

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
1.5 相關研究與歷史回顧	1-4
1.5.1 室內噪音預測研究回顧	1-4
1.5.2 室內噪音管制歷史回顧	1-7
第二章 彙整研析國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻	2-1
2.1 蒐集國外現行都市軌道交通、機場周圍區域、營建周界及社會生活環境噪音源周界評估指標	2-1
2.1.1 都市軌道交通	2-2
2.1.2 機場周圍區域	2-4
2.1.3 營建周界	2-7
2.1.4 社會生活環境噪音源	2-7
2.2 彙整研析國外建置環境噪音評估指標及噪音評估預測相關方法	2-8
2.2.1 社會調查	2-8
2.2.2 客觀測量	2-14
2.2.3 環境噪音評估預測相關方法	2-15
第三章 蒐集國外住宅區室內音量品質指標、噪音測量、建議值及評估模擬方法	3-1
3.1 蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果	3-1
3.1.1 國外住宅區音量現況	3-1
3.1.1.1 韓國	3-1
3.1.1.2 中國大陸	3-4
3.1.1.3 香港	3-5
3.1.1.4 日本	3-7
3.1.1.5 歐盟	3-8
3.1.1.6 美國	3-8

3.1.2 住宅區民眾噪音煩惱度	3-9
3.2 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	3-15
3.2.1 住宅區音量品質相關指標	3-15
3.2.2 住宅區音量品質相關標準或建議值	3-16
3.3 蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序	3-23
3.3.1 測量儀器	3-23
3.3.2 儀器設置	3-23
3.3.3 測量條件	3-23
3.3.4 測量時間	3-24
3.3.5 布點要求	3-24
3.3.6 測量方法	3-27
3.3.7 讀數方法	3-27
3.3.8 資料記錄	3-27
3.3.9 評估指標	3-28
3.3.10 資料處理	3-28
3.3.11 結果表示	3-29
3.3.12 結果修正	3-29
3.4 蒐集國外住宅區音量評估模擬方法及相關管理措施與規範	3-29
3.4.1 國外住宅區音量評估模擬方法	3-29
3.4.1.1 室內噪音模擬和計算概述	3-29
3.4.1.2 室內噪音模擬和電腦軟體	3-31
3.4.1.3 評估和相互對比	3-40
3.4.1.4 國外室內噪音推定計算	3-41
3.4.2 國外住宅區音量相關管理措施與規範	3-45
3.4.2.1 一般性室內噪音管制方法	3-45
3.4.2.2 一般性室內噪音控制技術	3-48
3.4.2.3 世界各國噪音政策	3-48
第四章 調查住宅區室內外場所音量及噪音源分布	4-1
4.1 進行住宅區室內外噪音量測研究	4-1
4.1.1 住宅區室內外噪音量測規劃說明	4-1
4.1.2 住宅區室內外噪音量測結果說明	4-3
4.2 辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析	4-40

4.2.1 室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析規劃說明	4-40
4.2.2 室內噪音源分布及頻譜資料之量測結果說明	4-40
第五章 改善建築物隔音測量方法及隔音結構改善相關研究	5-1
5.1 建築物隔音效果的測量方法比較及改進	5-1
5.1.1 隔音的實驗室測量方法	5-1
5.1.1.1 實驗室測量原理	5-1
5.1.1.2 實驗室測量方法要求	5-2
5.1.2 外牆構件隔音的現場測量方法	5-5
5.1.2.1 交通噪音源測量隔音	5-5
5.1.2.2 揚聲器噪音源測量隔音	5-5
5.1.3 不同測試方法比較及改進	5-7
5.1.3.1 三種測量方法優缺點比較	5-7
5.1.3.2 隔音測量方法的改進	5-8
5.1.4 揚聲器多點測量方法實驗及結論	5-9
5.1.4.1 實驗裝置及原理介紹	5-9
5.1.4.2 實驗數據分析及結論	5-14
5.1.5 其它實驗方法	5-9
5.1.5.1 將近似為點音源的揚聲器拓展為線音源	5-17
5.1.5.2 用半消音室模擬現場音環境	5-17
5.1.6 結論	5-18
5.2 輕薄結構的隔音性能研究	5-18
5.2.1 緒論	5-18
5.2.1.1 研究背景及意義	5-18
5.2.1.2 隔音研究歷史、現狀及方法	5-18
5.2.1.3 本研究的主要工作	5-21
5.2.2 週期結構多層板的隔音性能分析	5-22
5.2.2.1 單層板的隔音特性	5-22
5.2.2.2 雙層板的隔音特性	5-24
5.2.2.3 多層板的隔音性能研究	5-27
5.2.2.4 結論	5-34
5.2.3 複合多孔彈性介質多層夾心板的隔音性能	5-34
5.2.3.1 多孔彈性介質的 Biot 理論	5-35
5.2.3.2 多孔彈性介質夾心板中的音傳播	5-38

5.2.3.3	多層複合板隔音效果的數值計算	5-41
5.2.3.4	複合三層板與同等條件下的複合雙層板的隔 音性能比較	5-45
5.2.3.5	結論	5-47
5.2.4	帶微穿孔板的多層隔音結構	5-47
5.2.4.1	微穿孔板基本理論	5-48
5.2.4.2	帶微穿孔板的三層隔音結構研究	5-50
5.2.4.3	帶微穿孔板的三層結構隔音性能分析	5-53
5.2.4.4	微穿孔板參數對隔音性能的影響	5-54
5.2.4.5	結論	5-58
5.2.5	多層隔音結構的實驗研究	5-58
5.2.5.1	實驗原理及實驗系統描述	5-58
5.2.5.2	不同多層結構隔音效果的實驗研究	5-60
5.2.5.3	結論	5-66
5.2.6	總結論	5-67
第六章	計畫執行進度及查核重點	6-1
6.1	執行進度	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	7-3

附件目錄

附件一、	評選會會議紀錄暨回覆說明
附件二、	第一次說明會議相關資料
附件三、	第 1 次工作進度報告會議紀錄暨回覆說明
附件四、	專家學者諮詢會議相關資料
附件五、	相關國內窗戶之隔音量及鐵路隔音牆設計與規劃等相關資料
附件六、	噪音計之 QA/QC 相關資料
附件七、	期中報告會議紀錄暨回覆說明
附件八、	第二次說明會議相關資料
附件九、	期末報告會議紀錄暨回覆說明

圖目錄

	<u>頁次</u>
圖 1.4-1 整體工作流程圖	1-3
圖 3.1-1 韓國公寓居民之比例 (2010 年)	3-1
圖 3.1-2 韓國公寓噪音之成因 (2012 年)	3-2
圖 3.1-3 韓國公寓噪音訴願案件量	3-3
圖 3.1-4 韓國公寓噪音爭端解決流程	3-3
圖 3.1-5 中國大陸 2015 年地級以上城市日間區域音環境狀況年際比較	3-4
圖 3.1-6 中國大陸 2015 年地級以上城市各類功能區達標情況	3-5
圖 3.1-7 日本歷年來噪音陳情數量變化情形	3-7
圖 3.1-8 日本 2009 年噪音陳情對象百分比	3-7
圖 3.1-9 美國 1975 年至 2000 年暴露在 65 dB(A)以上航空噪音的人口	3-9
圖 3.4-1 丹麥 ODEON 室內噪音電腦模擬示意圖	3-32
圖 3.4-2 德國 SoundPLAN 室內噪音電腦模擬示意圖	3-33
圖 3.4-3 比利時 Raynoise 室內噪音電腦模擬示意圖	3-35
圖 3.4-4 文獻來源比例	3-40
圖 3.4-5 幾種軟體的應用範圍	3-41
圖 3.4-6 室外噪音傳播至室內之衰減關係示意圖	3-42
圖 3.4-7 日本東名高速公路室外噪音傳播至室內之幾何關係示意圖	3-44
圖 3.4-8 香港九龍住宅簷篷內置減音器	3-52
圖 3.4-9 香港理大新建的學生宿舍之擋音式減音窗	3-53
圖 3.4-10 香港管理噪音的政府機關架構	3-54
圖 3.4-11 日本與噪音管制有關的法規	3-56
圖 3.4-12 日本噪音法規架構圖	3-59
圖 3.4-13 澳門歷年接獲的噪音投訴個案數目	3-60
圖 3.4-14 澳門 2016 年噪音投訴個案分類的百分率	3-61
圖 4.1-1 住宅區室內外噪音及頻譜資料測量狀況示意圖	4-1
圖 4.1-2 測量點位於建築物正面之牆面反射音實驗結果	4-7
圖 4.2-1 純音判定條件示意圖	4-40
圖 4.2-2 住宅區之開窗室內外同步 1/3 八音階不加權頻譜比較圖	4-43
圖 5.1-1 隔音構件隔音量之測量實驗系統示意圖	5-1
圖 5.1-2 揚聲器音源實驗系統原理圖	5-8
圖 5.1-3 實驗測量原理圖	5-10

圖 5.1-4 實驗測量實物圖	5-10
圖 5.1-5 隔音量分析計算原理圖	5-13
圖 5.1-6 實驗測試點分布圖	5-13
圖 5.1-7 $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 的隔音曲線	5-16
圖 5.1-8 $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 的隔音曲線	5-16
圖 5.1-9 $\theta = 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 的隔音曲線	5-16
圖 5.1-10 $\theta = 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ 的隔音曲線	5-16
圖 5.1-11 $\theta = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 構件隔音的理論值	5-16
圖 5.1-12 $\theta = 60^\circ, 75^\circ$ 構件隔音的理論值	5-16
圖 5.1-13 $\theta = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 構件隔音的實測值	5-17
圖 5.1-14 三種測量結果比較	5-17
圖 5.2-1 單層板隔音結構	5-23
圖 5.2-2 雙層板隔音結構	5-24
圖 5.2-3 週期結構多層板示意圖	5-27
圖 5.2-4 音波散射示意圖	5-29
圖 5.2-5 等厚多層板的隔音特性曲線 (N=2, 4, 6, 8)	5-31
圖 5.2-6 多層板低頻音—電類比線路圖	5-31
圖 5.2-7 分層週期結構示意圖	5-31
圖 5.2-8 分層週期結構特性	5-32
圖 5.2-9 Fe-Al 複合多層板隔音特性曲線	5-33
圖 5.2-10 多孔介質中應力應變關係分析圖	5-35
圖 5.2-11 音波入射到多孔介質示意圖	5-39
圖 5.2-12 多孔彈性介質與板直接耦合	5-40
圖 5.2-13 多孔介質通過空氣層與板耦合	5-40
圖 5.2-14 三層板中多孔彈性材料與板組合的不同結構示意圖	5-42
圖 5.2-15 三層板的前三種結構之隔音特性曲線	5-42
圖 5.2-16 三層板的後三種結構之隔音特性曲線	5-42
圖 5.2-17 不同泡沫厚度的隔音特性曲線	5-44
圖 5.2-18 調節板厚度後的隔音特性曲	5-44
圖 5.2-19 增加空腔厚度對隔音性能的影響	5-44
圖 5.2-20 多孔材料與雙層板的不同組合結構	5-45
圖 5.2-21 雙層板的三種結構隔音特性曲線	5-46
圖 5.2-22 雙層板與三層板的分離結構隔音性能曲線	5-46

圖 5.2-23 雙層板與三層板的固定結構隔音特性比較	5-46
圖 5.2-24 微穿孔板結構圖	5-48
圖 5.2-25 帶微穿孔板的三層隔音結構	5-51
圖 5.2-26 聲學系統四端網路	5-51
圖 5.2-27 微穿孔板與三層板結構的隔音性能比較圖	5-54
圖 5.2-28 微穿孔板與三層板結構的音強反射係數比較圖	5-54
圖 5.2-29 改變微穿孔板的穿孔率對隔音性能的影響	5-55
圖 5.2-30 改變微穿孔板的穿孔率對音速反射係數的影響	5-55
圖 5.2-31 改變微穿孔板的孔徑對隔音性能的影響	5-56
圖 5.2-32 改變微穿孔板的孔徑對音壓反射係數的影響	5-56
圖 5.2-33 改變微穿孔板後腔的深度對隔音性能的影響	5-57
圖 5.2-34 改變微穿孔板後腔的深度對音強反射係數的影響	5-57
圖 5.2-35 改隔音構件安裝實物圖	5-59
圖 5.2-36 隔音測量系統	5-59
圖 5.2-37 週期結構多層板隔音性能的實驗比較	5-61
圖 5.2-38 雙層夾心板隔音性能的實驗結果	5-62
圖 5.2-39 三層夾心板前三種結構隔音性能的實驗結果	5-63
圖 5.2-40 三層夾心板後三種結構隔音性能的實驗比較	5-63
圖 5.2-41 雙層板隔音曲線的理论值與實測值比較	5-65
圖 5.2-42 三層板的理論值與實測值比較	5-65
圖 5.2-43 三層夾心板與週期結構多層板隔音性能比較	5-66
圖 5.2-44 三層夾心板與雙層夾心板隔音性能比較	5-66

表 目 錄

	<u>頁次</u>
表 2.1-1 國外軌道交通噪音標準及評估指標	2-3
表 2.1-2 各國使用的航空噪音評估指標一覽表	2-4
表 2.1-3 進行社會調查之科學報告的基本技術要求	2-11
表 3.1-1 美國 1980 年遭受交通噪音干擾人口比例統計	3-9
表 3.2-1 不同國家、組織之住宅室內音量評估指標一覽表	3-15
表 3.2-2 不同國家、組織之住宅室內音量值一覽表	3-19
表 3.3-1 根據噪音特性對噪音測量值的修正方法	3-29
表 3.4-1 CadnaR 及 CadnaA 之相關性及差異性彙整表	3-37
表 3.4-2 室外噪音傳播至室內之壁面透過損失計算表	3-43
表 3.4-3 室外噪音傳播至室內之音量計算表	3-45
表 3.4-4 德國噪音管制規範一覽表	3-51
表 3.4-5 日本環境品質音量標準	3-57
表 3.4-6 日本面臨道路區域環境品質標準	3-57
表 3.4-7 日本面臨新幹線環境品質標準	3-57
表 3.4-8 澳門 2015 年至 2016 年噪音投訴個案總數之數值及增/減幅	3-60
表 3.4-9 各國樓板撞擊音標準比較表	3-63
表 3.4-10 紐約市公寓噪音罰則一覽表	3-63
表 3.4-11 中國大陸「民用建築隔音設計規範 (GBJ 118-88)」隔音減噪 設計標準等級含義	3-64
表 3.4-12 日本聲學標準等級的意義	3-64
表 4.1-1 住宅區室內外噪音測量之數量表	4-2
表 4.1-2 住宅區於開窗下之室內外音量差	4-5
表 4.1-3 單層玻璃及雙層玻璃之室內外音量差	4-5
表 4.1-4 開關窗之聲學傳播文獻摘錄	4-6
表 4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表	4-10
表 4.1-6 一般道路之住宅區室內外噪音測量結果彙整表	4-30
表 4.1-7 陸上運輸道路系統 (高速公路) 之住宅區室內外噪音測量結果 彙整表	4-31
表 4.1-8 陸上運輸道路系統 (快速道路) 之住宅區室內外噪音測量結果 彙整表	4-33
表 4.1-9 陸上運輸軌道系統(高鐵)之住宅區室內外噪音測量結果彙整表	4-34

表 4.1-10 陸上運輸軌道系統(臺鐵)之住宅區室內外噪音測量結果彙整表	4-35
表 4.1-11 陸上運輸軌道系統(捷運)之住宅區室內外噪音測量結果彙整表	4-36
表 4.1-12 本計畫實際測量關窗隔音量及文獻資料之比較分析表	4-37
表 4.1-13 本計畫實際測量開窗隔音量及文獻資料之比較分析表	4-38
表 4.1-14 本計畫實際測量牆面反射音及文獻資料之比較分析表	4-39
表 4.2-1 住宅區室內噪音源出現純音特性及其頻率分析表	4-41
表 5.1-1 噪音量讀數的修正	5-7
表 5.1-2 入射角度於 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之構件的隔音量	5-15
表 5.1-3 入射角度於 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 之構件的隔音量	5-15
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）自民國 96 年、97 年起即已進行圖書館及醫院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 年更進行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)，以因應未來民眾對於公共場所生活品質要求提高作準備，並與世界各國室內音量建議指標、室內音量容許值與品質接軌，提高國人生活水準。

國內因交通運輸便利及地域狹小等特性，導致人口往都會地區移動及集合住宅稠密之現象，近年來相關之生活噪音、樓板衝擊音及室外傳入室內之噪音陳情案件逐年增加，影響著國人的生活作息與工作表現等，故室內噪音問題已越來越受到民眾的重視。因此，提升住宅聲音環境品質之要求日益殷切。為提升建築環境聲音品質，內政部建築研究所於 88 年 9 月開始施行綠建築評估（綠建築標章），且於 91 年修訂增加「生物多樣性」及「室內環境」兩項指標，其中有噪音及振動防制之技術，並於 92 年度正式施行。而目前對於室外環境噪音已有相關法規管制，惟對於建築物鄰棟（戶）間之噪音干擾及室內噪音多無法事先預防及管制。

本年度希藉由此計畫：蒐集彙整國外環境噪音評估指標使用現況、國外住宅區音量現況、民眾噪音煩惱度、不同國家之住宅區室內相關標準或建議值、室內音量容許值、評估指標和測量方法、評估方法與模式及管理措施和規範等相關文獻資料，以掌握國際上的發展趨勢；並進行住宅區室內外音量測量、頻譜資料調查分析，並針對建築物隔音測量方法提出改進及進行輕薄隔音結構之研究。同時透過辦理說明會及諮詢會議，廣徵各界針對我國「住宅區室內音量品質」之測定指標、方法、地點位置及結果等之意見。相關分析評估結果可作為建立我國住宅區室內音量指標、測量、評估方法及建議值等之參考基礎。

爰此，環保署乃提出 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（以下簡稱本計畫），以利室內聲音環境品質之瞭解及改善，俾作為未來訂定相關室內噪音法規（建議值）與相關法制作業之參考。

1.2 計畫目標

- 一、彙整研析國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻。
- 二、蒐集國外住宅區室內音量品質指標、噪音測量、建議值及評估模擬方法。
- 三、調查住宅區室內外場所音量及噪音源分布，並改善建築物隔音測量方法及隔音結構改善相關研究。
- 四、研提我國住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案，並辦理說明會議與諮詢會議，以廣納各界意見。

1.3 工作內容

- 一、彙整研析國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻
 - (一)蒐集國外現行都市軌道交通、機場周圍區域、營建周界及社會生活環境噪音源周界評估指標。
 - (二)彙整研析國外建置環境噪音評估指標及噪音評估預測相關方法。
- 二、蒐集國外住宅區室內音量品質指標、噪音測量、建議值及評估模擬方法
 - (一)蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果。
 - (二)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。
 - (三)蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序。
 - (四)蒐集國外住宅區音量評估模擬方法及相關管理措施與規範。
- 三、調查住宅區室內外場所音量及噪音源分布，並改善建築物隔音測量方法及隔音結構改善相關研究
 - (一)進行住宅區室內外噪音量測研究（包括開窗與關窗之不同條件、反射音及衰減狀況等量測至少 10 次）。
 - (二)辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析。
 - (三)分析建築物隔音測量方法實驗原理條件及進行音源實驗，並針對建築物隔音測量方法提出改善建議。
 - (四)針對輕薄隔音結構進行理論研究與實驗分析，並進行至少 2 種之不同隔音結構性能之理論分析與實驗。
- 四、研提我國住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案，並辦理各 1 場次說明會議與諮詢會議，以廣納各界意見
 - (一)研提適用我國之住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案。

- (二)辦理住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案說明會議（至少 2 場次），邀請政府相關主管機關及相關業者代表參加，說明會議人數至少 30 人，提供茶水、便當及場地租金。
- (三)辦理住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案之專家學者諮詢會議（至少 1 場次），諮詢委員人數至少 10 人，提供茶水、便當及場地租金。
- (四)本計畫邀請委員審查或出席會議，其審查費或出席費及交通費應於當日當場以現金發放。

1.4 工作流程

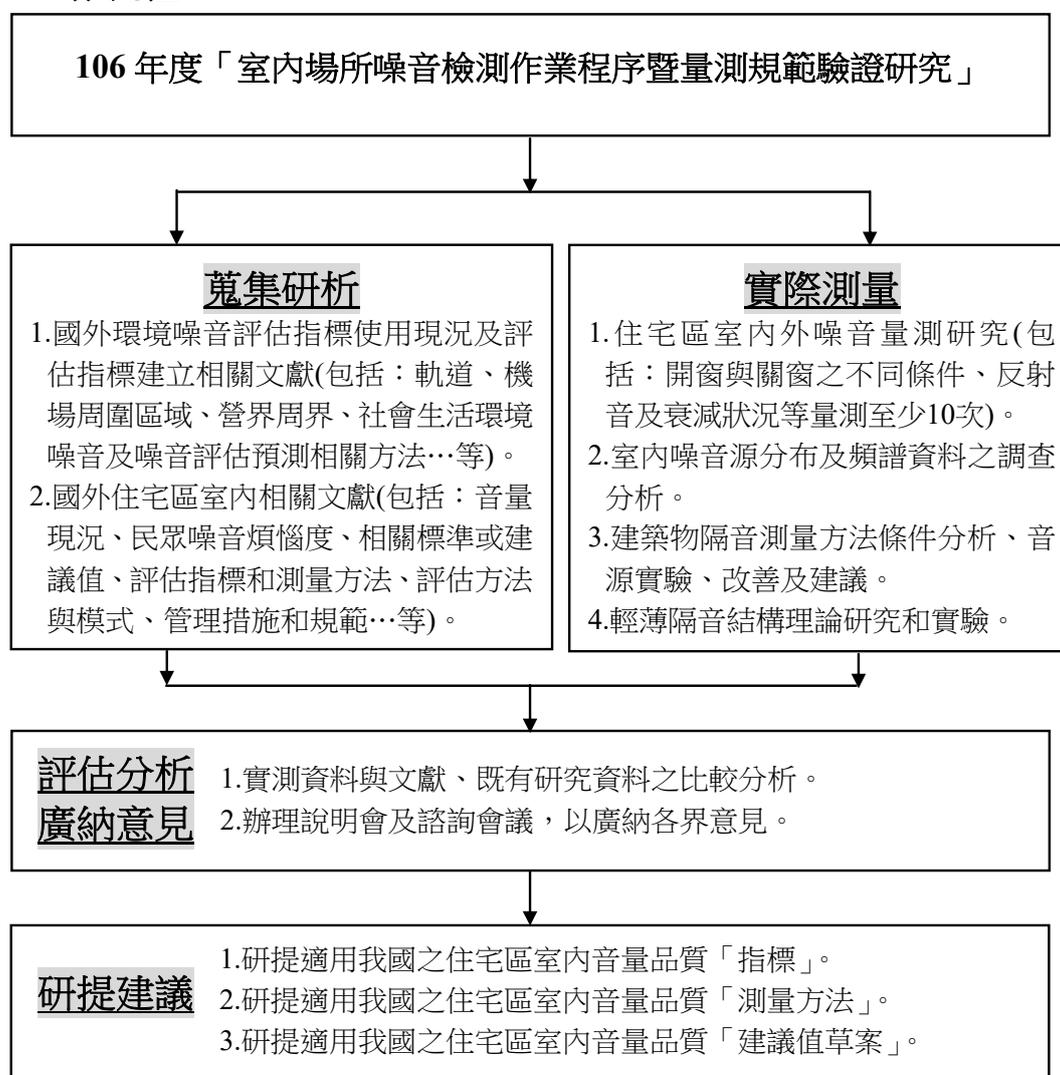


圖 1.4-1 整體工作流程圖

1.5 相關研究與歷史回顧

1.5.1 室內噪音預測研究回顧^[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，與室內聲音品質（以下簡稱音品）相關的建築聲學研究主要集中在四個方面：(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響應的研究。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 50ms 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」(Early Decay Time, 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」(Lateral Energy Factor, LEF) 和由 Gottlob 於 1973 年提出的「雙耳相關係數」(Intramural Cross-Correlation, 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，其確定方法為使用兩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.Beraneck 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。室內音場之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電腦模擬；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 音繞射模型^[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 RAMSETTE^[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之電腦數字模擬，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響應，用數學來描述即為將原始聲信號與脈衝響應進行卷積運算，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，數位濾波器不僅須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，此部份可通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。

1.5.2 室內噪音管制歷史回顧

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（Office of Noise Abatement and Control, 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（Noise Criteria Curve）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 (Noise Rating Curve)、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位準，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》(GBJ 118-88) 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 1,000 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。

第二章 彙整研析國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻

2.1 蒐集國外現行都市軌道交通、機場周圍區域、營建周界及社會生活環境噪音源周界評估指標

環境噪音指在交通運輸（交通噪音）、工業生產（工廠噪音）、建築施工（營建噪音）和社會生活中（近鄰噪音）所產生的、干擾周圍生活環境的聲音（頻率 20 Hz~20k Hz的可聽音範圍）^[28]。環境噪音污染是指所產生的環境噪音超過國家規定的噪音管制標準，如：環境音量標準(99.01.21)、噪音管制標準(102.08.05) …等，並干擾他人正常生活、工作和學習的現象^[29]。環境噪音按照來源大體可分為四類：交通噪音、工業噪音、營建噪音、社會生活（近鄰）噪音^[30]。

交通噪音主要指的是機動車輛、飛機、火車、捷運系統和輪船等交通工具在運行時發出的噪音，這些噪音的噪音源是移動的，其干擾範圍大。在這類噪音中，飛機噪音最大，影響也比較嚴重。汽車是都市交通中較大的噪音源，機動車的引擎運轉、零件摩擦、車身振動、煞車、排氣、鳴喇叭…等，都會產生噪音。一般公共汽車的噪音約為80分貝，車速提高一倍噪音增長6分貝~10分貝，最嚴重的是喇叭聲，一般汽車喇叭大約有100分貝~110分貝。

工業噪音主要指工業生產勞動中產生的噪音。主要來自機器和高速設備，如：電氣設備的噪音來自變壓器和電動機；加熱通風設備的噪音來自噴出口、漩渦、風扇及其他運轉零件。一般電子工業和輕工業的噪音在90分貝以下，紡織廠的噪音約在90分貝~110分貝之間；機械工業噪音約在80分貝~100分貝；鑿岩機、大型球磨機約達120分貝；風鏟、大型鼓風機約在120分貝以上。

營建噪音主要指建築施工現場產生的噪音。在施工中大量使用各種動力機械，要進行開挖、打樁、攪拌，要頻繁地運輸材料和零件，而產生大量噪音。營建噪音對發展中都市的影響極大，雖然每項施工都具有暫時性。營建機械噪音最嚴重的是打樁機，距音源10m時，平均約105分貝；距音源30m時，平均約90分貝。

社會生活（近鄰）噪音主要指人們在商業交易、體育比賽、遊行集會、娛樂場所等各種社會活動中產生的喧鬧聲，以及收錄機、電視機、洗衣機等各種家電

的嘈雜聲，這類噪音一般約在80分貝以下。如：洗衣機、縫紉機噪音約為50分貝～80分貝；電風扇的噪音約為30分貝～65分貝；冷氣機、電視機約為70分貝^[30]。

環境噪音污染（影響）評估的內容是：評估實施引起的音環境品質的變化和外界噪音對需要安靜建設專案的影響程度；提出合理可行的防制措施，把噪音污染降低到允許標準；從音環境影響角度評估建設專案實施的可行性；為建設專案最佳化選址、選線、合理布局以及都市規劃提供科學依據^[31]。

按評估物件劃分：環境噪音污染評估可分為專案音源對外環境的影響評估和外環境音源對需要安靜的專案之影響評估。按音源種類劃分：環境噪音污染評估可分為固定音源和移動音源影響評估。

固定音源影響評估：主要指工礦企業、事業單位和航空、鐵路、公路、水運等部門所擁有的固定音源的噪音影響評估。移動音源影響評估：主要指在都市道路、公路、鐵路、軌道交通上行駛的車輛以及從事航空和水運等運輸工具，在行駛過程中產生的噪音的影響評估。項目既擁有固定音源，又擁有移動音源時，應分別進行噪音影響評估，並根據有關要求進行疊加影響評估。

一、一般環境噪音的評估指標：環境品質評估指標為均能音量 L_{eq} (Equivalent Continuous Noise Level)、日間均能音量 L_d (Day)、夜間均能音量 L_n (Night)、加權等效連續感覺噪音量 $WECPNL$ (Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level)；衝擊性噪音的指標為最大音量 L_{max} 。

二、音源強度表達量：A加權聲功率級 (L_{Aw}) 或中心頻率為63 Hz～8,000 Hz之8個八音階的聲功率級 (L_{octw})；距離音源 r 處的A加權音量 (L_r) 或中心頻率為63 Hz～8,000 Hz之8個八音階的噪音量 ($L_{p(r)}$)；有效感覺噪音量 $EPNL$ (Effective Perceived Noise Level)。

三、工業企業廠界噪音評估指標為 L_d 、 L_n ；衝擊性噪音的評估指標為 L_{max} 。

環境噪音污染評估指標的制定依據是環境基本噪音。目前國內外環境噪音污染評估中，一般使用「均能音量 L_{Aeq} 」作為評估指標。針對不同的噪音環境，各國大都參考ISO建議（例如：睡眠為30分貝），根據不同時間、不同地區和室內噪音受室外噪音影響的修正值以及本國具體情況來制定。

2.1.1 都市軌道交通

不同國家軌道交通噪音標準的制定往往根據國情不同而採取不同的評估方法，一些國家選擇 L_{eq} 或者 $L_{eq,24h}$ 作為評估指標，一些國家則增加了 L_{max} 作為 $L_{eq(1h)}$

輔助的評估指標^[32]，我國軌道交通目前已有平均最大音量（ $L_{\max, \text{mean}, 1h}$ ）指標。美國運輸部聯邦公共交通管理局（Federal Transit Administration, FTA）於1995年發布了《聯邦公共交通工程噪音、振動環境影響評估指南》，其中提出了一套都市軌道交通工程噪音環境影響評估標準，使用的評估指標是 L_{dn} 和軌道交通噪音1小時均能音量 $L_{\text{eq}(1h)}$ ^[33]，軌道交通 $L_{\text{eq}(1h)}$ 與我國相同。2005年，國際標準組織ISO修訂公布的《鐵路應用-聲學-軌道車輛噪音測量》（ISO 3095-2005），規定處於不同行駛狀態下軌道車輛噪音的測量方法，評估指標均為 L_{\max} 和 L_{eq} ^[34]。

國外對軌道交通噪音標準的研究起步較早，各國都制定了鐵路噪音法規或條例，表2.1-1列出了部分國家軌道交通噪音標準的評估指標和限值^[35]。

表 2.1-1 國外軌道交通噪音標準及評估指標^[35]

國家	允許類別	評估指標	日間	夜間	整天	建築物正面噪音量
法國	降低噪音計畫極限值	L_{eq}	60			60~70 (24h)
	高速線極限值	L_{\max}	65~75			
英國	新建鐵路線隔音法規	L_{eq}	68	63		63(6:00~24:00)
日本	新幹線標準	L_{\max}			85	
		L_{eq}			70	

由表2.1-1可見，部分國家選用 L_{\max} 和 L_{eq} 兩個評估指標，並分別規定了不同時段的標準值。軌道交通噪音標準有分為兩個時段（日間和夜間）；亦有分為三個時段或四個時段（如：我國分為早、日間、晚、夜間）；也有按24小時音量。採用不同的評估指標，有不同的標準值。由於列車是分時段運行並屬於間歇性的，其評估方法應考慮這個特點。

根據《GB 12525-90鐵路周界噪音限值及監測方法》^[36]、《GB 14227-2006都市軌道交通車站月臺聲學要求和測量方法》^[37]的規定，中國大陸之鐵路周界、都市軌道交通車站月臺噪音評估指標為日間均能音量（ L_d ）、夜間均能音量（ L_n ）。

都市軌道交通噪音引起的煩惱程度主要取決於五個因素^[35]：

一、噪音的強度：強度越高引起煩惱的可能性越大。大都市中的交通噪音源複雜多樣，列車通過時距離軌道7.5m處之音量一般可達到90 dB以上，因此軌道交通噪音在眾多交通噪音源中屬於高強度音源。

二、噪音的頻率：響度相同而頻率高的噪音比頻率低的噪音容易引起煩惱。都市軌道交通列車行駛或煞車時將產生高頻率之窄頻帶強噪音。相關研究表明，輪軌噪音峰值約在1k Hz~2k Hz範圍內，煞車引起的噪音之頻率集中在更高的頻率範圍內，另機動車輛行駛時產生的振動頻率集中於低頻範圍內。

三、噪音的漲落幅度：噪音量的漲落幅度愈大，則愈容易引起煩惱。而都市軌道交通沿線環境噪音漲落幅度較大，環境背景噪音與列車通過時的最大音量差值可達15 dB(A)~25 dB(A)以上。

四、噪音的暴露時段：噪音暴露時段正處於人群的休息時間，如：早晨和夜晚，則容易感到煩惱。

五、噪音的持續時間：衝擊性噪音與穩態噪音相比，前者更感覺煩惱。在環境噪音背景值不高的軌道交通沿線區域，列車經過時的最大音量持續時間一般只有數秒鐘，近似於衝擊性（脈衝）噪音。衝擊性噪音對睡眠的影響或引起主觀煩惱，最大音量的大小是一個重要的因素。因此用最大音量評估都市軌道交通噪音對人們的影響，與均能音量相比其與主觀評估的相關性較好。考量噪音的建議值時，交通噪音對人群主觀煩惱較大的最大音量 L_{max} ，可以引入均能音量 L_{eq} 的計算方法，使得 L_{eq} 更貼近交通沿線地區人群的實際主觀反應現狀。

2.1.2 機場周圍區域

中國及日本之機場周圍區域飛機（起飛、降落、低空飛越）的噪音環境評估指標為加權等效連續感覺噪音量（WECPNL）。各國航空噪音的評估指標詳如表 2.1-2 所示。

表 2.1-2 各國使用的航空噪音評估指標一覽表（1/2）

國家	噪音指標	音量單位及加權時段
澳洲 Australia	$10 \log \left(\sum_i g_i 10^{0.1L_i} \right) - 88$	L_i 單位 EPNdB $g_i=1$ 07:00~19:00 $=4$ 19:00~07:00
加拿大 Canada	$10 \log \left(\sum_i g_i 10^{0.1L_i} \right) - 88$	L_i 單位 EPNdB $g_i=1$ 07:00~22:00 $=16.67$ 22:00~07:00
瑞典 Sweden 丹麥Denmark	$10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i g_i 10^{0.1L_i} \right)$	L_i 單位 dB (A_x), $T=86,400s$ $g_i=1$ 07:00~19.00 $=3.14$ 19:00~22:00 $=10$ 22:00~07:00
德國 Germany	$13.3 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i g_i \times t_i 10^{L_i/13.3} \right)$	L_i 單位 PNdB $g_i=1$ daytime $=10$ nighttime

表 2.1-2 各國使用的航空噪音評估指標一覽表 (2/2)

國家	噪音指標	音量單位及加權時段
法國 France	$10 \log \left(\sum_i g_i L_i^{0.1} \right) - 32$	L_i 單位dB (A_{Smax}) ; $T=180 \times 86,400s$ $g_i=1.5$ 06:00~22:00 $=0$ 22:00~06:00 or $g_i=1$ 06:00~22:00 $=5$ 22:00~06:00
英國 Great Britain	$L_{Aeq,T}$	L_{Aeq} (16h) 06:00~22:00
日本 Japan 中國大陸 Mainland China	$10 \log \left(\sum_i g_i L_i^{0.1} \right) - 27$	L_i 單位dB (A_{Smax}) (各次最大A特性噪音量) $g_i=1$ 07:00~09:00 $=3$ 19:00~22:00 $=10$ 22:00~07:00
荷蘭 Netherlands	$20 \log \left(\sum_i g_i L_i^{Li/15} \right) - 157$	L_i 單位dB (A_{max}) , yearly flights $g_i=1$ 08:00~18:00 $=2$ 06:00~08:00 ; 18:00~23:00 $=10$ 23:00~06:00
挪威 Norway	$10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i g_i L_i^{0.1} \right)$	L_i 單位dB (A_x) , $T=86400s$ $g_i=1$ 08:00~18:00 $=5$ 06:00~08:00 ; 18:00~24:00 $=10$ 24:00~06:00
瑞士 Switzerland	$Li + 15 \log N - 80$	L_i 單位PNdB $_{max}$ (尖峰噪音位準 (Peak Noise Level)) N number during 06:00~22:00 (為飛機飛過數目)
美國 USA 紐西蘭 New Zealand	$10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_i g_i L_i^{0.1} \right)$	L_i 單位dB (A_x) , $T=86,400s$ $g_i=1$ 07:00~22:00 $=10$ 22:00~07:00

資料來源：

1. Aircraft noise guideline limits in Denmark.
2. Ministère des Transports. Airculaire du 6 October 1978 (modificatif du 23 fevrier 1983) .
3. Air Traffic Act of 1971-03-30. Bundesgesetzblatt I 1971, 282287.
4. UK Department of Environment : Planning Policy Guidance Note PPG24-Planning and Noise. Sep.1994 (The Civil Aviation Act 1982, The Airports Act 1986, Town and Country Planning Act 1990) .
5. Health and Welfare Canada : National guidelines for environmental noise control, Ottawa, Canada 1989.
6. Environmental Quality Standards For Aircraft Noise of 1973-12-27.
7. New Zealand Standard 6805, Airport Noise Management And Land Use Planning, 1992.
8. US Department of Housing And Urban Development, The Noise Guidebook, Washington DC, USA 1985.
9. Decree of Mistry of Environment 31.10.1997 (Methodology for the measurement of the aircraft noise around airports) , Decree of the President of the Republic 11.12.1997 (Measures for the control and reduction of the noise produced by civil aircrafts)
10. Swiss Noise Protection Ordinance of 1986-12-15: The Protection of the Environment, 1983.

某一噪音的感覺噪音量是在「吵鬧」上與該聲音相同的中心頻率為 1k Hz 的窄帶噪音的噪音量。它是基於「煩惱」而不是基於「響度」的主觀分析。同樣響度的聲音使人感到煩惱的程度並不完全一致，人們對於頻帶寬度較窄的、斷斷續續的、頻率高的和突發的噪音，特別感到煩躁不安。

計算感覺噪音量的步驟如下：首先查出頻帶噪音量的對應噪度，再計算總噪度。對於八音階

$$N_t = 0.3 \sum_{i=1}^N N_i + 0.7 N_m \quad (2.1.1)$$

對於 1/3 八音階

$$N_t = 0.15 \sum_{i=1}^N N_i + 0.85 N_m \quad (2.1.2)$$

式中： N_t 為總噪度，單位為納； N_i 為第 i 個頻帶噪音量相應的噪度； N_m 為 N_i 中的最大值。然後按照總噪度計算感覺噪音量：

$$L_{PN} = 33.3 \lg N_t + 40 \quad (2.1.3)$$

單位為 PNdB。加權網路相應於 40 PNdB 的等噪度曲線時，所測得的 D 加權音量讀數上加 7 分貝，即約為感覺噪音量。在感覺噪音量的基礎上，考慮持續時間和純音修正，建立有效感覺噪音量（EPNL），其定義為

$$EPNL = PNL_{T_{\text{最大}}} + D \quad (2.1.4)$$

式中： $PNL_{T_{\text{最大}}}$ 為考慮噪音頻譜中的分立成分而得到的最大感覺噪音量；D 為噪音作用持續時間的修正值：

$$PNL_{T_{\text{最大}}} = PNL + F \quad (2.1.5)$$

式中：F 為考慮噪音中純音成分的修正值。

在有效感覺噪音量 EPNL 的基礎上，考慮白天、晚上、夜間的不同效應等因素，對飛機噪音應用加權有效連續感覺噪音量（WECPNL），其定義為：

$$WECPNL = EPNL + 10 \times \log(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 39.4 \quad (2.1.6)$$

式中 N_1 為白天（7:00~19:00）的次數； N_2 為晚上（19:00~22:00）的次數； N_3 為夜間（22:00~7:00）的次數。大多數飛機的有效感覺噪音量可用下式近似求得：

$$EPNL = L_A + 13 \quad (2.1.7)$$

而加權有效連續感覺噪音量為：

$$\text{WECPNL} = L_A + 10 \lg(N_1 + 3N_2 + 10N_3) - 27 \quad (2.1.8)$$

對於一定時間內（如一天）反復多次的飛機噪音，可用噪音和數量指數 NNI 評估。

$$\text{NNI} = \bar{L}_{PN} + 10 \lg N - 80 \quad (2.1.9)$$

式中 \bar{L}_{PN} 為重複的 L_{PN} 的平均值；N 為飛機在一定時間內反復出現的次數。此外，還有眾多的飛機和機場噪音評估指標。如：

$$\begin{aligned} \text{CNR} &= \bar{L}_{PN} + 10 \lg N - 12 \\ \text{NEF} &= \text{EPNL} + 10 \lg N - 88 \\ N &= \bar{L}_{PN} + 10 \lg N - 30 \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

式中 N 為飛機起飛或降落次數。

2.1.3 營建周界

營建噪音是指其過程中產生干擾周圍生活環境的聲音，常用的評估指標有^[38]：

一、A加權音量：用A加權測得的噪音量，用 L_A 表示，單位dB(A)。

二、均能音量：等效連續A加權音量的簡稱，指在規定測量時間T內之A加權音量的能量平均值，用 $L_{Aeq,T}$ 表示，簡寫為 L_{Aeq} ，單位為dB(A)。根據定義，均能音量表示為：

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt \right) \quad (2.1.11)$$

式中： L_A 為t時刻的暫態A加權音量；T為測量時間。

三、最大音量：在規定測量時間內或對某一獨立噪音事件，測得的A加權音量最大值，用 L_{Amax} 表示，單位為dB(A)。

2.1.4 社會生活環境噪音源

中國大陸根據GB 22337-2008^[39]，社會生活（近鄰）噪音源周界噪音評估指標為日間均能音量（ L_d ）、夜間均能音量（ L_n ）、室內噪音八音階噪音量；非穩態噪音的評估指標為最大音量（ L_{max} ）。

某一段時間內的A加權音量按能量的平均值稱為A加權均能音量，簡稱均能音量或平均音量。計算均能音量，是把音量劃分為幾個區間加以處理：

$$L_{Aeq} = 10 \lg \left[\sum_{j=1}^N (P_j) (10^{L_{A_j}/10}) \right] \quad (2.1.12)$$

式中： P_j 為第 j 個音量區間內持續的時間，在總時間間隔中所占的比例； L_{A_j} 為第 j 個區間的中心音量值（分貝）。

如果噪音是穩態的，均能音量就是該噪音的 A 加權均能音量。均能音量是衡量人的噪音暴露量的一個重要物理量。國際標準化組織已採用均能音量的評估方法，許多國家的環境噪音標準也以均能音量為評估指標。

美國環境保護局推薦日夜均能音量（ L_{dn} ）用於環境噪音評估。它考慮噪音在夜間對人的影響特別嚴重，對夜間噪音進行增加 10 分貝的加權處理。其計算式為：

$$L_{dn} = 10 \lg \left[\frac{1}{24} \left(15 \times 10^{L_d/10} + 9 \times 10^{(L_n+10)/10} \right) \right] \quad (2.1.13)$$

式中： L_d 是白天（07:00~22:00）的均能音量； L_n 為夜間（22:00~07:00）的均能音量。

日夜均能音量自使用以來，獲得了較大的成功。1978 年美國 T.J.舒爾茨總結了各國 11 項噪音調查結果，發現高煩惱人數的百分率同日夜均能音量有很好的相關性。交談干擾、睡眠干擾以及廣播電視收聽干擾等效應與日夜音量之間也有依賴關係。

2.2 彙整研析國外建置環境噪音評估指標及噪音評估預測相關方法

環境噪音對人們的影響是一種長期的累積效應。各國研究者透過許多的研究工作，一般認為噪音對人的影響，與音源的作用時間長短、頻率高低、音量大小以及人的特性密切相關。其間構成較為複雜的關係，拋開任何一方都無法真實地說明實際情況。國際上通用的建立環境噪音污染評估指標量的方法是「社會調查」和「客觀測量」。

2.2.1 社會調查

社會調查指與有關噪音煩惱度評估的調查，以及由某區域的居住環境決定的聲音特徵之測量值或計算值。制定環境噪音標準通常採用社會調查法來瞭解社會各相關方對環境噪音的要求。具體方法是：調查居民對環境噪音的煩惱程度等內容，透過流行病學的統計方法建立噪音量和居民煩惱率等對應關係，從而確定環

境噪音標準值。日本^{[40][41]}、荷蘭^[42]、瑞典^[43]、法國^[44]、美國^[45]、德國^[46]及中國^[47]雖然都採用社會調查法，並將這種調查結果作為制定環境目標的基礎，但在實際應用時卻不可以絕對化。因為各國在許多的社會調查中發現，居民的陳情率與人們對各種噪音源的感受、習慣、忍耐程度、噪音影響、作用時間長短、程度影響…等多方面均有關係。

GB/Z 21233—2007聲學應用社會調查和社會聲學調查評估噪音煩惱度^[48]提出了社會調查的技術要求，引用如下：

一、有關煩惱度評估的問題有兩種表達方式：一種是口頭描述的，另一種是數位量化的。

(一)口頭描述的問題

請回憶一下過去（12個月或者其他時間），當你正在家的時候，是不是經常因為××發出的噪音的干擾而煩惱？

- 從來沒有？
- 很少？
- 有時候？
- 經常？
- 一直？

(二)數字量化的問題，附帶說明

透過0到10這十個數位對在家中因噪音干擾而產生的煩惱度進行量化。如被調查者從來沒有受到過干擾，則選擇0；如一直受到干擾，則選擇10；如處在以上兩種狀態之間，則選擇0到10之間的一個適當的數字。

問題：請回憶一下過去（12個月或者其他時間），0到10中哪個數位最能描述你因受到噪音干擾而產生的煩惱度？

二、有關噪音煩惱度的社會調查、社會聲學調查的其他技術指導規範

(一)每一個被調查者必須被問到兩種類型的問題，但不能根據是否受到噪音干擾或者居住此地的時間長短等基本回答而直接將他們進行分類。如果必須要確認被調查者是否受到噪音干擾，需在調查的最後單獨提出有關這樣的問題。

(二)不能首先問被調查者是否受到干擾，然後問如果受干擾則其煩惱程度是多少。

(三)有關煩惱度評估的問題應該放在問卷的前面，除非與其他的調查目的相衝突，或者此前已經存在有關噪音方面的更細的問題。如果根據調查目的，其他一些關於噪音煩惱度的問題顯得更加重要，那麼以上規範化的問題可以在後面提出。

(四)如要問有關煩惱度的問題，請不要暗示被調查者正處在這樣的噪音環境中。例如：可以問「飛機噪音」，但不要問「正飛過的飛機的噪音」。

(五)如預測試顯示被調查者發現問卷中存在重複的問題，需適當調整問卷的結構。

(六)如需要用答題卡，那麼口頭描述的五個等級應按照順序進行排列，且不標注任何數位。

(七)準備調查者用書面手冊。

無論是電話調查還是訪問調查，應為調查者配備書面手冊，內容包括：

- 指導調查者準確按照書面內容提問。
- 訓練調查者無法正確理解問卷問題時，對「我不知道」回答的反應方法，要求該方法不對問題給予解釋。
- 督促被調查者在提供的答案中作選擇。
- 鼓勵所有的被調查者回答問卷（新遷入的居民可回答最近居住階段的情況）。

當被調查者發現問卷中存在重複問題時，調查者應做的說明。

三、煩惱度等級評定過程的技術規範

若可以獲得各類噪音暴露，則應當給出問卷的結果的頻次分布或者累積分布。也應當給出其他（匯總）統計結果，如評定為一般或者中度煩惱的分值，或選擇某一煩惱度等級的被調查者的比率等等。

對於如何根據被調查者人數的比率來定義煩惱度等級的方法，如「高」煩惱度等級，不作規定^[48]。不同的國家或者不同的研究人員在評定等級時所截取的統計值不同，因而產生的結果也不同。只要符合規定的頻率分布，任何截取統計值的方法都可以被接受。

四、表2.1-3是進行社會調查之科學報告的基本技術要求。

表 2.1-3 進行社會調查之科學報告的基本技術要求

類別	序列	主題	基本內容
調查的 整體設計	1	調查時間	調查的年份和月份。
	2	調查地點	調查地點所在的國家和都市。
	3	調查點的選擇	其他任何調查時間和地點的重要特徵。 相對於噪音源的調查點的地圖或文字描述。
	4	調查範圍	調查點選擇的原則。 調查點選擇和排除的標準。
	5	調查要求	調查點的數量。 單個調查點的被調查者數量。 調查原始目標說明。
調查樣本 的設計	6	樣本的選擇	被調查者的選擇方法（可能人選概率、確定人選等）。 被調查者的排除標準（年齡、性別、居住時間等）。
	7	樣本數量和品質	問卷回收率。 不能回收的原因。
調查資料 的收集	8	調查方法	方法（面對面訪談、電話等）。
	9	問題的說明	主要問題的準確文字說明（包括可供選擇的答案）。
	10	樣本估算的精度	主要分析所需的樣本回饋數量。
聲學條件	11	噪音源	主要音源的類型（飛機噪音、道路交通噪音等）。 被考慮或者排除的音源的運行方式。 判別音源的方法草案（如：最小音量、運行方式、每週工作日數等）。
	12	環境噪音的特性值	根據 GB/T 3222.1-2006、ISO 1996-2、ISO 1996-3 或 ISO 3891（可被引用的版本），完整表達每個調查點的環境噪音特徵值： —提供所有調查點的 $L_{Aeq,24h}$ 、 L_{dn} 和 L_{den} （或者某時間段的 L_{Aeq} ）。 —提供在特殊研究條件下所需的 $L_{Aeq,24h}$ 、 L_{dn} 和 L_{den} 的計算公式。 —對計算公式進行適當的說明和注解。 —提供脈衝和/或單頻音或有調音的修正方法。
	13	時間段	一天中記錄噪音的小時數。 記錄噪音的時間段（年數、月數）。
	14	評估/測量程式	評估方法（建模方法、採樣期間的測量方法等）。
	15	參考位置	相對於噪音源和反射面的標稱位置。 給出最吵外牆的噪音暴露量（或給出轉換原則），指出來自外牆反射音是否計算在內。
	16	噪音評估的精確度	噪音暴露評估精確度方面可獲得的最好資訊。
	17	劑量－反應關係	每一類噪音暴露的煩惱度頻率列表。
基本的劑 量－反應 分析	17	劑量－反應關係	每一類噪音暴露的煩惱度頻率列表。

以鐵路噪音為例，介紹社會調查的具體方法。研究鐵路環境噪音評估方法的最終目的，是為確定能夠表徵鐵路噪音並與受試者人群主觀反應基本吻合的、可以直接測量或透過計算得出的客觀評估指標，並在此基礎上建立起不同人群所能接受的標準，從而達到合理控制鐵路噪音的目標。

民眾是鐵路噪音污染的主要受害者，民眾對鐵路噪音污染的主觀感受，可以直接反映出鐵路噪音污染程度和影響。為了客觀、公正地評估噪音對民眾的影響，各國研究人員對此進行了廣泛的調查和試驗研究，將民眾受干擾的程度，分別以噪音強度和民眾的主觀反映之間的相關關係，或透過實驗獲得客觀影響來進行說明。透過社會調查，瞭解民眾對環境的主觀反映，是研究鐵路噪音污染狀況的一種較為實用的方法。

首先，為避免調查表中的內容、格式存在缺陷，建議先在小範圍內進行開放式問卷調查，在回收上來的開放式調查表的基礎上，設計調查表。調查表中的內容應力求簡單、明瞭，應以簡練明確的語言說明某調查內容，儘量避免模稜兩可、似是而非、不易判斷的語言，以免受試者畏縮繁瑣的選擇內容而不願配合調查或者拒絕調查^[49]。

其次，在考慮調查區域時，應考慮鐵路單線、多線、既有線、新線和高架橋梁等不同鐵路運營環境，選擇不同規模的都市以代表不同地域、不同人群（包括：文化、生活理念等）的影響。調查、測量時間儘量選擇在春秋兩季，避免因夏季蟲鳴、冬季關閉門窗，無法客觀地說明鐵路環境噪音對人群的影響。調查表儘量按照調查範圍內人群的年齡、職業、居住分布等隨機發放。

調查工作採用受過培訓的人員登門送、收調查表的方式，在不做任何暗示、受試者不瞭解調查人員本意的情況下，由受試者親自填寫，遇到文盲或半文盲時，可以由調查人員採取問答的方式進行。原則上每戶填寫1份。收表時，調查人員應及時檢查調查表中的內容，若發現填寫中出現內容相互矛盾或有內容遺漏的地方，應告知受試者並及時進行修改，以期提高調查表的質疑和回收率。

為了真實反映鐵路環境噪音對居民的影響程度，按照相關規定同步進行鐵路環境噪音的監測。為了比較全面、客觀地反映所測音量與該測點處受試者所接受到的音量情況，每個測點周圍調查的人數最好不少於20人^[49]。

社會調查法主要調查受試者對鐵路環境噪音的主觀反應。一般包括：物理因素影響、生理影響、心理影響和社會影響等。鐵路噪音主觀評估主要針對心理和生理的影響進行調查。

調查按照內容不同，基本可以分為4大類^[49]，即：

一、受試者基本情況：包括性別、年齡、職業、居住年限、健康狀況等。調查表中應注明受試者居住的詳細地址，包括：居住樓層，臥室、客廳與污染源的相對位置等。在調查過程中，要著重考慮不同年齡段人群的分布。為了避免老年性耳聾對調查結果的影響，可以將年齡上限定為70歲。最好對居住年限沒有限制。這是由於人們對環境影響有不同程度的耐受性和對某種事物的習慣或依賴，因此造成新線和既有線、新住戶與老住戶對環境污染源的感受和反應有較大的區別。健康狀況調查的主要目的是為了剔除耳聾、神經衰弱、心腦血管疾患等對調查結果的影響。

二、環境污染源及其主要污染因素：包括公路交通運輸、飛機、鐵路、工廠、營建、生活等主要污染源；其污染因素主要為污水、廢氣、異味、噪音、振動、電磁輻射等。

三、心理影響：研究發現人們對噪音的各種反應中，對人體健康影響最有價值的反應是煩惱，而不是干擾^[50]。因此，心理影響以對噪音的煩惱程度來表示，即主觀煩惱度。一般由輕至重，即由不煩惱到非常煩惱分為幾檔，用以判斷某種污染源對人群產生的煩惱程度。

國內外有報導將煩惱程度分為5檔，即：不煩、有些煩、煩、非常煩和嚴重煩惱，並採用後2檔，即「非常煩」和「嚴重煩惱」作為高煩惱的界限^[42, 44, 45, 51, 52]。ISO也將音量與煩惱率的關係用「高煩惱」來表示受到煩惱的程度^[53]。

四、生理影響：生理功能干擾是表示人們認識的一種反應，是各種外界因素，包括：個體情緒對其生理、心理行為的一種不良反應。生理功能干擾一般分為對睡眠、思考和語言交流等方面的干擾。對健康而言，影響的主要因素為睡眠^[54]。一般由輕至重分為4階層或5階層，取後2層或後3層作為高干擾^[50, 53, 54]。基於上述「心理影響」所述原因，取後2層作為高干擾的界限。

2.2.2 客觀測量

區域音環境評估目前多採用GB/T 14623-93《都市區域環境噪音測量方法》^[55]規定的網格或定點測量、評估方法，輔以GB/T 3222-1994《聲學·環境噪音測量方法》^[54]規定的都市道路交通噪音測量、評估方法。

「網格法」是將評估區域分成相等大小的正方形網格，在網格中心或距網格中心點最近的可測量位置布置測點，在規定的測量時間內測得10min之A加權均能音量，然後對所有網格社區的均能音量取算術平均值，作為整個評估區域的音環境品質評估指標。

在都市噪音普查中採用的網格定點測量方法：將市區按500公尺×500公尺劃分成網格（小都市按250公尺×250公尺），網格中心定為測量點，全市測量點要多於100個。測量每一個測量點時，麥克風離地面1.2公尺高，用音量記錄器或噪音統計分布儀連續測量15分鐘，或用噪音計按5秒間隔的時間讀取A加權音量瞬時值，一般可取200個資料，用以計算均能音量 L_{eq} 。日夜分別進行測量，可以計算日夜均能音量 L_{dn} ^[54]。

定點測量評估是針對評估區域選取一系列具有代表性的點位測量均能音量，以其所代表小區域的面積為權重，計算整個評估區域的面積之加權均能音量平均值，代表其環境噪音平均位準。事實上，網格測量評估法可以視為定點測量評估法的一種特例。

環境噪音現狀測量和測量時段：

一、測量指標

(一)環境噪音測量 L_{Aeq} 值；高音量的突發性噪音測量為 L_{Amax} 值；機場飛機噪音測量WECPNL（加權等效連續感覺噪音量）。

(二)噪音源的測量有八音階噪音量、總噪音量、A加權音量或音功率級等。

(三)衝擊性噪音應同時測量A加權音量及脈衝週期。

二、測量時段

(一)應在音源正常運轉或運行情況的條件下測量。

(二)每一測點，應分別進行日間、夜間的測量。測量時間與時段應有代表性，要符合各類音源環境的監測技術規範。對於噪音起伏較大的情況（如：道路交通噪音、鐵路噪音等），應增加日間、夜間的測量次數，或進行日夜24小時連

續測量，以取得較為客觀、準確的現狀值。機場飛機噪音必要時應進行一個飛行週期（一般為一週）的噪音測量。

2.2.3 環境噪音評估預測相關方法

噪音評估模式種類繁多，因此如何選擇適當的模式就非常重要，如果能夠選用模式適當，將有助於提升噪音預測結果的準確度並縮短工作時間。目前按照環境噪音源的特點和分類，將噪音評估預測模式分為四大類：都市交通道路噪音系統、鐵路噪音系統、工廠及建築工廠噪音系統、航空噪音系統及社會生活（近鄰）噪音系統，各類模式再細分如下^[56]：

一、道路系統噪音模式，其中包括：高速公路噪音模式、一般道路噪音模式、高架道路噪音模式和隧道出口道路噪音模式。目前國際上常用的道路噪音電腦模擬軟體主要有Mithra、CadnaA、Stamina & Optima及SounPLAN。而Mithra、CadnaA、SounPLAN軟體因其涵蓋之模式功能強大，已日漸為各大工程顧問公司或業主指定使用的預測評估軟體。

二、鐵路系統噪音模式，其中包括：捷運噪音模式、一般鐵路噪音模式、高速鐵路噪音模式。Mithra、CadnaA、SounPLAN軟體可應用一般鐵路及捷運系統，操作簡便且實用精確，適於可行性及規劃、環評等初步評估的應用。

三、廠（場）區噪音模式，包括：工廠企業噪音模式和建築工廠噪音模式。廠（場）區噪音模式大多用於規劃設計或環評階段，Mithra、CadnaA及SounPLAN是使用最廣泛的廠（場）區噪音軟體，其功能尚稱完整，故能滿足大部分廠（場）區之噪音預測應用。

四、航空噪音模式

飛機之噪音大致可細分為構架噪音（Airframe Noise）及引擎噪音（Engine Noise）二種，前者是由飛機構架引起，包括：機翼起落架、縫翼、襟翼安定面、機輪槽等，這些構架在飛機起落時較常用到，影響地面居民較大。至於飛機的引擎噪音可分為內部噪音及外部噪音，所謂內部噪音包括：風扇、壓縮器和渦輪噪音，其特性為具純音（Pure Tone）特性，頻率範圍為2,000 Hz至4,000 Hz之間；所謂外部噪音是指排氣噪音（Jet Exhaust Noise），主要由於噴嘴之高溫、高速的噴射氣流與周圍大氣強烈的剪切作用與擾動混合過程所產生的噪音，其噪音為一種寬頻的噪音，噪音量與排氣速度有關^[56]。

目前可查知的航空噪音預測模式有：美國整合噪音模式（INM）；美國MGA公司NOISEMAP 6.0飛航噪音模式；美國FAA飛航環境規劃（設計）評估工具AEDT；美國直升機噪音模式（HNM）；德國CANDA-AzB模式；德國SounPLAN軟體和美國NEF模式。在航空交通噪音預測模式應用上，由於航空噪音音源大、來源複雜且影響範圍大，一般多以飛機種類、起降時間分布、方向、起降特性等因素，輸入電腦軟體之預測模式加以計算。在一般環境噪音評估預測相關方法方面，依據國內外的研究，噪音的預測模式可分類為經驗公式、解析模式、電腦模式及模型實驗等4種^[56]。

一、經驗公式：經驗公式多應用在道路及鐵路噪音模式，是將噪音測量值和交通狀況（車速、交通量、交通信號等）、道路及鐵路條件（縱剖面）及其周邊環境條件（地形、地面、植栽、氣候等條件）等因素，利用多元回歸(Multiple Regression)的方法建立成相關方程式或曲線圖，然後導出交通噪音預測模式。

二、解析模式：解析模式應用在道路時，是由研究單一車輛所產生之噪音，建立道路上各種車流狀況的噪音模式，包含：(1)假設車流產生的聲音來自線性音源（Acoustic Line Source）的每單位長度的音功率，所有車輛均等分配構成連續性線音源的聲音位準測定模式；及(2)車輛間距為等距分配，構成不連續的音源，而誘導出音源沿一假設等量單車道的聲音位準測定模式。

三、電腦模式：此方法在道路及鐵路中應用，是利用電腦模擬車流行駛於所定之構造及線型的道路及鐵路上所可能產生的交通噪音。模擬的條件主要包括：道路構造及線型、地形、遮音體、車流量及空氣衰減、繞射、距離衰減等因素。近年來此類模式發展日益普遍，由於其電腦快速運算的強大功能，並可配合相關周邊設備輸出圖表，對於提供快速準確的模擬結果，有很大的幫助。

四、模型實驗之預測：日本有使用在道路及鐵路噪音之應用實例，是利用模型使交通、道路、鐵路及環境條件的重現而進行實驗，可掌握音壓位準及傳播特性。

上述四種模式中，第一種方法所建立的噪音預測模式屬於經驗法則，受當地交通狀況變化影響，但基本上仍是來自統計多元回歸分析的基本觀念及方法而應用的，所以容易被人們所接受，因此傳統上交通噪音預測模式的發展趨勢偏重於此。

第二、三種方法所建立的噪音預測模式屬於理論分析和系統模擬，可以設定各種交通狀況，再由數學及聲學理論模擬演算複雜的交通狀況，在以往實際應用上較為困難。近年來，隨著電腦軟體功能快速發展，利用電腦快速運算的強大功能，發展出許多功能完整的噪音電腦預測模式，因此成為目前應用的主流。

第四種方法適於道路、鐵路構造及周邊地形環境複雜之狀況，當上述其他各種方法難以掌握其變化時為唯一之有效方法，但必須要有相關的設備及設施。

現在國際上用得比較多的環境噪音軟體（特指空氣音傳播噪音模擬），包括：德國 SoundPLAN、丹麥 LimaTM、德國 CadnaA 及法國 Mithra 等，從原理上來看，由於都僅僅考慮空氣音傳播，故比較簡單。SoundPLAN 用的是比較精確的扇面法（Sector Method），CandnaA 及 lima 都是音線法（Ray Tracing Method，簡稱 RTM）。例如：臺灣及中國大陸用的較多的是 SoundPLAN 及 CadnaA，LimaTM 屬於 B&K 公司旗下，但在臺灣及中國大陸用得不多。從專業角度來看，SoundPLAN 更加適合工業噪音分析，比如廠界噪音等，在跨國大型工廠實踐用得最多，比如一些電廠、石油化工等單位。而 CadnaA 更多用於都市大範圍的噪音色階圖。

第三章 蒐集國外住宅區室內音量品質指標、噪音測量、建議值及評估模擬方法

3.1 蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果

以下蒐集包括：(1)韓國；(2)中國大陸；(3)香港；(4)日本；(5)歐盟；及(6)美國之住宅區音環境現況。綜合分析各國之統計數據，可以看出國外對於居住區之音環境質量的要求也日益殷切，如何提升其音環境質量已經成為世界性的課題。

3.1.1 國外住宅區音量現況

3.1.1.1 韓國^[57]

在韓國，居住在集合式住宅（如公寓）的居民比例約為71%，此一比例比其他國家（如：歐美日）高得多。而臺灣因地狹人稠，故集合式住宅亦佔有相當高之比例，故韓國之住宅區音環境現況可供參考，以期有助於解決國內之住宅區噪音問題。過去幾年來，公寓噪音已成為一個主要的韓國社會問題，因為近年來發生多件涉及公寓噪音的命案，引發全國重視此一問題的嚴重性。「樓板缺陷」被認為是爭端日益增多的首要原因，但在公寓噪音引起爭端日增的背後，還有更基本的原因，例如：個人主義高漲、溝通不良和缺乏瞭解。一旦因為公寓噪音而引發爭端，目前在韓國並沒有一套處理標準，可供遭受噪音煩擾的居民依循。

一、現況背景

2010年韓國住宅普查的結果顯示，全國公寓居民的比例約為71%，遠高於其他國家，如圖3.1-1所示。雖然因為居民疏忽和樓板結構缺陷而引發涉及公寓噪音的投訴越來越多，但韓國目前並無立法可管制公寓噪音。

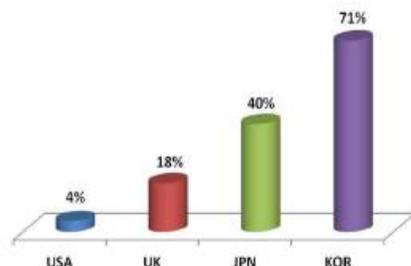


Figure 1 – Percentage of apartment residents (2010)

圖3.1-1 韓國公寓居民之比例（2010年）^[57]

二、公寓噪音現況

公寓噪音的原因大致可分為兩大類：公寓建築結構缺陷和居民疏忽。

(一)公寓建築結構缺陷

公寓噪音的致因一半以上的責任歸於建商，因為樓板及隔牆狀況不佳。韓國政府有針對樓板撞擊音制定標準。根據這項標準，輕量撞擊噪音可確保低於58 dB，重量撞擊噪音可確保低於50 dB，樓板厚度要求從原來的180mm增加為210mm。然而，建築結構即使達到這些規定，亦無法有效降低公寓噪音，反而會增加相關的抱怨。

韓國政府計畫從2014年起推行新的公寓結構標準，規定樓板無論「厚度」和「表現」均須達到結構標準。政府並決定引進「柱型結構」施工方法（透過樓板和梁柱傳遞力量），以達到絕佳的公寓隔音效果。政府已責成韓國土地及住宅開發公司（KLHC）引進這項工法，並透過各項獎勵辦法（如：容積率和稅務優惠），積極推動柱型結構工法。

(二)居民疏忽

事實上，公寓噪音抱怨的主要致因來自居民缺乏社區意識。根據韓國環境部最近的一項調查，73%的噪音抱怨來自鄰居家裡小孩奔跑或走路很大聲，其次依序是洗衣機或清潔機產生的噪音、拖動家具或彈奏樂器，如圖3.1-2所示。

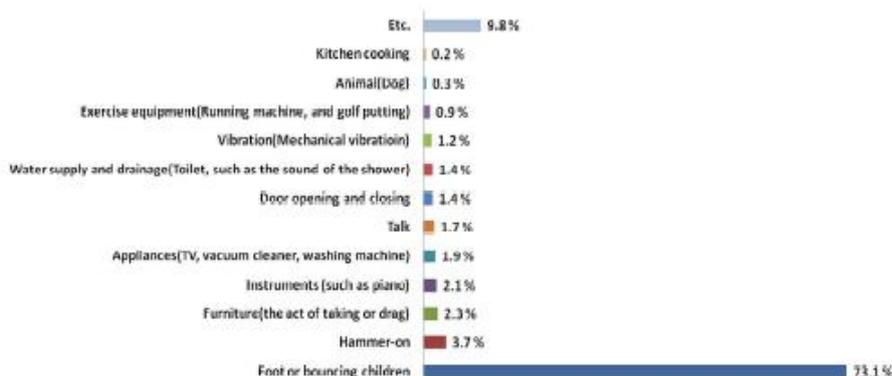


Figure 2 - Causes of the apartment noise in Korea (2012)

圖3.1-2 韓國公寓噪音之成因（2012年）^[57]

1.公寓管理協定

公寓管理協定的標準係根據住宅法（Housing Act）決定的。這項

協定規定有關公寓噪音的事務。然而，這些規定仍然不夠，因為公寓管理協定只做了原則性規定，並未提出具體方法及標準。韓國政府近來決定具體化居家生活噪音防制的內容（包括公寓噪音），並落實公寓管理協定的一般標準。預期這些作為將納入分時段和公寓噪音類型的禁止活動。

2.公寓噪音爭端之解決

韓國政府於2012年成立了公寓噪音中心（Apartment noise Center）來調解公寓噪音引起的爭端。公寓噪音中心提供由專家負責解答的求助熱線，並協助現場噪音測量，以期有助於公寓噪音爭端雙方對實情的瞭解，進而達到衝突的解決，如圖3.1-4所示。根據調查，公寓噪音中心成立以後，2012年公寓噪音訴願案件達7,021件，較2011年多出20倍以上，如圖3.1-3所示。目前公寓噪音中心僅受理都會區居民的訴願，這項服務未來將擴大到全國。

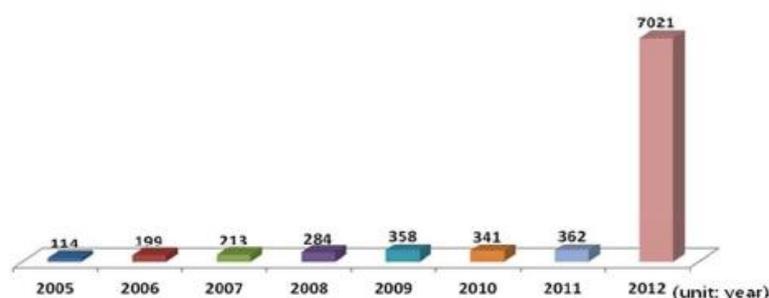


Figure 4 – The number of complaints about apartment noise in Korea

圖3.1-3 韓國公寓噪音訴願案件量^[57]

受理	線上受理，分析訴願 (若無法網路投訴，受理電話訴願)		
檢視解決方案	典型個案，依例處理 (必要時，諮詢專家意見)		
求助熱線	建議解決辦法及調解		
製作諮詢報告 (滿意度調查)	訴願獲得滿意解決	無	尋求專家鑑定
現場鑑定及測量服務	陪同外部專家至現場進行鑑定及測量		
製作鑑定報告 (滿意度調查)	訴願獲得滿意解決	無	訴諸 「國家環境爭端處理委員會」

圖3.1-4 韓國公寓噪音爭端解決流程^[57]

3.1.1.2 中國大陸

隨著中國城市建設迅速發展，城市的噪音問題也較以前有所增加。近年來，中國城市投訴各種環境污染問題的事件中，噪音污染的投訴佔有相當大的比重，其中絕大多數是居民對其居住環境受噪音干擾的不滿。

一、區域音環境^[58]

2015年，321個進行日間監測的地級以上城市，區域音環境質量平均值為54.1 dB(A)。其中，日間區域音環境質量為一級的城市佔4.0%，比2014年上升2.2個百分點；二級的城市佔68.5%，比2014年下降3.1個百分點；三級的城市佔26.2%，比2014年下降0.1個百分點；四級的城市佔0.9%，比2014年上升0.6個百分點；五級的城市佔0.3%，比2014年上升0.3個百分點，如圖3.1-5所示。

二、城市功能區音環境^[58]

2015年，308個城市功能區音環境監測的日間監測點次達標率平均為92.4%，比2014年上升1.1個百分點；夜間監測點次達標率平均為74.3%，比2014年上升2.5個百分點。各類城市功能區音環境質量日間達標率均高於夜間，如圖3.1-6所示。

據調查，中國大約2/3的城市居民生活在超過標準的音環境中，噪音污染影響範圍也逐漸增大。隨著生活質量的不斷提高，人們渴望一個安靜和諧的生活、學習、工作的環境，控制噪音污染是城市面臨的亟需解決的環境問題。

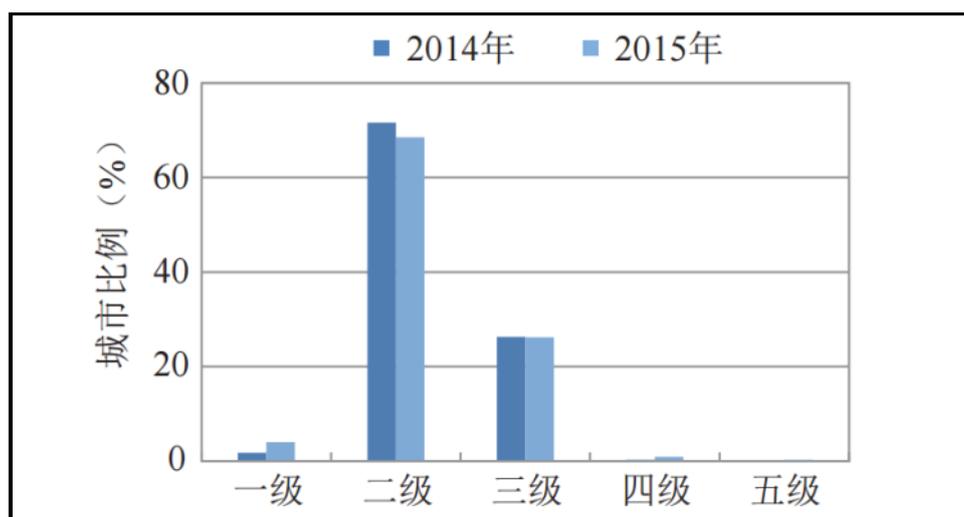


圖3.1-5 中國大陸2015年地級以上城市日間區域音環境狀況年際比較^[58]

註：區域音環境平均等效音級小於或等於50.0 dB(A)為一級；50.1～55.0為二級；55.1～60.0為三級；60.1～65.0為四級；大於65.0為五級。

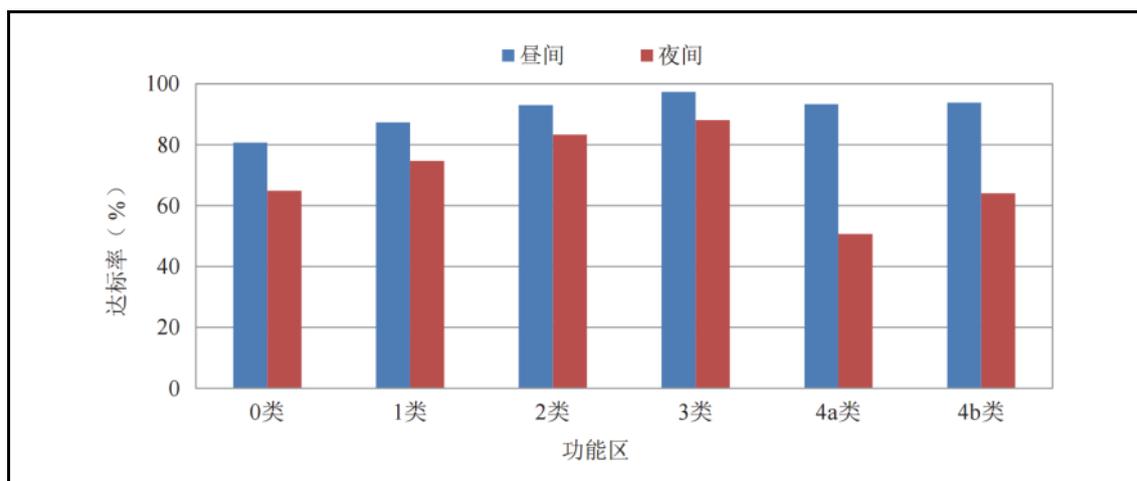


圖3.1-6 中國大陸2015年地級以上城市各類功能區達標情況^[58]

註：0類功能區指康復療養區等特別需要安靜的區域；1類功能區指以居民住宅、醫療衛生、文化教育、科研設計、行政辦公為主功能，需要保持安靜的區域；2類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；4a類功能區指道路交通兩側區域；4b類功能區指鐵路幹線兩側區域。

根據中國52個噪音監測網路城市的監測，除少數城市各類功能區之噪音未超過《城市區域環境噪音標準》（GB 3096 - 93）^[59]之噪音標準限值，其餘城市均有不同程度之超標。大體上而言，夜間比日間超標率高，0類和4類功能區超標率高於其它類功能區。

這些數據表明，中國的噪音狀況亟待改善。而且隨著城市中機動車量的猛增，使得交通噪音極大地影響了城市臨街區域的音環境，城市區域環境噪音污染程度加大，多數臨街住戶身受其害。由此可以看出，中國的居住區音環境質量總體看來是不令人滿意的。中國城市居住區中的噪音污染主要來自於四個方面：(1)道路交通噪音；(2)社會生活噪音；(3)工業噪音；及(4)建築施工噪音。據統計，在影響城市環境的各種噪音來源中，社會生活噪音約47%；工業噪音約8%~10%；建築施工噪音約5%；交通噪音約30%^[60]。

3.1.1.3 香港^[61]

一、噪音問題

如其他國際大都會，香港須要處理噪音的問題。過量的交通噪音成為香港特區政府最嚴重的噪音問題，滋擾約96萬市民（詳情請參閱"香港道路交通噪音分布情況"）。由於過往城市規劃不善與及發展項目過於密集，公路緊貼民居的情

況構成棘手的問題。80年代及90年代香港經濟蓬勃發展，處處皆是建築工程，交通日趨繁忙，這些亦是噪音問題的源頭。此外，建築工程、通風系統、防盜警鐘及鄰里所發出不同程度砰砰、轟轟或刺耳的噪音亦影響市民的生活。

二、交通噪音

環境保護署正處理兩類的交通噪音源-新建道路和現有道路。從1990年開始，新建道路已沿途加設了逾105公里的隔音屏障和隔音罩，讓35萬市民受惠，並且低噪音路面已普遍地應用在許多新建道路上。除此之外，環保署還就新建道路及建築物的設計提供減低噪音的建議。



相比之下，現有道路的噪音問題更為棘手。香港共約有600條道路的交通噪音超過70 dB(A)，其中約40個路段可循工務計畫設置隔音屏障。解決其他現有道路噪音問題的方法則需另作考慮，方案包括：交通管制及減少使用車輛。經過多番努力，現時約有90%的新建住宅樓宇的交通噪音已低於70 dB(A) L₁₀(1小時)。

三、建築噪音

環保署在1986年成立時，建築噪音是主要的問題。當時市區建築地盤的打樁機每天12小時運作，每12位市民便有1位受到打樁噪音滋擾。政府於1989年實施《噪音管制條例》，其後逐漸加強管制建築噪音。目前已建區的建築工地每日只可進行3小時至5小時打樁工程，而且必須採用低噪音打樁設備，其他嘈吵建築工序則受管制。然而，時至今日建築噪音的問題仍未徹底解決。環保署正探究問題癥結，並鼓勵建造業成員自律守法，改變他們把罰款納入經營成本的錯誤觀念。



然而，時至今日建築噪音的問題仍未徹底解決。環保署正探究問題癥結，並鼓勵建造業成員自律守法，改變他們把罰款納入經營成本的錯誤觀念。

四、飛機及其他噪音

飛機噪音由民航處負責管制。該處會監測噪音位準及規定航空公司採納較寧靜的飛行常規，例如：在飛機起飛時實施消減噪音的步驟。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，啟德機場附近盡是稠密的住宅區，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。

3.1.1.4 日本^[62]

圖3.1-7為日本全國歷年來噪音陳情數量變化情形，圖中顯示陳情案件數自從噪音管制法頒布以來，有逐年下降的趨勢，但1999年後又逐漸升高，至2006年又呈下降情形。圖3.1-8為2009年的統計資料，在15,101件陳情案中，工廠及營業場所佔31.6%居首位，佔第二位的是營建工地為27.8%。近年來，來自於家戶或營業場所空調設備噪音陳情案件有增加的趨勢，2009年之家庭生活噪音陳情約佔7.2%。

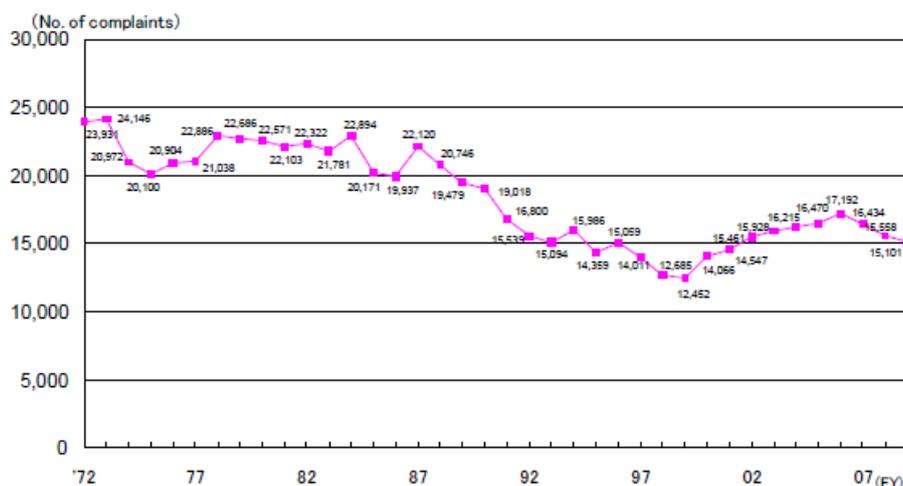


圖3.1-7 日本歷年來噪音陳情數量變化情形^[62]

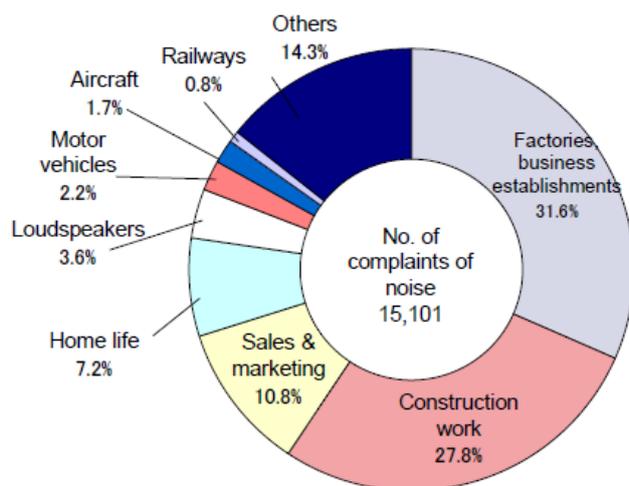


圖3.1-8 日本2009年噪音陳情對象百分比^[62]

3.1.1.5 歐盟

歐盟國居住區之音環境的影響因素主要是：(1)交通噪音；(2)工業噪音；及(3)社會生活噪音。根據世界衛生組織1999年的統計，歐洲國家中大約40%的人口暴露在噪音為55 dB(A)的交通噪音中，20%的人口白天暴露在噪音超過65 dB(A)的交通噪音中。考慮到所有的交通噪音暴露，那麼估計約一半的歐盟國家的人口居住在不能保證居民聲音舒適的地區，至少30%的居民於夜晚暴露在噪音超過55 dB(A)之影響人睡眠的噪音環境中。發展中國家的城市噪音污染更為嚴重，主要是交通噪音。調查收集到的數據表明噪音在24小時內是75 dB(A)~80 dB(A)^[63]。

1996年歐洲共同體委員會在《未來噪音政策》綠皮書中指出，有20%的歐盟人口（約8,000萬人）生活在「黑色區域」（指環境噪音大於65 dB(A)的嚴重干擾區域）；有42%的人口（約1億7千萬人）生活在「灰色區域」（指環境噪音在55 dB(A)~65 dB(A)之間的中等干擾區域）；只有38%的歐盟人口居住在環境噪音在55 dB(A)以下的區域^[64]。

歐盟各成員國居住區之音環境的狀況也各不相同。例如：噪音控制與管理比較好的英國，其居住區之音環境的狀況也並不十分樂觀。根據英國環保署的調查，英國居住音環境受到更多的社會生活噪音之干擾。

夜間過高的音樂噪音等家庭生活噪聲成為投訴很高的事件，另外，住宅中的二次噪音干擾和非噪音問題在噪音投訴中也佔據了相當大的比重。根據英國的環境健康學會（Chartered Institute of Environmental Health, CIEH）1997~1998年度公布的報告^[65]，大約有14萬件（平均每百萬人5,050件）的噪音投訴是關於居住生活噪音的。從1987~1997年，對於生活噪音的投訴增加了2倍。英國環保署的調查還顯示，大約7%的英國住宅室外噪音量超過68 dB(A)。

在荷蘭的阿姆斯特丹有29%居民抱怨鄰里噪音干擾；28%的住宅經常受到交通噪音的干擾。根據世界衛生組織2009年出版的《歐洲夜晚噪音指南》的統計，荷蘭夜晚受有害健康之噪音暴露影響的人口在增加^[66]。

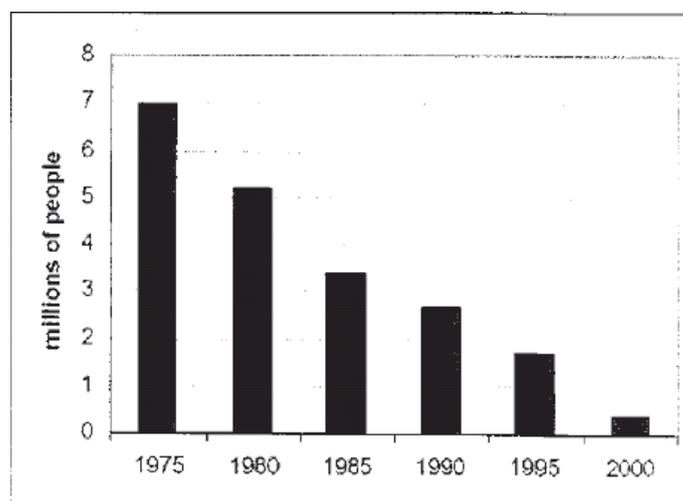
3.1.1.6 美國

美國的居住區之音環境主要受到來自「交通噪音」的干擾。在美國國家環保署的年度公報中，也沒有把噪音問題列為一個專題。表3.1-1是1980年美國暴露在交通噪音干擾下的人口比例^[67]。

表3.1-1 美國1980年遭受交通噪音干擾人口比例統計^[67]

噪音型式	> 55 dB(A)	> 65 dB(A)
道路交通	37.0%	7.0%
鐵路交通	2.4%	1.0%
航空噪音	9.0%	2.0%

從以上的數據可以看出，美國道路交通噪音和航空噪音擾民的現象比較嚴重。需要說明的是，美國的航空噪音從1975年~2000年發生了極大的變化，影響人口從700萬人下降到不足50萬人，這得益於美國航空署所做的噪音控制措施，主要有：(1)改變飛機的飛行路線；(2)減少夜晚的航班架次；及(3)改進飛機的性能降低噪音等手段，使得受航空噪音影響的居民數量大幅度的下降^[67]。圖3.1-9為美國暴露在65 dB(A)以上航空噪音的人口。

圖3.1-9 美國1975年至2000年暴露在65 dB(A)以上航空噪音的人口^[67]

3.1.2 住宅區民眾噪音煩惱度

長期受低頻噪音影響，可能產生神經衰弱症候群，極易導致神經衰弱、失眠、頭痛等各種神經官能症，影響人體健康。單調的低頻噪音還會引發視力障礙、交感神經緊張、末梢血管收縮、心動過速、呼吸頻率改變、血壓升高、消化機能減弱或紊亂、內分泌失調等症狀。

一、中國大陸

以中國大陸之研究為例，「居住環境中低頻雜訊的煩惱度調查研究^[68]」，主要針對城市居住區域典型低頻噪音煩惱度以及低頻噪音對人們生理和心理的影響進行調查分析。以主觀問卷之型式進行調查，調查人群為全國範圍內的大型城

市，包括：北京、天津、大連、西安、杭州、廣州、深圳、海口、三亞、西寧及重慶，11 個城市近 3,000 人。調查結果分析發現：性別對低頻噪音煩惱度的影響不大；隨著年齡的增長，人對低頻噪音的煩惱呈增長趨勢；人對聲音的敏感程度越高，對低頻噪音的煩惱程度也越高。而居住環境中存在的低頻噪音對人們生活產生的主要影響為：(1)對人的睡眠品質影響；(2)對精神集中力和注意力的影響；及(3)引起胸部不適。

中國大陸低頻噪音煩惱度的調查，北京市勞動保護科學研究所的「城市環境中低頻雜訊煩惱度調查研究^[69]」，匯總分析了低頻噪音的物理特性、響度特性和煩惱度特性。指出了低頻噪音的研究頻率範圍從 10 Hz~200 Hz。明確了低頻噪音響度隨噪音的增加迅速增大；相同的 A 加權，低頻噪音比高頻噪音對人們的干擾更大，A 加權的噪音低估了 200 Hz 以下低頻噪音的干擾。此次對全國部分主要城市之低頻噪音煩惱度主觀調查顯示：中國城市居民中 57.62%的人口認為自己對噪音敏感；針對城市主要低頻噪音源，包括：空調室外機、冷卻塔、水泵、電梯和公車的主觀調查，90%左右的人存在不同程度的煩惱，其中噪音敏感人群煩惱程度高於其他人群。

「居住區環境雜訊特徵及煩惱度研究^[70]」以現場採樣的方式為主，對住宅區供電系統、給排水系統、空調系統和地下停車庫 4 類系統的主要噪音源進行了實錄。在分析軟體對噪音八音階分析的基礎上，通過噪音能量與音壓的平方成正比的關係，求得低頻（中心頻率 63 Hz、125 Hz 和 250 Hz）、中頻（中心頻率 500 Hz、1k Hz、2k Hz）和高頻部分（4k Hz、8k Hz 和 16k Hz）的能量在噪音總能量中的百分比。根據因數分析的結果，住宅區的典型公建設施中，低頻噪音的成分所佔比例為 69.8%，中頻的貢獻率為 30.2%，高頻成分幾乎無貢獻，由此判斷住宅區之典型公建設施的噪音以低頻為主。

既然住宅區公建配套設施噪音的主導成分是低頻成分，某些原有評估指標的適用性就有待研究證明。因此，採用了實驗室心理測驗方法，分別研究了噪音計權方式、常用噪音評估量、評估曲線與主觀煩惱反應之間的關係。實驗結果表明，當受試者處於噪音短時間暴露的情況下，A 加權的評估效果較好；選取的六個 A 加權的評估參量中，以 L_{50} 的評估效果最好；PNC (Preferred Noise Criterion) 曲線對噪音煩惱度的評估效果略高於 NR (Noise Rating) 曲線。大多數實驗中，二項式擬合對煩惱度與音級的擬合效果最好，對數和指數擬合略遜一籌。

此外，現場問卷調查則運用層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 分析得出了住宅區環境噪音的煩惱度閾值。由於該方法是根據不同環境區域噪音的具體特性，由專家給出相應的判斷矩陣，採用 AHP 方法來構造模糊隸屬函數，計算區域環境噪音的閾值。因此其結果更切合實際，在噪音現場煩惱度問卷調查工作中的適用範圍也更為廣泛。此外，該方法同樣適用於實驗室心理測驗中常用的數字表述量計算。用 AHP 方法研究噪音煩惱度的現場問卷結果，更切合實際，適用範圍更廣。

「城市居住區低頻雜訊的煩惱度分析研究^[71]」從分析城市居住區低頻噪音的特性出發，在調查城市噪音源的基礎上，現場發放問卷調查的方法進行低頻噪音煩惱度的研究。在調查居住區噪音源的基礎上，對低頻噪音引起的煩惱度進行較為詳細的研究與分析，並與中高頻成分為主的交通噪音進行比較與研究。主要研究結果如下：著重研究了兩種有代表性的低頻噪音煩惱度以及對人的行為之干擾。對城市居住社區公共建築及高層住宅樓內配套設備固定噪音源（地下車庫、變配電房、水泵房、空調機房等）及室內噪音進行了監測，通過頻譜分析方法找出以低頻成分為主的噪音源，為進行低頻噪音煩惱度的調查研究提供了可靠的基礎。對存在低頻噪音源的居住區進行了主觀反應的調查，分析了低頻噪音的煩惱度以及低頻噪音對人的主觀生理感受影響程度等，並與以中高頻成分為主的交通噪音煩惱度及交通噪音對人的主觀生理感受影響程度進行了比較與分析。

研究結果表明：居住區低頻噪音引起的煩惱度不容忽視，在低頻噪音環境下仍能引起較高的煩惱概率；低頻噪音對人的睡眠、行為及主觀生理不適感有影響；低頻噪音煩惱度與中高頻噪音煩惱度的研究結果在對睡眠、工作及休息上有差異。

「城市居住區設備雜訊頻率特性分析及煩惱度研究^[72]」，在國內外研究現狀調查的基礎上，選取供電系統、地下車庫、電梯設備、供熱系統、排水供水系統、空調設備和通風系統中的 12 種典型噪音源，採用雙通道即時分析 VS302USB，調試並記錄以上設備正常運轉狀態的數位聲音信號。此外，通過聲音信號處理分析這些噪音源的頻譜及低、中、高頻段的能量比率。

結果表明，各音源最大噪音所在頻段以低頻段為最多（12 種典型噪音有 9 種），最大能量分布頻段也是以低頻段為最多（12 種典型噪音有 7 種），因而低頻噪音已經成為居住區影響最大的噪音源。採用成對比較實驗方法，在 12 種噪音

中選取 5 種低頻設備噪音和 5 種中頻設備噪音，將其調試為等噪音（4 個等級）、等 A 加權噪音（4 個等級）和等響度級（4 個等級），進行實驗室煩惱度研究。

此外，為獲得評估者的評判標準和規律，進行純音（63 Hz 至 8000 Hz 八音階中心頻率）等響度級（4 個等級）和類比噪音（對應現場採集噪音的最大 3 個噪音及其頻率）等響度級（4 個等級）實驗室煩惱度研究。實驗結果表明，純音及模擬噪音在等響度條件下，頻率因素是評估者做出煩惱評估的主要依據，評估者對中高頻音的煩惱反應要高於低頻音。此外煩惱程度還與評估噪音的頻率豐富程度有關，中頻帶 500 Hz 頻率範圍是評估者認為煩惱程度較低的頻率範圍；在等噪音和等響度級下，煩惱程度相對較低的低頻噪音在 A 加權噪音下煩惱程度被放大，採用 A 加權噪音評估低頻噪音時應對其進行修正，減小低頻段的衰減值，以使 A 加權噪音在低頻噪音評估中正確反映噪音暴露者受到的實際影響。

「城市居住區低頻環境雜訊煩惱度研究^[73]」，對受低頻噪音干擾的城市居住區進行了噪音源調查、現場監測、噪音信號採樣、分析等工作，並藉由現場調查和實驗室低頻噪音主觀反應心理實驗，提出了居住區環境噪音的煩惱閾值。研究了噪音加權方式、常用噪音評估量、常用評估曲線與主觀煩惱反應之間的關係，以及不同噪音對人的行為的影響。

為進一步量化人們的主觀煩惱程度，瞭解評估者的評估指標和規律，研究採用數量估計法，研究 6 種不同頻率的純音（100 Hz、160 Hz、200 Hz、250 Hz、500 Hz 和 1,000 Hz）在不同響度（55 phon、60 phon、65 phon、70 phon、75 phon、80 phon 六個響度級）下的主觀煩惱度，採用數量估計法對各個純音聲音樣本進行煩惱值評定，以求獲得頻率、響度級與煩惱度之間的定量關係。

實驗結果顯示：評估者對於各頻率純音的煩惱反應與響度級由良好的線性相關，隨著響度級的升高而增大。在等響度級條件下，頻率因素是評估者做出煩惱評估的主要依據。評估者認為中頻段 500 Hz、1,000 Hz 的煩惱度要明顯高於低頻段 100 Hz、160 Hz、200 Hz、250 Hz，其中 1,000 Hz 的煩惱度要高於 500 Hz，而低頻段 100 Hz、200 Hz 純音的煩惱度要明顯高於 160 Hz、250 Hz。根據實驗結果，建立各頻率純音的煩惱度方程，以此為基礎，分析具有相同煩惱度時不同頻率純音的響度級、噪音，最終嘗試在低頻段提出了一個新的評估網路，根據不同的頻率進行了不同的衰減。

此外，還採用成對比較法對模擬噪音（分別模仿冷凍機組、變配電房、直燃機噪音、排污泵噪音）進行了等響度級實驗室煩惱度研究。結果表明，在等響度級條件下，類比噪音的頻率因素是評估者做出煩惱評估的主要依據，低頻音的煩惱程度要低於中高頻。而現場採樣音源的類比，不應僅根據噪音大小來選取特徵峰，而應和等煩惱度曲線結合起來，根據煩惱度值相對大小選取幾個特徵峰（以 5 個特徵峰左右）。

中國大陸《社會生活環境噪音標準》和《工業企業廠界環境噪音標準》專門規定了結構傳播固定設備室內噪音限值。這些標準參照《民用建築隔聲設計規範》規定了各類型房間 A 加權限值，再由下式計算得到 NR 數，並參考對應的 NR 曲線確定 31.5 Hz~500 Hz 各八音階噪音（ $L_{31.5}$ 、 L_{63} 、 L_{125} 、 L_{250} 及 L_{500} ）限值：

$$NR = \begin{cases} L_A - 10, & L_A \leq 50 \\ L_A - 7, & L_A > 50 \end{cases} \quad (3.1.1)$$

式中 L_A 為 A 加權 dB(A)。然而《民用建築隔聲設計規範》中 A 加權與 NR 數關係依據下式確定：

$$NR = L_A - 5 \quad (3.1.2)$$

在相同 A 加權下，由式 (3.1.2) 與式 (3.1.1) 得到的 NR 數最大可差 5，與 NR 數對應的各八音階頻帶噪音限值也相差 5 dB。有學者認為 NR 曲線未充分考慮噪音各八音階頻帶能量分布的不平衡性，因此無法很好地評估低頻噪音。中國大陸現行的結構傳播固定設備室內噪音限值所涉及的頻率上限為 710 Hz，而國外相關標準的頻率上限一般不超過 200 Hz，且限 $L_{31.5}$ 限值也比中國低得多。

「室內聲環境標準限值合理性實驗研究^[74]」，通過將白色噪音濾波獲得 31.5 Hz~500 Hz 各八音階頻寬樣本，調整其噪音至標準限值後合成原始聲音樣本，並適當調整各八音階頻帶噪音，合成新的聲音樣本，採用成對比較法，對比研究各聲音樣本的主觀煩惱。

結果在 A 加權或響度級相同之情況下，適當降低 31.5 Hz 與 63 Hz 八音階頻帶噪音，並提高 125 Hz、250 Hz 及 500 Hz 八音階頻帶噪音，聲音樣本主觀煩惱均小於原始聲音樣本。多元逐步回歸分析結果表明，在各八音階中，31.5 Hz 八音階頻帶噪音與聲音樣本主觀煩惱度最為相關，且呈顯著正相關 ($p < 0.01$)，即隨著 $L_{31.5}$ 增加，主觀煩惱度也增大，二者的 Pearson 相關係數為 0.925~0.951。

「城市居住區低頻環境雜訊評價方法與指標研究^[75]」，在國外關於低頻環境噪音煩惱度的評估方法與指標的研究成果的基礎上，針對中國大陸城市居住區音環境特點進行了研究，內容包括：城市居住區設備噪音採樣與頻率特性分析，以噪音實樣、模擬低頻噪音及純音為音源，在實驗室進行的主觀煩惱度實驗以及城市居住區低頻噪音煩惱度社會調查。

在相關實驗研究和結果提出了兩種基於中國大陸城市居住區低頻環境噪音特點的評估方法與指標：根據實驗室純音的主觀煩惱度研究，純音在各響度級的煩惱度排序結果基本一致，評估者認為中頻段 500 Hz 和 1,000 Hz 的煩惱度要明顯高於低頻段。

而在低頻段及等響度條件下，純音的煩惱度排序從大到小為 100 Hz、200 Hz、160 Hz、250 Hz，由此在低頻部分嘗試提出了一個新的加權網路；根據對城市居住區內 10 個典型社區的社會聲學煩惱度調查，以及現場音源的調查和監測，利用噪音主觀反應模糊隸屬函數的 AHP 方法，計算得到居住區低頻環境噪音的煩惱閾值。除 1 類音功能區外，本調查得到的煩惱閾值和 A 加權的標準值之間的差值在 2 dB 到 5 dB 之間，由此提出對 A 加權的補償值應介於 2 dB~5 dB 的範圍內，能更客觀地反應居住區內的低頻環境噪音引起的煩惱度。

賈麗等「用社會聲學調查方法研究居住區雜訊煩惱閾值^[76]」，針對目前中國大陸城市居住區音環境頻率特徵有所改變的狀況，選取杭州市 10 個社區進行社會聲學調查。調查分兩部分：一是進行音環境頻率特徵監測，以明確居住區音環境的頻率特徵，結果表明，居住區環境噪音呈現較明顯的低頻特性；二是用社會聲學調查方法，以問卷方式調查居民在相應音環境下的煩惱度，並使用模糊數學方法處理這些資料，計算居住區噪音煩惱閾值。

結果居住區噪音煩惱閾值在 57 dB~63 dB 之間，與住宅所在的功能區有關。其中 1 類音功能區與 2 類音功能區的煩惱閾值較為接近，分別為 57.7 dB 和 57.0 dB，說明居住在比較安靜地區的居民對音環境要求較高。在中國大陸居住區分布最集中的 2 類音功能區，噪音煩惱閾值比現行標準限值低 3 dB。在這些居住區，近年來輻射低頻噪音的音源呈增多趨勢，說明在低頻噪音成分比較豐富的地區，當環境噪音的噪音還未達到標準限值時，人們已經感覺煩惱。在 3 類、4 類區中，存在同樣的情況。3 類、4 類區的煩惱閾值分別比標準限值低 5 dB 及 7 dB 左右，說明低頻噪音的影響要比估計的嚴重。

二、歐盟

世界衛生組織 2009 年出版的《歐洲夜晚噪音指南》之報告^[66]，當夜間環境噪音達到高位準時，居民傾向於關閉臥室窗戶（參見 Langdon 和 Buller, 1977; Scharnberg et al., 1982; Schreckenberg et al., 1999; Diaz et al., 2001）。Scharnberg 等人的研究和 Schreckenberg 等人發現當道路交通噪音位準超過 55 dB (L_{Aeq}) 時，超過 50% 的臥室窗戶關閉。根據瑞典道路交通噪音聲音研究計畫的結果，瑞典已經重現了這些發現。然而，儘管關閉門窗的居民由於噪音導致的睡眠障礙減少，但也由於通風不良導致了睡眠障礙的增加。Schreckenberg 等（1999 年）報告道路交通噪音達到高於鐵路噪音位準增加的情況下，關閉窗戶的發生率急劇上升。即使夜間噪音位準達 55 dB(A)，只有 35% 暴露於鐵路噪音的居民反應於夜間會關上窗戶。

3.2 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

3.2.1 住宅區音量品質相關指標

本計畫已蒐集「16個」國外住宅區室內之音量評估指標，包括：世界衛生組織（WHO）、歐美、紐澳及亞洲等。一般而言，多數均採取A加權均能音量 L_{Aeq} 作為評估指標，少部分則有列入A加權最大音量 L_{Amax} 作為評估指標（WHO、英國曼徹斯特市、韓國），詳如表3.2-1所示。

表3.2-1 不同國家、組織之住宅室內音量評估指標一覽表

國家、地區、組織		室內音量評估指標
組織	世界衛生組織(WHO)	L_{Aeq} 、 L_{Amax}
歐美	1.美國(聯邦)	L_{dn} (the L_{eq} with a 10 dB nighttime penalty)
	2.美國舊金山市(San Francisco)	L_{Aeq}
	3.美國沙加緬度市(Sacramento)	L_{Aeq}
	4.英國(United Kingdom)	L_{Aeq}
	5.英國曼徹斯特市(Manchester)	L_{Aeq} 、 L_{Amax}
	6.丹麥(Denmark)	L_{Aeq} (低頻 20 Hz~200 Hz 及全頻 20 Hz~20k Hz)
	7.拉脫維亞(Latvia)	L_{Aeq}
	8.南非(South African)	L_{Aeq} 、 L_{Adn}
紐澳	1.澳洲(Australia)	L_{Aeq}
	2.澳洲昆士蘭州(Queensland)	$L_{Aeq,adj,1hr}$ 、 $L_{A10,adj,1hr}$ 、 $L_{A1,adj,1hr}$
	3.紐西蘭(New Zealand)	L_{Aeq}
亞洲	1.中國大陸(China)	L_{Aeq}
	2.印度(India)	L_{Aeq}
	3.韓國(Korea)	L_{Aeq} 、 L_{Amax}
	4.日本(Japan)	L_{Aeq}

資料來源：本計畫整理。

3.2.2 住宅區音量品質相關標準或建議值

已蒐集「16個」不同國家、地區及組織之住宅區室內的允許（指導）噪音值或標準值，詳如表3.2-2所示並分別說明如後。其中大部份國家之住宅區相關室內音量均與世界衛生組織（WHO）之指引值相近。世界衛生組織（WHO）之 L_{Aeq} 指引值為日間35 dB(A)（16小時）；夜間30 dB(A）（8小時），其音量於實務上而言算相當之嚴苛。最寬鬆者為美國聯邦、舊金山市及沙加緬度市，其日間音量約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。

一、世界衛生組織（WHO）^[63]

於1999年公布社區噪音指引（Guidelines for Community Noise），噪音指標為「A加權均能音量 L_{Aeq} 」和「A加權最大音量 L_{Amax} 」。由表3.2-2看來，WHO的噪音指引值相當嚴格，所建議之連續「5分鐘」測量的日間住宅室內噪音不得高於35 dB(A)；夜間臥室噪音不得高於30 dB(A)，此為開窗戶之值（slightly open微開窗，夜間牆體外1m處的均能音量不超過45 dB(A)，假設開窗會衰減15 dB(A)）。此外，WHO還為干擾夜間睡眠的最大噪音值做出定義，突發音的 L_{Amax} 須小於45 dB，且噪音計檢波指示器使用「快」回應進行測量。

二、美國

（一）聯邦^[77]

Federal Guidelines（聯邦指引）針對室內居住區為日夜均能音量 L_{dn} 須小於45 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

（二）舊金山市（San Francisco）^[78]

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07:00~22:00期間， L_{Aeq} 不能超過55 dB(A)；22:00~07:00期間， L_{Aeq} 不能超過45 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

（三）沙加緬度市（Sacramento）^[79]

在任何公寓住宅、市政廳、兩人或多人居住單元，在22:00~07:00期間，室內噪音應滿足：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)。否則，產生超過此限值的噪音是違法行為。若環境噪音超過了此限值，則相應標準提高5 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

三、英國（United Kingdom）^[80]

(一)標準組織 (British Standards Institution)

BS 8233:2014針對住宅室內噪音指引值於臥室方面，除了日間07:00~23:00之 L_{Aeq} 不能超過35 dB(A)之外；另於夜間23:00~07:00之睡眠時分不能超過30 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

(二)曼徹斯特 (Manchester) [81]

英國曼徹斯特市針對臥室之噪音限制標準係參考：(1)英國標準BS 8233:2014；及(2)WHO指引值而來，詳如表3.2-2所示。日間07:00~23:00之 L_{Aeq} 不能超過35 dB(A)；夜間23:00~07:00之睡眠時分不能超過30 dB(A)，且夜間之單一噪音事件的快特性最大音量 $L_{Amax,F}$ 超過45 dB(A)之次數不能超過15次。

四、丹麥 (Denmark) [82]

針對住宅之噪音建議限值分為：(1)超低頻 (1 Hz~20 Hz)；(2)低頻 (10 Hz~160 Hz)；及(3)全頻 (20 Hz~20k Hz)，其住宅之 L_{Aeq} 全頻建議限值於所蒐集之文獻資料中屬最為嚴苛，全日介於25 dB(A)~30 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

五、拉脫維亞 (Latvia) [83]

針對客廳及臥室噪音允許標準值為 L_{day} 35 dB(A)、 $L_{evening}$ 35 dB(A)、 L_{night} 30 dB(A)，詳如表3.2-2所示。而地方政府有權在其行政區域內，規定住宅房屋和公共建築物之更嚴格的許可標準。

六、南非 (South African) [84]

針對住宅區之建議允許值分為三種地區：(1)鄉村；(2)郊區；及(3)都會區；且分為三種時段：(1)日夜；(2)日間；及(3)夜間，其中於都會區之室內的夜間 L_{Aeq} 建議允許值於開窗下為35 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

七、澳洲/紐西蘭

(一)澳洲及紐西蘭 (Australia & New Zealand) [85]

有共同之建築物聲學標準AS/NZS 2107：2016，針對不同建物佔用區域之建議值分為：(1)公寓一般區域；(2)生活區域；及(3)睡眠區域， L_{Aeq} 音量建議值則區分為滿意值及最大值，詳如表3.2-2所示。

(二)澳洲昆士蘭州 (Queensland) [86]

昆士蘭之環境保護政策(2008)針對室內住宅之聲音品質目標值的指標分為：(1) $L_{Aeq,adj,1hr}$ ；(2) $L_{A10,adj,1hr}$ ；及(3) $L_{A1,adj,1hr}$ ，其中於日間及晚之 $L_{Aeq,adj,1hr}$ 目標值為35 dB(A)；夜間為30 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

八、中國大陸 (China) ^[87]

《民用建築隔音設計規範》(GBJ 118-88) 對住宅室內 L_{Aeq} 允許噪音值予以了分級，詳如表3.2-2所示。

九、印度 (India) ^[88]

印度標準局之國家建築規範(NBC 2016)，其公寓、酒店及住家可接受的室內噪音值 L_{Aeq} 為35 dB(A)~40 dB(A)，詳如表3.2-2所示。

十、韓國 (Korea) ^[57]

近年來，政府提高了公寓噪音的損害認定標準(Damage certification standards of the apartment noise)，並公布了最大噪音量標準。因此，在日間即使發生一次55 dB(A)的噪音，即被認定已造成損害。最大日間噪音標準，相當於拋下1.5公升塑膠桶所產生的噪音。早先之 L_{Aeq} 標準為日間55 dB(A)、夜間45 dB(A)；新標準則為日間40 dB(A)、夜間35 dB(A)，詳如表3.2-2所示

十一、日本 (Japan) ^[89]

日本建築學會編制《建築設計資料集成》，其室內噪音適用等級 L_{Aeq} 噪音位準為35 dB(A)~45 dB(A)之間，詳如表3.2-2所示。

表3.2-2 不同國家、組織之住宅室內音量值一覽表

國家、組織	資料來源	名稱	類別	適用場所或對象	指標	噪音值
1.世界衛生組織 (WHO) ^[63]	—	Guidelines for Community Noise (1999)	Guideline values (指引值)	Dwelling, indoors (住宅室內)	L_{Aeq}	35(日間及晚, 16 小時)
				Inside bedrooms (臥室內)		30(夜間 8 小時)
				Dwelling, indoors (住宅室內)	$L_{Amaxfast}$	—
				Inside bedrooms (臥室內)		45(夜間 8 小時)
2.美國(聯邦) ^[77]	U.S. EPA(環保署)	Identified Levels of Environmental Noise In Defined Areas	Federal Guidelines (聯邦指引)	Indoor residential areas(室內居住區)	L_{dn} (with a 10 dB nighttime penalty)	$L_{dn} < 45 \text{ dB(A)}$
3.美國舊金山市(San Francisco) ^[78]	<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) 	San Francisco Police Code Article 29: Section 2909 (d) (December 2014 Guidance)	Regulatory Codes and Standards (管制標準)	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)	L_{Aeq}	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)
4.美國沙加緬度市(Sacramento) ^[79]	Environmental Management Department (環境管理部門)	Sacramento County Code, Chapter 6.68(The County Noise Ordinance)	Interior Noise Standards (標準值)	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)	L_{Aeq}	(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)。
5.英國 (United Kingdom) ^[80]	British Standards Institution(英國標準組織)	BS 8233:2014 (Guidance on sound insulation and noise reduction for buildings)	Guideline (recommended levels)指引值	Living room(客廳)	L_{Aeq}	35 dB(A) (日間 16 小時, 07:00~23:00), 夜間無
				Dining room(飯廳)		40 dB(A) (日間 16 小時, 07:00~23:00), 夜間無
				Bedroom(臥室)		35 dB(A) (日間 16 小時, 07:00~23:00) 30 dB(A) (夜間 8 小時, 23:00~07:00)

國家、組織	資料來源	名稱	類別	適用場所或對象	指標	噪音值																						
6.英國 曼徹斯特市 (Manchester) ^[81]	Environmental Protection Environmental Health The Neighbourhoods Service Manchester City Council(環境保護及健康，曼徹斯特市議會)	Planning & Noise Technical Guidance(December 2015)	Noise Limits Criteria (限制標準，參考英國 BS 8233:2014 及 WHO)	Bedrooms (臥室)	L _{Aeq} L _{Amax,F}	30 dB L _{Aeq} (夜間 8 小時，23:00~07:00) (individual noise events should not normally exceed 45 dB L _{Amax,F} by more than 15 times)																						
				Living Rooms (客廳)		35 dB L _{Aeq} (日間 16 小時，07:00~23:00)																						
7.丹麥 (Denmark) ^[82]	Danish Environmental Protection Agency (環境保護局)	Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration	Recommended Noise Limits (建議限值)	Dwelling (住宅)	L _{Aeq}	<table border="1"> <thead> <tr> <th>時段</th> <th>超低頻 L_G (1~20 Hz)</th> <th>低頻 L_{Aeq,LF} (10~160 Hz)</th> <th>L_{Aeq} (20~20k Hz)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>晚及夜間</td> <td>85</td> <td>20</td> <td>30/25</td> </tr> <tr> <td>日間</td> <td>85</td> <td>25</td> <td>30 (day & evening)</td> </tr> </tbody> </table>	時段	超低頻 L _G (1~20 Hz)	低頻 L _{Aeq,LF} (10~160 Hz)	L _{Aeq} (20~20k Hz)	晚及夜間	85	20	30/25	日間	85	25	30 (day & evening)										
						時段	超低頻 L _G (1~20 Hz)	低頻 L _{Aeq,LF} (10~160 Hz)	L _{Aeq} (20~20k Hz)																			
						晚及夜間	85	20	30/25																			
日間	85	25	30 (day & evening)																									
8.拉脫維亞 (Latvia) ^[83]	The local government shall be entitled to specify in its administrative territory stricter permissible standards for the residential premises and public buildings.	Cabinet Regulation No. 598(13 July 2004)	Permissible Acoustic Noise Standards (允許標準值)	Living rooms and bed rooms (客廳及臥室)	L _{Aeq}	L _{day} 35、L _{evening} 35、L _{night} 30 (地方政府有權在其行政區域內，規定住宅房屋和公共建築物之更嚴格的許可標準。)																						
9.南非 (South African) ^[84]	South African National Standard(南非標準局)	SANS 10103:2003 (SABS 0103)	Recommended Allowable Ambient Sound (Rating) Levels (建議允許值)	Residential Districts (住宅區)	L _{Aeq} L _{Adn}	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">Residential Districts</th> <th colspan="3">Equivalent Continuous Rating Level for Noise (L_{Req,T}) (dBA)</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Indoors with open windows</th> </tr> <tr> <th>Day-night (L_{R,dn})</th> <th>Daytime (L_{Req,d})</th> <th>Night-time (L_{Req,n})</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a)Rural istricts</td> <td>35</td> <td>35</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>b)Suburban districts (little road traffic)</td> <td>40</td> <td>40</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>c)Urban districts</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>35</td> </tr> </tbody> </table>	Residential Districts	Equivalent Continuous Rating Level for Noise (L _{Req,T}) (dBA)			Indoors with open windows			Day-night (L _{R,dn})	Daytime (L _{Req,d})	Night-time (L _{Req,n})	a)Rural istricts	35	35	25	b)Suburban districts (little road traffic)	40	40	30	c)Urban districts	45	45	35
						Residential Districts		Equivalent Continuous Rating Level for Noise (L _{Req,T}) (dBA)																				
								Indoors with open windows																				
							Day-night (L _{R,dn})	Daytime (L _{Req,d})	Night-time (L _{Req,n})																			
a)Rural istricts	35	35	25																									
b)Suburban districts (little road traffic)	40	40	30																									
c)Urban districts	45	45	35																									

國家、組織	資料來源	名稱	類別	適用場所或對象	指標	噪音值					
						Area	Satisfactory	Maximum			
10. 澳洲/紐西蘭 (Australia & New Zealand) ^[85]	This Standard was prepared by the Joint Standards Australia/Standards New Zealand Committee AV-004, Acoustics Architectural, to supersede AS/NZS 2107:2000.	Australian/New Zealand Standard 2107:2016 (AS/NZS 2107:2016) Acoustics - Recommended design sound levels and reverberation times for building interiors	Recommended Noise Levels (建議值)	Different Areas of Occupancy in Buildings (不同建物之佔用區域)	L _{Aeq}	Apartment common areas (e.g. foyer, lift lobby) near major roads	45	55			
						Apartment common areas (e.g. foyer, lift lobby) near minor roads	45	55			
						Living areas near major roads	35	45			
						Living areas near minor roads	30	40			
						Sleeping areas in areas with negligible transportation	25	30			
						Sleeping areas near major roads	30	40			
						Sleeping areas near minor roads	30	35			
						註：夜間(22:00~07:00)、日間及晚(07:00~22:00)。					
11. 澳洲昆士蘭州 (Queensland) ^[86]	the Minister for Sustainability, Climate Change and Innovation	Environmental Protection (Noise) Policy 2008	Acoustic quality objectives (目標值)	Dwelling for indoors (室內住宅)	L _{Aeq,adj,1hr} L _{A10,adj,1hr} L _{A1,adj,1hr}	時段	L _{Aeq,adj,1hr}	L _{A10,adj,1hr}	L _{A1,adj,1hr}		
						日間及晚	35	40	45		
						夜間	30	35	40		
12. 中國大陸 (China) ^[87]	主編部門： 中華人民共和國城鄉建設環境保護部 批准部門： 中華人民共和國國家計畫委員會	民用建築隔音設計規範(GBJ 118-88)	允許噪音值	住宅	L _{Aeq}	允許噪音值(A加權, dB)					
						建築類別	房間名稱	特級	一級	二級	三級
								住宅	臥室、書房	—	≤40
	起居室	—	≤45	≤50	≤50						
註：表列為日間，夜間的數值比日間小 10 dB(A)。											

國家、組織	資料來源	名稱	類別	適用場所或對象	指標	噪音值																						
13.印度 (India) ^[88]	Bureau of Indian Standards (印度標準局)	National Building Code of India 2016(NBC 2016) Part 8 Building Services-Section 4 Acoustics, Sound Insulation and Noise Control	Acceptable indoor noise levels (可接受之室內噪音值)	Apartments, hotels and homes (公寓、酒店及住家)	L _{Aeq}	35~40																						
14.韓國 (Korea) ^[57]	designed by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport and the Ministry of Environment	Damage certification standards of the apartment noise	國家標準	Apartment Noise (公寓噪音)	L _{Aeq} L _{Amax}	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">時段</th> <th colspan="2">L_{Aeq}標準</th> <th colspan="2">量測時間</th> <th rowspan="2">損害認定 (最大噪音)</th> <th rowspan="2">時間</th> </tr> <tr> <th>之前</th> <th>以後</th> <th>之前</th> <th>以後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>日間</td> <td>55 dB</td> <td>40 dB</td> <td rowspan="2">5分鐘</td> <td rowspan="2">1分鐘</td> <td>55 dB</td> <td rowspan="2">06:00~22:00</td> </tr> <tr> <td>夜間</td> <td>45 dB</td> <td>35 dB</td> <td>50 dB</td> </tr> </tbody> </table>	時段	L _{Aeq} 標準		量測時間		損害認定 (最大噪音)	時間	之前	以後	之前	以後	日間	55 dB	40 dB	5分鐘	1分鐘	55 dB	06:00~22:00	夜間	45 dB	35 dB	50 dB
時段	L _{Aeq} 標準		量測時間		損害認定 (最大噪音)	時間																						
	之前	以後	之前	以後																								
日間	55 dB	40 dB	5分鐘	1分鐘	55 dB	06:00~22:00																						
夜間	45 dB	35 dB			50 dB																							
15.日本 (Japan) ^[89]	日本建築學會編制	《建築設計資料集成》	建議值	集中住宅居室	L _{Aeq}	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">噪音位準(dB(A))</th> <th colspan="3">噪音等級</th> </tr> <tr> <th>1級</th> <th>2級</th> <th>3級</th> <th>1級</th> <th>2級</th> <th>3級</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35</td> <td>40</td> <td>45</td> <td>N-35</td> <td>N-40</td> <td>N-45</td> </tr> </tbody> </table>	噪音位準(dB(A))			噪音等級			1級	2級	3級	1級	2級	3級	35	40	45	N-35	N-40	N-45				
噪音位準(dB(A))			噪音等級																									
1級	2級	3級	1級	2級	3級																							
35	40	45	N-35	N-40	N-45																							

資料來源：本計畫整理。

3.3 蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序

以下蒐集及說明國外一般性室內噪音具體測量方法及其標準作業程序。

3.3.1 測量儀器

中國大陸《聲學環境噪音測量方法》(GB/T 3222-1994)^[54]規定：測量儀器準確度為2型(包括2型)以上的積分式噪音計或噪音統計分析儀(具有噪音自動監測的功能)，其性能符合《噪音計電、聲性能及測量方法》(GB 3785)和《積分平均噪音計》(GB/T 17181)的要求。測量儀器和音校準器應按JJG 699、JJG 176、JJG 778的規定定期檢定；測量前後使用音校準器校準測量儀器的示值偏差不大於2 dB，否則測量無效。

3.3.2 儀器設置

測量時，噪音計或傳聲器(麥克風)可以手持，也可以固定在三角架上，使傳聲器(麥克風)指向被測音源。為了儘可能減少反射影響，要求傳聲器(麥克風)離地面高1.2m，與操作者距離0.5m左右，距牆面和其他主要反射面不小於1m，離窗不小於1.5m^[90]。

此外，《工業企業噪音測量規範》(GBJ 122-88)^[91]規定：對非生產場所的室內噪音測量，測量噪音時，傳聲器(麥克風)應置於測點上距地面高1.2m處，傳聲器(麥克風)應指向影響較大的音源。

3.3.3 測量條件

一、中國大陸《民用建築隔音設計規範》(GBJ 118-88)^[87]

規定：允許噪音值的基本參量，應採用A加權均能音量。允許噪音值應為日間開窗條件下的標準值，且噪音特性為穩態噪音。允許噪音值的測量，應在影響最嚴重的噪音源發音時進行。對使用中不需要開窗的建築，例如：有空調的房間，允許噪音值指關窗情況下的噪音值。

二、中國大陸《工業企業噪音測量規範》(GBJ 122-88)^[91]

規定：對非生產場所的室內噪音測量，測量噪音時，室內聲學環境(門與窗的啟與閉，打字機、空調器等室內音源的運行狀態)，應符合正常使用條件。

三、美國沙加緬度市(Sacramento，加州首府)《噪音控制法令》^[79]

規定：室內噪音測量時，窗戶的開關狀態應隨季節符合正常使用情況。

此外，所有標準都沒有明確說明噪音測量是在有人還是無人的情況下。但測量條件首先應滿足對室內噪音規範、標準中所用噪音評估指標的解釋（指對允許噪音值和背景噪音的測量條件的說明，視場所不同而不同）時所規定的各項環境條件。

3.3.4 測量時間

一、中國大陸《聲學環境噪音測量方法》（GB/T 3222-1994）^[54]

規定：室內噪音的測量應在日間、夜間兩個不同時段內進行：日、夜時間應按地區經度、季節變化和地區生活習慣綜合考慮劃定，一般日間為06:00～22:00時段，夜間為22:00～06:00時段。測量一般選擇在星期一至星期六的正常工作日，如果星期日以及不同季節環境噪音有顯著差異，必要時可要求做相應的測量或長期連續測量。

二、中國大陸《公共場所噪音測定方法》（GBT 18204.22-2000）^[90]

規定：文化娛樂場所、商場（店），測定營業前30 min、營業後30 min、營業結束前30 min的噪音dB(A)。旅店業、圖書館、博物館、美術館、展覽館、醫院候診室、公共交通等候室、公共交通工具均在營業後60 min測定。

三、澳洲昆士蘭《噪音測量指南》^[92]

規定：室內噪音測量時間應在人的活動期間。測量的時間間隔T應足夠長，以保證測量資料能代表室內噪音的真實狀況。

3.3.5 布點要求

首先節錄各標準、規範對室內噪音測量的布點規定：

一、中國大陸《工業企業噪音測量規範》（GBJ 122-88）^[91]

對於非生產場所：辦公室、設計室、會議室、醫室、托兒所、倉庫等室內噪音測量，一般應在室內居中位置附近選3個測點取其平均值。傳聲器（麥克風）應置於測點上距地面高1.2m處，傳聲器（麥克風）應指向影響較大的音源。

二、中國大陸《聲學環境噪音測量方法》（GB/T 3222-1994）^[54]

對於建築物內的測量：這些測量應在所需測試的噪音影響的環境之建築物內進行。測量位置最好離牆面或其他反射面至少1m，離地面1.2m～1.5m，離窗1.5m處。

三、中國大陸《公共場所噪音測定方法》（GB/T 18204.22-2000）^[90]

對於較大的公共場所（大於 100 m^2 ）距音源（或一側牆壁）中心劃一直線至對側牆壁中心，在此直線上取均勻分布的三點為監測點；較小的公共場所（小於 100 m^2 ）在室中央取一點為監測點。

四、中國大陸《民用建築隔音設計規範》（GBJ 118-88）^[87]

對於通常室內場合：

(一)對於住宅、學校、醫院、旅館、辦公樓及商業建築中面積小於等於 30 m^2 的房間，在被測房間內選取1個測點，測點位於房間中央；對於面積大於 30 m^2 、小於等於 100 m^2 的房間，選取3個測點；對於面積大於 100 m^2 的房間（例如：開敞式辦公室、商場等），可根據具體情況，最佳化選取能代表該區域室內噪音位準的測點及測點數量。

(二)測點分布應均勻且具代表性，測點應分布在人的活動區域內。對於開敞式辦公室，測點可布置在辦公區域；對於商場，測點可布置在購物區域。測點的布置應滿足下列條件：

1. 測點距地面的高度應為 $1.2\text{ m} \sim 1.6\text{ m}$ ；
2. 測點距房間內各反射面的距離應大於 1.0 m ；
3. 各測點之間的距離應大於 1.5 m ；
4. 測點距房間內噪音源的距離應大於 1.5 m 。

註：對於較擁擠的房間，上述測點條件無法滿足的情況下，測點距房間內各反射面的距離應大於 0.7 m 。

(三)對於間歇性非穩態噪音的測量，測點數可為一個。測點應設在房間中央，測點距房間各反射面的距離應大於 1.0 m ，測點距地面的高度應為 $1.2\text{ m} \sim 1.6\text{ m}$ 。

《建築隔音評估標準》（GBJ 121-88）^[93]對《民用建築隔音設計規範》的上述布點補充說明為：對於面積較大的房間，例如：開敞式辦公室、商場等，由於情況複雜，所以在這裡沒有提出確定測點數量的具體規定。對於這類場所的測點的選取和布置原則是：測點分布應均勻，同時測點應設在人的活動區域內。例如：開敞式辦公室，測點可設在辦公區域；商場，測點可設在購物區域及收銀處；超市，測點可設在購物通道內及收銀處。

五、中國大陸專利《民用建築室內噪音測量與評估方法》^[94]

在現有規範基礎上對室內噪音測量的最佳化如下：選定測量點指的是在室內四個方向和中間各設置1個測量點，測量點離牆面或反射面0.5m，離地面1.2m～1.5m，所述的選定測量點還包括在結構傳音的敏感處設置點位；對於戶外噪音源通過空氣傳音引起的室內噪音污染，還包括在面向外部噪音源的窗或閘外設置點位。

綜合以上節錄，測量布點方法建議如下：

(1)測點分布應均勻且具代表性，測點應分布在人的活動區域內，總體要求是：

(a)測點距地面的高度應為1.2m～1.6m；

(b)測點距房間內各反射面的距離應大於1.0m，離窗大於1.5m；

(c)各測點之間的距離應大於1.5m；

(d)測點距房間內噪音源的距離應大於1.5m，當房間較小時，測點距房間內各反射面的距離應大於0.7m。

(2)對於住宅、學校、醫院、旅館、辦公樓及商業建築中面積小於等於30m²的房間，在被測房間內選取1個測點，測點位於房間中央；對於面積大於30m²、小於等於100m²的房間，選取3個測點；對於面積大於100m²的房間(例如：開敞式辦公室、商場等)，可根據具體情況，最佳化選取能代表該區域室內噪音位準的測點及測點數量。

(3)對於間歇性非穩態噪音的測量，測點數可為一個。

(4)應該在結構傳音的敏感處設置點位；對於戶外噪音源通過空氣傳音引起的室內噪音污染，還需要在面向外部噪音源的窗或閘外設置點位。

另美國及澳洲之布點要求如下：

一、美國沙加緬度市(加州首府)《噪音控制法令》^[79]

室內噪音測量時，測點應靠近受影響區域，離牆、天花板和地板的距離至少4英尺(約1.2m)。

二、澳洲昆士蘭《噪音測量指南》^[92]

室內噪音測量時，測點距牆至少1m，離地面的高度為1.2m～1.5m，離窗戶的距離至少1.5m。

3.3.6 測量方法

中國大陸《民用建築隔音設計規範》（GBJ 118-88）^[87]提出了一般室內場合噪音測量的詳細實施方法，節錄如下：

一、對於穩態噪音，在各測點處測量A加權均能音量，儀器時間加權特性為「慢」特性，測量時間週期為5秒，取平均值，並將各測點的測量值進行能量平均。

二、對於音量隨時間變化較複雜的持續的非穩態噪音，在各測點處測量10min的A加權均能音量。將各測點的測量值進行能量平均。

三、對於間歇性非穩態噪音，用噪音計或其他聲學測量儀器的「快」特性測量最大A加權，同時記錄下0.5小時內噪音的間歇時間，計算出噪音所佔的時間比例。按（GBJ 118-88）^[87]之表A.1.1的規定進行修正。

四、當建築物內部的設備噪音是影響室內噪音的主要噪音源時，如：電梯噪音、水泵噪音等，室內噪音的測量是測量設備處於正常運行狀態下，設備完成一個有代表性的運行過程的A加權均能音量。

五、在進行室內噪音測量時，若主觀判斷噪音中含有可聽純音，應在測量A加權或A加權均能音量的同時，測量該A加權或A加權均能音量所對應的1/3八音階頻帶頻譜，按表A.1.1的規定進行判定，並按表A.1.1的規定進行修正。

《民用建築隔音設計規範》中的上述方法可在室內噪音的實際測量中參考實施。

3.3.7 讀數方法

穩態噪音與近似穩態噪音用快特性讀取指示值或平均值；週期性變化噪音用慢特性讀取最大值並同時記錄時間變化特性；脈衝噪音讀取峰值和脈衝保持值；無規則變化噪音用慢特性，每隔5秒讀一個暫態A加權；每個測點連續讀取100個資料代表該測點的噪音分布^[90]。

3.3.8 資料記錄

測量資料一般直接由噪音計或其他測量儀器讀出，讀數的方法為：每隔5秒讀一個暫態A加權，每個測量點要連續讀取若干個資料值，記錄於環境噪音測量資料表中，讀數時還應判斷主要噪音來源^[90]。

3.3.9 評估指標

在公共場所噪音標準中，規定用 L_{Aeq} 作為評估值，用 L_{10} 、 L_{50} 、 L_{90} 作為分析依據。對於公共場所的一般性衛生監測，可分別求出各點的 L_{50} ，然後進行合成或平均計算做為公共場所噪音的判定依據^[90]。

3.3.10 資料處理

一、累積百分音量 L_{10} 、 L_{50} 、 L_{90}

累積百分音量 L_x 的計算方法為：將在規定時間內測得的所有暫態A加權數據（例如100個資料），按音量的大小順序排列並編號（由大到小），則第一個 L_1 就是最大值。第10個值 L_{10} 表示在規定時間內有10%的時間之音量超過此音量，它相當於在規定時間內噪音的平均峰值； L_{50} 第50個資料，表示在規定時間內有50%的時間之音量超過此音量，它相當於在規定時間內噪音的平均值； L_{90} 為第90個資料，表示在規定時間內有90%的時間之音量超過此音量，它相當於在規定時間內噪音的背景值^[90]。

二、均能音量 L_{Aeq}

均能音量 L_{Aeq} 可由式 (3.3.1) 計算：

$$L_{Aeq} = 10 \times \log \left(\frac{n}{a} 10^{0.1L_{Ai}} \right) - 10 \times \log(n) \quad (3.3.1)$$

式中： n — 在規定的時間 T 內採樣的總數， $n = T/Dt$ ；

Dt — 採樣測量的時間間隔，s；

L_{Ai} — 第 i 次測量的A加權，dB；

由於環境噪音標準中都用A加權，故如不加說明則均能音量就是A加權均能音量，並常簡單地用符號 L_{eq} 表示。

當 $n=100$ 時，則均能音量表示如式 (3.3.2)：

$$L_{Aeq} = 10 \times \log \left(\frac{n}{a} 10^{0.1L_{Ai}} \right) - 20 \quad (3.3.2)$$

如果資料 L_{Ai} 遵從正態分布，則均能音量可用公式 (3.3.3) 近似計算：

$$L_{Aeq} = L_{50} + \frac{d^2}{60} \quad (3.3.3)$$

式中： d — L_{10} 與 L_{90} 之差^[90]。

3.3.11 結果表示

噪音的測量結果用均能音量 L_{Aeq} 來表示，該點的噪音位準用累積百分音量的 L_x 表示其音量的分布^[90]。

3.3.12 結果修正

對不同的噪音特性（包括：峰值因素、頻率特性、持續時間和起伏等），須對噪音測量值進行修正，修正方法如表3.3-1^[87]。

表3.3-1 根據噪音特性對噪音測量值的修正方法^[87]

噪音特性		修正值 dB(A)	
穩態 噪音	持續穩態的噪音	0	
	脈衝性穩態噪音(如：捶擊、鉚接聲)	+5	
	含有可聽純音之穩態的噪音(如：狗叫、蜜蜂的嗡嗡聲)	+5	
非穩 態噪 音	間 歇 噪 音	在半小時內噪音所佔時間的百分數	—
		56~100	0
		18~56	-5
		6~18	-10
		< 6	-15
	音量隨時間起伏，變化較複雜的噪音(如：交通噪音)	0	

3.4 蒐集國外住宅區音量評估模擬方法及相關管理措施與規範

3.4.1 國外住宅區音量評估模擬方法

本節國外之住宅區室內音量評估模擬方法蒐集之目的，是為瞭解模擬室內外噪音之可行性，瞭解室內噪音模擬軟體及室內噪音推定通常使用的原理和計算方法，分析包括：Odeon、Raynoise、Insul、SoundPLAN、CadnaR、BASTIAN和TNEL幾種最常用的室內模擬軟體性能和特點，並依據近幾年發表在國際著名期刊的文章、報告及軟體公司官網上的介紹等資料，對各軟體進行比較分析，針對需求和電腦系統的配置選擇合適的軟體以及合適的版本，達到模擬需要之目的。最後並整理國外評估住宅室內噪音之經驗公式，可供實際測量比對之參考。

3.4.1.1 室內噪音模擬和計算概述

壹、室內噪音模擬和計算方法

一、音線跟踪法（Ray Tracing Method，簡稱RTM）

房間聲學的音線跟踪模型出現於1968年^[95]。音線跟踪法假設大量從音源發出、向各個方向輻射的粒子，依據各個表面的吸音係數，跟踪這些攜帶音能量

的粒子的分布情況。當粒子在界面處發生反射，粒子新的傳播方向由反射定理得知^[96]。

為獲得關於某特定接收點的計算結果，必須在接收點處定義一個面積或者一個體積以獲取通過其中的粒子，或者考慮通過錐體軸向的音線數目。若房間的面積是A，音線傳播時間為t，音線數目的最小值N應為^[96]：

$$N \geq 8 \frac{\pi c^2}{A} t^2 \quad (3.4.1)$$

式中：c是聲音在空氣中傳播的速度。

依據上式，對於一個10 m²的房間，傳播到600ms時至少要有大概100,000條音線^[96]。音線每次碰撞後能量減少為原來的(1-α)倍(其中α為界面的吸音係數)，當音線能量低於預先設定的閾值時，電腦停止對該音線的跟踪。重複以上過程直至所有的音線都被跟踪完畢，從而確定整個音場的空間分布^[96]。

二、鏡像音源法 (Mirror Image Source Method, 簡稱MISM)

反射面的鏡像反射路徑可依據反射面的鏡像音源和接收點的相對位置確定，這是鏡像法的基本原理。在一個矩形房間中，首先可直觀地確定所有反射階次的所有鏡像音源，而接收點的音能量即為各鏡像音源產生的能量和，各鏡像音源到接收點的距離決定了反射音到接收點的時延，反射次數決定了能量衰減的大小。假定矩形房間的體積為V，則在以c×t為半徑的球體內鏡像音源數目近似為^[96]：

$$N_{\text{refl}} = \frac{4\pi c^3}{3V} t^3 \quad (3.4.2)$$

該估計值會隨著反射次數(傳播時間)的增加而呈三次方增長。

鏡像音源法的優勢在於其非常準確，但如果房間不是簡單的矩形就會出現很多問題。若房間中有n個表面，就存在n個可能的一階鏡像音源，每一個又會產生n-1個二階鏡像音源，直到第i階鏡像音源時，鏡像音源的總數近似為^[96]：

$$N_{\text{sou}} = 1 + \frac{n}{n-2} \left((n-1)^i - 1 \right) \approx (n-1)^i \quad (3.4.3)$$

考慮一間15,000 m³、包含30個反射面的房間，平均自由程為16m，依據所需要的最高反射次數為13，需要計算的總時間為600ms，鏡像音源數目大約為 $N_{\text{sou}} = 29^{13} \approx 10^{19}$ ，N隨反射次數近似呈指數增加，而問題在於這些鏡像音源中僅有極少部分是有效的，其餘絕大部分鏡像音源對音場能量的貢獻不大。因此鏡像法

僅適用於簡單的矩形房間或所需要反射次數較低的情況。基於鏡像法，有多種具體的計算方法並且有些已經被某些官方機構定為標準化，如VDI 3760^[97]。因在一般普通混響（迴響）房間中，反射音線數目相當大，對電腦運算速度要求非常高，VDI 3760是一種簡化後的方法。

三、混合方法

混合法結合了前兩種方法的優勢^[96]。用音線跟踪法標註可能無效的鏡像音源在哪些表面反射，然後對這些反射情況逐一進行檢驗，判斷是否對選定接收點的音能量引起了足夠大的貢獻。如果後驗結果發現該鏡像音源有效，則與該次反射相關的反射係數和輻射方向特性等都需被考慮進去。另外，還必須確保每個有效的鏡像音源只被檢驗一次，以減小實際運算的計算量，故需建立「鏡像樹」來記錄各低階的鏡像音源之反射路徑^[96]。

四、其他

對於鏡像音源法（MISM）和音線跟踪法（RTM），這兩種方法各有利弊。後來，又產生了一些將它們相結合的方法，如：圓錐束法（Conical Beam Method，簡稱CBM）和三棱錐束法（Triangular Beam Method，簡稱TBM）。Raynoise等軟體將這兩種方法混合使用作為其計算音場的核心技術。另外還包括在文獻中簡單提及的顆粒模型^[98]等方法。

貳、室內噪音模擬和計算工具

目前室內聲學模擬的軟體主要有Odeon、Raynoise、Insul、SoundPLAN、CadnaR、BASTIAN和TNEL等。綜上，室內噪音模擬工具主要使用音線跟踪法、鏡像音源法、兩者的混合法及其他原理來模擬室內音場，同時會考慮繞射（Diffraction）等實際情況使結果更趨於真實結果^[99]。電腦模擬軟體更靈活，容易修改幾何參數和材料表面吸音係數。軟體中的視窗化和其他分析工具也使軟體更具真實感。軟體使用方便，可快速得到準確的數據結果和視窗化、可聽化的效果。

3.4.1.2 室內噪音模擬和電腦軟體

壹、丹麥 Odeon 軟體

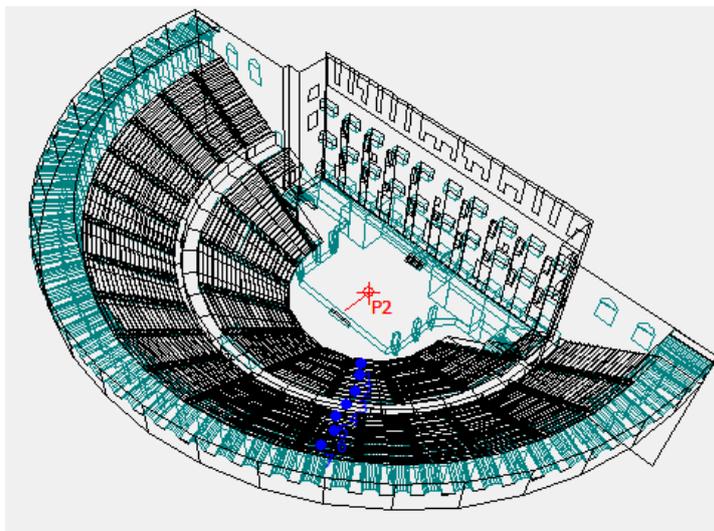
Odeon 是由丹麥技術大學（Danmarks Tekniske Universitet）聲學技術系研究開發的聲學（噪音）模擬軟體。Odeon 軟體是一款對建築物內部和半開放空間進行聲學建立模型的軟體。軟體利用音像法和音線法，同時考慮繞射的因素，依據

房間的幾何形狀、尺寸大小和房間的表面特性，快速計算出可靠的模擬預測結果^[99]。得到的主要模擬結果包括：評估房間模型的聲音傳播特性、噪音大小和主觀感覺。從這些資料數據中，可瞭解所有使用者需要的相關參數和信息，這些結果可以用數據、圖表展示，軟體中的動畫工具還可使音波和房間表面的互相作用直觀地展示出來。

Odeon 軟體吸收了音像法和音線法的優點，同時將聲音的波動性考慮在內，引入了音波反射、繞射的理論模型，使模擬結果更接近真實情況^[99]。軟體算法中，將模擬分成早期反射音和後期反射音兩部分。直達音及早期反射音包含了音場的強度、清晰度和空間感，需要準確地確定其時間分布、方向等信息，用音線法和修正音像法的混合方法對其進行準確的模擬。對早期反射音的模擬將界面的有限尺度所產生的繞射特性以及界面的散射作用考慮在內；而後期反射音採用音線跟蹤法。算法中引入「第二音源」的模型^[99]。

Odeon 軟體可對禮堂、圓形劇場、階梯教室、音樂工作室、辦公場所、機場、火車站、體育場館、音樂廳、工廠等室內環境進行聲學模擬，對規劃中的房間和建築物內部的翻新進行聲學預測和最佳化設計。對室外場所，如：城市廣場、火車站進行音場預測，對揚聲器系統和房間音場情況的預測和最佳化設計，實現對耳機和揚聲器聲學情況的真實模擬以及房間聲學的教育和研究。

軟體可直接匯入 DXF、3DS 等格式的幾何圖形，支援 Google SketchUp 匯入，可精確模擬點音源、線音源、面音源，並包含：繞射、傳輸、散射等模型，可形成直觀的反射圖及形象地展示反射路徑等 3D 視窗化圖像^[99]，如圖 3.4-1 所示。



(資料來源：<http://www.odeon.dk/archaeological-acoustics-open-theatre#>)

圖 3.4-1 丹麥 ODEON 室內噪音電腦模擬示意圖

貳、德國 SoundPLAN 軟體

SoundPLAN 開發公司為德國 Braunstein，官方網站 www.soundplan.eu/deutsch/。自 1986 年由 Braunstein + Berndt GmbH 軟體設計師和諮詢專家頒布以來，迅速成為德國戶外聲學軟體的標準，並逐漸成為世界關於噪音預測、製圖及評估的領先軟體。SoundPLAN 軟體是專門針對噪音和空氣污染情況的電腦模擬。噪音建立模型包括：交通噪音、室內和室外的噪音、一般工業噪音和航空噪音。SoundPLAN 的使用範圍從小工廠到整個城市的噪音規劃，對實體和項目的尺寸沒有限制。軟體提供多種多樣的界面、資料庫、工具箱讓建立模型計算高效、省時^[100]。

噪音的來源多種且多樣，SoundPLAN 可模擬大多數的室內及室外噪音源，包括：公路噪音、鐵路噪音、飛機噪音等交通噪音及點、線及面音源等抽象噪音^[100]。SoundPLAN 包含多個音源模型，可直接計算交通噪音音功率，而工業噪音則需要將測量的數據轉化成音功率計算。SoundPLAN 使用扇形法（Sector Method）進行音場計算。從接收點出發，發射射線覆蓋所有要考慮的區域和實體，包括：源、反射體、隔音牆及地面衰減區等。射線間隔為 1 度，也可自行設定，間隔越小計算越精確，用時也越長。研究顯示，扇形掃描比射線掃描要精確，它可覆蓋接受點周圍的整個區域，而射線掃描就會忽略掉射線間的部分^[101]。室內噪音模擬如圖 3.4-2 之示意。

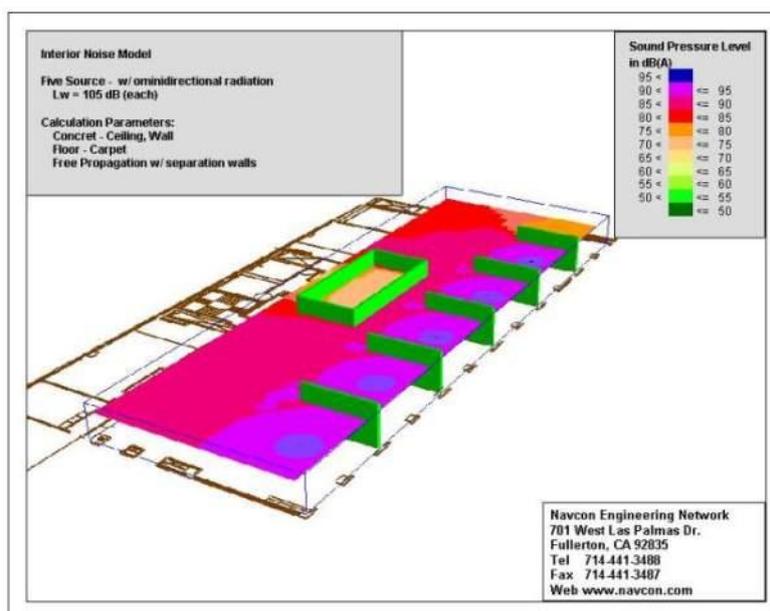


圖 3.4-2 德國 SoundPLAN 室內噪音電腦模擬示意圖

（資料來源：<http://www.SoundPLAN.com/>）

參、紐西蘭 Insul 軟體

Insul 是由 Marshall Day Acoustics 公司開發的預測牆壁、地板、天花板和窗戶隔音性能的軟體，官網是 <http://www.insul.co.nz/>。它可在聲音傳輸計算中預估 1/3 八音階的穿透損失和加權隔音量指數^[102]。



Insul 會考慮樣本大小的影響，在對窗戶那樣的小樣本預測中尤其重要。Insul 可快速的評估新的材料和系統，調查改變現有設計所產生的影響。它可預測在壁骨腔中安裝聲學材料後的影響。

Insul 已經經歷了幾個版本，演變成一個在 Windows 環境下非常容易使用的工具，並且在實驗室測試中不斷完善、改進，為範圍廣泛的建設提供了可接受的準確度。雖然 Insul 像其他預測軟體一樣，它並不能完全替代測量。但與測試數據的大量比較表明，對於大多數建築，Insul 能可靠地預測出加權隔音量指數 (Weighted sound reduction index, R_w) / 聲音穿透等級 (Sound Transmission Class, STC)，誤差只在 3 dB 以內；衝擊隔音量等級 (Impact Insulation Class, IIC) 的誤差在 5 分貝以內^[102]。

Insul 可預測單層、雙層和三層牆壁，地板、屋頂、天花板、窗戶的隔音性能；預測在不同地板覆蓋物下的混泥土地板、輕質板和木材地板的隔音性能；預測自然降雨和實驗室降雨在屋頂產生的噪音 (ISO 140-18)；計算室外噪音在室內的音量 (EN 12354/3)；能夠預測多穿孔板穿透損失；Insul 還能準確估計穿透損失 (TL)、加權隔音量、音量差及音壓級。

Insul 可預測各種輕量級夾芯板的隔音^[102]。一個典型的用薄鋼板或鋁板皮及聚苯乙烯或岩棉芯製造的輕量級夾芯板可被建立模型。芯的屬性可使用內置的材料特性編輯器來調整。改善了對常用於商業和工業建築中各種形狀金屬板的預測，在這之前只可預測單一的採用波紋之類的簡單結構的面板。

Insul 能精確計算戶外噪音在室內的音量，在計算中會考慮使聲音傳播損失的建築表面（如：牆壁、窗戶、屋頂），房間的大小和它的聲學特性（混響(迴響)時間）及外部噪音的頻譜。最多有五個不同的建築因素（如：門、牆、窗、屋頂和地板）會考慮在內。每條路徑對噪音衰減的貢獻能夠通過數字或圖像觀察出來。

Insul 的預測主要依賴於質量定律^[103]。質量定律可模擬出單一均勻板組成的

牆的傳輸損失。它能通過牆的面密度和聲音的頻率預測出傳輸損失 (Transmission Loss, TL)。當面密度或者頻率增加一倍時, TL 就增加 6 dB。質量定律的簡單解釋是牆的運動受慣性控制, 牆體表現為柔軟的固體。牆的質量增加或振動頻率增加時, 它的位移或速度就會降低 (因為它容易使牆改變方向更頻繁)。因此, 只需要知道材料的密度和材料的厚度就能通過質量定律計算材料的隔音性能。

肆、比利時 Raynoise 軟體

Raynoise 是比利時聲學設計公司 LMS 所開發的一款大型音場模擬軟體系統 [104]。其主要功能是對封閉空間、敞開空間以及半開/半閉空間的各種聲學行為加以模擬。它能夠較準確地模擬聲音傳播的物理過程, 其中包括: 鏡面和擴散反射、牆面和空氣吸收、繞射和透射等現象 [105], 並能最終重造接收位置的聽音效果。

該系統可廣泛應用於廳堂音質設計、工業噪音預測和控制、錄音設備設計、機場、地鐵和車站等公共場所的語音系統設計, 以及公路、鐵路和體育場的噪音估計等。Raynoise 更適合於大尺度、複雜邊界 (地形)、全頻域的聲學問題的預測與評估 [104], 尤其是可模擬音樂廳、大型會議廳等需進行較精密音質設計的案例。

Raynoise 可廣泛用於工業噪音預測和控制、環境聲學、建築聲學以及模擬現實系統的設計等領域, 但設計者的初衷還是在房間聲學, 即主要用於廳堂音質的電腦模擬。進行廳堂音質設計, 首先要求準確快速地建立廳堂的三維模型 (如圖 3.4-3), 因為它直接關係到電腦模擬的精度。

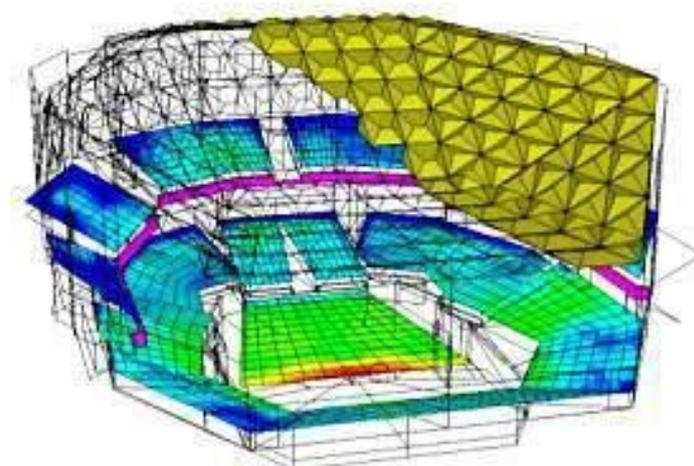


圖 3.4-3 比利時 Raynoise 室內噪音電腦模擬示意圖

資料來源: <http://www.mra.pt/industria/produutos/acustica-e-vibracoes/software-de-simulacao-acustica/software-de-acustica-arquitectonica-em-interiores-lms-raynoise/>

伍、德國 CadnaR

CadnaR為德國DataKustik公司所發展之聲學軟體，主要應用於室內和工作環境之噪音計算和預測，可幫助使用者進行工作環境之聲學規劃和降低噪音處理。可使用下列計算方法（單獨或結合使用）：擴散場、鏡像法、顆粒模型和VDI 3760標準^[106]。CadnaR軟體操作簡單，軟體的設計便於使用者建立模型和輕鬆的進行簡單計算。同時，當分析變得複雜的時候，使用者則可受益於精細的輸入選項。使用者只需要關注項目，對於軟體則不需要花費太多時間，所有的輸入和分析操作都簡單直觀。

模擬結果可在一秒鐘內實現2D與3D視圖的轉換。透過使用各種快捷鍵和自動化技術，加快了建立模型速度。CadnaR採用場景分析、柵格算法或者使用3D視圖顯示結果等技術加強使用者的分析能力，對整個規劃和評估過程給予充分的支援。CadnaR的計算方法基於廠商依據最新的EC導則（2006/42/EC）^[107]，提出之機器的發散參數、房間尺寸和設計計算工作環境中的聲音負載。可制訂降低噪音措施的規劃和評估，如：改變布局、設置隔音牆、加牆體或天花板吸音層，改變發散噪音量或其他措施。

CadnaR對於複雜的房間幾何尺寸也可建立模型（主要使用鏡像法或顆粒模型）。對於機器布置和其他音源的建立模型可使用點音源、線音源、面音源或盒裝音源。點音源可具有方向性（使用簡單的方式或者5度為步長）。房間中之屏蔽物可使用隔音牆和盒狀障礙物。計算考慮了障礙物的反射和吸收，考慮了房間內所有表面的本地吸收分布。可輸入隨頻率變化的吸音係數或對於牆和天花板區域選擇指定產品的吸音頻譜（對於局部區域同樣可行）。可用二維或三維的方式顯示噪音分布。帶噪音量分布在X、Y和Z平面上的投影的三維柵格。CadnaR集成最佳化之VDI 3760標準裡的算法，對複雜聲學環境能夠快速準確的建立模型^{[106][108]}。

另有關室內使用CadnaR及室外使用之CadnaA聲學噪音預估軟體，其差異性及相關性補充說明如表3.4-1所示。

表 3.4-1 CadnaR 及 CadnaA 之相關性及差異性彙整表 (1/2)

1.相關性	
CadnaR 及 CadnaA 皆為德國 DataKustik 公司所發展之聲學軟體。	
2.差異性	
CadnaR-『室內』聲學噪音預估軟體	CadnaA-『室外』聲學噪音預估軟體
在工作場所，可依據 EC 導則 (2006/42/EC)，採用機器製造商的參數和房間尺寸設計，計算工作環境中的聲音負載。	工業 <ul style="list-style-type: none"> • 應用於噪音減量方案的評估。 • 在便利的資料庫中維護噪音排放等資料。 • 通過先進的 3D 特性，檢查所建立之模型。 • 根據內部音源計算室外聲音傳播。 • 與 Bastian 的室內噪音計算程式進行資料交換。 • 計算不確定度會考量到排放噪音傳播的標準偏離。
制定降噪措施的規劃和評估，如：改變布局、設置隔音牆、加牆體或天花板吸音層、改變發散噪音級或其他措施。	工業專家系統 (SET 選項) <ul style="list-style-type: none"> • 基於音源的技術系統參數(例如：電力 KW、流量 m³/h、轉速 rpm)，自動生成聲功率頻譜。 • 可利用針對音源技術(如：電動機、內燃機、泵、通風設備、冷卻塔、齒輪箱等)預先設定的 150 種模組，方便工作。 • 可通過音源組合構建複雜的傳播模型。
結合辦公室、呼叫中心、公用房間和區域等的規劃來評估可替代場所。	道路及鐵路 <ul style="list-style-type: none"> • 可以比較不同的規劃方案。 • 自動優化街道或鐵路邊的噪音屏障。 • 視覺化模擬減降噪音方案。 • 通過目錄結構和變數進行有效的專案管理。 • 通過 DTM 自動處理物件資料交叉。 • 視覺化所有傳播軌跡。
通過吸音產品資料應用庫，進行吸音產品的選擇，包括：吸音天花板或牆體覆蓋層的成本效益分析。	航空器噪音 (FLG 選項) <ul style="list-style-type: none"> • 依據 AzB 2008, AzB(1975), ECAC Doc.29 或 DIN 45684-1 的標準計算模組，應用於計算民用或軍用機場的噪音排放。 • 包括了所有相關的國際標準，模擬處理的機場航空噪音評估程式。 • 執行航空器噪音、道路噪音、鐵路噪音和工業設備噪音暴露的結合評估。 • 使用依據 ICAO (國際民間航空組織) 標準雷達資料代碼的航空器分類組，來計算航空器噪音。

表 3.4-1 CadnaR 及 CadnaA 之相關性及差異性彙整表 (2/2)

2. 差異性	
CadnaR-『室內』聲學噪音預估軟體	CadnaA-『室外』聲學噪音預估軟體
通過計算聲級柵格分布來檢查替代規劃場所的效果。	噪音地圖 <ul style="list-style-type: none"> • 分散式運算和多執行緒計算，加速計算。 • 採用 64 位元技術，適用所有 RAM。 • 高效的各種資料融合技術，可匯入 30 多種不同的格式資料。 • 在 3D 視圖中，可讀取和替換目標屬性。 • 使用各種噪音評估技術分析所建立之模型。 • 使用加速技術的同時，確保模型的品質。 • 具備在大比例尺工作時可獲得更多的複雜細節和可能的高清晰度之優點。
對於複雜的房間幾何尺寸也可以建模（使用鏡像法或顆粒模型）。	空氣污染 (APL 選項) <ul style="list-style-type: none"> • 依照 Lagrangian 粒子模型 AUSTAL 2000(其他模型正在整合中)，進行空氣污染分布的計算、評估。 • 在噪音及空氣品質緩解計畫中，結合測量評估。 • 在建立空氣污染分布模型中，CadnaA 提供友善的易用性和強大計算速度。 • 具備匯入所有資料格式功能，不需要額外費用。
對於機器布置和其他聲源的建模可以使用點音源、線音源、面音源、盒裝音源。	
點音源可具有方向性（使用簡單的方式或者 5 度為步長）。	
房間中遮罩物可使用隔音牆和盒狀障礙物。	

資料來源：本計畫整理。

陸、德國 BASTIAN

BASTIAN與前述之CadnaR同為德國DataKustik公司所發展之聲學軟體，系統主要用於預測建築隔音，依據的標準是歐洲標準（European Standard）系列EN 12354。BASTIAN系統可應用於預測房間之間的隔音效果，如：學校教室、酒店或醫院。BASTIAN提供了大量的建築聲學資料庫^[109]，涉及各種聲學參數。BASTIAN

系統的計算包括：房間之間空氣音隔音（Airborne Sound Insulation）依據標準EN 12354-1；房間之間衝擊音隔音（Impact Sound Insulation）依據標準EN 12354-2；對室外音的空氣音隔音依據標準EN 12354-3；所有描述建築環境參數依據ISO 717-1和-2標準（包括：頻譜修正量）；對於參數STC（Sound Transmission Class）和IIC（Impact Insulation Class）採用ASTM E 413-87和ASTM E 989-89標準。

BASTIAN擁有強大的模擬計算能力，可支援複雜和簡單的模型。可計算1/3八音階和單數字評級（Single-Number Ratings），計算來自室外的音透射後的室內音壓級，隔音的計算基於隔音傳輸元素和系統的數據。建立模型中，門、窗和進氣口可插入到不同的結構之間，增加了通風口和導管的側面元素或音傳輸系統。多種連接類型，包括：重單層牆和雙層牆、輕質牆板、地板和側面空心牆，以及它們的組合，通過重複和反演房間的情況來改變參數，可方便的生成各種房間情況的變體。

BASTIAN能夠就地計算模型的混響（迴響）時間，修正了側面元素的輻射所造成的影響，材料結構和音源的資料庫可由使用者擴充。使用者可匯入自定義的結構，包括：圖片格式BMP/JPG及可匯入CadnaA的噪音頻譜圖。另可匯出模型的結構圖以及通過微軟Excel格式匯出所有的計算數據。擁有多語言使用者界面，包括：德語、英語、法語和西班牙語等。

柒、日本 TNEL 軟體

集合住宅室內噪音，由日本木村翔教授於1978年提出的全噪音暴露TNEL評估指標，是對在使用中的集合住宅室內之噪音環境的評估。此評估指標的評估步驟是對調查後所選定作為評定項目的各種音源在30分鐘內的尖峰噪音量平均值，並依30分鐘內的持續發生時間或發生次數，重新計算出各個時間的TNEL30值。TNEL主要對以下三個類型的聲音進行計算：連續性的衝擊音、穩定音和單發衝擊音。

綜上所述，音場模擬預測之主要軟體，包括：Odeon、SoundPLAN、Insul、Raynoise、CadnaR、BASTIAN及TNEL。這些軟體主要用來模擬室內音場；有的亦可用於室外；有的則室內外均可，不同的軟體也有不同的版本供各類使用者選擇。這些軟體針對不同使用者、應用於不同場所而設計。各軟體大都提供了若干建立模型軟體或資料庫的銜接，如：CAD、Excel、QSI和GIS資料庫等，可實現多種所需場景下噪音的模擬和音場的模擬。各軟體又各具特色，有的軟體可繪製直觀形象的噪音圖、實現可聽化或生成動態音場分布圖等強大的功能。

3.4.1.3 評估和相互對比

壹、文獻統計情況

為了調研各種軟體在科研工作者中的使用情況，檢索了JASA、AA、JSV、ICSV、INTERNOISE等期刊、會議，並將檢索到的文獻做了如下之統計。從文獻來源上看，使用軟體進行聲學模擬預測總共約有151篇文獻，各個期刊、會議的文獻比例見圖3.4-4。

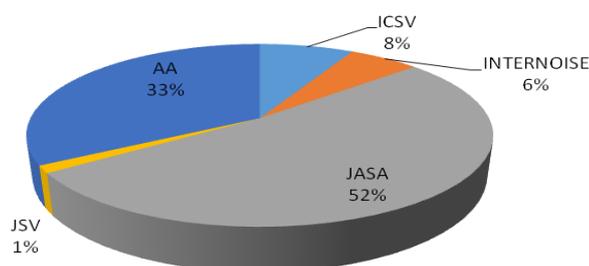


圖 3.4-4 文獻來源比例

貳、應用廣泛性

依據前述所查文獻內容，對Odeon、SounPLAN、Insul、Raynoise、CadnaR及BASTIAN等幾款軟體的應用範圍進行比較。Odeon主要對建築物內部和半開放空間進行聲學建立模型，可依據房間的幾何形狀、尺寸大小和房間的表面特性快速計算出可靠的模擬預測結果。SoundPLAN為專門針對噪音和空氣污染模型的電腦模擬，包括：交通噪音、室內和室外的職業性噪音、一般工業噪音和航空器噪音。Insul主要應用於室內聲學，預測牆壁、地板、天花板及窗戶的隔音性能以及屋頂由於降雨產生的噪音。Raynoise的主要功能是對封閉空間、敞開空間以及半開/半閉空間的各種聲學行為加以模擬。CadnaR主要應用於室內和工作環境噪音量計算和預測，可幫助使用者進行工作環境中的聲學規劃和降低噪音處理。而BASTIAN則應用於預測房間之間的隔音效果，如：學校教室、酒店或醫院。另外常見之LimA主要是對環境噪音的計算和分析；CadnaA則廣泛適用於工業設施、公路、鐵路和區域等多種噪音源的影響預測、評估、工程設計與控制對策研究。幾種軟體的應用範圍如圖3.4-5所示。

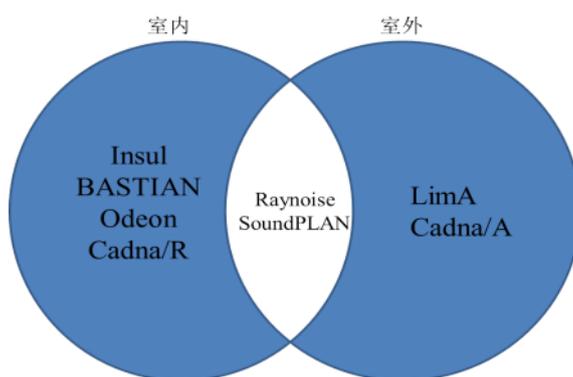


圖 3.4-5 幾種軟體的應用範圍

3.4.1.4 國外室內噪音推定計算

壹、室內外噪音經驗式及計算概念

一、基本概念

室外噪音傳播至室內之衰減模式，如圖3.4-6之示意。當室外環境噪音為 SPL_w 時，傳達至受音之外牆牆面時會有距離衰減 ΔL_r 成為 SPL_o ；聲音要透過外牆達到室內，受外牆開口部隔音性能影響會有 TL_w 的衰減；最後進入室內再受室內吸音力 ΔL_n 、其他因素 ΔL_t 之影響，而成為室內音壓級 SPL_i 。

此即為室外噪音傳播至室內之衰減模式，即建築物室內噪音與室外噪音環境間之關係受到衰減因子（ ΔL 、 ΔL_r 、 TL_w 、 ΔL_n 、 ΔL_t ...）之影響。環境噪音衰減量與各衰減因子間之關係如下式所示：

$$\Delta L = \Delta L_r + TL_w + \Delta L_n - \Delta L_t \quad (3.4.4)$$

上式及圖3.4-6中：

ΔL ：環境噪音衰減量； ΔL_r ：距離衰減量

ΔL_n ：室內減音量； ΔL_t ：其他傳播途徑

TL_w ：外牆開口部隔音量； SPL_w ：音源之音功率級

SPL_o ：外牆面入射音壓級； SPL_i ：室內容許噪音音壓級

環境噪音預測模式 + 戶外噪音傳播至室內之衰減模式 = 室內音量

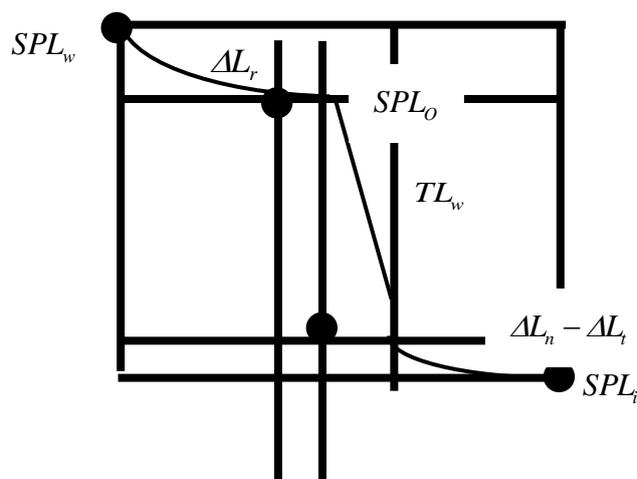


圖 3.4-6 室外噪音傳播至室內之衰減關係示意圖

二、室內外噪音經驗式^[110]

日本橫濱市集合住宅防音對策書關於室內噪音之推算經驗式如下所示。

$$L = L_0 - TL - 10 \times \log \frac{A}{\sum S_i} + 6 \quad (3.4.5)$$

$$TL = 10 \times \log \frac{\sum S_i}{\sum (S_i \times 10^{-TL/10})} \quad (3.4.6)$$

$$A = 0.161 \times V/T \quad (3.4.7)$$

式中：

L：室內噪音推定值；L₀：屋外噪音

TL：建物的防音性能（綜合透過損失）；A：室內吸音力

S_i：牆體或窗戶面積；V：室內體積；T：殘響時間；

其中屋外噪音 L₀ 經驗式如下：

$$(一) 東名高速公路：L_0 = 91.9 - 10 \times \log(\ell) \quad (3.4.8)$$

$$(二) 國道1號、246號：L_0 = 81.0 - 8.8 \times \log(\ell) \quad (3.4.9)$$

$$(三) 國道15號、16號：L_0 = 77.0 - 9.8 \times \log(\ell) \quad (3.4.10)$$

$$(四) 其他自動車專用道（第三京浜、橫濱新道、保土ヶ谷バイパス、橫濱
橫須賀道路、首都高速道路）：L_0 = 91.7 - 12.8 \times \log(\ell) \quad (3.4.11)$$

$$(五) 新幹線 $\ell \leq 25\text{m}$ ：L_0 = 102.6 - 8.6 \times \log(\ell) \quad (3.4.12)$$

$$(六) 新幹線 $\ell > 25\text{m}$ ：L_0 = 103.5 - 9.6 \times \log(\ell) \quad (3.4.13)$$

$$(七) 在來線（鐵道地上部）：L_0 = 109.8 - 16.7 \times \log(\ell) \quad (3.4.14)$$

貳、計算實例

以日本東名高速公路為例，計算室外噪音傳遞至室內之音量，如圖3.4-7、表3.4-2及表3.4-3所示^[110]。

一、本案例道路中心與2樓受音點之距離

$$l = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} = \sqrt{48.2^2 + 8.2^2} = 48.9\text{m}$$

二、屋外噪音的預測（東名高速公路）

$$L_0 = 91.9 - 10 \times \log(l) = 91.9 - 10 \times \log(48.9) = 75.01 \text{ dB(A)}$$

三、6塊榻榻米之日式房間的噪音計算

(一)室內A面的大小

- 1.壁面長度3.6m、深度2.7m；壁面從地板到天花板的高度2.4m。
- 2.窗戶尺寸寬度為1.8m、高1.7m。

(二)透過損失

壁體部50 dB；窗部37 dB（500 Hz時）。

(三)室內的殘響時間0.2秒（假設為和室）。

表 3.4-2 室外噪音傳播至室內之壁面透過損失計算表^[110]

壁體種類		構成要素	面積 S_1	透過損失 $T_1 / 500\text{Hz}$	$S_1 \times 10^{-TL_1/10}$
音源側的壁面	A 面	壁體(150mm)	5.58	50 ^{註1}	$5.58 \times 10^{-50/10}$
		窗口(鋁窗框)	3.06	37	$3.06 \times 10^{-37/10}$
	B 面	壁體(150mm)	5.04	50 ^{註1}	$5.04 \times 10^{-50/10}$
		窗口(鋁窗框)	1.44	37	$1.44 \times 10^{-37/10}$
小計			④15.12		⑤ 1.00×10^{-3}

註：壁體透過損失 $Y = 50 + \log(X/150)$ ；Y 透過損失(dB)，X 為 RC 壁體厚(mm)。

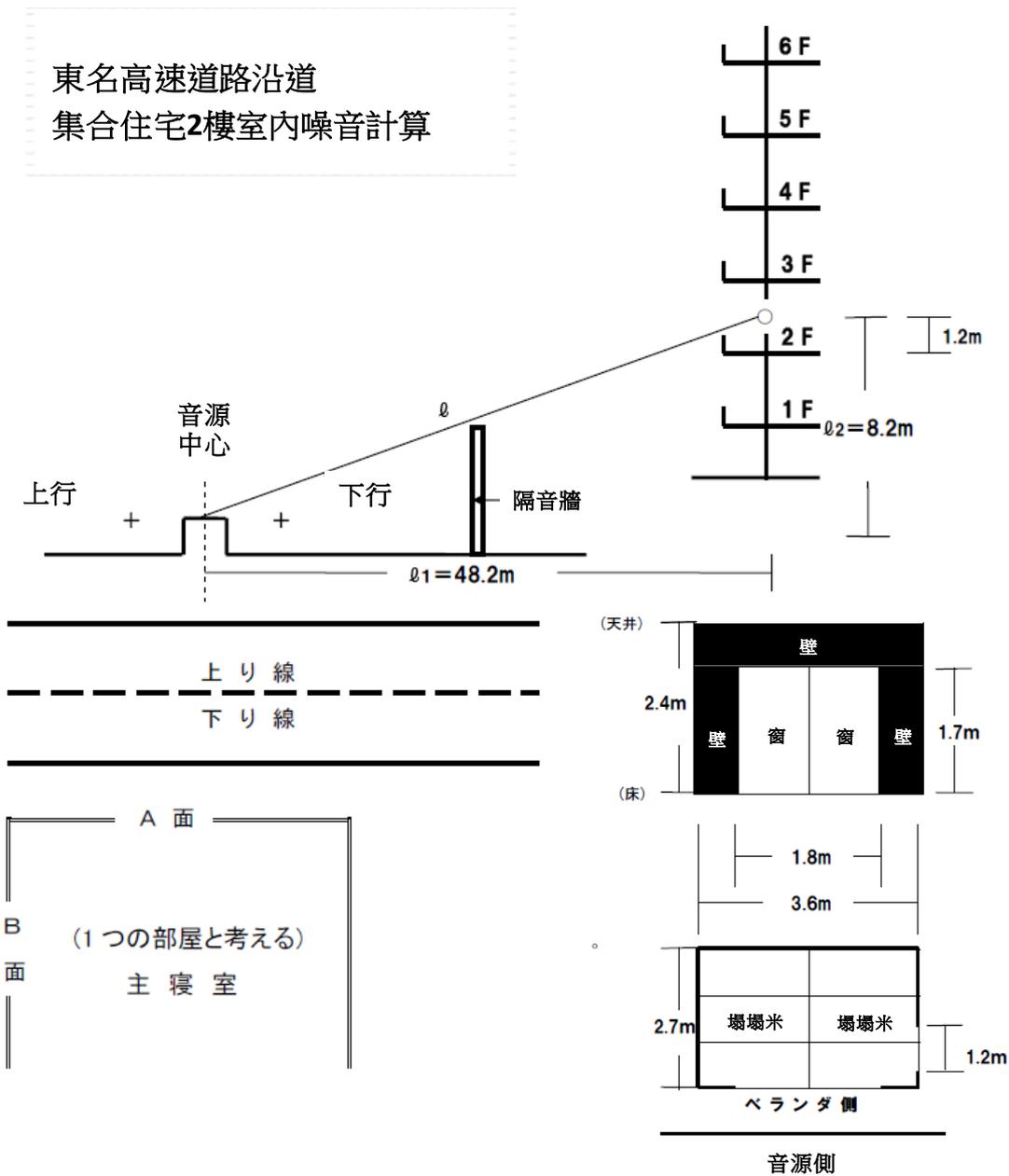


圖 3.4-7 日本東名高速公路室外噪音傳播至室內之幾何關係示意圖 [110]

表 3.4-3 室外噪音傳播至室內之音量計算表^[110]

1.音源側 屋外噪音	音源名稱		東名高速道路
	音源中心與受音點 之距離		$l = 48.9\text{ m}$
	屋外噪音	①	$L_0 = 75.01\text{ dB(A)}$
2.建物的 防音性能	綜合透過損失的計 算	②	$TL = 10 \times \log \frac{\sum S_1}{\sum (S_1 \times 10^{-TL/10})}$ $= 10 \times \log \frac{(4)}{(5)} = 10 \times \log \frac{15.12}{1.00 \times 10^{-3}} = 41.78\text{ dB(A)}$
	室內吸音力的計算	③	$A = 0.161 \times V/T = 18.77$ V：室內體積(23.32 m ³)；T：殘響時間(0.2秒)
3.室內噪音 推定值	$L = L_0 - TL - 10 \times \log \frac{A}{\sum S_1} + 6$ $= (1) - (2) - 10 \times \log \frac{(3)}{(4)} + 6$ $= 75.01 - 41.78 - 10 \times \log(18.77/15.12) + 6$ $= 38.29\text{ dB(A)}$		

註：殘響時間於一般日式房約 0.2 秒，西式房大約 0.5 秒。

3.4.2 國外住宅區音量相關管理措施與規範

3.4.2.1 一般性室內噪音管制方法

總體上說，城市室內噪音的管制是一項綜合工程，包括：法制建設、城市規劃、建設管理、環境監管、環境評估、建築設計、聲學設計等多個相關領域，涉及政府、規劃管理部門、交通管理部門、建設管理部門、環境監察管理與評估部門、建設設計部門、開發商、業主等多個單位和個人。由於待建、已建項目分別對應的室內噪音管制措施在很多地方存在較大區別，下面對這兩類情況分別展開討論。本部分資料來自參考文獻《室內噪音的預測和管制研究》（參考文獻^[111]）。

壹、室內噪音管制的流程

- 一、待建專案的室內噪音管制流程。
- 二、已建專案的室內噪音管制流程。

貳、室內噪音管制的步驟

- 一、待建專案的室內噪音管制步驟

(一)立法與執法

制定相關法律並嚴格強制執行是室內噪音管制的先決條件。國外多數國家有相關法令對室內噪音加以強制管制。例如：中國大陸已頒布《中華人民共和國環境噪音污染防治條例》用以控制環境區域噪音，但尚無類似條款專門用於室內噪音的控制。

(二)城區合理規劃

在總體規劃中，應該按噪音等級將城市合理分區，建立或完善城市主城區的區域環境「噪音地圖（Noise Map）」，並由環境監測部門予以經常更新。噪音地圖在歐洲多數大城市採用，如：倫敦、伯明罕、巴黎、阿姆斯特丹、布魯塞爾、柏林、日內瓦、羅馬尼亞、布拉格、赫爾辛基…等。它使用直觀清晰的方式反映區域環境噪音分布的基本狀況，能幫助決策者方便合理地規劃城市以防止環境噪音的擴散，為人們掌握控制噪音的主動權提供可能。

在規劃城區時，參照噪音地圖，儘量使音環境要求較高的場合（如：住宅、文教、醫療場合）遠離噪音源和高噪音區，並可將對噪音不敏感的建築物排列在該類建築周邊臨交通幹線上，以形成周邊式的隔音牆。同時應儘量避免交通幹線（包括：機場、航線和鐵路線）鄰近和穿行音環境要求較高的區域。

(三)項目審批與監管

將區域環境噪音超標情況作為強制性法規寫入建設專案批復要求與條件，加大並規範環境影響評估之噪音影響評估的權重因數與測量預測方法。

(四)環境影響評估

在規劃住宅、文教、醫療等對音環境敏感的建築時，需要委託具有乙級以上資質的環境影響評估單位對建設前後周圍環境噪音加以正確合理的測量與預測，對噪音影響展開重點評估。對於區域環境噪音現狀達不到建設專案所處類別的要求時，開發商必須展開積極有效的「室外噪音控制」設計工作，並委託環評單位對控制措施效果進行合理預測，結論必須有據可依。對於採取控制措施後，仍無法出具可靠論據證明能達到所處類別要求的建設專案，建設專案管理部門將不予批復。

(五)建築設計

待建專案的結構設計過程，必須包含建築聲學設計專項。設計單位必須配備有專門的建築聲學設計師，且該人員需持有國家或省級統一認證的建築

聲學職業資格證書。待建專案的隔音設計要求，須嚴格遵照《民用建築隔音設計規範》中的相關內容。在設計評審時，需包括隔音設計評審專項，進行專門評審且具有一票否決權。

(六)室內噪音隱患評估

對音環境要求高的場所，建議業主在室內裝修、擺設前，專門組織人力對將來可能存在的室內音源與戶間噪音予以合理預測、隱患評估與措施設計。

二、已建專案的室內噪音管制步驟

(一)立法與執法

該部分與待建專案相關內容相一致。

(二)噪音不滿意度舉報與調查

政府、環境管理部門應該開通順暢的環境噪音污染、噪音擾民的舉報管道，並有義務對其中問題較突出的室內噪音案例進行跟蹤走訪與調查。建議在各個社區建立完備的「噪音不滿意度調查（Noise complaint investigate）」與「危機處理（Crisis-process）」機制，以迅速發現室內噪音問題地點並有效予以處理。

(三)噪音測量

對問題地點首先須同時開展室外區域環境噪音測量和室內噪音測量工作，相關測量方法與要求請參照3.3節。測量室外區域環境噪音時，應分別在室外、室內布點測量，室內測點宜分別測量窗戶或閘開、關兩種狀態下室外區域環境噪音的影響，以確定門、窗等的實際插入損失。

在測量室內噪音源的噪音影響時，首先應調查清楚所有潛在的噪音源，然後應在各測點分別針對每個噪音源單開的情況進行測量，以確定各處各噪音源的影響分布，同時需在室內重點防護位置加以額外布點。

當調查發現室外有大型振動源（如：變壓器、冷源熱泵機組）鄰近時，需使用振動感測器依據《振動與衝擊對建築物振動影響的測量和評估基本方法及使用導則》（GB/T 14124-1993）進行振動測量與評估。以上測量在室內布點位置須保持一致。

(四)噪音來源識別

按照多個音場疊加則音能量線型疊加的原理，正確處理測量到的資料，分別計算出各室外噪音源、各室內噪音源在室內各測點處的噪音能量及其所佔百分比，以確定室內各處各來源噪音影響貢獻值，識別主要噪音源。

(五)採取措施

測量分析後需針對不同情況分別採取措施，以保護室內重點防護點（區）：

當主要是室外音影響時，應根據具體情況針對性進行「室外噪音控制」和建築隔音加強的措施。當主要是室內音影響時，應瞭解清楚具體單個噪音源在重點保護點的影響貢獻值，並分別採取：音源降噪、隔音防護（隔音罩、擋音板和室內隔音牆等）以及安裝位置變更等措施。

對於主要由室外振動引發的影響情況，必須詳細調查建築周圍（包括地下）所有配套設施，重點是變壓器、冷源熱泵機組、中央空調器等大型裝置。對振動源本身需採取隔振、減振措施，特殊場合下須同時在室內進行減振補救：將現有地板改造成浮築樓板，甚至在現有房間內浮築建造一個嵌套房間。

3.4.2.2 一般性室內噪音控制技術

噪音的防制主要是控制音源的輸出和音的傳播途徑，以及對接收者進行保護。包括：吸音、隔音、消音等措施。

目前，國內外採用「吸音降噪」方法進行噪音控制已非常普遍，一般效果約為6 dB~10 dB。其設計步驟歸納如下：

一、瞭解噪音源的聲學特性。如：音源之總音功率級 L_w ，或測定距音源一定距離處的各個頻帶音量與總音量 L_p ，以及確定音源指向性因數 Q 。

二、瞭解房間的聲學特性。如：幾何尺寸、估算各個壁面各個頻帶的吸音係數 α_1 、房間常數 R_1 。最後，由噪音允許標準所規定的噪音量，求出需要的減音量。

三、根據所需之減音量，求相應的房間常數 R_2 或總吸音量 A_2 、平均吸音係數 α_2 。

四、確定了材料的吸音係數後，合理選擇吸音材料和結構，並注意安裝方法。注意材料強度、施工難易程度、經濟性、裝飾性及防火、防潮等。吸音降噪只能降低混響音，對直達音較無效。只靠吸音降噪降低噪音10 dB以上，幾乎不可能。

3.4.2.3 世界各國噪音政策

壹、歐盟^[112]

歐盟的環境噪音影響著很多人的健康，其中不乏早逝的案例，歐盟環境噪音

問題也對經濟造成重大衝擊。歐盟監管架構提出不同的方案，試圖處理環境噪音問題，並降低其健康影響風險，做法包括：訂定有關噪音地圖、行動計畫和源排放限制的責任。但監管機構延宕執行和歐盟缺乏企圖心，導致在歐盟制定一套有效的噪音消減政策始終無法完成。歐盟委員會（European Commission, EC）的服務包含多項行動，該委員會並建議一系列以改善當前狀況為目的之法案。

如果要改善對問題的認知，對於歐盟公民的環境噪音暴露量，必須要有可靠的估計。歐洲議會和歐盟委員會的「環境噪音之評估及管理指令（2002/49/EC）」（Environmental Noise Directive, END）要求，歐盟會員國（Member States, MS）從2007年6月30日開始，必須根據第7(1)條，以5年為期，為所有主要道路、鐵路、機場和都會區繪製策略性噪音地圖。

歐盟會員國主管機關（Competent Authority, CA）將可運用策略性噪音地圖，來決定行動計畫的優先順序。歐盟委員會則可利用策略性噪音地圖，來評估暴露於噪音的人數。這些資訊也可讓一般民眾明白，他們暴露於噪音的程度，以及當前已採取哪些行動來降低他們的噪音暴露，使其低於可能危害民眾健康的程度。

END的目的之一是在全歐盟建立一套共同的環境噪音暴露評估方法。基於這個目的，指令中定義了一系列共同噪音指標。歐盟會員國則根據END第7條繪製策略性噪音地圖。由於缺乏適當的評估，過去始終無法制定END所要求的環境噪音評估共同方法。歐盟的政策目標仍然付之闕如。END並無訂定野心勃勃的噪音消減作為（如：在源頭消減噪音），進而帶動其他立法。相反地，END的規定僅容許利用既有技術。例如：源頭的噪音限值是根據噪音源排放之實際噪音量來訂定的，而此一結果往往是業界的建議。為了改善噪音暴露之估計，END第6.2條授權歐盟委員會制定決定噪音指標 L_{den} 及 L_{night} 的共同評估方法。到目前為止，歐盟委員會評估了在第一回合策略性噪音繪圖期間（2007年），不同國家的方法所產生結果之可比較性，並做出結論認為所採用的評估方法差異非常大^[113]。

評估結果顯示，在歐盟會員國之間，要提出一致且可比較的暴露過高噪音人口數據，仍然非常困難^[114]。困難的原因在於：(1)歐洲所要求的策略性噪音繪圖不完全；(2)歐盟層級所報告之數據品質及格式不一；(3)所採用之評估方法不同；(4)有關需繪圖道路之選擇和建築物內人口之分布的策略不同；(5)用於健康影響評估之劑量-反應曲線無法取得或過時。

而歐盟之環境噪音監管框架，包括：

- (一)降低機動車輛之噪音。
- (二)歐洲機場作業限制。
- (三)歐洲鐵路噪音政策。
- (四)戶外機具噪音之處理。

貳、德國^[115]

於歐盟國家中，德國因屬對於各類噪音研究、預防及控制等之先進國家，故特別摘錄說明之。德國有關噪音的法規包括：多項法律、條例及其他有關各種噪音源（交通、產業、機動機具、運動場…等）的規定。噪音一般是由歐盟立法管轄，譬如所謂的「戶外噪音指令（Outdoor Directive）」和「耗能產品指令（Energy-using-Products Directive）」。其他法令對噪音源所產生之噪音暴露也有限制規定。另一個實例是將歐盟的「環境噪音指令（Environmental Noise Directive）」落實於德國噪音政策的執行方案。這些方案包含考量公眾關切擬訂適當噪音消減計畫的原則。德國最惱人的噪音源即交通噪音，因此，交通路線規劃均由各別噪音源之相關法律及條例予以規範。大多數固定噪音源之噪音暴露，均由一項國家級法令予以規範，即「噪音消減技術指引（TA Laerm）」。此外，德國還制定多項與噪音標準有關的政府經濟發展計畫。最後，德國還有獎勵優良安靜產品系列的「藍色天使（Blue Angel）」環保標章。

在德國，保護民眾免於不良環境暴露的法令，一般都遵循「污染者付費原則」。德國的主要「噪音污染者」為交通、產業、鄰居和機動機具。立法基礎為在技術上可行之噪音消減措施。至於採取何種措施，則相當程度取決於噪音消減的程度或應消減程度。歐盟立法通常透過一系列歐盟指令，為歐盟會員國提供一套法律框架。歐盟規範（European Regulation）則不需要國家實施，其本身便具有法律約束力。國家立法通常遵循歐盟指令的立法建議。國家立法制定有關噪音（根據歐盟指令）、噪音暴露、土地利用規劃或經濟誘因的規定，也可能為時間利用規定，提供一個管制框架。

地方立法遵循國家法律制定，經常規範一般民眾的行為，並制定有關個人製造噪音的限制。尤其，機動機具之操作時間，也由地方立法規定。由於噪音消滅通常屬於地方層級的工作，因此，地方政府有義務因地制宜執行聯邦法律，並決定是否有必要實施進一步措施。

在噪音源頭執行技術性噪音消減，是最高指導原則。基於國際標準和德國所參與簽署之全球噪音政策，德國必須遵從某些指導性噪音管制規範。這些指導性規範經常僅提出技術可行性措施之最低要求。因此，德國的自創規範非常少。表 3.4-4 列示德國現行的主要噪音管制規範。

表 3.4-4 德國噪音管制規範一覽表

噪音類型	噪音源	效力	規範(行動)
空中交通	飛機	國際	ICAO, Annex 16, Vol. I (限制) ^[116]
道路交通	車輛	歐盟	1970/157/EEC (限制) ^[117]
	摩托車	歐盟	1997/24/EC (限制) ^[118]
	車輪	歐盟	規範(EC) No 661/2009 (限制) ^[119] 規範(EC) No 1222/2009 (標示) ^[120]
鐵路交通	火車	歐盟	CR TSI 噪音(對傳統鐵軌的限制) ^[121] HS TSI 鐵道車輛(對高速火車的限制) ^[122]
產業/運動/休閒	設施	德國	BImSchG (最新噪音消減技術) ^[123]
產品	機動機具	歐盟	指令2000/14/EC (標示及限制) ^[124]
		德國	32. BImSchV (標示、限制、操作時間) ^[125]
	能源相關產品	歐盟	指令2009/125/EC (限制) ^[126] 指令2010/30/EC (標示) ^[127]

參、香港⁶¹

經過30年的努力，香港成功減少了許多最喧鬧和滋擾的噪音源，包括打樁機至新建道路的交通噪音。但噪音問題仍需關注，尤其是在噪音管制實施前已發展和較舊的市區以及某些工業。因此，環保署一直鼓勵發展商採用新穎的解決方案和分享最佳作業手法。新近的例子包括：創新的減音窗戶和簷篷設計，以及可讓建造業和酒牌處所交流改善噪音環境心得的特設網上平台。

一、發展里程

推出以建造業及酒牌處所為對象的新網站，以推廣可緩減其營運噪音的良好作業手法。截至2015年底共有61個路段重鋪了低噪音路面物料，令約12萬名市民受惠。截至2015年底共有17個現有路段加建了隔音屏障，令約5萬6千名市民受惠。

二、補偏救弊

香港約有96萬人受過量交通噪音影響，他們主要居住在較舊的市區，由於該些地區的發展密度高，只有很小空間可在噪音源與噪音受體之間提供分隔或

興建隔音屏障。然而，發展商為減低噪音已在建材和設計上動腦筋，並於不久前推出了兩項新穎的解決方案可惠及用家。其中一項是在九龍一宗私人發展新項目所採用具有吸音物料的簷篷，另一項是在香港理工大學學生宿舍所採用的特別設計窗戶，該設計在窗戶開啟時，仍可盡量減低噪音。

(一)減音簷篷：九龍地盤的發展商面對巨大挑戰。發展項目的527個住宅單位中，部分會俯視交通繁忙的道路，例如：佛光街，因此受到高達77分貝 L_{10} （1小時）的過量交通噪音影響。新樓盤除了採取多項傳統的噪音消減措施，例如：調節樓宇坐向盡量避免單位直接面向繁忙道路，及利用建築簷片和減音露台阻隔噪音，發展商亦興建跨越地盤邊界的簷篷來阻隔噪音，並在簷篷外端裝設可減少傳到住戶的噪音的減音器。圖3.4-8例子展示發展商如何為噪音問題提供解決方案。

(二)打開窗戶減噪音：圖3.4-9理大新建的學生宿舍是另一新穎解決方案的例子。宿舍樓高27層及有828個居住單位，部分居住單位因俯視交通繁忙的道路，會受高達80分貝 L_{10} （1小時）的過量交通噪音影響。這次發展商採用了由上下兩個交疊部分組成的擋音式減音窗，窗框內側更設有吸音物料。這樣的設計令噪音衍射後會被吸收，減音效果比傳統玻璃窗多8 dB(A)。更出色之處是該設計容許打開窗戶通風，毋須依賴冷氣。

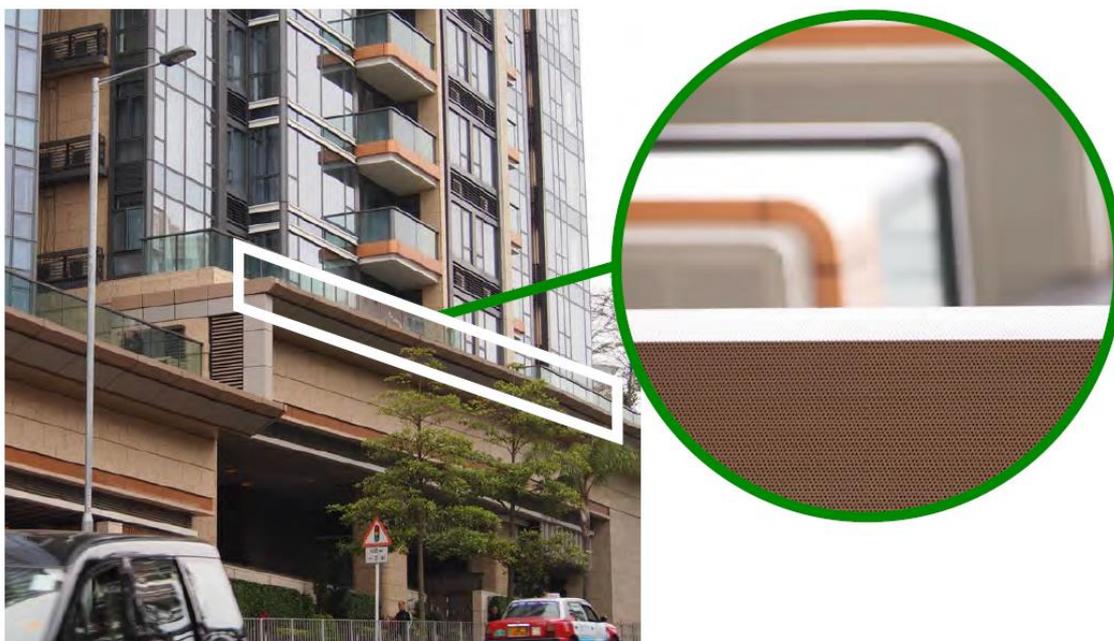


圖 3.4-8 香港九龍住宅簷篷內置減音器^[61]



圖 3.4-9 香港理大新建的學生宿舍之擋音式減音窗^[61]

三、未來展望

環保署一直竭力減低噪音量，並且取得不俗的成果。目前，大部份環境噪音都已受到法律管制。政府已立例規管建築、工商業活動及鄰里所發出的噪音，同時規定在香港登記的車輛必須符合指定的噪音標準。環保署亦積極參與規劃及政策制定工作，並且推行消減噪音措施。儘管香港人口自1980年代終至今增加了約100萬，車輛數目亦倍增，但受嘈吵車輛聲浪滋擾的市民人數增長卻受到控制。然而，香港的交通還是愈來愈繁忙。環保署必須加強管制，方可有效控制交通噪音，否則，受過量交通噪音影響的市民人數將會持續快速上升。



四、管制噪音污染

噪音是市民經常投訴的環境問題。1986年環保署成立後，即以管制噪音為主要目標。環保署訂立了多項管制規定，限制建築工程、工商業樓宇及鄰里所發出的噪音，致力避免噪音問題。香港地少人多，加上以往規劃欠妥善，經濟又蓬勃發展，所以難免有環境噪音問題，但當局正不斷努力，務求消減噪音。

工商業場所如食肆等的通風系統經常產生擾人聲浪。這類噪音和鄰里噪音、防盜警鐘、新登記車輛噪音均受《噪音管制條例》監管，後者的噪音量必須達到歐洲及日本的標準。



圖 3.4-10 香港管理噪音的政府機關架構^[61]

五、周全計畫杜絕噪音

對付噪音，防患於未然是最佳的良策。如果住宅不貼近繁忙道路，便不會有許多市民受到交通噪音滋擾。《香港規劃標準與準則》早於1985年便開始規管噪音問題，而噪音的管制標準亦逐步收緊。透過環評程序，環保署在新市鎮及發展項目的規劃初期提供意見。就以東涌新市鎮為例，環保署便曾參與設計，確保居民不會受過量飛機或道路交通噪音滋擾。



宏觀上，環保署亦會就一些關於香港整體決策事宜提供意見，例如：未來的運輸計畫及香港整體發展方向等。在這方面，環保署會評估各種建議方案的環境影響，然後建議政府採納對環境損害最輕微的方案。

如有任何噪音滋擾的投訴，可致電環保署或警署。警方是負責鄰里噪音、防盜警鐘和建築噪音投訴的執法部門。環境保護署轄下的4個區域辦事處則處理工商業樓宇及建築地盤噪音的投訴。有關管理噪音的政府機關架構詳如圖3.4-10所示。

肆、日本^{62]}

關於在日本的噪音法規，「環境基本法」提供了與噪音相關的“環境品質標準”，而“各種不同的噪音源”則由「噪音管制法（騒音制御法）」來進行管制。環境噪音品質標準是建立在不同的土地利用類型和時段，並針對航空噪音及和新幹線噪音訂有不同的標準。噪音管制法針對工場、營業場所指定特定設施及營建工地噪音之管制，則由縣及市等地方政府進行監管。近年來，新類型的噪音問題，如：低頻噪音，在現行的噪音管制法無法全面涵括，因此產生了不少噪音陳情案件。日本環境基本法規定的標準是「保護人類健康和維護生活環境」，並做為施政目標的標準。

一、日本環境品質標準

現行環境品質標準包含：環境噪音、航空噪音和新幹線鐵路噪音的標準，圖3.4-11為日本與噪音管制有關的法規。

環境噪音品質標準為國家標準，並依照指定的土地利用和時段類別訂有不同標準，分區類別原則上由縣級來指定，這些標準係以時段均能音量作為指標。標準主要區分為兩種類型，分別是「一般地區」和「面臨道路地區」，並再依所在土地細分為各種區域標準，如表3.4-5及表3.4-6所示。面臨道路地區的標準之訂定並有以下幾點考量：(一)在日本的道路交通已顯著增加；(二)儘管道路已具備非常高的公共性，但仍有道路網路尚未完全開發；(三)居住在面臨道路地區的民眾會因道路而受益。

除了上述標準，針對小型機場和大型建設或傳統的鐵路公路，環境噪音品質由地方政府監控。在2009年，在總數3,630個一般地區監測點，有81.4%的監測點符合標準；而面臨道路地區總數6,965個監測點，有90.6%符合各自的環境品質標準。

新幹線鐵路噪音環境品質標準採用 L_{max} 作為指標，如表3.4-7所示。由於之前未設有傳統鐵路的噪音環境品質標準，在市區不斷開發與擴展鐵路網的情況下，政府於1995年的噪音控制措施的指引值採用 L_{eq} 為指標，適用於新建鐵路建設和大規模的重建。具體來說，將此類環境品質目標訂為日間 L_{eq} 60分貝，夜間 L_{eq} 訂為55分貝。

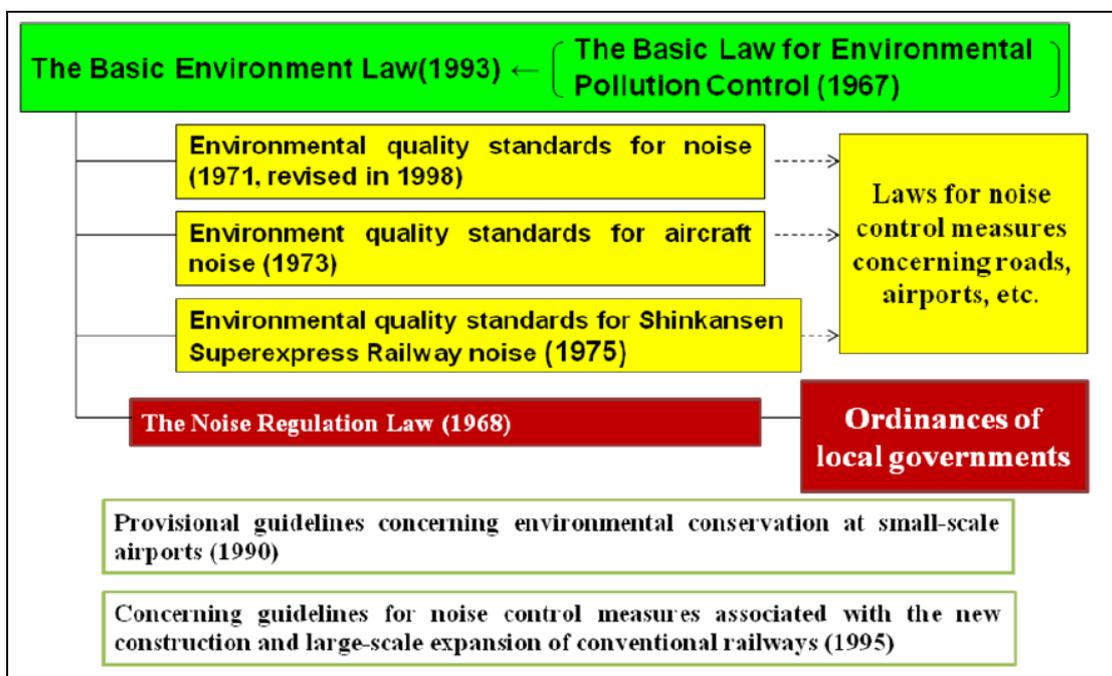


圖 3.4-11 日本與噪音管制有關的法規^[62]

表 3.4-5 日本環境品質音量標準^[62]

(Revised in 1999)

Category of area	Standard value	
	Daytime (10AM-10PM)	Nighttime (10PM-10AM)
AA	50dB or lower	40dB or lower
A & B	55dB or lower	45dB or lower
C	60dB or lower	50dB or lower

- Day is defined as between 6 a.m. and 10 p.m. and night as between 10 p.m. and 6 a.m. the following day
- Areas where AA is applicable are areas that particularly require quiet like areas where rest homes and social welfare facilities are concentrated
- Areas where A is applicable are areas used exclusively for residence
- Areas where B is applicable are areas used mainly for residence
- Areas where C is applicable are areas used for commercial and industrial use, with a considerable number of residential houses

表 3.4-6 日本面臨道路區域環境品質標準^[62]

Type of area	Standard value	
	Daytime (10AM-10PM)	Nighttime (10PM-10AM)
Of Category A areas, areas facing roads with two or more lanes	60dB or lower	55dB or lower
Of Category B areas, areas facing roads with two or more lanes, and of Category C areas, areas facing roads with clear lanes	65dB or lower	60dB or lower

表 3.4-7 日本面臨新幹線環境品質標準^[62]

(Notification in 1975)

Category of area	Standard value
I	70dB or lower
II	75dB or lower

Areas where I is applicable are areas used mainly for residence, while areas where II is applicable are areas other than I including areas used for commercial and industrial use where it is necessary to preserve the normal way of life.

二、日本噪音管制法

除了前述的法令是與環境品質有關，日本的噪音管制法架構如圖3.4-12所示。噪音管制法要求地方政府指定區域以保護該區域內的居民，對於區域內的工廠、營業場所、營建工地以及機動車輛必須管制其發出的噪音。截至2009年底，全日本共有1,315個市鄉鎮公告了此類區域，佔全國所有市鄉鎮的75.1%。日本管制法所管制的工廠或營業場所指的是公告區域範圍內的工廠或營業場所內設置有中央所指定的「指定噪音設施」，操作這些指定噪音設施者必須向地方政府申請核可且在周界外必須符合管制標準。營建工地亦指公告區域範圍內的施工為指定的施工程序，工程單位必須符合周界標準且申報每日施作時間，並且週日及國定假日不得施工。各地方的管制標準可由縣級主管機關訂定，但不得低於中央所訂標準。當工廠、營業場所、營建工地的周界噪音超過管制標準時，且認定對周遭環境產生不利的影響時，地方首長可以提出建議或要求排放者改善。

當道路交通噪音超過容許音量或經監測後超過環境省所訂標準且認定對周遭環境產生不利的影響時，環境省可以要求該縣公共安全部門及道路主管機關透過交通管理或改善道路結構以降低噪音。除了中央所規定的工廠、營業場所及營建工地外，地方縣級單位亦可以依照本身的情況，自行公告管制對象，如夜間酒吧、餐廳的擴音設施。

三、新的噪音來源

近年來，來自於家戶或營業場所空調設備噪音陳情案件有增加的趨勢，為了因應此情形，環境省研議導入噪音標籤（Noise Labeling System），鼓勵製造廠商生產低噪音型機具。同時宣導在安裝及使用時應注意防音措施。另外，低頻噪音的陳情案件也日漸增加（註：日本的低頻噪音範圍訂在100 Hz以下），尤其是在政府鼓勵再生能源後，有些來源是風力發電機組。由於這些機組所設置的區位導致監測數量尚不足，加上對於噪音及健康的關連性亦尚未明瞭，但風力發電機組的設置數量年有增加，故環境省目前針對風力發電機組的噪音進行相關研究。

四、日本環境糾紛解決制度（Environmental dispute resolution system）

環境糾紛協調委員會（EDCC）是日本一個國家級的組織，隸屬於總務省。根據公害糾紛處理法（EDR），本委員會的角色之一，是及時和適當地透過調解、調處、仲裁或裁決來解決環境糾紛。透過本EDR系統已解決了一些機場噪音、地下鐵振動或低頻噪音污染案件、道路交通、新幹線、工廠的噪音振動案件。

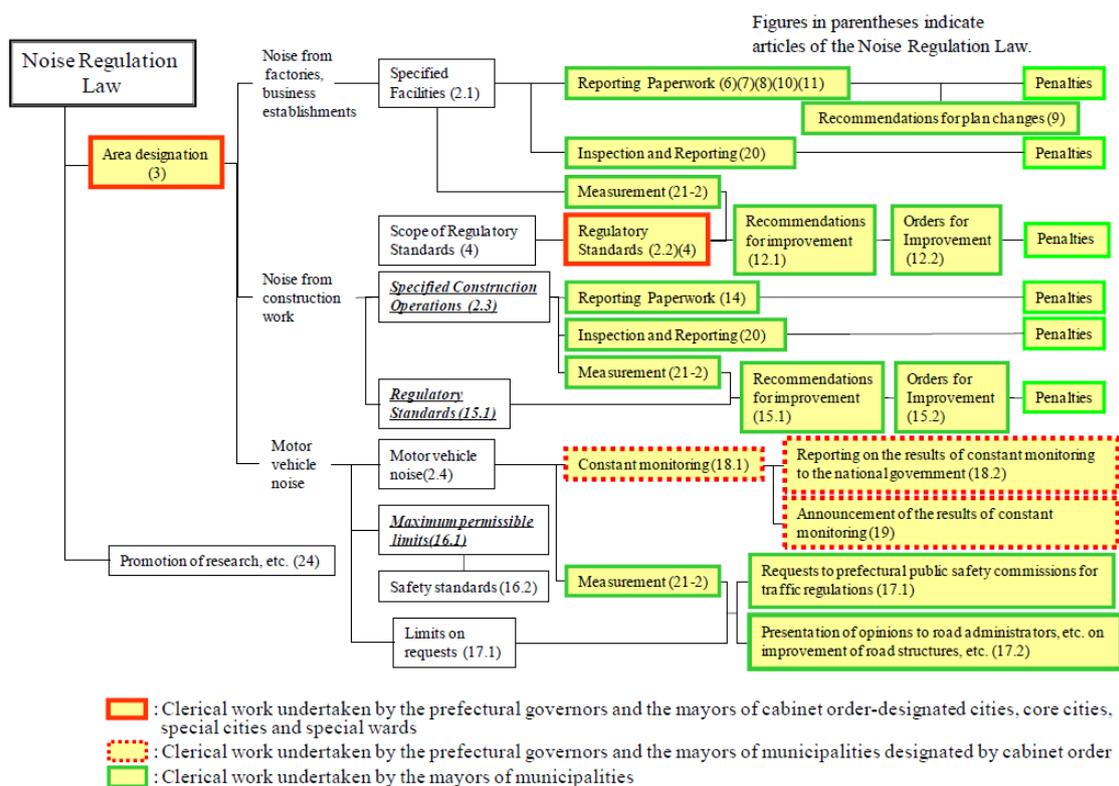


圖 3.4-12 日本噪音法規架構圖^[62]

伍、澳門^[198]

一、現況背景

與大部分城市一樣，噪音問題是澳門城區主要環境問題之一。而近年隨著社會經濟的急促發展，噪音問題有惡化趨勢。2016年主要的噪音投訴個案類別為“談話及喧嘩”、“音樂及卡拉OK”以及“室內裝修”，三者合共佔總投訴個案約7成。總體而言，2016年噪音投訴個案



數目較2015年輕微回落，反映公眾守法意識有所提升，詳如表3.4-8及圖3.4-13所示。

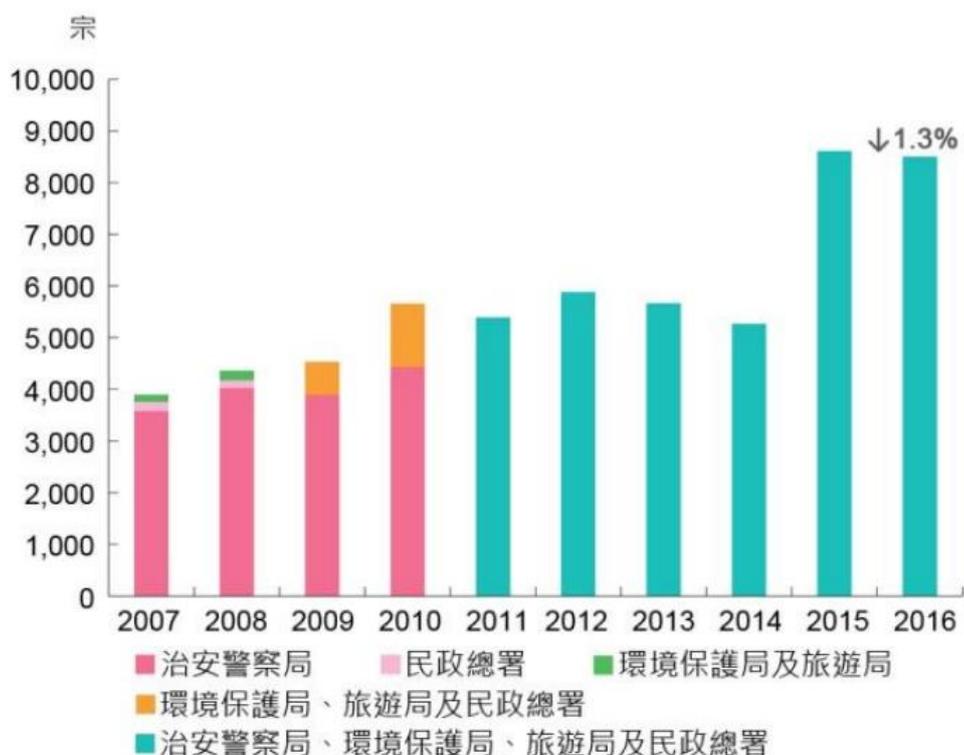
整體而言，2016年各種噪音驅動力，特別是道路交通以及社會生活噪音所構成的壓力仍較大，詳如圖3.4-14所示。近年鄰近新發展區域如施利華街站、生態保護區站的噪音水平呈明顯的上升趨勢。為此，建議需逐步控制道路車輛的數

目，加大推廣低噪音環保車輛的使用，創設更完善的步行及公交系統，並鼓勵和推動公眾綠色出行。同時，亦需繼續加強噪音法的執法和宣傳力度，配合社會的發展適時完善有關法例，以減少噪音對居民的影響。

表 3.4-8 澳門 2015 年至 2016 年噪音投訴個案總數之數值及增/減幅

(單位：宗)	2015	2016	增/減幅
總個案	8,611	8,500	-1.3%

註：(1)包括治安警察局、環境保護局、民政總署及旅遊局所接獲的噪音投訴個案。
(資料來源：統計暨普查局－《環境統計2016》，2017)



註：(1) 2007 年開始包括治安警察局、環境保護局、民政總署及旅遊局所接獲的噪聲投訴個案。

圖 3.4-13 澳門歷年接獲的噪音投訴個案數目^[198]

資料來源：統計暨普查局，2017

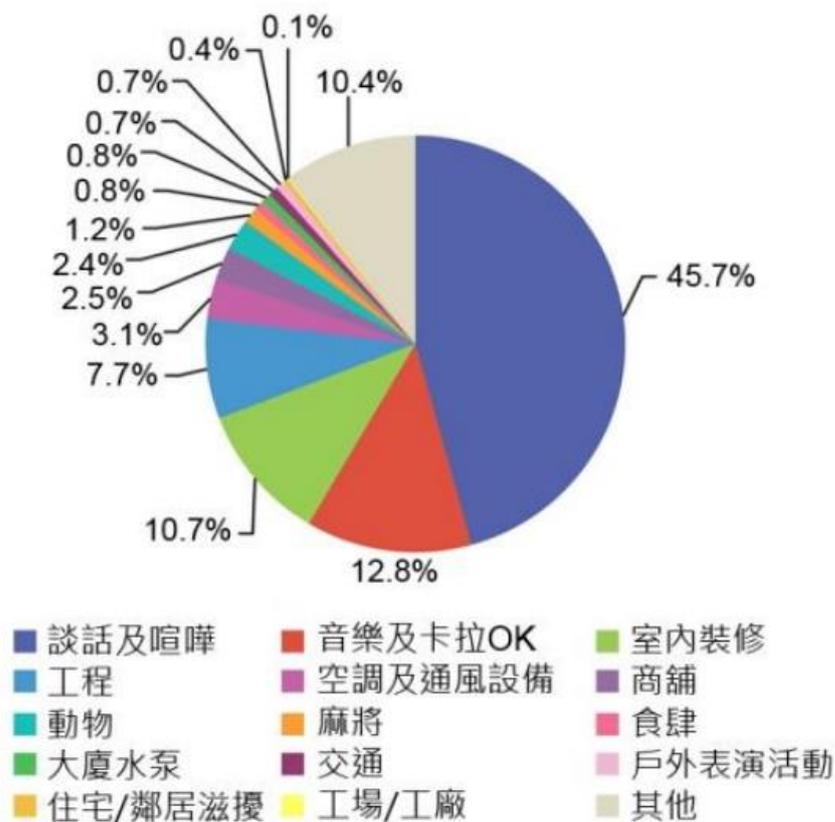


圖 3.4-14 澳門 2016 年噪音投訴個案分類的百分率^[198]

資料來源：統計暨普查局，2017

二、最新法令

第8/2014號法律《預防和控制環境噪音》已於2015年2月22日起生效。新噪音法主要規管七類噪音污染源，包括：(1)土木建築工程噪音及工作所使用之設備；(2)住宅樓宇之更改、保養及維修工程；(3)住宅樓宇中的日常生活活動及寵物發出之噪音；(4)公共地方的活動；(5)表演、娛樂及類似活動；(6)空調及通風設備；及(7)工業、商業或服務業樓宇或獨立單位中之活動。

新噪音法在舊噪音法的基礎上加強了對市民影響較大的打樁工程噪音及社會生活噪音的監管，以進一步保障市民的健康及寧靜的作息環境。在工程噪音方面，除了在星期日及公眾假期的全日，以及平日晚上8時至翌日早上8時的時段，不得進行任何打樁工程外，亦增設打樁工程不得超出20分鐘 L_{eq} 均能音量85 dB(A)之噪音標準，同時全面禁止使用高污染之撞擊式柴油錘、氣動錘及蒸氣錘打樁機等；除此之外，新噪音法亦收緊了住宅樓宇之更改、保養及維修工程噪音時段為星期日及公眾假期的全日，以及平日晚上7時至翌日早上9時的時段。

在社會生活噪音方面，對住宅樓宇中的日常生活活動及寵物所發出的噪音作出時間管制，受限制的時段為晚上10時至翌日早上9時。同時亦規定在星期日至星期五的晚上10時至翌日上午9時，以及星期六及公眾假期前夕的晚上11時至翌日早上9時的時段，不得在公共地方發出騷擾噪音，有關管制時段與露天表演、娛樂及類似活動一致。

三、相關罰則

新噪音法亦訂定了相關罰則，如違反住宅樓宇中的日常生活活動及寵物所發出的噪音，以及在公共地方發出噪音之相關規定，可被科處澳門幣1千元至2千元罰款；如違反住宅樓宇中的更改、保養及維修工程、空調及通風設備、露天表演、娛樂及類似活動、以及工業、商業及服務業所發出噪音之相關規定，可被科處澳門幣5千元至1萬元罰款；如違反土木工程噪音及工作所使用之設備相關規定，則可被科處澳門幣10萬元至20萬元罰款。

四、主管機關

為提高執法效率，新噪音法統一由環境保護局及治安警察局負責執法。日後環境保護局負責監察土木工程噪音及工作所使用的設備噪音；住宅樓宇中的更改、保養及維修工程噪音；空調及通風設備噪音；工業、商業或服務業樓宇或獨立單位中的任何活動所發出噪音，以及露天表演、娛樂及類似活動噪音的遵守情況及相關執法處罰工作。而治安警察局將負責監察住宅樓宇中的日常生活活動及寵物，以及在公共地方發出噪音的遵守情況，並繕立實況筆錄，送交環境保護局展開後續處罰工作。

陸、樓板撞擊音標準^[57]

韓國是全世界公寓噪音爭端最多的國家之一。近年來，有關公寓噪音的訴願迅速增加，原因為管理標準不切實際和居民缺乏社區意識。樓板撞擊音對於住宅室內為重要的噪音來源，相較於韓國的規定，歐美國家的樓板撞擊音標準比較嚴格，如表3.4-9所示。只有日本和韓國訂有重量-樓板撞擊音標準，這是因為亞洲人民的靜態生活方式。但在日本這項標準也不是強制的，而只是建議性質。

在歐洲，並無區分重量或輕量-樓板撞擊音，因為歐洲人在屋內通常都穿著鞋子。歐洲國家的標準不是低於韓國，就是與韓國差不多。例如：奧地利43 dB~50 dB，德國、挪威和芬蘭為53 dB。

柒、噪音罰則

在美國許多州，一旦發生有關公寓噪音的訴願，管理辦公室可以警告3次，如果未見改善，管理辦公室甚至可以勒令居民搬離，即使是屋主也不例外。為了避免居民製造噪音干擾他人生活，紐約市明定罰款金額，如表3.4-10所示。

在德國，為了預防公寓噪音爭端，政府訂有非常嚴厲的罰則。一旦發現製造噪音干擾鄰居或公眾情事，罰款可能高達10,000德國馬克。

在英國，政府訂有明確的社區生活噪音規定。管理單位一旦受理噪音損害訴願，將先對製造噪音者提出警告，如果持續再犯，將罰款1,000英鎊。

表 3.4-9 各國樓板撞擊音標準比較表^[57]

國家	標準	強制/建議	輕量-樓板撞擊音	重量-樓板撞擊音
韓國	住宅施工標準 相關規定	強制	58 dB以下	58 dB以下
德國	DIN 4109	建議	低於53 dB(A)	-
日本	住宅品質確保促進法 (第IV級)	建議	低於50 dB(L)	低於55 dB(L)
美國	住宅及城市發展法 (第III級)	建議	客廳和臥室 48~55	-

表 3.4-10 紐約市公寓噪音罰則一覽表^[57]

違反情形	違反次數	罰款	拖欠	明文規定
製造或放任 不合理噪音 (7AM~10PM)	1 st	\$350	\$1,000	有
	2 nd	\$700	\$2,000	有
	3 rd	\$1,050	\$3,000	無
製造或放任 不合理噪音 (10PM~7AM)	1 st	\$450	\$1,000	有
	2 nd	\$900	\$2,000	有
	3 rd	\$1,350	\$3,000	無

捌、噪音分級標準及劃分依據

表3.2-2中，針對中國大陸及日本住宅區位將噪音位準值分成1級、2級及3級，其分級標準及劃分依據補充說明如下，並與國內4種區分法的差異性進行比較。

一、中國大陸

(一)「民用建築隔音設計規範(GBJ 118-88)」

中國大陸「民用建築隔音設計規範(GBJ 118-88)」為國家建築工程

建設強制標準。隔音減噪設計標準等級，應按建築物實際使用要求確定，分特級、一級、二級及三級，共四個等級。標準等級的含義如表3.4-11所示。

**表 3.4-11 中國大陸「民用建築隔音設計規範（GBJ 118-88）」
隔音減噪設計標準等級含義^[87]**

特級	一級	二級	三級
特殊標準(根據特殊要求確定)	較高標準	一般標準	最低限

(二)城市功能區音環境^[58]

1. 0類功能區指康復療養區等特別需要安靜的區域；
2. 1類功能區指以居民住宅、醫療衛生、文化教育、科研設計、行政辦公為主功能，需要保持安靜的區域；
3. 2類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；
4. 3類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；
5. 4a類功能區指道路交通兩側區域；4b類功能區指鐵路幹線兩側區域。

二、日本

(一)《建築設計資料集成》

日本《建築設計資料集成》其聲學標準等級的意義詳如表3.4-12所示。分為特級、一級（標準級）、二級（允許值）及三級（最低限）共四個等級。

表 3.4-12 日本聲學標準等級的意義^[87]

特級	特殊用途	超越一般的特別隔音性能	根據特殊情況的要求
一級(標準級)	推薦標準	隔音性能很好	通常使用狀態下決不會對隔音不滿
二級(允許值)	允許標準	隔音性能滿足一般要求	隔音能滿足一般要求
三級(最低限)	—	隔音性能為最低限度	使用者不滿，但由於社會及經濟等原因允許的最低限

(二)噪音規制法以及特定工廠噪音規制基準

噪音規制法以及特定工廠噪音規制基準，對於受保護的區域之管制區

類別的分類是一樣的，在這兩個規制的註記（備考）中有明文說明管制區類別的分類以及權責單位：

1.噪音管制區分為第一種區域、第二種區域、第三種區域、第四種區域，各地方的區域類別由地方政府-都、道、府、縣長公布。

2.第一種區域：現為環境良好的居住區域，且特別需要保持安寧的區域。

3.第二種區域：以居住為主的區域，且需要保持安寧的區域。

4.第三種區域：以供住宅、商業、工業等使用的區域，且需要保持居民生活環境，有必要防止噪音發生的區域。

5.第四種區域：供工業使用但為了居住在本區域內居民之生活環境惡化，需要防止嚴重噪音發生的區域。

三、臺灣

依據「噪音管制區劃定作業準則（98.09.04）」第2條：噪音管制區劃分為下列四類，依其土地使用現況、行政區域、地形地物、人口分布劃分之：

(一)第一類噪音管制區：環境亟需安寧之地區。

(二)第二類噪音管制區：供住宅使用為主且需要安寧之地區。

(三)第三類噪音管制區：以住宅使用為主，但混合商業或工業等使用，且需維護其住宅安寧之地區。

(四)第四類噪音管制區：供工業或交通使用為主，且需防止噪音影響附近住宅安寧之地區。

四、差異性比較

因中國大陸及日本之室內音量係以建築隔音之觀點來考量，故其4個等級都是以「隔音性能」作為區分；而國內之噪音管制區係依其土地使用現況、行政區域、地形地物、人口分布劃分，故分級標準及劃分上有相當大的不同。另世界衛生組織（WHO）之 L_{Aeq} 指引值為日間35 dB(A)（16小時）；夜間30 dB(A）（8小時），由表3.2-2知，亞洲國家之住宅室內音量值相較WHO至少寬鬆5分貝以上。

若以環境音量品質的觀點而言，中國大陸及日本之分類內容和我國現行的4類噪音管制區內容就比較相似。而日本境內各地的區域種類是由地方政府之都、道、府、縣長公布；我國則是由縣市環保局來劃分（或修訂）境內各地區之噪音管制類別，而後再由地方政府公告實施。

第四章 調查住宅區室內外場所音量及噪音源分布

本計畫3.3節已蒐集及彙整分析國外有關一般性室內噪音之具體測量方法，並參考國內既有之相關測量規範及過去研究案之測量經驗等資料，初步研擬之室內音量的測量方法詳如6.1節之說明。本章主要在於現場調查及測量住宅區室內外音量、噪音源分布、環境及頻譜等資料，以瞭解目前住宅區室內外音量品質及噪音源類型，以作為住宅區室內外音量改善方法及相關法制作業訂定之參考。

4.1 進行住宅區室內外噪音量測研究

依據甄選須知，本項工作包括：開窗與關窗之不同條件、反射音及衰減狀況等測量至少10次。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；(5)測量儀器；及(6)內容確認。

4.1.1 住宅區室內外噪音量測規劃說明

一、測量目的及狀況

擬定之測量狀況如圖4.1-1之示意，主要在於瞭解建築物於「開窗及關窗」之隔音量（即穿透損失）及室內外音量衰減等情形。另由室外與牆面不同距離之測點的同步測量，瞭解牆面是否對於測點有噪音增量之影響（即牆面反射音）。

- (一)瞭解建築物「牆面」對室外測點之反射音影響。
- (二)瞭解建築物「窗戶打開」之穿透損失及對室外噪音的衰減狀況。
- (三)瞭解建築物「窗戶關閉」之穿透損失及對室外噪音的衰減狀況。
- (四)研提適用我國之住宅區室內音量品質的建議值草案或相關管制作為。

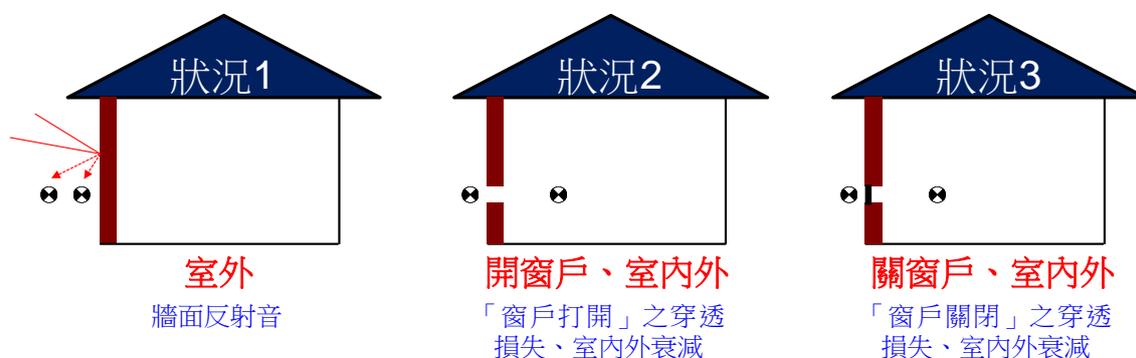


圖 4.1-1 住宅區室內外噪音及頻譜資料測量狀況示意圖

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：曾發生民眾噪音陳情之地點、路段或車流繁忙路段進行測量，俾具代表性。

(二)對象：選擇一般道路及陸上運輸之「道路系統或軌道系統」進行測量。

(三)數量：進行臨一般道路及陸上運輸之「道路系統或軌道系統」之住宅區室內外音量測定，兼顧一般道路、道路系統（高速公路、快速道路）或軌道系統（捷運、臺鐵、高鐵），數量規劃為20次數（合約為10次數）並統計分析其結果。本計畫之測量點次詳如表4.1-1所示。

表4.1-1 住宅區室內外噪音測量之數量表

對象	數量
1.一般道路	1
2.陸上運輸道路系統	
(1)高速公路	7
(2)快速道路	2
3.陸上運輸軌道系統	
(1)捷運	4
(2)臺鐵	4
(3)高鐵	2
數量小計	20 點次

三、測量方法

(一)住宅區室內

參考：

- 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.國外室內音量測量方法之文獻蒐集回顧。

本計畫據此初步建議住宅區室內音量之測量方法，請參閱「6.1 研提適用我國之住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案」。已於民國106年6月20日之「第一次說明會議（6.2.1節）」及8月28日之「專家學者諮詢會議（6.2.2節）」中對此進行討論及確認，原則上本計畫實際之室內音量測定工作將依此進行。

(二)住宅區室外

參考下述既有之測量方法規範。

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：(1)世界衛生組織（WHO）對住宅室內噪音為採連續5分鐘測量之 L_{Aeq} ，亦對干擾夜間睡眠的最大噪音值做出定義；及(2)韓國之公寓噪音損害認定標準原採5分鐘測量之 L_{Aeq} ，其後更改為1分鐘測量之 L_{Aeq} ，並公布了最大噪音量標準。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。

六、內容確認

為確認上述相關規劃之適宜性，已藉由民國106年6月20日之「第一次說明會議（6.2.1節）」及8月28日之「專家學者諮詢會議（6.2.2節）」與相關先進、單位等進行討論與確認，以進行相關之測量及分析工作。

4.1.2 住宅區室內外噪音量測結果說明

一、文獻資料蒐集及分析

(一)聲音通過窗戶之室內外音量差

1. 世界衛生組織（WHO）^[63]

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)。

2. 澳洲昆士蘭 (Queensland) 州政府及布里斯本 (Brisbane) 市議會^[128]

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）

3. “Noise Reduction through Facades with Open Windows^[128]”

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4.1-2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。

4. “WHO Night Noise Guidelines for Europe^[66]”

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4.1-3所示。

5. “Open/Closed Window Research^[196]”

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為20 dB(A)左右，其結果詳如表4.1-4所示。

6. 小結

隔音量變化的原因與建築物特性、房間混響時間、室外噪音源…等有關。綜合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)不等，其中又以「空屋」之窗戶隔音量約5 dB(A)為最小（表4.1-2）；「關窗」之音量差則約為20 dB(A)。

表4.1-2 住宅區於開窗下之室內外音量差^[128]

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4.1-3 單層玻璃及雙層玻璃之室內外音量差^[66]

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4.1-4 開關窗之聲學傳播文獻摘錄^[196]

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。 ● 如果窗口佔牆面積的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佔據其餘的90%。
DoE Design Bulletin 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

(二)建築物牆面之反射音

1. 日本

齋藤英俊等人2011年於鐵道總研報告(RTRI REPORT P.5~P.10 Vol. 25, No. 11, Nov. 2011)^[129]發表「建物の立地条件が騒音レベルに与える影響の定量評価」論文，針對建築物牆面所引起的反射音影響做了1/25縮尺的高架結構模型實驗，其實驗結果及相關參數說明詳如圖4.1-2所示。此研究所推估之建築物牆面的反射音關係式如下（測量點位於建築物正面）。

$$\Delta L = -A \times \ln(d) + B \quad (1 \leq d \leq 25) \quad (4.1.1)$$

式中各參數說明如後： ΔL 表示噪音增加量，單位dB； A 與 B 皆表示與建築物牆面長度（ w ，單位m）有關之係數； d 表示測點與建築物之間的距離，單位m。式4.1.1的參數 A 隨牆面的長度增加而減少，參數 B 值則約為一常數，其值為3（約為反射音最大值）。

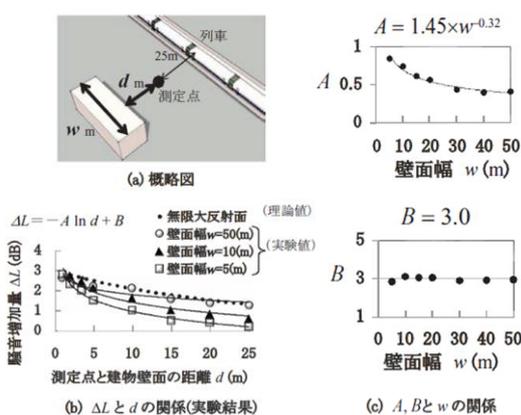


圖4.1-2 測量點位於建築物正面之牆面反射音實驗結果^[3]

若假設建築物高度25m、寬度10m且微音器（麥克風頭）距離牆面1.0m~2.0m（國內環保署規範）之情況下，推估反射音的增量約有2.5 dB~3.0 dB，即依文獻回顧之公式計算，當距離牆面為1m時，其噪音增加量 ΔL 為3 dB。

2. END及ISO

歐盟環境噪音指引（Environmental Noise Directive, END）及國際標準組織（International Standards Organization, ISO）建議於建築物前面測量有二種之音量修正方式：(1)當測量位置是直接於牆體表面時，-6 dB的修正（ISO, 2006）^[130]；(2)當測量位置是距離牆面 $2m \pm 0.5m$ 時，-3 dB的修正（ISO, 2000）^[131]。

3. “Methods of Environmental Impact Assessment Second Edition”^[197]”

PPG 24（Planning Policy Guidance 24）建議於同地點測量，Facade（距潛在受影響受體的牆面1m）的測值比Free-Field（自由場，距地面以外的反射面至少3.5m）高3 dB。另“DoT’s（1998）Calculation of Road Traffic Noise”的建議則為2.5 dB。事實上，牆面的影響隨音源而異且決定於音場是定向（directional）還是擴散（diffuse）。無論計算或測量結果是自由場還是立面都是至關重要的，其必須考慮的差異是相當大的。

4.小結

綜上之文獻回顧知，若依國內現行相關建築物外部噪音之評估規範（聲音感應器須距離牆面線1m~2m），參考：(1)日本模型實驗；(2)END及ISO；及(3)自由場之定義，皆顯示須對測值進行修正，即有牆面的反射音增量導致測值的高估。而多數文獻對此測量距離之修正量的建議約為3 dB。

二、測量結果說明

住宅區室內外噪音之各點次的詳細測量結果請分別參閱表4.1-5，各點次之測量結果彙整如表4.1-6~表4.1-11，茲將結果說明如後。

(一)一般道路

項目 (共計 1 點次)		均能音量 L_{eq}	最大音量 L_{max}	開窗率
1.關窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(1 點次)	17.7	20.2	—
	(2)空屋或近完工新屋(0 點次)	—	—	—
2.開窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(1 點次)	6.0	10.4	100.0%(客廳門)
	(2)空屋或近完工新屋(0 點次)	—	—	—
3.牆面反射音 (dB(A))	距離牆面線 1.5m / 3.0m(0 點次)	—	註：1.5m 音量扣除 3.0m 音量	
	距離牆面線 1.0m / 3.5m(1 點次)	-0.5	註：1.0m 音量扣除 3.5m 音量	

(二)軌道系統 (捷運、臺鐵、高鐵)

項目 (共計 10 點次)		均能音量 L_{eq}	最大音量 L_{max}	開窗率
1.關窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(9 點次)	9.4~27.4	9.1~27.4	—
		平均 17.7	平均 16.9	—
	(2)空屋或近完工新屋(1 點次)	13.4	7.7	—
2.開窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(9 點次)	6.1~14.5	5.7~10.6	22.2%~59.0%
		平均 9.3	平均 8.5	平均 34.3%
	(2)空屋或近完工新屋(1 點次)	2.7	1.5	40.5%(門)
3.牆面反射音 (dB(A))	距離牆面線 1.5m / 3.0m(2 點次)	-1.0~-0.1	註：1.5m 音量扣除 3.0m 音量	
		平均 -0.6		
	距離牆面線 1.0m / 3.5m(8 點次)	-2.3~0.3	註：1.0m 音量扣除 3.5m 音量	
平均 -0.7				

(三)道路系統 (高速公路、快速道路)

項目 (共計 9 點次)		均能音量 L_{eq}	最大音量 L_{max}	開窗率
1.關窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(5 點次)	14.8~29.7	17.4~30.5	—
		平均 19.3	平均 21.1	—
	(2)空屋或近完工新屋(4 點次)	18.1~27.8	13.7~24.7	—
2.開窗隔音量 (dB(A))	(1)有民眾居住空間(5 點次)	5.9~12.6	6.2~14.0	16.7%~52.9%
		平均 9.4	平均 10.9	平均 41.5%
	(2)空屋或近完工新屋(4 點次)	5.3~9.3	6.3~11.4	24.0%~50.0%
3.牆面反射音 (dB(A))	距離牆面線 1.5m / 3.0m(1 點次)	-0.1	註：1.5m 音量扣除 3.0m 音量	
		-0.7~1.7		
	距離牆面線 1.0m / 3.5m(8 點次)	平均 0.1	註：1.0m 音量扣除 3.5m 音量	
平均 0.1				

(四)小結

1.隔音量

(1)音源型式：道路音源或軌道音源都屬中高頻率為主的噪音，窗戶玻璃之隔音量對於不同音源並無特別顯著之差異。

(2)牆體樣式：不同的牆體樣式（如：二丁掛、磨石子等），開關窗之隔音量差異並不大。

(3)窗戶樣式：一般而言，隔音量的大小與開口部的窗戶樣式（如：玻璃厚度、密合性等）密切相關。但若室內雜物（如：衣物等）較多，即使是厚度較薄之壓花玻璃，可能因室內吸音而音量較低，而導致室內外之音量差異較大。

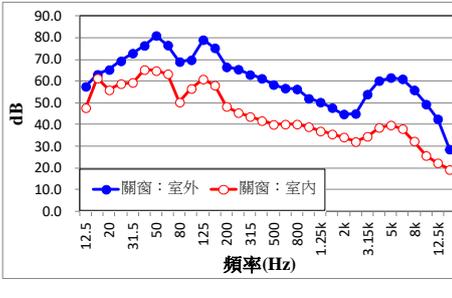
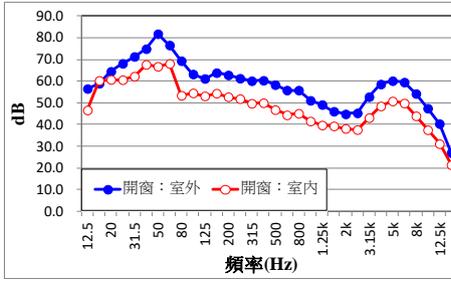
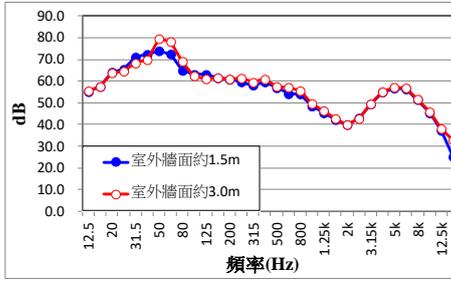
(4)有無人居：空屋的迴音（多重反射）可能造成室內音量較大，而導致開窗之隔音量較低。

(5)開關窗隔音量：依據測量之初步結果，關窗之平均隔音量約有20 dB(A)；開窗之平均隔音量約有10 dB(A)，若為空屋則開窗隔音量不足10 dB(A)。

2.牆面反射音

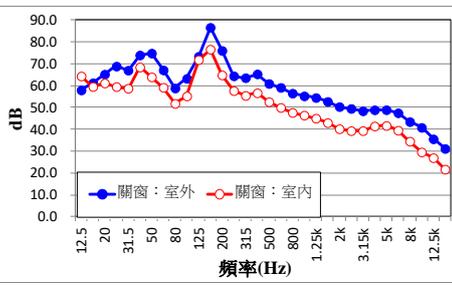
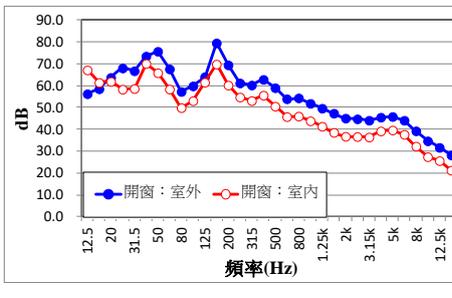
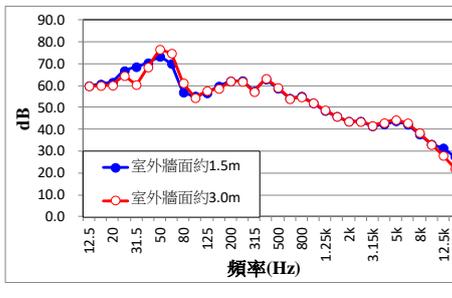
於距離牆面線1.5m/3.0m及1.0m/3.5m處之音量差異不大，顯示牆面近處之1.0m及1.5m之測點音量應多少有受到牆面反射音之影響，導致測值偏高。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (1/20)

基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
桃園市蘆竹區山菓路○號1F(透天厝)	106 07.23 (日)	機場捷運(高架段)	客廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高,離窗約1.5m遠	4.2	1.1	26.2%	左右拉窗(單片玻璃,約6mm,無窗簾)	32.5m	二丁掛	11.2m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)	室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)	牆面約1.5m(1)	牆面約3.0m(2)	音量差(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 _{eq}	L _{eq}		
70.8	73.3	52.3	55.6	18.5	17.7	67.9	70.3	58.0	60.0	9.9	10.3	65.1	66.1	-1.0
														
機場捷運高架段(A11坑口站)附近					左右拉窗(單片玻璃,約6mm)					二丁掛牆體				
														
室內客廳:關窗(離窗戶約1.5m)					室內客廳:開窗(離窗戶約1.5m)					室外:牆面反射音(1.5m、3.0m)				
														
關窗:室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗:室內外測量頻譜圖(不加權)					室外:牆面反射音頻譜圖(不加權)				

註:測量狀況為通過車次5班(近軌3列次,遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (2/20)

基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
桃園市蘆竹區橋頭街○巷○號1F(透天厝)	106 07.23 (日)	機場捷運(高架段)	客廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高, 離窗約1.5m遠	1.7	0.5	29.4%	左右拉窗(壓花毛玻璃, 約3mm, 無窗簾)	17.6m	磨石子	11.6m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.5m(1)	牆面約3.0m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
74.8	78.2	65.4	69.1	9.4	9.1	68.6	72.7	59.9	63.3	8.7	9.4	64.0	64.1	-0.1
														
機場捷運高架段(A10山鼻站)附近					左右拉窗(壓花毛玻璃, 約3mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內客廳：關窗(離窗戶約1.5m)					室內客廳：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.5m、3.0m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

註：測量狀況為通過車次5班(近軌3列次, 遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (3/20)

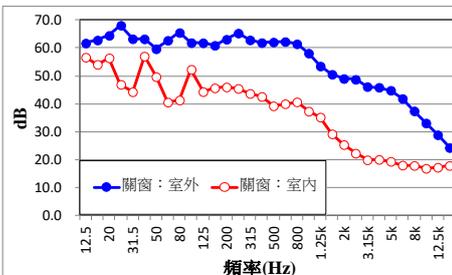
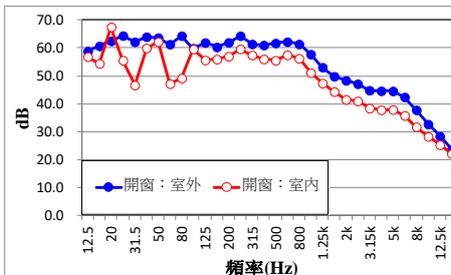
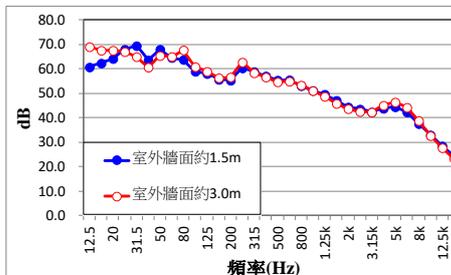
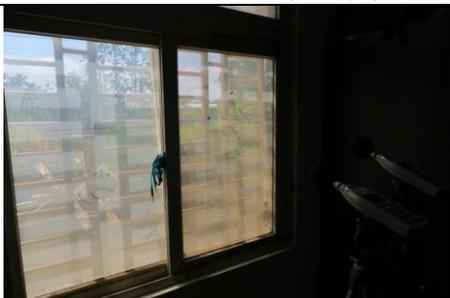
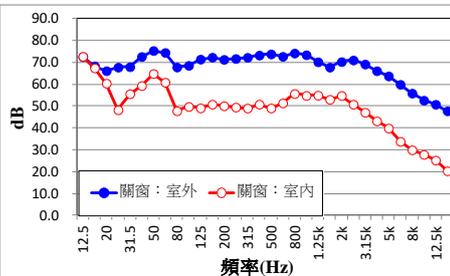
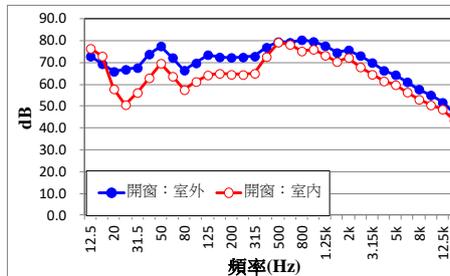
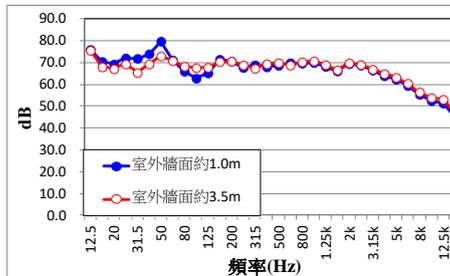
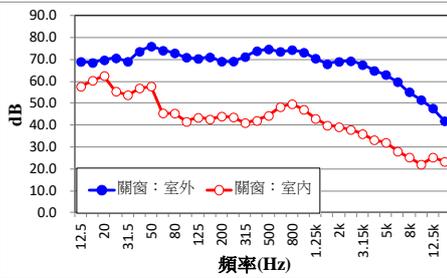
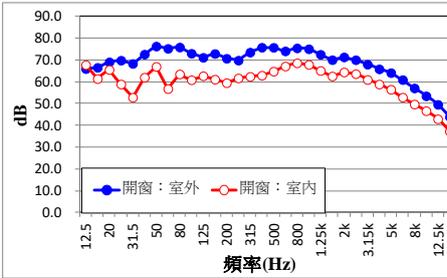
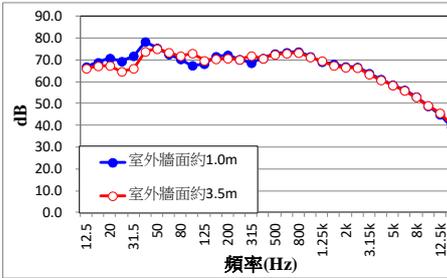
基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距道路胸牆約			
桃園市蘆竹區南竹路四段○巷○號3F(透天厝)	106 07.23 (日)	國道二號(路堤段)	寢室(接近完工新屋)	離地或樓板延伸線約1.3m高,離窗約1.5m遠	6.7	1.7	25.4%	左右拉窗(單片玻璃,約8mm,無窗簾)	10.5m	磨石子	22.2m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.5m(1)	牆面約3.0m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
67.9	71.8	47.4	52.7	20.5	19.1	67.4	73.2	62.1	66.9	5.3	6.3	62.1	62.2	-0.1
														
國道二號南竹路四段附近(路堤段)					左右拉窗(單片玻璃,約8mm)				室外測點(離牆面約1.5m)					
														
室內寢室:關窗(離窗戶約1.5m)					室內寢室:開窗(離窗戶約1.5m)				室外:牆面反射音(1.5m、3.0m)					
														
關窗:室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗:室內外測量頻譜圖(不加權)				室外:牆面反射音頻譜圖(不加權)					

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (4/20)

基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
桃園市平鎮區大昌路○巷○號1F(公寓)	106 08.13 (日)	臺鐵(路堤段)	寢室	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約1.5m遠	1.7	0.4	23.5%	左右拉窗 (單片玻璃，約4mm，無窗簾)	8.7m	上漆水泥牆	16.8 m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外 (1)		室內 (2)		隔音量 (1)-(2)		室外 (1)		室內(註) (2)		隔音量 (1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差 (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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
81.9	89.1	63.3	71.0	18.6	18.1	87.1	90.5	83.8	87.6	3.3	2.9	79.1	79.5	-0.4
														
臺鐵舊街坑橋附近(路堤段)					左右拉窗(單片玻璃，約4mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內寢室：關窗(離窗戶約1.5m)					室內寢室：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

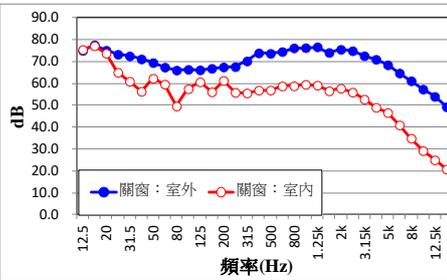
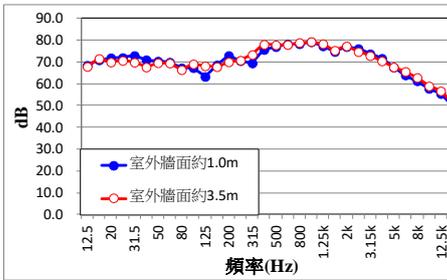
註：開窗測量時，適逢住家有訪客，一旁客廳有打開空調、電扇、走動、狗吠及交談聲等音源，導致室內測值較高。
 測量狀況為通過車次5班(近軌2列次，遠軌3列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (5/20)

基本資料						窗戶狀況				牆體狀況							
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約						
桃園市平鎮區環南路二段○巷○號1F(透天厝)	106 08.13 (日)	臺鐵(路堤段)	書房(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	2.7	0.6	22.2%	左右拉窗(單片玻璃，約 8mm，無窗簾)	38.3m	上漆水泥牆	18.0m						
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))					
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}			
81.7	83.6	54.3	56.2	27.4	27.4	83.0	85.9	75.4	80.0	7.6	5.9	80.2	79.9	0.3			
																	
臺鐵環南路二段附近(路堤段)						左右拉窗(單片玻璃，約8mm)						室外測點(離牆面約1.5m)					
																	
室內書房：關窗(離窗戶約1.5m)						室內書房：開窗(離窗戶約1.5m)						室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)					
																	
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)					

註：測量狀況為通過車次5班(近軌3列次，遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (6/20)

基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
桃園市楊梅區新農街二段○號1F(透天厝)	106 08.13 (日)	臺鐵 (路堤段)	浴廁 (音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	0.4	0.1	25.0%	左右拉窗 (單片方格玻璃，約 4mm，無窗簾)	3.7m	上漆水泥牆	11.5m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外 (1)		室內 (2)		隔音量 (1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		隔音量 (1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差 (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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
85.4	88.4	67.8	70.0	17.6	18.4	85.2	88.2	75.4	77.7	9.8	10.5	87.0	87.2	-0.2
														
臺鐵新農街二段附近(路堤段)					左右拉窗(單片方格玻璃，約4mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內浴廁：關窗(離窗戶約1.5m)					室內浴廁：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

註：測量狀況為通過車次5班(近軌3列次，遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (7/20)

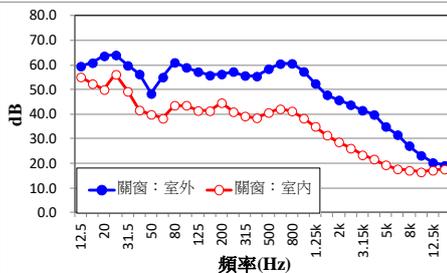
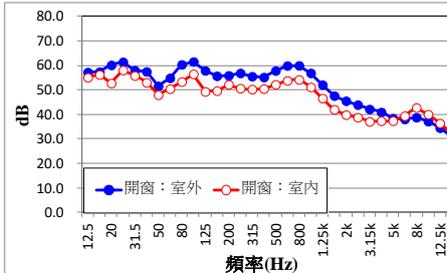
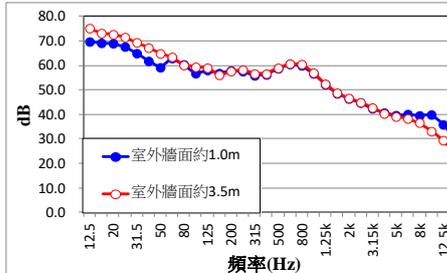
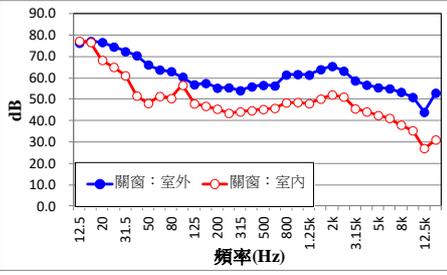
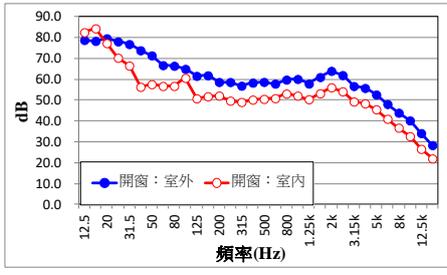
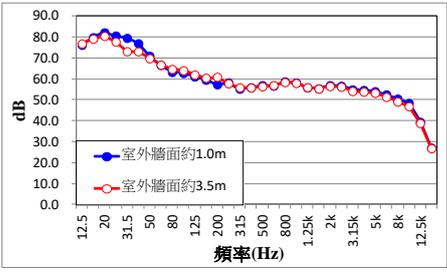
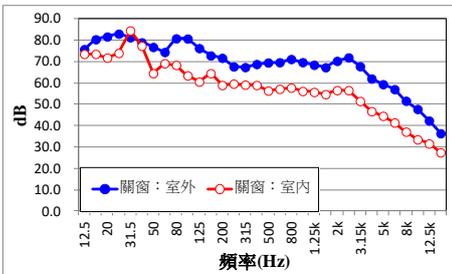
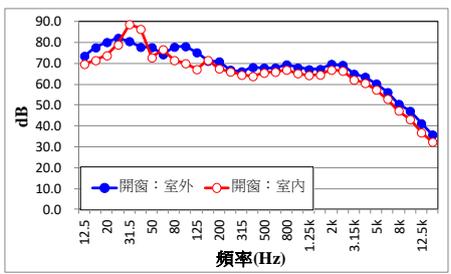
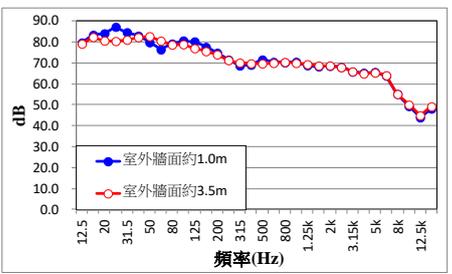
基本資料						窗戶狀況				牆體狀況				
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距道路胸牆約			
桃園市中壢區環西路二段○號2F(大樓)	106 08.13 (日)	國道一號(路堤段)	客廳(新屋未住人)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	6.7	1.9	28.4% (落地門窗)	左右拉窗(單片玻璃，約 8mm，無窗簾)	9.2m	二丁掛	62.4m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))		
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
65.2	66.0	47.1	52.3	18.1	13.7	64.7	67.2	59.2	60.5	5.5	6.7	65.1	65.4	-0.3
														
國道一號環西路二段附近(路堤段)						左右拉窗(單片玻璃，約8mm)				室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內客廳：關窗(離窗戶約1.5m)						室內客廳：開窗(離窗戶約1.5m)				室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (8/20)

基本資料						窗戶狀況				牆體狀況							
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	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	長度約	樣式	距軌道胸牆約					
桃園市蘆竹區五福村○號1F(透天厝)	106 09.17 (日)	高鐵(路堤段)	廚房飯廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高, 離窗約1.5m遠		1.9	0.6	31.2%	左右拉窗(單片玻璃, 約4mm, 無窗簾)	18.4m	二丁掛	28.5m					
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))					
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}			
72.6	73.8	59.7	61.8	12.9	12.0	70.9	73.1	63.2	65.1	7.7	8.0	67.7	67.4	0.3			
																	
蘆竹區五福村附近(路堤段)						左右拉窗(單片玻璃, 約4mm)						室外測點(離牆面約1.5m)					
																	
室內廚房飯廳：關窗(離窗戶約1.5m)						室內廚房飯廳：開窗(離窗戶約1.5m)						室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)					
																	
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)					

註：測量狀況為通過車次5班(近軌3列次, 遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (9/20)

基本資料						窗戶狀況				牆體狀況				
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
桃園市大園區高鐵北路二段○號1F(透天厝)	106 09.17 (日)	高鐵(路堤段)	樓梯間(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約1.5m遠	4.2	1.7	40.5% (門)	單片玻璃約 8mm，無窗簾	4.0m	大理石	30.8m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))		
室外 (1)		室內 (2)		隔音量 (1)-(2)		室外 (1)		室內 (2)		隔音量 (1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差 (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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
80.1	81.2	66.7	73.5	13.4	7.7	78.6	79.9	75.9	78.4	2.7	1.5	80.1	79.9	0.2
														
大園區高鐵北路二段附近(路堤段)						單片玻璃，約8mm				室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內樓梯間：關窗(離窗戶約1.5m)						室內樓梯間：開窗(離窗戶約1.5m)				室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

註：測量狀況為通過車次5班(近軌3列次，遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (10/20)

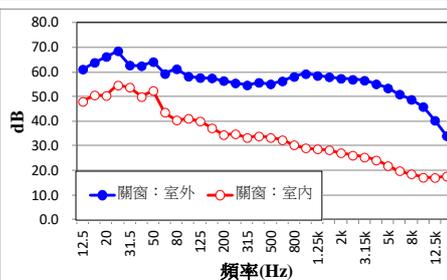
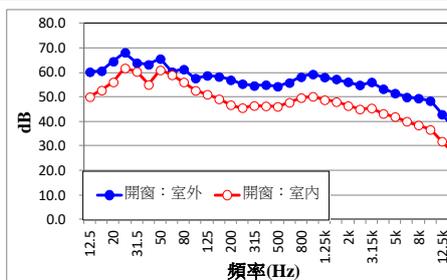
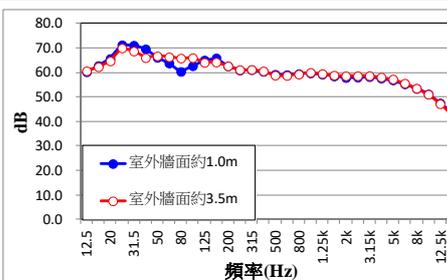
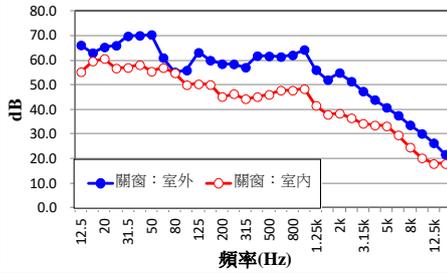
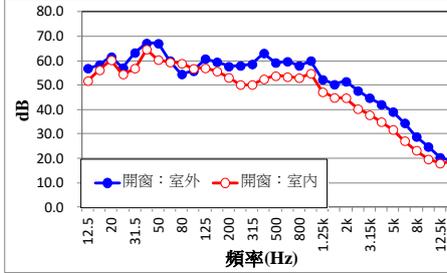
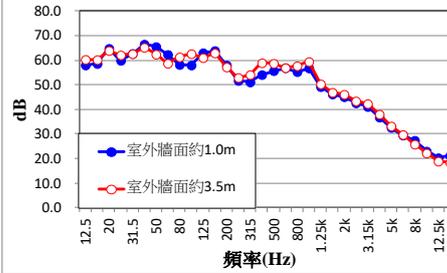
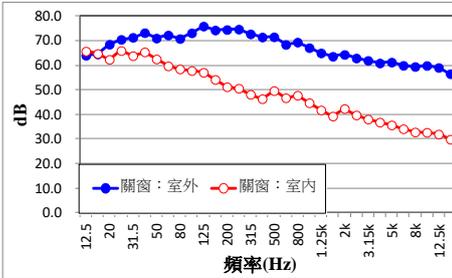
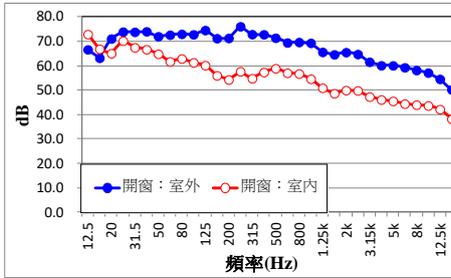
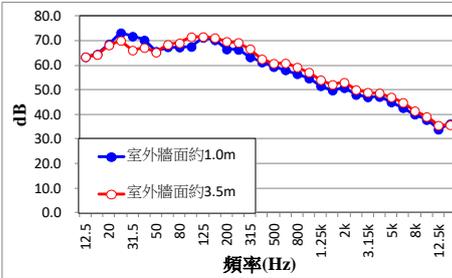
基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距道路胸牆約			
臺北市大安區建國南路二段○巷○號3F(大樓)	106 10.11 (三)	建國高架(快速道路)	客廳(接近完工新屋)	離地或樓板延伸線約1.3m高, 離窗約1.5m遠	10.0	2.4	24.0% (落地門窗)	左右拉窗(複層玻璃, 約6mm, 無窗簾)	4.5m	金屬	25.2m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
68.2	71.0	40.4	46.3	27.8	24.7	67.5	70.5	58.2	60.2	9.3	10.3	70.0	70.3	-0.3
														
建國高架(快速道路)					左右拉窗(複層玻璃, 約6mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內客廳: 關窗(離窗戶約1.5m)					室內客廳: 開窗(離窗戶約1.5m)					室外: 牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)					室外: 牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (11/20)

基本資料						窗戶狀況				牆體狀況							
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約						
臺中市北屯區東山路一段○巷○號2F(公寓)	106 10.23 (一)	臺鐵(高架段)	客廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高, 離窗約1.5m遠	2.9	1.7	59.0% (客廳門)	推窗(白膜膠合玻璃, 約5mm, 無窗簾)	5.2m	二丁掛	30.4m						
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))					
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}			
69.0	70.3	54.2	57.8	14.8	12.5	66.3	67.1	60.2	61.4	6.1	5.7	62.7	64.6	-1.9			
																	
臺鐵東山路一段附近(高架段)						推窗(白膜膠合玻璃, 約5mm)						二丁掛牆體					
																	
室外測點(離牆面約1.5m)						室內客廳: 開窗(離窗戶約1.5m)						室外: 牆面反射音(1.0m、3.5m)					
																	
關窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)						室外: 牆面反射音頻譜圖(不加權)					

註: 測量狀況為通過車次5班(近軌3列次, 遠軌2列次)。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (12/20)

基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約			
臺北市北投區中央北路四段○巷○弄○號 1F(平房)	106 11.02 (四)	捷運(路堤段)	寢室(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	0.6	0.2	33.3%	左右拉窗(壓花毛玻璃，約 3mm，無窗簾，雜物多)	8.0m	上漆水泥牆	2.9m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
77.9	79.2	55.3	59.2	22.6	20.0	78.5	80.2	64.0	69.6	14.5	10.6	67.0	69.3	-2.3
														
北捷中央北路四段附近(路堤段)					左右拉窗(壓花毛玻璃，約3mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內寢室：關窗(離窗戶約1.5m)					室內寢室：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

註：測量狀況為通過車次5班(近軌2列次，遠軌3列次)。牆面反射音因離牆面距離不足，故移至近旁測量。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (13/20)

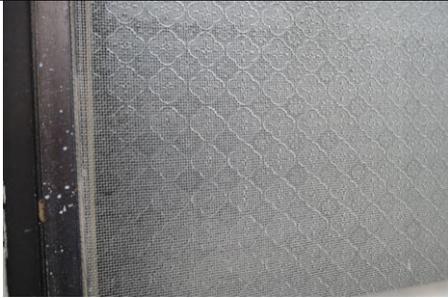
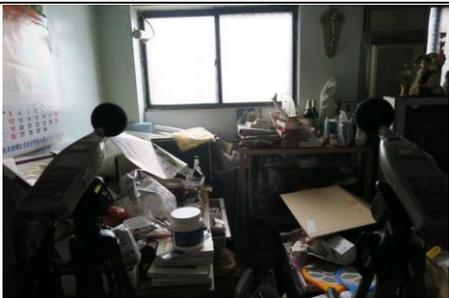
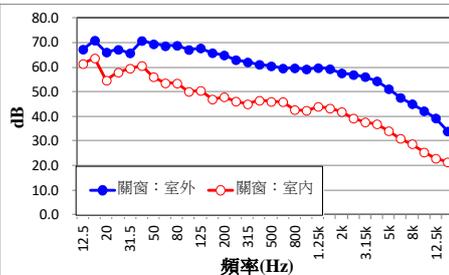
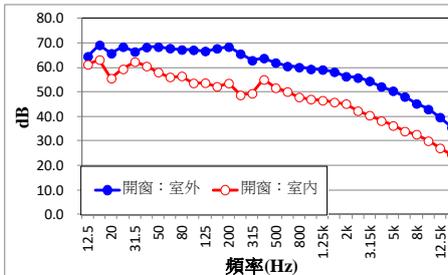
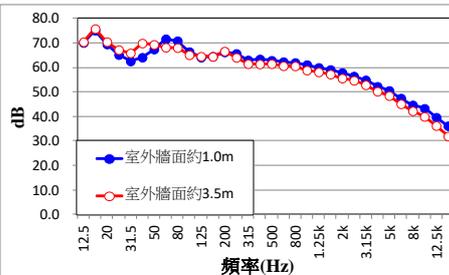
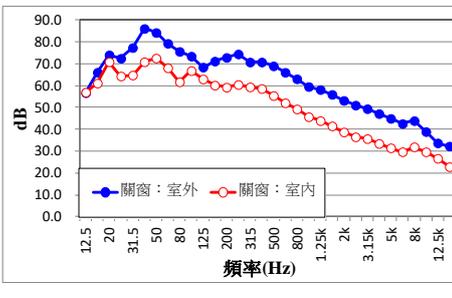
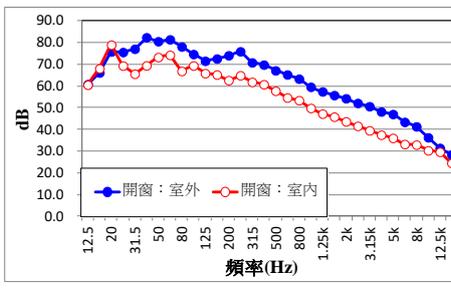
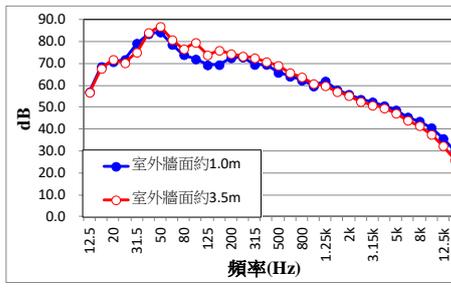
基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距道路胸牆約			
臺北市北投區大度路三段○號1F(公寓)	106 11.02 (四)	大度路(平面快速道路)	客廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	0.9	0.4	44.4%	左右拉窗(壓花毛玻璃，約 3mm，無窗簾)	28.0m	小磁磚	15.8m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
69.6	78.6	53.5	59.0	16.1	19.6	69.8	78.1	57.9	64.8	11.9	13.3	70.6	68.9	1.7
														
大度路三段(平面快速道路)					左右拉窗(壓花毛玻璃，約3mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內客廳：關窗(離窗戶約1.5m)					室內客廳：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (14/20)

基本資料						窗戶狀況				牆體狀況							
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	長度約	樣式	距軌道胸牆約						
臺北市士林區福壽街○號1F(透天厝)	106 11.02 (四)	捷運(高架段)	廚房 飯廳 (音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高, 離窗約1.5m遠	2.3	1.1	47.8%	左右拉窗(壓花毛玻璃, 約3mm, 無窗簾)	5.5m	水泥牆	7.0m						
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))					
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}			
73.9	75.1	61.2	65.2	12.7	9.9	74.0	75.3	64.3	68.1	9.7	7.2	73.1	74.8	-1.7			
																	
北捷福壽街附近(高架段)						左右拉窗(壓花毛玻璃, 約3mm)						室外測點(離牆面約1.5m)					
																	
室內廚房飯廳: 關窗(離窗戶約1.5m)						室內廚房飯廳: 開窗(離窗戶約1.5m)						室外: 牆面反射音(1.0m、3.5m)					
																	
關窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗: 室內外測量頻譜圖(不加權)						室外: 牆面反射音頻譜圖(不加權)					

註: 測量狀況為通過車次5班(近軌2列次, 遠軌3列次)。有一排煙窗無法關閉, 造成關窗之隔音量較低。

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (15/20)

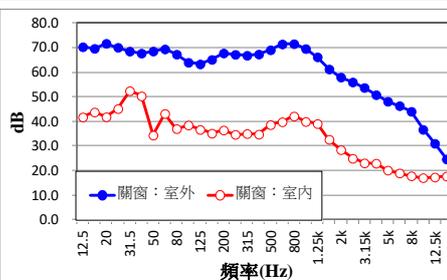
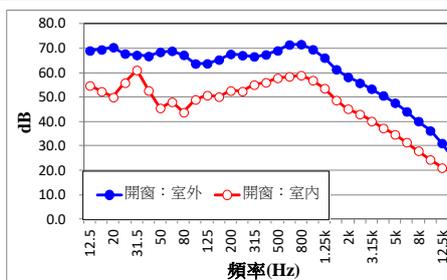
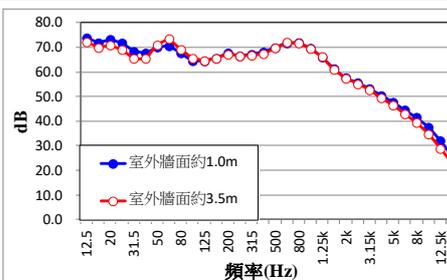
基本資料						窗戶狀況				牆體狀況							
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距五楊胸牆約						
新北市五股區成泰路一段○巷○號1F(大樓)	106 11.05 (日)	國一(路堤段)、五楊高架	遊戲房(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	1.8	0.3	16.7%	推窗(膠合玻璃，約 5mm，無窗簾)	70m	二丁掛	7.3m						
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))					
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}			
76.7	78.9	47.0	48.4	29.7	30.5	76.7	78.5	64.1	64.5	12.6	14.0	76.9	76.8	0.1			
																	
國一成泰路一段附近(路堤段+高架段)						推窗(膠合玻璃，約5mm)						二丁掛牆體					
																	
室內遊戲房：關窗(離窗戶約1.5m)						室內遊戲房：開窗(離窗戶約1.5m)						室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)					
																	
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)					

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (16/20)

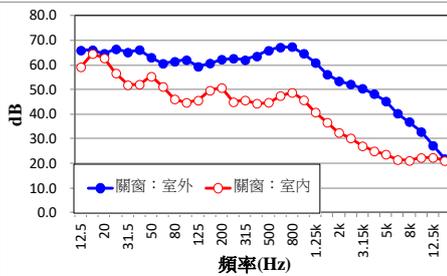
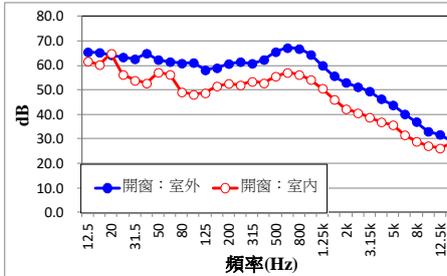
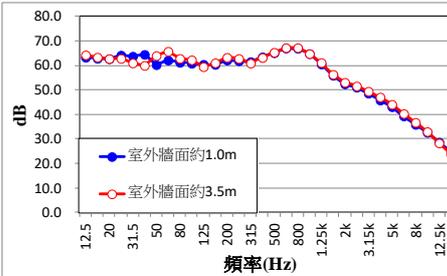
基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距五楊胸牆約			
新北市五股區成泰路一段○巷○號1F(公寓)	106 11.05 (日)	國一(路堤段)、五楊高架	寢室(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高,離窗約1.5m遠	1.7	0.9	52.9%	左右拉窗(雙層壓花毛玻璃,約3mm,無窗簾)	17.8m	方形磁磚	21.7m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
72.3	74.8	53.3	54.7	19.0	20.1	71.8	74.5	61.8	64.7	10.0	9.8	72.0	72.2	-0.2
														
國一成泰路一段附近(路堤段+高架段)					左右拉窗(雙層壓花毛玻璃,約3mm)					牆體方形磁磚				
														
室內寢室：關窗(離窗戶約1.5m)					室內寢室：開窗(離窗戶約1.5m)					室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)					室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (17/20)

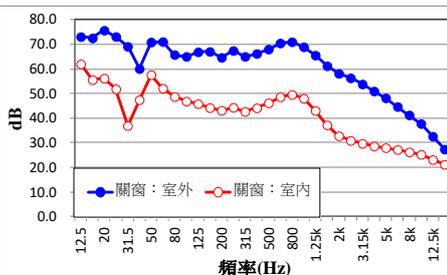
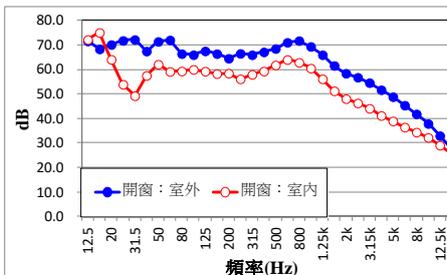
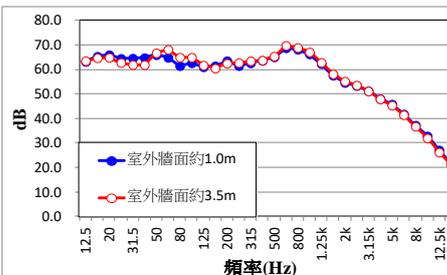
基本資料						窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距五楊胸牆約				
新北市五股區成泰路一段○巷○號 1F(大樓)	106 11.05 (日)	國一(路堤段)、五楊高架	寢室(接近完工新屋)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高，離窗約 1.5m 遠	1.0	0.5	50.0%	左右拉窗(膠合玻璃，約 5mm，無窗簾)	38m	二丁掛	7.5m				
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))			
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}	
76.0	78.6	54.3	55.1	21.7	23.5	76.5	79.8	68.1	68.4	8.4	11.4	73.3	74.0	-0.7	
															
國一成泰路一段附近(路堤段+高架段)						二丁掛牆體				室外測點(離牆面約1.5m)					
															
室內寢室：關窗(離窗戶約1.5m)						室內寢室：開窗(離窗戶約1.5m)				室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)					
															
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)					

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (18/20)

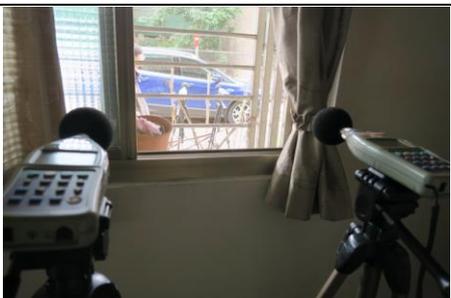
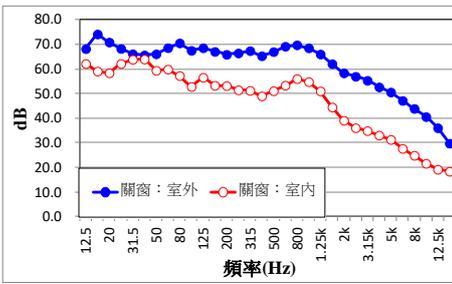
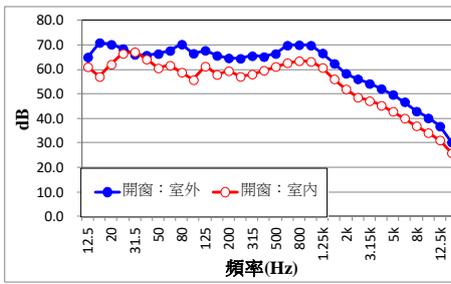
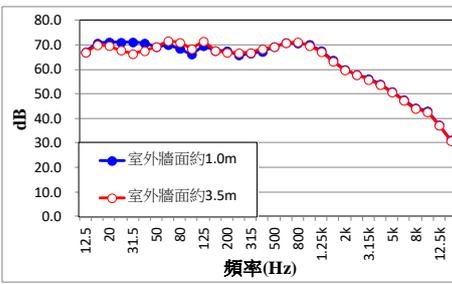
基本資料					窗戶狀況				牆體狀況					
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距汐五胸牆約			
新北市三重區力行路二段○巷○號1F(公寓)	106 11.05 (日)	國一(路堤段)、汐五高架	寢室(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高,離窗約1.5m遠	1.0	0.5	50.0%	左右拉窗(單片方格玻璃,約4mm,有窗簾)	19.8m	水泥牆	9.9m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))					開窗之室內外同步測量結果(dB(A))					反射音同步測量結果(dB(A))				
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
75.5	79.6	60.7	62.2	14.8	17.4	75.9	81.7	69.4	70.6	6.5	11.1	76.9	76.9	0.0
														
國一力行路二段附近(路堤段+高架段)					左右拉窗(單片方格玻璃,約4mm)					室外測點(離牆面約1.5m)				
														
室內寢室:關窗(離窗戶約1.5m)					室內寢室:開窗(離窗戶約1.5m)					室外:牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗:室內外測量頻譜圖(不加權)					開窗:室內外測量頻譜圖(不加權)					室外:牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (19/20)

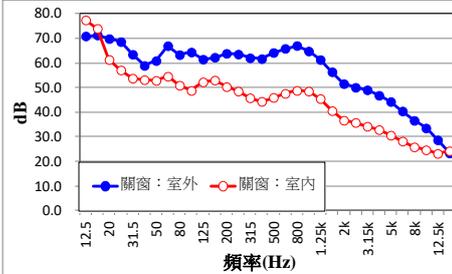
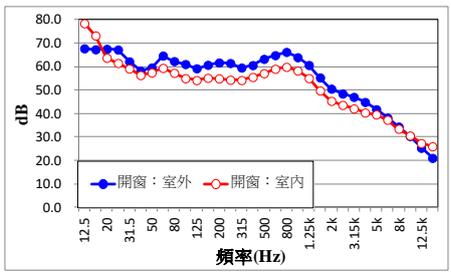
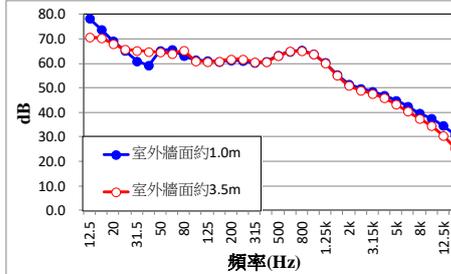
基本資料						窗戶狀況				牆體狀況				
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距汐五胸牆約			
臺北市大同區延平北路四段○巷○號1F(大樓)	106 11.05 (日)	國一(路堤段)、汐五高架	交誼廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約 1.3m 高, 離窗約 1.5m 遠	11.9	5.2	43.7% (交誼廳門)	推窗(單片玻璃, 約 10mm, 無窗簾)	6.0m	二丁掛	17.6m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))		
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約 1.0m(1)	牆面約 3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
71.8	74.0	55.0	56.2	16.8	17.8	70.8	73.5	64.9	67.3	5.9	6.2	70.6	70.5	0.1
														
國一延平北路四段附近(路堤+高架)						推窗(單片玻璃, 約10mm)				二丁掛牆體				
														
室內交誼廳：關窗(離窗戶約1.5m)						室內交誼廳：開窗(離窗戶約1.5m)				室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)				
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)						開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)				

表4.1-5 住宅區室內外噪音測量結果表 (20/20)

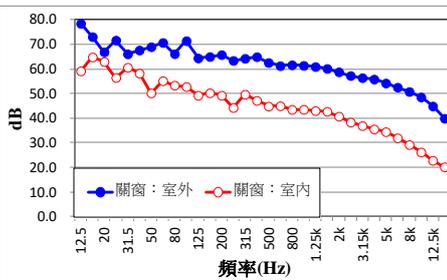
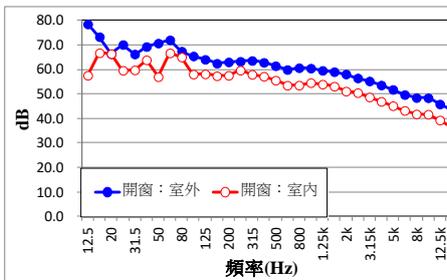
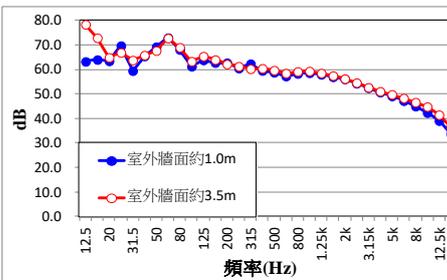
基本資料						窗戶狀況				牆體狀況				
測點名稱	測量日期	測量類別	室內位置	噪音計位置	窗戶總面積約 A(m ²)	開窗面積約 B(m ²)	開窗率約 B/A	樣式	長度約	樣式	距道路邊緣約			
臺北市松山區三民路○號1F(公寓)	106 11.05 (日)	一般道路	客廳(音源關閉)	離地或樓板延伸線約1.3m高，離窗約1.5m遠	1.9	1.9	100.0% (客廳門)	推窗(單片玻璃，約8mm，無窗簾)	6.2m	二丁掛	4.1m			
關窗之室內外同步測量結果(dB(A))						開窗之室內外同步測量結果(dB(A))						反射音同步測量結果(dB(A))		
室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		室外(1)		室內(2)		隔音量(1)-(2)		牆面約1.0m(1)	牆面約3.5m(2)	音量差(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}	L _{eq}	L _{eq}	L _{eq}
71.2	76.1	53.5	55.9	17.7	20.2	69.9	77.1	63.9	66.7	6.0	10.4	67.8	68.3	-0.5
														
三民路(一般道路，雙向4車道)				三民路(一般道路，雙向4車道)				二丁掛牆體						
														
室內客廳：客廳(離窗戶約1.5m)				室內客廳：客廳(離窗戶約1.5m)				室外：牆面反射音(1.0m、3.5m)						
														
關窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				開窗：室內外測量頻譜圖(不加權)				室外：牆面反射音頻譜圖(不加權)						

表4.1-6 一般道路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	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))	
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m
一般道路	三民路(雙向4車道)	1.臺北市松山區三民路○號1F(公寓)	客廳(音源關閉) 二丁掛	推窗(單片玻璃, 約8mm, 無窗簾)	100.0% (客廳門)	17.7	20.2	6.0	10.4	-	-0.5

表4.1-7 陸上運輸道路系統（高速公路）之住宅區室內外噪音測量結果彙整表（1/2）

測量類別	測點名稱	室內位置	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
高速公路	國道二號(路堤段)	1.桃園市蘆竹區南竹路四段○巷○號3F(透天厝)	寢室(接近完工新屋)	磨石子	左右拉窗(單片玻璃, 約8mm, 無窗簾)	25.4%(落地門窗)	20.5	19.1	5.3	6.3	-0.1	-
	國道一號(路堤段)	2.桃園市中壢區環西路二段○號2F(大樓)	客廳(新屋未住人)	二丁掛	左右拉窗(單片玻璃, 約8mm, 無窗簾)	28.4%(落地門窗)	18.1	13.7	5.5	6.7	-	-0.3
	國一(路堤段)、五楊高架	3.新北市五股區成泰路一段○巷○號1F(大樓)	寢室(接近完工新屋)	二丁掛	左右拉窗(膠合玻璃, 約5mm, 無窗簾)	50.0%	21.7	23.5	8.4	11.4	-	-0.7
	小計	3點次	接近完工新屋或未住人新屋	25.4%~50.0%		18.1~21.7	13.7~23.5	5.3~8.4	6.3~11.4	-0.1	-0.7~-0.3	
平均值	34.6%			20.1	18.8	6.4	8.1	-0.1	-0.5			

註：算術平均值為各點次之實際測量結果的平均。

表4.1-7 陸上運輸道路系統（高速公路）之住宅區室內外噪音測量結果彙整表（2/2）

測量類別	測點名稱	室內位置	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
高速公路	國一(路堤段)、五楊高架	1.新北市五股區成泰路一段○巷○號1F(大樓)	遊戲房(音源關閉)	二丁掛	推窗(膠合玻璃,約5mm,無窗簾)	16.7%	29.7	30.5	12.6	14.0	-	0.1
	國一(路堤段)、五楊高架	2.新北市五股區成泰路一段○巷○號1F(公寓)	寢室(音源關閉)	方形磁磚	左右拉窗(雙層壓花毛玻璃,約3mm,無窗簾)	52.9%	19.0	20.1	10.0	9.8	-	-0.2
	國一(路堤段)、汐五高架	3.新北市三重區力行路二段○巷○號1F(公寓)	寢室(音源關閉)	水泥牆	左右拉窗(單片方格玻璃,約4mm,有窗簾)	50.0%	14.8	17.4	6.5	11.1	-	0.0
	國一(路堤段)、汐五高架	4.臺北市大同區延平北路四段○巷○號1F(大樓)	交誼廳(音源關閉)	二丁掛	推窗(單片玻璃,約10mm,無窗簾)	43.7% (交誼廳門)	16.8	17.8	5.9	6.2	-	0.1
	小計	4點次	遊戲房、寢室、交誼廳	16.7%~52.9%			14.8~29.7	17.4~30.5	5.9~12.6	6.2~14.0	-	-0.2~0.1
	平均值			40.8%			20.1	21.5	8.8	10.3	-	0.0

註：算術平均值為各點次之實際測量結果的平均。

表4.1-8 陸上運輸道路系統（快速道路）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	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
快速道路	建國高架(快速道路)	1.臺北市大安區 建國南路二段 ○巷○號3F(大樓)	客廳(接近完工新屋)	金屬	左右拉窗 (複層玻璃，約6mm， 無窗簾)	24.0% (落地門窗)	27.8	24.7	9.3	10.3	-	-0.3

測量類別	測點名稱	室內位置	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
快速道路	大度路(平面快速道路)	1.臺北市北投區 大度路三段○ 號1F(公寓)	客廳(音源關閉)	小磁磚	左右拉窗(壓花毛玻璃，約3mm， 無窗簾)	44.4%	16.1	19.6	11.9	13.3	-	1.7

表4.1-9 陸上運輸軌道系統（高鐵）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	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
高鐵	高鐵(路堤段)	1.桃園市大園區 高鐵北路二段 ○號1F(透天厝)	住家樓 梯間(音 源關閉)	大理石	單片玻璃約 8mm，無窗 簾	40.5% (門)	13.4	7.7	2.7	1.5	—	0.2

測量類別	測點名稱	室內位置	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
高鐵	高鐵(路堤段)	1.桃園市蘆竹區 五福村○號1F(透天厝)	廚房飯 廳(音源 關閉)	二丁掛	左右拉窗(單 片玻璃，約 4mm，無窗 簾)	31.2%	12.9	12.0	7.7	8.0	—	0.3

表4.1-10 陸上運輸軌道系統（臺鐵）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	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
臺鐵	臺鐵(路堤段)	1.桃園市平鎮區大昌路○巷○號1F(公寓)	寢室	上漆水泥牆	左右拉窗(單片玻璃, 約4mm, 無窗簾)	23.5%	18.6	18.1	3.3(註)	2.9(註)	-	-0.4
	臺鐵(路堤段)	2.桃園市平鎮區環南路二段○巷○號1F(透天厝)	書房(音源關閉)	上漆水泥牆	左右拉窗(單片玻璃, 約8mm, 無窗簾)	22.2%	27.4	27.4	7.6	5.9	-	0.3
	臺鐵(路堤段)	3.桃園市楊梅區新農街二段○號1F(透天厝)	浴廁(音源關閉)	上漆水泥牆	左右拉窗(單片方格玻璃, 約4mm, 無窗簾)	25.0%	17.6	18.4	9.8	10.5	-	-0.2
	臺鐵(高架段)	4.臺中市北屯區東山路一段○巷○號2F(公寓)	客廳(音源關閉)	二丁掛	推窗(白膜膠合玻璃, 約5mm, 無窗簾)	59.0%(客廳門)	14.8	12.5	6.1	5.7	-	-1.9
	小計 平均值	4點次	寢室、書房、浴廁、客廳		22.2%~59.0%		14.8~27.4	12.5~27.4	6.1~9.8	5.7~10.5	-	-1.9~0.3
				32.4%		19.6	19.1	7.8	7.4	-	-0.6	

註：1.臺鐵桃園市平鎮區大昌路○巷○號 1F(公寓)開窗測量時，適逢住家有訪客，一旁客廳有打開空調、電扇、走動、狗吠及交談聲等音源，導致室內測值較高，故不納入結果之統計。

2.算術平均值為各點次之實際測量結果的平均。

表4.1-11 陸上運輸軌道系統（捷運）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	牆體樣式	窗戶樣式	開窗率	關窗隔音量(dB(A))		開窗隔音量(dB(A))		牆面反射音 L_{eq} (dB(A))		
						L_{eq}	L_{max}	L_{eq}	L_{max}	1.5m音量 扣除3.0m	1.0m音量 扣除3.5m	
捷運	機場捷運(高架段)	1.桃園市蘆竹區山菓路○號1F(透天厝)	客廳(音源關閉)	二丁掛	左右拉窗(單片玻璃,約6mm,無窗簾)	26.2%	18.5	17.7	9.9	10.3	-1.0	-
	機場捷運(高架段)	2.桃園市蘆竹區橋頭街○巷○號1F(透天厝)	客廳(音源關閉)	磨石子	左右拉窗(壓花毛玻璃,約3mm,無窗簾)	29.4%	9.4	9.1	8.7	9.4	-0.1	-
	捷運(路堤段)	3.臺北市北投區中央北路四段○巷○弄○號1F(平房)	寢室(音源關閉)	上漆水泥牆	左右拉窗(壓花毛玻璃,約3mm,無窗簾,雜物多)	33.3%	22.6	20.0	14.5	10.6	-	-2.3
	捷運(高架段)	4.臺北市士林區福壽街○號1F(透天厝)	廚房 飯廳(音源關閉)	水泥牆	左右拉窗(壓花毛玻璃,約3mm,無窗簾)	47.8%	12.7(註)	9.9(註)	9.7	7.2	-	-1.7
	小計 平均值	4點次	客廳、寢室、廚房 飯廳		26.2%~47.8% 34.2%	9.4~22.6 16.8	9.1~20.0 15.6	8.7~14.5 10.7	7.2~10.6 9.4	-1.0~-0.1 -0.6	-2.3~-1.7 -2.0	

註：1.臺北市士林區福壽街○號 1F(透天厝)關窗測量時，有一排煙窗無法關閉，造成關窗之隔音量較低，故不納入結果之統計。

2.算術平均值為各點次之實際測量結果的平均。

三、本計畫測量結果與文獻資料之比較

(一)聲音通過窗戶之室內外音量差

1.關窗隔音量（表4.1-12）

本計畫測量「有民眾實際居住」之室內外的關窗隔音量： L_{eq} 約9.4 dB(A)~29.7 dB(A)，算數平均值約18.2 dB(A)； L_{max} 約9.1 dB(A)~30.5 dB(A)，算數平均值約19.4 dB(A)。國外文獻之關窗 L_{eq} 隔音量約18分貝~30分貝不等（含理論值），實測約20分貝左右，與本計畫之測量平均值18.2 dB(A)之結果相近。

2.開窗隔音量（表4.1-13）

本計畫測量「有民眾實際居住」之室內外的開窗隔音量： L_{eq} 約5.9 dB(A)~14.5 dB(A)，算數平均值約8.2 dB(A)； L_{max} 約5.7 dB(A)~14.0 dB(A)，算數平均值約9.9 dB(A)。國外文獻之開窗 L_{eq} 隔音量約5分貝~15分貝不等，本計畫之測量結果亦與文獻結果相近。

3.小結

因音源頻率的不同、現場環境的不同（如：牆面本身所傳遞的聲響、其他門窗傳入的殘響、室內殘音的竄響、室內本身存在的音源…等），故實測之隔音量與實驗室測量值有落差。本計畫現地測量之開關窗的 L_{eq} 結果與國外文獻之結果相近，關窗之平均隔音量初估約有20分貝；開窗之平均隔音量約有10分貝。

表4.1-12 本計畫實際測量關窗隔音量及文獻資料之比較分析表

資料來源	關窗隔音量(分貝)			
	L_{Aeq}		L_{Amax}	
	測值範圍	算數平均值	測值範圍	算數平均值
本計畫實際測量15點次(有民眾實際居住)				
(1)一般道路(1點次)	17.7	17.7	20.2	20.2
(2)軌道系統(高鐵、臺鐵、捷運，9點次)	9.4~27.4	17.7	9.1~27.4	16.9
(3)道路系統(高速公路、快速道路，5點次)	14.8~29.7	19.3	17.4~30.5	21.1
小計	9.4~29.7	18.2	9.1~30.5	19.4
世界衛生組織 WHO Night Noise Guidelines for Europe	● 21.3 dB(單層玻璃)。 ● 22.2 dB(雙層玻璃)。			
DoE Design Bulletin 26(1972)	窗口關閉：18 dB(A)~20 dB(A)。			
Nelson – Transportation Noise (1987)	單個窗口關閉： 20 dB~25 dB。(理論值)			
EN 12354-3:1999	單層玻璃窗關閉(4mm玻璃)：22 dB~30 dB。			

註：文獻資料為 L_{eq} 值。算術平均值為本計畫實際測量點次之結果平均。

表4.1-13 本計畫實際測量開窗隔音量及文獻資料之比較分析表

資料來源	開窗隔音量(分貝)			
	L _{Aeq}		L _{Amax}	
本計畫實際測量15點次(有民眾實際居住)	測值範圍	算數平均值	測值範圍	算數平均值
(1)一般道路(1點次)	6.0	6.0	10.4	10.4
(2)軌道系統(高鐵、臺鐵、捷運, 9點次)	6.1~14.5	9.3	5.7~10.6	8.5
(3)道路系統(高速公路、快速道路, 5點次)	5.9~12.6	9.4	6.2~14.0	10.9
小計	5.9~14.5	8.2	5.7~14.0	9.9
昆士蘭(Queensland)州政府之「噪音控制指導規劃(Planning for Noise Control Guideline, PNCG)	5 dB(A)~10 dB(A)。			
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)	5 dB(A)。			
Mitchell Ryan等人(Noise Reduction through Facades with Open Windows, 2011)	5.4 dB(A) (空房) ~ 14.7 dB(A)。			
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			
世界衛生組織(WHO Guidelines for Community Noise, 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佔據其餘的90%。 			
DoE Design Bulletin 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)。 			
Nelson – Transportation Noise (1987)	單個窗口打開: 隔音為5 dB~15 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	部分打開之任何類型的窗口: 10 dB~15 dB。			

註: 文獻資料為 L_{eq} 值。算術平均值為本計畫實際測量點次之結果平均。

(二)建築物牆面之反射音(表4.1-14)

依國內現行相關測量規範：於陳情人所指定其居住生活範圍之室外地點測定者，噪音計應距離周圍建築物牆面線及其他主要反射面1m~2m。由本計畫實測距離牆面線1.5m/3.0m及1.0m/3.5m處之音量差異不大，顯示建築物牆面之反射音將可能增加待測音量。

表4.1-14 本計畫實際測量牆面反射音及文獻資料之比較分析表

資料來源			牆面反射音(分貝)	
			L _{Aeq}	
本計畫 實際測量 20點 次	(1)一般道路(1點次)	1.5m與3.0m	—	—
		1.0m與3.5m	-0.5	1.0m音量扣除3.5m音量
	(2)軌道系統(高鐵、臺鐵、捷運，10點次)	1.5m與3.0m	-1.0~-0.1；平均 -0.6	1.5m音量扣除3.0m音量
		1.0m與3.5m	-2.3~0.3；平均 -0.7	1.0m音量扣除3.5m音量
	(3)道路系統(高速公路、快速道路，9點次)	1.5m與3.0m	-0.1	1.5m音量扣除3.0m音量
		1.0m與3.5m	-0.7~1.7；平均 0.1	1.0m音量扣除3.5m音量
日本齋藤英俊等人鐵道總研報告(RTRI REPORT P.5~P.10 Vol. 25, No. 11, Nov. 2011)			依文獻回顧之公式計算，當麥克風距離牆面為1m時，反射音為3 dB。	
歐盟環境噪音指引 (Environmental Noise Directive, END) 及國際標準組織 (International Standards Organization, ISO)			<ul style="list-style-type: none"> ● 當測量位置是直接於牆體表面時，-6 dB的修正 (ISO, 2006)。 ● 當測量位置是距離牆面2m±0.5m時，-3 dB的修正 (ISO, 2000)。 	
Methods of Environmental Impact Assessment Second Edition			<ul style="list-style-type: none"> ● Free-Field(自由場，距地面以外的反射面至少3.5m)或Facade(距潛在受影響受體的牆面1m)。 ● PPG 24(Planning Policy Guidance 24)建議於同地點測量，Facade的測值比Free-Field高3 dB。 ● “DoT’s (1998) Calculation of Road Traffic Noise” 的建議則為2.5 dB。 	

4.2 辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析

本項工作執行重點在於現場調查及測量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。

4.2.1 室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析規劃說明

本計畫之室內噪音頻譜調查分析的規劃雷同於「4.1.1 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5筆噪音事件）之頻譜測量。

4.2.2 室內噪音源分布及頻譜資料之量測結果說明

各測點之住宅區「開窗室內外同步」的1/3八音階不加權頻譜比較如圖4.2-2所示。由圖示可看出室外噪音源「通過開窗」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。

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

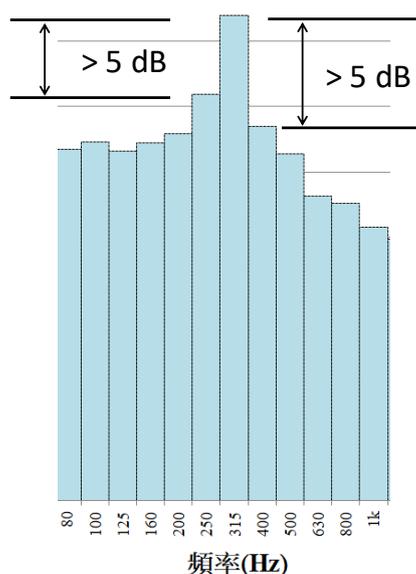


圖4.2-1 純音判定條件示意圖

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（tone）之特性，其判定條件如圖4.2-1之示意。

依據德國DIN 45680之純音（tone）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。雖於測量過程已關閉室內噪音源（如：風扇、冷氣機…等），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（如：人員走動、交談…等）亦會使室內有出現音源干擾之情形。由表4.2-1統計分析測量之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。

表4.2-1 住宅區室內噪音源出現純音特性及其頻率分析表（1/2）

測量類別	測點名稱	室內位置	是否有純音	純音頻率	
捷運	機場捷運 (高架段)	1.桃園市蘆竹區山菓路○ 號1F(透天厝)	客廳(音源關閉)	否	
	機場捷運 (高架段)	2.桃園市蘆竹區橋頭街○ 巷○號1F(透天厝)	客廳(音源關閉)	是	160 Hz
	臺北捷運 (路堤段)	3.臺北市北投區中央北路 四段○巷○弄○號1F(平房)	寢室(音源關閉)	否	
	臺北捷運 (高架段)	4.臺北市士林區福壽街○ 號1F(透天厝)	廚房飯廳(音源關閉)	是	20 Hz
臺鐵	臺鐵 (路堤段)	1.桃園市平鎮區大昌路○ 巷○號1F(公寓)	寢室(音源關閉)	是	50 Hz
	臺鐵 (路堤段)	2.桃園市平鎮區環南路二 段○巷○號1F(透天厝)	書房(音源關閉)	是	50 Hz
	臺鐵 (路堤段)	3.桃園市楊梅區新農街二 段○號1F(透天厝)	浴廁(音源關閉)	否	
	臺鐵 (高架段)	4.臺中市北屯區東山路一 段○巷○號2F(公寓)	客廳(音源關閉)	否	
高鐵	高鐵 (路堤段)	1.桃園市蘆竹區五福村○ 號1F(透天厝)	廚房飯廳(音源關閉)	否	
	高鐵 (路堤段)	2.桃園市大園區高鐵北路 二段○號1F(透天厝)	住家樓梯間(音源關閉)	否	

表4.2-1 住宅區室內噪音源出現純音特性及其頻率分析表 (2/2)

測量類別		測點名稱	室內位置	是否有純音	純音頻率
高速公路	國道二號 (路堤段)	1.桃園市蘆竹區南竹路四 段○巷○號3F(透天厝)	寢室(接近完工新屋)	是	20 Hz
	國道一號 (路堤段)	2.桃園市中壢區環西路二 段○○號2F(大樓)	客廳(新屋未住人)	否	
	國一(路堤 段)、五楊 高架	3.新北市五股區成泰路一 段○巷○號1F(大樓)	遊戲房(音源關閉)	是	31.5 Hz
		4.新北市五股區成泰路一 段○巷○號1F(公寓)	寢室(音源關閉)	否	
		5.新北市五股區成泰路一 段○巷○號1F(大樓)	寢室(接近完工新屋)	否	
	國一(路堤 段)、汐五 高架	6.新北市三重區力行路二 段○巷○號1F(公寓)	寢室(音源關閉)	否	
		7.臺北市大同區延平北路 四段○巷○號1F(大樓)	交誼廳(音源關閉)	否	
快速 道路	建國高架	1.臺北市大安區建國南路 二段○巷○號3F(大樓)	客廳(接近完工新屋)	否	
	大度路 (平面快速 道路)	2.臺北市北投區大度路三 段○號1F(公寓)	客廳(音源關閉)	否	
一般 道路	三民路	1.臺北市松山區三民路○ 號1F(公寓)	客廳(音源關閉)	否	
點次小計 20		出現純音點次 6	純音比例 30.0%	純音範圍20 Hz~160 Hz	

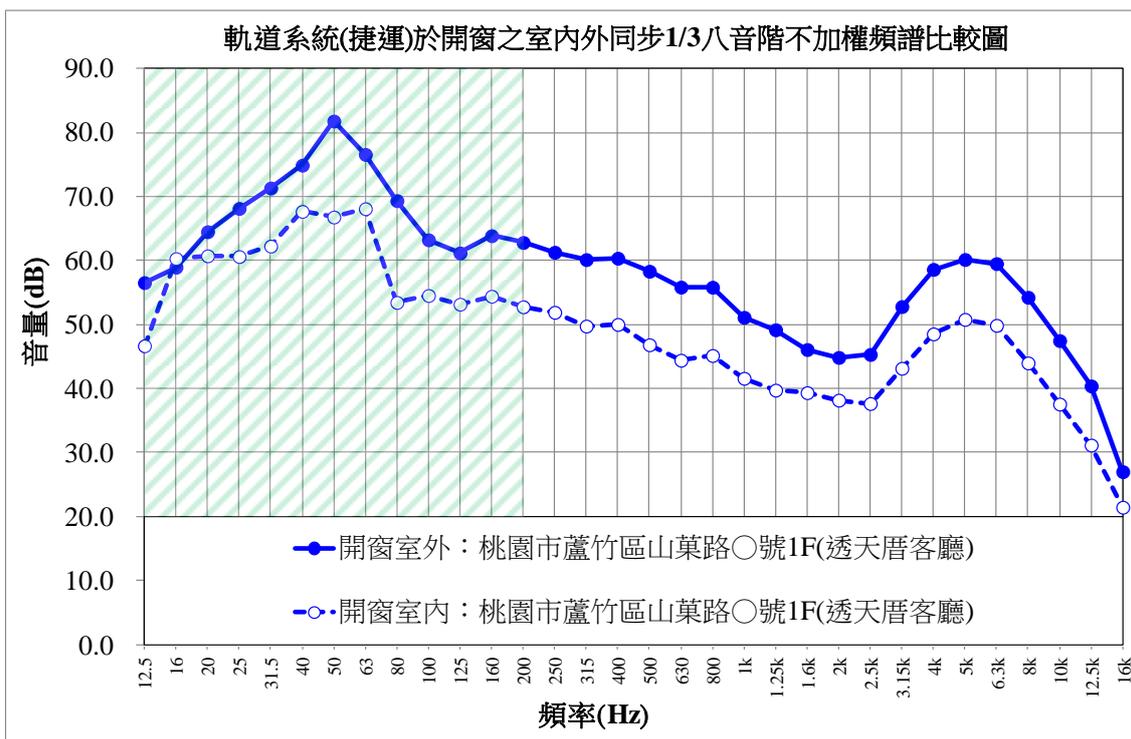


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (1/20)

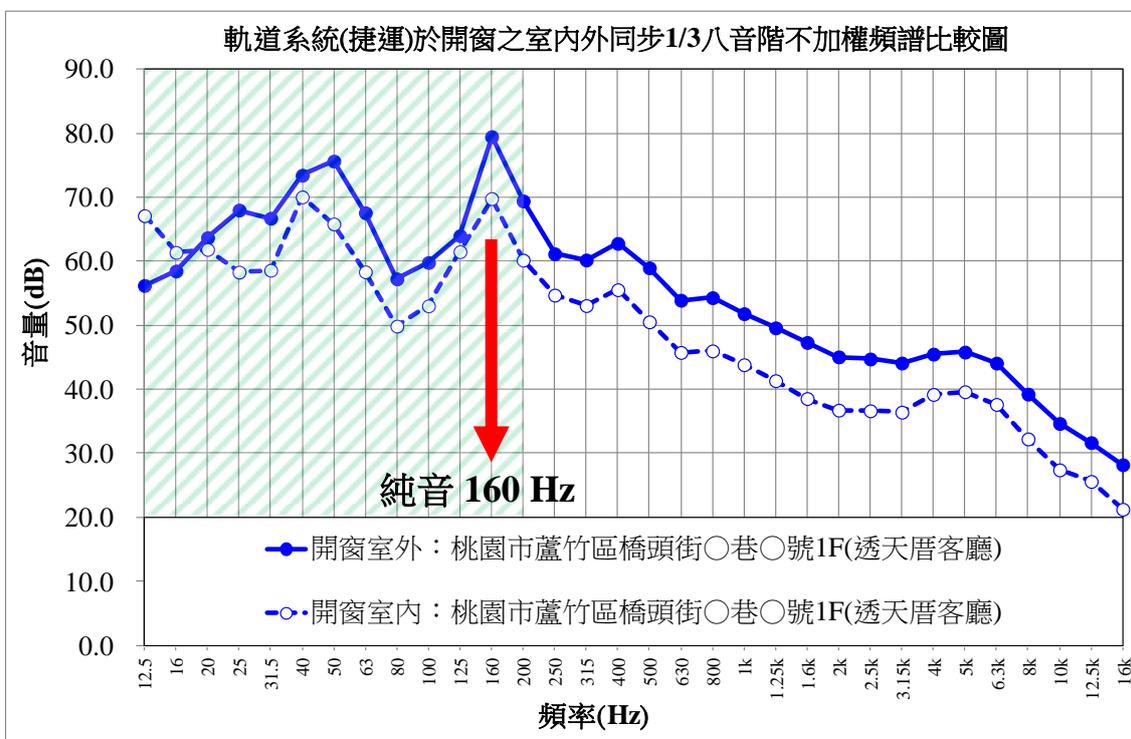


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (2/20)

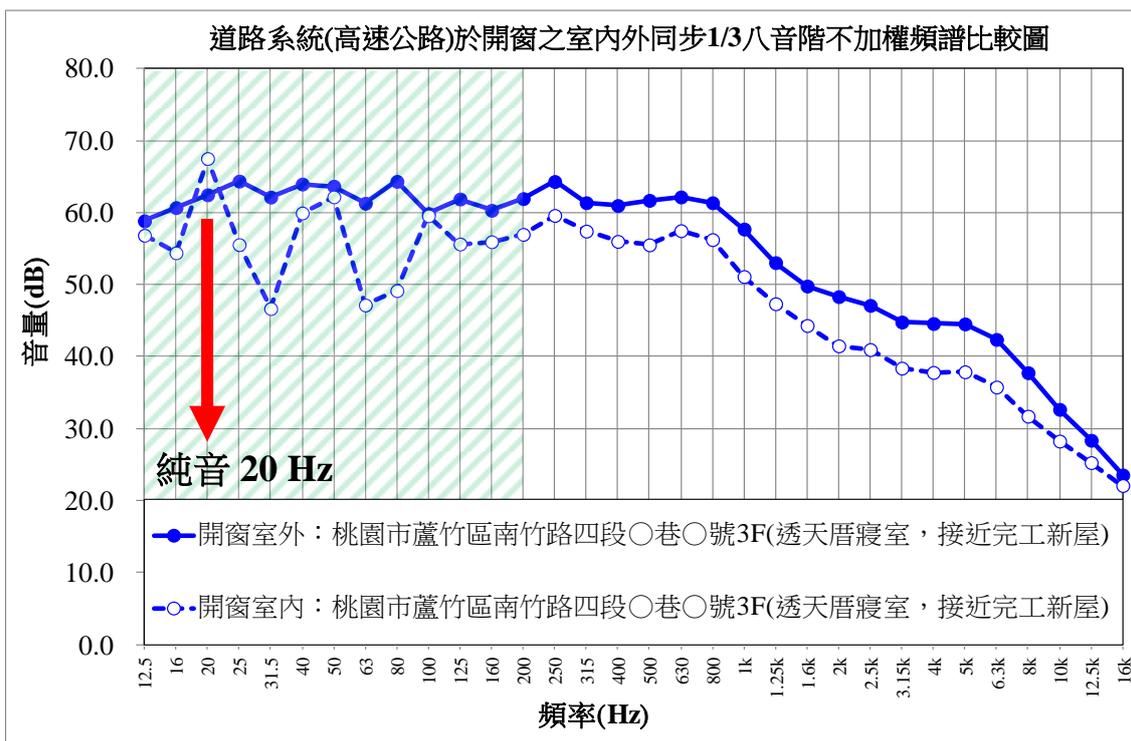


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (3/20)

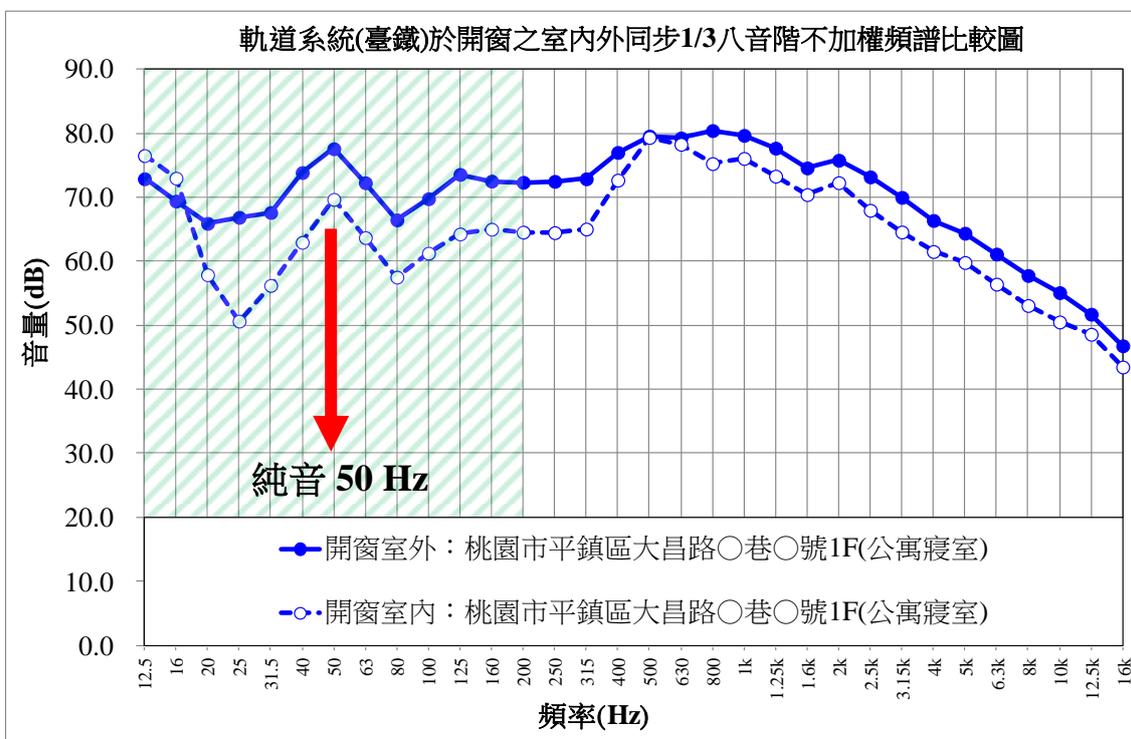


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (4/20)

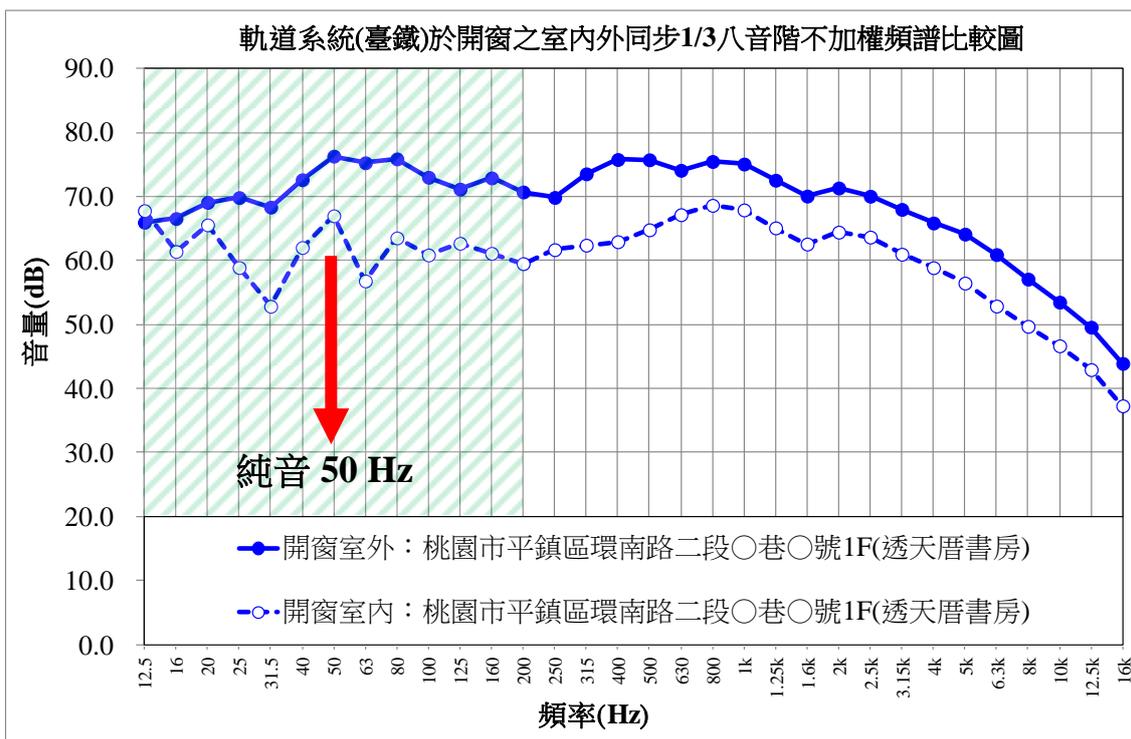


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (5/20)

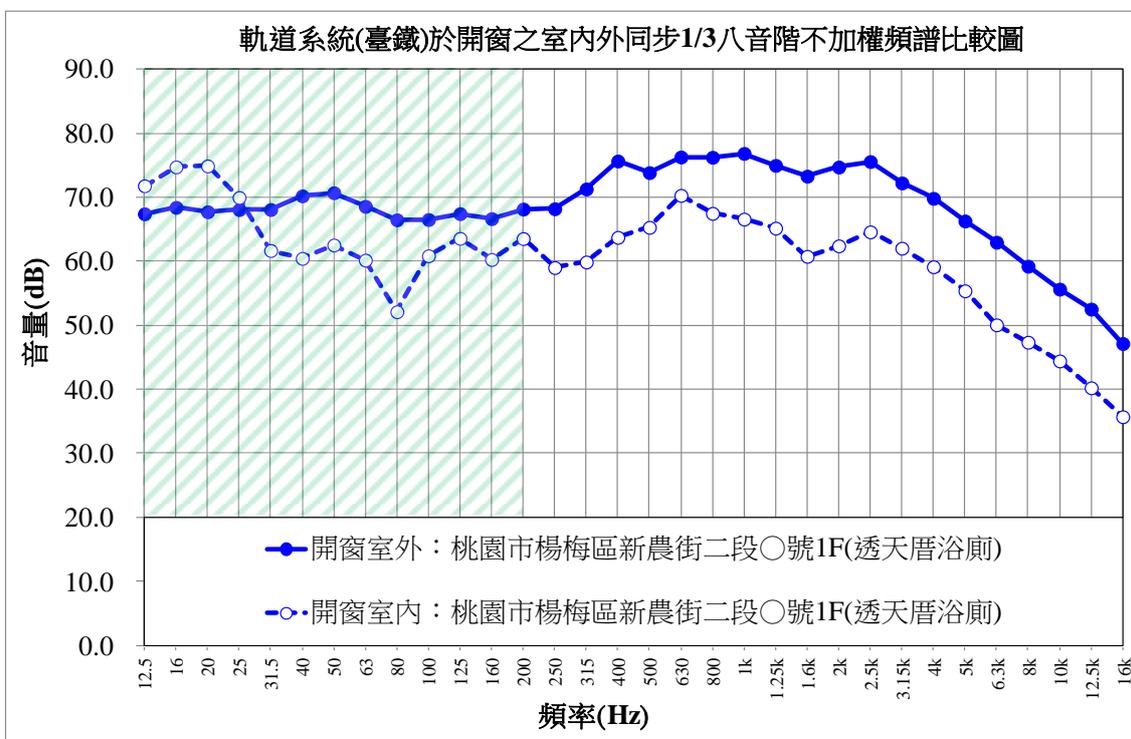


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (6/20)

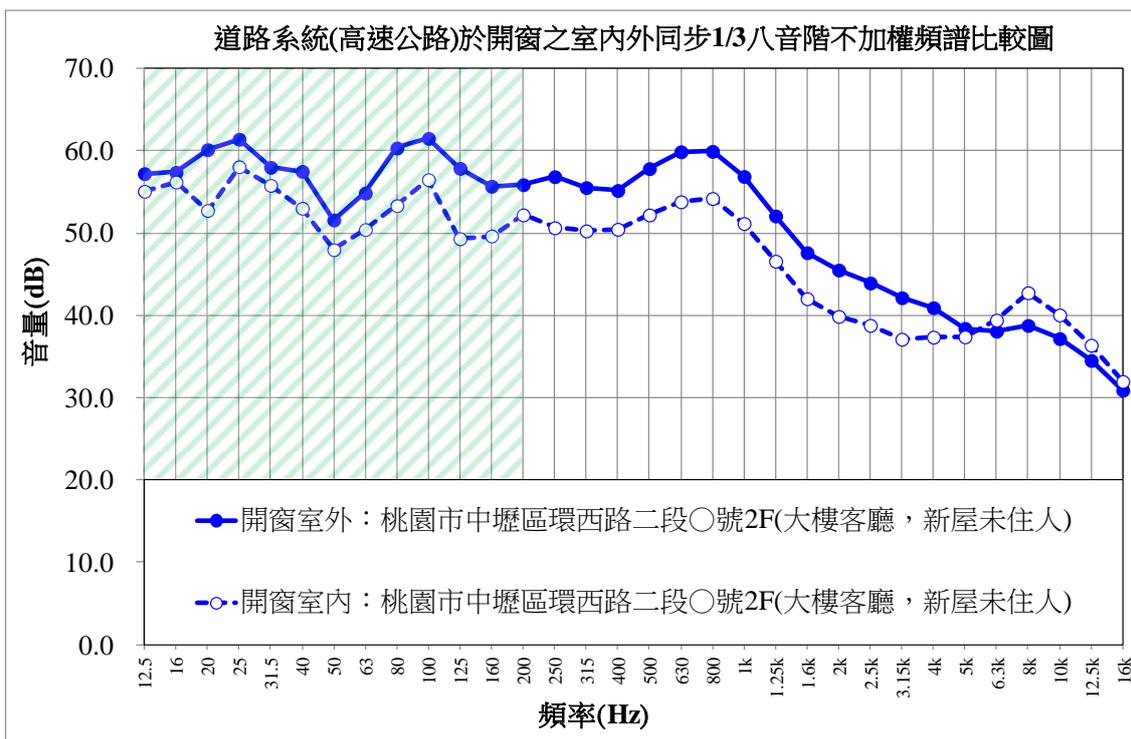


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (7/20)

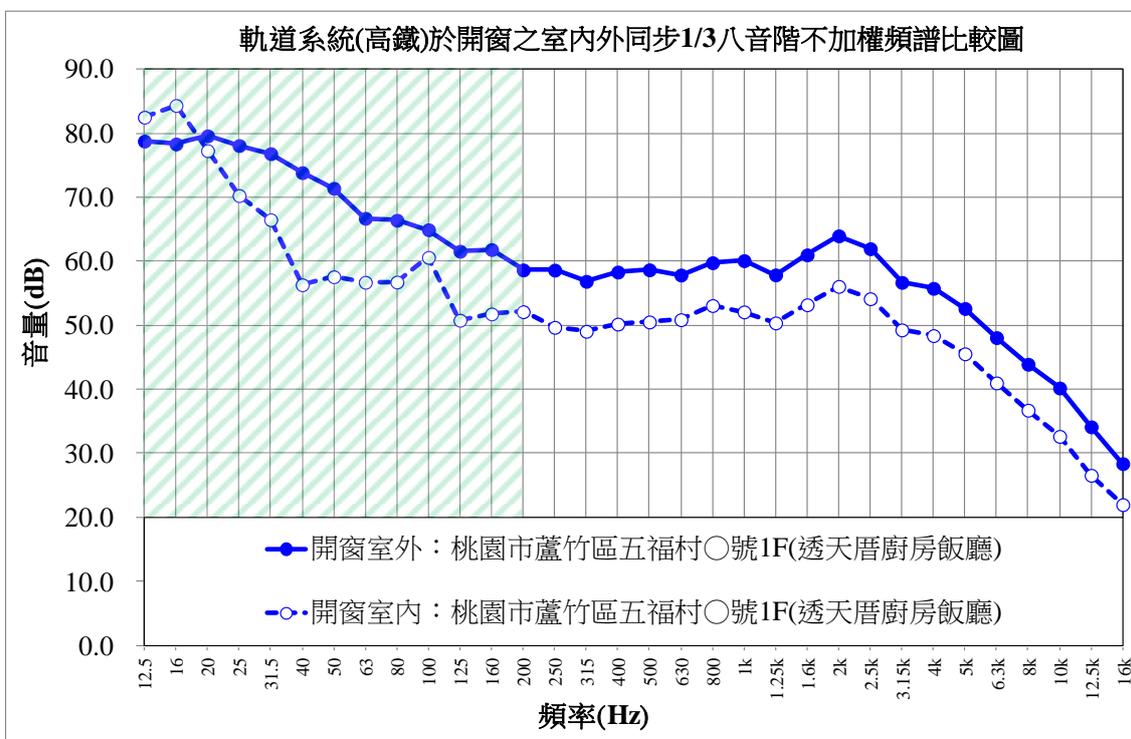


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (8/20)

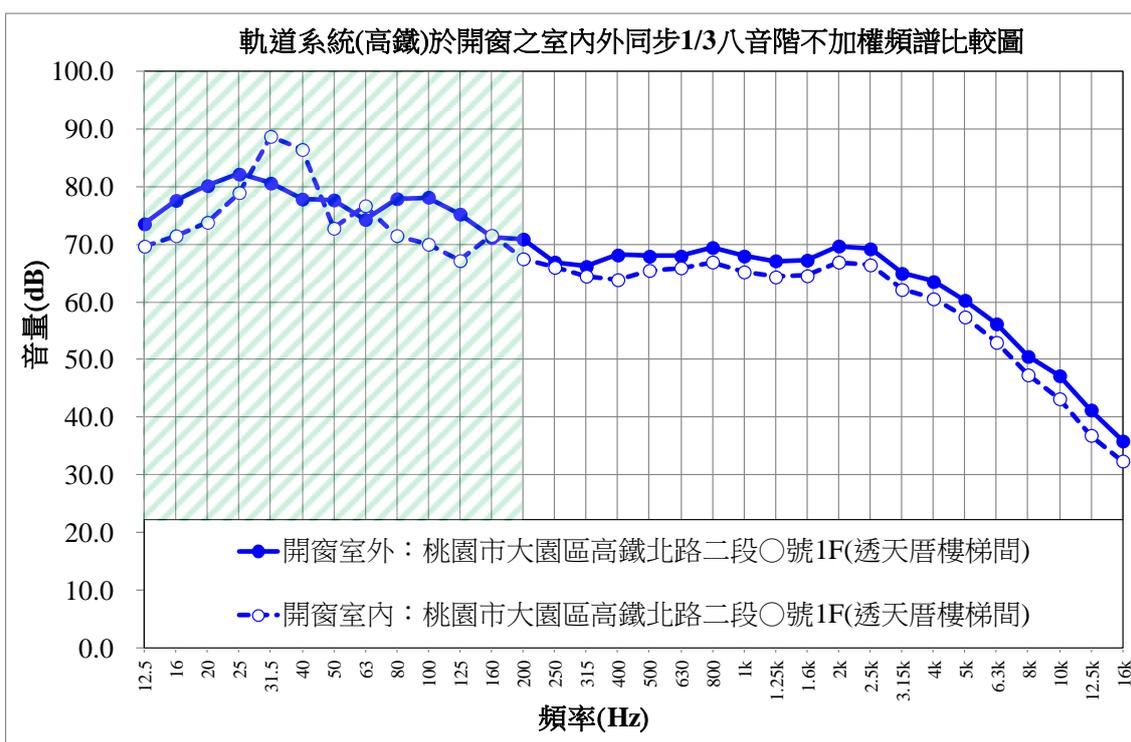


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (9/20)

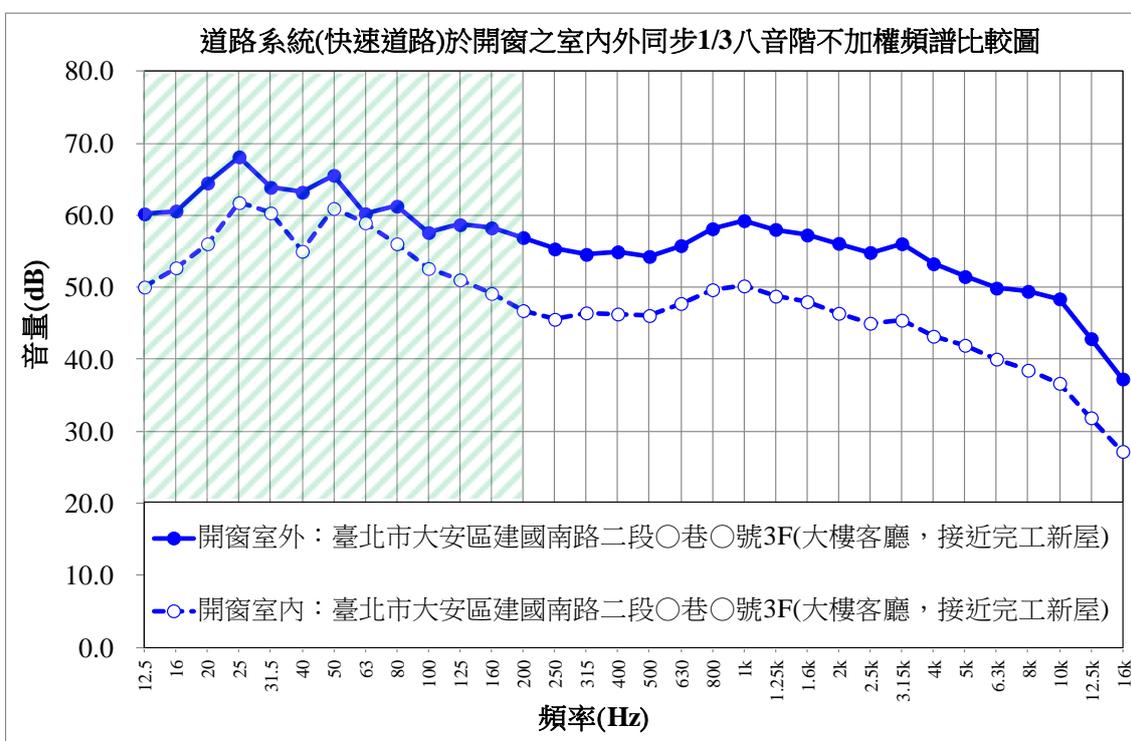


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (10/20)

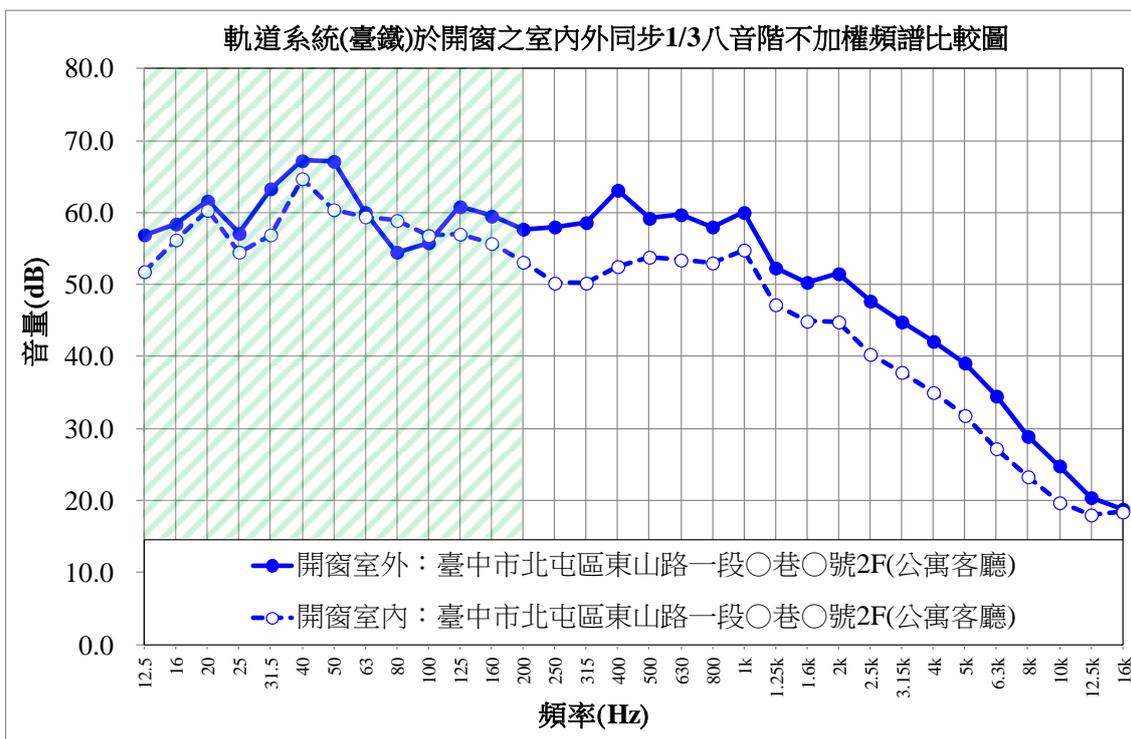


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (11/20)

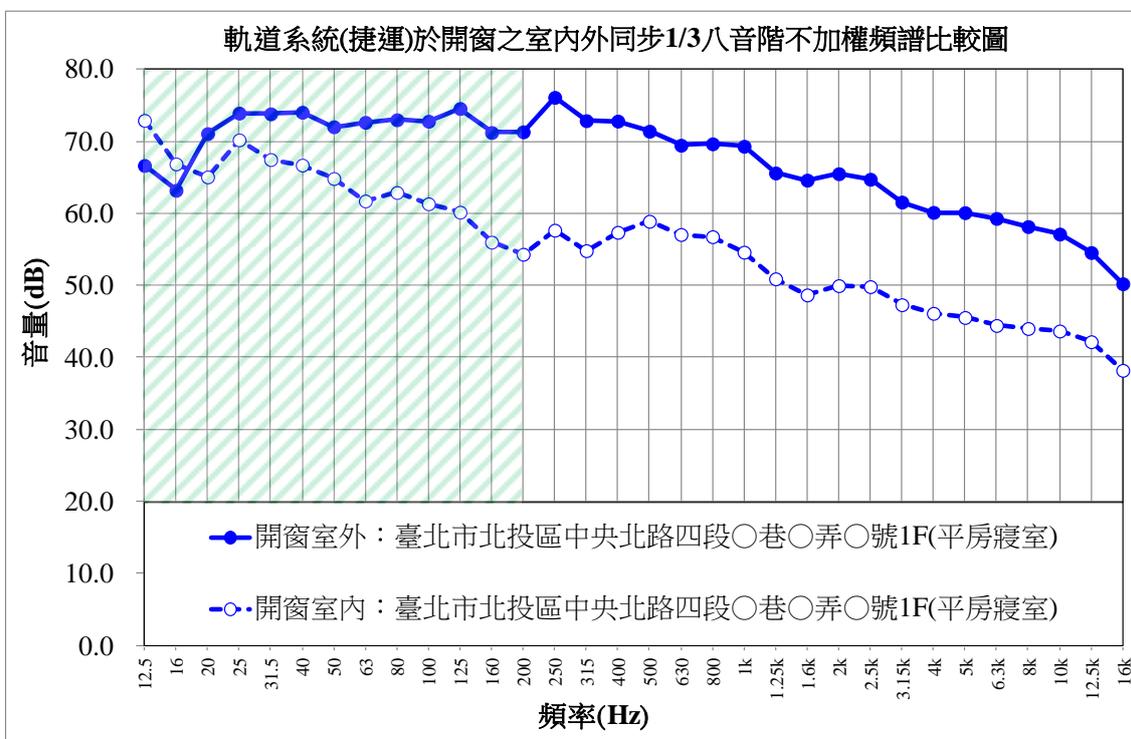


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (12/20)

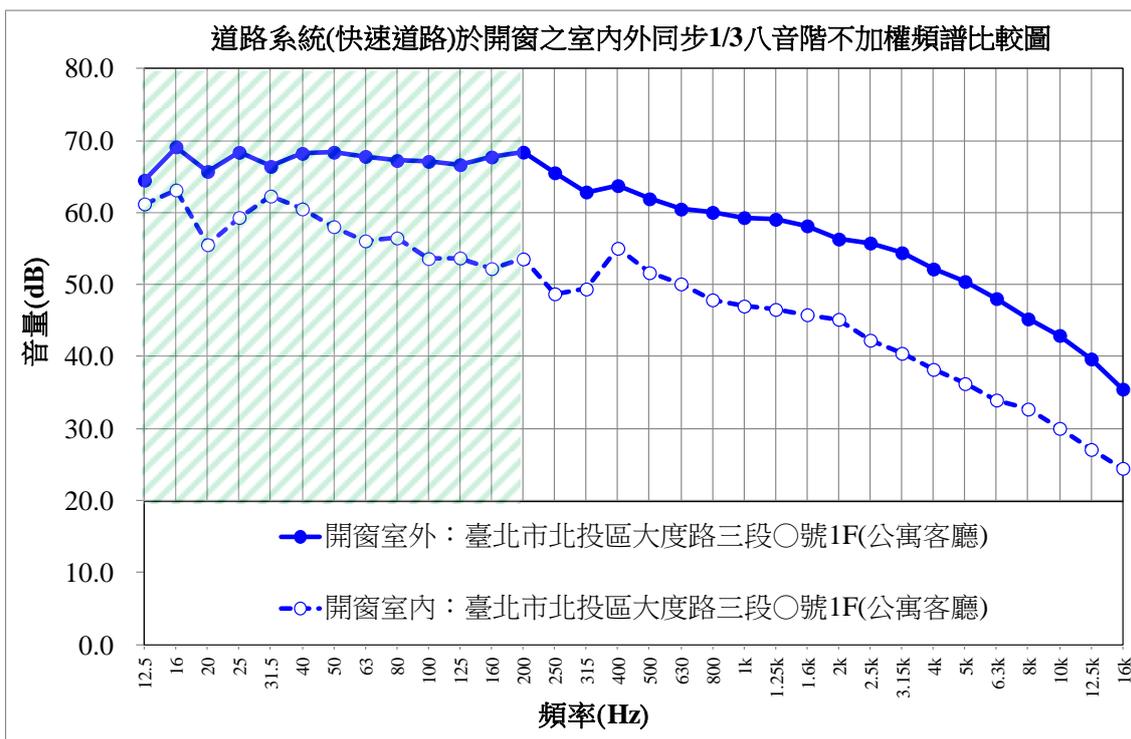


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (13/20)

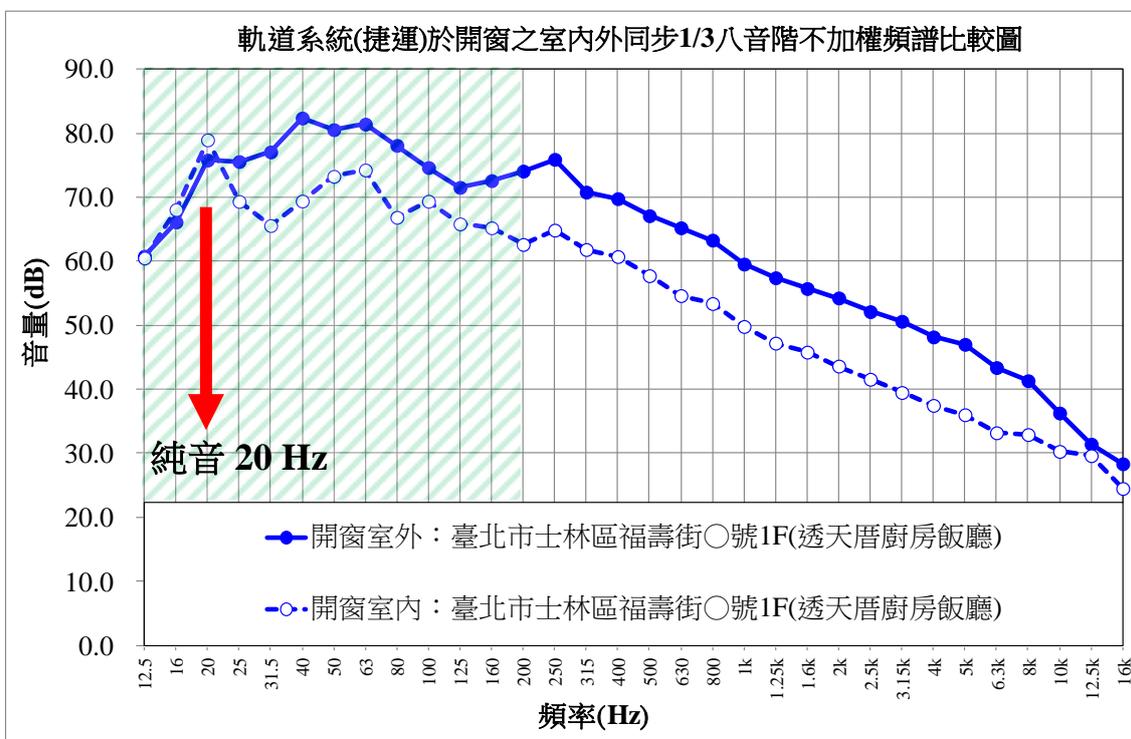


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (14/20)

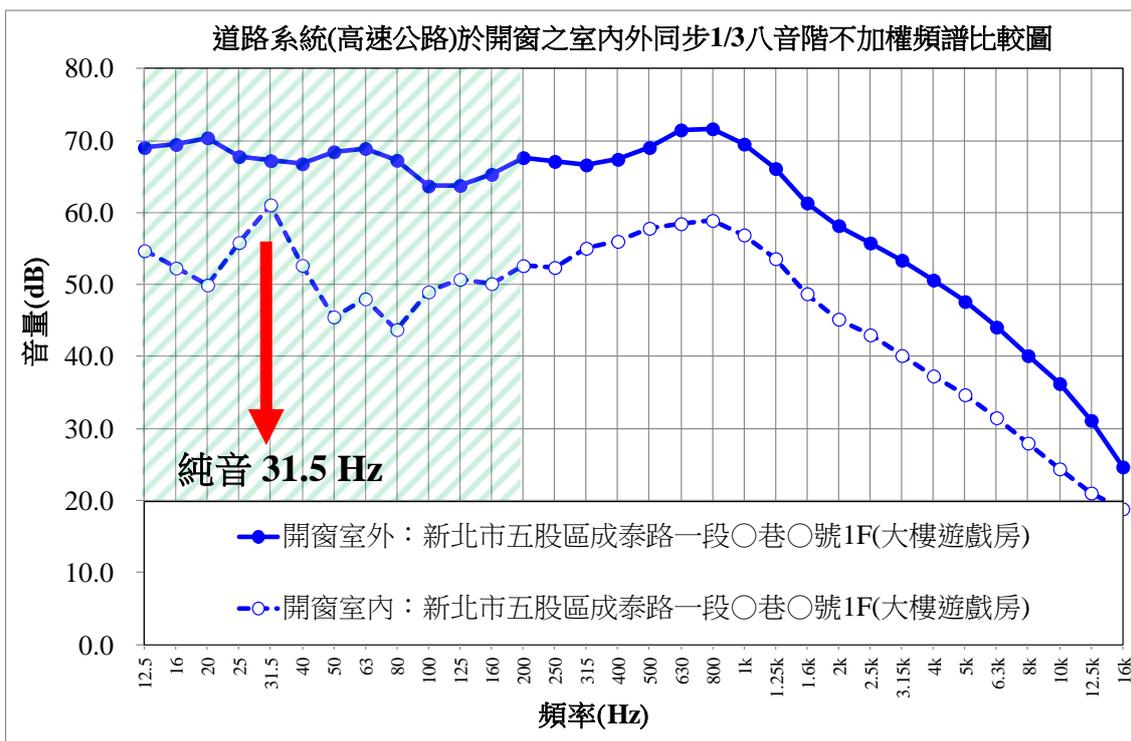


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (15/20)

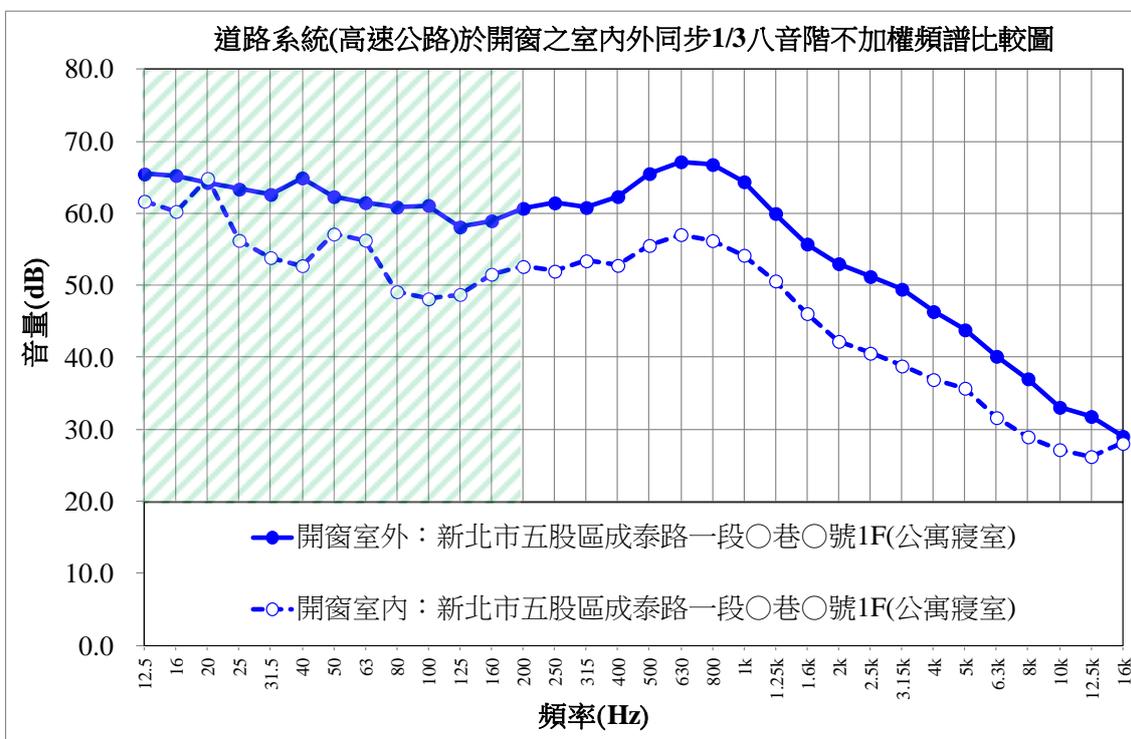


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (16/20)

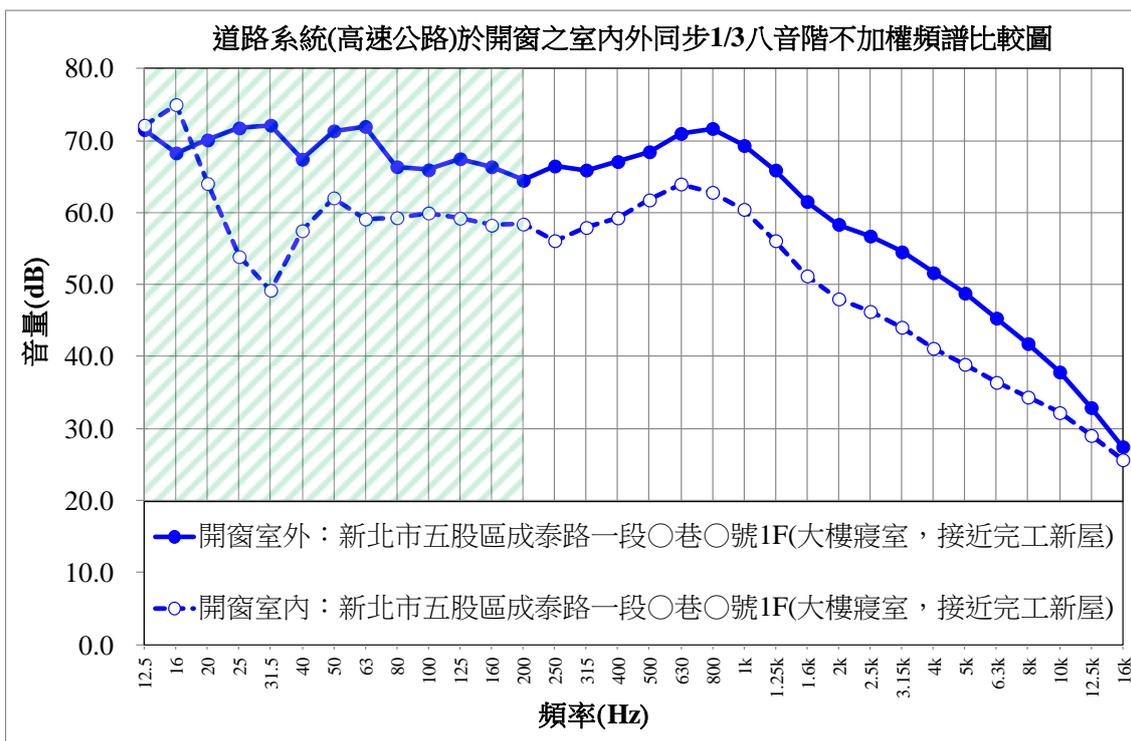


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (17/20)

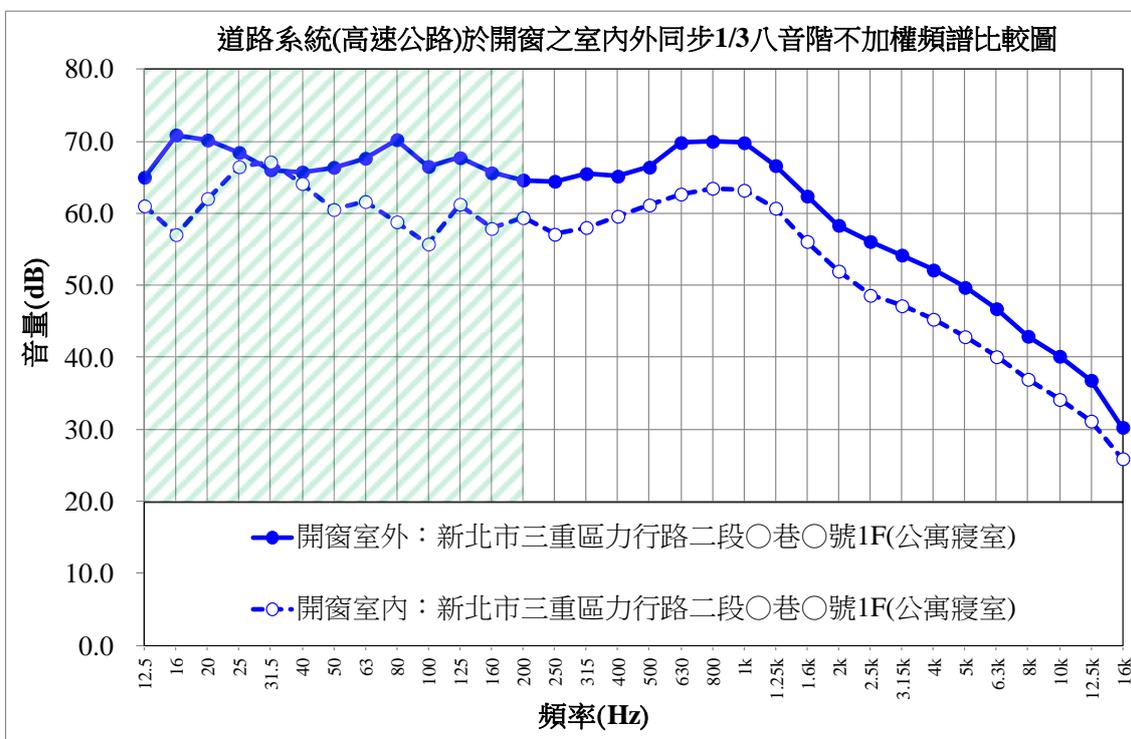


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (18/20)

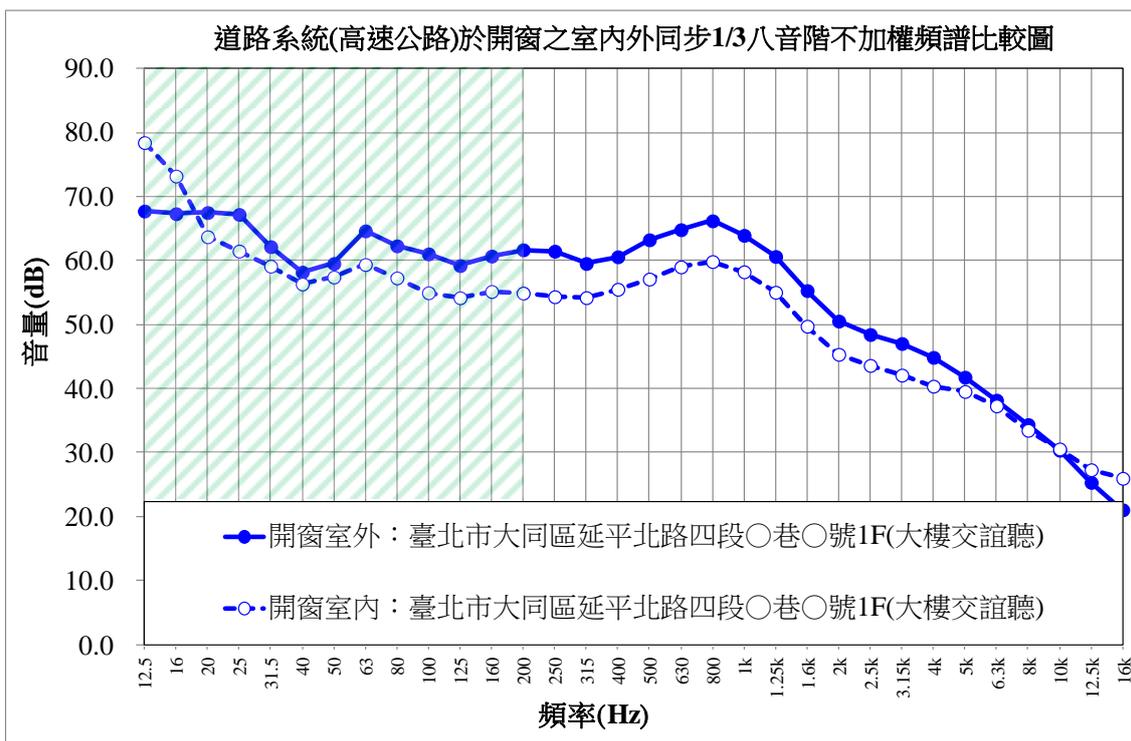


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (19/20)

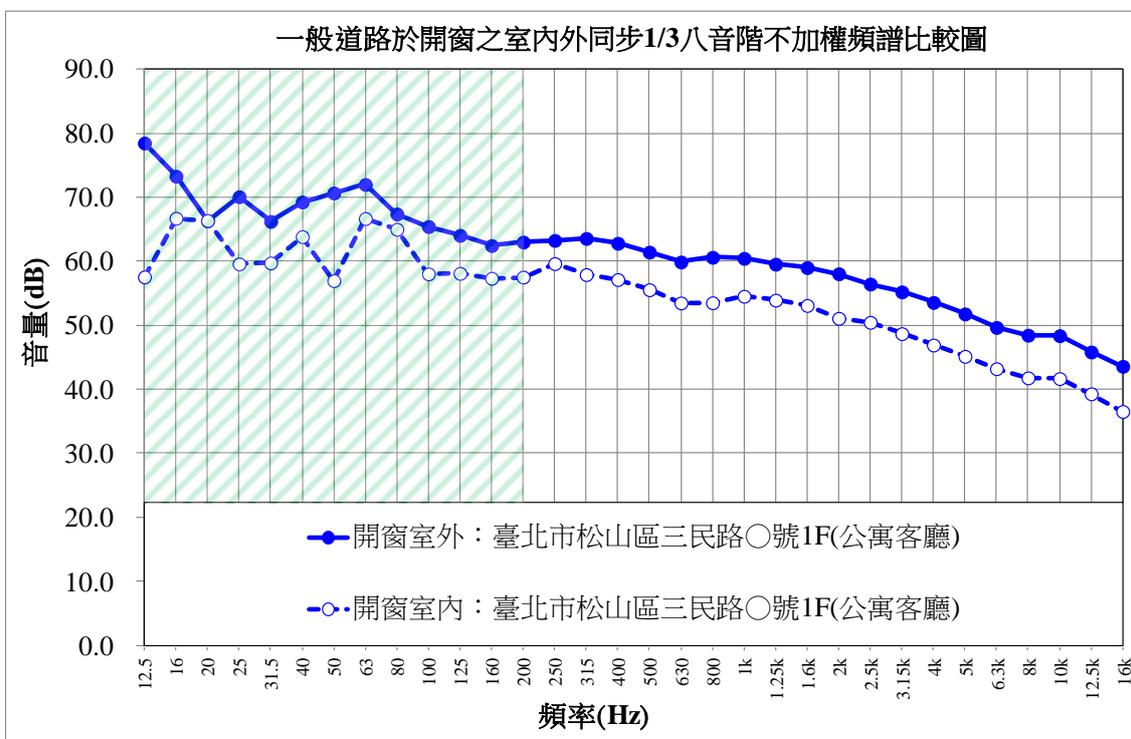


圖4.2-2 住宅區之開窗室內外同步1/3八音階不加權頻譜比較圖 (20/20)

第五章 改善建築物隔音測量方法及隔音結構改善相關研究

本章之工作內容主要分為二部分：(1)對建築物隔音測量方法提出改進並進行驗證工作，使得測試結果能比較準確地反映現場隔音效果，以獲得最佳建築物隔音效果測試方法。(2)進行輕薄隔音結構理論研究及實驗分析，期能直接應用於隔音結構的工程設計中，以優化隔音結構、提高隔音性能。

5.1 建築物隔音效果的測量方法比較及改進

測量建築構件空氣音隔音量的方法有多種，國際上通用的方法有實驗室測量法（混響室法）和現場測量方法，另外還有相關函數測量法、脈衝測量法等。本研究主要就隔音的實驗室測量方法和現場測量方法作出具體比較分析，並就現場測量方法提出改進措施。

5.1.1 隔音的實驗室測量方法

5.1.1.1 實驗室測量原理

實驗室測量方法的隔音測量系統如圖 5.1-1 所示，隔音構件兩側均為混響室，在雙層隔牆之腔內填充吸音材料。假設音源室、接收室音壓有效值分別為 p_i 、 p_t ；隔音構件面積為 S_i ；接收室總面積、房間常數、房間體積及平均吸音係數分別為 S 、 R_2 、 V 及 $\bar{\alpha}$ ；透過隔音構件的音能量為 W_t ；入射到隔音構件的音強為 I_i ；隔音構件的透射係數為 τ ；空氣密度及空氣中音速為分別為 ρ 及 c ，則透射的音功率為 [132]：

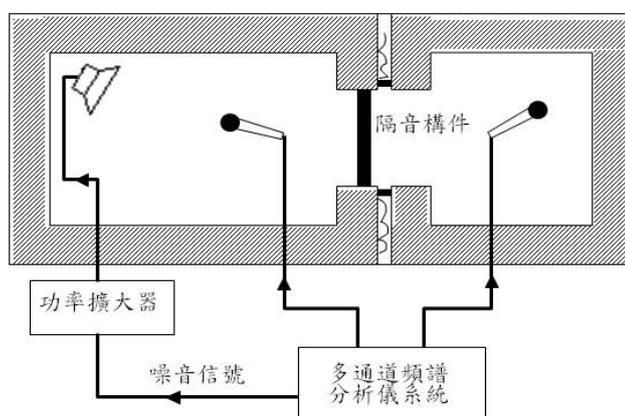


圖5.1-1 隔音構件隔音量之測量實驗系統示意圖

$$W_t = I_i S_i \tau = \frac{p_i^2 S_i \tau}{4\rho c} \quad (5.1.1)$$

接收室內的音能量密度可寫成：

$$\varepsilon_r = \frac{4W_t}{R_2 c}, \quad \varepsilon_r = \frac{p_r^2}{\rho c^2} \quad (5.1.2)$$

因而有：

$$p_r^2 = \frac{4W_t \rho c}{R_2} = \frac{p_i^2 S_i \tau}{4\rho c} \frac{4\rho c}{R_2} = \frac{p_i^2 S_i \tau}{R_2} \quad (5.1.3)$$

$$R_2 = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} \quad (5.1.4)$$

噪音衰減量為：

$$NR = 10 \lg \frac{p_i^2}{p_r^2} = TL - 10 \lg \frac{S_i(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}} \quad (5.1.5)$$

$\bar{\alpha}$ 為接收室的平均吸音係數，在混響室中， $\bar{\alpha}$ 小於 0.1，所以 $S\bar{\alpha}/S_i(1-\bar{\alpha})$ 可以近似寫成 $S\bar{\alpha}$ ，得到隔音量的表達式為：

$$TL = NR + 10 \lg(S_i / S\bar{\alpha}) = NR + 10 \lg(S / A) \quad (5.1.6)$$

式中 $A = S\bar{\alpha}$ 為接收室的總吸音量。

$$A = \frac{0.163V}{T_{60}} \quad (5.1.7)$$

5.1.1.2 實驗室測量方法要求^{[133][134]}

一、測試房間要求

(一)測試房間的體積不應小於 50m³，兩個房間的體積和形狀不應完全相同，其體積相差不應小於 10%。

(二)房間尺寸的比例應合理選擇，諸尺寸中不應有兩個是相等的，亦不應成整數比。

(三)必要時，在兩個測試房間內均應安裝擴散體。

(四)接收室內環境噪音應足夠低，並應估計好音源室的輸出功率和實驗室室內準備安裝的試件隔音量。

(五)在測量隔音量的實驗裝置中，任何間接傳音與通過試件的傳音相比可予以忽略。但音源室和接收室之間的結構應採取有效的隔振措施，在兩個房間的整個表面上宜覆蓋一層降低音輻射的襯壁。

(六)接收室的低頻混響時間應控制在 2 秒左右。

二、隔牆試件要求

(一)試件洞口的布置，應使裝置的試件在其周邊和牆板間的正常連接及密封狀況盡可能類似於實際構造型式，安裝條件應在測試報告中說明。

(二)試件安裝在音源室和接收室之間洞口內的位置應予說明。

(三)在具有抑制側向結構音輻射的實驗室內，對任何非直接通路的傳音與通過試件的傳音相比可予以忽略。

三、表觀隔音量

對於實驗室本身應測量其表觀隔音量最大值。具體方法是在試件洞口內裝一個高隔音結構，測量其表觀隔音量。試件的表觀隔音量為入射到試件上的音功率與傳透到接收室的全部音功率比值的對數再乘以 10，即：

$$R' = 10 \log_{10} \left(\frac{W_1}{W_3} \right) \quad (5.1.8)$$

其中 R' 為表觀隔音量 (分貝)， W_1 為入射到試件上的音功率 (瓦)， W_3 為傳透到接收室的全部音功率 (瓦)，傳透到接收室的全部音功率 W_3 通常由以下幾部分功率組成：

- (一)直接傳入隔牆並且直接從隔牆輻射的音功率 (W_{Da})；
- (二)直接傳入隔牆但是由側向結構輻射的音功率 (W_{Df})；
- (三)傳入側向結構但直接從隔牆輻射的音功率 (W_{Fd})；
- (四)傳入側向結構並從側向結構輻射的音功率 (W_{Ff})；
- (五)通過漏洞，通風管等傳音 (作為空氣音) 的傳透音功率 (W_L)。

實驗室的表觀隔音量在計算時，將整個隔牆看作是測試試件。若進一步改進這一結構的隔音特性，表觀隔音量不再增加，即可認為此表觀隔音量等於表觀隔音量最大值。如一個試件的表觀隔音量測量值 R' ，相較實驗室表觀隔音量最大值 R'_{max} 小 10 分貝 ($R'_{max} - R' > 10$ 分貝)，間接傳音可忽略，該表觀隔音量即為試件的隔音量。如試件表觀隔音量與實驗室表觀隔音量最大値之差小於 10 分貝時 ($R'_{max} - R' < 10$ 分貝)，側向傳音的影響必須考慮。

四、門和窗等測試構件的安裝要求

(一)若試件比試件洞口小，應將一個有足夠隔音量的特製隔牆裝在試件洞口內，試件放在特製的牆內。通過特製的隔牆和其它間接途徑的傳音與通過試件的傳音相比，可予以忽略。

(二)對門、窗等構件的面積，應按構件單體開孔面積計算（包括：可能用到的框架與密封裝置）。

(三)安裝門時，應使下部位置儘量接近實驗室地面。

(四)若試件可以開、關，應按正常型式安裝成能開、閉的，在實驗之前應至少開、關十次。

五、音源室內音場的要求

(一)所用音源應能發射穩定的音波，在所考慮的頻率範圍內應有一個連續的頻譜，所採用的濾波器應為 1/3 八音階頻帶帶寬。

(二)音源的音功率應足夠高，使接收室內任一個頻帶的噪音量比環境噪音量至少高 10 分貝。

(三)若音源有兩個或兩個以上的揚聲器同時工作時，這些揚聲器則應安裝在一個箱內，箱的最大尺寸不應超過 0.7m，各揚聲器應同相位驅動。

(四)揚聲器箱的位置，應合理布置，並與試件有一定距離。通常應放在試件對面的牆角上，並且不應指向試件。

六、平均噪音量的測量要求

(一)可採用多個固定的麥克風位置或一個具有 p^2 積分的連續移動麥克風來獲得平均噪音量。麥克風位置在 1/3 八音階頻帶中心頻率高於 500 Hz 時取 3 點，低於和等於 500 Hz 時取 6 點。

(二)每個麥克風位置上對每一頻率用 5 秒的平均時間讀取平均值。

(三)所有麥克風位置離房間界面或擴散體應大於 0.7 米。

七、測量的頻率範圍要求

宜採用 1/3 八音階頻帶的濾波器測量噪音量。測量 1/3 八音階頻帶時，應採用以下中心頻率：100 Hz、125 Hz、160 Hz、200 Hz、250 Hz、315 Hz、400 Hz、500 Hz、630 Hz、800 Hz、1000 Hz、1,250 Hz、1,600 Hz、2,000 Hz、2,500 Hz 和 3,150 Hz。

5.1.2 外牆構件隔音的現場測量方法

5.1.2.1 交通噪音源測量隔音^{[133][135]}

音場由不同方向且音強有變化地入射到試件上的現有交通噪音作為激發音源產生。在相同時刻測量試件兩側各頻率的等效噪音量來確定外牆的交通噪音隔音量，按下式計算：

$$R_{tr} = L_{eq1} - L_{eq2} + 10 \log_{10}(S/A) \quad (5.1.9)$$

式中 R_{tr} 為交通噪音隔音量； L_{eq1} 為試件前 2m 處包括試件反射效應在內的等效噪音量； L_{eq2} 為接收室內的平均等效噪音量； S 為試件面積，即從接收室內所看到的整個立面的面積； A 為接收室的吸音量。在不考慮外牆構造、表面面積或它相對於噪音源的位置，而只要求測量它所提供的隔音效果時，應採用交通噪音標準噪音量差，其計算應按下式進行：

$$D_{nT,tr} = L_{eq1} - L_{eq2} + 10 \log_{10}(T/T_0) \quad (5.1.10)$$

式中 $D_{nT,tr}$ 為交通噪音標準噪音量； T 為接收室內實測混響時間； T_0 為基準混響時間，對於住宅取 0.5s，等效噪音量計算式為：

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_p} dt \right] \quad (5.1.11)$$

式中 L_p 為隨時間變化的瞬時噪音量； T 為積分或統計的取樣時間，應不小於 5.0s，測量等效噪音量時，若將麥克風放在緊靠外牆面時，麥克風的軸應與試件平行。這時依式 (5.1.9) 或式 (5.1.10) 計算的交通噪音隔音量或交通噪音標準噪音量差之值中應分別減去 3 分貝。

接收室內的等效噪音量應為空間與時間的平均值，這個平均值可採用多個固定麥克風位置（通常取無規分布的 6 個位置）或一個用遙控可動麥克風改變不同位置得到，麥克風的位置離試件應大於 1m，離房間其它界面應大於 0.5m。

5.1.2.2 揚聲器噪音源測量隔音^{[133][136][137]}

一、測量原理

音場由從一個方向入射到試件上的揚聲器發出的噪音產生。揚聲器放置

在建築物外面距試件一個合適距離處，測量貼近試件前面的不計試件反射影響時的平均噪音量，和接收室內的平均噪音量來確定外牆的揚聲器噪音隔音量。假設入射到試件上的音功率為 W_1 、入射角為 θ 、試件面積為 S ，則牆外側和室內的音能量密度分別為：

$$\varepsilon_1 = \frac{W_1}{cS \cos \theta}, \quad \varepsilon_2 = \frac{4W_2}{cR_2} \quad (5.1.12)$$

試件兩側音能量和音壓有效值的關係為：

$$W_2 = \tau W_1, \quad p_{1e}^2 = \varepsilon_1 \rho c^2, \quad p_{2e}^2 = \varepsilon_2 \rho c^2 \quad (5.1.13)$$

式中 τ 為音能量透射係數，用 ΔR 表示總的入射噪音量與接收室噪音量的差值，入射音壓和接收室音壓關係可以表示為：

$$\Delta R = 10 \log_{10} \frac{p_{1e}^2}{p_{2e}^2} = 10 \log_{10} \frac{\frac{W_1}{S \cos \theta}}{\frac{4W_2}{R_2}} = TL - 10 \log_{10} \frac{4S \cos \theta}{R_2} \quad (5.1.14)$$

$$TL_{\theta} = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{4S \cos \theta}{R_2} \quad (5.1.15)$$

TL_{θ} 為在入射角 θ 下的隔音量； \bar{L}_{p1} 為貼近外牆試件表面但不考慮試件反射效應時的平均噪音量； \bar{L}_{p2} 為接收室內的平均噪音量； S 為試件面積； A 為接收室的吸音量。

二、音場的產生應符合下列要求

- (一)所用噪音在考慮的頻率範圍內應穩定而有連續的頻譜。
- (二)採用 1 或 1/3 八音階帶寬的濾波器。
- (三)試件表面的局部噪音量差異不應超過 5 分貝。
- (四)測量應在 45° 入射角條件下進行。也可加測 0°、15°、30°、60°、75° 入射角時的隔音量。

三、平均噪音量的測量要求

- (一)貼近外牆面的平均噪音量 L_{p1} 應使用下列方法測量：在其它條件基本相同但沒有測試牆的自由場內，按測量時相同的位置放置揚聲器和麥克風，然後測出相當於測試牆表面處的平均噪音量 L_{p2} 。

(二)接收室內的噪音量應是一個空間與時間的平均，可採用多個固定的麥克風位置（通常取無規分布的 6 個位置）或採用一個具有積分的連續移動麥克風來獲得平均噪音量，麥克風位置離試件應大於 1m，離房間其它界面應大於 0.5m，每個麥克風位置上宜對每一頻率用 5 秒的平均時間讀取平均值。

(三)接收室內任一個頻帶的噪音量高出環境噪音量不到 10 分貝時，應測量音源正在發音時接收室的噪音量及發音之前或之後的環境噪音量，按表 5.1-1 加以修正。隔音量應標明入射角度，例如：45°入射角時的隔音量寫作 TL_{45° 。

表5.1-1 噪音量讀數的修正

所測得噪音量與環境噪音量差值(dB)	< 3	3	4~5	6~9	> 10
修正量	數據無效	3	2	1	0

5.1.3 不同測試方法比較及改進

5.1.3.1 三種測量方法優缺點比較

隔音室測量建築構件的隔音理論模型嚴密，實測時能很好地抑制側向傳音，實驗精度高，不受外界條件干擾，實驗可重複性好，因而能準確反映建築構件的隔音性能。但該方法對實驗環境要求較高，必須在專業的混響室內進行，且實驗結果對現場隔音性能的預測不夠理想。

交通噪音源的現場隔音測量方法能真實反映隔音構件的實際隔音效果，測試設備簡單，測試環境要求低，但測試結果不是試件隔音性能精確表現。同樣的隔音構件，由於安裝方式、建築物結構和周圍環境的不同，測得的隔音效果也不相同，實驗可重複性差，測量誤差較大，一般而言，會比實驗室測得的隔音量小一些。

揚聲器噪音源的現場測量方法針對音波在某一角度入射時測得的隔音效果，而現場噪音可視為半自由場入射，因而測量數據與交通噪音源測量及實驗室測量的結果會存在差別。它既不是隔音構件隔音性能的真实反映，也不是現場隔音效果的真实反映，但測量結果可為構件現場隔音效果提供參考，這種測量方法的優點是受外界環境的影響較小，實驗條件可以人為控制。

5.1.3.2 隔音測量方法的改進

從以上的分析可知，以上三種測量方法有著各自的優勢和不足，且測量結果有明顯差距，數據間可比性不好，實驗室測量的結果不能準確地預測現場的隔音效果，不能很好地反映工程設計。為了增強測試結果之間的可比性，便於利用測試結果指導工程隔音設計，可以從以下幾個方面改進測量方法，使得測試結果比較準確地反映現場隔音效果。單個揚聲器音源多次測量：現有揚聲器作為音源的現場測量方法只能給出一定角度下隔音結構的現場測量隔音量，而交通噪音通常可視為無規律入射的半自由場，因而測得的結果不具有一般性，不能反映現場的實際隔音效果，可以改為單個揚聲器的多點測量求值的方法，原理如下所述。

測試原理圖如圖 5.1-2 所示，在半自由場內，將音波入射角度在 $0 \sim \pi/2$ 範圍內分成 N 等分，將音源放在距試件一定距離 r_0 處，測量此時試件內的音壓及試件的入射音壓，對 N 個點依次測量。得到試件入射音壓和接收室音壓的有效值分別為 p_{11e} 、 p_{12e} 、 \dots 、 p_{1Ne} 、 p_{21e} 、 p_{22e} 、 \dots 、 p_{2Ne} 。用 ΔR 表示不同角度總的入射噪音量與接收室噪音量的差值，則入射音壓和接收室音壓關係可以表示為：

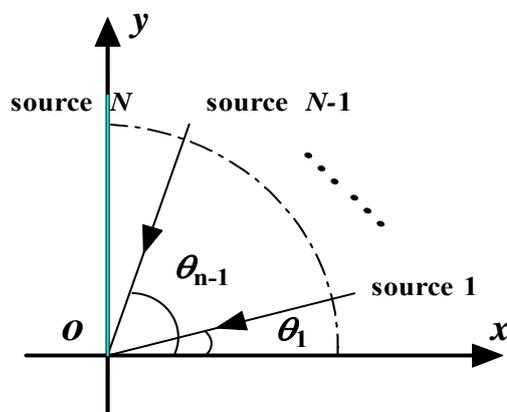


圖5.1-2 揚聲器音源實驗系統原理圖

$$\Delta R = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N p_{1ne}^2}{\sum_{n=1}^N p_{2ne}^2} \quad (5.1.16)$$

假設不同角度入射時，試件前的噪音量相同，則上式可化簡為：

$$\begin{aligned}\Delta R &= 10 \log_{10} \frac{N p_{1e}^2}{\sum_{n=1}^N p_{2en}^2} = -10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{p_{2en}^2}{p_{1e}^2} \\ &= -10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{4\tau(\theta_n) S \cos \theta_n}{R_2}\end{aligned}\quad (5.1.17)$$

$$\Delta R = -10 \log_{10} \frac{4S}{R_2} - 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tau(\theta_n) \cos \theta_n \right) \quad (5.1.18)$$

進一步求解可得：

$$\Delta R + 10 \log_{10} \frac{4S}{R_2} = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tau(\theta_n) \cos \theta_n \right) = -10 \log_{10} \bar{\tau} \quad (5.1.19)$$

$$\bar{TL} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N p_{1en}^2}{\sum_{n=1}^N p_{2en}^2} + 10 \log_{10} \frac{4S}{R_2} \quad (5.1.20)$$

式中 $\tau(\theta_n)$ 為音波以角度 θ_n 入射時的音強透射係數， $\bar{\tau}$ 為音波從不同角度入射時的平均音強透射係數， R_2 為接收室的房間常數。可見只要測得音源在不同角度時，試件兩側的音壓有效值、試件面積及接收室的房間常數，就可以求得半自由場入射情況下隔音構件的隔音量。但由於本實驗原理基於二維音場，因而與實際的三維音場還存在一定的差異，但比單角度入射結果有改善。

5.1.4 揚聲器多點測量方法實驗及結論

5.1.4.1 實驗裝置及原理介紹

隔音測量結構為“消音室—消音箱”，實驗測量原理圖及實物圖分別如圖 5.1-3 及圖 5.1-4 所示。數據採集系統為丹麥 B&K 公司的 Pulse3560D 多通道頻譜分析系統（圖 5.1-4 之 2），功率放大器為美國 LAX 公司生產的 LAX3200 功率放大系統。消音箱外尺寸為 1200mm×1100mm×1000mm（圖 5.1-4 之 3）；測試試件為厚度 1.0mm 的鋁板，鋁板尺寸為 960mm×860mm（圖 5.1-4 之 4），鋁板四周鉗定在消音箱上。消音箱外層為厚度 2mm 的鋼板，內部側面填充厚度 100mm 的吸音棉，底部為總長度為 500mm 的吸音材（圖 5.1-4 之 5），吸音材長 400mm（圖 5.1-4 之 6）。

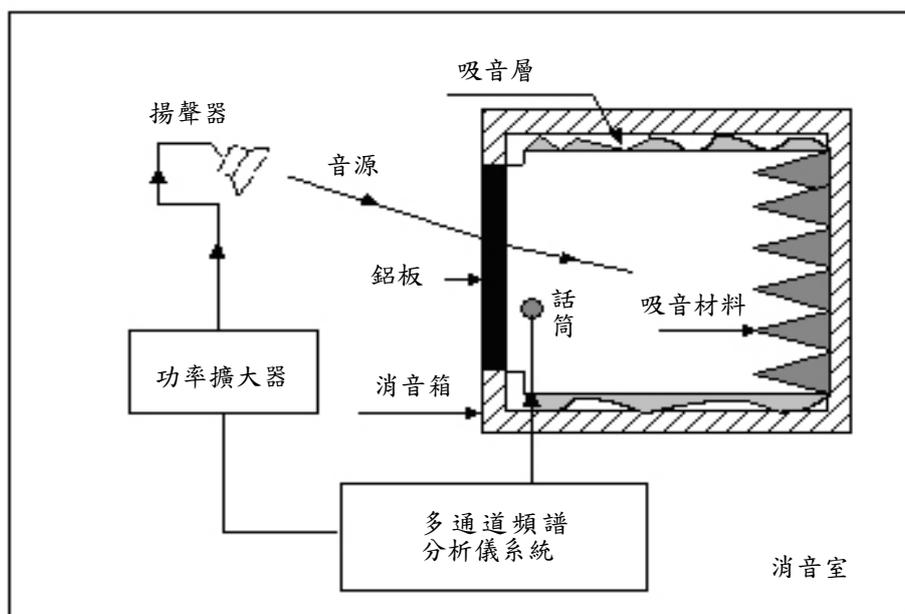


圖5.1-3 實驗測量原理圖

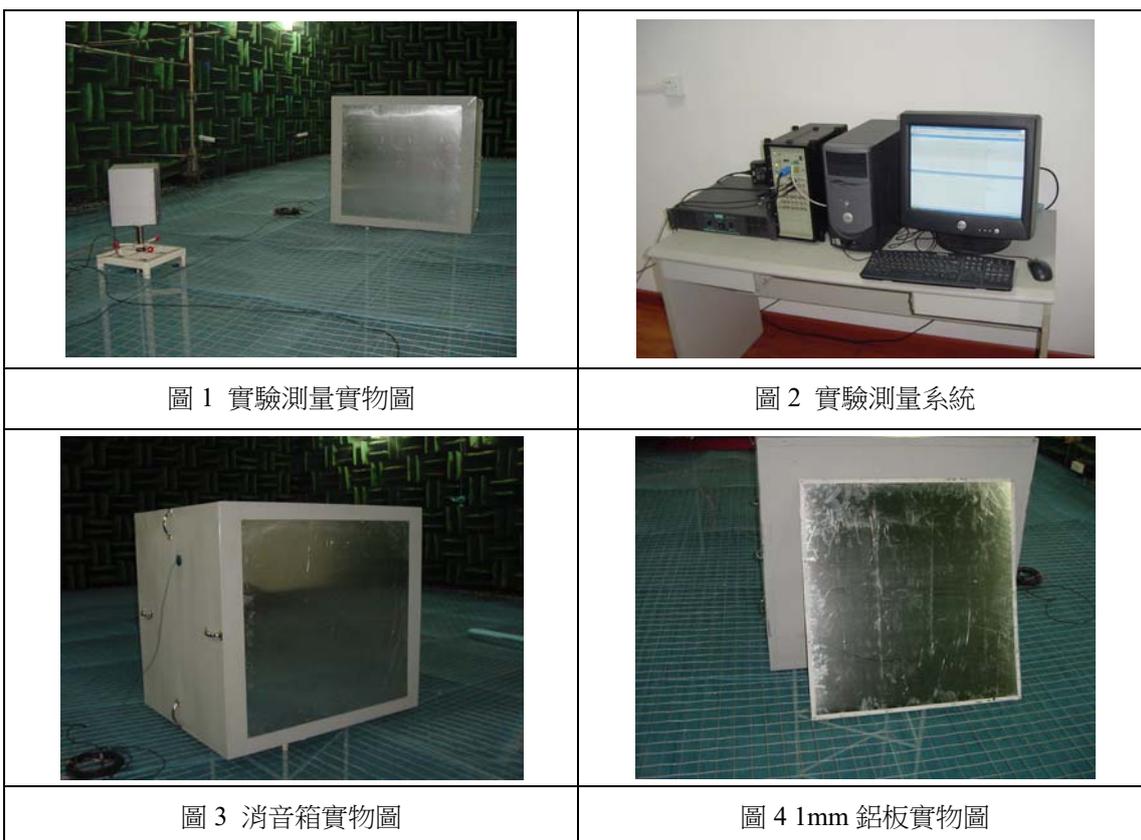


圖5.1-4 實驗測量實物圖 (1/2)

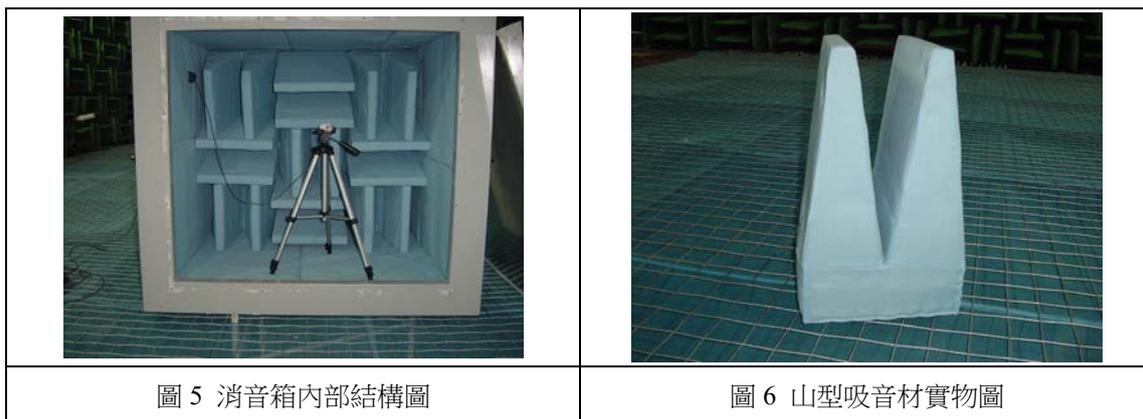


圖5.1-4 實驗測量實物圖 (2/2)

實驗原理如前文所述，但計算公式相應地發生改變，用 ΔR 表示不同角度總的入射噪音量與接收室噪音量的差值，則有：

$$\Delta R = 10 \log_{10} \frac{p_{1eAll}^2}{p_{2eAll}^2} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N p_{1en}^2}{\sum_{n=1}^N p_{2en}^2} \quad (5.1.21)$$

令不同角度的人射音壓有效值滿足以下表達式：

$$p_{1e1}^2 = p_{1e2}^2 = \dots = p_{1en}^2 = p_{1e}^2 \quad (5.1.22)$$

可以表示為：

$$\Delta R = -10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{p_{2en}^2}{p_{1e}^2} \quad (5.1.23)$$

第 n 次測量時，隔音構件兩側的音能量密度 ε_{1n} 、 ε_{2n} ；音壓 p_{1e} 、 p_{2en} 及音功率 W_{1n} 、 W_{2n} 之間滿足以下關係式：

$$\varepsilon_{1n} = \frac{W_{1n}}{cS \cos \theta}, \varepsilon_{2n} = \frac{W_{2n}}{c} \left(\frac{1}{S} + \frac{4}{R_{m2}} \right) \quad (5.1.24)$$

$$p_{1e}^2 = \varepsilon_{1n} \rho c^2, p_{2en}^2 = \varepsilon_{2n} \rho c^2 \quad (5.1.25)$$

解 (5.1.21) ~ (5.1.25) 式得：

$$\Delta R = -10 \log_{10} \left[S \left(\frac{1}{S} + \frac{4}{R_{m2}} \right) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tau(\theta_n) \cos \theta_n \right] \quad (5.1.26)$$

隔音量的表達式為：

$$TL = 10 \log_{10} \frac{N p_{1e}^2}{\sum_{n=1}^N p_{2en}^2} + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{4S}{R_{m2}} \right) \quad (5.1.27)$$

式中 S 為鉛板的面積； R_{m2} 為消音箱的房間常數；對於單角度入射，入射到試件表面的音能量和透過試件表面的音能量分別為 W_1 、 W_2 ；音能量密度分別為 ε_1 、 ε_2 。保持音源位置和功率不變，將消音箱移去，測得原鉛板前表面處的音壓有效值為 p_{e1} ，在測試狀態下測得消音箱內鉛板附近的音壓有效值為 p_{e2} ，音強透射係數為 τ ，當音波以角度 θ 入射時，由音波在自由場和房間的傳播特性可得：

$$W_1 = \varepsilon_1 c_0 S \cos \theta \quad (5.1.28)$$

$$W_2 = \varepsilon_2 c_0 \left(\frac{1}{S} + \frac{4}{R_{m2}} \right)^{-1} \quad (5.1.29)$$

入射音能量和透射音能量的關係為：

$$W_2 = \tau W_1 \quad (5.1.30)$$

音場中音能量密度和音壓的關係為：

$$\varepsilon_1 = \frac{p_{e1}^2}{\rho_0 c_0^2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{p_{e2}^2}{\rho_0 c_0^2} \quad (5.1.31)$$

解以上各式可得：

$$\frac{1}{\tau} = \frac{p_{e1}^2 S \cos \theta}{p_{e2}^2} \left(\frac{1}{S} + \frac{4}{R_{m2}} \right) \quad (5.1.32)$$

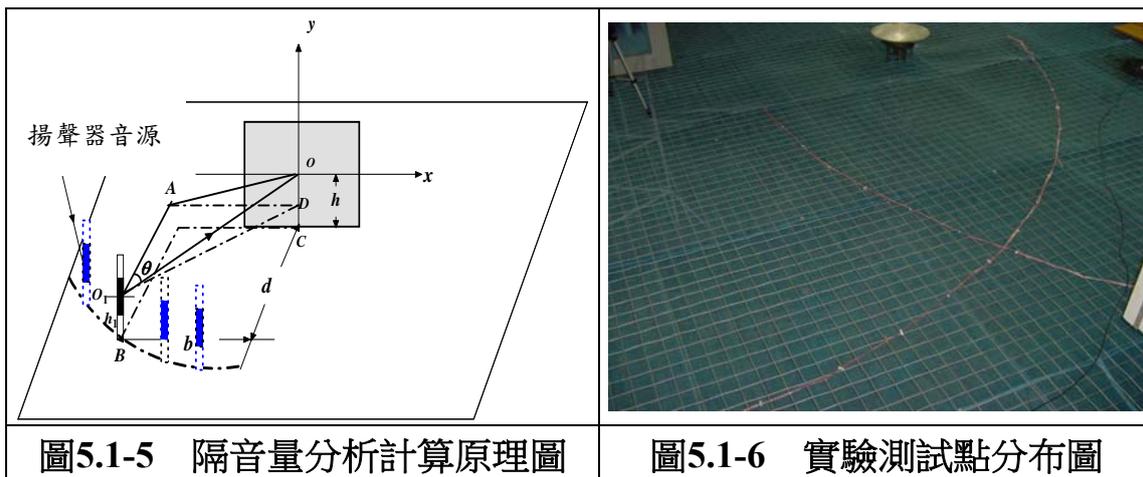
構件的隔音量 TL 為：

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{e1}^2}{p_{e2}^2} \right) + 10 \log_{10} (4 \cos \theta) + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S}{R_{m2}} \right) \quad (5.1.33)$$

$$TL = \bar{L}_{p1} - \bar{L}_{p2} + 10 \log_{10} (4 \cos \theta) + 10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} + \frac{S}{R_{m2}} \right) \quad (5.1.34)$$

房間常數 R_{m2} 滿足表達式

$$\frac{1}{R_{m2}} = \frac{T_{60}}{0.161V} - \frac{1}{S_A} \quad (5.1.35)$$



式中 \bar{L}_{p1} 為貼近外牆試件表面但不考慮試件反射效應時的平均噪音量， \bar{L}_{p2} 為接收室內的平均噪音量。 S_A 、 V 及 T_{60} 分別為消音箱的室內總的等效表面積、體積及混響時間。圖 5.1-5 所示為構件隔音量分析計算的原理圖，圖中音源距試件的垂直距離 $\overline{O_1A} = d$ ，音源距垂直於試件表面且豎直平分試件的平面的距離為 $\overline{AD} = b$ ，試件中心與音源（揚聲器）中心的高度差為 $\overline{OD} = h - h_1$ ，則由以上各量計算可得音源中心到試件中心的距離為：

$$\overline{O_1O} = \sqrt{d^2 + b^2 + (h - h_1)^2} \quad (5.1.36)$$

因而音波的人射角度 θ 可表示為：

$$\cos \theta = \frac{d}{\sqrt{d^2 + b^2 + (h - h_1)^2}} \quad (5.1.37)$$

在實驗進行過程中，保持長度 $\overline{O_1O}$ 不變，通過改變 d 和 b 的值來改變角度 θ ，測量不同角度下構件的隔音效果。本實驗中保持 $\overline{O_1O} = 3.0\text{m}$ ，實際測試點分布圖如圖 5.1-6 所示，圖中共有兩條弧線，其中延伸到圖片左下角的弧線是為了測量消音箱內音壓而計算得出的揚聲器擺放的位置，由於入射音壓不能通過測量鉛板前表面的音壓獲得，而只能將消音箱移開後測得該點自由場情況下的音壓。但每次移動消音箱增加了實驗的複雜程度，因而在消音室的其它位置與消音箱中心等高位置放置麥克風，按上述同樣方法確定音源放置的位置，得到圖 5.1-6 中的另一條曲線，這樣麥克風得到的數值就與測量時鉛板前表面的入射音壓一致（整個實驗過程應保持音源的功率不變）。

5.1.4.2 實驗數據分析及結論

實驗測量中選取音波的入射角度在 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 範圍內，每隔 5° 選取一個測量點，共測量 16 個點，計算可得不同角度下的隔音量數值，如表 5.1-2 和表 5.1-3 所示。

隔音性能曲線如圖 5.1-7~圖 5.1-10 所示，圖像中「average」表示音波沿 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 範圍內 16 個點入射時，得到的隔音量之平均值。分析隔音曲線可知，隨著入射角度的變化，隔音性能曲線變化非常明顯。以隔音量的平均值得到的曲線為參考曲線，可見入射角度增加，構件的隔音性能下降，在低頻段（圖中 400 Hz 中心頻率及以下的頻段），隔音量降低較小；在中高頻段（圖中 500 Hz 中心頻率及以上的頻段）隔音量下降較大。對於不同的入射角度，當角度特別大（如 55° 以上）或特別小（ 25° 以下時），隔音性能曲線與多角度平均得到的曲線相差較大，在隔音的現場測量中，這些角度所在的測試點數據不能很好地反映構件的實際隔音性能，數據的可信度低。

圖 5.1-11 和圖 5.1-12 為 1.0mm 無限大單層鋁板的理論隔音曲線，實驗中的鋁板為有限大面積且周邊固定，低頻存在結構共振，高頻存在吻合效應，且有阻尼存在。由於鋁板的實際物理性能、邊界條件與理論計算選取的模型不同，因而實驗結果與理論計算的結果差別較大，但對比可見，理論計算結果和實驗測試反映的隔音性能隨角度變化的規律是一致的。

比較圖 5.1-13 中的四條曲線可見，在入射角度 $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ 的情況下，得到的隔音曲線與多角度平均得到的隔音曲線相差較小，因而在制定揚聲器單點現場測量的標準時，將音波以 45° 入射之構件的隔音量作為現場的測量結果。

進一步分析圖 5.1-13 和圖 5.1-14 可知，若在對現場測量精度要求不高的情況下，可以僅測量音波以 45° 入射之構件的隔音量。若對測量精度要求較高，但現場條件不能提供 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 範圍內的 16 點測量，或者為了降低現場測量的複雜程度，可以選取 35° 、 40° 、 45° 這三個點進行測量，然後再按角度求平均。圖 5.1-14 的實驗結果表明這種測量方法得到的結果接近 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 範圍內的 16 點測量結果，從而大大降低了測量的工作量，與單點測量相比又提高了測量結果的精度。

表5.1-2 入射角度於 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之構件的隔音量

入射角 頻率(Hz)	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
100	27.4	27.5	27.7	27.8	27.5	27.7	27.2	27.2	27.1
125	23.3	23.3	24.6	24.2	24.8	24.1	24.1	24.0	23.7
160	25.8	25.8	25.8	25.9	26.2	25.4	25.8	25.4	25.5
200	26.1	25.7	25.5	25.5	26.1	26.8	27.0	26.9	27.0
250	19.4	19.4	19.0	19.3	19.7	20.1	20.4	20.5	20.6
315	16.9	17.3	17.5	18.2	17.8	17.9	19.2	19.7	20.3
400	17.2	17.4	16.9	17.6	18.1	18.3	18.5	18.9	19.1
500	21.7	21.6	21.6	21.8	22.0	21.8	20.8	20.2	19.2
630	34.4	34.1	33.3	33.1	30.1	27.4	24.3	23.3	22.1
800	27.5	27.4	29.6	33.5	36.0	33.3	31.2	30.2	29.1
1,000	30.9	30.5	31.2	30.6	29.9	29.7	30.3	30.4	29.3
1,250	34.9	33.9	33.1	31.3	31.5	31.4	31.6	30.0	28.1
1,600	38.1	37.5	36.2	36.3	36.9	35.7	34.8	35.1	33.8
2,000	40.0	41.2	40.0	40.5	41.0	40.2	39.5	37.6	39.3
2,500	37.3	37.5	38.6	37.7	35.9	37.6	37.3	37.7	36.3
3,150	36.0	36.6	38.5	38.7	41.4	40.5	41.5	41.5	37.8

表5.1-3 入射角度於 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之構件的隔音量

入射角 頻率(Hz)	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	平均值
100	27.9	27.9	26.4	25.6	25.0	23.2	21.7	28.3
125	23.9	24.5	23.4	22.5	22.9	21.4	21.3	25.0
160	25.4	25.7	24.3	24.1	23.7	22.2	20.8	26.5
200	27.3	27.1	26.5	27.1	26.9	25.7	23.9	27.6
250	20.9	21.1	20.2	20.4	20.4	19.0	18.6	21.1
315	20.3	20.9	19.9	20.6	19.9	18.8	19.0	19.7
400	19.4	19.6	18.7	19.3	18.7	17.6	17.3	19.3
500	18.8	18.4	17.2	17.6	17.2	16.1	15.3	21.1
630	21.6	21.4	20.0	20.7	20.3	20.0	19.7	25.5
800	27.8	26.9	25.1	23.9	23.8	22.3	22.2	29.1
1,000	27.5	26.2	24.6	23.5	23.5	22.3	22.1	29.1
1,250	25.9	24.4	23.1	21.9	22.0	20.7	20.6	28.5
1,600	30.4	28.2	25.7	24.5	24.0	23.0	22.7	31.6
2,000	38.4	33.5	29.1	26.9	26.1	25.0	24.9	34.6
2,500	37.0	38.1	31.1	28.2	26.2	26.0	25.7	34.9
3,150	35.7	34.2	33.0	32.1	29.1	27.9	27.7	36.8

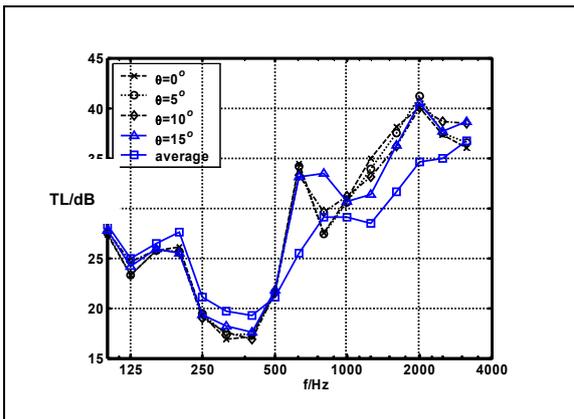


圖5.1-7 $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ 的隔音曲線

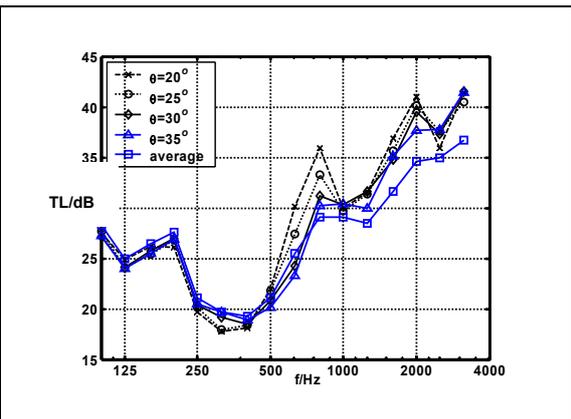


圖5.1-8 $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 的隔音曲線

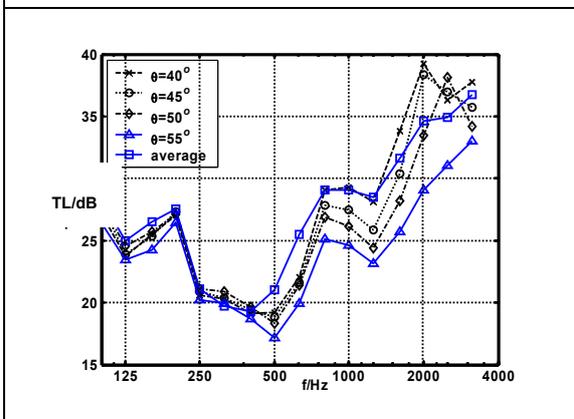


圖5.1-9 $\theta = 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ$ 的隔音曲線

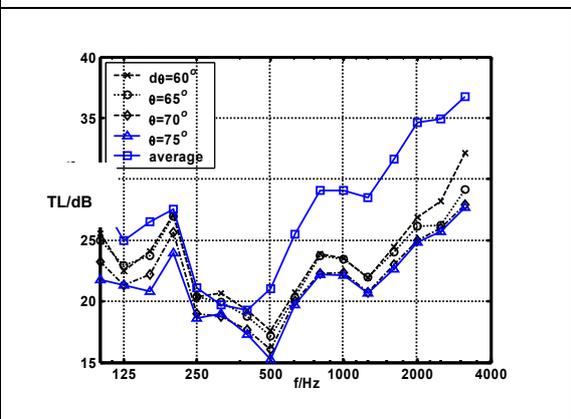


圖5.1-10 $\theta = 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ$ 的隔音曲線

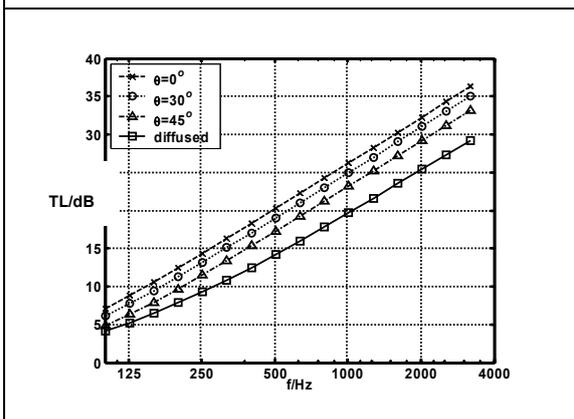


圖 5.1-11 $\theta = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 構件隔音的理論值

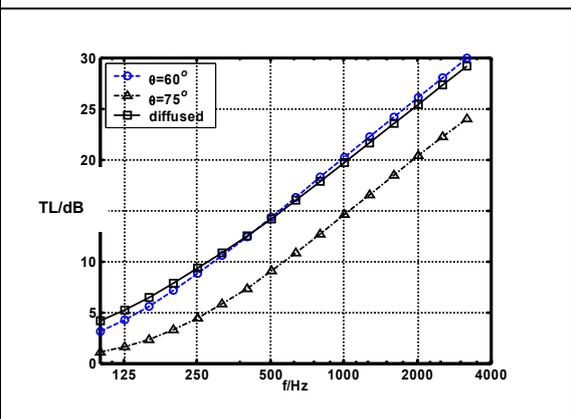


圖 5.1-12 $\theta = 60^\circ, 75^\circ$ 構件隔音的理論值

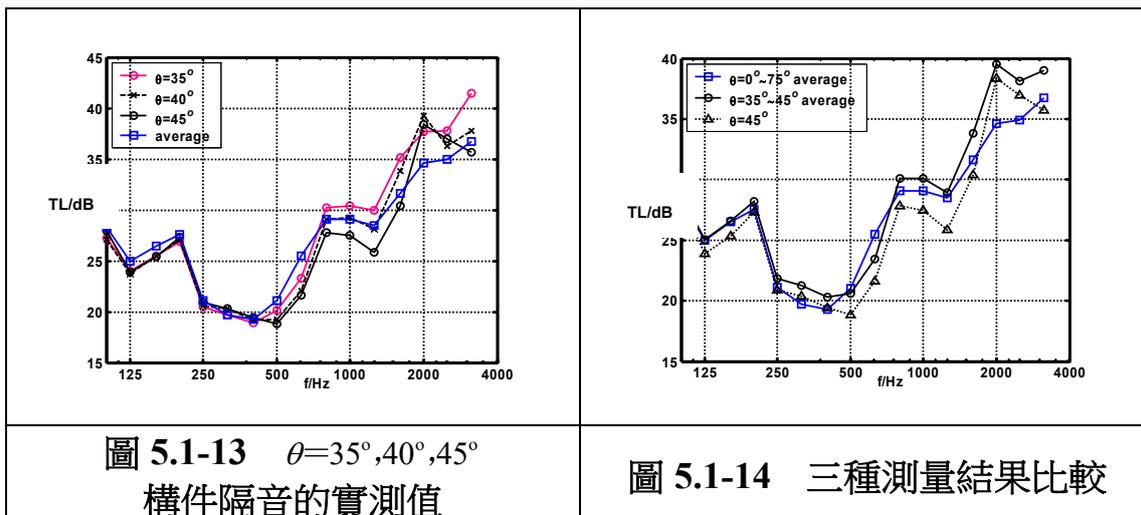


圖 5.1-13 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$
構件隔音的實測值

圖 5.1-14 三種測量結果比較

5.1.5 其它實驗方法

5.1.5.1 將近似為點音源的揚聲器拓展為線音源^[138]

交通噪音的聲學模型可以等效為線音源，音源上各點互不相干，因而可以採用不相干點音源組成的線陣來模擬現場的噪音效果。實際的測試系統可以採用一定數量的揚聲器組成線互不相干的線陣列，揚聲器之間的距離遠小於陣列到測試構件之間的距離。此時外牆周圍的音場可視為半自由音場，音波從不同角度入射到試件上，測量和數據處理的方法與用交通噪音源測量時的方法相同，這種測試方法克服了現場測量受外界環境影響的弊端，能很好地反映構件現場的隔音效果，實驗的可重複性好。

將多個揚聲器在現場排成一條直線並與試件表面平行，直線距試件表面的垂直距離應遠大於揚聲器之間的距離，其實驗原理與測量方法與交通噪音源的測量方法類似。

5.1.5.2 用半消音室模擬現場音環境^[139]

為了實現對現場噪音環境和建築構件隔音效果的準確預測，應在實驗室中模擬現場的音環境，現場交通噪音可視為半自由音場，因而音源室可以利用半消音室來替代混響室。交通噪音源可以利用不相干的線性揚聲器陣列來模擬，必要時可以製作建築物和建築構件的縮尺模型，其測試方法與隔音室測量構件隔音性能的方法相同。

5.1.6 結論

前幾節詳細論述了現行隔音測量標準中，關於隔音的現場測量和實驗室測量方法。分析了噪音源隔音測量、揚聲器音源測量和混響室測量三種方法的實驗原理、實驗條件，總結了不同測量方法的特點，在此基礎上針對揚聲器音源測量方法提出了改進方式，並通過實驗進行證明。

實驗結果表明，用揚聲器音源進行隔音的現場測量（或驗收）時，若對現場測量精度要求不高，可以僅測量音波以 45° 入射構件時的隔音量為主。若對測量精度要求較高，但現場條件不能提供 $0^\circ\sim 75^\circ$ 範圍內的多點測量，或者為了降低現場測量的複雜程度，可以選取 35° 、 40° 、 45° 這三個點進行測量，然後再按角度求平均。實驗表明這種測量方法得到的結果接近 $0^\circ\sim 75^\circ$ 範圍內的 16 點測量結果，從而降低了測量（或驗收）的工作量，與僅單點測量相比又提高了測量結果的精度。

5.2 輕薄結構的隔音性能研究

5.2.1 緒論

5.2.1.1 研究背景及意義

隔音是噪音控制的主要方法之一，它通過改變音波的傳輸途徑而達到降噪的目的。工程上常用的有隔音牆、隔音罩及隔音間等隔音結構。在飛機、輪船艙壁設計及高層建築的隔牆設計中，需要採用面密度和厚度較小的輕薄隔音結構。探索不同輕薄結構的隔音規律，在工程領域有著廣泛的應用前景。本研究從優化隔音結構、提高隔音性能的角度出發，提出了三種多層輕薄隔音結構，進行了理論分析和實驗研究，探求複合多層隔音結構的一般規律。期許相關的研究工作和成果可直接應用於隔音結構的工程設計中。

5.2.1.2 隔音研究歷史、現狀及方法

隔音理論的研究最早源於 19 世紀。Poisson 和 Laplace 對音波在不均勻介質中傳播問題進行了理論計算，19 世紀末，Rayleigh^[140]總結前人的研究成果並加以拓展，提出了不可壓縮無限大牆的隔音理論，並得到計算薄牆傳音插入損失的「品質定律」。

20 世紀 30 年代，許多學者^[141~144]對牆體的隔音特性進行了大量的理論和實驗研究，並就隔音結構的隔音量和插入損失得到了具體的計算方法。隨後的一段時間裡，人們對板的隔音特性日益關注。1942 年，Cremer^[145]在對無限大板傳音損失的研究中引用彈性力學理論，提出了斜入射音波與板中彎曲波之間發生吻合效應的彎曲波理論，解釋了實際隔音構件中的隔音低谷現象，彌補了品質定律的不足，並進一步解決了樓板的撞擊噪音輻射、板中固體的音傳播等理論問題。Fay^[146]在 1948 年對板和音場的相互耦合作用進行了比較系統的理論分析，研究發現板在振動時的振動情況與其所處的邊界條件和波的人射情況有很大關係，並對垂直入射和非垂直入射的波進行了比較並得到一些結論。

在 1948 年至 1950 年之期間，London^[147]提出了混響音場中單、雙層牆的隔音理論，解決了音波在無規入射情況下牆的隔音問題。1951 年，Pachner^[148]對無限大和有限大的牆向外輻射音場的情況進行了研究。為了提高隔音結構的隔音效果，Kurtze^{[149][150]}等人提出了各種不同的複合隔音結構，並就不同結構的隔音性能進行了比較。

1956 年，Biot^{[151][152]}建立了彈性多孔材料模型的理論，為多孔材料的廣泛應用打下了堅實的理論基礎。20 世紀 70 年代，彈性多孔材料的理論得到進一步完善，近些年來多孔材料在隔音領域的研究和應用更加廣泛。為了改善隔音結構的低頻隔音效果，克服被動隔音在低頻領域的缺陷，有源噪音控制在隔音領域的應用也進行了大量的研究並在工程上得到了應用。1995 年，Sas^[153]等人就雙層有限大板隔音結構進行了數值計算並用有源控制的方法進行改善低頻隔音性能的研究。C. Bao^[154]等人就雙層板結構有源隔音的腔控、板控和房間控制這幾種控制方法進行了實驗比較，總結出這幾種控制方法的各自特點和不同的適用場合。Carneal^[155]對雙層板結構的有源結構隔音進行了進一步分析，研究表明板的剛度、模態密度、控制器的布放等因素都將對隔音效果產生明顯的影響。這些研究結果為有源控制系統在低頻隔音領域的應用提供了可靠的理論依據。

近些年來，輕薄隔音結構越來越受到研究人員的關注。1993 年，Bolton^[156]等人就音波垂直入射到含彈性多孔材料的無限大複合板結構的隔音性能進行理論分析和實驗驗證。後來又就音波無規入射到含彈性多孔材料的無限大複合板結構的隔音性能進行了進一步研究，並比較多孔材料的不同安裝方式對隔音效果的影響^[157]。隨後 Panneton^[158]和 Sgard^[159]等人用有限元的方法就音波垂直入射和無規入射到有限大多孔材料夾心複合雙層板結構進行了數值計算，得到一些有實際應用

價值的結論。Moore^[160]將對稱夾心板中的位移模式分為對稱形變和反對稱形變的組合，提出了具有最大傳音損失的「模態抵消」夾心板設計方法。Renji^[161]以蜂窩板夾心結構為研究物件，分析了考慮複合夾心板橫向剪切形變情況下的隔音特性。並將研究結果與薄板理論和品質定律得到的隔音性能進行比較。

在隔音理論的發展過程中，先後產生了四種主要的分析方法，即波動分析法（Wave Analysis）、統計能量分析法（Statistical Energy Analysis）、模態分析法（Modal Analysis Approach）和數值分析方法（Numerical Methods）。這些方法有著各自的特點，在分析不同的隔音結構中有著自身的優勢。

波動分析法^[147]也稱無限大板理論，是求解隔音構件傳音特性的經典方法。它以波動理論為基礎，以音壓、介質質點速度和音阻抗為研究物件，求解相應的波動方程和動力學方程，從而解出隔音量的理論值。波動分析法導出的主要規律有「品質定律」和「吻合效應」以及雙層板的隔音規律等。由於無限大板理論未計及隔音構件的幾何尺寸的影響，沒有考慮板的邊界條件的約束，因而在理論結果與實測結果會有一定的差別，通常會就具體的應用場合對理論公式做適當修正。

統計能量分析法^[162]在 20 世紀 60 年代初期逐漸發展起來，到了 70 年代應用逐漸廣泛^[163]，現已成為解決複雜共振結構的重要手段之一。統計能量分析法從統計能量的觀點出發，以能量和密度替代幅度和相位作為研究物件，應用理論分析與實驗結果來處理複雜結構中無規參量的總體回應。統計能量分析方法研究隔音構件傳音損失的基本模型包含：「混響場—單層板—混響場」三個子系統，子系統的模態密度分別反映音場和隔板的幾何、物理參數對能量傳遞的影響；子系統間的能量流用耦合損耗因數來表徵，它適用與解決兩個或多個機械或音的耦合系統在無規力激發下的回應。統計能量分析方法要求子系統應具有足夠大的模態密度，因而這種方法只適合於高頻段的計算。

模態分析法^[164]是將線性定常系統振動的微分方程組中的物理座標變換為模態座標，使方程解耦，成為一組以模態座標及模態參數描述的獨立方程，以便求出系統的模態參數。在隔音領域，模態分析法的基本思想是利用隔音構件的振動模態資訊，如：特徵頻率、模態品質、模態剛度、特徵向量和音波的輻射特性為研究物件，求出音源一側混響音場激勵條件下隔音構件的振動響應及另一側的輻射音場，從而得到隔音量的理論結果。它適合分析形狀規則的隔音結構，對於非勻質板或邊界條件複雜的情況，振動模態則不易確定。

數值分析方法^[165]在隔音領域的應用主要是有限元和邊界元的方法，已有研究表明^{[153][166]}，有限元和邊界元法能很好地解決流體與固體耦合的問題，因而對隔音構件的傳音損失的問題同樣適用。數值分析法的顯著優點是不受隔音結構的幾何形狀、材料性質的限制，並且可以用來處理非線性問題，但隨著計算頻率的增加，為了保證一定的精確度，需要劃分的單元數會急劇增大，計算複雜程度隨之加劇，因而所能計算的上限頻率受到限制。

本研究在波動分析法的理論基礎上，應用轉移矩陣方法，分析週期多層結構和複合三層板結構的隔音性能，在分析帶微穿孔板複合三層結構的隔音特性時，引入了阻抗矩陣的方法，利用轉移矩陣和阻抗矩陣來分析多層隔音結構，具有計算簡單、物理意義清楚的特點。

5.2.1.3 本研究的主要工作

對於單、雙層隔音結構，已有過大量的研究工作，得到了單、雙層結構的隔音規律。近年來對複合雙層夾心隔音結構的研究也逐漸增多。但這些結構普遍存在低頻隔音不足、隔音曲線起伏較大的問題，通常是採用增加材料的面密度來改善隔音性能，這就使隔音結構變得笨重且不宜安裝。本研究在普通雙層結構的基礎上，以輕薄隔音結構為研究目標，結合近些年來隔音研究的新進展，先後就週期或準週期性多層板結構、含彈性多孔材料的複合多層板結構和帶微穿孔板的多層板隔音結構進行了理論研究和實驗驗證。

研究主要分為以下幾個方面：

在 5.2.1 節中，對前人在隔音領域的主要成果作了回顧和總結，歸納了研究隔音的幾種理論方法。

在 5.2.2 節中，對普通單層和雙層板的隔音理論進行了總結，在此基礎上，提出了週期和準週期性多層隔音結構，應用轉移矩陣的方法進行了理論研究，經過數值計算和參數的研究，說明了週期性多層結構在隔音性能上的特點。

在 5.2.3 節中，首先介紹了 Biot 關於飽和流體彈性多孔材料中的音傳播理論，結合彈性力學和流體力學的知識，給出了計算彈性多孔材料夾心多層結構的計算方法，研究了彈性多孔材料夾心多層結構的隔音性能，研究中就同等條件下不同結構對隔音效果的影響進行了數值分析，得到了最佳的隔音結構並比較了不同隔音結構隔音性能的優劣。

在 5.2.4 節中，將微穿孔板結構引入隔音結構中，構成「吸音－隔音」複合三層隔音結構，應用阻抗轉移的方法推導出這種結構隔音量和音強反射係數的解析運算式，分析結果表明帶微穿孔板的複合三層結構與同等條件下的三層結構相比，在隔音性能上有所改善，同時使反射音能量減小，減弱了入射端的混響音場。

在 5.2.5 節中，應用混響室測量隔音的方法對上述週期性多層隔音結構和夾心板多層結構的隔音性能進行了實驗研究，實驗結果反映了理論分析中得到的一般規律。實驗結果表明，多層複合結構與普通雙層結構相比在隔音性能上有顯著的改善，不同的隔音材料對隔音性能有著明顯的影響。

在最後之研究總結中，對整體研究的工作進行結論。

5.2.2 週期結構多層板的隔音性能分析

已有許多學者對從單層板隔音特性到不同結構雙層板的隔音特性進行了大量的研究^[167~169]，並形成了品質定律等隔音理論。後來又對夾心複合板的隔音性能進行了研究^{[149][170]}。近些年來，複合多孔介質雙層夾心結構也受到研究人員的關注^{[156][159]}，這些研究主要集中在探索複合板的材料、結構對隔音效果的影響，得到了一些重要的結論。然而，目前對於具有週期結構的多層板的隔音研究則較少。已有研究表明，音波穿過週期性或準週期性結構時，有些頻段的音波能完全通過，而在有些頻段音波則不能通過，即表現出明顯的通帶和禁帶的特性。對於週期結構和準週期結構，應用轉移矩陣的分析方法，已經得到了很好的理論結果，並得到了相關實驗的驗證^[171~174]。但已有研究主要集中在超音頻段，在音頻範圍內的相關工作則較少。本節將結合傳統的隔音理論，探討音頻領域的具有週期結構的無限大多層板的隔音特性。

5.2.2.1 單層板的隔音特性^[168]

如圖 5.2-1 所示，一束平面音波以角度 θ 入射到無限大板上，音波在空氣和板的分介面發生反射和折射。 p_i 、 p_r 及 p_t 分別為入射波、反射波及透射波的音壓。考慮隔板的彎曲勁度 D 和損耗因素 η ，假設板在左右兩側的速度勢函數分別為 ϕ_1 及 ϕ_2 ，則可將 ϕ_1 及 ϕ_2 表示成如下之型式：

$$\phi_1 = \phi_i + \phi_r = e^{-jk_y y} (e^{-jk_x x} + R e^{jk_x x}) \quad (5.2.1)$$

$$\phi_2 = T e^{-jk_y y} e^{-jk_x x} \quad (5.2.2)$$

$$k = \frac{\omega}{c_0}, \quad k_x = k \cos \theta, \quad k_y = k \sin \theta \quad (5.2.3)$$

R 及 T 為反射及透射速度勢函數的複振幅； ρ_0 及 c_0 分別為空氣密度及空氣中的音速； ω 為音波的角頻率； k 為音波波向量， k_x 及 k_y 為波向量分別在 x 與 y 方向上的分量。設板的橫向位移為 $W_t = \tilde{W}_t e^{-jk_y y}$ (\tilde{W}_t 為位移複振幅)，則板振動的動力學方程式和邊界條件可表示為：

$$p_1 - p_t = j\omega\rho_0(\phi_1 - \phi_2) = (Dk_y^4 + j\eta Dk_y^4 - \omega^2 m)W_t \quad (5.2.4)$$

$$v_{1x} = -\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = j\omega W_t \quad (5.2.5)$$

$$v_{2x} = -\frac{\partial \phi_2}{\partial x} = j\omega W_t \quad (5.2.6)$$

$$p_1 = p_i + p_r \quad (5.2.7)$$

解以上各式得：

$$T = \frac{2\rho_0 c_0 \sec \theta}{j(\omega m - \frac{Dk^4 \sin^4 \theta}{\omega}) + 2\rho_0 c_0 \sec \theta + \frac{\eta Dk^4 \sin^4 \theta}{\omega}} \quad (5.2.8)$$

因而音強透射係數為：

$$\tau(\theta) = \frac{|p_t|^2}{|p_i|^2} = |T|^2 = \left\{ \left[1 + \eta \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right) \left(\frac{\omega^2 D \sin^4 \theta}{c_0^4 m} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right) \left(1 - \frac{\omega^2 D \sin^4 \theta}{c_0^4 m} \right) \right]^2 \right\}^{-1} \quad (5.2.9)$$

$$D = \frac{El^3}{12(1-\sigma_0^2)}, \quad TL(\theta) = -10 \log_{10} \tau(\theta) \quad (5.2.10)$$

上式中 $TL(\theta)$ 為板的隔音量； m 、 E 、 σ_0 及 l 分別表示板的面密度、彈性模量、泊松比 (Poisson's ratio) 及板的厚度，在上式中，當：

$$\frac{\omega^2 D \sin^4 \theta}{c_0^4 m} = 1 \quad (5.2.11)$$

發生吻合效應，板的隔音量達到最小值，此時有：

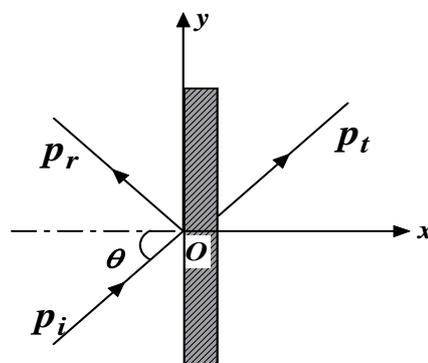


圖5.2-1 單層板隔音結構

$$f'_c = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (5.2.12)$$

f'_c 稱吻合頻率。當 $\theta = \pi/2$ ， f'_c 具有最小值，稱為吻合臨界頻率：

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (5.2.13)$$

由 (5.2.11) 式及 (5.2.13) 式可知，當 $f > f_c$ 才可能出現吻合效應。假設板中彎曲波的波長為 λ_1 ，介質中音波的波長為 λ ，當發生吻合效應時有 $\lambda = \lambda_1 \sin \theta$ ，即當介質中音波波長在板上的跡與板中傳播的彎曲波之波長相同時，板中將發生吻合共振。板的振動速度加大，音能大量透過，板的隔音量降低。分析 (5.2.9) 式可知，在低頻段，滿足條件： $\omega^2 D / c_0^4 m \ll 1$ ，此時可忽略板的勁度對隔音性能的影響，因而有：

$$TL(\theta) \approx 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\omega m \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad (5.2.14)$$

當音波垂直入射時有：

$$\theta = 0, \quad TL_0 = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\omega m}{2\rho_0 c_0} \right)^2 \right] \quad (5.2.15)$$

在音波無規入射的情況下，若具有極好的擴散音場，可對透音係數在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 範圍內積分，得到低頻無規入射的透射係數運算式為：

$$\bar{\tau} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (5.2.16)$$

分析 (5.2.15) 式可見，在不考慮板的勁度和阻尼的情況下，隔音量僅與板的面密度和音波頻率有關，這個規律稱為「品質定律」。

5.2.2.2 雙層板的隔音特性^{[169][175]}

雙層板結構的早期研究經歷了以下過程：Wintergerst 計算了中空的同品質雙層牆，在僅考慮空氣層彈性的情況下，對正入射音波的隔音，並計算出雙層牆的共振頻率。Constable 討論了同品質雙層板在波長 λ 和板空腔厚度 d ，分別滿足 $\lambda \gg d$ 及 $\lambda \ll d$ 情況下對正入射音波的隔

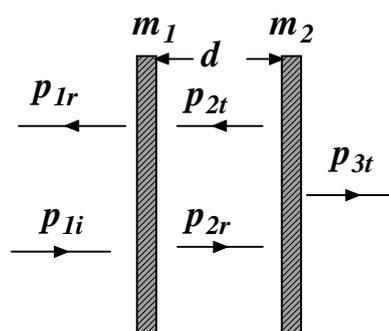


圖5.2-2 雙層板隔音結構

音，並就忽略板本身彈性時，不同品質雙層板的隔音問題進行了計算，但理論結果過於複雜。Schoch 進一步討論了垂直與斜入射音波的隔音問題，得出理論結果。1950 年，London¹⁴⁷建立了混響音場的雙層板隔音理論，並給出可以應用的理論結果。

圖 5.2-2 所示為平面音波垂直入射到無限大雙層板結構上，板的面密度分別為 m_1 及 m_2 ；板間空腔厚度為 d ；兩層板的損耗因素和等效勁度係數分別為 η_1 、 η_2 及 s_1 、 s_2 。在音波以角度 θ 入射的情況下，音壓透射係數可表示為：

$$t_p = \frac{p_t}{p_i} = -\frac{2j\rho_0^2 c_0^2 \sec^2 \theta \sin(kd \cos \theta)}{z_1' z_2' \sin^2(kd \cos \theta) + \rho_0^2 c_0^2 \sec \theta} \quad (5.2.17)$$

$$z_n' = z_n + \rho_0 c_0 \sec \theta [1 - j \cot(kd \cos \theta)] \quad (n=1,2) \quad (5.2.18)$$

$$z_1 = j\omega m_1 + r_1 - \frac{js_1}{\omega} = m_1(j\omega + \eta_1 \omega_1) - \frac{js_1}{\omega} \quad (5.2.19)$$

$$z_2 = j\omega m_2 + r_2 - \frac{js_2}{\omega} = m_2(j\omega + \eta_2 \omega_2) - \frac{js_2}{\omega} \quad (5.2.20)$$

以上各式中， ω_1 及 ω_2 分別為兩層板在真空中自由振動的角頻率； r_1 及 r_2 為板的音阻； k 為音波的波數 $k = \omega / c_0$ 。

當音波垂直入射時，(5.2.17) 式改寫為：

$$t_p = \frac{2j\rho_0^2 c_0^2 \sin kd}{z_1' z_2' \sin^2 kd + \rho_0^2 c_0^2} \quad (5.2.21)$$

$$z_n' = z_n + \rho_0 c_0 (1 - j \cot kd) \quad (n=1,2) \quad (5.2.22)$$

(5.2.17) 式中，音壓透射係數隨頻率的變化關係比較複雜，分析可見，它在滿足 $kd = (2n-1)\pi/2$ 時取最小值，即有最大隔音量； $kd = n\pi$ 時取最大值，此時即為空腔駐波共振。在低頻段，滿足 $kd \ll 1$ ，(5.2.21) 式近似表示為：

$$t_p = \frac{2j(\rho_0 c_0)^2 / kd}{[z_2 + \rho_0 c_0 - j\rho_0 c_0 / kd][z_1 + \rho_0 c_0 - j\rho_0 c_0 / kd] + (\rho_0 c_0 / kd)^2} \quad (5.2.23)$$

在 (5.2.23) 式中，忽略板的勁度、機械阻尼和音阻尼，可得滿足以下方程式時，取得最小隔音量：

$$(-\omega^2 m_1 + \rho_0 c_0^2 / d)(-\omega^2 m_2 + \rho_0 c_0^2 / d) = \left(\frac{\rho_0 c_0^2}{d}\right)^2 \quad (5.2.24)$$

$$\text{即 } \omega_0 = \left[\left(\frac{\rho_0 c_0^2}{d} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) \right]^{1/2} \quad (5.2.25)$$

ω_0 為系統低頻結構共振角頻率。下面分三種情況分析不同頻段的隔音特性：

一、當頻率低於結構的共振頻率

即 $\omega < \omega_0$ 時，有 $\omega^2 m_1 m_2 < (m_1 + m_2) \rho_0 c_0^2 / d$ ，忽略空氣特性阻抗項 $\rho_0 c_0$ 得：

$$\frac{p_t}{p_i} = -\frac{2j\rho_0 c_0}{\omega(m_1 + m_2)} \quad (5.2.26)$$

$$\text{因而 } \tau = \left[\frac{2\rho_0 c_0}{\omega(m_1 + m_2)} \right]^2, \quad TL = 20 \log_{10} \frac{\omega(m_1 + m_2)}{2\rho_0 c_0} \quad (5.2.27)$$

可見此結果類似於同品質單層板的隔音量。

二、音波頻率在結構的共振頻率附近時

$$\frac{p_t}{p_i} = -\frac{2\rho_0 c_0}{(\eta_1 \omega_1 m_2 + \eta_2 \omega_2 m_1 + K \rho_0 c_0)} \quad (5.2.28)$$

其中 $K = (m_1 / m_2) + (m_2 / m_1)$ ，可見若板板損耗因素較小，可以通過增大兩層板的面密度比來減小透音量，即使 $m_1 / m_2 \gg 1$ 或 $m_2 / m_1 \gg 1$ ，不過這樣會影響到高频特性（見下述）。若為同品質雙層板，其固有角頻率為 ω' ，損耗因素為 η ，上式可化為：

$$\frac{p_t}{p_i} = -\frac{2}{2\eta(m\omega' / \rho_0 c_0) + 2} \quad (5.2.29)$$

若機械阻尼較大以至於 $\eta \gg \rho_0 c_0 / \omega' m$ （通常情況下是滿足的）此時有：

$$\frac{p_t}{p_i} = -\frac{2\rho_0 c_0}{2m\omega'\eta} \quad (5.2.30)$$

$$\text{因而有：} TL = 20 \log_{10} \frac{2m\omega'}{2\rho_0 c_0} + 20 \log_{10} \eta = TL_0 + 20 \lg \eta \quad (5.2.31)$$

其中 TL_0 相當於同品質單層板的隔音量，假如 $\eta \ll \rho_0 c_0 / \omega' m$ ，則透音係數接近於 1，幾乎所有能量都透過雙層板，因而通常採用不同品質的雙層板來減小共振頻率時的透音量。

三、在高頻部分，不再滿足 $kd \ll 1$

由 (5.2.21) 可得，當 $kd = (2n - 1)\pi / 2$ 時音壓透射係數取最小值，此時對應音壓比值為：

$$\frac{p_t}{p_i} = -\frac{2j\rho_0^2 c_0^2}{\omega^2 m_1 m_2} \quad (5.2.32)$$

此時有最大隔音量，在兩板品質一定的情况下，與共振頻率處不同，可以通過使 $m_1 = m_2$ 來增加隔音量(比兩板隔音量之和還大 6 dB)。

雙層板結構比單層板隔音效果在中高頻段有明顯改善，但由於空腔駐波共振在某些頻率會產生隔音低谷；在低頻段，板的面密度對隔音起主導作用，隔音性能改善效果不太明顯，且由於雙層結構有系統結構共振存在，也會產生隔音低谷。因而雙層隔音結構比單層板隔音有顯著優勢，但隔音效果仍不太理想。

5.2.2.3 多層板的隔音性能研究

壹、週期結構無限大多層板隔音量的理論推導

無限大週期性多層板的結構如圖 5.2-3 所示。空氣層 G_i 和固體板 S_i 相間放置，空氣層及板的厚度分別為 a_i 和 b_i 。座標原點在 x_0 處，其他各點座標分別為 $x_1^-, x_1^+, \dots, x_i^-, x_i^+, \dots$ 。設有一束平面音波從 x_0 處垂直入射多層板中。音波將在不同介質的分介面發生反射和折射。音波在介質中的傳播遵循 Helmholtz 方程：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5.2.33)$$

其在無限大介質層中的平面波解為：

$$p(x,t) = Ae^{-j(\omega t - kx)} + Be^{-j(\omega t + kx)} \quad (5.2.34)$$

略去時間項 $e^{-j\omega t}$ 得：

$$p(x) = Ae^{jkx} + Be^{-jkx} \quad (5.2.35)$$

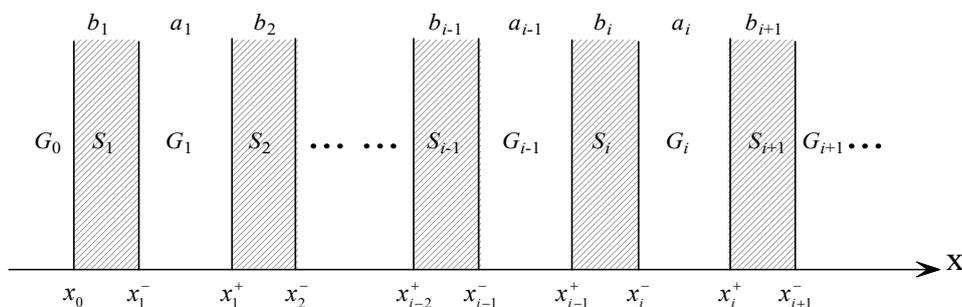


圖5.2-3 週期結構多層板示意圖

式中 $p(x)$ 表示音場中各點的音壓，上式右端第一項表示向右傳播的音波，第二項表示音波向左傳播的部分。音場中該點的質點振動速度的運算式為：

$$u(x) = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial x} dt = \frac{1}{\rho c} [Ae^{jkx} - Be^{-jkx}] \quad (5.2.36)$$

下面用方程式 (5.2.35) 及 (5.2.36) 推導具有週期結構的多層板的隔音量。在空氣層中，音壓可以表示為：

$$p(x) = G^-(x)e^{jk_g x} + G^+(x)e^{-jk_g x} \quad (5.2.37)$$

在板介質中類似有： $p(x) = S^-(x)e^{jk_s x} + S^+(x)e^{-jk_s x}$

$$\text{令 } \mathbf{G}(x) = \begin{pmatrix} G^-(x) \\ G^+(x) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}(x) = \begin{pmatrix} S^-(x) \\ S^+(x) \end{pmatrix} \quad (5.2.38)$$

其中 k_g 及 k_s 分別為空氣及板介質中的波向量，根據音波在兩種介質的分介面處音壓和質點速度連續，在 x_{i-1}^- 介面處有：

$$S_{i-1}^-(x_{i-1}^-) + S_{i-1}^+(x_{i-1}^-) = G_{i-1}^-(x_{i-1}^-) + G_{i-1}^+(x_{i-1}^-) \quad (5.2.39)$$

$$\frac{1}{\rho_s c_s} [S_{i-1}^-(x_{i-1}^-) - S_{i-1}^+(x_{i-1}^-)] = \frac{1}{\rho_0 c_0} [G_{i-1}^-(x_{i-1}^-) - G_{i-1}^+(x_{i-1}^-)] \quad (5.2.40)$$

令 $q^2 = \frac{\rho_0 c_0}{\rho_s c_s}$ ，代入 (5.2.39) 及 (5.2.40) 並化簡得：

$$S_{i-1}^-(x_{i-1}^-) = \frac{1}{2} [1 + q^{-2}] G_{i-1}^-(x_{i-1}^-) + \frac{1}{2} [1 - q^{-2}] G_{i-1}^+(x_{i-1}^-) \quad (5.2.41)$$

$$S_{i-1}^+(x_{i-1}^-) = \frac{1}{2} [1 - q^{-2}] G_{i-1}^-(x_{i-1}^-) + \frac{1}{2} [1 + q^{-2}] G_{i-1}^+(x_{i-1}^-) \quad (5.2.42)$$

令 $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} (1+q^2)/2 & (1-q^2)/2 \\ (1-q^2)/2 & (1+q^2)/2 \end{pmatrix}$ ，最終結果可用矩陣表示為：

$$\mathbf{S}_{i-1}(x_{i-1}^-) = \mathbf{H} \mathbf{G}_{i-1}(x_{i-1}^-) \quad (5.2.43)$$

同理可得在介面 x_i^+ 處有 $\mathbf{G}_i(x_i^+) = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{S}_{i+1}(x_i^+)$

$$\text{令 } \mathbf{U}_g(a_i) = \begin{pmatrix} e^{-jk_g a_i} & 0 \\ 0 & e^{jk_g a_i} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U}_s(b_i) = \begin{pmatrix} e^{-jk_s b_i} & 0 \\ 0 & e^{jk_s b_i} \end{pmatrix} \quad (5.2.44)$$

由圖 5.2-3 並結合以上運算式可得：

$$\mathbf{S}_i(x_i^-) = \mathbf{H} \mathbf{G}_i(x_i^-), \quad \mathbf{G}_i(x_i^-) = \mathbf{U}_g(a_i) \mathbf{G}_i(x_i^+), \quad \mathbf{S}_{i+1}(x_i^+) = \mathbf{U}_s(b_i) \mathbf{S}_{i+1}(x_{i+1}^-) \quad (5.2.45)$$

整理後得：

$$\mathbf{S}_i(x_i^-) = \mathbf{H} \mathbf{U}_g(a_i) \mathbf{H}^{-1} \mathbf{U}_s(b_i) \mathbf{S}_{i+1}(x_{i+1}^-) \quad (5.2.46)$$

對於 N 層板的週期結構，令 $\mathbf{M}_i = \mathbf{H}\mathbf{U}_g(a_i)\mathbf{H}^{-1}\mathbf{U}_s(b_i)$ ，將上式遞推可得：

$$\mathbf{S}_1(x_1^-) = \mathbf{M}_1\mathbf{S}_2(x_2^-) = \mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\mathbf{S}_3(x_3^-) = \cdots = \mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\cdots\mathbf{M}_{N-1}\mathbf{S}_N(x_N^-) \quad (5.2.47)$$

考慮到結構的邊界條件，在左邊界：

$$\mathbf{G}_0(x_0) = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{S}_1(x_0^-), \quad \mathbf{S}_1(x_0^-) = \mathbf{U}_s(b_1)\mathbf{S}_1(x_1^-) \quad (5.2.48)$$

在右邊界： $\mathbf{S}_N(x_N^-) = \mathbf{H}\mathbf{G}_N(x_N^-)$ ，因而有：

$$\mathbf{G}_0(x_0) = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{U}(b)\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\cdots\mathbf{M}_{N-1}\mathbf{H}\mathbf{G}_N(x_N^-) \quad (5.2.49)$$

令 $\mathbf{M} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{U}(b_1)\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2\cdots\mathbf{M}_{N-1}\mathbf{H}$ ，為總的轉移矩陣，則上式可表示為：

$$\mathbf{G}_0(x_0) = \mathbf{M}\mathbf{G}_N(x_N^-) \quad (5.2.50)$$

音波穿過 N 層板時，將發生多次反射和折射，如圖 5.2-4 所示。音波從左邊介質 A 正入射透過介質 B，進入右邊介質 A，音波在介質 B 的左邊和右邊的音壓可以用複振幅表示為：

$$p_{i-1}^A(x, t) = e^{j\omega t} (a_{i-1}^A e^{jk_A x} + b_{i-1}^A e^{-jk_A x}) \quad (5.2.51)$$

$$p_i^A(x, t) = e^{j\omega t} (a_i^A e^{jk_A x} + b_i^A e^{-jk_A x}) \quad (5.2.52)$$

式中 p 表示波函數； ω 及 k_A 分別表示角頻率及波向量。左、右兩邊複振幅之間的關係可以用一個歸一化複矩陣來 \mathbf{S}_i 表示，即：

$$\begin{pmatrix} a_i^A \\ b_{i-1}^A \end{pmatrix} = \mathbf{S}_i \begin{pmatrix} a_{i-1}^A \\ b_i^A \end{pmatrix} \quad (5.2.53)$$

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} t_i & r_i \\ r_i' & t_i' \end{pmatrix}, \quad |t_i|^2 + |r_i|^2 = 1 \quad (5.2.54)$$

式中， r_i 、 t_i 及 r_i' 、 t_i' 分別表示左、右兩邊的反射和透射係數。由於音波從左往右和從右往左入射是可逆的，因而有 $t_i = t_i'$ ，又因為 \mathbf{S}_i 是酉矩陣，因而 \mathbf{S}_i 與它的共軛轉置矩陣的乘積等於單位矩陣，即 $\mathbf{S}_i(\mathbf{S}_i^*)^T = \mathbf{I}$ ，解得 $r_i' = -r_i^* t_i' / t_i^*$ ，將以上結果代入 (5.2.53) 及 (5.2.54) 得：

$$\begin{pmatrix} a_i^A \\ b_{i-1}^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_i & r_i \\ -r_i^* t_i' / t_i^* & t_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{i-1}^A \\ b_i^A \end{pmatrix} \quad (5.2.55)$$

進一步化簡得：

$$\begin{pmatrix} a_{i-1}^A \\ b_{i-1}^A \end{pmatrix} = \mathbf{m}_i \begin{pmatrix} a_i^A \\ b_i^A \end{pmatrix}, \quad \mathbf{m}_i = \begin{pmatrix} 1/t_i & -r_i/t_i \\ -r_i^*/t_i^* & 1/t_i^* \end{pmatrix} \quad (5.2.56)$$

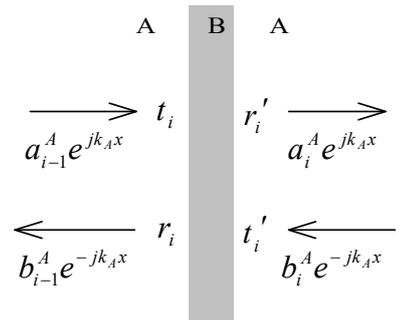


圖5.2-4 音波散射示意圖

上式中 \mathbf{m}_i 即為音波通過中間介質 B 時音壓的複振幅在左右兩邊的傳遞矩陣，稱為散射矩陣，同理可得若中間有 N 層 B 介質時，總的散射矩陣為：

$$\mathbf{M}_N^s = \begin{pmatrix} 1/t_N & -r_N/t_N \\ -r_N^*/t_N^* & 1/t_N^* \end{pmatrix} \quad (5.2.57)$$

因而總的音壓反射和透射係數可以通過散射矩陣表示為^[164]：

$$\mathbf{M}_N^s = \begin{pmatrix} 1/t & -r/t \\ -r^*/t^* & 1/t^* \end{pmatrix} \quad (5.2.58)$$

式中， t 和 r 分別為總的音壓透射和總的音壓反射係數， t^* 和 r^* 分別為 t 和 r 的共軛。由聲學理論可知，隔音量的運算式為^[168]：

$$TL = 10 \log_{10} |t|^2 \quad (5.2.59)$$

整理 (5.2.50) 式、(5.2.58) 式和 (5.2.59) 式可得：

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_N^s, \quad TL = 10 \log_{10} |M_{11}|^2 \quad (5.2.60)$$

上式中 TL 為板的隔音量， M_{11} 為轉移矩陣的 $\mathbf{M}(1,1)$ 項。可見，應用轉移矩陣的方法可以很方便地分析週期結構多層板的隔音特性。

貳、多層板隔音特性的數值模擬

對於板的層數 N 較大的情況，隔音量的解析運算式較繁雜，且物理意義不明顯，故採用數值模擬的方法分析它在不同頻帶的隔音特性。下面將就不同結構的多層板的隔音特性進行數值分析，並總結相關結論。有關參數取值為：板和空氣層的總厚度 $d = 60\text{mm}$ ，總的面密度取相當於 3.0mm 厚的鋁板的面密度，即 $m_0 = 8.1\text{kg/m}^2$ 。為了便於比較不同結構情況下的隔音特性， d 和 m_0 在整個數值模擬過程中保持不變。

一、同材料等厚多層板

選取總厚度為 3.0mm 的鋁板，進行等厚分層模擬，即在圖 5.2-3 中取：

$$a_1 = a_2 = \dots = a_{N-1} = a, \quad b_1 = b_2 = \dots = b_N = b \quad (5.2.61)$$

圖 5.2-5 是分別就板的層數 $N = 2, 4, 6, 8$ 時得到的 $0 \text{ Hz} \sim 10\text{k Hz}$ 範圍內的隔音曲線。當 $N = 2$ 時， $a = 57.0\text{mm}$ ， $b = 1.5\text{mm}$ ；同理可知，當 $N = 4$ 時， $a = 19.0\text{mm}$ ， $b = 0.75\text{mm}$ ；當 $N = 6$ 時， $a = 11.4\text{mm}$ ， $b = 0.5\text{mm}$ ；當 $N = 8$ 時，有 $a = 8.14\text{mm}$ ， $b = 0.375\text{mm}$ 。

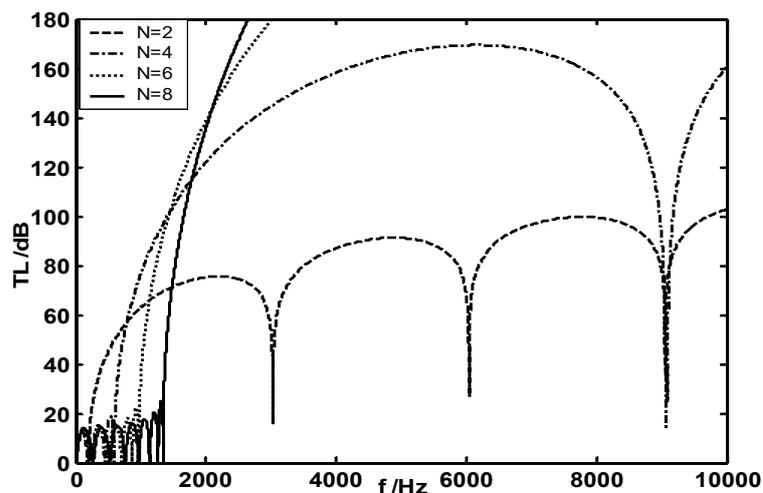


圖5.2-5 等厚多層板的隔音特性曲線 (N=2, 4, 6, 8)

由圖 5.2-5 可知，多層板與雙層板具有類似的性質，即存在低頻系統共振和高頻空腔駐波共振，這兩者都會影響到板的隔音性能。在低頻段，音波波長遠大於板的厚度，系統可視為集中參數等效系統，其音—電類比線路如圖 5.2-6 所示。圖中 $j\omega M_a$ 、 $j\omega C_a$ 及 $\rho_0 c_0$ 分別表示板、空氣層及板外空氣介質的音阻抗， p_i 和 p_t 分別為入射音壓和透射音壓。由電路理論可知，對於 N 層板，必然會出現 $N-1$ 個共振頻率，共振頻率分布是不均勻的，隨著頻率的增加相鄰的兩低谷間距離減小。低谷的位置與板和空氣層的厚度有關，板或空氣層越厚則共振低谷越向低頻端移動。在中高頻段，對於多層板，與雙層板類似，會出現空腔駐波共振，其共振頻率滿足運算式^[176]：

$$f_n = nc_0 / 2a \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5.2.62)$$

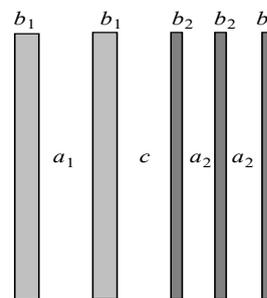
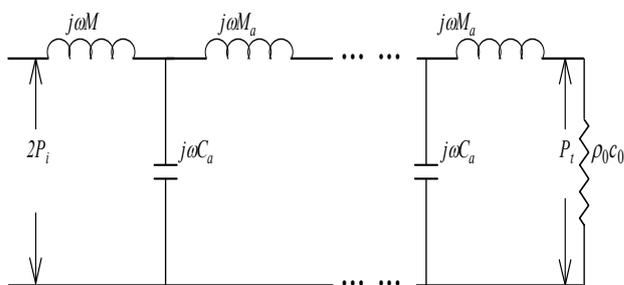


圖5.2-6 多層板低頻音—電類比線路圖 圖5.2-7 分層週期結構示意圖

比較分析圖 5.2-5，可見在相同的面密度和厚度的條件下，隨著板的層數增加，每層板的厚度相應減小。中高頻隔音效果明顯提高，主要表現為隔音曲線斜率變大，隔音量增加變快，高頻共振頻率個數減少，相鄰高頻共振頻率間距增大，甚至可以移出音頻範圍。但低頻隔音效果變差，主要表現為低頻隔音量減小，品質共振低谷個數增加，且共振頻率上移。綜合以上分析可知，多層等厚週期結構多層板在提高中高頻隔音方面有明顯的優勢，適合於對中高頻隔音要求較高的場合。

二、分層等厚度多層板隔音特性

由以上的分析可知，在總厚度和總的面密度不變的條件下，增加板的層數對高頻隔音有益，而增加板的厚度能增強低頻隔音效果，在板的面密度一定的前提下，兩者間產生了矛盾。若採用分層等厚度多層板有可能在一定程度上降低高、低頻隔音之間的矛盾。這種板的結構示意圖如圖 5.2-8 所示，可將多層板分兩部分來考慮。圖中左邊部分板和空氣層的厚度較大，側重於低頻隔音，改善低頻系統共振影響；右邊部分採用薄板和薄的空氣層，主要目的是改善空腔駐波共振的影響，從而改善高頻隔音效果。圖 5.2-9 是四層板和五層板的數值模擬結果，仍採用總厚度 3.0mm 的鋁板，其參數具體如下：

- (1) $N_1 = 2, N_2 = 2, b_1 = 1.0\text{mm}, a_1 = 41.0\text{mm}, c = 15.0\text{mm}, b_2 = 0.5\text{mm}, a_2 = 1.0\text{mm}$
- (2) $N_1 = 2, N_2 = 3, b_1 = 0.9\text{mm}, a_1 = 40.0\text{mm}, c = 15.0\text{mm}, b_2 = 0.4\text{mm}, a_2 = 1.0\text{mm}$

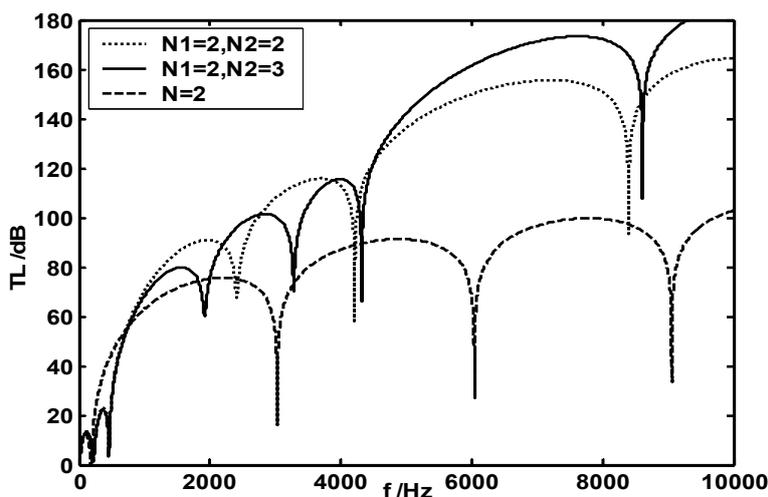


圖5.2-8 分層週期結構特性

以上兩式中， N_1 表示厚板的層數， N_2 表示薄板的層數， b_1 為厚板的厚度， b_2 為薄板的厚度， a_1 為厚板間空氣層的厚度， a_2 為薄板間空氣層的厚度， c 為厚、薄板間的空隙厚度。

在圖 5.2-8 中， $N = 2$ 表示圖 5.2-1 中的等厚雙層板。比較圖中的三條曲線可見，分層週期結構的多層板與等厚多層板相比的優點是：可以在基本不影響低頻隔音的情況下進一步改善高頻隔音特性。不過在中頻段會出現幾個小的共振低谷，這是由於薄板的系統共振造成的。這種結構比較適合於對低頻隔音有一定要求，但對高頻隔音要求較高的場合。

三、不同材料的分層週期結構

在上述四層板的基礎上，保持薄板參數不變，將兩層厚鋁板用同品質的鋼板替代，總厚度和總的面密度不變，參數調整為：

$$b_1 = 0.346\text{mm}, a_1 = 42.3\text{mm}, c = 15.0\text{mm}, b_2 = 0.5\text{mm}, a_2 = 1.0\text{mm}$$

得到的圖像與上述四層鋁板的比較圖如圖 5.2-9 所示。比較兩曲線可見，在總的面密度和厚度不變的前提下，換用不同材料對隔音性能沒有明顯的影響。同樣，將空氣層改用其他氣體如二氧化碳，結果對隔音特性的影響也較小。這是因為在面密度和厚度一定的情况下，換用其他材料對板的等效音阻抗影響很小，但換用不同材料可以改變板的強度等其他物理量，以適應不同場合的需要。而改變氣體種類也只能小幅度的改變空腔內氣體的音阻抗。

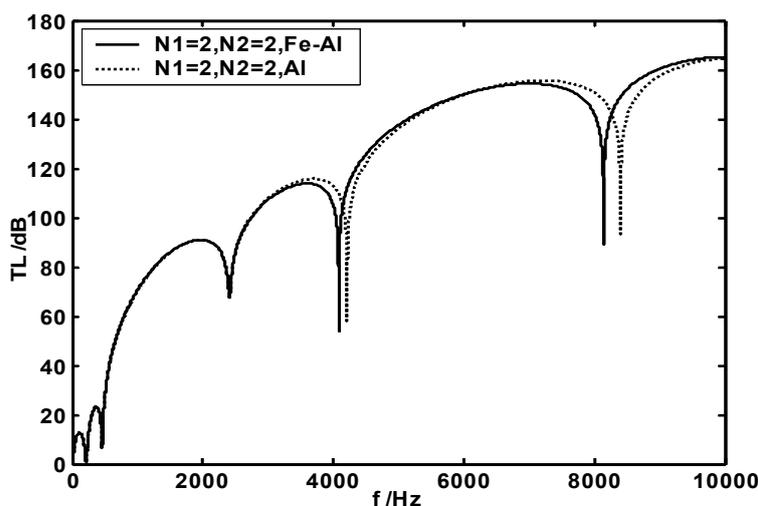


圖5.2-9 Fe-Al複合多層板隔音特性曲線

5.2.2.4 結論

由以上對不同週期結構多層板隔音特性的分析，可以發現多層板與傳統的雙層板相比，在相同厚度和相等面密度的條件下，週期性結構在隔音效果上有自身的特點：

一、等厚週期結構多層板的中高頻隔音特性較好，但低頻隔音效果相對於雙層板而言變差，適合於中高頻隔音的需要。

二、分層等厚週期結構多層板與雙層板相比，可以在基本上不影響低頻隔音特性的基礎上，改善中高頻隔音效果。但由於空氣共振的影響，中高頻段隔音效果不如等厚週期結構多層板隔音效果好，因而適合於兼顧低頻隔音、著重中高頻隔音的場合。

三、不同材料分層週期多層板與同種材料相比，沒有明顯優勢，但改變材料可以改變板的強度等其他物理量。有關研究表明^[156]，對於雙層板，通過板間填充多孔介質的方式，可以改善高、低頻共振，使隔音曲線更加平滑，也有利於板間的固定。但目前對於週期結構的多層板填充多孔介質的研究文獻較少，有關多層板填充多孔介質的隔音特性的研究工作將在下一節中進行介紹。

5.2.3 複合多孔彈性介質多層夾心板的隔音性能

多孔彈性材料夾心板因其輕、薄的特點在隔音降噪中有著廣泛的應用。1956年，Biot 提出流體飽和多孔介質中的音傳播理論^{[151][152]}，奠定了多孔介質聲學的基礎。隨著 Biot 理論的不斷完善，近些年來應用 Biot 理論研究彈性多孔介質夾心板的隔音性能受到科研人員的關注，Bolton 和 Lauriks 等人先後就音波垂直和無規入射到無限大雙層夾心板的隔音情況進行了研究^[153, 154, 177]。隨後 Atalla 等用有限元和邊界元的方法先後對低頻音波垂直和無規入射到有限大雙層夾心板的隔音性能進行了數值分析^{[159][178]}，得到了一些有應用價值的結果。由於描述多孔介質的參數較多，相對較複雜，有些文獻採用了根據具體情況考慮主要因素的方法簡化分析過程^[179]，但適用範圍有限。目前文獻僅對雙層夾心板的不同結構有研究，對於多層多孔材料結構夾心板的隔音性能研究則較少。本節將就不同結構的三層彈性多孔介質夾心板的隔音性能進行分析，並與通常情況下的雙層夾心板作比較，並對更多層夾心結構的隔音規律作出探索。

5.2.3.1 多孔彈性介質的 Biot 理論

Biot 理論是基於孔隙中流體的流動屬於 Poiseuille 型流的動力學機理而建立。Biot 假設飽和流體多孔介質由固體骨架和相互連通的孔隙構成，所有孔隙大小均勻，孔內充滿可以相對於骨架運動的可壓縮的黏滯流體，它們的相對運動滿足達西定律。假設具有慣性的流體和骨架的運動是相互耦合的，忽略熱學、化學效應，把飽和流體多孔介質作為均勻各向同性介質處理，且彈性波波長比最大顆粒的尺寸大。

Biot 考慮到孔隙介質為雙相介質，彈性波在雙相介質中的傳播存在三個力，即彈性力、慣性力和黏滯力，因而可以導出飽和流體多孔介質中音傳播的音波方程式，從而建立多孔介質中音速、音衰減與頻率及多孔介質參數（孔

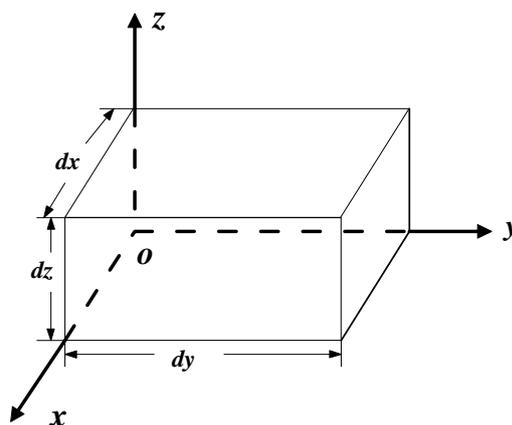


圖5.2-10 多孔介質中應力應變關係分析圖

隙率、骨架和孔隙流體的彈性、流體的黏滯性）之間的關係。Biot 理論預言了流體飽和的多孔介質的骨架和孔隙流體中存在三種音波，即快縱波、慢縱波和切變橫波。和均勻固體相比，多了一種慢縱波。慢縱波的傳播中，流體和骨架的運動相位是相反的，它的傳播速度小於流體和骨架中的縱波速度，由於慣性和黏滯作用，骨架和孔隙流體中的這三種波總是相互耦合的。Biot 指出，黏滯力控制孔隙流體的相對運動是彈性波在孔隙介質傳播過程中發生衰變的主要機理。在 Biot 理論中，用四個彈性常數來描述流體飽和的多孔介質的應力、應變關係，與均勻各向同性固體介質相比，多用了兩個彈性參數，分別對應流體的彈性及流體和骨架間的彈性相互作用。Biot 理論用兩個相互耦合的向量方程式，分別描寫骨架和流體的運動，在兩個方程式中都包含骨架和流體間的慣性和黏性相互作用項，構成這兩個方程式的相互耦合。

音波在均勻且各向同性的流體飽和的多孔彈性介質中傳播時，以快縱波、慢縱波和切變橫波三種型式傳播，由 Biot 理論^[151]得到作用在單位面積固體介質上的應力與固體及流體應變的關係為：

$$\sigma_x = 2Ne_x + Ae_s + Q\varepsilon \quad (5.2.63)$$

方程式 (5.2.63) 中， $e_s = \nabla \cdot \bar{u}$ 為固體體積應變， \bar{u} 為固體位移向量；式中 $e_x = \partial u_x / \partial x$ ， u_x 為 x 方向位移分量； $\varepsilon = \nabla \cdot \bar{U}$ 為流體的體積應變， \bar{U} 為流體的位移向量； $N = E_1 / 2(1 + \nu)$ 為固體剪切模量， $E_1 = E_m(1 + j\eta)$ ， E_m ， ν 為固體靜態楊氏模量和泊松比， η 為損失因數； $A = \nu E_1 / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$ 為第一拉密常數； $Q = (1 - h)E_2$ 表示固體骨架和流體體積改變間的耦合關係，式中 h 為材料的孔隙率， E_2 為孔中流體的體積彈性模量。同理在 y 方向和 z 方向有：

$$\sigma_y = 2Ne_y + Ae_s + Q\varepsilon \quad (5.2.64)$$

$$\sigma_z = 2Ne_z + Ae_s + Q\varepsilon \quad (5.2.65)$$

作用在多孔材料中單位面積流體上的應力表示為：

$$s = R\varepsilon + Qe_s \quad (5.2.66)$$

上式中常數 $R = hE_2$ 描述流體中應力和應變的關係， Q 和 R 原則上可以通過經驗估計得出數值。作用在 xy 平面上的剪切力為：

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = N\gamma_{xy}, \quad \gamma_{xy} = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x \quad (5.2.67)$$

τ_{xy} 表示作用在 x 面方向指向 y 軸的應力，同理可得在其他兩個平面有：

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = N\gamma_{xz}, \quad \gamma_{xz} = \partial u_x / \partial z + \partial u_z / \partial x \quad (5.2.68)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = N\gamma_{yz}, \quad \gamma_{yz} = \partial u_y / \partial z + \partial u_z / \partial y \quad (5.2.69)$$

多孔材料中，固相介質在 x 、 y 和 z 方向的動力學方程式為：

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho_1 \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (u_x - U_x)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (u_x - U_x)}{\partial t} \quad (5.2.70)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho_1 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (u_y - U_y)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (u_y - U_y)}{\partial t} \quad (5.2.71)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \rho_1 \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (u_z - U_z)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (u_z - U_z)}{\partial t} \quad (5.2.72)$$

多孔材料中，流體相在三個坐標軸方向上的動力學方程式為：

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \rho_2 \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (U_x - u_x)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (U_x - u_x)}{\partial t} \quad (5.2.73)$$

$$\frac{\partial s}{\partial y} = \rho_2 \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (U_y - u_y)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (U_y - u_y)}{\partial t} \quad (5.2.74)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \rho_2 \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} + \rho_a \frac{\partial^2 (U_z - u_z)}{\partial t^2} + b \frac{\partial (U_z - u_z)}{\partial t} \quad (5.2.75)$$

式中 $\rho_1 = (1-h)\rho_s$ 為固相材料的容積密度， ρ_s 為固體介質的密度， $\rho_2 = h\rho_0$ 為流體介質的容積密度， ρ_0 為流體的密度， ρ_a 是兩者的耦合密度； b 是固相和流體相之間的黏滯耦合因數，解 (5.2.63) ~ (5.2.75) 得：

$$N\nabla^2\bar{u} + \nabla[(A+N)e_s + Q\varepsilon] = -\omega^2(\rho_{11}^*\bar{u} + \rho_{12}^*\bar{U}) \quad (5.2.76)$$

$$\nabla(Qe_s + R\varepsilon) = -\omega^2(\rho_{12}^*\bar{u} + \rho_{22}^*\bar{U}) \quad (5.2.77)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \rho_{11}^* &= \rho_{11} + b/j\omega, \quad \rho_{22}^* = \rho_{22} + b/j\omega \\ \rho_{12}^* &= \rho_{12} - b/j\omega, \quad \rho_{11} = \rho_1 + \rho_a \\ \rho_{12} &= -\rho_a, \quad \rho_a = \rho_2(\epsilon' - 1) \end{aligned} \quad (5.2.78)$$

式中 $b = j\omega\epsilon'\rho_2(\rho_c^*/\rho_0 - 1)$ ， ϵ' 為多孔介質的幾何結構因數，假設介質中孔隙為圓柱體結構，則有^[180]：

$$E_2 = E_0 \{1 + 2(\gamma - 1)T_c[\lambda_c\sqrt{-jN_{Pr}}]/(\lambda_c\sqrt{-jN_{Pr}})\}^{-1} \quad (5.2.79)$$

$$\begin{aligned} \rho_c^* &= \rho_0 \{1 - [2/(\lambda_c\sqrt{-j})]T_c[\lambda_c\sqrt{-j}]\}^{-1}, \quad E_0 = \rho_0 c_0^2 \\ \lambda_c^2 &= 8\omega\rho_0\epsilon'/h\sigma, \quad T_c[\lambda_c\sqrt{-j}] = J_1[\lambda_c\sqrt{-j}]/J_0[\lambda_c\sqrt{-j}] \end{aligned} \quad (5.2.80)$$

上式中 γ 為定壓比熱與定容比熱之比； c_0 為流體中音速； N_{Pr} 為普朗特數； σ 是流體的靜態流阻； j 為虛數單位，及 J_1 分別為零階和一階第一類 Bessel 函數。總結上述可見，參數 ρ_0 、 ρ_1 、 E_m 、 ν 、 η 、 ϵ' 、 h 和 σ 決定了多孔彈性介質的聲學特性。對方程式 (5.2.76) 及 (5.2.77) 方程式兩邊取散度分別得到：

$$\nabla^2[Pe_s + Q\varepsilon] = -\omega^2(\rho_{11}^*e_s + \rho_{12}^*\varepsilon) \quad (5.2.81)$$

$$\nabla^2(Qe_s + R\varepsilon) = -\omega^2(\rho_{12}^*e_s + \rho_{22}^*\varepsilon) \quad (5.2.82)$$

式中 $P = A + 2N$ ，因為多孔材料為各向同性，方程式 (5.2.81) 及 (5.2.82) 可表示成：

$$Q\nabla^2\varepsilon + \omega^2\rho_{12}^*\varepsilon = -P\nabla^2e_s - \omega^2\rho_{11}^*e_s \quad (5.2.83)$$

$$R\nabla^2\varepsilon + \omega^2\rho_{22}^*\varepsilon = -Q\nabla^2e_s - \omega^2\rho_{12}^*e_s \quad (5.2.84)$$

解以上兩式得：

$$\nabla^2\varepsilon = \frac{(\rho_{12}^*Q - \rho_{22}^*P)\nabla^2e_s + \omega^2[(\rho_{12}^*)^2 - \rho_{11}^*\rho_{22}^*]e_s}{(\rho_{22}^*Q - \rho_{12}^*R)} \quad (5.2.85)$$

$$\varepsilon = \frac{(PR - Q^2)\nabla^2e_s + \omega^2(\rho_{11}^*R - \rho_{12}^*Q)e_s}{\omega^2(\rho_{22}^*Q - \rho_{12}^*R)} \quad (5.2.86)$$

將 Laplacian 算符作用於 (5.2.86) 式並結合 (5.2.85) 式得：

$$\nabla^4e_s + A_1\nabla^2e_s + A_2e_s = 0 \quad (5.2.87)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } A_1 &= \omega^2(\rho_{11}^*R - 2\rho_{12}^*Q + \rho_{22}^*P)/(PR - Q^2) \\ A_2 &= \omega^4[\rho_{11}^*\rho_{22}^* - (\rho_{12}^*)^2]/(PR - Q^2) \end{aligned} \quad (5.2.88)$$

可見 (5.2.87) 表明多孔材料中存在兩種縱波，假設方程式的解具有 $e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ 結構，其中 \vec{k} 為波向量， \vec{r} 為位置向量。解方程式 (5.2.87) 可得縱波的波數為：

$$k_{1,2}^2 = (A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2})/2 \quad (5.2.89)$$

其中 k_1 、 k_2 分別為慢縱波、快縱波（通常也稱為空氣波和結構波）的波數。空氣波主要由流體的聲學參數決定，如：孔隙率、流阻等；結構波主要取決於材料的體變彈性特徵。空氣波和結構波在固相介質和流體介質中同時存在。

對方程式 (5.2.76) 及 (5.2.77) 兩邊取旋度分別得到：

$$-\omega^2(\rho_{11}^*\vec{\omega} + \rho_{12}^*\vec{\Omega}) = N\nabla^2\vec{\omega} \quad (5.2.90)$$

$$-\omega^2(\rho_{12}^*\vec{\omega} + \rho_{22}^*\vec{\Omega}) = 0 \quad (5.2.91)$$

解方程式 (5.2.90) 及 (5.2.91) 得到切變波的方程式為：

$$\nabla^2\vec{\omega} + k_t^2\vec{\omega} = 0 \quad (5.2.92)$$

式中 $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$ 為固體骨架的轉動應變， $\vec{\Omega} = \nabla \times \vec{U}$ 為孔隙中流體的轉動應變，進一步求解得切變波的波數為：

$$k_t^2 = (\omega^2 / N)[\rho_{11}^* - (\rho_{12}^*)^2 / \rho_{22}^*] \quad (5.2.93)$$

Biot 理論被廣泛認同並已應用於描述動態孔隙彈性性質的基礎理論，它不研究流體在孔隙中的微觀運動，只考慮固體和流體兩相混合體的宏觀運動。當音波或彈性波在多孔介質中傳播時，受其影響，孔隙中的流體由於與固體骨架之間存在黏滯摩擦和慣性耦合而受迫參與運動，從而引起音波傳播速度的改變、能量的耗散和振幅的衰減。可見，多孔介質的動態特徵與介質受擾動密切相關；反過來，音波在多孔介質中音傳播特性的變化又與多孔介質的動態特性相關聯。因此，真實、準確地描述多孔介質特性和音波傳播特徵變化這一相互影響、相互關聯的動態過程，認識音波在孔隙中的傳播規律比普通板結構複雜。

5.2.3.2 多孔彈性介質夾心板中的音傳播

設有一束單位振幅的平面音波以角度 θ 進入無限大多孔彈性介質，如圖 5.2-11 所示，僅考慮二維情況，入射波的速度勢函數可表示為：

$$\phi = e^{-j(k_x x + k_y y)} \quad (5.2.94)$$

式中 $k = \omega / c$, $k_x = k \sin \theta$, $k_y = k \cos \theta$, 音波在介面上同時發生折射和反射, 由 Bolton 等人的分析可得介質中固體骨架的位移和 y 方向應力分量分別為 [157] :

$$u_x = jk_x e^{-jk_x x} \left(\frac{C_1}{k_1^2} e^{-jk_{1y} y} + \frac{C_2}{k_1^2} e^{jk_{1y} y} + \frac{C_3}{k_2^2} e^{-jk_{2y} y} + \frac{C_4}{k_2^2} e^{jk_{2y} y} \right) - j \frac{k_{1y}}{k_t^2} e^{-jk_x x} (C_5 e^{-jk_{1y} y} - C_6 e^{jk_{1y} y}) \quad (5.2.95)$$

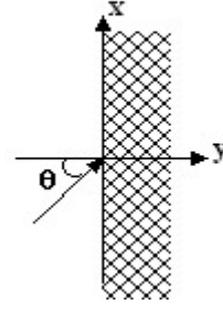


圖5.2-11 音波入射到多孔介質示意圖

$$u_y = j e^{-jk_x x} \left(\frac{k_{1y} C_1}{k_1^2} e^{-jk_{1y} y} - \frac{k_{1y} C_2}{k_1^2} e^{jk_{1y} y} + \frac{k_{2y} C_3}{k_2^2} e^{-jk_{2y} y} - \frac{k_{2y} C_4}{k_2^2} e^{jk_{2y} y} \right) - j \frac{k_x}{k_t^2} e^{-jk_x x} (C_5 e^{-jk_{1y} y} + C_6 e^{jk_{1y} y}) \quad (5.2.96)$$

$$\sigma_y = e^{-jk_x x} \left[(2N \frac{k_1^2}{k_1^2} + A + b_1 Q) (C_1 e^{-jk_{1y} y} + C_2 e^{jk_{1y} y}) + (2N \frac{k_2^2}{k_2^2} + A + b_2 Q) (C_3 e^{-jk_{2y} y} + C_4 e^{jk_{2y} y}) + 2N \frac{k_x k_{1y}}{k_t^2} (C_5 e^{-jk_{1y} y} - C_6 e^{jk_{1y} y}) \right] \quad (5.2.97)$$

$$\tau_{xy} = e^{-jk_x x} N \left[\frac{2k_x k_{1y}}{k_1^2} (C_1 e^{-jk_{1y} y} - C_2 e^{jk_{1y} y}) + \frac{2k_x k_{2y}}{k_2^2} (C_3 e^{-jk_{2y} y} - C_4 e^{jk_{2y} y}) + \frac{k_x^2 - k_{1y}^2}{k_t^2} (C_5 e^{-jk_{1y} y} + C_6 e^{jk_{1y} y}) \right] \quad (5.2.98)$$

介質中流體的位移和應力可分別寫成如下運算式：

$$U_x = jk_x e^{-jk_x x} \left(b_1 \frac{C_1}{k_1^2} e^{-jk_{1y} y} + b_1 \frac{C_2}{k_1^2} e^{jk_{1y} y} + b_2 \frac{C_3}{k_2^2} e^{-jk_{2y} y} + b_2 \frac{C_4}{k_2^2} e^{jk_{2y} y} \right) + j \frac{\rho_{12}^* k_{1y}}{\rho_{22}^* k_t^2} e^{-jk_x x} (C_5 e^{-jk_{1y} y} - C_6 e^{jk_{1y} y}) \quad (5.2.99)$$

$$U_y = j e^{-jk_x x} \left(b_1 \frac{k_{1y} C_1}{k_1^2} e^{-jk_{1y} y} - b_1 \frac{k_{1y} C_2}{k_1^2} e^{jk_{1y} y} + b_2 \frac{k_{2y} C_3}{k_2^2} e^{-jk_{2y} y} - b_2 \frac{k_{2y} C_4}{k_2^2} e^{jk_{2y} y} \right) + j \frac{\rho_{12}^* k_x}{\rho_{22}^* k_t^2} e^{-jk_x x} (C_5 e^{-jk_{1y} y} + C_6 e^{jk_{1y} y}) \quad (5.2.100)$$

$$s = e^{-jk_x x} \left[(Q + b_1 R) (C_1 e^{-jk_{1y} y} + C_2 e^{jk_{1y} y}) + (Q + b_2 R) (C_3 e^{-jk_{2y} y} + C_4 e^{jk_{2y} y}) \right] \quad (5.2.101)$$

參數 C_1 及 C_6 由多孔材料與板的耦合方式決定，通常可分為多孔材料直接固定於板上和通過空氣與板耦合兩種，如圖 5.2-12 和圖 5.2-13 所示。對於直接固定於板上的情況，設板的橫向位移為 $w_t = W_t(x)e^{j\omega t}$ ，板的中心面的位移表示為 $w_p = W_p(x)e^{j\omega t}$ ，則在板和多孔材料的分介面處的邊界條件為：

$$(i) v_y = j\omega W_t ; (ii) u_x = W_t$$

$$(iii) U_y = W_t ; (iv) u_x = W_p(-/+)\frac{h_p}{2}\frac{dW_t}{dx}$$

邊界處的運動方程式可表示為：

$$(v) (+/-)P(-/+)\sigma_p - jk_x h_p \tau_{xy} / 2 = (Dk_x^4 - \omega^2 m_s)W_t$$

$$(vi) (+/-)\tau_{xy} = (D_p k_x^2 - \omega^2 m_s)W_p$$

式中 h_p 為板的厚度， D 是板的彎曲勁度， D_p 是板的縱向勁度； $v_y = -\partial\phi/\partial y$ 為板左側介質質點速度的 y 方向分量； m_s 是板的面密度， $q_p = -\sigma_y - s$ 為多孔介質作用在板上的應力。對於多孔介質與板通過空氣層耦合的情況，板的邊界條件可表示為：

$$(i) v_{1y} = j\omega W_t ; (ii) v_{2y} = j\omega W_t$$

$$(iii) P_1 - P_2 = (Dk_x^4 - \omega^2 m_s)W_t$$

式中 P_1 、 P_2 為板左右的音壓； v_{1y} 、 v_{2y} 為板兩邊空氣介質的質點速度。

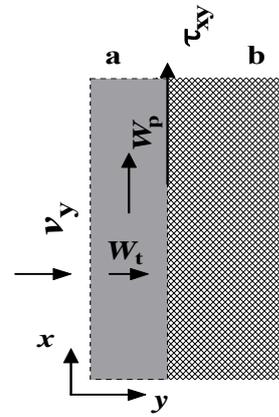


圖5.2-12 多孔彈性介質與板直接耦合

類似地多孔材料與空氣的分介面處的邊界條件表示為：

$$(i) -hP_2 = s ; (ii) -(1-h)P_2 = \sigma_y$$

$$(iii) v_y = j\omega(1-h)u_y + j\omega h U_y ; (iv) \tau_{xy} = 0$$

對於多層複合結構，應用以上邊界條件，可以通過傳遞矩陣的方式求出入射音波與透射音波之間的音壓關係，求出平面音波以 θ 角入射時的透射係數 $\tau(\theta)$ ，再對空間積分即可求得場入射時的平均透射係數^[181]，可得到平均隔音量。

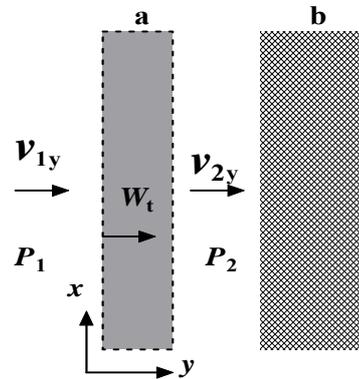


圖5.2-13 多孔介質通過空氣層與板耦合

5.2.3.3 多層複合板隔音效果的數值計算

壹、不同結構三層複合板隔音性能分析

按照多孔介質與板的耦合方式不同，對於三層板，可得到如圖 5.2-14 所示的不同結構，圖中結構 I 為板與多孔介質固定在一起；結構 II 為第三層板與多孔材料分離；結構 III 為多孔材料僅固定在中間板層上；結構 IV 為多孔材料分別固定在兩側板上；結構 V 中第二層板與多孔介質間有一空氣層。在以上結構中，用鋁板和聚氨酯泡沫進行數值計算，鋁板密度 $\rho_{Al} = 2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，楊氏模量 $E_{Al} = 7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，泊松比 $\nu_{Al} = 0.33$ ；聚氨酯泡沫密度 $\rho_p = 30 \text{ kg/m}^3$ ，楊氏模量 $E_p = 8 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，泊松比 $\nu_p = 0.4$ ；流阻 $\sigma = 2.5 \times 10^4 \text{ Nm}^{-4}$ ，結構因數 $\varepsilon' = 7.8$ ，損失因數 $\eta = 0.265$ ，孔隙率 $h = 0.9$ ，比熱容比 $\gamma = 1.4$ ，普朗特常數 $N_{pr} = 0.713$ ；空氣中音速 $c = 344 \text{ m/s}$ ，空氣密度 $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$ 。三層板的厚度分別取 $a_1 = a_3 = 1.27 \text{ mm}$ ， $a_2 = 1.0 \text{ mm}$ ；結構 III 和 IV 中每層空氣的厚度為 $l_1 = l_2 = 1.0 \text{ mm}$ ，結構 II 和 V 中空氣層的厚度為 $l = 2.0 \text{ mm}$ ；兩層泡沫的厚度均為 $b_1 = b_2 = 27.0 \text{ mm}$ ，總體的面密度為 11.18 kg/m^2 ，整個計算過程保持面密度不變。

通過數值分析，得到如圖 5.2-15 和圖 5.2-16 所示不同結構的隔音性能曲線。分析圖像可知，在同樣面密度和幾乎相等厚度的條件下，板與彈性多孔材料的不同組合方式產生的隔音效果有很大差異。結構 I 中，板和多孔材料構成一個整體，整體勁度最大，因而低頻隔音效果最好，但有利於結構傳音，且表現出明顯的吻合效應，中高頻隔音不足；結構 III 和 IV 中材料的組合方式相似，隔音性能差別較小，在低頻部分結構 IV 略顯優勢，主要是因為結構 IV 的組合方式增強了兩側板的勁度；而結構 III 中由於第二層板兩側多孔材料對稱分布，在改變板的勁度方面不及前者；結構 II 和 V 材料組合方式相似，隔音曲線在 $300 \text{ Hz} \sim 1,000 \text{ Hz}$ 頻段結構 V 比結構 II 的平均隔音量高約 5 dB ，在其他頻段兩者差別不大；但結構 III 和 IV 在整個頻帶的隔音效果明顯優於結構 II 和 V。綜合考慮全頻帶的隔音效果，結構 IV 應是較理想的隔音結構。

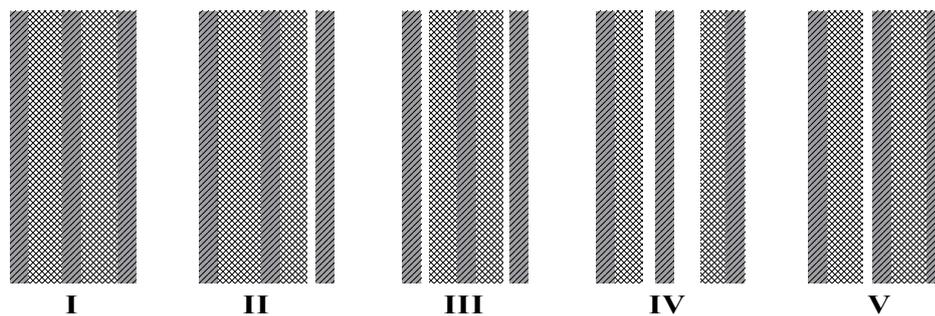


圖 5.2-14 三層板中多孔彈性材料與板組合的不同結構示意圖

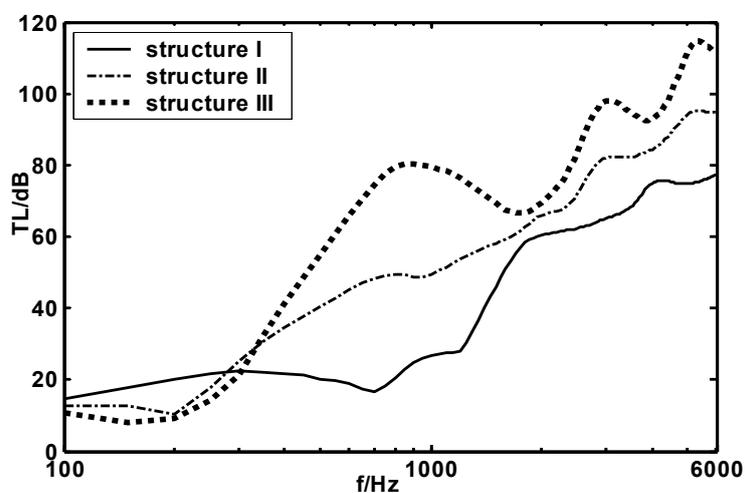


圖 5.2-15 三層板的前三種結構之隔音特性曲線

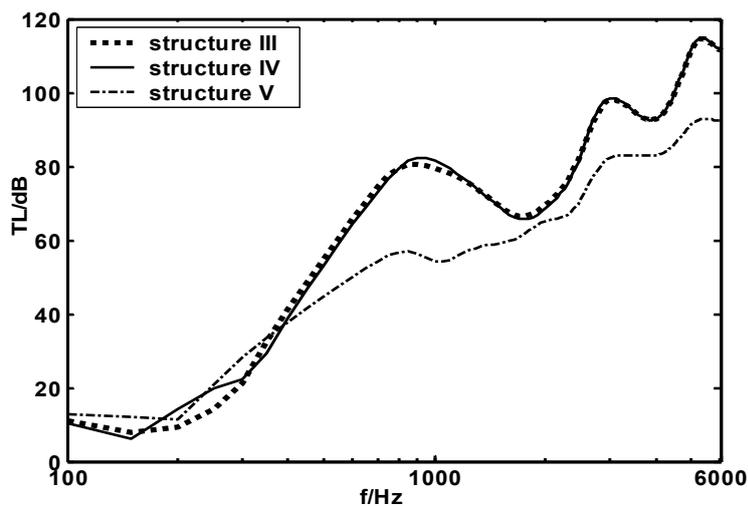


圖 5.2-16 三層板的後三種結構之隔音特性曲線

貳、調節材料參數對結構隔音性能的影響

在結構 IV 中，在保持材料整體構成不變的條件下，適當調節不同層結構的厚度，隔音性能將會隨參數的變化而發生改變。

一、保持其他參數不變，將多孔材料的厚度由原來的 $b_1 = b_2 = 27.0\text{mm}$ 調節為：

1. $b_1 = 20\text{mm}$, $b_2 = 34\text{mm}$ 。
2. $b_1 = 10\text{mm}$, $b_2 = 44\text{mm}$ 。

得到之隔音性能曲線如圖 5.2-17 所示，可見微調多孔材料層的厚度，改變結構的對稱性，能抑制較強的共振，從而使中頻段的隔音曲線變得平坦。如果使兩層泡沫的厚度相差較大，則高、低頻的隔音性能都將得到改善，曲線起伏進一步變小，但中頻隔音量降低。因而在設計時應儘量避免多孔材料對稱分布情況的出現。

二、調節三層鋁板的厚度，其他參量不作變動，將 $a_1 = a_3 = 1.27\text{mm}$ 、 $a_2 = 1.0\text{mm}$ 調整為 $a_1 = 1.74\text{mm}$ 、 $a_2 = 1.0\text{mm}$ 、 $a_3 = 0.8\text{mm}$ ，得到改變後的隔音量曲線如圖 5.2-18 所示。由圖 5.2-18 可見，改變前後結構的中、低頻隔音性能基本不變化，高頻段隔音效果略有變化。這與上一節之雙層板結構的結論一致，即板的品質相等時，高頻隔音效果最好，在具體設計中可根據要求調節以達到較理想的效果。

三、增加空腔的厚度，在保持板和多孔材料厚度不變的情況下，增加空腔的厚度，將原來的空腔厚度 $l_1 = l_2 = 1\text{mm}$ 增加為：

1. $l_1 = 5\text{mm}$, $l_2 = 10\text{mm}$ 。
2. $l_1 = l_2 = 10\text{mm}$ 。

隔音曲線的變化見圖 5.2-19 所示，從圖中可見，增加空氣層的厚度對隔音效果的改善非常不明顯，因而在這種結構中增加空氣層的厚度不是改善隔音性能的最佳選擇，應當從調節板和多孔材料分布的角度來改善隔音效果，必要時可適當增加板的層數或多孔材料的面密度，甚至改變材料的種類。

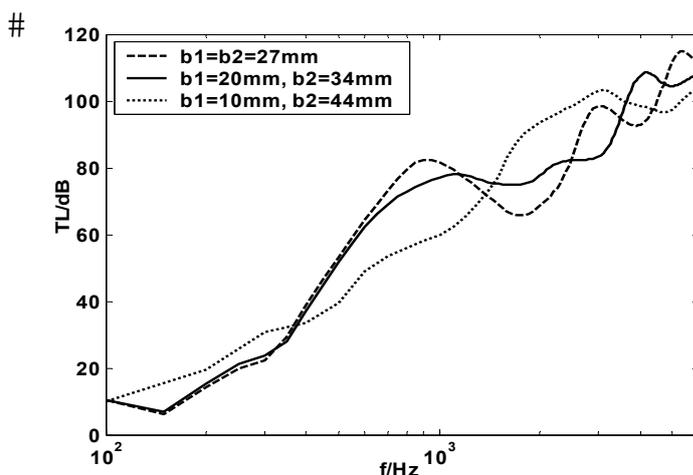


圖 5.2-17 不同泡沫厚度的隔音特性曲線

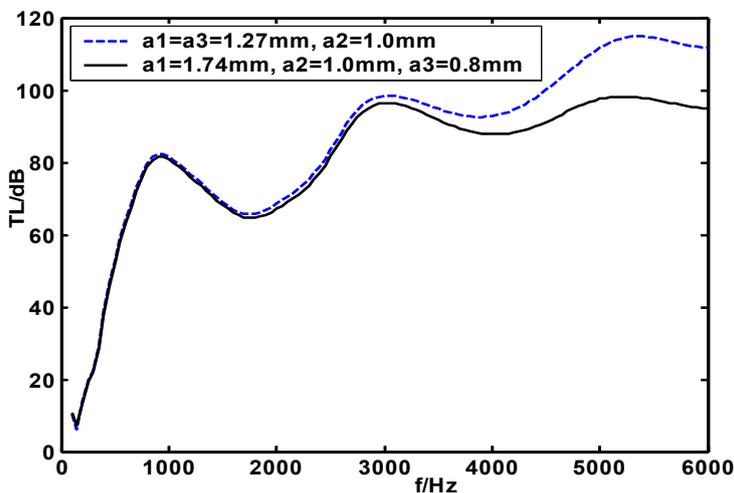


圖 5.2-18 調節板厚度後的隔音特性曲

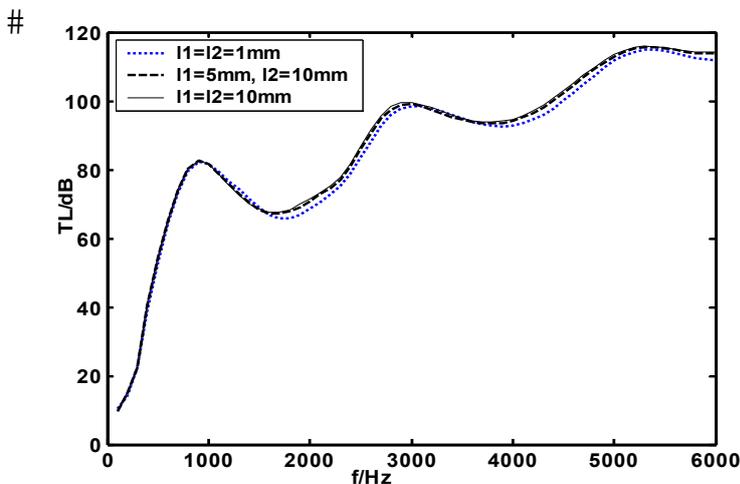


圖 5.2-19 增加空腔厚度對隔音性能的影響

5.2.3.4 複合三層板與同等條件下的複合雙層板的隔音性能比較

複合雙層板的結構如圖 5.2-20 所示，結構 BB 中多孔材料兩側都固定在板上；結構 BU 中多孔材料僅固定在一側板上；結構 UU 中多孔材料則與兩側板都不接觸。在保持整體面密度不變的條件下，假設板的厚度分別為 2.0mm 和 1.54mm，聚氨酯泡沫的厚度為 54.0mm，空氣層的總厚度為 2.0mm，其他參數不變。

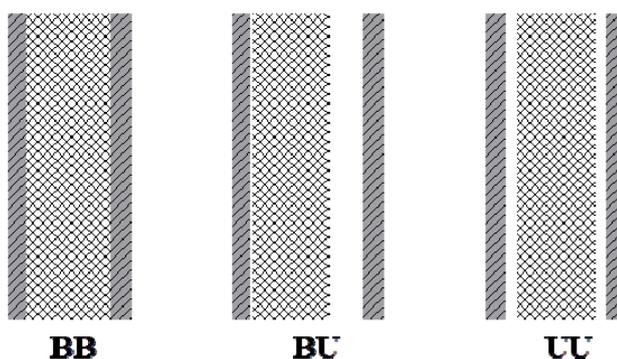


圖 5.2-20 多孔材料與雙層板的不同組合結構

數值計算結果如圖 5.2-21 所示，結論與 Bolton 等人的分析結果類似，即從整個頻段的隔音效果上看，結構 UU 是較好的選擇。比較圖 5.2-21 可見雙層夾心板的不同結構與三層夾心板的對應結構在隔音性能上有相同的趨勢，但在具體的隔音效果上有顯著差別。分析圖 5.2-22 中的兩條隔音曲線可見，三層夾心板中的最優結構 IV 比雙層夾心板中的最優結構 UU 在 400 Hz 以上有明顯的隔音優勢。圖 5.2-23 顯示三層夾心板的結構 I 比雙層夾心板的結構 BB 在 1,400 Hz 以上有明顯的隔音優勢，不過這些都是以適度犧牲中低頻的隔音效果得到的。

通過以上分析可見，在相同面密度的前提下，三層夾心板比雙層夾心板在中高頻階段有較好的隔音效果，在對低頻隔音要求不高的場合，三層夾心板有明顯優勢。從以上隔音曲線的趨勢來看，若將板的層數再細分，其結果將是高頻隔音效果更好，但低頻隔音性能更差且變差的頻率將上移。

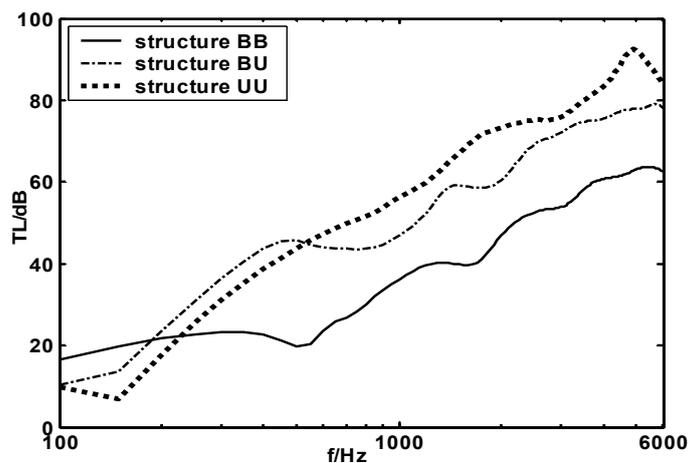


圖 5.2-21 雙層板的三種結構隔音特性曲線

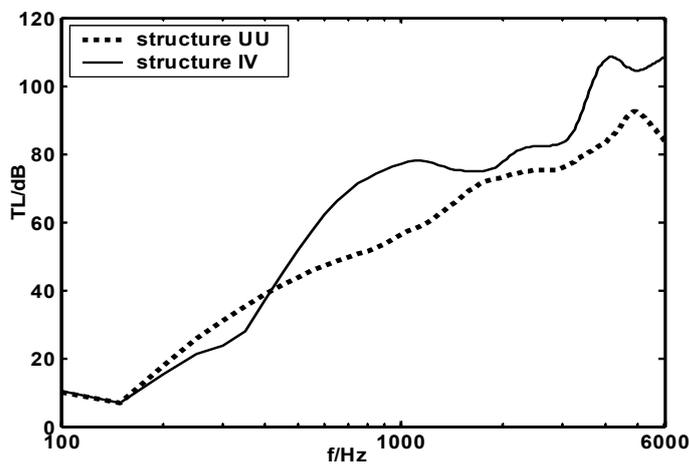


圖 5.2-22 雙層板與三層板的分離結構隔音性能曲線

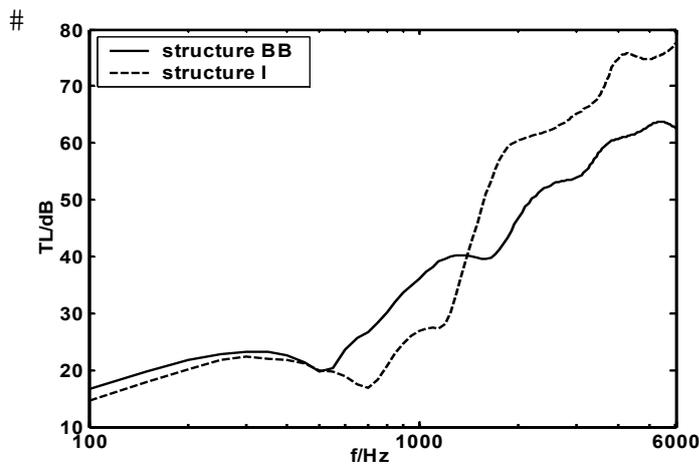


圖 5.2-23 雙層板與三層板的固定結構隔音特性比較

5.2.3.5 結論

在隔音結構的設計中，多孔彈性材料構成的雙層夾心板得到廣泛應用，與普通雙層板相比，降低了空腔共振的影響，使隔音曲線變得比較平坦，同時由於多孔材料勁度的存在，也改善了吻合效應造成的影響。

本研究提出的三層板複合結構在隔音效果上較雙層複合結構有明顯的優勢，這種優勢主要體現在中、高頻段。計算還表明，結構層數的增加能加強中、高頻的隔音效果，在必要時甚至可以採用更多層的複合結構。在多層結構中，材料的分布方式對隔音性能的影響也比較明顯；本節分析的三層結構中，第四種結構從總體上而言是隔音效果最佳的結構。在同種材料分布方式中，調節材料的厚度分布也能在一定程度上影響隔音效果。在隔音結構設計時應根據具體需求來調節材料的厚度和分布方式。多層結構帶來的負面影響是低頻隔音效果更差，實際上，低頻隔音效果差一直是被動隔音的缺陷所在。已有的研究表明，主動控制能在一定程度上彌補被動隔音的不足^{[155][182]}，這可作為今後研究的內容。

5.2.4 帶微穿孔板的多層隔音結構

在薄板上穿以大量分布規則的孔隙，就形成了穿孔板。若在板後留有適當空腔，內填吸音材料，就構成普通的穿孔板吸音結構。穿孔板吸音結構在 20 世紀中期就已經形成了完整的理論和設計方法^[183]。普通穿孔板採用共振式吸音結構，孔徑通常在幾毫米到幾釐米範圍內。在穿孔板的基礎上，若將孔徑降低到毫米量級以下，則稱為微穿孔板。微穿孔板是馬大猷在上個世紀 60 年代後期為準備在惡劣條件下應用的吸音體而提出發展的。1975 年^[184]，馬大猷首次建立了微穿孔板理論。理論研究表明，降低穿孔的孔徑可以增大微穿孔板的音阻，調節穿孔率可以該變微穿孔板的音品質抗，因而調節板的參數，就可以得到合適的音阻抗。微穿孔結構在吸音、隔音領域有著廣泛的應用，1988 年^[185]有學者研製了微穿孔透明消音通風百葉窗，現場測試具有 15 dB 的隔音量，並申請國家專利。上個世紀 90 年代，微穿孔板技術使德國議會大廈的聲聚焦問題得到了成功解決^[186]，在國際上引起了較大的反響，微穿孔板的研究也受到了國內外學者^[187~189]的廣泛重視。

近些年來，對雙層微穿孔板結構的研究也日益增多^[190, 191]，有些學者嘗試把有源控制引入到微穿孔板吸音中來^[192]，並在實驗上取得了較好的效果。微穿孔板具

有清潔、無污染、便於加工和安裝等優點，在隔音領域中，通過加裝微穿孔板，既可以增加牆的隔音，又可以降低室內的混響音，用透明微穿孔板還可以增加室內的採光能力，在一些噪音控制要求較高的場所（如：醫院的觀察室等）或要求通風性能好的場合，微穿孔板結構能有效的提高隔音，降低室內噪音。本節在普通雙層板的基礎上，將微穿孔板與雙層板結合，應用阻抗轉移矩陣的方法，研究了帶微穿孔板多層隔音結構的隔音性能。

5.2.4.1 微穿孔板基本理論

微穿孔板結構如圖 5.2-24 所示，圖中 d 為孔徑，一般在毫米量級以下； b 為孔間距； t 為薄板的厚度。微穿孔板可以看作大量微管的並聯，在孔間距離比孔徑大得多的情況下，可以認為各孔的特性互不影響。假設孔間距離比波長小得多

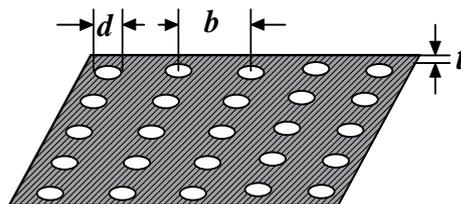


圖 5.2-24 微穿孔板結構圖

($b \ll \lambda$)，孔間板面對音波的反射也可以忽略不計，這樣可以應用 Rayleigh^[140] 對微管中的音波分析結果。引用 Crandall^[193] 的推導，把圓管中的空氣看成由大量厚度極薄的同軸圓柱層構成，每層沿軸向的運動受其慣性和與軸向速度在徑向的梯度成正比的黏滯阻力的限制，如果微觀兩端間的音壓差為 Δp ，運動方程式為：

$$\rho_0 \ddot{u} - \frac{\eta}{r_1} \frac{\partial}{\partial r_1} \left(r_1 \frac{\partial u}{\partial r_1} \right) = \frac{\Delta p}{t} \quad (5.2.102)$$

式中 ρ_0 為空氣密度； η 為空氣的黏滯係數； u 為空氣沿軸向的質點速度（其數值為徑向 r_1 的函數）； t 為管長。考慮正弦式運動，上式對時間的微分可用 $j\omega$ 乘積代入得：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial}{\partial r_1} + k^2 \right) u = -\frac{\Delta p}{\eta t} \quad (5.2.103)$$

其中 $k^2 = -j\omega\rho_0/\eta$ ，上式的解為：

$$u(r_1) = -\frac{\Delta p}{\eta k^2 t} \left[1 - \frac{J_0(kr_1)}{J_0(kr_0)} \right] \quad (5.2.104)$$

管中的平均速度為：

$$\bar{u} = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u r_1 dr_1 = -\frac{\Delta p}{\eta k^2 t} \left[1 - \frac{2}{kr_0} \frac{J_1(kr_0)}{J_0(kr_0)} \right] \quad (5.2.105)$$

J_0 及 J_1 中為 0 階及 1 階第一類 Bessel 函數，微管的音阻抗率為：

$$Z_1 = \frac{\Delta p}{\bar{u}} = j\omega\rho t \left[1 - \frac{2}{x\sqrt{-j}} \frac{J_1(x\sqrt{-j})}{J_0(x\sqrt{-j})} \right]^{-1} \quad (5.2.106)$$

式中 $x = \sqrt{\frac{\rho_0\omega}{\eta}} r_0 = \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \frac{d}{2} = \frac{\sqrt{2}r_0}{\sqrt{2\mu/\omega}}$ ， $\sqrt{\frac{2\mu}{\omega}}$ 為黏滯性附面層厚度，因而 x 為 $\sqrt{2}$ 倍

半徑與附面層厚度的比， μ 為運動黏滯係數 $\mu = \eta / \rho_0$ 。在細管和粗管的近似值分別為：

$$Z_1 \xrightarrow{x \ll 1} \frac{4}{3} j\omega\rho_0 t + \frac{32\rho_0\mu t}{d^2} \quad (5.2.107)$$

$$Z_1 \xrightarrow{x \gg 10} j\omega\rho_0 t + \frac{4\rho_0\mu t}{d} \sqrt{\frac{\omega}{2\mu}} (1+j) \quad (5.2.108)$$

Z_1 的實數部分是音阻率 R_1 ，虛數部分是音抗率 ωM_1 （ M_1 是音品質率），微穿孔板的 x 約在 1 到 10 之間。在 x 小時，趨近於式 (5.2.107)；在 x 大時，趨近於式 (5.2.108)，可得：

$$Z_1 = \frac{32\rho_0\mu t}{d^2} \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + j\omega\rho_0 t \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \frac{x^2}{2}}} \right) \quad (5.2.109)$$

將此值與準確值 (5.2.106) 式比較，二者最大誤差為 6%。上式適合於任何 x 值，但 x 值不能太大，在管中出現橫波時，上式就不適用了。

當管長不比管徑大得多時，就需要加上末端修正，音品質的末端修正值是由末端的音輻射而來的，使有效管長增加。音阻的末端改正是由於空氣出入微管時有一部分沿障板流動，因而產生摩擦所致，對於兩端外都是無窮平面障板時，音阻率增加，音阻^[194]增加量為 $\sqrt{2\omega\rho_0\eta}/2$ ，音抗補償為 $0.85\omega\rho_0 d$ ，這兩部分都應在 (5.2.109) 式中得到體現。穿孔板的相對音阻抗為：

$$z = \frac{Z_1}{p\rho_0 c_0} = r + j\omega m \quad (5.2.110)$$

$$r = \frac{32\mu}{pc_0} \frac{t}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}xd}{32t} \right), m = \frac{t}{pc_0} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \frac{x^2}{2}}} + 0.85 \frac{d}{t} \right) \quad (5.2.111)$$

當取 $c_0 = 340\text{m/s}$ ； $\mu = 1.56 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ； d 及 t 的單位用毫米表示；穿孔率的百分比 $p = [100\pi(d/2)^2/b^2]\% = (78.5d^2/b^2)\%$ 時，上式可寫成：

$$r = \frac{0.147t}{d^2 p} k_r, \quad m = 0.294 \times 10^{-3} \frac{t}{p} k_m \quad (5.2.112)$$

其中音阻常數和音品質常數分別為：

$$k_r = \sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}xd}{32t}, \quad k_m = 1 + 1/\sqrt{3^2 + x^2/2} + 0.85 \frac{d}{t}$$

$$x = \sqrt{\frac{\omega}{\mu}} \frac{d}{2} = d \sqrt{\frac{f}{10}} = 0.316d\sqrt{f} \quad (5.2.113)$$

以上結果僅限於非金屬板或熱傳導係數非常小的情況，對於金屬板或熱傳導係數較大的情況，應計及熱傳導的影響。Crandall 曾作過詳細的討論^[193]，對於熱傳導係數非常小的情況，空氣的壓縮是絕熱過程，在金屬管中，接近管壁的空气保持恒溫，若管道非常細，則整個管內的空氣處於恒溫狀態。熱量的傳導代表能量的損失，管內的阻尼增大，阻尼增大相當於將以上結果中運動黏滯係數的值 μ 修改為 $\mu + \nu$ ， ν 為空氣的溫度傳導係數（溫度梯度為 $1^\circ\text{C}/\text{m}$ 時，單位時間單位厚度空氣溫度的增加量），數值為 $2 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ，將 μ 與 ν 相加求和得 $\mu' = 3.56 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ，所以對於金屬微穿孔板有：

$$r = \frac{0.335}{d^2} \frac{t}{p} k, \quad m = 0.294 \times 10^{-3} \frac{t}{p} k_m, \quad x = 0.21d\sqrt{f} \quad (5.2.114)$$

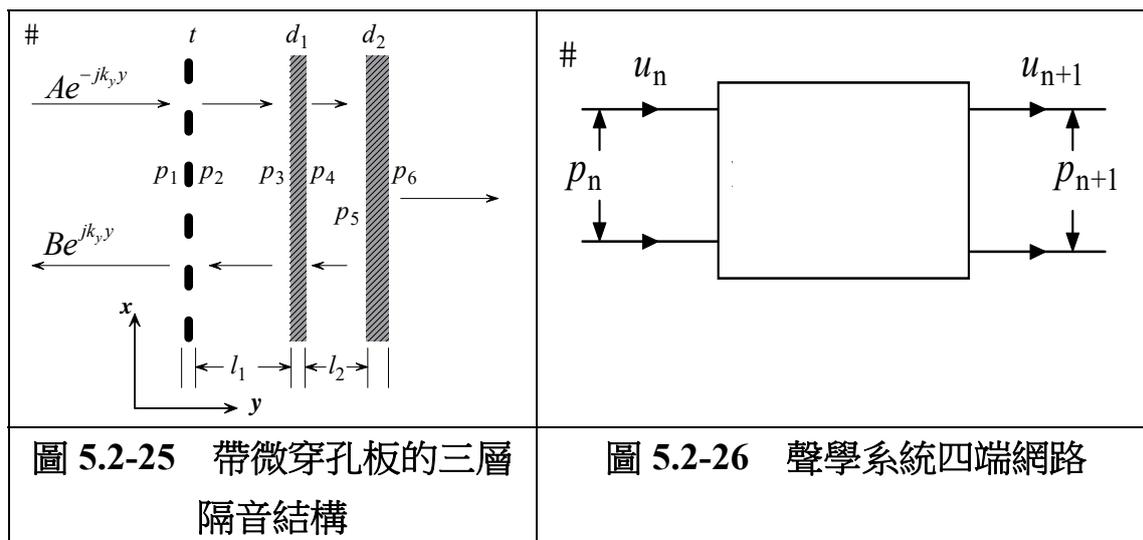
5.2.4.2 帶微穿孔板的三層隔音結構研究

雙層板的隔音特性已有過大量的理論研究，並已得到成熟的理論，若不考慮板的阻尼，則雙層板結構主要是靠反射音波而達到隔音之目的。在雙層板前放置微穿孔吸音板，可以增加隔音效果，同時使室內的噪音下降，在一些特殊要求的場合下有明顯優勢，可以替代彈性和柔性多孔吸音材料。本節將研究這種結構的隔音性能，旨在探索這種結構的一般規律。

帶微穿孔板的三層隔音結構如圖 5.2-25 所示。平面音波從左側以角度 θ 進入微穿孔板，不考慮時間項 $e^{j\omega t}$ ，考慮板材料的勁度，不考慮後兩層板的阻尼，音波在左側 y 方向的音壓表示為：

$$p_1 = Ae^{-jk_y y} + Be^{jk_y y} \quad (5.2.115)$$

音波在不同介質中的反射和折射關係用阻抗轉移矩陣來表示，可以等效為四端網路如圖 5.2-26 所示，由圖 5.2-26 得到四端網路的音壓和速度關係為：



$$\begin{pmatrix} p_n \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{n+1} \\ u_{n+1} \end{pmatrix} \quad (5.2.116)$$

對於圖 5.2-25 系統，音壓和質點速度關係可表示為：

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_0 c_0 z_{mp} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \mathbf{E}_1 \begin{pmatrix} p_2 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (5.2.117)$$

$$\begin{pmatrix} p_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_y l_1 & j\rho_0 c_0 \sin k_y l_1 / \cos \theta \\ j \cos \theta \sin k_y l_1 / \rho_0 c_0 & \cos k_y l_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ u_3 \end{pmatrix} = \mathbf{E}_2 \begin{pmatrix} p_3 \\ u_3 \end{pmatrix} \quad (5.2.118)$$

同理可得 $\begin{pmatrix} p_3 \\ u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_0 c_0 z_{p1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_4 \\ u_4 \end{pmatrix} = \mathbf{E}_3 \begin{pmatrix} p_4 \\ u_4 \end{pmatrix} \quad (5.2.119)$

$$\begin{pmatrix} p_4 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_y l_2 & j\rho_0 c_0 \sin k_y l_2 / \cos \theta \\ j \cos \theta \sin k_y l_2 / \rho_0 c_0 & \cos k_y l_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_5 \\ u_5 \end{pmatrix} = \mathbf{E}_4 \begin{pmatrix} p_5 \\ u_5 \end{pmatrix} \quad (5.2.120)$$

$$\begin{pmatrix} p_5 \\ u_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_0 c_0 z_{p2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_6 \\ u_6 \end{pmatrix} \quad (5.2.121)$$

式中 $k_x = k \sin \theta$ 及 $k_y = k \cos \theta$ 分別為波向量 k 在 x 及 y 方向上的分量

令 $\begin{pmatrix} p_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} p_6 \\ u_6 \end{pmatrix}$ ，其中 $\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}$ ，則 \mathbf{T} 可以表示為：

$$\mathbf{T} = \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \mathbf{E}_3 \mathbf{E}_4 \quad (5.2.122)$$

上式中 $\rho_0 c_0$ 為空氣的特性阻抗； t 、 d_1 及 d_2 分別為微穿孔板、第一層板及第二

層板的厚度； l_1 及 l_2 分別為第一、二層空腔的深度； z_{mp} 、 z_{p1} 及 z_{p2} 分別為微穿孔板、第一、二層板的相對音阻抗，其運算式分別為：

$$z_{mp} = r + j\omega m \quad (5.2.123)$$

由於微穿孔板本身所謂「局部作用」結構，即其中的空氣振動只能沿法線方向（微穿孔的軸向），因而法向相對音阻是不隨音入射方向而變的。對於非金屬材料和金屬材料， r 及 m 的值分別由（5.2.112）和（5.2.114）決定。板的相對音阻抗分別為：

$$z_{p1} = (j\omega m_{s1} - j \frac{D_1 k^4 \sin^4 \theta}{\omega}) / \rho_0 c_0, \quad D_1 = \frac{E d_1^3}{12(1-\sigma^2)}$$

$$z_{p2} = (j\omega m_{s2} - j \frac{D_2 k^4 \sin^4 \theta}{\omega}) / \rho_0 c_0, \quad D_2 = \frac{E d_2^3}{12(1-\sigma^2)} \quad (5.2.124)$$

m_{s1} 及 m_{s2} 分別為後兩層板的面密度； D_1 及 D_2 為板的彎曲勁度； E 為板的楊氏模量； σ 為板的泊松比。假設微穿孔板所在位置為座標原點，則有：

$$\begin{pmatrix} A+B \\ \frac{(A-B)\cos\theta}{\rho_0 c_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_6 \\ u_6 \end{pmatrix}, \quad p_6 = \rho_0 c_0 u_6 / \cos\theta \quad (5.2.125)$$

解得：

$$A = \frac{1}{2} \left(T_{11} + \frac{T_{12} \cos\theta}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} / \cos\theta + T_{22} \right) p_6 \quad (5.2.126)$$

$$R(\theta) = \left| \frac{B}{A} \right|^2 = \left| \frac{\rho_0 c_0 T_{11} / \cos\theta + T_{12} - T_{21} \rho_0^2 c_0^2 / \cos^2\theta - \rho_0 c_0 T_{22} / \cos\theta}{\rho_0 c_0 T_{11} / \cos\theta + T_{12} + T_{21} \rho_0^2 c_0^2 / \cos^2\theta + \rho_0 c_0 T_{22} / \cos\theta} \right|^2 \quad (5.2.127)$$

$$\tau(\theta) = \left| \frac{p_t}{p_i} \right|^2 = 4 \left| T_{11} + \frac{T_{12} \cos\theta}{\rho_0 c_0} + \rho_0 c_0 T_{21} / \cos\theta + T_{22} \right|^{-2} \quad (5.2.128)$$

對於音波無規入射情況，應就 θ 在 $0 \sim \pi/2$ 內積分求音強透射係數的平均值，即：

$$\bar{\tau} = \int_0^{\pi/2} \tau(\theta) \sin 2\theta d\theta \quad (5.2.129)$$

此時結構的隔音量為：

$$TL = -10 \log_{10} \bar{\tau} \quad (5.2.130)$$

若將微穿孔板層換成同厚度的板層，則得到了普通三層板結構，這時只需將上述的阻抗轉移矩陣 \mathbf{E}_1 中的 z_{mp} 改寫成：

$$z'_{mp} = (j\omega\rho_l t - j\frac{D_l k^4 \sin^4 \theta}{\omega}) / \rho_0 c_0, \quad D_l = \frac{E_0 t^3}{12(1-\sigma_0^2)} \quad (5.2.131)$$

式中 ρ_l 為替代層的密度； E_0 及 σ_0 為替代層的楊氏模量和泊松比，這樣就可以將帶微穿孔板的三層結構與同條件下的普通三層板結構的隔音性能相比較。

5.2.4.3 帶微穿孔板的三層結構隔音性能分析

在圖 5.2-25 中，微穿孔板和隔音板都採用鋁板。微穿孔板的孔徑 $d = 0.1\text{mm}$ ，微穿孔板的厚度 $t = 0.1\text{mm}$ ，穿孔率 $p = 0.94$ ；隔音鋁板的厚度分別為 $d_1 = 1\text{mm}$ 和 $d_2 = 2\text{mm}$ ，兩層空腔的深度為 $l_1 = 80\text{mm}$ ， $l_2 = 10\text{mm}$ ；空氣密度和空氣中音速分別為 $\rho_0 = 1.21\text{kg/m}^3$ 、 $c_0 = 344\text{m/s}$ ；鋁板密度 $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ；鋁板楊氏模量 $E = 7 \times 10^{10} \text{Pa}$ ；泊松比 $\sigma = 0.33$ 。為了比較圖 5.2-25 結構的隔音性能，將微穿孔板換成同厚度的鋁板，其他條件不變得到對比的隔音曲線和結構的音強反射係數如圖 5.2-27 和圖 5.2-28 所示。

分析圖 5.2-27 可見，帶微穿孔板的三層隔音結構與同等條件下的三層板相比，在 4,200 Hz 以下的隔音效果比三層板結構優越，一定程度上改善了被動隔音結構低頻隔音較差的問題，且曲線的波動幅度較小。雖然在高頻段隔音性能有所降低，但已經能滿足一般的隔音要求。

從圖 5.2-28 中可以看出，微穿孔結構的音強反射係數比三層板結構的音強反射係數有大幅度下降，這是因為微穿孔板結構有阻性吸音存在，消耗掉部分音能量，微穿孔板與空氣組成的抗性共振吸音結構也能吸收部分音能，這樣就降低了入射端室內的噪音量。相比較而言，三層板結構的隔音原理主要是利用板與空氣層的阻抗相差較大，將絕大部分音能量反射回來而達到隔音之目的，雖然達到了隔音之目的，但會使入射端室內的混響音場增強，導致室內音壓增大。因而這種吸音—隔音結構一方面可以改善中低頻隔音效果，同時可以降低室內的混響音場，在一些特定的場合有其顯著的優勢。

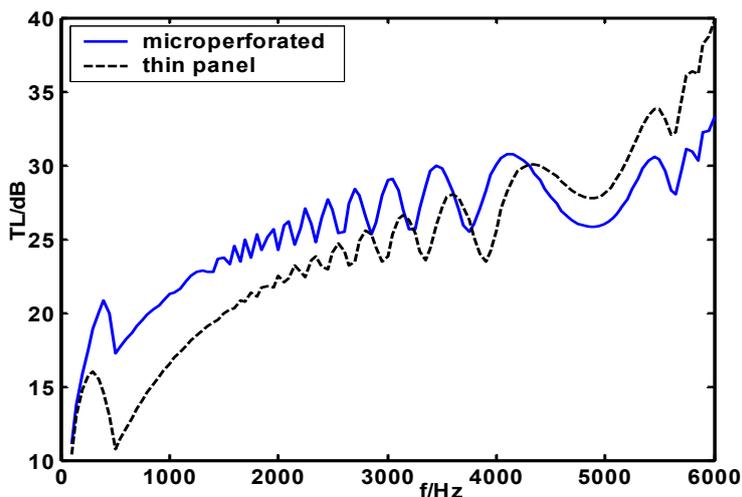


圖 5.2-27 微穿孔板與三層板結構的隔音性能比較圖

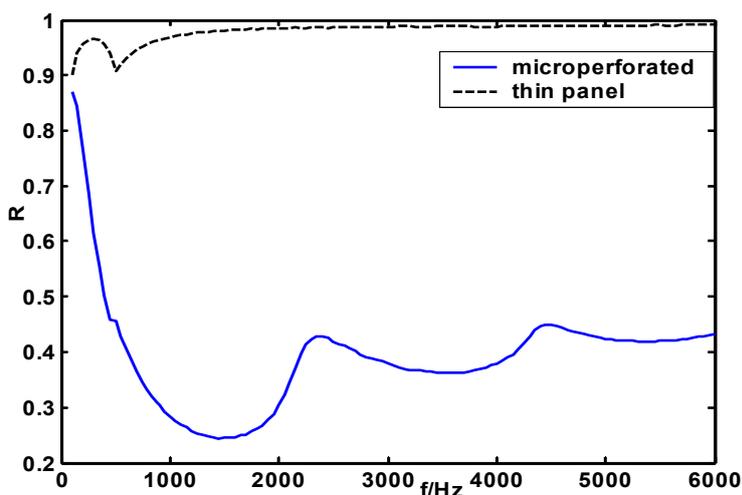


圖 5.2-28 微穿孔板與三層板結構的音強反射係數比較圖

5.2.4.4 微穿孔板參數對隔音性能的影響

為了觀測微穿孔板參數改變對隔音結構的影響，這裡將分別改變微穿孔板參數及板後空腔的深度，總結隔音性能變化和的一般規律。

壹、改變微穿孔板的穿孔率

保持結構的其他參數不變，改變微穿孔板的穿孔率，將 $p = 0.94$ 調整為

$p = 3.94$ ，得到如圖 5.2-29 及圖 5.2-30 所示的隔音曲線和音強反射係數曲線。從圖上可以看出，增大穿孔率一方面會使結構的隔音性能下降，另一方面室內的反射音能量增加，因而增大穿孔率從隔音和吸音角度都會產生負面影響。但如前文所述，不是穿孔率越小越好，當不滿足孔間距比波長小得多時，孔間板面對音波的反射就不能忽略，因而超出了本研究理論的適用範圍。可見，在理論允許的範圍內，減小穿孔率有利於提高隔音效果同時降低室內的音壓。

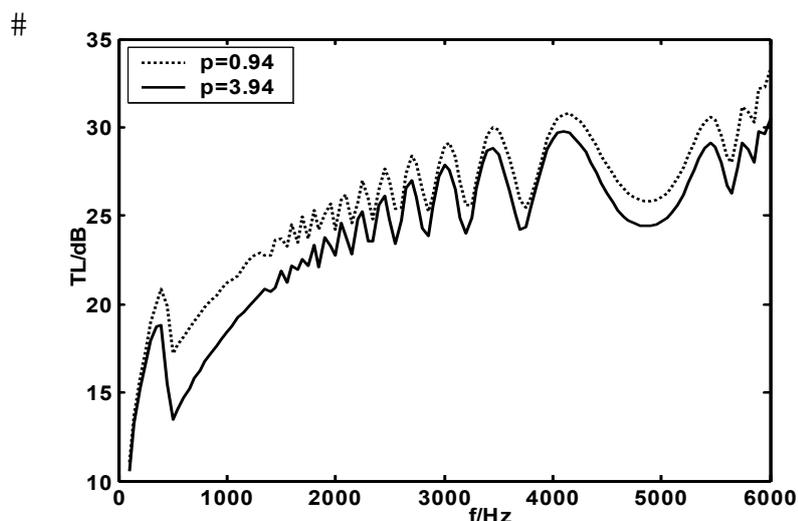


圖 5.2-29 改變微穿孔板的穿孔率對隔音性能的影響

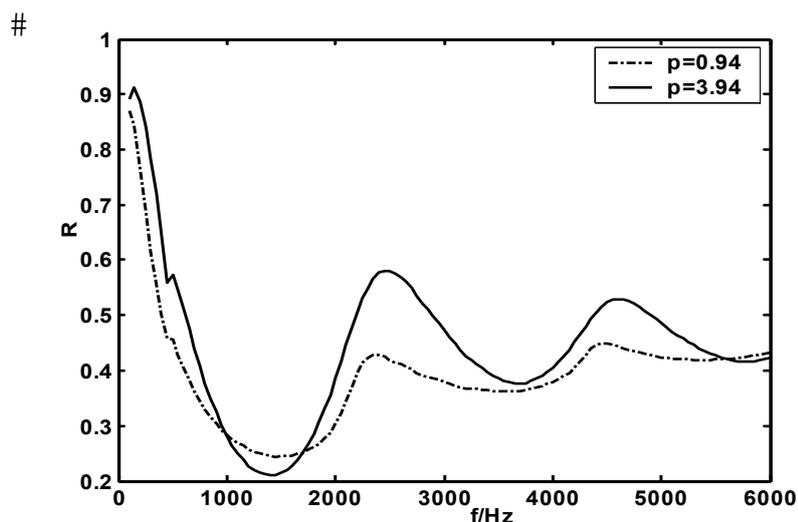


圖 5.2-30 改變微穿孔板的穿孔率對音速反射係數的影響

貳、改變微穿孔板的孔徑

微穿孔板的孔徑也是表示微穿孔板性能的重要參數之一。增大板的孔徑，將孔徑由原來的 $d = 0.1\text{mm}$ 改變為 $d = 0.3\text{mm}$ ，改變後的隔音性能曲線及音強反射係數如圖 5.2-31 及圖 5.2-32 所示。可見孔徑增大，結構的隔音效果變差，隔音曲線隨頻率的變化起伏明顯，同時微穿孔板和空腔組成的共振結構吸音效果降低，因而音強反射係數上升，入射端室內的音壓增大。無論從隔音還是吸音角度來看，孔徑均不宜太大。

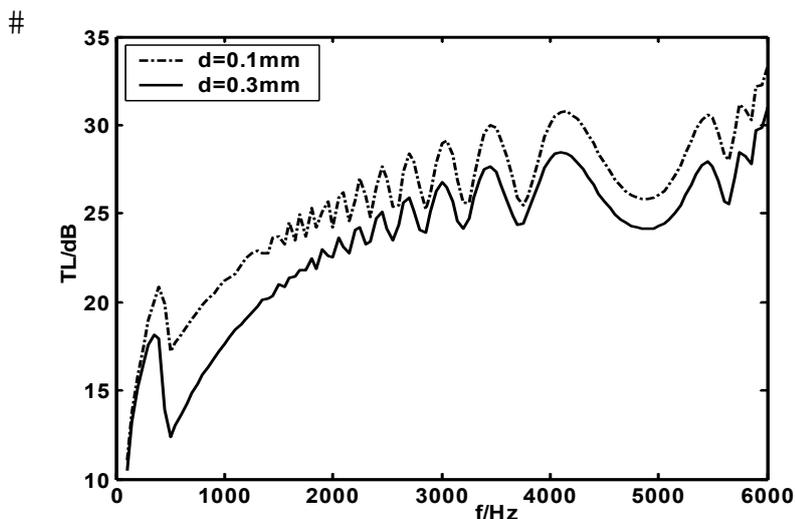


圖 5.2-31 改變微穿孔板的孔徑對隔音性能的影響

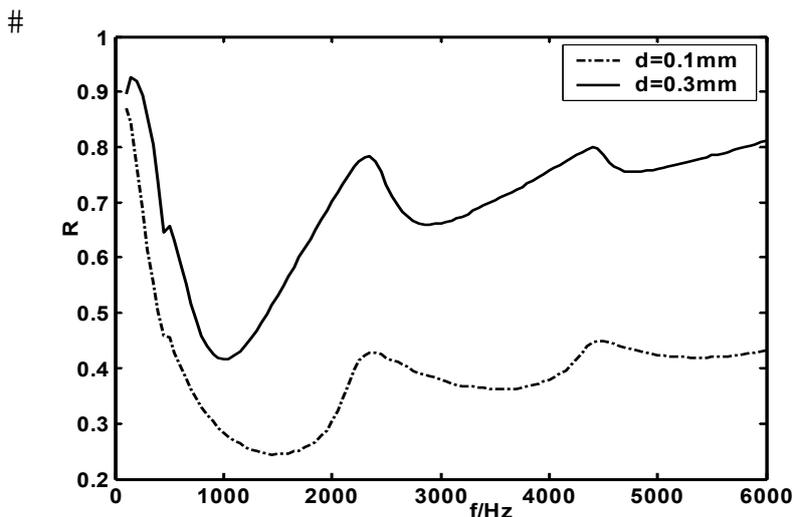


圖 5.2-32 改變微穿孔板的孔徑對音壓反射係數的影響

參、改變微穿孔板後的空腔深度

調節微穿孔板後空腔的深度，改變後的隔音曲線和音強反射係數如圖 5.2-33 及圖 5.2-34 所示。從隔音曲線上看出，改變空腔的深度對隔音性能的影響甚微，當深度減小時，整個頻帶的隔音性能稍有降低，隔音曲線形狀基本相似。但從圖 5.2-34 可以看出，腔的深度明顯影響到共振吸音的效果，因而也就顯著改變了音強反射係數，腔的深度減小，共振吸收峰上移，中、低頻段的音強反射係數明顯增大，使入射端室內的混響音場增強。

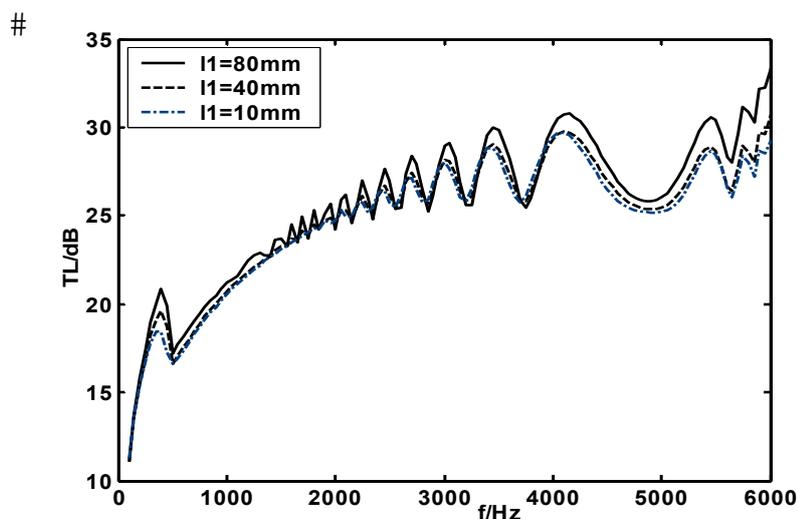


圖 5.2-33 改變微穿孔板後腔的深度對隔音性能的影響

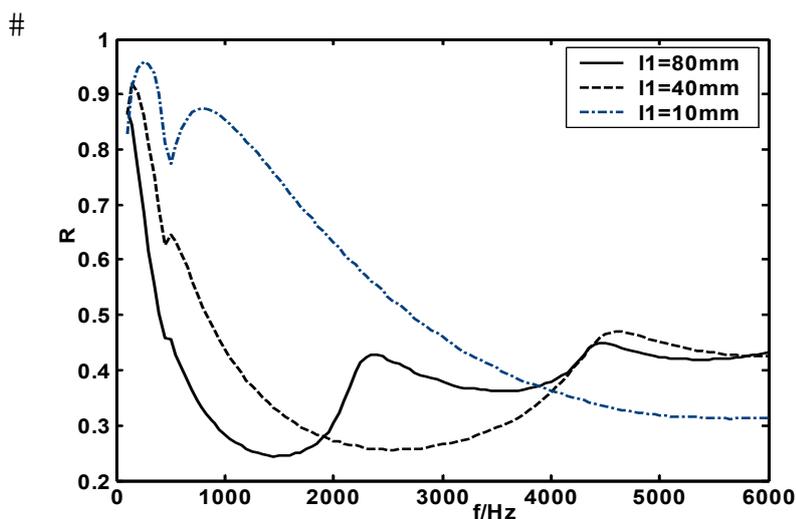


圖 5.2-34 改變微穿孔板後腔的深度對音強反射係數的影響

5.2.4.5 結論

總結以上分析結果，可見帶微穿孔板的隔音結構不僅具有很好的隔音效果，還具有良好的吸音效果，微穿孔板的參數對隔音效果和音強反射係數有明顯的影響。在理論模型允許的範圍內（孔間距遠小於音波波長），減小穿孔率或減小穿孔板的孔徑時隔音效果將得到改善，同時音強反射係數也會降低，吸音能力增強。改變微穿孔板後空腔的深度對隔音性能不會產生明顯的影響，但隨著腔深度的增加，音強反射係數減小，吸音效果較好。

5.2.5 多層隔音結構的實驗研究

通過前幾節的理論分析，可見不同多層隔音結構有著各自的特點及應用場合。為了驗證理論分析結果，本節從實驗角度對多層輕薄隔音結構進行測試，進一步研究多層輕薄隔音結構的規律。

5.2.5.1 實驗原理及實驗系統描述

實驗室測量方法的隔音測量系統如圖 5.1-1 所示，隔音構件兩側均為混響室，在雙層隔牆之腔內填充吸音材料。假設音源室、接收室音壓有效值分別為 p_i 、 p_r ；隔音構件面積為 S_i ；接收室總面積、房間常數、房間體積及平均吸音係數分別為 S 、 R_2 、 V 及 $\bar{\alpha}$ ；透過隔音構件的音能量為 W_i ；入射到隔音構件的音強為 I_i ；隔音構件的透射係數為 τ ；空氣密度及空氣中音速為分別為 ρ 及 c ，則透射的音功率為^[140]：

$$W_i = I_i S_i \tau = \frac{p_i^2 S_i \tau}{4\rho c} \quad (5.1.1)$$

接收室內的音能量密度可寫成：

$$\varepsilon_r = \frac{4W_i}{R_2 c}, \quad \varepsilon_r = \frac{p_r^2}{\rho c^2} \quad (5.1.2)$$

因而有：

$$p_r^2 = \frac{4W_i \rho c}{R_2} = \frac{p_i^2 S_i \tau}{4\rho c} \frac{4\rho c}{R_2} = \frac{p_i^2 S_i \tau}{R_2} \quad (5.1.3)$$

$$R_2 = \frac{S \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (5.1.4)$$

噪音衰減量為：

$$NR = 10 \lg \frac{p_i^2}{p_r^2} = TL - 10 \lg \frac{S_i(1-\bar{\alpha})}{S\bar{\alpha}} \quad (5.1.5)$$

$\bar{\alpha}$ 為接收室的平均吸音係數，在混響室中， $\bar{\alpha}$ 小於 0.1，所以 $S\bar{\alpha}/S_i(1-\bar{\alpha})$ 可以近似寫成 $S\bar{\alpha}$ ，得到隔音量的表達式為：

$$TL = NR + 10 \lg(S_i/S\bar{\alpha}) = NR + 10 \lg(S/A) \quad (5.1.6)$$

式中 $A = S\bar{\alpha}$ 為接收室的總吸音量。

$$A = \frac{0.163V}{T_{60}} \quad (5.1.7)$$



圖 5.2-35 隔音構件安裝實物圖



圖 5.2-36 隔音測量系統

接收室體積為 181.8m^3 ，實驗試件選用鋁板和聚氨酯海綿組合而成的多層結構，實驗裝置實物圖如圖 5.2-35 所示。在隔音室的隔牆上離地面 1.0m 處開 $1.06\text{m} \times 0.96\text{m}$ 的矩形視窗，視窗邊框選用 3.0cm 厚硬質橡膠板，橡膠板寬度 30.0cm，面密度為 59.0 kg/m^2 ，用膨脹螺釘將橡膠板沿窗四周固定，邊緣塗上玻璃膠以保證結構的密封性能。雙層牆的單層牆體厚度均為 38.2cm，雙層牆中間空腔厚度為 9.6cm，空腔中用寬度為 0.6m、厚度 11.0cm 的吸音玻璃棉將窗四周填充，再用厚度為 1.0cm 的橡膠板彎成弧形將空腔與外界隔離，降低結構傳音和側向傳音對實驗的影響。所有孔隙用玻璃膠填塗，鋁板通過厚度 1.0cm 的方形彈性橡膠密封條與方形木線條接觸，木線條用鐵釘固定在橡膠板邊框上，彈性橡膠密封條用雙面膠粘貼於橡膠邊框上。這樣能保證結構的密封效果，又能使鋁板的邊界可以近似為自由邊界。實驗中四層鋁板的厚度分別為 1.72mm、1.08mm、1.08mm 及 0.74mm，鋁板大小為 $0.90\text{m} \times 1.00\text{m}$ ，密度為 $2,700 \text{ kg/m}^3$ 。彈性多孔材料為廣東米格百利公

司的聚氨酯海綿，厚度為 3.0cm，大小為 0.88m×0.98m，面密度為 0.97 kg/m²，穿孔率 91%。實驗資料獲取系統為丹麥 B&K 公司 Pulse3560D 多通道分析儀系統與個人電腦組合，資料分析軟體為 Pulse3560D 配套資料獲取分析軟體 Brüel & Kjær PULSE Type 7700，麥克風為丹麥 B&K 公司生產的型號為 4190L 型自由場麥克風。擴音系統為美國 LAX 公司 MA3200 功率放大器，噪音源選用白噪音。測量裝置如圖 5.2-36 所示，測量頻率範圍為 100 Hz～6,300 Hz，採用 1/3 八音階頻帶濾波器。混響時間和隔音量的測量參照中國大陸國家標準「建築隔音測量規範 GBJ75-84」和「混響室法吸音係數測量規範 GBJ47-83」。對於每個隔音構件，分別將音源室和接收室的測試麥克風，選取室內高低不同的 5 個測試點進行測量，每個測試點測量 3 次，將測得的結果取平均值作為音源室和接收室的平均噪音量。

5.2.5.2 不同多層結構隔音效果的實驗研究

壹、週期結構的多層板的隔音性能實驗比較

將四層鋁板按照不同的組合方式重疊構成 1 層～4 層隔音結構，保持中間空氣層的厚度為 14.0cm，鋁板組合時用透明膠布繞邊緣一周密封並使鋁板緊密接觸，組合後各結構參數如下。

一、單層結構：中間沒有空氣層，四層鋁板重疊總厚度為 $d = 4.62\text{mm}$ 。

二、雙層結構：中間空腔厚度 $l = 14.0\text{cm}$ ，單層鋁板厚度為厚度 $d_1 = 1.72\text{mm}$ ，三層組合鋁板厚度 $d_2 = 2.90\text{mm}$ 。

三、三層結構：空氣層和厚度分別為 $l_1 = 6.6\text{cm}$ ， $l_2 = 7.4\text{cm}$ ；單層鋁板厚度為 $d_1 = 1.72\text{mm}$ ， $d_2 = 1.08\text{mm}$ ；雙層鋁板重疊厚度為 $d_3 = 1.82\text{mm}$ 。

四、四層結構：空氣層厚度分別為 $l_1 = 6.6\text{cm}$ 、 $l_2 = 3.2\text{cm}$ 、 $l_3 = 4.2\text{cm}$ ；四層鋁板厚度分別為 $d_1 = 1.72\text{mm}$ 、 $d_2 = 1.08\text{mm}$ 、 $d_3 = 1.08\text{mm}$ 、 $d_4 = 0.74\text{mm}$ 。

實驗測得這四種結構的隔音性能如圖 5.2-37 所示。從圖上可見，單層結構在低頻段隔音效果較好，曲線起伏較小，在中高頻段出現了吻合效應導致出現隔音低谷，由於單層結構比多層結構少了 14.0cm 的空氣層，在 400 Hz 以上隔音效果明顯不如多層結構。對於多層結構，隨著層數增加，低頻隔音效果變差，高頻隔音性能提高，曲線上出現了明顯的空腔共振低谷。對於週期性多層隔音結構，實驗結果得到的規律與理論分析得到的結論基本相符。

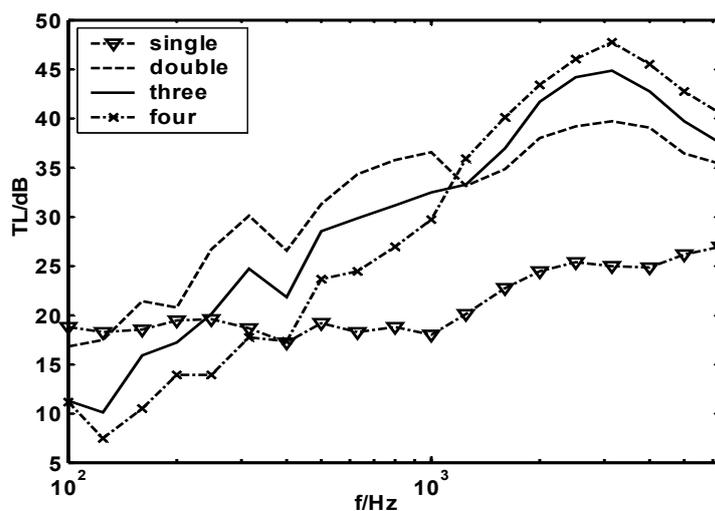


圖 5.2-37 週期結構多層板隔音性能的實驗比較

貳、雙層夾心板的不同結構隔音性能比較

針對 5.2.3 節分析的雙層板的三種結構，保持鋁板厚度和數量不變，添加厚度為 6.0cm 的聚氨酯海綿，調節結構和材料的布放，實驗參數的選取如下：

一、雙層兩邊固定結構（BB 結構），鋁板厚度 $d_1 = 1.72\text{mm}$ ， $d_2 = 2.90\text{mm}$ ，海綿厚度 $l_p = 6.0\text{cm}$

二、雙層單邊固定結構（BU 結構），海綿層固定在 1.72mm 厚的鋁板上，空腔深度為 $l = 8.0\text{cm}$ ，其他參數同（一）中所述。

三、雙層兩邊均不固定結構（UU 結構），海綿與 1.72mm 厚鋁板和 2.90mm 厚鋁板間的空氣層厚度分別為 $l_1 = 3.6\text{cm}$ ， $l_2 = 4.4\text{cm}$ ，其他參數保持不變。

實驗得到不同雙層結構夾心板的隔音性能見圖 5.2-38，分析可知，單邊固定結構的隔音性能在低頻段比兩邊都不固定結構的隔音效果好，而在高頻段比兩邊固定結構的隔音效果好，對於兩邊都固定的結構，由於少了 8.0cm 厚度的空氣層，因而對隔音效果有影響，在低頻段的影響更明顯。資料反映的隔音規律符合理論計算的規律。即單邊固定隔音結構在低頻段減小了結構共振的影響，在中高頻段降低了吻合效應造成的影響，能兼顧高、低頻的隔音效果，在雙層夾心結構中屬於最佳隔音結構。

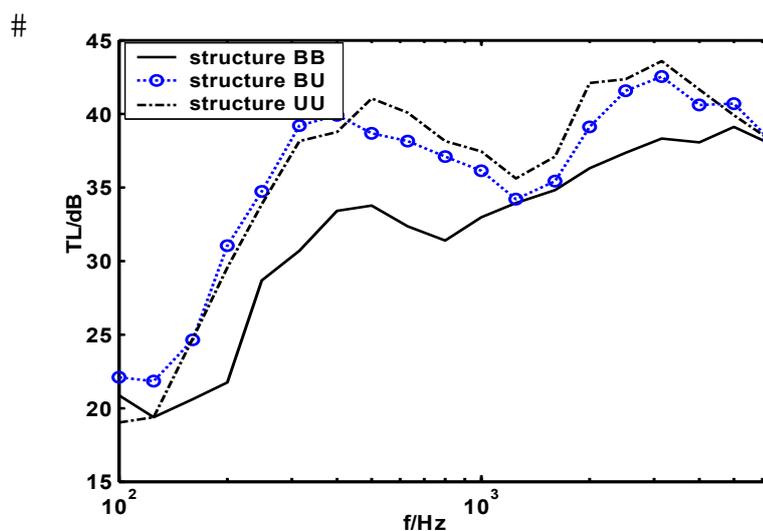


圖 5.2-38 雙層夾心板隔音性能的實驗結果

參、三層夾心板結構隔音性能分析

在 5.2.3 節中，從理論上分析了五種不同結構三層夾心板的隔音特點，實驗中就五種不同結構的隔音進行了測試，三層板的厚度分別為 $d_1 = 1.72\text{mm}$ 、 $d_2 = 1.08\text{mm}$ 及 $d_3 = 1.82\text{mm}$ ；海綿層厚度為 $l_{p1} = l_{p2} = 3.0\text{cm}$ ；其他實驗參數選擇如下：

一、結構 I，三層板與兩層海綿材料緊密接觸構成一個整體，沒有空氣層。

二、結構 II，第三層板與海綿材料分離，中間留有一層空腔 $l = 8.0\text{cm}$ 。

三、結構 III，兩側鋁板均與海綿材料分離， 1.72mm 鋁板附近空氣層厚度為 $l_1 = 3.6\text{cm}$ ； 1.82mm 鋁板附近空氣層厚度為 $l_2 = 4.4\text{cm}$ 。

四、結構 IV，海綿材料附著於兩側鋁板，中間鋁板與海綿材料分離，中間鋁板左、右側空氣層的厚度分別為 $l_1 = 3.6\text{cm}$ 、 $l_2 = 4.4\text{cm}$ 。

五、結構 V，第一層海綿與第二層板分離，中間空氣層的厚度為 $l = 8.0\text{cm}$ 。

實驗測得以上五種結構的隔音效果如圖 5.2-39 和圖 5.2-40 所示。在前三種結構中，結構 I 在低頻段出現結構共振低谷，高頻段曲線起伏較小，但隔音效果相對較差。結構 II 由於存在空氣層，整個頻段的隔音效果優於結構 I。結構 III 中存在兩層空氣結構，分析時可以認為材料層數比結構 II 多，因而低頻段的隔音效果較結構 II 略差，但中高頻段優於結構 II。比較後三種結構可見，結構 IV 的隔音效果

較好。分析五條曲線可得，結構 II 和結構 V 材料構成方式相似（單層空腔），得到的隔音曲線差別不大；結構 III 和結構 IV 中存在雙層空腔，其他材料的布放方式也相似，因而得到的隔音性能差別較小。綜合考慮整個隔音頻帶，結構 IV 的隔音效果相對優越，但不同結構在不同的局部頻段有自身的優勢，在隔音設計時應考慮到工程需要和安裝的具體條件而作出適當的選擇。

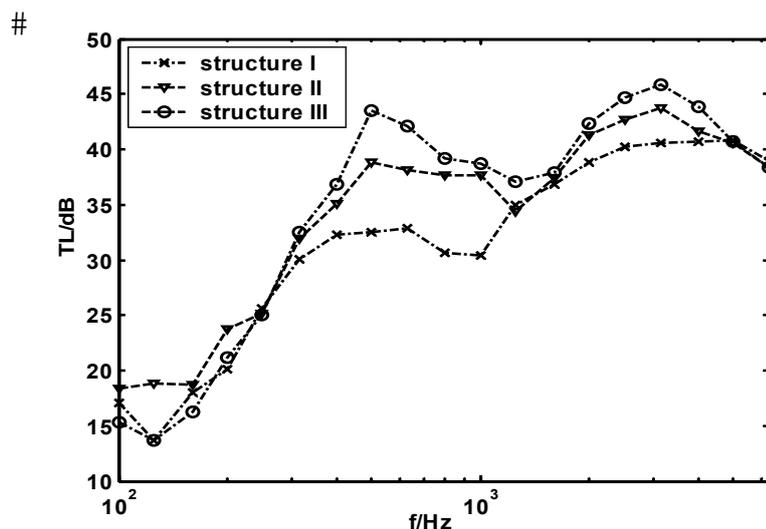


圖 5.2-39 三層夾心板前三種結構隔音性能的實驗結果

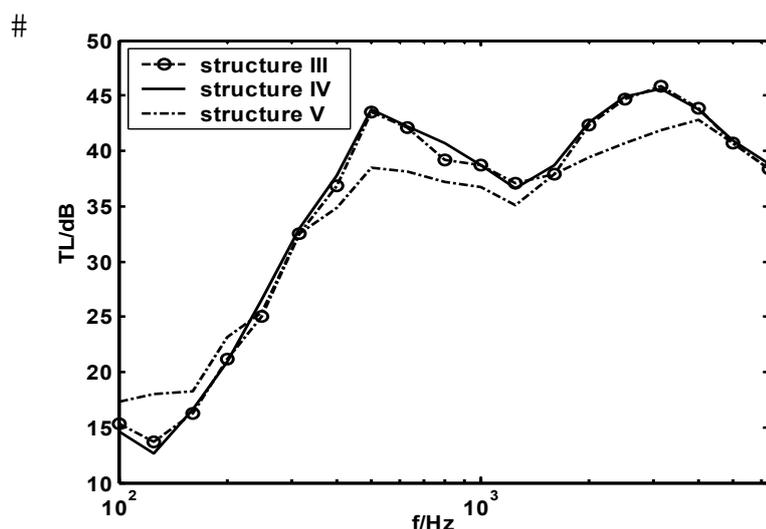


圖 5.2-40 三層夾心板後三種結構隔音性能的實驗比較

肆、實驗測量結果與數值計算結果比較

將測量結果與理論計算結果比較可見，實測結果與理論值不完全吻合，在高頻段相差較大。圖 5.2-41 為普通雙層板的數值計算結果與實測結果的比較，圖中「sound leak」為考慮板邊緣孔隙漏音對理論值的修正。在 600 Hz 以內，測量值與理論值相差不大；在 600 Hz 以上，隨著頻率的增加，二者的差值越來越大。圖 5.2-42 給出了三層板中結構 II 的理論值和實測值的比較結果，圖中「wall」所表示的曲線為隔音室的牆未開孔前的表觀隔音量；「sound leak」為考慮板的邊緣漏音對實驗結果的影響，以上修正結果是將邊緣縫隙等效為漏音孔徑 $d=1.8\text{cm}$ 的小孔。比較分析可見，在 300 Hz 以下，理論值與實驗值差別較小；在 300 Hz 以上，尤其在高頻段，理論結果與實測資料差別較大。造成實驗誤差的因素歸結如下：

一、實驗中儘管採取了密封措施，但仍存在漏音現象，主要是鋁板邊緣存在縫隙，橡膠條密封效果不夠理想造成的。圖 5.2-42 給出了邊緣存在等效直徑為 1.8cm 的小孔時對理論值的影響^[95]，可見孔隙的存在造成中高頻隔音的明顯降低。以直徑 1.8cm 的孔隙為例，圖 5.2-41 中雙層板由於孔隙的存在使得曲線與理論值在 600 Hz 處出現了分離。圖 5.2-42 中的三層夾心板板由於孔隙的影響造成曲線在 300 Hz 處開始與理論計算值出現偏差。這是對本實驗結果產生影響的主要因素。

二、隔音室的隔音性能對實驗的影響。由於隔音室的門隔音量有限，實測結果表明門的隔音量比隔牆小很多，這樣實際上音波從音源室到接收室存在兩條傳音路徑，即通過隔音構件傳播和通過隔音室的門傳播，高頻段隔音室的隔音量明顯不足。由圖 5.2-42 可知，在 900 Hz 以上隔音室的隔音性能不能達到實驗測試要求，這樣實測結果會因門的隔音效果不佳而受影響。

三、實驗中厚度較大的鋁板採用多層重疊構成，而數值模擬中選取的是整塊鋁板，二者的物理特性（彎曲勁度）存在差別，造成理論和實驗結果出現差別。

四、實驗中盡量模擬自由邊界，但很難做到理論上要求的真正自由邊界。理論上的無限大板在實驗中為接近 1m^2 的多層板，這些也會對造成理論和實驗的不一致，實驗原理和實驗方法有待在以後的研究工作中進一步改進。

在對不同結構的隔音性能之測量中，理論模型與實驗條件間存在一定的差異，這是由於測試條件與理論模型不完全相符造成的。但本節中的所有實驗資料都是在相同的實驗條件下得到的，不同結構的隔音性能曲線仍然具有可比較性。從已有資料的分析結果可以看出，實驗結果能夠反映不同結構的隔音特點。

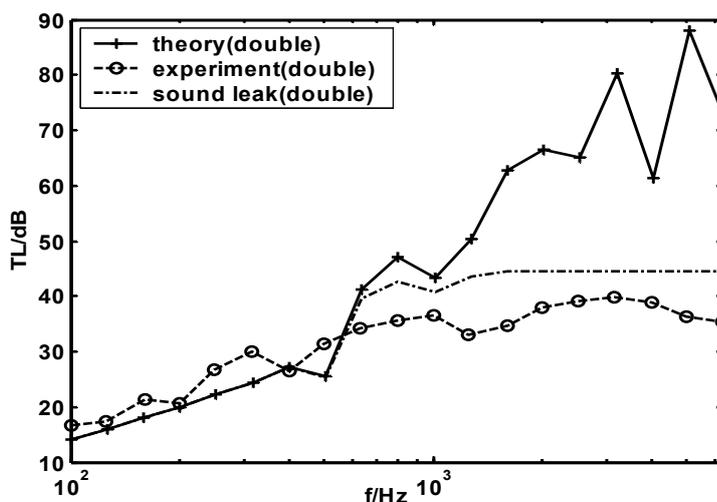


圖 5.2-41 雙層板隔音曲線的理论值與實測值比較

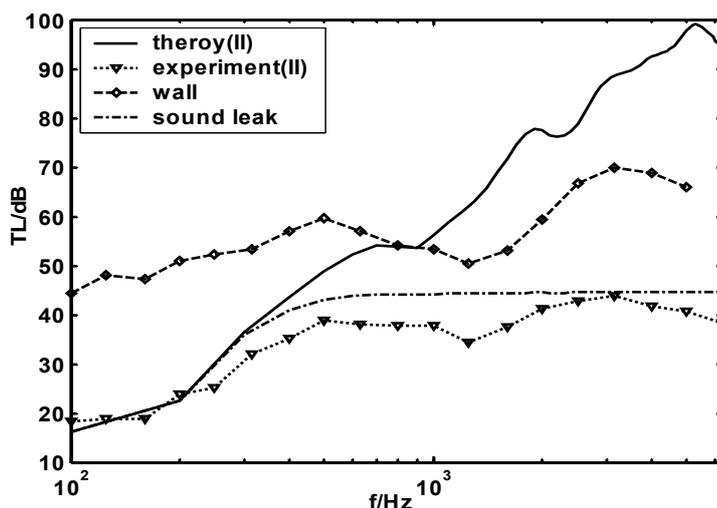


圖 5.2-42 三層板的理论值與實測值比較

伍、夾心板與週期結構多層板的隔音性能比較

通過對以上三類隔音結構的實驗分析，可以看出不同結構的各自優缺點。在選取隔音結構時，如何在不同類型之間取捨，就要求對不同類型結構的隔音性能的差別進行比較，圖 5.2-43 和圖 5.2-44 分別顯示了三層夾心結構與週期結構和雙層夾心結構的差異。與週期性結構相比，添加彈性多孔材料雖然使隔音結構的面密度略有增加，但隔音性能在整個頻帶都有明顯提高，而且對於系統的中高頻空腔共振也可以起到抑制作用，使隔音曲線的起伏變小。因而在隔音結構的設計中，

在條件允許的條件下，應該考慮添加彈性多孔吸音材料來提高隔音性能。比較雙層和三層夾心板的隔音性能，可見圖 5.2-44 中三層結構在 430 Hz 以上的隔音效果優於雙層夾心結構，且曲線變化趨勢一致，但低頻段的隔音性能變差，隔音特點符合多層結構的一般規律。

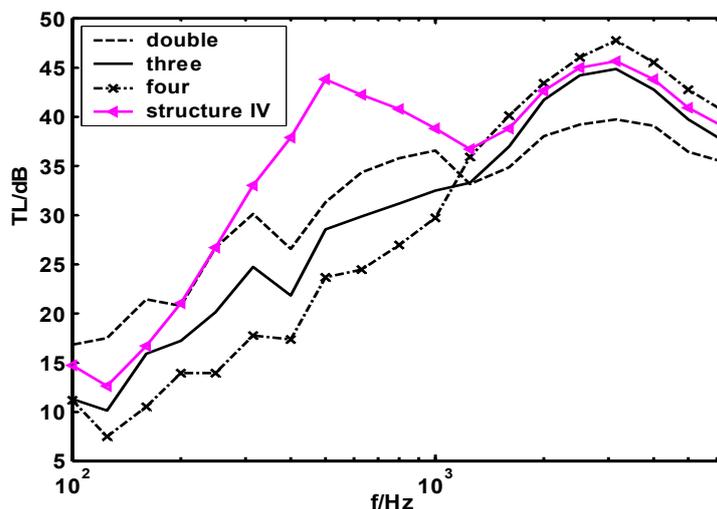


圖 5.2-43 三層夾心板與週期結構多層板隔音性能比較

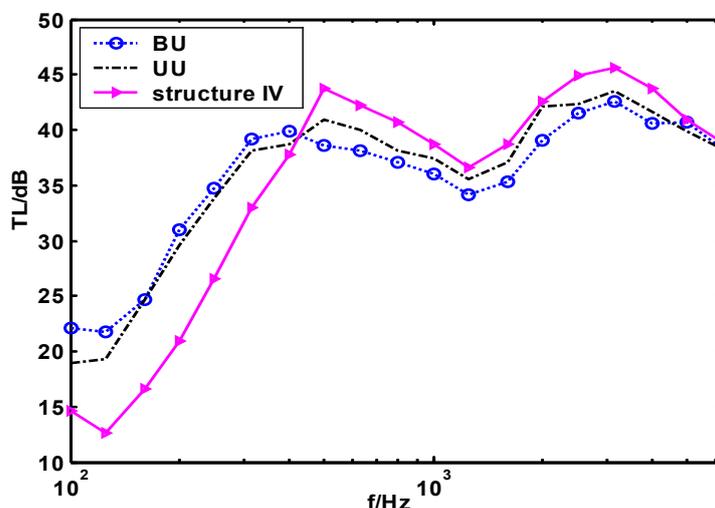


圖 5.2-44 三層夾心板與雙層夾心板隔音性能比較

5.2.5.3 結論

實測結果表明，多層隔音結構的隔音特性具有一般規律，在材料種類和面密度保持不變的條件下，僅增加結構的層數會使低頻隔音效果下降，中高頻的隔音

效果得到提升。在結構層數保持不變的前提下，改變材料的布放方式對隔音性能在某些頻段也有小幅度影響，可以起到局部調節的作用。在多層隔音結構中，彈性多孔吸音材料的應用對隔音性能有較大幅度的改善，在滿足輕薄結構的條件下，又能得到較好的隔音效果。

5.2.6 總結論

隔音性能的改善依賴於新型的隔音結構和隔音材料。本研究以輕薄隔音結構為研究目標，就幾種不同的多層隔音結構進行了理論研究和實驗分析。在波動分析方法的基礎上，以多層結構為主要研究物件，首先就週期性和準週期性多層結構，應用轉移矩陣的方法研究了結構的隔音性能，分析調節空氣層和板的厚度、材料類型對隔音效果的影響，然後對雙層、三層彈性多孔材料夾心結構的隔音性能進行了研究，並就同種夾心結構中材料的不同布放方式對隔音效果的影響進行了數值分析。為了提高低頻的隔音效果，在三層週期性隔音結構的基礎上，對帶微穿孔板的三層結構進行了理論研究，最後對週期性多層結構和多層彈性多孔材料夾心板結構進行了實驗驗證，並將不同隔音結構的實驗結果進行比較分析。得到了這幾類隔音結構的一般隔音規律和各自隔音的特點。

本研究的主要創新點和貢獻如下：

一、多層週期或準週期性結構與普通的雙層板相比，隨著板的層數增加，中高頻隔音性能提高，低頻隔音性能下降，適合於對中高頻隔音要求較高，但對於低頻隔音要求不高的噪音控制場所。

二、彈性多孔材料夾心結構與週期結構多層板相比，可以在稍微增加結構面密度的情況下使整個頻段的隔音性能改善，而且能一定程度上抑制系統的共振。三層夾心板比雙層夾心板在中高頻隔音效果好，但低頻隔音性能降低。

三、帶微穿孔板的多層隔音結構與週期性結構相比，一方面能提高系統的中低頻隔音效果，改善被動隔音低頻隔音不足的問題，同時能減小反射音能量，使音源室的混響音場減弱，適合於即要求有較好的隔音效果同時對吸音有一定要求的場合。

將來有待開展的工作：

一、詳細探討帶微穿孔結構多層板的隔音和吸音效果，分析結構的隔音和吸音之間的相互關係，嘗試使用不同材料，設計出最優的隔音結構。

二、將有源噪音控制與無源隔音相結合，解決被動隔音中低頻隔音不足的問題，設計在全頻帶都具有較好隔音效果的主—被動隔音結構。

第六章 計畫執行進度及查核重點

6.1 執行進度

本計畫之執行期限為自決標日起至民國 106 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 106 年 12 月底，契約書之預定進度累積百分比為 100%，實際執行進度為 100%，工作內容項目與實際執行情形之進度互相符合。

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%	106年5月	106年6月	106年7月	106年8月	106年9月	106年10月	106年11月	106年12月	單項比重 (%)	單項達成率 (%)	總達成率 (%)
(一)蒐集國外現行都市軌道交通、機場周圍區域、營建周界及社會生活環境噪音源周界評估指標。	8%	2.67%	2.67%	2.67%						8.0%		
		33.3%	66.7%	100.0%								
(二)彙整研析國外建置環境噪音評估指標量及噪音評估預測相關方法。	8%	2.67%	2.67%	2.67%						8.0%		
		33.3%	66.7%	100.0%								
(三)蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果。	8%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%		8.0%		
		14.3%	28.6%	42.9%	57.1%	71.4%	85.7%	100.0%				
(四)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。	8%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%		8.0%		
		14.3%	28.6%	42.9%	57.1%	71.4%	85.7%	100.0%				
(五)蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序。	8%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%		8.0%		
		14.3%	28.6%	42.9%	57.1%	71.4%	85.7%	100.0%				
(六)蒐集國外住宅區音量評估模擬方法及相關管理措施與規範。	8%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%	1.14%		8.0%		
		14.3%	28.6%	42.9%	57.1%	71.4%	85.7%	100.0%				
(七)進行住宅區室內外噪音量測研究(包括開窗與關窗之不同條件、反射音及衰減狀況等量測至少10次)。	8%	1.60%	1.60%	1.60%	1.60%	1.60%				8.0%		
		20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%						
(八)辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析。	6%	1.20%	1.20%	1.20%	1.20%	1.20%				6.0%		
		20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%						
(九)分析建築物隔音測量方法實驗原理條件及進行音源實驗，並針對建築物隔音測量方法提出改善建議。	8%			2.67%	2.67%	2.67%				8.0%		
				33.3%	66.7%	100.0%						
(十)針對輕薄隔音結構進行理論研究與實驗分析，並進行至少2種之不同隔音結構性能之理論分析與實驗。	8%			2.67%	2.67%	2.67%				8.0%		
				33.3%	66.7%	100.0%						
(十一)研提適用我國之住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案。	8%				1.60%	1.60%	1.60%	1.60%	1.60%	8.0%		
					20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%			
(十二)辦理說明會議。	10%		5.00%					5.00%		10.0%		
			50.0%					100.0%				
(十三)辦理專家學者諮詢會議。	4%				4.00%					4.0%		
					100.0%							
工作進度報告、期中報告、期末報告			☆			○		◎	■	100.0%		
預定進度累積百分比(%)	100%	12.7%	30.4%	48.4%	66.8%	81.1%	87.2%	98.4%	100.0%			
備註	☆第一次工作進度報告：106年6月；○期中報告：106年9月；◎期末報告初稿：106年11月；■期末報告定稿：106年12月											

表格填寫說明：

1. 請依合約書所列各分項工作列於表中之工作內容項目；2. 單項比重指各分項工作內容占整體計畫之比重；3. 單項達成率指該單項工作完成百分比；4. 總達成率指各分項工作已完成部分所占百分比；5. 進度累積百分比指已完成之各分項工作合計之百分比

註：106 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%			實際執行 進度 (%)	100%	
工作內容項目	實際執行情形	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			
第一次查核點	表 6.1-1	√					
第二次查核點	表 6.1-1	√					
第三次查核點	表 6.1-1	√					
查核點	預定完成時間	查核點內容說明			章節	已完成內容	
第一次查核點 (工作進度報告)	106 年 6 月	(一)蒐集國外現行都市軌道交通、機場周圍區域、營建周界及社會生活環境噪音源周界評估指標。			2.1	1.一般環境噪音的評估指標：環境品質評估指標為均能音量 L_{eq} (Equivalent Continuous Noise Level)、日間均能音量 L_d (Day)、夜間均能音量 L_n (Night)、加權等效連續感覺噪音量 WECPNL (Weighted Equivalent Continuous Perceived Noise Level)；衝擊性噪音的指標為最大音量 L_{max} 。 2.目前國內外環境噪音污染評估中，一般使用「均能音量 L_{Aeq} 」作為評估指標。	
		(二)彙整研析國外建置環境噪音評估指標量及噪音評估預測相關方法。			2.2	1.國際上通用的建立環境噪音污染評估指標量的方法是「社會調查(指與有關噪音煩惱度評估的調查，以及由某區域的居住環境決定的聲音特徵之測量值或計算值)」和「客觀測量(網格法或定點測量)」。 2.在一般環境噪音評估預測相關方法方面，依據國內外的研究，噪音的預測模式可分類為：(1)經驗公式；(2)解析模式；(3)電腦模式；及(4)模型實驗等 4 種。 3.現在國際上用得比較多的環境噪音評估軟體(特指空氣音傳播噪音模擬)，包括：德國 SoundPLAN、丹麥 LimaTM、德國 CadnaA 及法國 Mithra 等。	

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容
第一次查核點 (工作進度報告)	106 年 6 月	(三)蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果。	3.1	<p>1.包括：(1)韓國；(2)中國大陸；(3)香港；(4)日本；(5)歐盟；及(6)美國之住宅區音量現況。</p> <p>2.低頻噪音已經成為居住區中影響最大的噪音源，某些原有評估指標的適用性就有待研究證明。</p> <p>3.在等噪音和等響度級下，煩惱程度相對較低的低頻噪音於 A 加權之煩惱程度被放大，故評估低頻噪音時應對其進行修正，減小低頻段的衰減值，以正確反映噪音暴露者受到的實際影響。</p> <p>4.國外研究若採 A 加權指標，其補償值應介於 2 dB~5 dB 的範圍內，能更客觀地反應住宅區內之低頻噪音引起的噪音煩惱度。</p>
		(四)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。	3.2	<p>1.已蒐集「16 個」國外住宅區室內之音量評估指標（表 3.2-1）。一般而言，多數均採取 L_{Aeq} 作為評估指標，少部分則有列入 L_{Amax} 作為評估指標（WHO、英國曼徹斯特市、韓國）。</p> <p>2.已蒐集「16 個」住宅區室內的允許（指導）噪音值或標準值（表 3.2-2），其中大部份國家之住宅區相關室內音量均與 WHO 之指引值相近。</p>
		(五)蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序。	3.3	參考國外作法及國內既有之相關測量規定及經驗，以初步建立我國住宅區室內音量測量方法。
		(六)蒐集國外住宅區音量評估模擬方法及相關管理措施與規範。	3.4	<p>1.分析包括：丹麥 Odeon、比利時 Raynoise、紐西蘭 Insul、德國 SoundPLAN、德國 CadnaR、德國 BASTIAN 和日本 TNEL 幾種最常用的室內模擬軟體性能和特點，並介紹了日本之室內外噪音經驗式及計算概念。</p> <p>2.已蒐集包括：歐美日、香港及澳門等國（地區）之相關管理措施與規範。為了預防公寓噪音（社區生活噪音）爭端，國外訂有相關罰款，如：美國紐約州、德國及英國。</p>

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容
第一次查核點 (工作進度報告)	106年6月	(七)初步建立我國之住宅區室內音量品質指標。	6.1	參考目前國內之各種噪音測量方法的指標及國外對於室內音量之評估指標，其中多數均採取A加權均能音量 L_{eq} 作為評估指標，少部分有列入A加權最大音量 L_{max} (世界衛生組織、英國曼徹斯特市及韓國)。據此，本計畫初步建議住宅區之室內音量評估指標為「 L_{Aeq} 及 L_{Amax} 」。
		(八)初步建立我國之住宅區室內音量測量方法。	6.1	參考：(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；及(3)相關國外之室內音量測量方法，本計畫據此初步建議住宅區之室內音量測量方法。
		(九)6月辦理1場次住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案說明會議，邀請政府相關主管機關及相關業者代表參加，說明會議人數至少30人，提供茶水、便當及場地租金。	6.2	已於106年6月20日辦理。針對住宅區室內音量品質指標、測量方法、數量分配、噪音源分布情形及頻譜資料調查分析等實地測量作業規劃進行討論及說明。
		(十)提交第一次工作進度報告審查。	—	已於106年6月29日函文提送。
第二次查核點 (期中報告)	106年9月	(一)持續蒐集國內外相關文獻並彙整研析。	2章 3章	如前述之說明。
		(二)進行住宅區室內外噪音量測研究(包括開窗與關窗之不同條件、反射音及衰減狀況等量測至少10次)。	4.1	1.已完成一般道路1點次、道路系統(高速公路、快速道路)9點次、軌道系統(捷運、臺鐵、高鐵)10點次，合計數量為20點次。 2.現地測量開關窗的 L_{Aeq} 及 L_{Amax} 之隔音量結果與國外文獻之範圍相近。關窗之平均隔音量約有20dB(A)；開窗約10dB(A)。 3.距離牆面線1.5m/3.0m及1.0m/3.5m處之音量差異不大，顯示牆面近處之1.0m及1.5m之測點應多少有受到牆面反射音之影響，導致測值偏高。

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容
第二次查核點 (期中報告)	106 年 9 月	(三)辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析。	4.2	<p>1.已完成一般道路 1 點次、道路系統(高速公路、快速道路)9 點次、軌道系統(捷運、臺鐵、高鐵)10 點次，合計數量為 20 點次。</p> <p>2.室外噪音源「通過開窗」傳遞至室內時，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> <p>3.統計分析測量之 20 點次，於 20 Hz~200 Hz 之低頻範圍出現純音(德國 DIN 45680)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。</p>
		(四)分析建築物隔音測量方法實驗原理條件及進行音源實驗，並針對建築物隔音測量方法提出改善建議。	5.1	<p>1.已蒐集測量建築物空氣音隔音量方法之相關資料，包括：(1)實驗室測量方法；(2)現場測量方法之交通噪音源；及(3)現場測量方法之揚聲器噪音源。</p> <p>2.本計畫擬由單個揚聲器音源多次測量（不同的入射角度）、將近似為點音源的揚聲器拓展為線音源和用半混響室類比現場音環境三方面改進測量方法，使得測試結果比較準確地反映現場隔音效果，以獲得最佳建築物隔音效果測試方法與提出建議。</p>
		(五)針對輕薄隔音結構進行理論研究與實驗分析，並進行至少 2 種之不同隔音結構性能之理論分析與實驗。	5.2	<p>1.已蒐集隔音研究歷史、現狀及方法，並分析其背景資料及優缺點。綜述前人工作的基礎上提出新型多層輕薄隔音結構，並對其隔音性能作理論分析和實驗研究。</p> <p>2.在波動分析方法的基礎上，以多層結構為主要研究物件，首先就週期性和準週期性多層結構，應用轉移矩陣的方法研究結構的隔音性能。</p> <p>3.將不同隔音結構的實驗結果進行比較分析，以得到這幾類隔音結構的一般隔音規律和各自隔音的特點。</p>

查核點	預定完成時間	查核點內容說明	章節	已完成內容
第二次查核點 (期中報告)	106年9月	(六)8月辦理1場次住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案之專家學者諮詢會議，諮詢委員人數至少10人，提供茶水、便當及場地租金。	6.2	已於106年8月28日辦理。針對住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案、實地測量作業規劃及本計畫實地測量初步結果進行討論及說明。
		(七)初步建立我國之住宅區室內音量建議值。	6.1	1. 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)。 2. L_{max} 建議值：60 dB(A)（參考 WHO，比夜間 L_{eq} 值高出 15 dB(A)）。 參考國外資料並佐以本土之實測結果，辦理「室內音量建議值草案」並檢討現行噪音源端之管制標準有無改善空間。
		(八)提交期中報告審查。	—	已於106年9月28日函文提送。
第三次查核點 (期末報告 (初稿))	106年11月	(一)持續蒐集國內外相關文獻並彙整研析。 (二)11月辦理1場次說明會議。 (二)研提適用我國之住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案。 (三)提交期末報告(初稿)審查。		1.(1)蒐集國內外相關文獻並彙整研析；及(2)研提適用我國之住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案，已如前述之說明。 2.已於106年11月15日辦理「第二次說明會議」。針對「室內場所噪音檢測作業程序暨量測規範驗證研究」之測量結果說明。 3.已於106年11月27日函文提送。

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、彙整研析國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻

(一)完成彙整 10 篇國外環境噪音評估指標使用現況及評估指標建立相關文獻，以瞭解國外一般環境多使用均能音量 L_{Aeq} 作為評估指標。

(二)完成彙整國外建置環境噪音評估指標方法採社會調查和客觀測量 2 種，「社會調查（指與有關噪音煩惱度評估的調查，以及由某區域的居住環境決定的聲音特徵之測量值或計算值）」和「客觀測量（網格法或定點測量）」；而噪音評估預測建置方法分為(1)經驗公式；(2)解析模式；(3)電腦模式；及(4)模型實驗等 4 種，可作為我國未來制定評估指標及方法之參考。

二、完成蒐集國外住宅區室內音量品質指標、噪音測量、建議值及評估模擬方法

(一)完成蒐集國外住宅區音量現況及民眾噪音煩惱度相關研究結果

完成蒐集 6 個國家地區或組織資料，包括韓國、中國大陸、香港、日本、歐盟、美國等住宅區音量現況，其中低頻噪音影響越來越加重視，根據國外研究若採 A 加權須進行補償，其補償值應介於 2dB~5dB 的範圍內，能更客觀地反應住宅區內之低頻噪音引起的噪音煩惱度。

(二)完成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

完成蒐集 16 個國外住宅區室內之音量品質評估指標，大多採 L_{Aeq} 作為評估指標，僅世界衛生組織(WHO)、英國曼徹斯特市、韓國有列入 L_{Amax} 作為評估指標，此將做為我國未來訂定住宅區室內音品之參考。

(三)完成蒐集國外住宅區音量之量測方法和標準作業程序，並參考環保署 96 年、97 年圖書館及醫院等公共場所室內音量研究工作、98 年至 101 年陸上運輸系統場站室內音量研究工作內容，以做為我國未來研擬室內建議容許值及量測方法之參考。

(四)完成蒐集 5 個國家室內評估模擬方法，包括：丹麥 Odeon、比利時 Raynoise、紐西蘭 Insul、德國 SoundPLAN、德國 CadnaR、德國 BASTIAN 和日本 TNEL 幾種最常用的室內模擬軟體性能和特點，並介紹了日本之室內外噪音經驗式及計算概念。另蒐集包括歐美日、香港及澳門等國（地區）之相關管理措施與規

範，為了預防公寓噪音（社區生活噪音）爭端，國外訂有相關罰款，如：美國紐約州、德國及英國。

三、完成調查住宅區室內外場所音量及噪音源分布，並改善建築物隔音測量方法及隔音結構改善相關研究

(一)完成辦理室內噪音源分布及頻譜資料之調查分析

依據室內噪音源頻譜資料之調查分析，低於 200Hz 的部分，室內外音頻之線型變化有較大的差異，顯示於室內有低頻噪音源之干擾。由表 4.2-1 統計分析測量之 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)分析建築物隔音測量方法實驗原理條件及進行音源實驗，並針對建築物隔音測量方法提出改善建議

本工作團隊完成蒐集 3 種測量方法優缺點比較，包括實驗室測量方法、現場測量方法之交通噪音源及現場測量方法之揚聲器噪音源，用揚聲器音源進行隔音的現場測量或驗收時，可以僅測量音波以 45° 入射構件時的隔音量為主以降低測量或驗收的工作量。

(三)針對輕薄隔音結構進行理論研究與實驗分析，並進行至少 2 種之不同隔音結構性能之理論分析與實驗

本工作團隊共完成 3 種隔音結構分析，各隔音材料在中高頻隔音效果較好，但低頻隔音性能則降低。

四、研提我國住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案

(一)民國 106 年 6 月 20 日於臺北車站第 2 會議室完成辦理說明會議，針對住宅區室內音量品質指標、室內外場所測量方法、數量分配、噪音源分布情形及頻譜資料調查分析等實地測量作業規劃進行討論及內容說明。

(二)民國 106 年 8 月 28 日於法鼓德貴學苑階梯教室 6F 會議室完成辦理專家學者諮詢會，針對住宅區室內音量品質指標、測量方法和建議值草案及室內外場所實地測量作業規劃進行討論及實地測量初步結果說明，進行意見交換，以做為環保署之參考。

(三)民國 106 年 11 月 15 日於法鼓德貴學苑階梯教室 6F 會議室完成辦理第二次說明會議，說明室內外場所之測量結果。

7.2 建議

- 一、參考國外之住宅區室內音量評估指標，本計畫初步建議住宅區之室內音量評估指標為「 L_{Aeq} 及 L_{Amax} 」。
- 二、參考國內既有之相關規範及國外文獻資料，初步建議住宅區之室內音量測量方法的測量時間如下：
 - (一)一般室內環境噪音
(非屬)週期性或(非屬)間歇性變動之噪音評定方法，依據「噪音管制標準」規定辦理。
 - (二)室外噪音源通過空氣傳音引起的室內噪音污染
 - 1.一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。
 - 2.陸上運輸軌道系統：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。測量次數不應少於 10 班列車，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。
- 三、對於室外測點之建築物牆面反射音的影響建議可再另案深入探究。例如：牆面材質、測點與牆面距離、測點與牆面線夾角、音源特性、有無牆面之影響…等狀況，以找出牆面之反射音修正量的建議值。
- 四、針對室內音量品質推動自主管理的措施上，建議可考慮推動智慧型手機 APP 噪音監測系統的引入，惟應先評析適當的 APP 軟體，並建立校正參考指引。