

隔音效果的測量方法比較與改進

jacob liu 劉嘉俊

摘要

隔音測量分為現場測量方法和實驗室測量方法，現場測量方法有交通噪音源現場測量和揚聲器音源測量，實驗室測量方法為混響室測量法。本文詳細論述了這三種測量方法的實驗原理，並就具體的實驗方法和實驗條件進行詳細地介紹，分析比較這三種測量方法的特點及應用，並在此基礎上提出揚聲器音源現場測量的改進方法，即採取多角度現場測量，再按角度求平均值的方法，並進行了實驗證明，實驗結果與理論預測大致相同，文章最後提出了隔音現場測量的另外兩種方法，即多個揚聲器構成線音源的方法和採用半消聲室的方法。

Abstract

The measurement of sound insulation can be conducted with two methods – field measurement and lab measurement. The field measurement method can be divided into two categories – traffic noise source measurement and loudspeaker noise source measurement while the lab measurement method refers to the measurement conducted in a reverberation room. This paper particularly discusses the experimental principles of these three measurement methods and specifically introduces experimental methods and experimental conditions. Based on the analysis and comparison of the features and application of these three measurement methods, this paper presents improvement suggestions for field measurement of loudspeaker noise source. In fact, this paper adopts a method in which field measurement is conducted from multiple angles and a mean value is produced from these multiple-angle field measurements. An experiment is also conducted, of which the results prove to be similar to the theoretical prediction. Finally, this paper presents two more methods for field measurement of sound insulation – measurement of line source from multiple loudspeakers and measurement in a semi-anechoic room.

關鍵字：混響室(Reverberation Room)，消聲室(Anechoic Room)。

壹、前言

測量建築構件空氣聲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）、現場測量方法和相關函數測量法...等，本文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。

貳、正文

一、實驗室測量方法

(一)實驗室測量原理

實驗室測量方法的隔音測量系統如圖2-1所示，隔音構件兩側均為混響室，

功率擴大器

噪音信號

多通道頻譜分析儀系統

隔音構件

$0^\circ \sim 75^\circ$

圖2-1 隔聲構件隔聲量測量實驗

在雙層隔牆之腔內填充吸音材料，假設音源室、接收室之聲壓有效值分別為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ，
隔音構件面積為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，接收室總面積、房間常數、房間體積和平均吸音係數分別為
 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ 和 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，透過隔音構件的聲能量為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，入射到隔音
構件的聲強為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，隔音構件的透射係數為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，空氣密度和空氣中聲速為分別為
 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ，則透射的聲功率為^[1]：

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{2-1}$$

接收室內的聲能量密度可寫成：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ}, \quad 0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (2-2)$$

因而有： $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (2-3)

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (2-4)$$

噪音衰減量為： $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (2-5)

$0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室的平均吸音係數，在混響室中， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 小於0.1，所以 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 可以近似寫成 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，得到隔音量公式可表示為：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (2-6)$$

式中 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室的總吸音量； $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (2-7)

(二)實驗室測量方法要求^{[2][3][8]}

1.測試房間要求

- (1) 測試房間的體積不應小於50立方公尺，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%。
- (2) 房間尺寸的比例應合理選擇，不應有兩個是相等的，亦不應成整數比。
- (3) 必要時，在兩個測試房間內均應安裝擴散體。
- (4) 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內準備安裝的試件隔音量。
- (5) 在測量隔音量的實驗裝置中，任何間接傳聲與通過試件的傳聲相比可予以忽略。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聲輻射的襯壁。
- (6) 接收室的低頻混響時間應控制在2秒左右。

2.隔牆試件要求

- (1) 試件洞口的佈置，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形式，安裝條件應在測試報告中說明。

(2) 試件安裝在音源室和接收室之間洞口內的位置應予說明。

(3) 在具有抑制側向結構聲輻射的實驗室內，對任何非直接通路的傳聲與通過試件的傳聲相比可予以忽略。

3.表觀隔聲量

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。試件的表觀隔聲量為入射到試件上的聲功率與傳透到接收室的全部聲功率比值的對數再乘以10，即：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ},$$

其中 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為表觀隔聲量（分貝）， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為入射到試件上的聲功率（瓦）， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為傳透到接收室的全部聲功率（瓦），傳透到接收室的全部聲功率 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 通常由以下幾部分功率組成：

- (1) 直接傳入隔牆並且直接從隔牆輻射的聲功率（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）
- (2) 直接傳入隔牆但是由側向結構輻射的聲功率（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）
- (3) 傳入側向結構但直接從隔牆輻射的聲功率（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）
- (4) 傳入側向結構并從側向結構輻射的聲功率（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）
- (5) 通過漏洞，通風管等傳聲（作為空氣聲）的傳透聲功率（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）

實驗室的表觀隔聲量在計算時，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 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 比實驗室表觀隔音量最大值 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 小10分貝（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ} - 0^{\circ} \sim 75^{\circ} > 10$ 分貝），間接傳聲可忽略；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（ $0^{\circ} \sim 75^{\circ} - 0^{\circ} \sim 75^{\circ} < 10$ 分貝），側向傳聲的影響必須考慮。

4.門和窗等測試構件的安裝要求

(1) 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聲與通過試件的傳聲相比，可予以忽略。

(2) 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）。

(3) 安裝門時，應使下部位置儘量接近實驗室地面。

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

5.音源室內聲場的要求

(1) 所用音源應能發射穩定的聲波，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。

(2) 音源的聲功率應足夠高，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。

(3) 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0.7米，各揚聲器應同相位驅動。

(4) 揚聲器箱的位置，應合理佈置，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。

6.平均噪音量的測量要求

(1) 可採用多個固定的麥克風位置或一個具有 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 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500Hz時取3點，低於和等於500Hz時取6點。

(2) 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。

(3) 所有麥克風位置離房間界面或擴散體應大於0.7米。

7.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1/3八音階時，應採用以下中心頻率：100、125、160、200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、2000、2500和3150Hz。

二、外牆構件隔音的現場測量方法

(一)交通噪音源測量隔音^{[2][4]}

聲場由不同方向且聲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：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (3-1)$$

式中 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為交通噪音隔音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為試件前2m處包括試件反射效應在內的等效噪音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室內的平均等效噪音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為試件面積，即從接收室內所看到的整個立面的面積， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 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：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (3-2)$$

式中 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為交通噪音標準噪音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室內實測混響時間， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為基準混響時間，對於住宅取0.5s，等效噪音量計算式為：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (3-3)$$

式中 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為隨時間變化的瞬時噪音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 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。這時按式 (3-1) 或式 (3-2) 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（通常取無規分佈的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1米，離房間其它界面應大於0.5米。

(二)揚聲器噪音源測量隔音^{[2][5][6]}

1.測量原理

聲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聲功率為 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ，入射角為 $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ ，試件面積為 $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ ，則牆外側和室內的聲能量密度分別為：

$$\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}, \quad \theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ} \quad (3-4)$$

試件兩側聲能量和聲壓有效值的關係為： $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ ， $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ ， $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$

(3-5)

式中 $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ 為聲能量透射係數，用 $\theta=35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ 表示總的入射噪音量與接收室噪音量的差值，入射聲壓和接收室聲壓關係可以表示為：

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (3-6)$$

$$0^{\circ} \sim 75^{\circ} \quad (3-7)$$

$0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為在入射角 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 下的隔音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 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， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室內的平均噪音量， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為試件面積， $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 為接收室的吸音量。

2. 聲場的產生應符合下列要求

- (1) 所用噪音在考慮的頻率範圍內應穩定而有連續的頻譜。
- (2) 採用1或1/3八音階帶寬的濾波器。
- (3) 試件表面的局部噪音量差異不應超過5分貝。
- (4) 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。

3. 平均噪音量的測量要求

- (1) 貼近外牆面的平均噪音量 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 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 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。
- (2) 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（通常取無規分佈的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1米，離房間其它界面應大於0.5米，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。
- (3) 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，應測量音源正在發聲時接收室的噪音量及發聲之前或之後的環境噪音量，按表3-1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 $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。

表3-1 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
-----	------	---	---	---	---

三、不同測試方法比較及改進

(一)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聲，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聲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。

(二)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4-1所示，在半自由場內，將聲波入射角度在 $0 \sim 0^\circ \sim 75^\circ$ 範圍內分成 $0^\circ \sim 75^\circ$ 等分，將音源放在距試件一定距離 $0^\circ \sim 75^\circ$ 處，測量此時試件內的聲壓及試件的入射聲壓，對 $0^\circ \sim 75^\circ$ 個點依次測量。得到試件入射聲壓和接收室聲壓的有效值分別為 $0^\circ \sim 75^\circ$, $0^\circ \sim 75^\circ$, ..., $0^\circ \sim 75^\circ$, $0^\circ \sim 75^\circ$, $0^\circ \sim 75^\circ$, ..., $0^\circ \sim 75^\circ$ 。用 $0^\circ \sim 75^\circ$ 表示不同角度總的入射噪音量與接收室噪音量的差值，則入射聲壓和接收室聲壓關係可以表示為：

$$0^\circ \sim 75^\circ$$

圖4-1 揚聲器音源實驗系統原理圖

$$0^\circ \sim 75^\circ$$

(4-1)

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：

$$\begin{aligned} &0^\circ \sim 75^\circ \\ &0^\circ \sim 75^\circ \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (4-3)$$

進一步求解可得：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (4-4)$$

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (4-5)$$

式中 $0^\circ \sim 75^\circ$ 為聲波以角度 $0^\circ \sim 75^\circ$ 入射時的聲強透射係數， $0^\circ \sim 75^\circ$ 聲波從不同角度入射時的平均聲強透射係數， $0^\circ \sim 75^\circ$ 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聲壓有效值、試件面積、和接收室的房間常數，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聲場，因而與實際的三維聲場還存在一定的差異，但比單角度入射結果有改善。

四、揚聲器多點測量方法實驗及結論

(一)實驗裝置及原理介紹

隔音測量結構為“消聲室—消聲箱”，實驗測量原理圖。

功率擴大器

多通道頻譜分析儀系統

揚聲器

鋁板

吸音層

消音室

消音箱

話筒

音源

吸音材料

$$0^\circ \sim 75^\circ$$

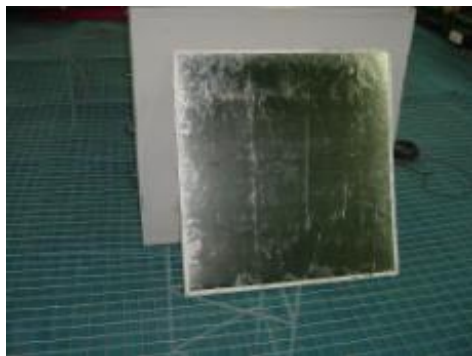
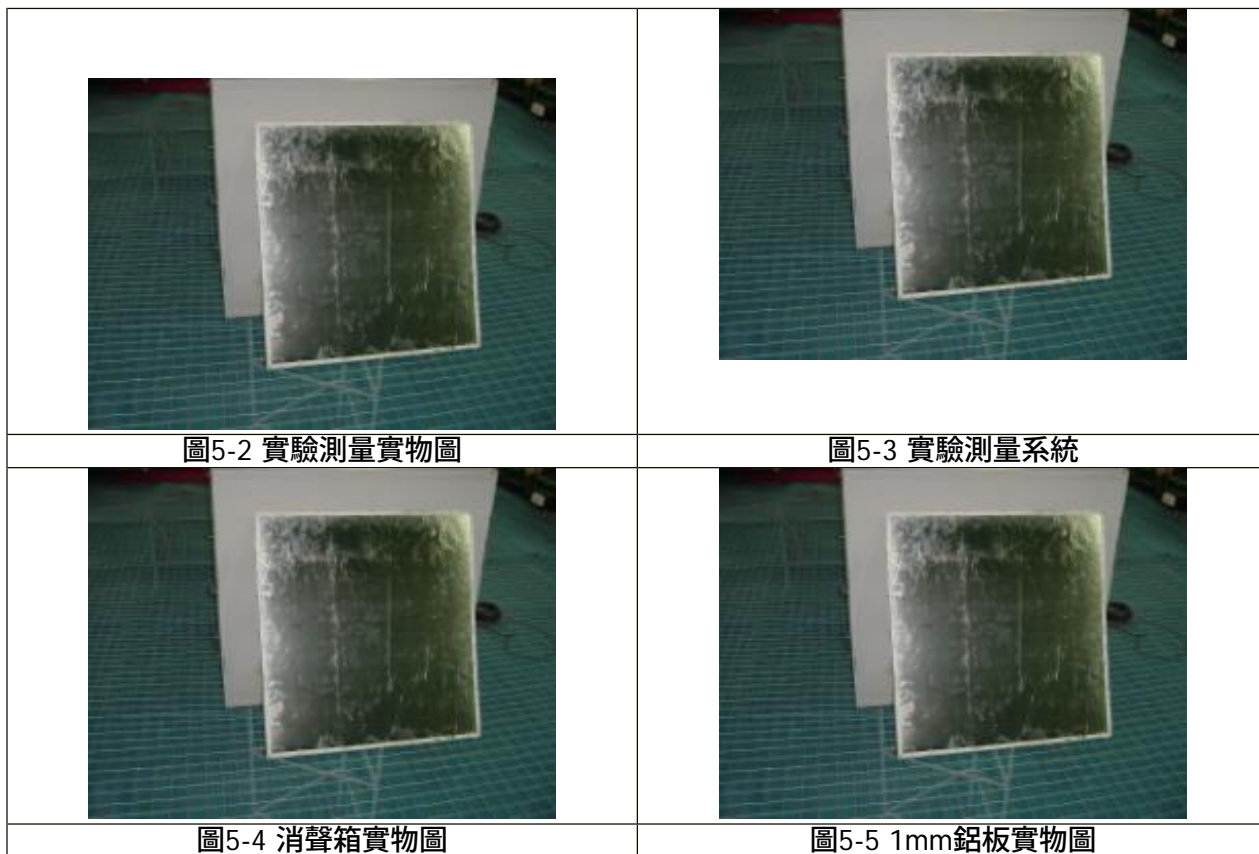


圖5-1 實驗測量原理圖

和實物圖分別如圖5-1、圖5-2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5-3），功率放大器為美國LAX公司生產的LAX3200功率放大系統。消聲箱外尺寸為1200mm×1100mm×1000mm（圖5-4），測試試件為厚度1.0mm的鋁板，鋁板尺寸為960mm×860mm（圖5-5），鋁板四周鉗定在消聲箱上。消聲箱外層為厚度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5-6），吸音材長400mm（圖5-7）。



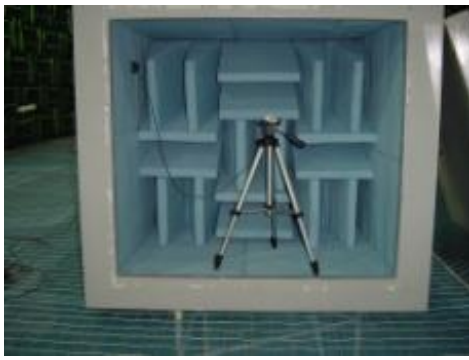


圖5-6 消聲箱內部結構圖

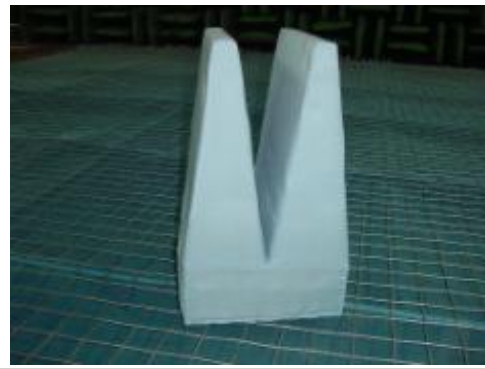


圖5-7 山型吸音材實物圖

實驗原理如前文所述，但計算公式相應地發生改變，用 $0^\circ \sim 75^\circ$ 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：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-1)$$

令不同角度的入射聲壓有效值滿足以下表達式：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-2)$$

可以表示為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-3)$$

第 $0^\circ \sim 75^\circ$ 次測量時隔音構件兩側的聲能量密度 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ 、聲壓 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ 和聲功率 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ 之間滿足以下關係式：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-4)$$

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-5)$$

解(5-1)~(5-5)式得：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-6)$$

隔音量的表達式為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-7)$$

式中 $0^\circ \sim 75^\circ$ 為鋁板的面積， $0^\circ \sim 75^\circ$ 為消聲箱的房間常數，對於單角度入射，入射到試件表面的聲能量和透過試件表面的聲能量分別為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ，聲能量密度分別為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ，保持音源位置和功率不變，將消聲箱移去，測得原鋁板前表面處的聲壓有效值為

$0^\circ \sim 75^\circ$ ，在測試狀態下測得消聲箱內鋁板附近的聲壓有效值為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，聲強透射係數為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，當聲波以角度 $0^\circ \sim 75^\circ$ 入射時，由聲波在自由場和房間的傳播特性可得：

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-8}$$

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-9}$$

入射聲能量和透射聲能量的關係為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-10}$$

聲場中聲能量密度和聲壓的關係為：

$$0^\circ \sim 75^\circ, 0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-11}$$

解以上各式可得：

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-12}$$

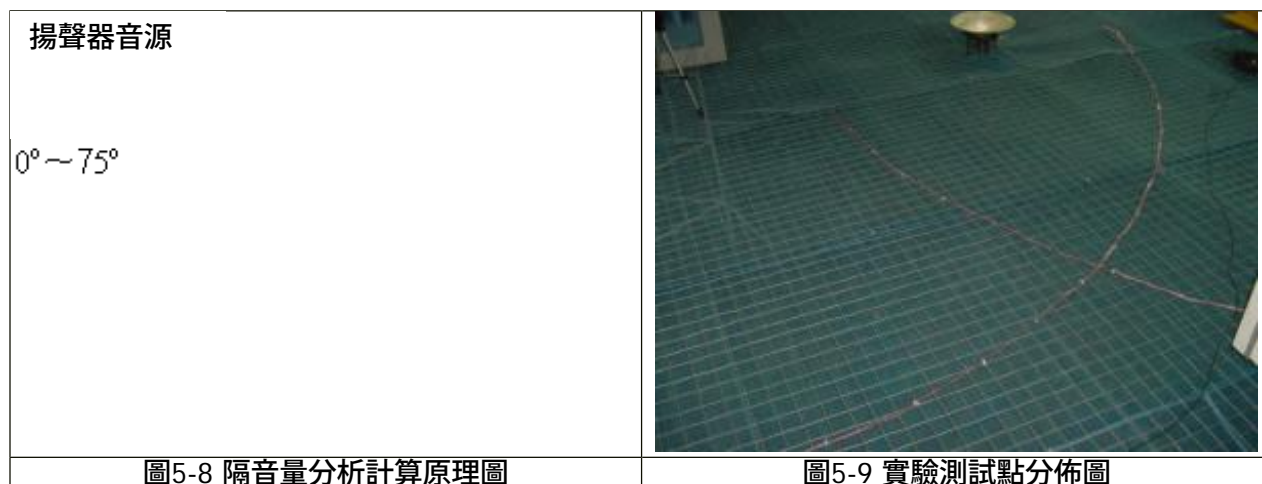
構件的隔音量 $0^\circ \sim 75^\circ$ 為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-13}$$

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-14}$$

房間常數 $0^\circ \sim 75^\circ$ 滿足表達式

$$0^\circ \sim 75^\circ \tag{5-15}$$



式中 $0^\circ \sim 75^\circ$ 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， $0^\circ \sim 75^\circ$ 為接收室內的

平均噪音量。 $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ ， $0^\circ \sim 75^\circ$ 分別為消聲箱的室內總的等效表面積、體積和混響時間。圖5-8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 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，音源距垂直於試件表面且豎直平分試件的平面的距離為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，試件中心與音源（揚聲器）中心的高度差為 $0^\circ \sim 75^\circ$ ，則由以上各量計算可得音源中心到試件中心的距離為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-16)$$

因而聲波的入射角度 $0^\circ \sim 75^\circ$ 可表示為：

$$0^\circ \sim 75^\circ \quad (5-17)$$

在實驗進行過程中，保持長度 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 不變，通過改變 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 和 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 的值來改變角度 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ ，測量不同角度下構件的隔音效果。本實驗中保持 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ ，實際測試點分佈圖如圖5-9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聲箱內聲壓而計算得出的揚聲器擺放的位置，由於入射聲壓不能通過測量鋁板前表面的聲壓獲得，而只能將消聲箱移開後測得該點自由場情況下的聲壓。但每次移動消聲箱增加了實驗的複雜程度，因而在消聲室的其它位置與消聲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5-9中的另一條曲線，這樣麥克風得到的數值就與測量時鋁板前表面的入射聲壓一致（整個實驗過程應保持音源的功率不變）。

(二)實驗數據分析及結論

實驗測量中選取聲波的入射角度在 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 範圍內每隔 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 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和表5-2所示。

隔音性能曲線如圖5-10～圖5-13所示，圖像中“average”表示聲波沿 $\theta=35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 範圍內16個點入射時得的隔音量的平均值。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400Hz中心頻率及以下的頻段），隔音量降低較小，在中高頻段（圖中500Hz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5-14和圖5-15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5-16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，將聲波以 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 入射時構件的隔音量作為現場的測量結果。

進一步分析圖5-16和圖5-17可知，若在對現場測量精度要求不高的情況下，可以僅測量聲波以 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 入射時構件的隔音量。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 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ， $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ， $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 這三個點進行測量，然後再按角度求平均，圖5-17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入射角度於 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 時構件的隔音量

頻率	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
1000	30.9	30.5	31.2	30.6	29.9	29.7	30.3	30.4	29.3
1250	34.9	33.9	33.1	31.3	31.5	31.4	31.6	30.0	28.1
1600	38.1	37.5	36.2	36.3	36.9	35.7	34.8	35.1	33.8
2000	40.0	41.2	40.0	40.5	41.0	40.2	39.5	37.6	39.3
2500	37.3	37.5	38.6	37.7	35.9	37.6	37.3	37.7	36.3
3150	36.0	36.6	38.5	38.7	41.4	40.5	41.5	41.5	37.8

表5-2入射角度於 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 時構件的隔音量

頻率	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
1000	27.5	26.2	24.6	23.5	23.5	22.3	22.1	29.1
1250	25.9	24.4	23.1	21.9	22.0	20.7	20.6	28.5
1600	30.4	28.2	25.7	24.5	24.0	23.0	22.7	31.6
2000	38.4	33.5	29.1	26.9	26.1	25.0	24.9	34.6
2500	37.0	38.1	31.1	28.2	26.2	26.0	25.7	34.9
3150	35.7	34.2	33.0	32.1	29.1	27.9	27.7	36.8

TL/dB 0°~75° 圖5-10 0°~75° 的隔音曲線	TL/dB 0°~75° 圖5-11 0°~75° 的隔音曲線
TL/dB 0°~75° 圖5-12 0°~75° 的隔音曲線	TL/dB 0°~75° 圖5-13 0°~75° 的隔音曲線
TL/dB 0°~75° 圖5-14 0°~75° 構件隔音的理論值	TL/dB 0°~75° 圖5-15 0°~75° 構件隔音的理論值
TL/dB 0°~75° 圖5-16 0°~75° 構件隔音的實測值	TL/dB 0°~75° 圖5-17 三種測量結果比較

五、其它實驗方法

(一)將近似為點音源的揚聲器拓展為線音源^[7]

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，此時外牆周圍的聲場可視為半自由聲場，聲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。

(二)用半消聲室模擬現場聲環境^[8]

爲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聲環境，現場交通噪音可視爲半自由聲場，因而音源室可以利用半消聲室來替代混響室，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。

參、結論

本文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，可以僅測量聲波以 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 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，或者爲了降低現場測量的複雜程度，可以選取 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ， $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ， $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 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。

肆、參考文獻

1.中文參考文獻

- (1) 建築隔音測量規範GBJ75—84 (1985)。
- (2) 混響室法吸音係數測量規範GBJ47—83 (1983)。
- (3) 馮瑀正，「輕結構隔音原理與應用技術」，科學出版社（1987）。
- (4) 陶擎天、趙其昌及沙家正，「音頻聲學測量」，中國計量出版社（1986）。
- (5) 沈濠，「聲學測量」，科學出版社（1986）。
- (6) 杜功煥、朱哲民、龔秀芬，「聲學基礎」，南京大學出版社，第二版（2001）。

(7) 劉憲章、辜小安及尹皓, 「鐵路環境噪音評價聲學比例模型實驗方法的研究」, 鐵道勞動安全衛生與環保, 24 (2), 第104-106頁 (1997)。

(8) 內政部建築研究所, 「綠建材性能實驗研究—子計畫3—建築音響性能資料庫之建立—隔音窗類建材」, 第104-106頁 (2004)。

2.英文參考文獻

(1) Bies, David A. and Hansen, Colin H., Engineering Noise Control, E & FN Spon. Press, London (1998)。