

# 聲音頻率與其方向之關聯性

高中組物理科第一名

省立台中第二高級中學

作者：陳宗伯

指導教師：鄭美華、凌美瓊

## 一、研究動機

前陣子家中音響故障，要購入新的高級喇叭。爲了更加發揮新音響的特性，特別請音響店老闆來家中擺設及校正。放置時，老闆特別強調：「高音喇叭擺設的方向要面向欣賞者，這樣子才會有好的效果；而低音喇叭就不一定要如此，因對人或不對人放置並不會對欣賞效果造成太大的影響。」追問原因何在，老闆表示：「這是我和同好多年的心得，也談不上如何解釋。」因而對此主題產生了研究之興趣。

## 二、研究目的

自行設計實驗裝置

1. 找出聲音頻率與其方向性的關聯。
2. 此關聯性隨距離的變化。
3. 經由聲壓頻譜的分布及其輸出波形，判定出喇叭的品質。

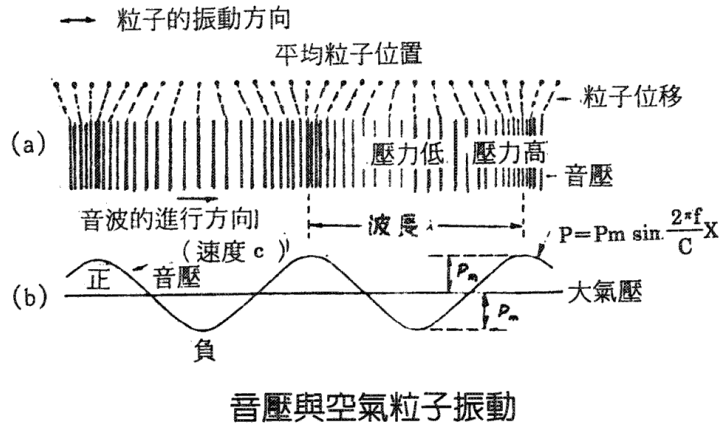
## 三、研究設備與器材

- |                      |           |           |
|----------------------|-----------|-----------|
| 1. 聲頻產生器             | 2. 喇叭（單體） | 3. 聲壓計    |
| 4. 示波器               | 5. 功率放大器  | 6. 方格紙    |
| 7. 鐵架                | 8. 麥克風    | 9. 電腦、印表機 |
| 10. 其它：①各類電線 ②重錘 ③耳塞 |           |           |

## 四、研究原理

(一)聲壓 (sound pressure,  $P$ )

空氣中的聲波爲壓力變化波，考慮某時刻，如圖所示：



聲壓級 (sound pressure level,  $L_p$ ) 的定義

$$\Rightarrow L_p = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} = 20 \log_{10} \frac{P}{2 \times 10^{-5}}$$

$L$  單位 dB,  $P$  為聲壓力值, 單位帕 ( $\text{Pa} = \text{Nt}/\text{m}^2$ ),  $P_0$  為聲壓基準值, 大小為  $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。

(二) 聲強 (sound intensity,  $I$ )

聲強為單位時間、單位面積通過聲音能量, 單位 ( $\text{Joule}/\text{sec} \cdot \text{m}^2$ )。

(三) 聲壓與聲強的區別

高中基礎理化課本 112 頁中所提的內容為聲音的強度。若要測量聲音的強度, 必須使用 2 個麥克風組合而成的聲音強度計, 才能測量出, 但市面上常看到的儀器為單一麥克風所構成的聲壓計, 卻只能量聲壓的大小, 但若假設聲波為平面波或球面波, 則可依下列式子, 找出聲強與聲壓的關係, 因而算出聲強。

以平面波為例

設平面波的聲波方程式  $P = A \sin(kx - \omega t)$

代入一維的聲音波動方程式  $\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t}$  (參考資料四)

( $\mu$  : 空氣分子振動速度  $\rho$  : 空氣密度  $c$  : 聲速)

$$\int \frac{\partial P}{\partial x} dt = -\rho u$$

$$- \frac{Ak}{\omega} \sin(kx - \omega t) = -\rho u$$

$$\because k = \frac{\omega}{c} \Rightarrow \frac{A}{c} \sin(kx - \omega t) = \rho u$$

$$\Rightarrow P = \rho c u \Rightarrow u = \frac{P}{\rho c}$$

將  $u = \frac{P}{\rho c}$  代入聲強定義  $I = Pu$

$$I = Pu = P \frac{P}{\rho c} = \frac{P^2}{\rho c} \text{ 所以 } I = \frac{P^2}{\rho c}$$

故當聲波的形式為平面波或球面波時，只要測出聲壓的大小，即可算出聲強的大小。

## 五、研究過程

(一)使用三個喇叭：

1. 找出固定能量輸入下，改變喇叭輸出頻率，對喇叭輸出聲壓級影響。
2. 找出喇叭發聲時，輸出波形失真情形。

根據以上兩點找出適合研究使用的喇叭及其最佳使用頻率範圍。

(1)使用裝置一A。

(2)記錄背景噪音值。

(3)使用一號喇叭。聲壓計置在喇叭正前方20cm處，在50Hz至5000Hz間，以每50Hz做為間隔，而在5000Hz至10000Hz間，以每100Hz為間隔，測量喇叭在不同輸出頻率之下，輸出聲壓級改變情形，得(表A-1)(圖A-1)。

(4)使用二號喇叭，重覆步驟2~3，得(表A-2)(圖A-2)。

(5)使用三號喇叭，重覆步驟2~3，得(表A-3)(圖A-3)。

(6)使用裝置一B。

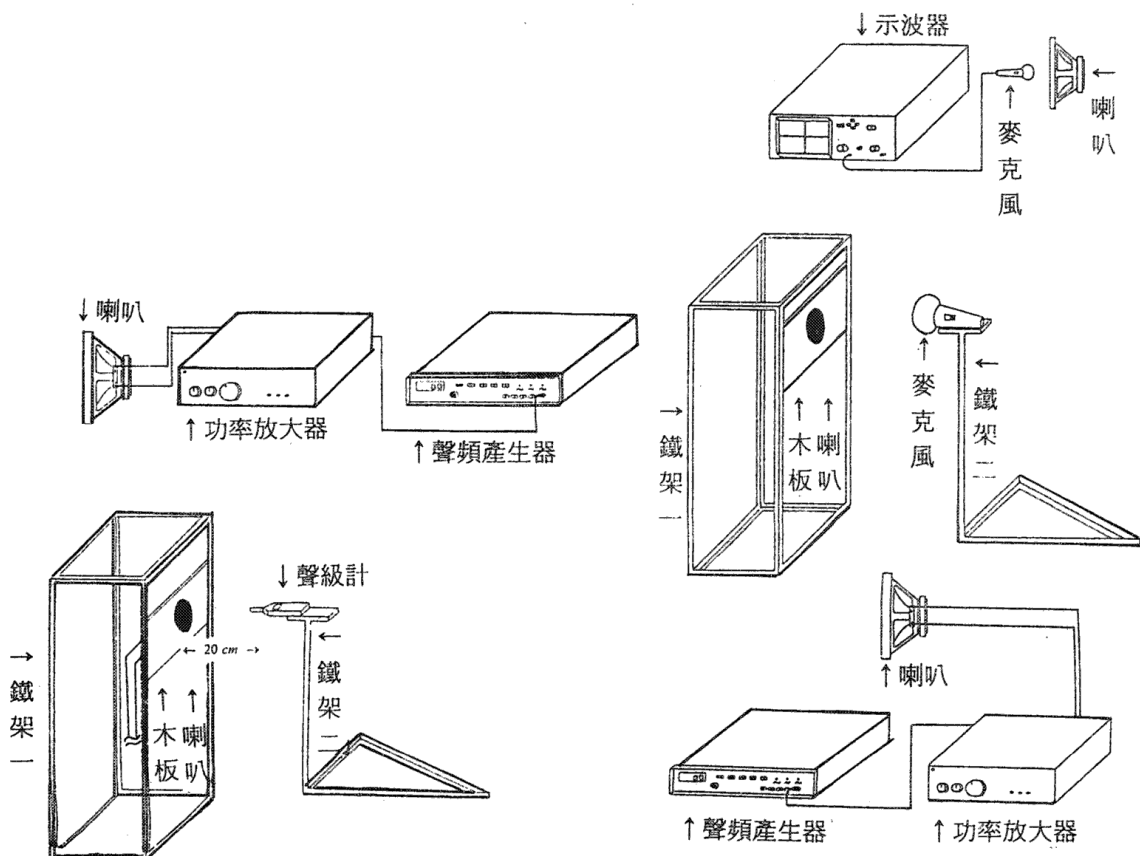
(7)使用一號喇叭，輸出的頻率分別為600Hz、1450Hz、2500Hz、3500Hz，將麥克風置於喇叭前20cm處，使用示波器檢視喇叭的輸出波形，並拍照記錄，得(照片1)~(照片4)。

(8)使用二號喇叭，重覆步驟7，得(照片5)~(照片8)。

(9)使用三號喇叭，重覆步驟7，得(照片9)~(照片12)。

(10)將聲頻產生器訊號直接輸入示波器，拍照記錄，得(照片13~16)。

(11)分析(圖A-1~3)及比較(照片1~16)，可見聲壓頻譜分布及輸出波形失真情形，依此選定適合的喇叭及其最佳使用頻率進行下個步驟實驗。



(裝置圖 1A)

(裝置圖 1B)

(二)輸出不同頻率的聲音，測量在相同半徑的圓周上所形成的聲壓。

- (1)使用裝置二。
- (2)記錄背景噪音值。
- (3)輸出頻率分別為600Hz、1450Hz、2500Hz及3500Hz，將聲壓計放置在以喇叭在方格紙上的投影點為圓心，1m為半徑的圓周上，每15°測量聲壓級的值，得(表B-1)。
- (4)重覆步驟2~3，測量半徑改變為2m，得(表B-2)。
- (5)重覆步驟2~3，測量半徑改變為3m，得(表B-3)。
- (6)將所得到數值經由聲壓級定義換算成聲壓

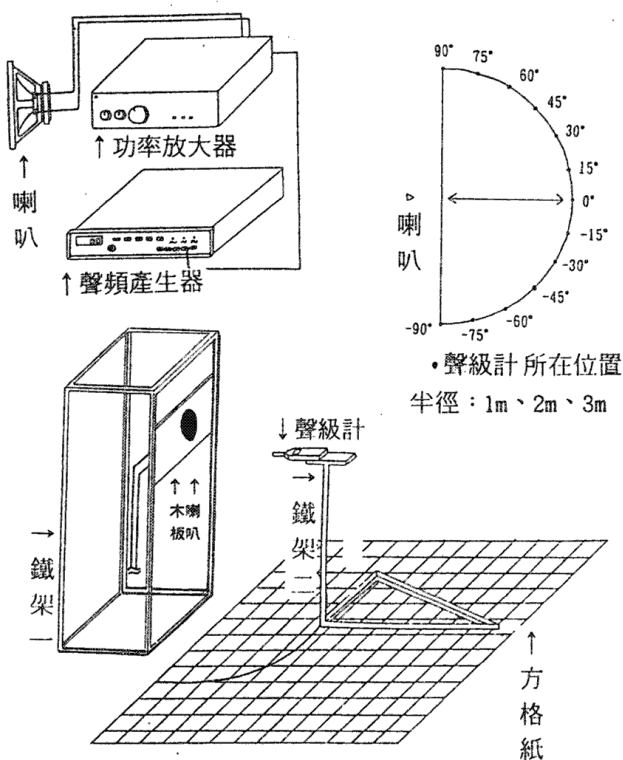
$$L_p(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad P_0 = 2 \times 10^{-5}$$

$$\Rightarrow P = 2 \times 10^{-5} \times 10^{(L_p/20)}$$

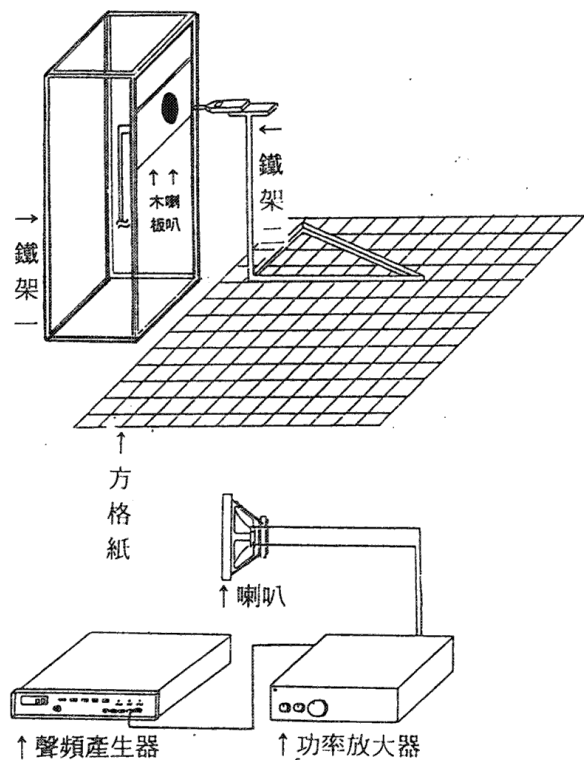
- (7)再畫出(圖B-1)~(圖B-3)。
- (8)取(表B-1~3)中，600Hz的數據，畫出(圖B-4)。
- (9)重覆步驟7，頻率改為3500Hz，畫出(圖B-5)。

(三)輸出不同頻率的聲音，自不同位置上，測出其聲壓，並畫出其等聲壓線。

- (1)使用裝置三（參照《裝置圖3》）
- (2)記錄背景噪音值。
- (3)輸出頻率600Hz，聲壓計置在方格紙方格點上方145cm處，測量方格點的聲壓級，得（表C-1），再由聲壓級換算成聲壓（公式同過程二、步驟6），畫出等聲壓線，得（圖C-1）。



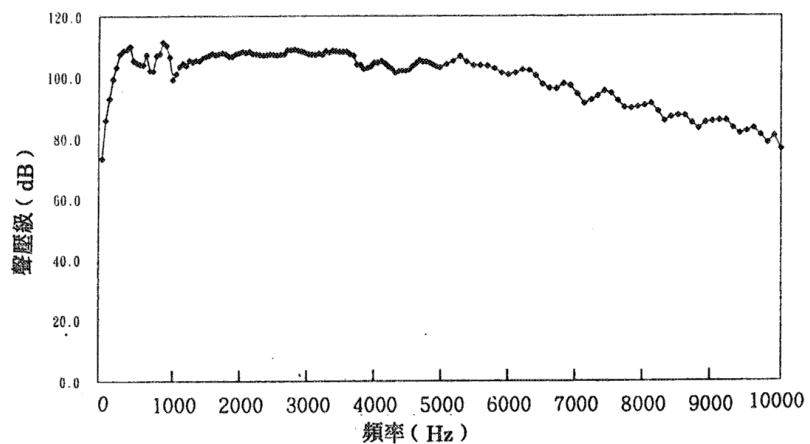
(裝置圖2)



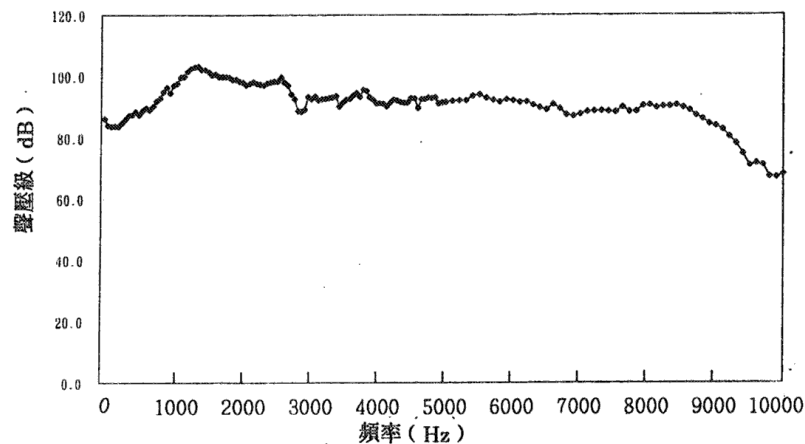
(裝置圖3)

- (4)重覆步驟2~3，頻率2500Hz，得（表C-2）（圖C-2）。
- (5)重覆步驟2~3，頻率3500Hz，得（表C-1）（圖C-3）。
- (6)將（圖C-1）~（圖C-3）重合，得（圖C-4），比較之。

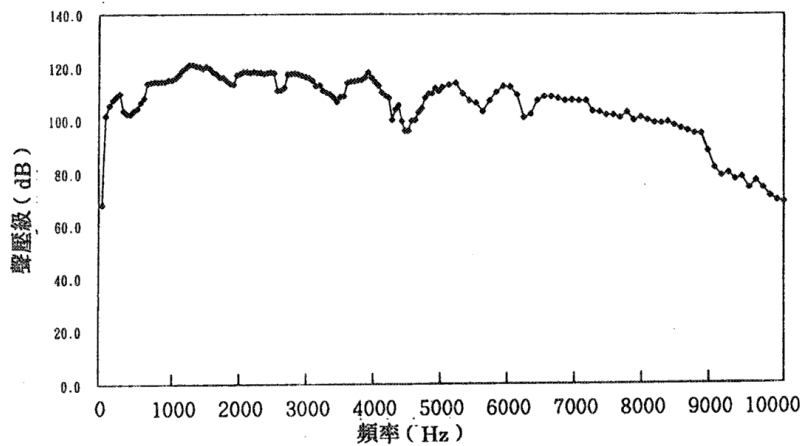
## 六、實驗照片、數據及圖表



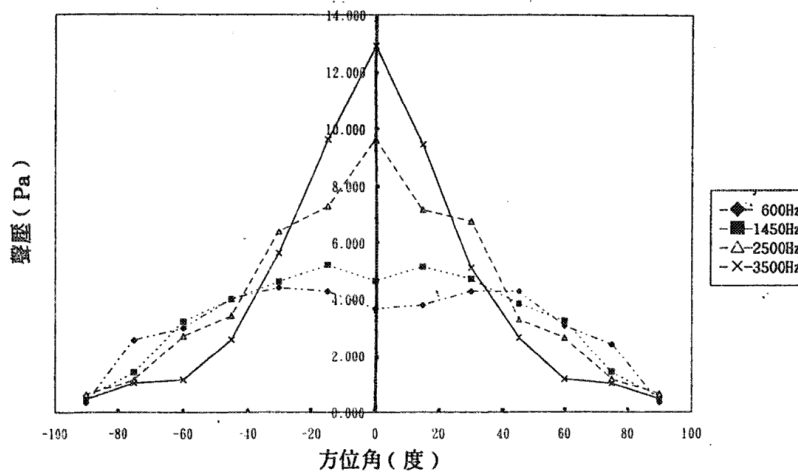
圖A-1 一號喇叭聲壓頻譜分布



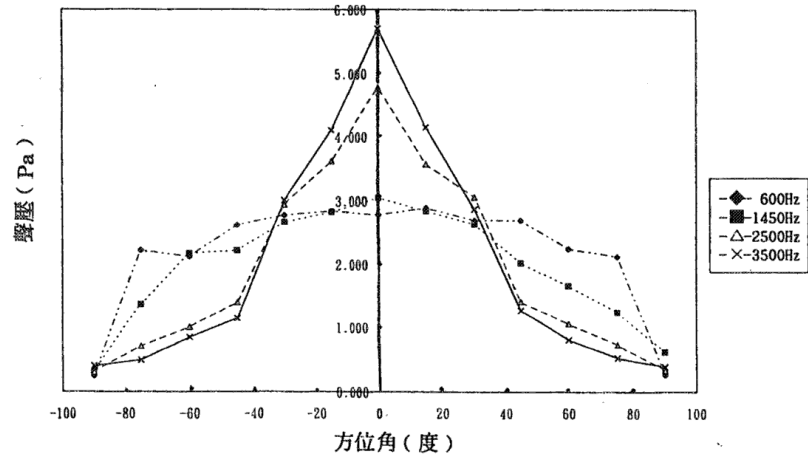
圖A-3 三號喇叭聲壓頻譜分布



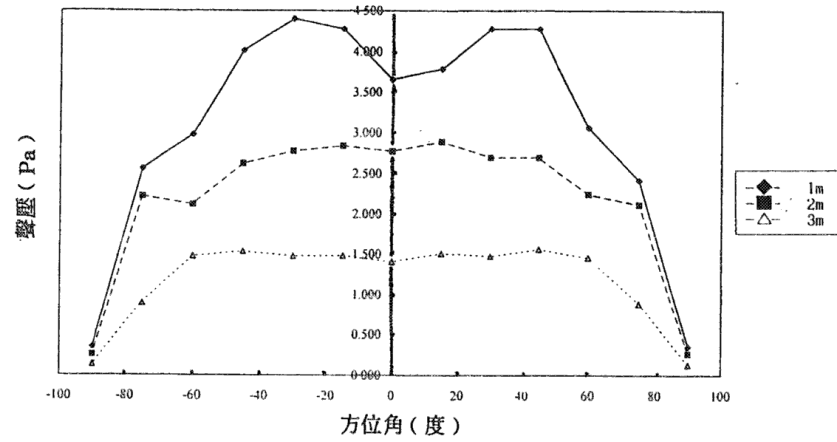
圖A-2 二號喇叭聲壓頻譜分布



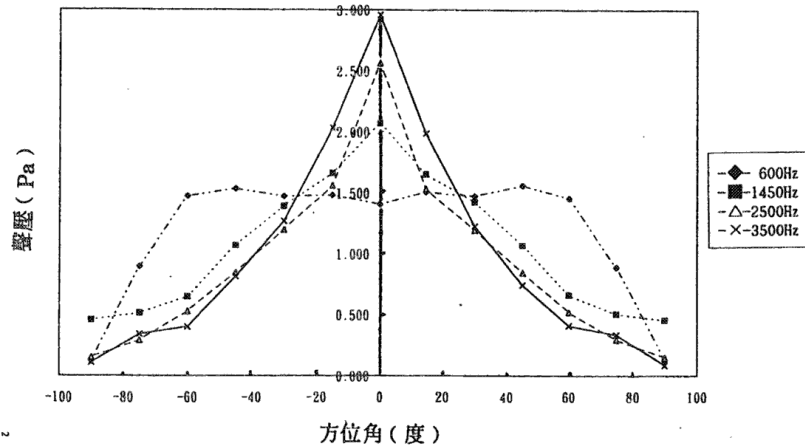
圖B-1 相同半徑 (1m) , 不同頻率聲音的聲壓分布



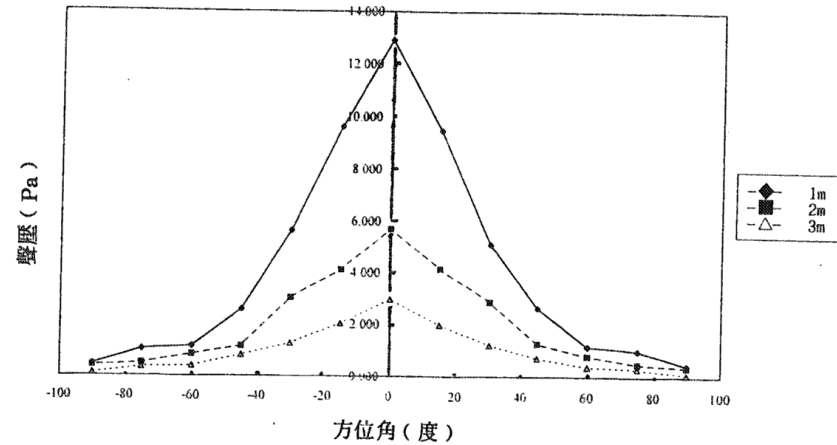
圖B-2 相同半徑 (2m)，不同頻率聲音的聲壓分布



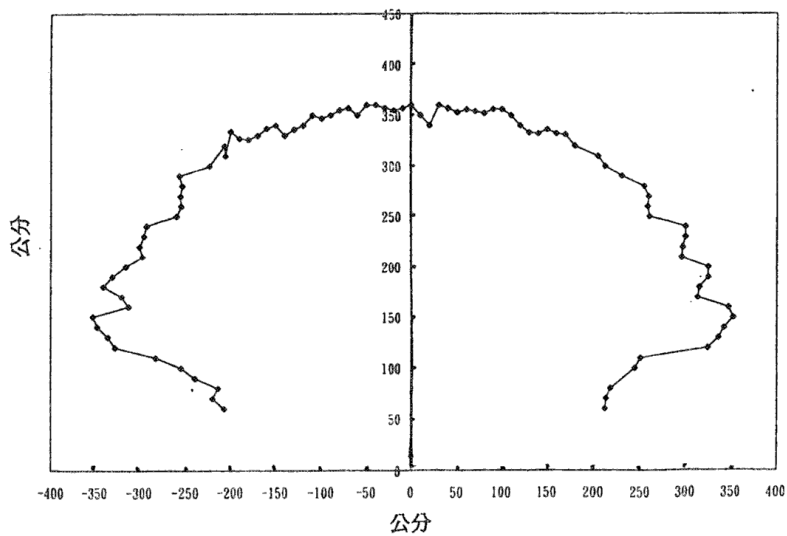
圖B-4 相同頻率 (600Hz)，不同半徑的聲壓分布



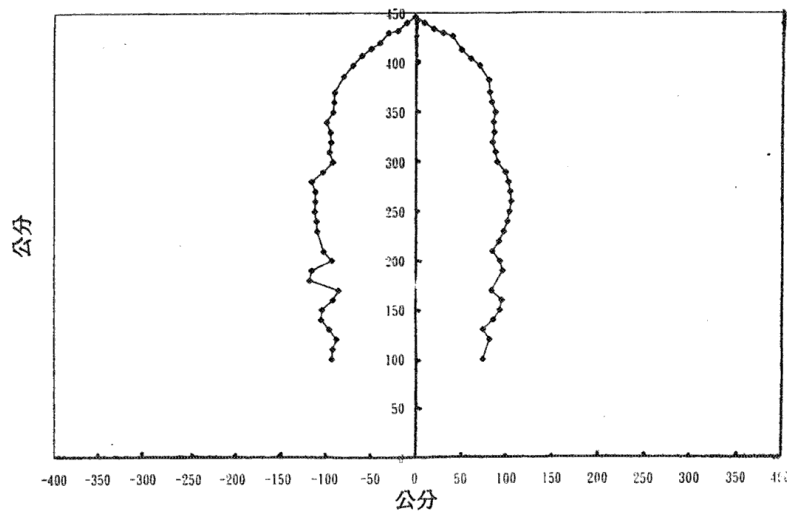
圖B-3 相同半徑 (3m)，不同頻率聲音的聲壓分布



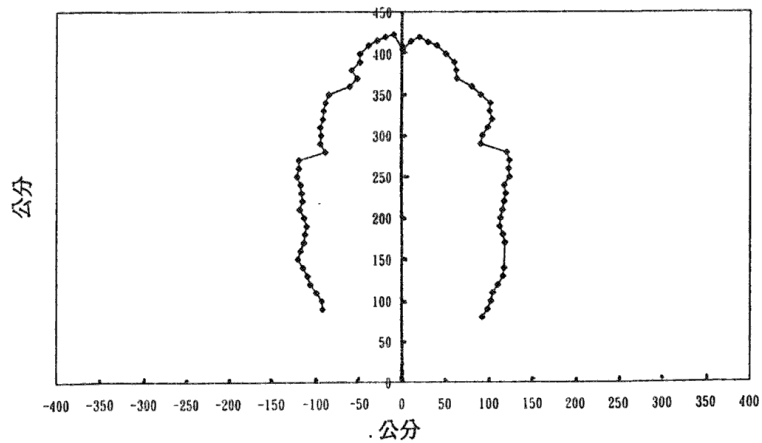
圖B-5 相同頻率 (3500Hz)，不同半徑的聲壓分布



圖C-1 600Hz, 1.262Pa (96dB) 等聲壓線圖

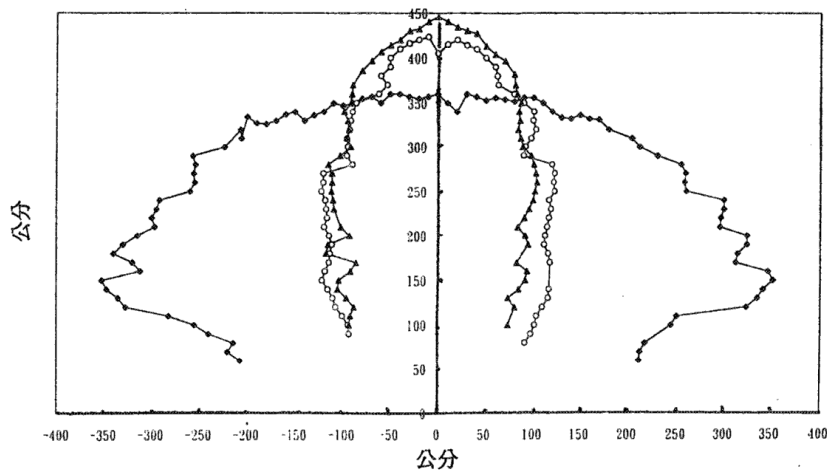


圖C-3 3500Hz, 1.262Pa (96dB) 等聲壓線圖



圖C-2 2500Hz, 1.262Pa (96dB) 等聲壓線圖

◆-600Hz -○-2500Hz -▲-3500Hz



圖C-4 600Hz, 2500Hz, 3500Hz, 1.262Pa (96dB) 等聲壓線圖



## 七、討 論

- (一)經測量，裝置中，鐵架共振頻率為76~78Hz，木板為32~34Hz，和實驗所用的頻率相差甚大，對實驗的影響不大。為減少支撐鐵架因喇叭發音所造成的振動，及振動產生的聲波干擾實驗，所以我們使用較重的鐵架作為支撐，以降低振動的大小。此外，喇叭、木板和鐵架接合處以泡棉和瓦楞紙板作為阻尼，以進一步阻絕振動。
- (二)裝置中，我們將喇叭和聲級計放置在鐵架上離地面145cm，是為減少地面反射波對測量造成的影響，加上實驗在室外進行，減少四週環境反射波造成的誤差，也因此實驗無法在室內進行。
- (三)裝置一中，為比較三喇叭品質，我們將喇叭和聲級計距離拉近為20cm，是為減少介質對不同頻率聲波有著不同程度影響所致。
- (四)裝置中將喇叭固定在木板上，隔開前後空間，是為避免「音壓短路」產生。一般解決的方法是加上音箱，而且音箱所產生的低頻共振也可彌補喇叭低頻的不足，但共振會影響實驗結果（討論 1），所以我們使用一塊大木板代替音箱，這樣子不但有相同的效果，也可以降低共振的產生。
- (五)背景噪音的影響方面，整個實驗背景噪音值（聲壓級）都在51dB~60dB間，根據聲壓級定義

$$L_p = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0}, P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

將背景噪音以最大值 $L_{\text{Noise}} = 60 \text{ dB}$ 代入，得 $P_{\text{Noise}} = 0.02 \text{ Pa}$ ，而實驗中喇叭發出的聲壓後百分之十的平均值 $L_{\text{speaker}} = 95.2 \text{ dB}$ （本數值並不包括裝置一中，5000Hz~10000Hz的聲壓值，因此一範圍以超過喇叭廠商的建議值），將其代入聲壓級定義，得 $P_{\text{speaker}} = 1.15 \text{ Pa}$ ，將兩者相除

$$\frac{P_{\text{Noise}}}{P_{\text{speaker}}} = \frac{0.02}{1.15} = 0.017 = 1.7\%$$

得背景噪音為待測噪音的1.7%以下，影響可忽略不計。

- (六)為減少喇叭及擴大機品質對實驗結果的影響，我們進行過程一，觀察喇叭定功率輸出下，聲壓頻譜分布及輸出波形失真情形，選出所需的喇叭及其最佳的頻率範圍。由(表A-1~3)(圖A-1~3)，可見到一號喇叭聲壓頻譜分布情形要較二號及三號喇叭穩定；由(照片A-16)中，可看出一號喇叭幾忽沒有失真的情況發生，所以我們選定一號喇叭及使用600Hz、1450Hz、2500Hz，及

3500Hz等四個頻率以進行下一個步驟的實驗。

- (七)由過程二所得(表B-1~3)(圖B-1~3),可發現一個趨勢:聲音頻率越高,在方位角較小的地方(如 $0^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ ),所測得聲壓較高;而較低頻率聲音此現象則不明顯,其聲壓大小受方位角的影響不大。
- (八)過程三中,我們測量並記錄了許多聲壓級的數據,而為了畫出等聲壓線圖,必需要對其中數據進行內插。但我們使用聲級計測得數值,為經過對數換算聲壓級(請參見實驗原理一),無法直接進行內插,所以我們先將所測得的聲壓級換算成聲壓後,再進行內插,以求出 $1.262\text{ Pa}$ ( $96\text{ dB}$ )的等聲壓線(請見<圖C-1~4>)。
- (九)由過程三所得到的(圖C-1~4),可明顯看出頻率高的聲音,其等聲壓線分布情形和低頻的聲音有著明顯不同:頻率高者,其等聲壓線在方位角小的地方離聲源較遠,而方位角越大,等聲壓線就越向聲源靠近;但低頻的聲音,其等聲壓線和聲源的距離並不因方位角的變化而產生太大改變。

## 八、結 論

根據實驗結果,我們可以獲得下列結論:

- (一)聲音頻率越高,聲壓的方向性越明顯,亦說明了高音喇叭的擺放要相當講究。
- (二)就距離而言,聲音頻率高者,其聲壓的方向性不因距離增加而改變;但低頻者,其聲壓的方向性卻隨距離的增加而變得更不明顯。所以對通常的音樂演奏會或演唱會,因觀眾的距離較遠,高音的方向性值得特別注意。
- (三)較貴的喇叭,在定功率輸出下及固定距離處,其聲壓頻譜要比價錢低的喇叭來的穩定,輸出也幾忽沒有失真,亦即品質較佳,驗證了一分錢,一分貨。

## 九、應用與展望

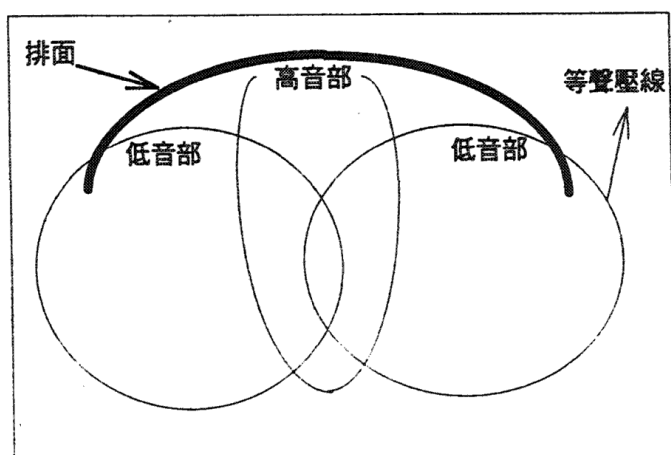
(一)聲樂上的應用

得到以上結論,我們突然想到:不知這一結論對其它的聲源是否適用?於是我們訪問合唱團指導老師,她根據以往帶合唱團的經驗表示:「女高音部(soprano)在合唱團中所唱音高最高,其聲音在正面聽起來,要比唱其它部的同學來的明顯大聲,而且可傳到正面很遠處。若離開正面,聲音就會明顯下降。此現象隨著演唱音高降低而漸不明顯,而對團中演唱音階最低的男低音(bass)而言,在正面相同距離聽來,其音量明顯比女高音小,但卻不因方向改變而降低,在廣泛的範圍內都可聽到,但傳的並沒有像女高音如此之

遠。」

由上所述可知結論一對人聲也適用。因此我們可以對合唱團團員所站立的位置提出以下建議：

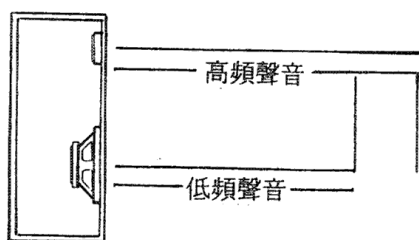
合唱團隊型應為弧形，低音部在左右兩側，高音部在中間（下圖），如此一來，欣賞者只要站在合唱團前方一定的範圍內，就可以到最好的聆聽效果。



(圖：合唱團聲部位置分佈)

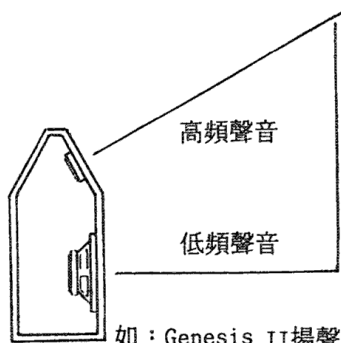
## (二)音響設計的應用

根據我們參考最近幾年的音箱外形設計，發現一個趨勢，可由（圖9-1）～（圖9-4）看出。



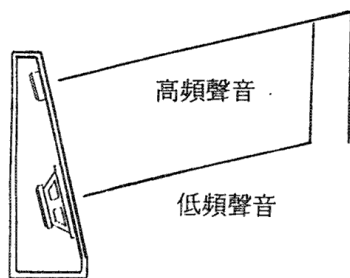
如：一般喇叭

(圖9-1)



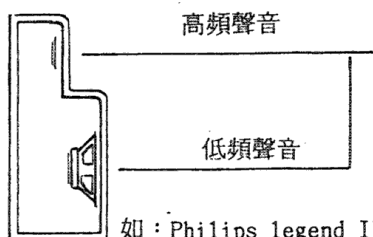
如：Genesis II揚聲器

(圖9-2)



如：THIEL全系列揚聲器  
、Primadonna Gold

(圖9-3)



如：Philips legend II揚聲器

(圖9-4)

圖中可看出，高音喇叭位置漸趨向位於低音喇叭之後，和（結論一）比較，可發現此種設計方式，可使高低聲頻等聲壓線的位置更接近，也就是說，欣賞者所聽到的聲音，其高低音響度大小更接近原音，不會有高音過強或低音太大聲的缺點，符和實驗結果。而這幾款喇叭在音響雜誌上的評語也都不錯，所以本實驗結果可以為此種音箱設計提供更多的依據，也可以作為其他廠商設計上的參考。

## 十、參考資料

1. 大學物理學（下冊），p.830~p.872。Marcelo Alonso、Edward J. Finn原著，孫邦治、柯順德、程惠波、唐玉聲譯。大中國圖書公司，民國60年。
2. 新世紀物理研習叢書—聲學漫談，p.1~p.61, p.140~p.193馬大猷、楊訓仁著，牛頓出版公司，民國85年。
3. 環境噪音控制工程，p.1~p.100，鄭長聚、洪宗輝、王謨賢、章力著，科技圖書股份有限公司，民國84年。
4. 現代音響科學，p.230~p.234，梁東源著，復漢出版社，民國86年。
5. 噪音工學的基礎，p.10~p.12，中野有朋著，黃忠良譯，復漢出版社，民國85年。
6. 音響與音樂雜誌，民國85年1月份~民國86年1月份。

## 評 語

作者探討揚聲器所發聲音之方向性與頻率之關係，對揚聲器基本反應特性之了解的預備工作，及為求精確測量的實驗設計，考慮周到。結果具實用價值。