高速公路噪音潛勢分析與防制措施之研究」報告內容，歐洲國家實驗孔隙率 20%之 PAC 鋪面，減音量約介於 3.0 dB(A)~8.0 dB(A)。

3. 交通部臺灣區國道高速公路局北區工程處民國 102 年 1 月「多孔隙鋪面不同厚度減音成效量測報告書」之內容，新鋪設 PAC 與原始鋪面之減音量約介於 2.8 dB(A)~5.4 dB(A)。

於國道 6 號之「多孔隙瀝青混凝土功能性及經濟性評估（陳建旭等，2012）」，顯示孔隙之減少約有 8 成左右來自交通壓實，壓實孔隙率為不可逆之現象，當路面已受到壓實後，高壓清洗 PAC 路面只能將表面少數堵塞孔隙雜物清除，壓實孔隙仍無法恢復，因此，清洗 PAC 路面之效果是有限的。除此之外，高壓水洗法成本高，可能鬆動 PAC 之粒料組構，容易形成粒料鬆脫，綜合上述原因，因此，目前不建議高壓清洗 PAC 孔隙。降雨量之清洗及車輛自清作用有助於 PAC 透水及減音效果之延續。目前高速公路局於鋪面維護部分皆是以雨水自然沖刷路面灰塵，並無高壓清洗等項目。相關維護機制依據「高速公路養護手冊」鋪面章節-瀝青混凝土，辦理各損壞型態之養護對策。

廢輪胎橡膠瀝青技術的發展可追溯自 1940 年代起，之後隨著時代進步，加上自動化設備的研發，應用層面更加普及。國際間環保永續的理念發酵，建立物質再生的產業環境，使其發揮有效利用的價值性，進而創造互利的永續經營經濟概念。對此，將廢輪胎研磨成膠粉作為橡膠瀝青鋪面應用，正是此營運概

念最佳化的表現，且經國內外實證橡膠瀝青鋪面之工程實績，皆顯示鋪面功能性提升之成效，在兼顧工程與環保的優勢下，國內橡膠瀝青相關產業的應用發展深具誘因^[13]。

國內橡膠瀝青鋪面應用大致可分 5 個發展階段（如圖 5.2-13），於民國 89 年開始有較具規模的橡膠瀝青鋪面應用計畫推動，使技術突破學術研究領域，正式邁入與產業技術接軌的實務應用階段；101 年起，在前期既有技術經驗基礎上，搭配國外成熟成套設備的引進與運用，經環保署與各公路單位的齊力推動下，至現階段已完成近 30 餘公里車道的鋪築應用實績，有關工程資訊彙整如表 5.2-2；下階段規劃持續擴大應用範圍，並驗證橡膠瀝青鋪面的長期使用成效，另因應橡膠瀝青須採用專用設備拌製，期能藉機扶植國內橡膠瀝青產業形成，促使橡膠瀝青鋪面材料能真正導入國內市場競爭與選用^[13]。



圖 5.2-13 國內橡膠瀝青鋪面應用推展歷程^[13]

表 5.2-2 國內橡膠瀝青鋪面路段工程實績資訊^[13]

完工年度	路段位置	橡膠瀝青鋪面段里程	單車道長度(公里)	廢輪胎膠粉量(公噸)	備註
89	台1線湖口路段 (北上/雙車道)	61k+000~62k+300	2.6	29.3	配合路段改善工程已剷除。
90	台1線苗栗路段 (南北向/雙車道)	102k+380~102k+880	2.0	22.5	主幹道路段尚存,已使用達16年。
104	台61線大園及觀音路段 (南下/雙車道)	33k+150~34k+000 (橋面段) 43k+200~44k+200 (路堤段)	3.7	41.6	長期使用成效評估中。
105	國道1號三義路段 (北上/雙車道+單車道)	122k+086~123k+550	2.564	28.3	長期使用成效評估中。
107	台72線公館至銅鑼路段 (西向/雙車道及路肩)	15k+820~23k+050	21.69	125.6	-

完工年度	路段位置	橡膠瀝青鋪面段里程	單車道長度(公里)	廢輪胎膠粉量(公噸)	備註
合計			32.554	247.3	

橡膠瀝青之所以優於一般瀝青是因為高黏度且具有彈性，因為含有與砂粒同大小的橡膠顆粒，故需搭配採用砂量較少的開放級配或越級配粒料，如圖 5.2-14 所示。採用的橡膠瀝青含瀝青量又比傳統瀝青混合料高很多，裹覆在粒料表面的瀝青膜約為傳統瀝青混合料油膜的 2 倍，故有很好的耐久性，且橡膠瀝青油膜中含有許多彈性橡膠顆粒而具有很好的抗疲勞效果，開放級配或越級配粒料架構並具有抗變形及抗滑降噪特性^[13]。

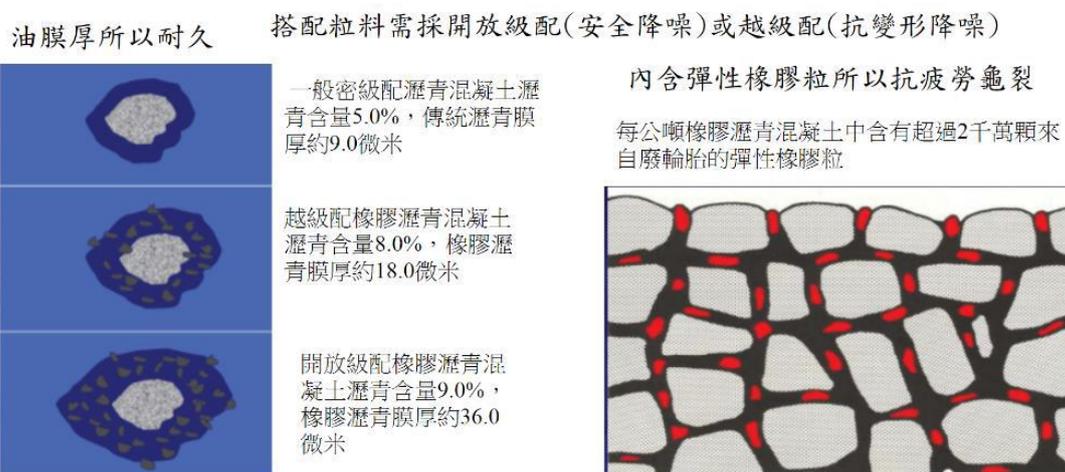


圖 5.2-14 橡膠瀝青成效優於一般瀝青之示意說明^[13]

台 61 線西濱快速道路進行越級配橡膠瀝青鋪面應用評估：就整體而言，相較用於快速道路之一般瀝青密級配鋪面，經單點式 24 小時連續噪音測量，橡膠瀝青鋪面處所測量之噪音分貝皆低於一般瀝青鋪面，平均約有 3 dB 的降噪效果，試驗分析結果如圖 5.2-15 所示^[13]。

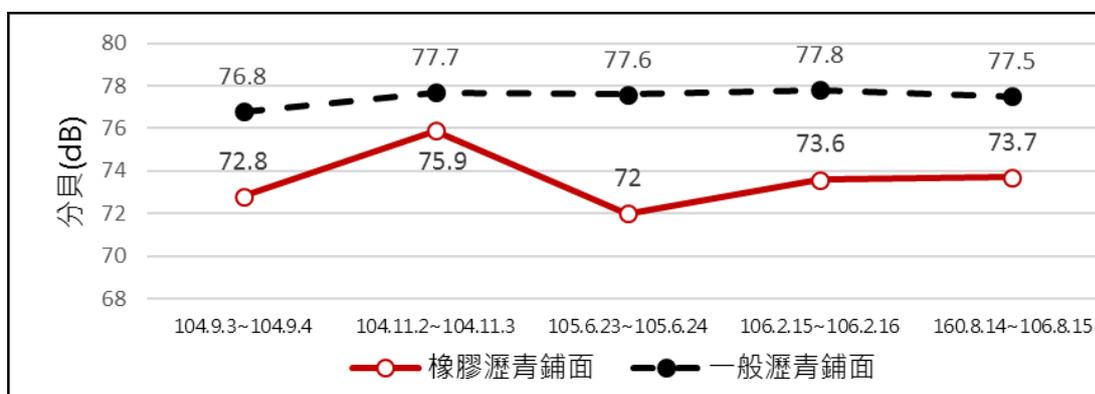
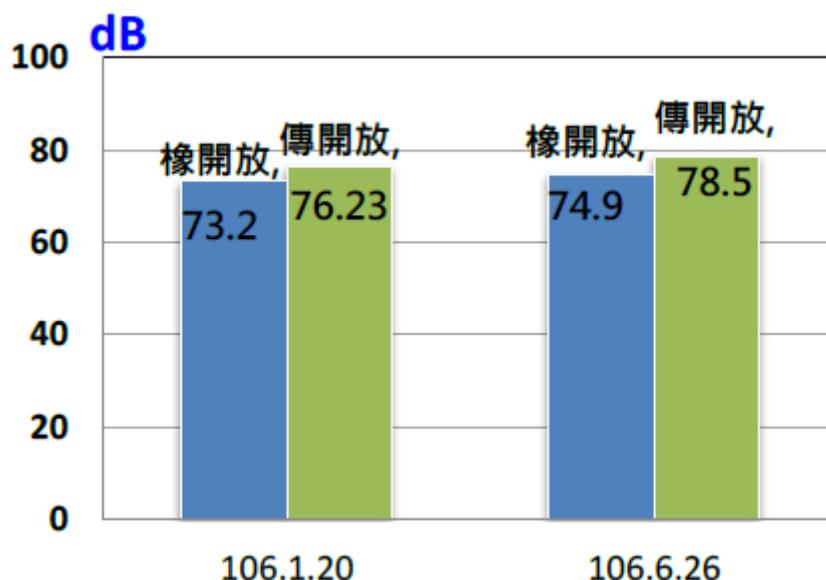


圖 5.2-15 台 61 線西濱快速道路橡膠瀝青段降噪效果評估^[13]

國道 1 號高速公路進行開放與越級配橡膠瀝青鋪面應用評估：就整體而言，相較用於高速公路之一般瀝青開放級配鋪面，經單點式 24 小時連續噪音測量，橡膠瀝青鋪面處所測量之噪音分貝皆低於一般瀝青開放級配鋪面，有 3 dB 的降噪效果，試驗分析結果如圖 5.2-16 所示^[13]。

圖 5.2-16 國道 1 號高速公路橡膠瀝青段降噪效果評估^[13]

目前廢玻璃再製品的運用管道，是以公共工程、環保建材以及工藝裝飾為主，像是台北市復興南路、八德路及新光路二段等多處路段均使用玻璃瀝青混凝土，發揮玻璃之夜間反光及止滑特性，增加夜間行車安全。另根據研究報告指出，在馬路上鋪設的瀝青混凝土如以廢玻璃（粒徑小於 4.76 mm）取代天然粒料 10%~15%，路面抗滑能力較傳統瀝青路面佳且具反光效果^[14]。

廢玻璃再利用於瀝青路面之試鋪地點位於公路局第五區工程處斗南工務段轄區（雲林縣境內），分別於 156 線 7k 右側車道（麥寮~崙背間）及 158 線右側車道（東勢街道）。前後兩次噪音檢測時程相隔 7 個月，其檢測結果並無明顯之差異。主要原因為該計畫試鋪路面採用密級配，並無多餘空隙以吸收外來之噪音，玻璃瀝青路面噪音值也與一般路面之值相當。鋪面如欲獲得顯著之降低噪音效果，應採用開放級配或使用多孔隙瀝青混凝土路面來達成^[15]。

四、牆面隔音

如果是牆面隔音，一般是建築物的窗戶、門和牆壁的數量、尺寸、位置和所選材料，它決定了進入建築物的外部噪音量。一般情況下，放置在外牆垂直部件之間的絕緣層將在減少牆體的聲音傳輸方面發揮重要作用。此外，隔音玻璃還會減弱通過窗戶傳輸的聲音，為了確保良好的隔音效果，還必須考慮衰減通風。

五、減音措施之選擇

在既有道路及新道路上，例如：低噪音路面、交通管理、隔音牆等，最多使用的減輕噪音措施是甚麼？共有 20 個歐洲道路主管會議（CEDR）成員國對調查問卷作了答覆。

對這些問題的答覆進行了合併和討論，其結果詳如圖 5.2-17 及圖 5.2-18 所示。這些問題旨在評估歐洲道路主管會議（CEDR）成員國針對既有道路及新道路所採取之噪音減低措施的類型和數量。

(一)既有道路

隔音牆及低噪音路面是處理既有道路噪音的最顯著改善措施（圖 5.2-11）。除了這些措施外，20% 成員國還利用交通管理來解決噪音問題。在既有道路之改善上，75% 成員國單獨使用隔音牆或與其他措施結合使用。其它常用措施，包括：牆面隔音（40%）及道路路面改善（30%）。

(二)新道路

關於新的道路噪音防制方面，同樣使用隔音牆及鋪面是用來解決噪音問題的主要措施。超過 90% 的成員國傾向於使用專有的隔音牆，而低噪音路面的使用是第二個最常用的措施。與既有道路上使用的相同措施相比，隔音牆和鋪面的使用增加了 15%。不過使用牆面隔音及交通管理措施則減少 5%。與現有道路不同，在規劃階段使用隧道和路線選擇是作為減輕噪音的一種手段。然而，在新的國家道路計畫的規劃階段，只有 10% 和 35% 的成員國分別考慮這兩種選擇。

(三)減音措施數目

1.既有道路

超過 55% 的歐洲道路主管會議（CEDR）成員國使用 2 種或多種減少噪音措施來處理既有道路上的噪音。只有 5% 的成員國使用 4 種不同類型的措施之組合；25% 使用 2 種措施的組合；另外 25% 使用 3 種措施的組合（圖 5.2-12）。

其餘 35%的成員國依賴 1 種減音措施，而 10%的受訪者針對既有道路不使用任何的噪音減音措施。

2.新道路

當談到新道路上的噪音措施時，80%的歐洲道路主管會議（CEDR）成員國使用 2 種或多種類型的減音措施（10%使用 5 種、15%使用四種、20%使用 3 種、35%使用 2 種）來處理新的國家道路上的噪音（圖 5.2-12）。所有 CEDR 成員國都有處理新道路噪音問題的程序，於新道路的噪音處理方法有更多種選擇。結果顯示，CEDR 成員國中有較高比例對於新建道路使用的減音措施多於現有道路。一些成員國認為新公路的路線選擇過程是避免環境影響的一個機會。然而，令人驚訝的是只有 35%的成員國使用這一備選辦法來減輕噪音。

隔音牆是歐洲道路主管會議（CEDR）成員國為減少既有和新道路之交通噪音而採取的主要減音措施。不過應該指出的是隔音牆不一定是在特定地點減少噪音的最適當或最具成本效益的方法。因此，一個聲學專家必須對噪音敏感地點進行全面評估，以調查替代性和可能更具成本效益的減音措施。雖然一些成員國使用了牆面隔音、交通管理和低噪音路面等減音措施，但在使用中似乎沒有一致的模式。

處理源頭的噪音（例如：車輛）可能會更具成本效益，令整個道路網路受惠。在建造新道路時，可以使用路線選擇過程來減輕噪音。但是調查的結果清楚地表明，這一備選辦法只有數目有限的成員國使用，應鼓勵更多成員國在早期規劃階段使用路線選擇。

在隔音牆的施工中，採用了多種建築材料。然而，主要的材料類型是混凝土、木材和鋁。使用中的材料類型顯然取決於可用性，但應該指出，隔音牆也可以用可回收的材料建造，這對木材等材料並非總能得到利用的國家有利。同樣必須確保所使用的材料具有必要的聲學特性，以滿足設計目標。除了使用歐洲聲學和非聲學性能標準之外，大多數國家已經採用了自己的國家標準來建造隔音牆。很少有國家有任何試驗當前之隔音牆設計以改善噪音衰減的經驗（荷蘭正在這方面進行研究）。

一些成員國認為除了歐洲標準外，還有必要在隔音牆方面引入他們自己的規格，這可能是由當地環境問題引起的。在實施任何針對其他環境因素以及減少噪音的方法取得的經驗對所有成員國都有利，因為它可以幫助創造一種泛歐環

境驅動的減少噪音政策。最後，調查顯示有超過 80% 的歐洲道路主管會議 (CEDR) 成員國沒有適當的程序來維護現有道路上的專有隔音牆。

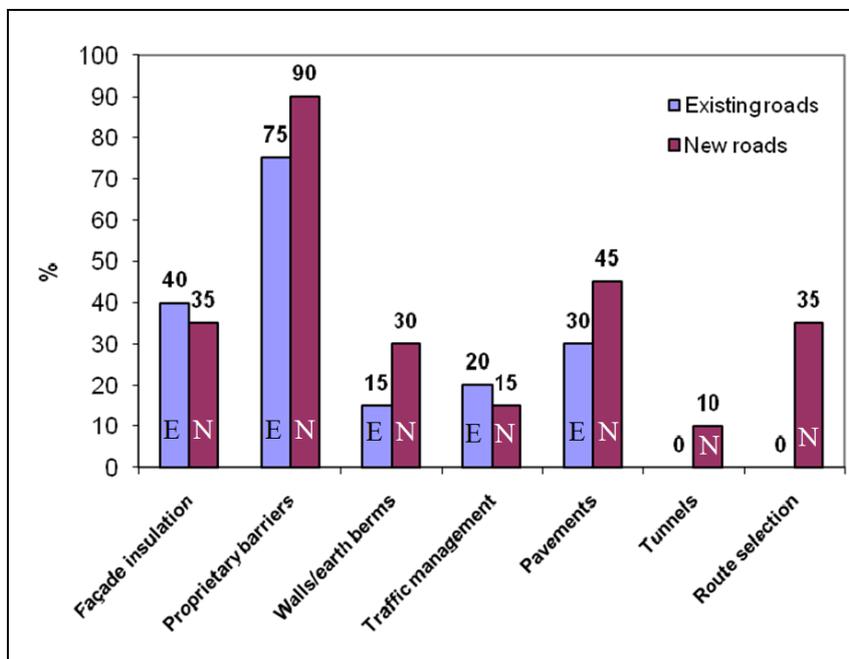


圖 5.2-17 歐盟道路主管會議 (CEDR) 成員國針對既有和新道路的減音措施類型之比例^[1]

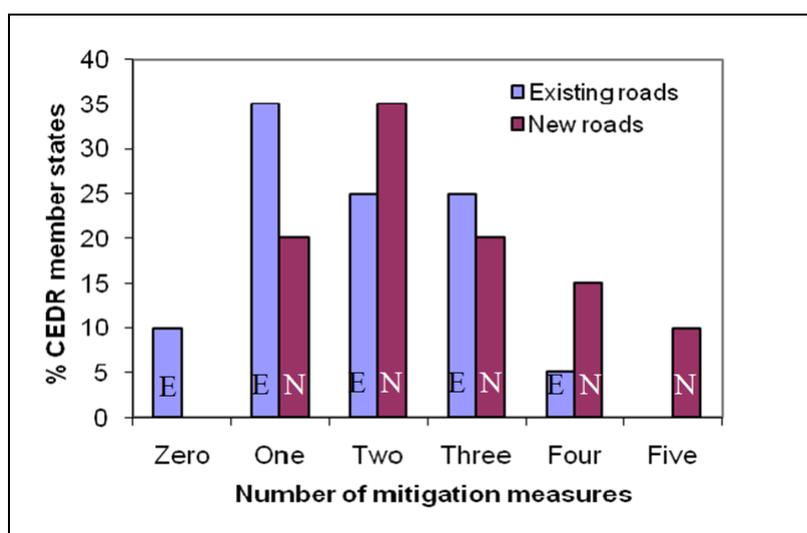


圖 5.2-18 歐盟道路主管會議 (CEDR) 成員國為減輕既有和新道路噪音而使用的減音措施數目之比例^[1]

5.2.3 噪音防制精進作法之討論及建議

在對前述文獻資料蒐集評估的基礎上，彙整一般結論如下：

一、在大多數歐洲道路主管會議（CEDR）成員國有處理各種噪音問題的噪音政策或準則。雖然這些文件的法律地位可能不同，但它們都採用噪音限值來控制歐洲國家道路沿線的噪音，其中大多數是室外限值。

二、國外所使用之噪音指標，主要包括： L_{Aeq} 、 L_{den} 及 L_{10} ，用於計算和測量噪音量和定義噪音限值，整理如表 5.2-3 所示。在 CEDR 成員國，至少有 7 種不同的電腦模型用於計算或預測噪音水準。這意味著，要比較各國的噪音限值相當複雜，解決這個問題的最好方法是引入通用的方法來進行噪音計算。

表 5.2-3 各國之高速公路噪音指標

國家	A 加權高速公路噪音指標	時段平均或小時平均
1. 歐盟	L_{Aeq} 、 $L_{A_{den}}$	時段
2. 美國	$L_{A10(h)}$ 、 $L_{Aeq(h)}$	小時
3. 日本	L_{Aeq}	時段
4. 中國大陸	L_{Aeq}	時段
5. 澳洲新南威爾斯	L_{Aeq}	時段
6. 臺灣	$L_{Aeq,1h}$	小時

資料來源：本計畫整理。

三、在確定哪些道路需要維護或鋪新路面時，噪音通常不是一個考量標準。儘管如此，在 65% 的 CEDR 成員國中，當決定道路需要修理或新鋪設路面時，會考慮噪音。只有幾個成員國將噪音作為路面管理系統中的參數，另有 20% 的成員國已經在指南或類似文件中說明使用了低噪音路面。儘管只有少數幾個成員國對使用低噪音路面有正式要求，但目前 80% 的成員國有這種路面。多孔型路面（Porous-type）、薄層路面（Thin-layer）和石膠泥瀝青混凝土路面（Split Mastic Asphalt, SMA）是成員國可用的降噪路面的主要類型。

四、隔音牆是 CEDR 成員國既有和新道路方案採用的主要減音措施。在隔音牆的施工中，採用了多種建築材料，主要的材料類型是混凝土、木材和鋁。然而，應該指出的是隔音牆不一定是在特定地點減少噪音的最適當或最經濟有效的方法。因此，重要的是對噪音敏感地點進行全面評估，以調查其他可能更具成本效

益的減少噪音措施。一些成員國使用了諸如：牆面隔音、交通管理、車速限制和低噪音路面等減音措施，但在使用中似乎沒有一致的模式。

五、除了使用歐洲標準來建立隔音牆的聲學和非聲學特性外，大多數國家都採用了本國的隔音牆標準。在試驗當前隔音牆設計以改善噪音衰減方面的經驗非常有限。與其他設計相比，帶有吸音性頂部的 T 型隔音牆效率最高。超過 80% 的 CEDR 成員國沒有適當的程序來維護現有道路上的隔音牆。

六、當涉及到建設新的道路時，可以透過路線選擇過程來減輕噪音。但是調查結果表明，這個選項只被一些成員國使用。在更多成員國中，可以鼓勵在早期規劃階段使用路線選擇。

七、向公眾說明消滅噪音措施等議題，重要的是要以易於理解的方式向公眾提供資訊。許多成員國將文字與噪音地圖結合起來，有些甚至包括聲音的例子。例如：荷蘭使用「噪音模擬器（即帶有互動式節目和揚聲器的電腦）」來顯示隔音牆的效果。

根據國外之作法，彙整了關於噪音管理和消滅的治理建議：

一、在歐洲，主要的噪音問題發生在既有的道路網路沿線，而且隨著交通量的增加，問題的嚴重性也隨之增大。因此，在這些道路上消滅噪音是非常重要的，以便推行一個長期減少噪音的過程。

二、對於新的道路發展，重要的是在早期規劃階段即包括噪音問題。採用這種方法可能有助於避免未來的噪音影響，這種做法通常以國家噪音準則為基礎。

三、在既有道路改善的專案中，噪音應列為重要參數，以適應增加的交通量或車速提升。這可以改善居住在修（改）建道路附近的居民的噪音環境。

四、當計畫在新的、既有的和重建的道路上納入消滅噪音措施時，採用 20 年～30 年的時間跨度來預測未來因交通量增加而產生的噪音非常重要。

五、在接近住宅區的道路施工時，應考慮規劃和減低這類工程產生的施工噪音，住在工地附近的居民應該得到足夠的資訊。

六、在計畫和設計噪音消滅措施的項目中，建議制定良好的溝通策略，以確保與公眾進行雙向溝通。透過這種方式，居民可以獲得該項目的表達權，這可能意味著他們對透過減輕噪音可以實現的降噪期望更為現實。

七、道路上設置的隔音牆不僅影響住在附近的居民亦對司機和乘客有影響。因此，使用適合其安裝位置的隔音牆設計非常重要。

八、在選擇噪音緩解措施時，應考慮使用低噪音路面，因為這種路面被認為是一種具有成本效益的減音方式。在改善既有道路時，使用低噪音路面通常是一種低成本的減音措施。在路面管理系統中，應把噪音作為一個研究參數，可在持續的道路路面重建過程中，善用減低噪音的路面。

九、為了減少個別車輛的噪音排放，促進對新車和輪胎的批准，將是非常寶貴的。從車輛源頭處理噪音可能會更具成本效益，並且會使整個道路網絡受益。

十、與所有基礎設施一樣，需要定期維護諸如：鋪面、隔音牆、牆面隔音等噪音消減措施。

十一、有必要進一步研究和開發以改進和長期使用的噪音消減措施，如：優化低噪音路面、輪胎及車輛等，還需要更好地瞭解噪音對健康的影響。

十二、在未來的幾年裡，與歐洲噪音指令（END）有關的噪音地圖繪製和噪音行動計畫等問題將具有高度的相關性。

5.3 航空噪音指標及法規限值

目前各國所採用的航空噪音評估指標不盡相同，大多數都採用感覺噪音級 *PNL* 或 *A* 聲級來評估一次飛行事件，對於長期連續的飛行事件，國際民航組織（ICAO）推薦採用加權等效連續感覺噪音級 *WECPNL*，一些國家也提出了其他的評估指標。

一、航空噪音評估指標

(一)單一事件噪音曝露值 L_{AE} (Single Event Noise Exposure Level, SENEL 或噪音暴露聲級 Sound Exposure Level, SEL)：對於單次或離散噪音事件，如飛機的一次起飛或降落過程，可用暴露聲級 (Sound Exposure Level, SEL) 來表示這一噪音事件的大小，也是均能音量的一種。

$$SEL = L_{AE} = 10 \log_{10} \frac{1}{10} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_A(t)}{P_0} \right)^2 dt$$

式中：

$P_A(t)$ 是 *A* 加權音壓；

P_0 是參考音壓；

t_1 ：單一噪音事件的開始時間；

t_2 ：單一噪音事件的結束時間。

(二) 察覺音量 L_{PN} (Perceived Noise Level, PNL)

克雷特 (Kryter) 等人提出了新的評估指標：噪度和感覺噪音量。其想法是測試聽眾對不同中心頻率的頻帶噪音量的平均回應，並用噪音量－頻率型式得到一個統計的八音階等噪度曲線。

噪度的單位為納 (Noy)，用 N_a 表示。定義在中心頻率為 1k Hz 的八音階上，噪音量為 40 dB 的噪音之噪度為 1 Noy。將噪度轉換為分貝指標，稱為感覺噪音級，用 PNL 表示。感覺噪音級與噪度的關係如下：

$$PNL = 40 + 10 \log_2 N_a$$

可用噪音計測取噪音的 A 聲級 L_A 或 D 聲級 L_D (D 權聲音壓力位準，D-Weighted Sound Pressure Level：一般用於研究航空噪音時常用)，但為某種飛機飛行「一次」時噪音所造成影響，用下面公式近似計算：

$$L_{PN} \cong L_A + 13(\text{dB}) \text{ 或 } L_{PN} \cong L_D + 7(\text{dB})$$

(三) 有效察覺噪音量 L_{EPN} (Effective Perceived Noise Level, EPNL)

有效察覺噪音量，除了對純音加以校正外，尚考慮到噪音的延時之持續性，此項計算相當複雜，也是均能音量的一種。一般需計算包括純音修正後航空器飛越時的最大音量 ($L_{TPN \max}$)，加上持續時間修正量 ΔPN ，當評估航空噪音對人體影響時，不但考慮噪音的頻譜特性，還要考慮噪音的持續時間等特性，為此引入有效察覺音量，但為某種飛機飛行「一次」時噪音所造成影響，其定義為：

$$L_{EPN} = L_{TPN \max} + \Delta PN$$

ΔPN 值：所指的是航空器噪音上升到 $L_{TPN \max}$ 再下降 10 dB 所要的時間 ($t_2 - t_1$)，將之影響濃縮或放大到 10 秒的標準化基準上，進行修正 (即 $t_{ref} = 10s$)。

$$\Delta PN \cong 10 \log_{10} [(t_2 - t_1)/20] \text{ 或 } \Delta PN = 10 \log_{10} \frac{t}{10} ;$$

$$t = \frac{\int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1LTPN} dt}{10^{0.1LTPN \max}}$$

式中：

另表示法，有效察覺音量 L_{EPN} ：

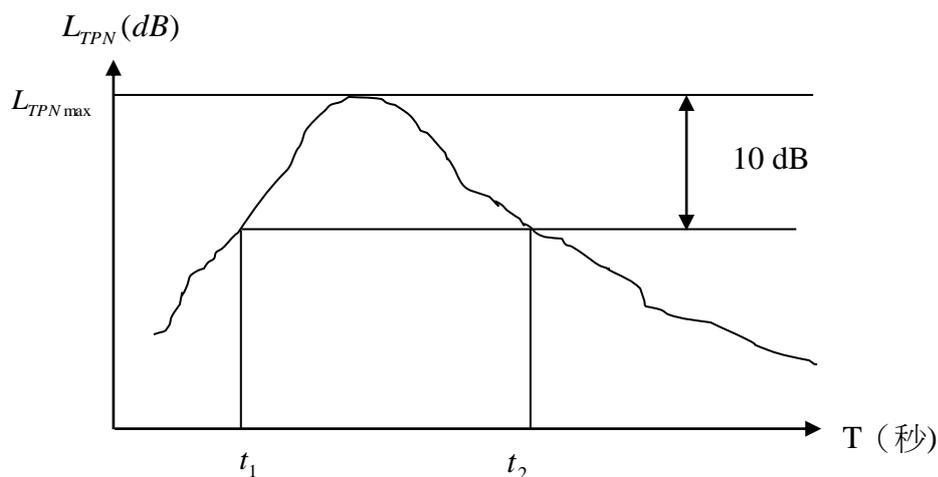
$$L_{EPN} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \right) \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1 L_{TPNi}} dt (dB)$$

式中：

T_0 —基準時間，取 10 秒；

t_1 、 t_2 —計算的起、止時間，即在最大值 $L_{TPN \max}$ 下降 10 dB 的起、止時間，如圖。

L_{TPNi} —經過純音修正的察覺音量 (dB)



ICAO 規定，對飛機作噪音鑑定時，採用有效察覺音量做為度量單位，我國亦同。用噪音計測取飛機飛越測點上空整個過程的噪音的 A 聲級或 D 聲級，然後用下列公式計算作有效察覺音量：

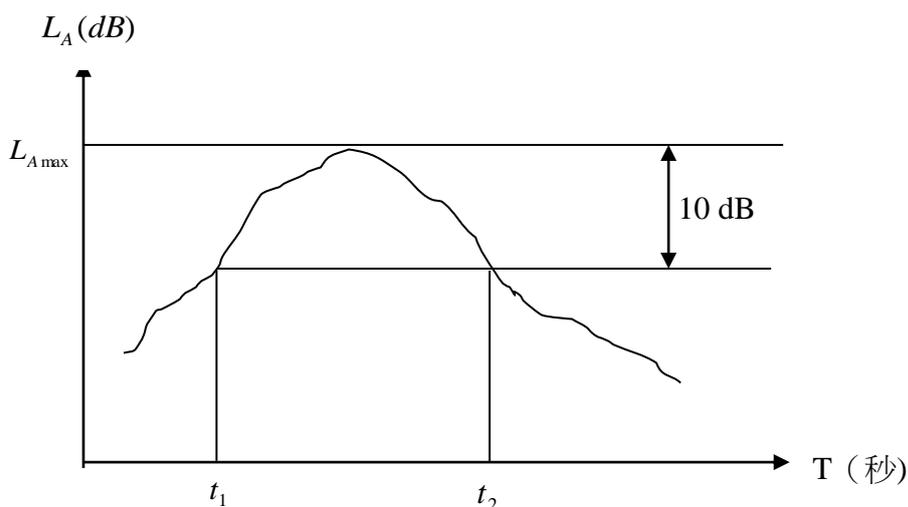
$$L_{EPN} = L_{A \max} + 10 \log \frac{t_2 - t_1}{20} + 13 (dB)$$

$$L_{EPN} = L_{D \max} + 10 \log \frac{t_2 - t_1}{20} + 7 (dB)$$

式中：

$L_{A \max}$ ：A 權最大音量； $L_{D \max}$ ：D 權最大音量；

t_1 、 t_2 ：計算的起、止時間。如圖。



(四)總噪音暴露音量 L_{TNE} (Total Noise Exposure Level, TNEL)

總噪音暴露級 (Total Noise Exposure Level, TNEL) 是表示飛機噪音在統計時間內 (通常為一天) 對人的總衝擊總量，即作用在人體上的總感覺聲級。總噪音暴露音量的運算式為：

$$TNE = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0.1EPNL_i} + 10 \log \frac{T_0}{t_0} (dB)$$

式中：

n ：飛機的飛行架次；

T_0 ：取 10 秒；

t_0 ：取 1 秒；

$EPNL_i$ 表示第 i 架次的有效感覺噪音級。

(五)等效連續察覺音量 L_{ECPN} (Equivalent Continuous Perceived Noise Level, ECPNL) 等效連續察覺音量的表達式為：

$$L_{ECPN} = L_{TNE} - 10 \log \frac{t}{t_0}$$

$$L_{TNE} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{EPNi}} + 10 \log \frac{T_0}{t_0} (dB) = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{EPNi}} + 10$$

式中：

n ：飛機的飛行架次。

T_0 ：取 10 秒。

t ：噪音總暴露時間，單位為秒。

t_0 ：取 1 秒。

等效連續察覺音量，表示航空噪音平均每秒鐘對人的衝擊（察覺音量）。其與加權等價連續察覺音量 L_{WECPN} （Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level）的區別是：前者不考慮航空噪音在日夜不同時間對人體有不同的影響；而後者考慮這種不同的影響。

（六）加權等價連續察覺音量 L_{WECPN} （Weight Equivalent Continuous Perceived Noise Level, WECPNL）

加權等價連續察覺音量用 L_{WECPN} 表示（單位為 dB），國際民航組織早在 1969 年 11 月～12 月召開的有關航空噪音的會議上，建議對來自航空噪音的總噪音暴露使用加權等價連續察覺音量表示，中國大陸在 1988 年頒布的《機場周圍噪音環境標準》（GB 9660-88）及日本在 1973 年頒布的飛航噪音之環境品質標準環保署編號 154 號（1973 年 12 月 27 日，航空機騒音に係る環境基準）亦採用此指標做為評估量，加權等價連續察覺音量的表達方式為：

$$L_{WECPN} = \overline{L_{EPN}} + 10 \log(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 40(\text{dB})$$

式中：

$\overline{L_{EPN}}$ ：N 次飛行的有效察覺音量的平均值。

N_1 ：07：00～19：00 之航空器起降架次。

N_2 ：19：00～22：00 之航空器起降架次。

N_3 ：22：00～07：00 之航空器起降架次。

另外表示方式：

1. 分兩時段：

$$L_{WECPN} = 10 \log \left[\left(\frac{5}{8} \right) 10^{(ECPNL_d/10)} + \left(\frac{3}{8} \right) 10^{(ECPNL_n/10)} \right] + S$$

式中：

$ECPNL_d$ = 日間時段之 ECPNL； $ECPNL_n$ = 夜間時段之 ECPNL；

S = 季節修正因子（夏季 +5 dB，冬季 -5 dB）。

2. 分三時段：

$$L_{WECPN} = 10 \log \left[\left(\frac{4}{8} \right) 10^{(ECPNL_d/10)} + \left(\frac{1}{8} \right) 10^{(ECPNL_e/10)} + \left(\frac{3}{8} \right) 10^{(ECPNL_n/10)} \right] + S$$

式中： $ECPNL_e$ = 傍晚時段之 ECPNL。

民航機場（日本環境品質標準），由於考慮夜間噪音對人的吵雜程度較大，因此夜間之 EPNL 加重 10 分貝，便可求得 WECPNL。

3.簡捷式：

其計算公式為：

$$L_{WECPN} = \overline{L_{Amax}} + 10 \log(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 27$$

式中：

N_1 ：07：00～19：00 之航空器起降架次。

N_2 ：19：00～22：00 之航空器起降架次。

N_3 ：22：00～07：00 之航空器起降架次。

$\overline{L_{Amax}}$ ：為各偵測架次最大 A 權噪音量之平均值。

軍用空軍基地（日本環境品質標準），其計算公式為：

$$L_{WECPN} = \overline{L_{Amax}} + 10 \cdot \log_{10}(N_w) - 27$$

$$\overline{L_{Amax,T}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{Amax}^{(n)} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{T}{20} \right)}{10}} \right)$$

根據

$$L_{EPN} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L_{TPNi}} dt (dB) \right)$$

代入

$$L_{WECPN} = \overline{L_{EPN}} + 10 \log(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 40 (dB) ,$$

並用 $10 \times \log(86400)$ 取代 40，

可得：

$$L_{WECPN} = 10 \log \left[\frac{\left(\int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L_{TPNi}} dt \right) (N_1 + 3N_2 + 10N_3)}{86400} \right]$$

在上式中， $N_1 + 3N_2 + 10N_3$ 是考慮航空噪音在一天日夜有不同影響而經過「加權」後的一天飛行總架次。

$$\left(\int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L_{TPN}} dt \right) (N_1 + 3N_2 + 10N_3)$$

為一天的航空噪音量總值。

86,400 秒為一天時間的秒數，由此可見， L_{WECPN} 的物理概念很明確，它表示航空噪音全天平均每秒鐘對人的衝擊（察覺音量）。

(七)噪音與數目指標 NNI (Noise and Number Index)

NNI 係在英國發展出來的指標，亦用於評估航空噪音，航空噪音事件察覺音量最大值的日平均與起降架次加權之和，再減 80，其計算為：

$$NNI = \overline{L_{PN_{max}}} + 15 \log N - 80$$

$\overline{PNL_{max}}$ ：各飛航架次最大 PNL 值之平均值。(平均尖峰噪音位準：Average Peak Noise Level)，可以由下式求之：

$$\overline{L_{PN_{max}}} = 10 \log \left[(1/N) \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L}{10}} \right]$$

式中：

L_{PN} ：為尖峰噪音位準 (Peak Noise Level)，單位為 PN dB。

n ：為飛機飛過數目 (架次)。

NNI 值可用以評估飛機飛過數目及噪音對機場附近居民及一般社會民眾的影響程度，同時在機場興建前預測或興建後測定，亦可繪製 NNI 的等噪音曲線，以評估航空噪音的影響。倫敦機場採用 NNI 作為控制標準，認為當 NNI 為 20 dB~30 dB 時，感覺有干擾；40 dB 時，感覺很吵；50 dB 時，感覺非常吵；當達到 60 dB 時則感覺無法容忍。

(八)複合噪音指標 CNR (Composite Noise Rating)

複合噪音評估是根據有效感覺噪音級和晝夜的飛行次數來定義的，記為 CNR 。

$$CNR = EPNL + 10 \lg(N_d + 10N_n) - 12$$

式中：

$EPNL$ ：有效感覺噪音級；

N_d 、 N_n 分別是白天和夜間的飛行次數。

用於飛機的複合噪音評估，只考慮飛機的特點，對測得的噪音量進行了二種修正：(1)用 300 Hz~600 Hz 頻帶的「等效噪音量」來代替 CNR 的頻譜噪音，

這樣簡化了計算，它適用於軍用飛機；(2)以「察覺音量」替代 N 聲級，適用於民用機場。

1.空軍基地複合噪音評估：一般在實際評估時，不是對某一點或地區測量，而是對整個機場受噪音污染地區透過測量或由已知的飛機飛行參數的計算，得出噪音量，並在機場區域圖上標繪出 300 Hz~600 Hz 頻帶的等音線，這些等音線の間隔為 5 dB。

2.民用機場的複合噪音評估：由於這種評估考慮了對人的影響，因而航空噪音的評估多採用察覺音量，它對 1/3 八音階的資料分別計算加權後的「察覺音量」。對於不同的飛機飛行噪音，均在機場附近的地圖上描出由最大察覺音量連成的等音線，這些等音線由起飛點至著陸點。對於不同的飛機類型分別作出其等音線以便進行評估。對噪音持續時間的修正是以在每一跑道上每種飛機飛行資料來修正，夜間和日間修正是將夜間噪音加 10 dB。

(九)噪音暴露預報 *NEF*

為了用一個盡可能將各種因素都考慮進去的單一數值評估機場附近的噪音干擾，在 *CNR* 的基礎上，美國空軍部門提出了噪音暴露預測值（Noise Exposure Forecast, *NEF*），用以評估航空噪音暴露預測，某特別種類之飛機 *i*，在飛行路線 *j* 時，其噪音暴露預測值表示為：

$$NEF_{ij} = EPNL_{ij} = 10 \log [n_{D(ij)}/20 + n_{N(ij)}/1.2] - 75$$

式中：

$EPNL_{ij}$ ：第 *i* 種飛機沿 *j* 飛行路線所產生之有效察覺噪音位準。

$n_{D(ij)}$ ：飛機種類 *i* 在飛行路線 *j* 於白天之飛行次數。

$n_{N(ij)}$ ：同上於夜間之飛行次數。

在地面一定位置之總噪音暴露預測值如下式所示：

$$NEF = 10 \log \left[\sum_i \sum_j 10^{0.1NEF_{ij}} \right]$$

一般認為噪音暴露位準大 $NEF = 40$ 通常難為人們所接受，而位準低於 $NEF = 30$ 則可以接受。 NEF 以下簡捷式求之：

$$Nt = Nd + 10 \times \frac{15}{9} \times Nn = Nd + 16.7Nn$$

$$NEF = \overline{L_{PN_{\max}}} + \Delta PN + 10 \log N_t - 88 + F$$

式中：

N_t ：表示飛機起飛及降落次數。

N_d ：表示白天 15 小時之次數。

N_n ：表示夜間 9 小時之次數。

F ：表示純音修正量。

ΔPN 為持續時間修正量。

另外簡捷式為：航空噪音事件察覺音量取最大值的日平均與預測時間的加權起降架次之和，再減 88，其計算式為：

$$NEF = \overline{L_{PN_{\max}}} + 10 \log [(t_2 - t_1) / 20] + F + 10 \log N_t - 88$$

式中： F ：純音校正 0 dB~3 dB

另外表達式為：

$$NEF = \overline{L_{EPN}} + 10 \log (N_d + 16.7 N_n) - 88 (dB)$$

式中：

N_d ：日間（通常為 07 點~22 點）航空器的起降架次。

N_n ：夜間（通常為 22 點~07 點）航空器的起降架次。

上式可以改寫為：

$$NEF = \left[\overline{L_{EPN}} + 10 \log (N_d + 16.7 N_n) - 40 \right] - 48 (dB)$$

又

$$L_{WECPN} = \overline{L_{EPN}} + 10 \log (N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 40 (dB)$$

對比上二式，可得出 NEF 的物理概念與 L_{WECPN} 相似，也是表示航空噪音全天平均每秒鐘對人的衝擊。

但是其值比 L_{WECPN} 相應較低 48 dB，而且噪音日夜不同影響只分兩段時間去考慮，不如 L_{WECPN} 分三段時間考慮的細緻。如果省略噪音日夜不同影響考慮細緻程度的差別，則可以認為： $NEF \approx L_{WECPN} - 48 (dB)$ 。

一般都根據飛機場周圍各個地點的 NEF 計算值繪出等音線，即在同一條線上 NEF 值都相同，這個等音線可用於飛機場附近土地的規劃上。 NEF 值超過 30 就認為對土地使用可能會有影響。國外研究表明， NEF 在 30~40 內，土地的使用隨各建築物的種類而異，一般作為學校建築是不允許的，而作為商業企業建築則不受限制，在 NEF 值大於 40 的區域內的建築物則必須進行隔音措施。這種

方法考慮的因素比較全面，能夠更好地反映人們在實際條件下對飛機噪音的主觀感受，在美國已被廣泛使用。

(十)等干擾指標 N

等干擾指標是以飛機飛越的最大平均察覺音量和對日夜分別加權得到的，它由法國民用航空噪音研究委員會提出，對於日間出現的飛機等干擾指標，其公式為：

$$N_d = \overline{L_{PN\max}} + 10\log N - 30$$

式中：

N_d ：日間的 N 值。

$\overline{PNL_{\max}}$ ：各飛航架次最大 PNL 值之平均值，單位：dB。

N ：日間的飛機飛行次數。

對於夜間飛行的飛機，它比其他評估指標處理要相對複雜，其夜間被分為 2 個時段（22：00～02：00）和（02：00～6：00），並且認為第一段時間裡飛機飛行次數的重要性是第二時段的 3 倍，因而以 $6\log(3N_1 + N_2) - 1$ 代替了上式中的 $10\log N$ ，其公式為：

$$N_n = \overline{L_{PN\max}} + 6\log(3N_1 + N_2) - 31$$

式中：

N_1 ：（22：00～02：00）飛機飛行次數。

N_2 ：（02：00～6：00）飛機飛行次數。

如果 $(3N_1 + N_2) < 64$ ，則計算公式和白天一樣，即 $6\log(3N_1 + N_2)$ 用 $10\log N$ 代替。在 N 值大於 96 區域，禁止建造與機場無關的所有建築物；在 $84 < N < 96$ 區域發展建築物必須受到限制，並須採取隔音措施；在低於 84 區域，則不受限制。

(十一)航空噪音日夜音量 DNL

為了考慮噪音在夜間對人們煩惱的增加，規定在夜間測得的所有聲級均加上 10 dB（A 加權）作為修正值，計算晝夜噪音能量的加權平均，由此構成航空噪音日夜音量這一評估指標 DNL （Day Night Equivalent Sound Level）。其可表示為：

擷取航空噪音事件的均能音量，加上持續時間占全日總秒數的對數值，夜間時段事件均能音量須加權 10 分貝，其公式為：

$$DNL = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{86400} \left(\int_{0000}^{0700} 10^{[L_A(t)+10]/10} dt + \int_{0700}^{2200} 10^{[L_A(t)]/10} dt + \int_{2200}^{2400} 10^{[L_A(t)+10]/10} dt \right) \right]$$

式中：

$L_{A(t)}$ = 航空噪音事件持續時間內之均能音量。

(十二) 社區噪音均能音量 (Community Noise Equivalent Level, CNEL)

日間、晚、夜間航空噪音事件加權的均能音量，除了在 10 PM~7 AM 之實測音量各加上 10 dB(A) 外，另在 7 PM~10 PM (傍晚) 亦各加上 5 dB(A)。CNEL 是對一天 24 小時取 A 加權的平均噪音，其中對日、晚及夜間取不同的加權係數，為美國加州慣用之噪音指標之一，後來也用作城市噪音評估，其公式為：

$$CNEL = 10 \log \frac{1}{24} \left\{ (12 \times 10^{0.1L_d}) + [3 \times 10^{0.1(L_e+5)}] + [9 \times 10^{0.1(L_n+10)}] \right\}$$

式中：

L_d ：日間起降噪音事件均能音量 (07:00~19:00)。

L_e ：晚上起降噪音事件均能音量 (19:00~22:00)。

L_n ：夜間起降噪音事件均能音量 (22:00~07:00)。

CNEL 係美國加州採用的一種指標，以 dB 表示，並可由下式求出：

$$CNEL = \overline{L_{SE}} + 10 \log Nt - 49.4$$

式中：

$\overline{L_{SE}}$ ：單架飛機之聲音曝露位準之平均值，dB。係噪音曝露位準 (Sound Exposure Level) 之平均值，SEL 為單發事件之間歇性噪音值換算成一秒內之累積能量值。

N_t ：航次數， $N_t = N_d + 10N_n$ 。

N_d ：日間航次。

N_n ：夜間航次。

各項飛航環境噪音指標之制訂，各有其特殊的考慮因素，表 5.3-1 即說明 CNR、NEF 與 CNEL 在制訂時，所考慮之各項因素，應用時應特別注意。

一般 CNEL 用於評估機場附近地區噪音衝擊和在土地使用規劃中的噪音預估，它和前面介紹的日夜音量 (L_{dn}) 有類似之處，只是更為複雜一些。

表 5.3-1 航空噪音對社區影響之指標制訂與考慮因素

考慮因素	複合噪音評量 (CNR)	噪音暴露預測值 (NEF)	等價社區 噪音位準 (CNEL)
1.單一事件噪音量之基本測度	最大察覺音量	純音矯正 察覺音量	A 權音量
2.個別單發事件持續時間之測量	無	能量積分	能量積分
3.時間區段	白天 (7am~10pm) 夜間 (10pm~7am)		白天 (7am~7pm) 傍晚 (7pm~10pm) 夜間 (10pm~7am)
4.在不同時間區段之加權法則	白天 0 dB 夜間 10 dB		白天 0 dB 傍晚 5 dB 夜間 10 dB
5.時間區段內相同事件數目 (N)	10logN		10logN
6.影響之綜合	對數		對數

資料來源：噪音管制手冊，施鴻志、莊進源等，1987。

(十三)煩擾度指數 \bar{Q}

煩擾度指數 \bar{Q} 比均能量音量 L_{eq} 更具有普遍意義的評估指標，是為適合各種不同噪音環境的評估而提出的，其公式為：

$$\bar{Q} = \frac{1}{\alpha} \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\alpha \times L(t)} dt \right)$$

或

$$\bar{Q} = \frac{1}{\alpha} \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{\alpha \times L_i} \tau_i \right)$$

式中：

\bar{Q} ：煩擾度指數，dB。

T ：觀察的持續時間，秒 (sec)。

τ_i ：第 i 個音量間隔中的時段，秒 (sec)。

L_i ：第 i 個音量時段的 L_{eq} 或 L_{EPN} ，dB。

$L(t)$ ：時間 t 的瞬間音量，dB。

α ：任意常數，隨不同情況而定。

選擇不同的 α 值可以用於估算不同噪音特性的主觀影響，當 $\alpha = 1/10$ 時，則 \bar{Q} 變為 L_{eq} ；當 $\alpha = 1/13.3$ 時，則得到的 \bar{Q} 值，在德國主要用於表述航空噪音干擾強度特性的評估上；在奧地利用於評估沿街住宅、學校和辦公樓對交通噪音的適應性。

1. 德國

德國在 $\alpha = 1/13.3$ 基礎上，將 \bar{Q} 值用於評估飛航噪音和飛機場周圍土地使用，其公式為：

$$\bar{Q} = 13.3 \log(10^{\frac{\bar{L}_{PN}}{13.3}}) + 13.3 \log N - 47$$

式中：

\bar{Q} ：煩擾度指數，dB。

\bar{L}_{PN} ：噪音平均值，dB。

N ：飛機飛行次數。

它適應居民的環境值：

I 區： $\bar{Q} > 82$ ，不適用建造居民住建築。

II 區： $77 < \bar{Q} < 82$ ，僅供急用的居住建築（即機場專用），要求要有有效的防音措施。

III 區： $72 < \bar{Q} < 77$ ，不適宜興建住宅區，如已有住宅，必須有防音措施。

IV 區： $\bar{Q} < 72$ ，不作限制，但與 72 接近地區不宜興建醫院和學校等。

2. 奧地利

在奧地利使用於沿街住宅的道路噪音指標，其公式為：

$$\bar{Q} = 13.3 \log \left(\frac{1}{100} \sum 10^{\frac{L_{Ai}}{13.3}} \times f_i \right)$$

式中：

L_A ：A 加權噪音量，dB。

f_i ：相對應的等時間間隔數占總觀察時間的百分數。

沿街道住宅的道路交通音量 \bar{Q} 限制為：

$\bar{Q} \leq 40$: 100%無干擾。

$40 \leq \bar{Q} \leq 45$: 50%無干擾。

$45 \leq \bar{Q} \leq 55$: 中等程度干擾。

$\bar{Q} > 55$: 50%以上有強烈干擾。

(十四)總噪音載荷 B

荷蘭提出了總噪音載荷，用做飛機噪音對機場周圍地區群眾反應的評估指標，定義如下：

$$B = 20 \lg \left[\sum_{i=1}^n W_i 10^{\frac{L_i}{15}} \right] - C$$

式中：

L_i : 第 i 個單次噪音事件的最大 A 加權噪音；

W_i : 第 i 個噪音事件出現時間的加權係數，如表 5.3-2 所示；

n : 噪音事件數；

C : 常數，對一天的測量取 106，一年取 157。

表 5.3-2 總噪音載荷計算加權係數

時間/h	加權係數/W	時間/h	加權係數/W
00 : 00 ~ 06 : 00	10	19 : 00 ~ 20 : 00	3
06 : 00 ~ 07 : 00	8	20 : 00 ~ 21 : 00	4
07 : 00 ~ 08 : 00	4	21 : 00 ~ 22 : 00	6
08 : 00 ~ 18 : 00	1	22 : 00 ~ 23 : 00	8
18 : 00 ~ 19 : 00	2	23 : 00 ~ 24 : 00	10

(十五)平均噪音指標 \overline{NI}

噪度指標 \overline{NI} : 對 24h 內經純音修正的 A 加權噪音進行能量平均所求得的噪音級。表示為：

$$\overline{NI} = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_i + 10 \lg(\frac{t}{t_0}) + S + C)} \right]$$

式中：

L_i : 1/3 八音階資料進行純音修正的 A 加權噪音；

$$t : \text{有效持續時間} \quad t = \frac{1}{10^{0.1L_{\max}}} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0.1L(t)} dt \quad \text{或} \quad t = \frac{\sum_{n=1}^n 10^{0.1L_{t_i}} \Delta t}{10^{0.1L_{\max}}} ;$$

n : 取樣數 ;

t_0 : 全部觀察時間 ;

C : 一天中不同時間建議修正值 , 見表 5.3-3 ;

S : 季節修正量。

表 5.3-3 平均噪音指標中 C 的修正值

時間/h		C
時間分兩段	07 : 00 ~ 22 : 00	0
	22 : 00 ~ 07 : 00	10
時間分三段	07 : 00 ~ 19 : 00	0
	19 : 00 ~ 22 : 00	5
	22 : 00 ~ 07 : 00	10

有關國內外機場所採用之噪音指標及限值 , 詳如表 5.3-4 所示。

表 5.3-4 國內外機場的噪音指標及限值標準

國家	噪音指標	標準值/dB	管制區規定
澳大利亞	ANEF	< 20	無限制
		20 ~ 25	新住宅有隔音設施
		> 25	不允許蓋新住宅
加拿大	NEF	≤ 25	無限制
		28 ~ 30	新住宅有隔音設施
		> 35	不允許蓋新住宅
丹麥	L_{den}	≤ 55	無限制
		> 55	不允許蓋新住宅
		> 65	在哥本哈根機場住宅可採用隔音設施
法國	N	< 84	無限制
		84 ~ 89	現有住宅隔音設施
德國	$L_{Aeq(4)}$	< 62	無限制
		67 ~ 75	新住宅有隔音設施
		> 75	不允許新蓋住宅 , 現有住宅隔音設施
英國	$L_{Aeq,15h}$	≤ 57	無限制
		57 ~ 66	新住宅隔音設施
		66 ~ 72	反對蓋新住宅
		> 72	不准蓋新住宅
日本	WECPNL	< 70	無限制
		> 85	隔音設施

國家	噪音指標	標準值dB	管制區規定
荷蘭	B	≤35 >35 >40 40~50	無限制 不准建新居民區 不准蓋新住宅 現有住宅隔音設施
紐西蘭	DNL	≤55 55~65 >65	無限制 新住宅隔音設施 不准建新居民區
挪威	EFN	≤60 >60 60~70	無限制 不准建新居民區 隔音設施
瑞典	L _{den}	<55	無限制
瑞士	NNI	>45 45~55	不准建新居民區 隔音牆
美國	DNL	≤65 65~70 70~75 >75	無限制 不主張蓋新住宅 不主張新開發 不准新開發
德國	\bar{Q}	<72 72~77 77~82 >82	無限制 不建議蓋住宅，如建，需做噪音控制 僅供機場急用的居住建築，需做噪音控制 不准建居住區
台灣	DNL	60 ≤ DNL < 65 65 ≤ DNL < 75 75 ≤ DNL	第一級航空噪音防制區 第二級航空噪音防制區 第三級航空噪音防制區

資料來源：本計畫整理。

5.4 航空噪音防制及管制作法

5.4.1 與天氣有關的噪音影響

噪音本質上是一種聲波，其分布在離音源的各個方向上。通常，隨著音源和受音點之間的距離增加，受音處之噪音量降低。然而，聲波傳播的方向可能因天氣條件而改變，這可能導致在不同時間在相同位置的噪音量發生變化。例如：若處於下午雷暴期間，雲層傾向於將聲波向下彎曲到地面，這可以增加受音點聽到的音量。當較暖的空氣層位於較冷的空氣層上方而發生的逆溫（Temperature Inversion），對噪音的影響與雲覆蓋情況相同，如圖 5.4-1 所示。這些類型的天氣條件減緩了大氣對聲波的吸收，並可能導致噴氣式飛機之噪音更大聲^[16]。

風向是另一個通常導致聲波沿其流動方向彎曲的因素。例如：台灣地區之盛行風一般來自東北風或西南風，而飛機起飛和降落係逆風狀況，故依盛行風向之不同，飛行路徑兩側的居民可能會聽到噪音量的變化^[16]。

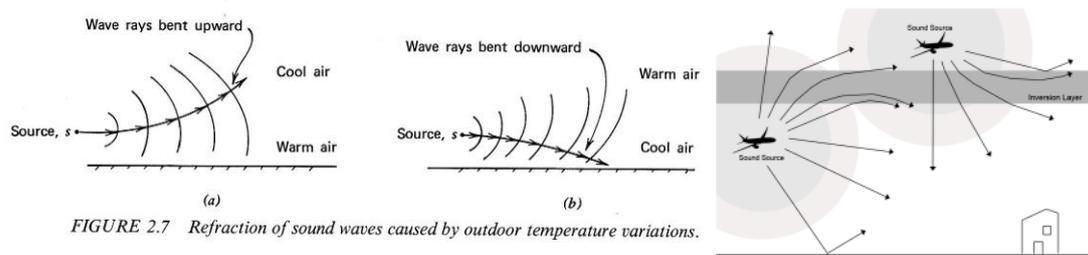


FIGURE 2.7 Refraction of sound waves caused by outdoor temperature variations.

圖 5.4-1 溫層逆轉將折射聲波並將它們分布成圓柱形^{[17][18]}

茲將航空器在不同天候狀況其噪音特性及影響說明如下^[19]。可影響聲音傳播的天氣（或大氣）條件包括：濕度、降水、溫度、風和紊流。風-紊流的影響通常比其他因素的影響更重要。在平靜風條件下，溫度（特別是垂直“梯度”）的重要性可能會增加，有時甚至會達到非常顯著的程度。相對於其他影響條件，濕度通常僅有微小的影響，即對於音量的變化沒有多大意義。

一、濕度和降水的影響

濕度和降水很少以顯著的方式影響聲音傳播。在平靜風條件下，濕度可以減少高頻噪音的傳播。在非常寒冷的條件下，民眾經常觀察到飛機聽起來“微不足道（Tinny）”，因為乾燥的空氣增加了高頻聲音的傳播。雨、雪和霧也幾乎沒有對聲音傳播有任何明顯的影響。已有大量的經驗數據支持這些結論^[20]。

二、溫度的影響

大氣中的聲速取決於空氣溫度^[21]，因此，如果溫度在地面以上的不同高度變化，聲音將以曲線路徑而不是直線傳播。在白天，溫度通常隨著高度的增加而降低。在這種“氣溫遞減（Temperature Lapse）”條件下，大氣向上折射（彎曲）聲波，並且在距離噪音源一定距離處可能存在聲學陰影區。

在某些天氣條件下，較高層的溫暖空氣可能會捕獲（Trap）較低層的冷空氣，這種“氣溫逆溫（Temperature Inversion）”最常見於傍晚、夜間和清晨。此時地面吸收的熱量輻射到大氣中^[22]，逆溫的影響恰好與氣溫遞減條件相反，它使聲音通過大氣傳播向下折射。由逆溫引起的向下折射通常導致具有原先向上傾斜傳播路徑的聲線繞過障礙物和地面影響，從而增加更遠距離處的噪音量。在極端條件下，一項研究發現逆溫時，地面飛機的噪音可能被放大 15 dB 至為 20 dB。在一項類似的研究中，飛機在地面上造成的噪音於距離飛機 1.8 英里外的受音點位置，比僅距離 0.2 英里的位置具有更高的噪音量^[23]。

三、風的影響

風具有強大的方向性成分，可導致傳播的顯著變化。通常，在噪音源的順風處的受音點將有較高的音量，而在逆風處的受音點將有較低的音量。垂直於噪音源到受音點路徑的風則沒有顯著影響。

由風向和溫度梯度引起的折射是附加的^[24]。一項研究表明，對於大於 500 Hz 的聲音頻率，這兩個因素的綜合影響傾向於兩個極值：在向下折射（氣溫逆溫或順風傳播）條件下約為 0 dB；向上折射條件下約-20 dB（氣溫遞減或逆風傳播）。在較低的聲音頻率下，由風和溫度梯度引起的折射效應不太明顯^[25]。風紊流（或“陣風”）也會影響聲音傳播。在遠處受音點位置聽到的音量會隨著陣風而波動。此外，由於隨風的漩渦之影響，陣風會導致聲音相當大的衰減。

5.4.2 管制措施

航道下航空噪音主要從噪音源、傳播途徑來進行防制，下面將從降低噪音源、最佳化飛機和機場的操作、機場周圍噪音的防制、經濟獎懲措施和噪音知識宣傳措施進行詳細說明，並介紹全球機場採用的防制措施的統計調查結果。

一、降低噪音源

(一) 逐步淘汰舊式高噪音飛機

ICAO 規範著全世界的民航，設立包括噪音在內的全面規範。ICAO 設立噪音標準並逐步淘汰舊式高噪音飛機，這種方法將會驅使製造商提高生產水準，放棄維修不滿足新標準的飛機。

(二) 緩解頻繁起降的壓力

對於營運量的快速增長，應考慮機場和機場周圍環境的承受能力，加以控制和最佳化，如興建第二個機場以緩解頻繁起降的壓力。

二、最佳化操作

(一) 最佳化航道

避開噪音敏感區域，如密集的居民區等。除起飛、降落或者依法規定的情形以外，民用航空器不得飛越城市市區上空。

(二) 最佳化飛機起飛降落路線

為飛機的起飛降落制定噪音最佳化路線，對不同的機場制定噪音消減程序，其主要有以下幾種方法：

1.控制跑道使用，交替使用各條跑道起降飛機，避免集中干擾一個地區。現代飛機對起降時的側向風不是特別敏感，這就意味著；如果跑道選擇可以降低噪音對居民的干擾，可以適當降低風向選擇方面的要求。洛杉磯機場有兩條主要跑道，重型飛機通常集中使用一條跑道，起飛主要是向西面海的方向。

2.在起飛後和著陸前飛機進行轉彎，避開居民密集區。

3.使用多級進近飛行，盡可能地晚一些降低高度。

4.起飛後快速爬升高度。

5.隔離機場飛機維修實驗場。

6.不允許噪音超過音量標準的飛機起降。

一般認為，起飛時飛機噪音影響比著陸時要大，因此，起飛之消音飛行程序受到更廣泛的關注。目前北京首都國際機場有執行起飛消音程序，所採用的消音程序是國際民航組織於 1982 年制訂的起飛消音程序 A，用於減低起飛後半程的噪音影響。國際民航組織於 1996 年底對起飛消音程序進行了修訂，提出兩種方案，分別用於減輕跑道末端和跑道延伸方向的噪音影響。用於減輕跑道末端噪音影響的起飛消音程序為：

1.飛機離地並爬升至 240 米以上。

2.減油門，但至少要保持有在一台發動機不工作情況下的最後起飛爬升梯度。

3.按規定收襟翼或縫翼。

4.高於機場地面 900 米後，增速至航路爬升速度，過渡到正常航路爬升程序。

用於減輕跑道方向一定距離處噪音影響的起飛消音程序與上述程序類似，只是交換一下第 2 步和第 3 步的次序，具體為：

1.飛機離地並爬升至 240 米以上。

2.開始收襟翼或縫翼。

3.減油門，但至少要保持有在一台發動機不工作情況下的最後起飛爬升梯度。

4.高於機場地面 900 米後，增速至航路爬升速度，過渡到正常航路爬升程序。

以上兩種起飛消音程序是專家們三年努力的成果，這些專具有廣泛的代表性，分別代表飛機製造商、航空公司、駕駛員、機場當局和締約國，起飛消音程序設計中分別考慮了安全、飛行、工作量等因素和消音效果。這兩種起飛程序，可在襟翼、推力和速度管理等操作最少的情況下，達到最佳消音效果。另外，它們富有靈活性，機場當局可以根據具體情況確定高度邊界值，最有效地降低噪音影響。在減油門時，如果飛機裝有自動推力恢復系統並工作，則不需駕駛員干預，飛機仍可自動保持一定爬升梯度，不低於在有一台發動機不工作情況下的最後起飛爬升梯度。

消音程序透過使用收襟翼和減油門等手段將噪音從一個地方移到另一個地方，從而可以有效地避開居民聚集區，但如果機場周圍的居民分布比較均勻的話，使用起飛消音程序就沒太大意義了。在這方面往往需要認真權衡的一個問題是：是使少數人忍受大量噪音影響，還是使多數人忍受少量噪音影響。很明顯，這是一項政策性決定。

(三)不鼓勵飛行員在夜間使用反推力

(四)限制輔助動力（APU）單元使用

儘量減少 APU 的使用，最大允許時間為 30 分鐘。APU 的使用被認定為引擎發動，應受機場宵禁令的管制。

(五)夜間起飛宵禁令

世界上許多機場（比如蘇黎世和雪梨）實行夜間宵禁制度，但在具體做法上卻有很大差別。有些機場，完全禁止飛機起降，跑道關閉；而另一些機場，則允許噪音低的螺旋槳飛機起降。阿姆斯特丹、倫敦、法蘭克福和香港的機場對一些符合噪音標準的飛機（包括寬體飛機）給予例外，而實行宵禁最嚴格的當數雪梨機場，有 7 個小時的時間不允許任何噴氣飛機活動。

宵禁是降低夜間干擾的有效手段，但宵禁有一定的副作用，比如造成高峰時間過度擁擠，飛機在地面停留時間太長，由於航空貨運選用其他機場而使機場收入減少，由於時差關係而使遠端航班起飛時刻安排困難（比如從歐洲飛中國大陸的航班）等，這在不允許延誤飛機降落的機場表現得尤為突出。

三、機場周圍噪音的防制

(一)劃定並定期修正航空噪音管制區

對機場周圍地區航空噪音管制區內居民提供防音設施補助，定期檢查居民的身體健康和聽力健康。

(二)飛機場與居民區之間建立隔音牆

我國民航局頒布的機場周圍地區航空噪音防制相關補助原則規定，航空噪音區內受補助設置的緩衝綠帶，包括：道路綠化、帶狀植被，其綠覆率須達 80% 以上，其中年生喬木須達 40% 以上。

(三)對噪音敏感的建築設施搬移至更安靜的區域

對於機場周邊居民提供補償遷移，美日等國均有相關措施收購及補助遷移。

(四)搬遷機場至對居民區影響較小的地方

根據對未來機場規模的預測，規劃機場周圍、航道下的城市建設，如有必要，搬遷機場至對居民區影響較小的地方。香港國際機場於 1998 年遷往赤鱗角後，市區的飛機噪音滋擾已大幅減低。以往，啟德機場附近儘是稠密的住宅區，飛機升降的隆隆巨響令 38 萬居民苦不堪言；相比之下，現時僅有約 200 位市民受到赤鱗角機場的噪音影響。

四、經濟獎懲措施

設置航空噪音監測網，定期對航空噪音進行監控。記錄飛機噪音和飛行路線，執行政府對夜間飛行的配額。處理公眾的詢問和投訴，對違反噪音管制的飛機進行嚴厲處罰和記錄，多次違反將禁止使用因應的機場，處罰的款項將用於機場周圍受噪音影響的居民區的補償。

對較安靜的飛機，降低機場使用費表示鼓勵；對於舊式高噪音的飛機，則需要支付更多的機場使用費。

我國航空交通主管機關交通部自民國 85 年開始，於民用航空法中明文規定，徵收航空噪音防制費作為補助機場周圍地區的住戶、學校等航空噪音防制設施的建設，並從降落費中提撥費用回饋機場附近住戶。補助的地理範圍，需依據地方縣市政府所公告的航空噪音防制區。

五、噪音知識宣傳措施

公眾越來越注重生活品質，希望降低對日常生活的打擾。公眾的環保意識日益增強，從而對飛機噪音更加敏感。向公眾普及噪音的相關知識，讓大家認

識到噪音的危害性，瞭解噪音管制與防制措施，提高社會監督，進一步促進噪音問題的預防、發現及解決。

六、綜述

目前各國使用的防制策略與收費方式均不相同，主要可分為 14 類，包括噪音消減程序 (Noise Abatement Procedures)、機場宵禁 (Airport Curfew)、跑道優先使用限值 (Preferential Runways)、營運量配額限制 (Operating Quota)、引擎運轉限制 (Engine Run-Up Restrictions)、航機供電設備營運限制 (APU Operating Restrictions)、噪音量限制 (Noise Budget Restrictions)、噪音費徵收 (Noise Surcharge)、噪音監控系統 (Noise Monitoring System)、機型噪音量限制 (Noise Level Limits)、噪音調和計畫 (Noise Compatibility Program)、第二階段機型限制 (Stage2 Restrictions)、第二階段淘汰計畫 (Stage2 Phase-Out) 以及第三階段機型限制 (Stage3 Restrictions)。表 5.4-1 顯示各防制措施於世界 595 個國際機場採用的次數，14 項防制措施中以「噪音收費」屬經濟防制制度，其餘措施均屬直接防制制度，由表 5.4-1 可印證前述直接防制為機場目前最常用的方法，其中以噪音消減程序列第一，而以直接營運配額限制最不普遍。各國所使用的 14 項防制策略中，較常採用的前 5 項，為噪音消減程序、跑道優先使用限制、引擎運轉限制、機場宵禁及噪音監控系統。

表 5.4-1 世界 595 個國際機場之噪音管制措施採用的次數

編號	噪音管制措施	採用次數
1	噪音消減程序	375
2	跑道優先使用限制	330
3	引擎運轉限制	331
4	機場宵禁	218
5	噪音監控系統	168
6	噪音調和計畫	113
7	噪音費徵收	113
8	Stage2淘汰計畫	105
9	機型噪音量限制	83
10	航機供電設備營運限制	70
11	Stage2機型限制	42
12	噪音量限制	42
13	Stage3機型限制	35
14	營運量配額限制	12

國際相關組織在民航環保所注重之課題不外乎包括：飛機噪音、機場空氣品質與溫室氣體的減量三大面向，其中各組織於噪音之措施比較詳如表 5.4-2 所示。

表 5.4-2 各國際組織之航空噪音政策與措施比較

組織	噪音措施
ICAO(國際民用航空組織，International Civil Aviation Organization)	- 由發生源減少噪音； - 土地使用規劃與管理； - 降低噪音之飛機操作程序； - 營運限制； - 噪音費（市場措施）。
APEC(亞洲太平洋經濟合作會議，Asia-Pacific Economic Cooperation)	遵循ICAO規範
EC(歐盟執委會，European Commission)	遵循ICAO規範之外，另 - 統一歐盟各國噪音指標之等噪音線圖。
IATA(國際航空運輸協會，International Air Transport Association)	遵循ICAO規範。
ACI(國際機場協會，Airports Council International)	遵循ICAO規範之外，另 - 考量噪音之降落費機制，ACI噪音評比指標； - 機場施行EMS。

資料來源：本計畫整理。

台灣由於地狹人稠，機場鄰近都會地區，為減少機場噪音影響，我國有關航空噪音方面，包括：各機場航空噪音監測、管制、回饋工作及機場周圍地區航空噪音改善…等工作。目前分工方面，環保機關負責航空噪音管制策略、管制標準、監測及劃定航空噪音防制區；航空主管機關（CAA）負責航空噪音補助、要求汰換超過噪音管制標準的航空器、調整航空器起降時間、操作程序、限制試車或訓練飛行時間、降低噪音之飛機操作程序、營運限制以及徵收噪音費。

我國機場目前之噪音管制措施，包括：飛機噪音認證標準、飛機噪音限制、飛機操作噪音管制、市場措施、機場周邊土地使用規劃、機場布設型式改善與噪音監控系統，詳如表 5.4-3 所示。

表 5.4-3 我國機場目前之航空噪音管制措施

類別	措施
飛機噪音認證標準	依循 ICAO 民航環保規範，針對噴射機、螺旋槳飛機與直昇機之認證標準
飛機操作噪音管制	- 採用噪音減量飛航操作程序； - 噪音減量環保航線； - 機場宵禁； - 飛機輔助動力系統使用限制； - 引擎測試與熱車限制。
市場措施	針對航機起降徵收噪音防制費，以作為各機場噪音防制工作之經費來源

類別	措施
機場周邊土地使用規劃	1. 航空噪音防制區分級標準 機場周圍地區依其受航空噪音影響程度，分為三個等級之航空噪音防制區： - 第一級航空噪音防制區：DNL 60 dB(A)~65 dB(A)間區域； - 第二級航空噪音防制區：DNL 65 dB(A)~75 dB(A)間區域； - 第三級航空噪音防制區：DNL 75 dB(A)以上區域。 2. 航空噪音防制區土地規劃原則 地方政府應依下列原則，檢討及規劃各級航空噪音防制區內之既有土地使用及開發計畫： - 第一級航空噪音防制區：應檢討現有土地使用及開發計畫； - 第二級航空噪音防制區：不得新建學校、圖書館及醫療機構； - 第三級航空噪音防制區：不得新建學校、圖書館、醫療機構及不得劃定為住宅區。
機場布設型式改善	- 重新規劃試車區域； - 機場周圍保留綠地； - 建造隔音牆。
噪音監控系統	依據噪音管制法第 16 條第 1 項，經中央主管機關公告之航空站，應設置自動監測設備，連續監測其所在機場周圍地區飛航噪音狀況。前項監測結果，應作成紀錄，並依規定向當地主管機關申報。

資料來源：本計畫整理。

在航空噪音相關管制法令方面，須檢視「民用航空器噪音管制標準」、「機場周圍地區航空噪音防制辦法」及「應設置自動監測設備連續監測機場周圍地區飛航噪音狀況之航空站」噪音法規並加以更新。

航空噪音監測與劃定航空噪音防制區方面，環保機關負責設置航空噪音監測網，且機場依規定按季申報監測資料。機場周圍地區航空噪音防制區周圍土地相容性使用策略，由航空主管機關（CAA）依民用航空法第 37 條規定辦理建築物設置防音設施。

5.4.3 各機場航空噪音超過噪音標準的罰則與實際執行作法

整理國外各機場航空噪音超過標準之罰則、實際執行作法與各部會間實際執行運作供參考。就所蒐集之資料而言，目前國際間對於航空器噪音超過標準有相關罰則以「美國機場及英國機場」為主，而噪音管制標準及噪音費罰則幾乎各不相同，即各個機場有其自己之作法，詳如表 5.4-4 所示。

表 5.4-4 國外各機場航空噪音超過標準之罰則與實際執行作法一覽表

項次	國家	城市	機場名稱	噪音值單位	噪音管制標準	噪音費罰則																																								
1	美國	New York	John F Kennedy Intl.	PN dB (perceived noise level in decibels)	在靠近社區之「起飛」跑道的航空器飛行路徑下的噪音量監測，起飛的航空器不得超過 112 PNdB。	每架航空器起飛違反此規則，航空公司須支付 250 美金。																																								
2	美國	New York	LaGuardia	PN dB (perceived noise level in decibels)	在靠近社區之「起飛」跑道的航空器飛行路徑下的噪音量監測，起飛的航空器不得超過 112 PNdB。	每架航空器起飛違反此規則，航空公司須支付 250 美金。																																								
3	美國	Newark	Newark Liberty Intl	PN dB (perceived noise level in decibels)	在靠近社區之「起飛」跑道的航空器飛行路徑下的噪音量監測，起飛的航空器不得超過 112 PNdB。	每架航空器起飛違反此規則，航空公司須支付 250 美金。																																								
4	美國	Boston	General Edward Lawrence Logan Intl	dB(A)	為了減少在居住區以北的噪音影響，對跑道 4L「起飛」之限值為 73 dB(A)；跑道 22R「降落」之限值為 78 dB(A)。	違反上述規定的處罰為每件罰款 50 美金至 500 美金不等。																																								
5	美國	Santa Ana	John Wayne	db SENEL(Single Event Noise Exposure Level)	<p>1.商用限值(Commercial Airlines Noise Limits)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="8">Monitor Number</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1S</th> <th>2S</th> <th>3S</th> <th>4S</th> <th>5S</th> <th>6S</th> <th>7S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CLASS A</td> <td>101.8</td> <td>101.1</td> <td>100.7</td> <td>94.1</td> <td>94.6</td> <td>96.1</td> <td>93.0</td> </tr> <tr> <td>CLASS E</td> <td>93.5</td> <td>93.0</td> <td>89.7</td> <td>86.0</td> <td>86.6</td> <td>86.6</td> <td>86.0</td> </tr> </tbody> </table> <p>2.通用限值(General Aviation Noise Limits)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">日間*</th> <th colspan="2">夜間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>NMS 1S</td> <td>101.8 dB</td> <td>NMS 1S</td> <td>86.8 dB</td> </tr> </tbody> </table>	Monitor Number									1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	CLASS A	101.8	101.1	100.7	94.1	94.6	96.1	93.0	CLASS E	93.5	93.0	89.7	86.0	86.6	86.6	86.0	日間*		夜間		NMS 1S	101.8 dB	NMS 1S	86.8 dB	<p>1.商用限值</p> <p>(1)取消該類航空器的資格。</p> <p>(2)罰款高達 500 美金。</p> <p>(3)取消航空承運的資格。</p> <p>2.通用限值</p> <p>於任一個或多個監測站超過標準，「違規通知」將會給航空器的註冊者。該「違規通知」適用於航空器擁有者、航空公司和航空器。「違規通知」從違反日期之後 3 年內有效。如果 3 年期間內有 3 個違反通用的噪音條例發生，航空器擁有者、航空公司以及航空器，</p>
Monitor Number																																														
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S																																							
CLASS A	101.8	101.1	100.7	94.1	94.6	96.1	93.0																																							
CLASS E	93.5	93.0	89.7	86.0	86.6	86.6	86.0																																							
日間*		夜間																																												
NMS 1S	101.8 dB	NMS 1S	86.8 dB																																											

項次	國家	城市	機場名稱	噪音值單位	噪音管制標準	噪音費罰則																												
					<table border="1"> <tr> <td>NMS 2S</td> <td>101.1 dB</td> <td>NMS 2S</td> <td>86.9 dB</td> </tr> <tr> <td>NMS 3S</td> <td>100.7 dB</td> <td>All Others</td> <td>86.0 dB</td> </tr> <tr> <td colspan="4">適用於通用飛航操作</td> </tr> <tr> <td>*日間(當地時間):</td> <td>起飛(離場)</td> <td colspan="2">降落(進場)</td> </tr> <tr> <td>星期一至星期六</td> <td>0700 to 2200</td> <td colspan="2">0700 to 2300</td> </tr> <tr> <td>星期日</td> <td>0800 to 2200</td> <td colspan="2">0800 to 2300</td> </tr> <tr> <td colspan="4">其他時間皆視為夜間時段。時間係由每個監測站的時間而定。</td> </tr> </table>	NMS 2S	101.1 dB	NMS 2S	86.9 dB	NMS 3S	100.7 dB	All Others	86.0 dB	適用於通用飛航操作				*日間(當地時間):	起飛(離場)	降落(進場)		星期一至星期六	0700 to 2200	0700 to 2300		星期日	0800 to 2200	0800 to 2300		其他時間皆視為夜間時段。時間係由每個監測站的時間而定。				會受到機場為期 3 年的使用拒絕。
NMS 2S	101.1 dB	NMS 2S	86.9 dB																															
NMS 3S	100.7 dB	All Others	86.0 dB																															
適用於通用飛航操作																																		
*日間(當地時間):	起飛(離場)	降落(進場)																																
星期一至星期六	0700 to 2200	0700 to 2300																																
星期日	0800 to 2200	0800 to 2300																																
其他時間皆視為夜間時段。時間係由每個監測站的時間而定。																																		
6	美國	South Lake Tahoe	Lake Tahoe Airport	dB(A)	<table border="1"> <tr> <td>夜間 (20:00~08:00)</td> <td colspan="3">77.1 dB(A) (進場及離場)</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">日間 (08:00~20:00)</td> <td>84 dB(A)</td> <td colspan="2">進場</td> </tr> <tr> <td>80dB(A)</td> <td colspan="2">離場</td> </tr> <tr> <td>86 dB(A)</td> <td colspan="2">進場：運輸超過 60 個座位</td> </tr> <tr> <td colspan="4">註：每個航班到達及離開均執行噪音監測。</td> </tr> </table>	夜間 (20:00~08:00)	77.1 dB(A) (進場及離場)			日間 (08:00~20:00)	84 dB(A)	進場		80dB(A)	離場		86 dB(A)	進場：運輸超過 60 個座位		註：每個航班到達及離開均執行噪音監測。				<p>1.商用航空器 如果超出 AC36-3H 的噪音限制，就被要求須在機場做噪音測試(操作都是基於季平均值)。</p> <p>2.私人航空器單一事件監測 第一次違反罰款 1,000 美金或禁令(如果做噪音測試可免除)。第二次違反罰款 5,000 美金或禁令。隨後的每次違反罰款 2,500 美金或禁令。</p>										
夜間 (20:00~08:00)	77.1 dB(A) (進場及離場)																																	
日間 (08:00~20:00)	84 dB(A)	進場																																
	80dB(A)	離場																																
	86 dB(A)	進場：運輸超過 60 個座位																																
註：每個航班到達及離開均執行噪音監測。																																		
7	美國	San Diego	Montgomery Field	dB(A)	<table border="1"> <tr> <td>06:30~23:30</td> <td>最大噪音值 88 dB(A)或 SENEL 值 94 dB(A)</td> </tr> <tr> <td>23:30~06:30</td> <td>最大噪音值 70 dB(A)或 SENEL 值 76 dB(A)</td> </tr> </table>	06:30~23:30	最大噪音值 88 dB(A)或 SENEL 值 94 dB(A)	23:30~06:30	最大噪音值 70 dB(A)或 SENEL 值 76 dB(A)	噪音限值只在住宅區適用。違者處以罰款，最高為 250 美金。																								
06:30~23:30	最大噪音值 88 dB(A)或 SENEL 值 94 dB(A)																																	
23:30~06:30	最大噪音值 70 dB(A)或 SENEL 值 76 dB(A)																																	
8	美國	Santa Monica	Santa Monica Airport	dB(A)	<p>聖莫尼卡城市和 FAA 之間的協議結果，機場條例建立了從聖莫尼卡機場兩端 1,500 英尺處設置最大噪音量 95.0 dB(A)的單一噪音事件暴露位準(SENEL,</p>	對噪音限值重複違規者，將逐步罰款(2,000 美金、5,000 美金、10,000 美金)，並不得使用此機場。(符合機場條例是強制性的，除非因天																												

項次	國家	城市	機場名稱	噪音值單位	噪音管制標準	噪音費罰則				
					Single Event Noise Exposure Level)。	氣、空中交通管制指令或淨空、空中緊急情況或其他安全方面的考慮，而須做出必要的偏差)				
9	美國	Van Nuys	Van Nuys Airport	dB(A)	起飛 A 加權最大音量：夜間 22:00~07:00「離場」限值，任何固定翼航空器產生 74 dB(A)或更高的音量無法於宵禁時段起飛。第 3 階段航空器(較新的或修改噴射引擎航空器)不受宵禁影響直到 23:00。	該條例違反者將支付民事罰款：範圍從首次違規 750 美金至 3 次違規以上 3,500 美金，該航空公司將被禁止使用機場。宵禁不適用於直昇機、緊急航班或軍用航空器。降落亦不受限制。				
10	英國	Birmingham	Birmingham International	dB(A)	1.日間：06:01~23:29 限值 92 dB(A)。 2.夜間：23:30~06:00 限值 87 dB(A)。	1.日間：「離場」航空器超過 92 dB(A)時，罰款 500 英鎊，每超過滿 1 dB(A)加罰 150 英鎊。 2.夜間：「到場或離場」航空器超過 87 dB(A)時，罰款同上。 這些附加費存放至社區信託基金(為一個註冊的慈善機構)，支持在受機場營運影響之地區的社區項目、計畫。				
11	英國	Manchester	Manchester	dB(A)	1.日間：07:00~23:00 限值 90 dB(A)。 2.夜間：23:00~23:29 限值 82 dB(A)；23:30~05:59 限值 81 dB(A)；06:00~06:59 限值 82 dB(A)。	每架航空器「起飛或重飛」後應以最可能的安靜方式操作，在相關監測站超過標準時，日間罰 750 英鎊；夜間除罰 750 英鎊之外，每超過 1 分貝加罰 150 英鎊。 徵收噪音處罰之目的是鼓勵飛行員以最可能的安靜方式操作和鼓勵航空公司採用更安靜的航空器。 全部的罰款捐贈給 Manchester 機場社區信託基金。				
12	英國	Castle Donington, Derby	East Midlands	dB(A)	<table border="1"> <tr> <td>夜間 23:00~07:00 起飛之航空器</td> <td>限值 dB(A)</td> </tr> <tr> <td>Aircraft with a QC on departure of 8 or 16</td> <td>See</td> </tr> </table>	夜間 23:00~07:00 起飛之航空器	限值 dB(A)	Aircraft with a QC on departure of 8 or 16	See	夜間 23:00~07:00「起飛」之航空器超過標準時，罰款 750 英鎊，每超過 1 分貝加罰 150 英鎊。
夜間 23:00~07:00 起飛之航空器	限值 dB(A)									
Aircraft with a QC on departure of 8 or 16	See									

項次	國家	城市	機場名稱	噪音值單位	噪音管制標準	噪音費罰則																				
					<table border="1"> <tr> <td></td> <td>para 13</td> </tr> <tr> <td>Aircraft with a MTOW of 300 tonnes or greater</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>Aircraft with a MTOW greater than 100 tonnes but less than 300 tonnes.</td> <td>87</td> </tr> <tr> <td>Aircraft with a MTOW of 100 tonnes or less.</td> <td>83</td> </tr> </table> <p>QC=quota count (as defined in the UK AIP Supplement)</p>		para 13	Aircraft with a MTOW of 300 tonnes or greater	92	Aircraft with a MTOW greater than 100 tonnes but less than 300 tonnes.	87	Aircraft with a MTOW of 100 tonnes or less.	83													
	para 13																									
Aircraft with a MTOW of 300 tonnes or greater	92																									
Aircraft with a MTOW greater than 100 tonnes but less than 300 tonnes.	87																									
Aircraft with a MTOW of 100 tonnes or less.	83																									
13	英國	Glasgow	Glasgow	dB(A)	1.日間：06:00~23:30 限值 94 dB(A)。 2.夜間：23:30~06:00 限值 87 dB(A)。	1.不超過 3 dB(A)，罰款 1,000 英鎊。 2.超過 3 dB(A)或更多，罰款 2,000 英鎊。																				
14	英國	Luton	Luton	dB(A)	<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">日間航班 (當地時間)</td> <td>06:00~22:59</td> <td>星期一至星期六</td> </tr> <tr> <td>07:00~22:59</td> <td>星期日</td> </tr> <tr> <td>> 94 dB(A)</td> <td>400% 附加費</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">夜間航班</td> <td>23:00~05:59</td> <td>星期一至星期六</td> </tr> <tr> <td>23:00~06:59</td> <td>星期日</td> </tr> <tr> <td>>82~85 dB(A)</td> <td>300% 附加費</td> </tr> <tr> <td>>86~89 dB(A)</td> <td>500% 附加費</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>>超過 89 dB(A)</td> <td>600% 附加費</td> </tr> </table> <p>日間：06:00~22:59 (星期一至星期六)；07:00~22:59 (星期日) 夜間：23:00~05:59 (星期一至星期六)；23:00~06:59 (星期日)</p>	日間航班 (當地時間)	06:00~22:59	星期一至星期六	07:00~22:59	星期日	> 94 dB(A)	400% 附加費	夜間航班	23:00~05:59	星期一至星期六	23:00~06:59	星期日	>82~85 dB(A)	300% 附加費	>86~89 dB(A)	500% 附加費			>超過 89 dB(A)	600% 附加費	降落費及導航服務費合計之 300%至 600%的噪音附加費。
日間航班 (當地時間)	06:00~22:59	星期一至星期六																								
	07:00~22:59	星期日																								
	> 94 dB(A)	400% 附加費																								
夜間航班	23:00~05:59	星期一至星期六																								
	23:00~06:59	星期日																								
	>82~85 dB(A)	300% 附加費																								
	>86~89 dB(A)	500% 附加費																								
		>超過 89 dB(A)	600% 附加費																							

項次	國家	城市	機場名稱	噪音值單位	噪音管制標準	噪音費罰則								
15	英國	London	Stansted Airport Limited	dB(A)	1.日間 07:00~23:00 「離場」限值，任何固定監測站為 94 dB(A)。 2.夜間 23:00~23:29 「離場」限值，任何固定監測站為 89 dB(A)。 3.日間 23:30~06:00 「離場」限值，任何固定監測站為 87 dB(A)。	1.日間 07:00~23:00 不超過 3 dB(A)，罰款 1,000 英鎊；超過 3 dB(A)每分貝追加 250 英鎊。 2.夜間 23:00~23:29 不超過 3 dB(A)，罰款 1,000 英鎊；超過 3 dB(A)每分貝追加 1,000 英鎊。 3.夜間 23:30~06:00 不超過 3 dB(A)，罰款 1,000 英鎊；超過 3 dB(A)每分貝追加 1,000 英鎊。								
16	比利時	Grâce-Hollogne	Liege Airport	dB(A)	根據噪音地圖，各區域的噪音限值 <table border="1"> <thead> <tr> <th>AREA</th> <th>L_{Aeq} (1s) MAX</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td>87 dB(A)</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>82 dB(A)</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>77 dB(A)</td> </tr> </tbody> </table>	AREA	L _{Aeq} (1s) MAX	B	87 dB(A)	C	82 dB(A)	D	77 dB(A)	每個違反罰款 200 歐元至 7,500 歐元。(規則、限值和罰款表為 Walloon Region decree 於 2004 年 1 月 29 日所公告)
AREA	L _{Aeq} (1s) MAX													
B	87 dB(A)													
C	82 dB(A)													
D	77 dB(A)													
17	泰國	Bangkok	Suvarnabhumi Internationali	dB	103 dB	2006 年 11 月宣布航空器超過 103 dB 將禁止在機場工作。航空公司將被機場要求出示經認證的噪音值證書。								

資料來源：本計畫整理。

5.4.4 噪音防制精進作法之討論及建議

目前航空噪音為社區居民所抱怨的，主要是航空之低頻噪音與單一航空事件噪音，這類型噪音與影響程度，以目前之指標與標準常被忽略，未來管制策略可採航空器低頻噪音、航道下航空噪音源特性與指標來進行管制。

基於航空環保議題之重要性，以及其包括之範疇廣泛，加上環境保護屬於長期不可停歇之工作，故需事先進行縝密且全盤之管制策略規劃，俾有助於我國未來三年航空噪音管制策略之執行，以確實將我國航空噪音各項環境保護之工作與國際接軌。

考量國外航空噪音管制發展與趨勢，擬定我國航空未來環保政策為：「創造永續發展的空運環境」，而主要目標包括：

- 減少機場噪音影響；
- 與國際同步發展，更新航空噪音相關管制法令與資訊；
- 提昇機場周遭居民良好的居住環境品質。

為達成上述目標，則可施行之策略參見表 5.4-5 所示，並說明如下：

表 5.4-5 可行之未來三年航空噪音管制策略與行動方案分析表

策略	行動方案	已執行	規劃中	未來	權責單位
1. 遵循國際民航環保規範	持續追蹤 ICAO 之民航環保航空噪音規範與發展	+		+	環保署
2. 降低噪音源	(1) 鼓勵老舊飛機的汰換，鼓勵業者引進低噪音之航機	+	+		民航局
	(2) 低頻噪音			+	環保署
3. 加強飛航噪音防制	(1) 機場進行噪音防制與補助工作	+			民航局
	(2) 加強機場噪音監測及資料應用	+		+	環保署
	(3) 加強各機場噪音改善計畫	+			民航局
4. 推動機場噪音標準法規	航空噪音最大音量管制			+	環保署
5. 評估機場周邊土地使用規劃與管理	建立機場噪音相容計畫與社區發展整合機制	+		+	環保署
6. 利用市場機制降低噪音影響	建立符合時代潮流之噪音防制費徵收機制		+	+	民航局

一、遵循國際民航環保規範

持續追蹤 ICAO 之民航環保航空噪音規範與發展，並密切監控國際間之航空噪音環保趨勢。有關法令方面，須先檢視「民用航空器噪音管制標準」、「機場周圍地區航空噪音防制辦法」及「應設置自動監測設備連續監測機場周圍地區飛航噪音狀況之航空站」噪音法規並加以更新。

二、降低噪音源

有關降低航空器低頻噪音方面，工作包括：

- (一)蒐集並研析各國航空器航空噪音管制測量方法與指標。
- (二)研析民眾對航空器低頻噪音之感受度及影響。
- (三)研擬我國航空器低頻噪音評估指標及量測技術。
- (四)參考國際規範及我國現況，研提適合我國航空器低頻噪音指標建議。

三、推動機場航空噪音最大音量管制標準法規

有關推動機場噪音標準法規，工作包括：

- (一)蒐集各國航道下航空噪音評估指標和最大音量管制標準。
- (二)研擬航道下航空噪音管制措施和相關法規。
- (三)研提適合我國航空噪音最大音量量測方法及評估指標。

噪音管制法第 16 條規定，經中央主管機關公告之航空站，應設置自動監測設備，連續監測其所在機場周圍地區飛航噪音狀況。前項監測結果，應作成紀錄，並依規定向當地主管機關申報。機場周圍地區航空噪音防制措施、防制區劃定原則、航空噪音日夜音量測定條件、申報資料、程序及其他應遵行事項之辦法，由中央主管機關定之。

環保署已於 98 年 6 月 1 日公告應設置自動監測設備連續監測機場周圍地區飛航噪音狀況之航空站，並於 98 年 6 月 8 日修正發布機場周圍地區航空噪音防制辦法。

參考美國聯邦航空總署飛航規則 (Far Part 150) 所訂土地相容使用對策，我國採用航空噪音日夜音量為航空噪音指標，並考量人口分布及土地使用情形據以劃定三等級航空噪音防制區。我國航空噪音防制區劃定與其他主要國家相比，較為嚴格，主要係考量我國國情（土地狹小及高人口密度），且大部分機場周遭緊鄰住家，爰將美國現行第一級及第二級航空噪音日夜音量等噪音線分貝值標準下

調修 5 分貝，第三級不變。主要國家不同航空噪音指標管制範圍比較詳如表 5.4-6 所示。

經由航空噪音整合模式 (INM) 模擬結果可知，如以航空噪音日夜音量 60 分貝所劃之等噪音線，相當於最大音量 90 分貝所劃之等噪音線。最大音量在各主要國家之使用目的：

- 淘汰噪音大機型(英國 Heathrow, Gatwick and Stansted 機場、美國 Santa Monica 機場、日本 Osaka Itami 機場)；
- 航空器「適航」規範和標準；
- 徵收降落費之參考依據；
- 單一航空噪音最大音量管制。

DNL 係採連續監測之航空噪音平均值，較符合客觀評估民眾的感受， L_{Amax} 僅反映單一航空噪音事件，其感受較為主觀。目前並無國家直接以最大音量 L_{Amax} 作為航空噪音指標來劃定航空噪音防制區。

我國現行使用航空噪音指標係採用航空噪音日夜音量 (DNL)，相較其他國家較為嚴格，若以最大音量指標直接劃定航空噪音防制區，範圍及標準需再考量人口特性及土地使用因素再予調整，其結果影響範圍經評估相當 (即如以航空噪音日夜音量 60 分貝所劃之等噪音線，相當於最大音量 90 分貝所劃之等噪音線)。

交通部民航局已於 104 年 2 月 4 日修正民用航空法第 37 條規定，將回饋金發放範圍依據與航空噪音防制區脫鉤。另為因應民眾航空噪音補償範圍訴求，環保署已於相關會議建議該局可參考其他國家辦理方式，搭配實際噪音檢測或增加相關補償排序方式。

四、評估機場周邊土地使用規劃與管理

設置航空噪音監測網，且依規定按季申報監測資料。機場周圍地區航空噪音防制區周圍土地相容性使用策略：

- (一)第一級航空噪音管制區：檢討現有土地使用及開發計畫。
- (二)第二級航空噪音管制區：不得新建學校、圖書館及醫療機構。
- (三)第三級航空噪音管制區：不得新建或增建學校、圖書館、醫療機構及劃定為住宅區。

依民用航空法第 37 條規定由航空主管機關 (CAA) 辦理，對受航空噪音污染範圍之地區特定之建築物設置防音設施。交通部依據民用航空法第 37 條授權

訂定之「航空噪音防制經費分配及使用辦法」及「機場回饋金分配及使用辦法」也已分別於 89 年 6 月 23 日、7 月 25 日發布實施，各航空站及各縣市政府已陸續成立「航空噪音執行小組」執行航空噪音補助工作。

表 5.4-6 主要國家不同航空噪音指標管制範圍比較表

級別	我國	美國	日本	加拿大、 美國空軍	香港
第一級	DNL 60 分貝及 65 分貝兩等噪音線間之區域	DNL 65 分貝及 70 分貝兩等噪音線間之區域	WECPNL 75 分貝及 90 分貝兩等噪音線間之區域(相當於 DNL 62 分貝及 77 分貝兩等噪音線間)	NEF 30 分貝(相當於 DNL 65 分貝)	NEF 25 分貝(相當於 DNL 60 分貝)
第二級	DNL 65 分貝及 75 分貝兩等噪音線間之區域	DNL 70 分貝及 75 分貝兩等噪音線間之區域	WECPNL 90 分貝及 95 分貝兩等噪音線間之區域(相當於 DNL 77 分貝及 82 分貝兩等噪音線間)		
第三級	DNL 75 分貝之等噪音線以上區域	DNL 75 分貝之等噪音線以上區域	WECPNL 95 分貝之等噪音線以上區域(相當於 DNL 82 分貝之等噪音線以上)		

五、預期效益

- (一)更新航空噪音管制相關法令，落實民航環保工作與國際同步發展。
- (二)有效管制航空低頻噪音，使民眾感受度及影響與實際監測值相近。
- (三)採用最大音量管制，反應實際影響瞬間音量，縮小與民眾落差。
- (四)減少航空噪音陳情事件。

5.5 辦理交通運輸系統噪音改善與精進作法說明會議

便利的交通運輸促進經濟及地區活絡，帶動商業、旅遊及文化活動蓬勃發展，對民眾生活型態帶來重大改變，但也因交通運輸之推動，增加了許多污染及噪音等環保難題。是以，如何發揮交通運輸角色，擴大綠色交通效能，於滿足用路人「安全的行」之基本需求外，更須不斷自我鞭策，持續精進改善，實踐普及之公共運輸與推展「環境永續」之理念，為所有交通運輸機關及環保單位等須共同努力的方向。

而隨著環境噪音問題的日益嚴重，降低噪音的方法顯得越來越重要，噪音可以採用兩種基本方法予以降低：被動式（Passive）噪音控制與主動式（Active）噪音控制。近來民眾對生活品質要求提高，寧適健康的住宅生活空間成為普遍需求，為改善居住環境品質，實有必要針對環境噪音源防制技術進行研究，研提可行改善技術，以供相關單位未來擬訂管制策略及管理措施之參考。

透過本說明會議提供一個交流平台，期藉由說明會之辦理，充分與相關先進、單位說明噪音改善與精進作法並交換意見，讓經驗得以留存，彼此相互學習，共同成長。以下摘錄說明會議之時間、地點、對象、推動方向、結論及照片，相關資料請詳附件六。

一、時間：107 年 11 月 7 日（星期三），下午 14：00 正。

二、地點：法鼓德貴學苑（台北市延平南路 77 號）階梯教室（R715）。

三、對象：相關政府交通管理機關及環保單位。

四、推動方向

（一）ANC 主動噪音控制，主要包括：說明主動噪音控制歷史、原理及現階段相關應用，讓與會人員瞭解 ANC 發展現況。

（二）本年度成果與歷年比較研析，主要包括：(1)106 年（20 點次）及 107 年（6 點次）開關窗之音量實測結果；(2)國外住宅區音量品質相關指標、標準或建議值；及(3)國內外相關研究之室內外音量的差異。

（三）相關噪音防制措施，主要包括：透過實例圖片讓與會人員瞭解國外較新穎的噪音防制措施，以作為國內使用上之參考。

五、結論：

（一）針對陸上運輸系統噪音改善部分，本署今年已委辦相關計畫針對噪音受體端之主動噪音控制技術進行相關研究，並規劃於 108 年邀集各相關單位進行以主動噪音控制技術改善之相關示範觀摩會議，以有效維護民眾生活品質。

（二）本署為改善陸上運輸系統噪音問題，後續將規劃從噪音傳播路徑改善之方式，結合科技手段進行綠能減碳隔音牆研究相關計畫，擇一陸上運輸系統進行實地量測，評估減噪兼具綠能與減碳之效益，各陸上運輸系統相關機關單位如有意願參與，且有適合設置地點，亦可提供本署參考。

六、照片



圖 5.5-1 說明會議照片

第六章 實際進度及查核重點

6.1 實際進度

本計畫之執行期限為自決標日起至民國 107 年 12 月 31 日止，為確實掌握本計畫各分項工作執行進度及成果能符合 鈞署之要求，本計畫將在計畫執行中設立三個階段性成果查核點，定期查核工作進度及內容是否符合工作期程，以有效達成作業進度與品質控管目標。各項工作項目預計完成之期程及查核點如表 6.1-1 所示，使 鈞署業務承辦人員對本計畫之工作進度一目瞭然，讓本計畫依既定工作期程完成各項工作目標，展現最佳成效。

6.2 查核重點

有關上述預定進度、實際進度及查核點說明，請詳「表 6.1-1 計畫工作執行進度表」及「表 6.2-1 實際進度及查核點說明」所示。本計畫截至 107 年 11 月底，契約書之預定進度累積百分比為 100.0%，實際執行進度為 100.0%。

表 6.1-1 計畫工作執行進度表

工作內容項目	時間 工作 權重%	107年4月	107年5月	107年6月	107年7月	107年8月	107年9月	107年10月	107年11月	107年12月
		1. 蒐集國際上現行環境噪音主動控制系統、原理及相關應用技術(至少5種類別)，並進行彙整研析事宜	10%		2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
2. 彙整國際上採用自然通風窗實施主動聲音傳播控制的技術規範與施行作法(至少8個國家)，並進行優劣比較與研析事宜	10%		2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%			
3. 蒐集國際現行各類型交通運輸系統噪音(含高速公路及航空噪音)管制法規與指標(至少10個國家)	10%						3.3%	3.3%	3.3%	
4. 彙整研析各國交通運輸系統噪音(含高速公路及航空噪音)超出管制標準限值作法，並依國內現況與生活特性，研提適用我國環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法	10%			2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%		
5. 研析各種陸上運輸系統沿線住宅區噪音源分布與量測結果比較，並針對各類型不同樣態住宅區環境噪音提出改善方案與建議	10%		2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%			
6. 彙整研析各類型通風隔音窗理論模型設計參數與數值模擬資料，並進行各種特性優劣比較	10%			10.0%						
7. 進行陸上運輸系統沿線住宅區環境噪音量測(至少5站次)，包括開窗與關窗條件及衰減狀況等不同室外及室內量測工作	20%		2.9%	2.9%	2.9%	2.9%	2.9%	2.9%	2.9%	
8. 彙整國內既有陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量(含低頻音)歷年量測成果數據(至少10處次)，並完成彙整各量測點之室內外噪音源分布及頻譜(含低頻)分析資料	10%		1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	1.4%	
9. 辦理交通運輸系統噪音改善與精進作法說明會議(為時半天，至少1場次)，說明會議人數預計20人，提供茶水、便當及場地租金	10%					10.0%				
工作進度報告、期中報告、期末報告				☆			○		◎	■
預定進度累積百分比(%)	100%		10.3%	32.6%	44.9%	67.1%	82.8%	92.4%	100.0%	

註：107 年 12 月修訂報告及報告定稿等相關契約作業。備註：1.上表須經執行單位確認，並明訂於契約書中。2.期中、期末應明列查核重點。

表 6.2-1 實際進度及查核點說明

契約書之預定進度 累積百分比 (%)		100.0%			實際執行 進度 (%)	100.0%	
工作內容 項目	實際執行情形 表 6.1-1	差異分析 (打√)			落後原因	困難檢討及對策	預計改善完成日期
		符合	落後	超前			
查核點	預定完成時間	查核點內容說明			章節	已完成內容簡述	
第三次查核點 (期末報告)	107 年 11 月	(一)彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻			第二章	<p>1.目前主動噪音控制技術相關應用技術包括：(1)自適應；(2)管道；(3)三維（自由）空間；(4)封閉；及(5)主動吸音研究…等。實務上以管道（如：主動降噪耳機）及封閉空間（如：汽車艙體、飛機機艙和房間）之控制較為純熟。</p> <p>2.已蒐集包括：日本、新加坡、香港、中國、法國、韓國、德國及西班牙等之自然通風窗實施主動聲音傳播控制相關研究。</p> <p>3.近 5 年來自然通風窗實施主動聲傳播控制的進展。第一類為直接控制通風窗開口聲傳播；第二類則是 ANC 靜壓式通風窗。</p> <p>4.ANC 靜壓式通風窗能以合理的成本提供寬頻噪音控制，是最接近需求的應用。將 ANC 直接應用於通風窗或其開口雖仍須要進一步研究，但在這類通風窗上設計窗格或許是個解決方案。</p>	
		(二)彙整研析各類型通風隔音窗理論模型設計參數與數值模擬資料			第三章	<p>1.理論模型：採用波動理論法對窗戶和房間內的音場進行計算。利用耦合空間的聲學理論，可以對其音場進行計算。求得最佳化的次級音場，將其與初級音場相加，以得到控制後的總音場。</p> <p>2.數值模擬：研究等效波導管截面面積對自然通風窗和房間內音場計算的影響。運用有限元素法分析（FEA）對自然通風窗進行建模，將有限元模型與理論模型的計算結果進行對比，以此來驗證理論模型的有效性。</p> <p>3.當使用單通道系統（只包含一個次級音源和一個誤差感測器）時，次級音源最優配置為將其放置於窗戶底部中間位置，此時系統的有效降噪頻率上限為 390 Hz；當使用雙通道系統（包含二個以上的次級音源和誤差感測器）時，系統的有效降噪頻率上限為 410 Hz，這說明使用多通道系統可以增加系統的降噪效果。</p>	

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容簡述
第三次查核點 (期末報告)	107 年 11 月	(三)陸上運輸系統沿線住宅區 室內外環境音量及各類噪 音源進行調查與量測	第 四 章	<p>1.多數國家針對室內音量均採取「L_{Aeq}」作為評估指標。新加坡、韓國、美國舊金山及沙加緬度市，其規範之日間音量約 55 dB(A)；夜間音量約 45 dB(A)，比較貼近一般室內實際居住情況之聲音品質。WHO 之指引值係根據影響健康的最低噪音量（臨界健康影響，Critical Health Effect）而訂定，故其音量值較為嚴苛。</p> <p>2.綜整國外之文獻資料蒐集分析，「開窗」之室內外音量差約 5 dB(A)~15 dB(A)，其中又以「空屋」約 5 dB(A)為最小（表 4.2-12）；「微開窗」約 10 dB(A)~15 dB(A)；「關窗」之音量差則約 20 dB(A)~30 dB(A)。</p> <p>3.完成陸上運輸系統沿線住宅區噪音測量 6 點次，包括：開關（門）窗之室內外同步測量。關（門）窗音量差，受透射過門窗的途徑介質（門窗框及玻璃）影響較大；開（門）窗音量差異主要與室內空間大小、吸音能力及門窗的打開位置等有關。</p> <p>4.(1)開（門）窗：全頻音及低頻音之隔音量並無一定之規律性。(2)關（門）窗：全頻隔音量幾乎皆高於低頻，即全頻隔音較佳。</p> <p>5.依據德國 DIN 45680 之純音判定條件做為找出室內低頻噪音主要頻率方法。低於 200 Hz 的低頻部分，室內外音頻之線型變化有較大的差異，特別於室內之音頻線型有較大的起伏，顯示於室內有低頻噪音源之干擾。</p>

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容簡述
第三次查核點 (期末報告)	107年11月	(四)彙整研析國際現行各類型交通運輸系統噪音(含高速公路及航空噪音)管制法規、指標及防制作法	第五章	<p>1. 國外所使用之高速公路噪音指標，主要包括：L_{Aeq}、L_{den} 及 L_{10}。隔音牆是各國既有和新道路方案採用的主要減音措施。</p> <p>2. 由國外經驗，建議在選擇噪音緩解措施時，可考慮使用低噪音路面（如：PAC 多孔隙瀝青、PERS 多孔彈性瀝青、橡膠瀝青等），惟應把噪音作為一個研究參數，研究相關維護之項目及頻率，俾達到後續之減音效果始能兼具其改善目標。</p> <p>3. 目前各國所採用的航空噪音評估指標不盡相同，大多數都採用感覺噪音級或 A 聲級來評估一次飛行事件，對於長期連續的飛行事件，國際民航組織（ICAO）推薦採用加權等效連續感覺噪音級 WECPNL。</p> <p>4. 目前各國較常採用的為噪音消減程序、跑道優先使用限制、引擎運轉限制、機場宵禁及噪音監控系統。目前國際間對於航空器噪音超過標準有相關罰則以「美國機場及英國機場」為主，而噪音管制標準及噪音費罰則幾乎各不相同，即各個機場有其自己之作法。</p> <p>5. 建議未來航空噪音管制策略可採航空器低頻噪音、航道下航空噪音源特性與指標來進行管制。透過有效管制航空低頻噪音，使民眾感受度及影響與實際監測值相近；另亦可採用最大音量管制，反應實際影響瞬間音量，縮小與民眾落差，俾減少航空噪音陳情事件，落實民航環保工作並與國際同步發展。</p> <p>6. 於 107 年 11 月 7 日（星期三）完成辦理「陸上運輸系統噪音改善與精進說明」會議。</p>
		(五)提交報告審查。		—

註：上表於期中、期末審查時，由執行單位提出實際執行情形，明列於報告中，作為審查依據。

第七章 結論及建議

7.1 結論

一、彙整研析國際上環境噪音源相關防制技術規範與現行作法相關文獻

本計畫完成蒐集近 5 年 8 個國家或地區(日本、新加坡、香港、中國、法國、韓國、德國及西班牙)的相關研究，用以說明自然通風窗方面，主要是實施主動聲音傳播控制之優劣研析及發展方向。近年來自然通風窗實施主動聲傳播防制技術大致可分為兩類：

第一類為直接控制通風窗開口聲傳播，亦即在通風窗開口處或其邊緣裝設次級音源，以控制開口處的聲傳播。日本及新加坡研發的 AAS 通風窗、法國的主動通風窗配置、韓國、德國及西班牙的相關研究，都屬於這一類。AAS 通風窗將次級音源裝設在開啟式通風窗（Opening Windows）的通風路徑上，以大型通風窗為適用目標。其他研究則是將次級音源裝設在通風窗開口處或其邊緣，以小型開口為適用目標，例如：小型通風窗的開口或部分開啟的通風窗，這類系統的優點為安裝簡易和高通風率。

第二類則是 ANC 靜壓式通風窗。這類系統在開啟式通風窗改裝的靜壓式結構上採用 ANC。香港及中國的相關研究和法國的主動迷宮結構，都屬於這一類。ANC 靜壓式通風窗在系統中同時採用被動和主動噪音控制方法。其中，靜壓箱（Plenum Chambers）在中頻至高頻範圍發揮減音效果，同時提供相當程度的自然通風。ANC 元件可以衰減經由靜壓箱傳播的低頻噪音元素。靜壓箱將原來的三維自由空間聲場問題轉化為單維聲通道問題或低階聲腔問題。因此，ANC 應用不僅更能有效減音，成本也較低。

二、針對陸上運輸系統沿線住宅區室內外環境音量及各類噪音源進行調查與量測，並彙整歷年量測執行成果與比較研析

本研究共完成陸上運輸系統（軌道）沿線住宅區噪音測量 106 年（20 點次）與 107 年（6 點次）。關（門）窗之音量差異，受透射過門窗的途徑介質（門窗框及玻璃）影響較大；開（門）窗之音量差異，主要與室內空間大小、吸音能力及門窗的打開位置等有關。開（門）窗：全頻音及低頻音之室內外隔音量並無一定

之規律性；關（門）窗：全頻隔音量幾乎皆高於低頻，即全頻隔音較佳；噪音測量結果，「開（門）窗」情形加上室內室外差（衰減）10 分貝，若為「關（門）窗」約衰減 20 分貝。

三、彙整研析各類交通運輸系統噪音改善成效，並依我國現況特性與參考國際作法研提適用國內環境噪音改善技術及交通運輸系統噪音防制精進作法，召開相關研商說明會議

國際間作法除了鋪設低噪音鋪面外（如：PAC 多孔隙瀝青、PERS 多孔彈性、橡膠瀝青等），亦有其他道路交通噪音消減措施，包括：限制土地用途、源頭改善、交通管理和設置(太陽能)隔音牆等，其中隔音牆是目前應用最廣泛的道路交通噪音減音措施。另外航空噪音方面，國際上多採用最大音量管制，可以反應實際影響瞬間音量，縮小與民眾落差，俾減少航空噪音陳情事件。

研商說明會議方面，民國 107 年 11 月 7 日（星期三）於法鼓德貴學苑階梯教室 7F 會議室完成辦理，會議中針對陸上運輸系統噪音改善部分，以噪音受體端之主動噪音控制技術進行說明；另為改善陸上運輸系統噪音問題，後續將規劃從噪音傳播路徑改善之方式，並結合科技手段進行綠能減碳隔音牆研究相關計畫，擇一陸上運輸系統進行實地量測，評估減噪兼具綠能與減碳之效益。

7.2 建議

- 一、建議對環境噪音源相關防制技術上，除理論及文獻資料之蒐集分析外，未來可考量實務操作案例（如：自然通風窗試辦計畫），俾與本計畫之理論資料或檢測數據進行相關研析與比較。
- 二、建議修法時能考量先來後到、新建物過於接近鐵（公）路沿線而影響民眾安寧居住之權益等實際問題。期待政府之相關部門，進行跨部會機制，如：區域計畫、建築、都市法則或環評法等之修訂，以維持社會公平性。
- 三、建議未來可透過過往相關噪音陳情監測數據加以分析及評估。例如：透過將既有標準加嚴 1 分貝、2 分貝…，瞭解過往陳情監測案之合格率變化情形等資訊，除可建立自法規公布以來相關陳情資料之分析數據外，亦可供進一步評估現有相關標準是否能有加嚴之空間。
- 四、由國外經驗，建議在選擇噪音緩解措施時，可考慮使用低噪音路面（如：PAC

多孔隙瀝青、PERS 多孔彈性、橡膠瀝青等)，惟應把噪音作為一個研究參數，研究相關維護之項目及頻率，俾達到後續之減音效果始能兼具其改善目標。

五、建議未來航空噪音管制策略可採航空器低頻噪音、航道下航空噪音源特性與指標來進行管制。透過有效管制航空低頻噪音，使民眾感受度及影響與實際監測值相近；另亦可採用最大音量管制，反應實際影響瞬間音量，縮小與民眾落差，俾減少航空噪音陳情事件，落實民航環保工作並與國際同步發展。