

揚聲器振膜的振動與輻射行為

1 本次實用訓練的目標

- 了解在模擬揚聲器高頻段所採用的分佈參數需求
- 應用雷射掃描技術到電聲換能器
- 解釋模態分析的結果
- 重新複習聲波輻射與傳播的基本理論
- 完成聲波輻射的分析
- 針對揚聲器品質評估與設計選擇發展相關的診斷技術

2 需求

2.1 與會者過去的知識背景

建議在開始本次的訓練課程前先行完成 *Klippel Training 1 “Linear Lumped Parameter Measurement”*。

2.2 最小的需求

本次訓練的目的在於無須完整的 KLIPPEL 量測硬體前提下，利用 Klippel database (.ksp)所提供的量測結果玩成本次的訓練內容。這些資料可從 www.klippel.de/training 網站上下載 *SCN Analysis Software* (2.0.11版本以上)以及量測軟體 *dB-Lab* 獲得，並且將其安裝在個人電腦中。

2.3 功能需求

假設與會者有 KLIPPEL R&D 量測系統，建議針對與會者所提供的換能器完成部分量測。為了完成這些量測，你仍需要以下額外的軟硬體：

- 掃描控制硬體
- 3D 掃描器
- 失真分析器(Distortion Analyzer ; DA2)
- 雷射感測器+控制器
- 放大器
- 固定架(Driver Stand)

3 訓練過程

1. 閱讀相關理論並重新獲得本次訓練所須的知識
2. 觀看示範影片來學習實務量測的部分
3. 回答預備的問題藉以確認對於內容之了解有多少
4. 依循著教材來解釋說明資料庫內的結果以及回答複選的問題(off-line)
5. 利用傳送你的回答到 www.klippel.de/training 網站上的匿名評分系統藉以確認你的答案
6. 將會收到內含有「**Certificate of Mastery, Knowledge or Participation**」的電子郵件(看參與者的表現)
7. 在有硬體的條件下針對換能器完成相關功能的量測

4 簡介

在低頻段，揚聲器的驅動與機械系統可利用集中參數的等效電路加以模擬。在端子的電訊號(電壓 u 與電流 i)產生電動力(F_{coil})，進而驅動移動的質量(M_{ms})、懸吊系統的勁度(K_{ms})以及機械阻(R_{ms})，進而產生音圈速度(v_{coil})。在一維的訊號路徑中，電訊號(如電壓 u)與機械訊號(如速度 v)組合成語音訊號的轉換函數(訓練1)。在高頻段，一個分佈參數模型是有許多的參數組合而成，而且需要所謂的狀態變數來描述振膜與懸吊系統的振動。在輻射面積上任一點(\mathbf{r}_c)法向上的速度($v(\mathbf{r}_c)$)產生進場與遠場的聲壓 $p(\mathbf{r}_n)$ 與 $p(\mathbf{r}_a)$ 。

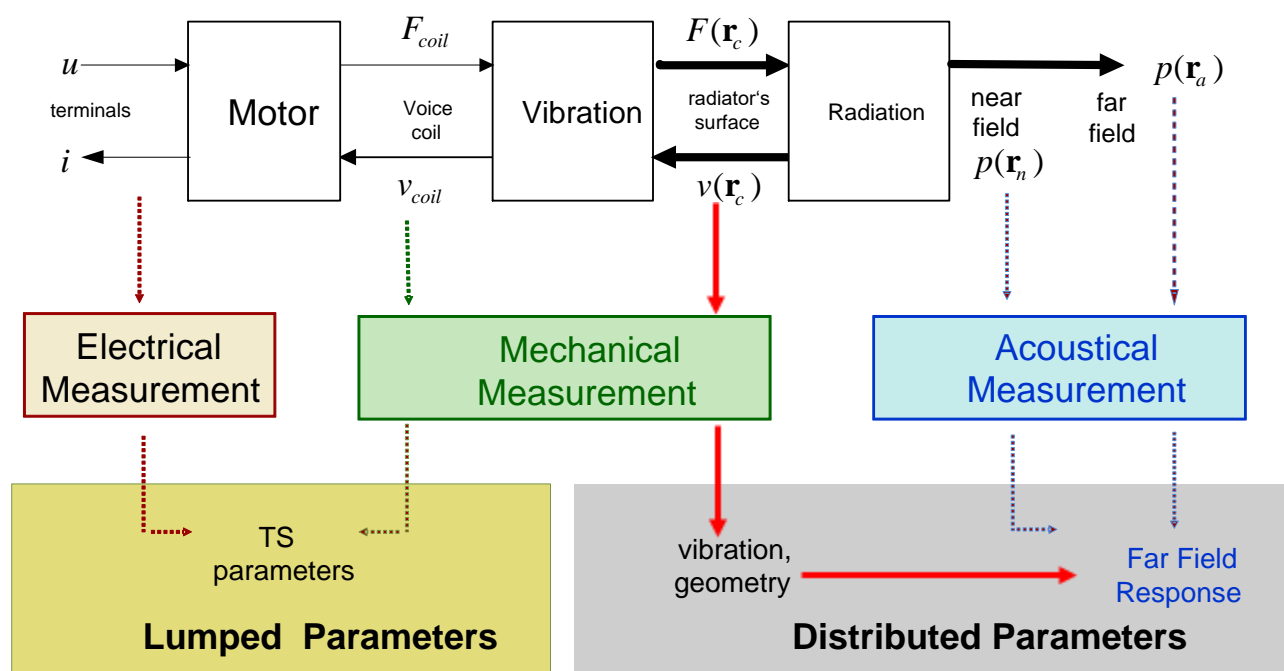


圖 1: 揚聲器參數

雖然機械振動在聲音的播放上扮演著一個重要的角色，但是在過去來說，對於它的量測遠比輸入電訊號與輸出聲音訊號來得困難。近代的雷射掃描技術在量測振膜的機械振動與幾何形狀上具有相當高的精確度。SCN Analysis Software 具有量測到資料的圖像以及動畫顯示，如可提供一個新的振膜振動分析型式以及輻射聲壓的預測。

4.1 位移轉換函數

雷射掃描將提供複雜的轉換函數

$$\underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c) = \frac{\underline{X}(j\omega, \mathbf{r}_c)}{\underline{U}(j\omega)} \quad (1)$$

在揚聲器端子的電壓訊號(u)以及在輻射面上任一點(\mathbf{r}_c)位置的位移(x)

紀錄正確的量測點位置以及描述振膜表面的幾何形狀；端賴不同的應用範疇(示範影片)，量測格線上的掃描點數變化將從50到3200。

圖 2 是一個揚聲器轉換函數的例子。紅色箭頭描述了低音揚聲器在 $f_s \approx 50$ Hz 處的共振頻率。在這個共振頻率以下，由於整體的激發力量將遵循懸吊系統假設勁度為常數的條件下，換能器將會產生相同的音圈位移。在共振頻率以上，將會產生近似 12 dB/octave 的衰減；在 1 kHz 以上，由於振動膜上產生模態分裂進而產生明顯的差異；此部分將在後續進行詳細的說明。

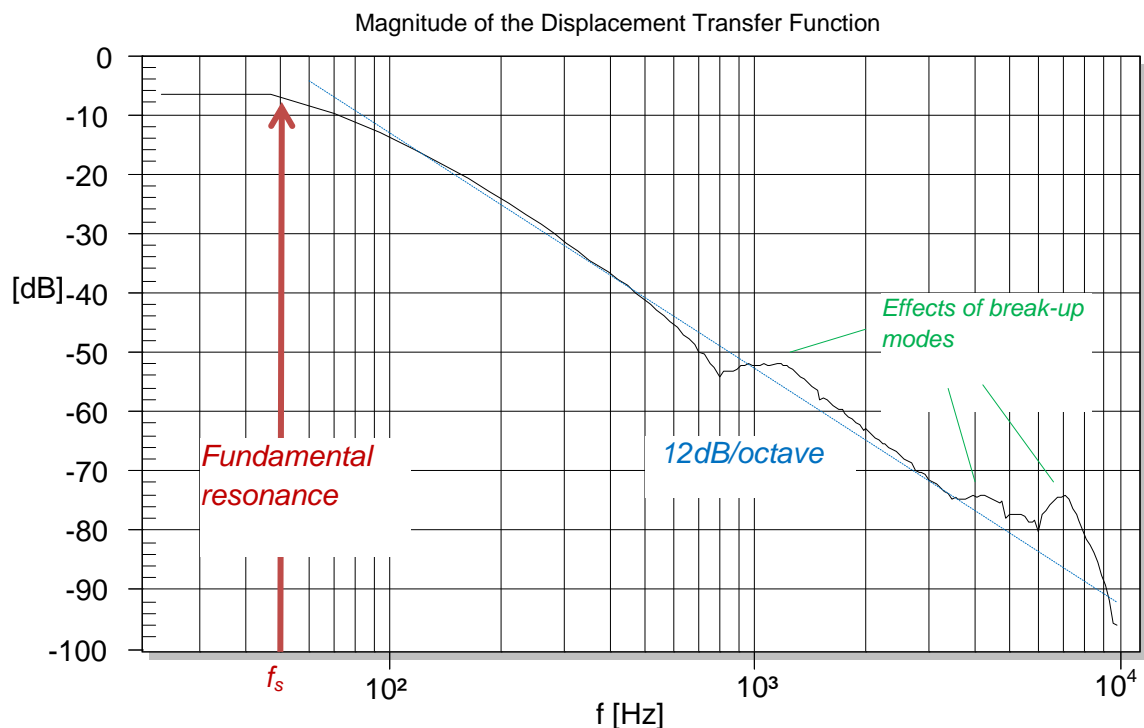


圖 2: 轉換函數 $\underline{H}_x(j\omega, r_c)$ 在輸入電壓與點 r_c 位移的大小

4.2 累積加速度大小(Accumulated Acceleration Level)

輻射源的振動大小可被概述總結成一個參數-累積加速度大小(Accumulated Acceleration Level ; AAL)-代表之，主要定義如下：

$$AAL(\mathbf{r}_a) = 20 \log \left(\frac{p_{aa}(\mathbf{r}_a)}{\sqrt{2} p_o} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

利用聲壓位能

$$p_{aa}(\mathbf{r}_a) = \frac{\rho_0 \omega}{2\pi} \int_{S_c} \frac{|\underline{v}(\mathbf{r}_c)|}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} dS_c \quad (3)$$

以及

ρ_0 空氣密度

S_c 振動膜表面

r_c 表面元素 dS_c 中的一點

r_a 遠場的觀測點

p_0 參考聲壓

以及速度

$$\underline{v}(j\omega, \mathbf{r}_c) = j\omega \underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c) \underline{u}(j\omega) \quad (4)$$

利用端子電壓(u)以及雷射掃描獲得的轉換函數($H_x(j\omega, \mathbf{r}_c)$)表示之。

在忽略由於位移($|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|$)所造成的相位以及只考量速度(v)的大小的前提下，聲壓位能(p_{aa})代表了在遠場一點(\mathbf{r}_a)的最大聲壓。因此，AAL 總會大於圖 3所顯示的聲壓級(Sound Pressure Level ; SPL)。

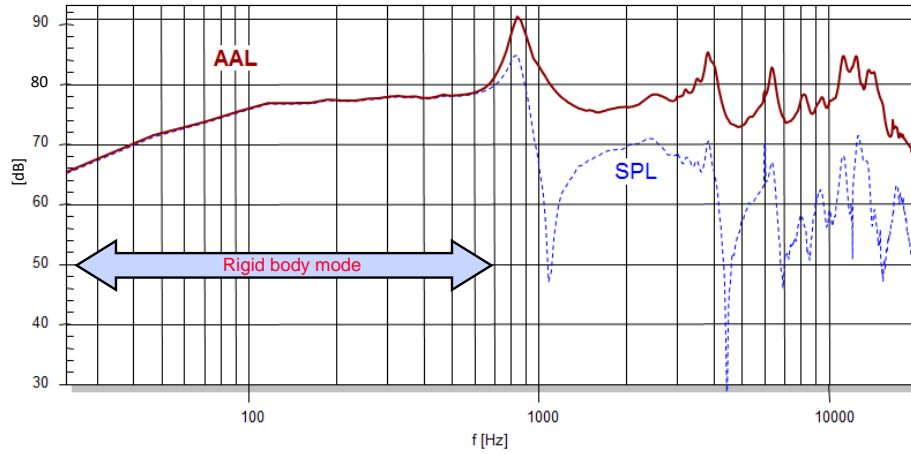


圖 3: 在相同的觀測點(\mathbf{r}_a)比較 AAL 與 SPL 曲線

在尚未發生模態分裂(800 Hz ; 圖 3)的低頻段，SPL 與 AAL 相同；而在高頻段，AAL 明顯的在振膜模態共振處會產生峰值；相反地，SPL 的變化顯示了在高頻段明顯的谷值(dips)，這些谷值的位置主要是聲壓輻射產生破壞性干涉知結果。

4.2.1 模態分析

AAL 變化的峰值與類似於基頻共振頻率點(f_s)的分佈模態共振相同。自然頻率相互間有正交化(orthogonal)的關係，因此可利用級數展開的方式表示

$$\underline{a}(\mathbf{r}_c) = \sum_{i=0}^{\infty} \underline{H}_i(j\omega) \psi_i(\mathbf{r}_c) \quad (5)$$

其中 $\psi_i(\mathbf{r}_c)$ 描述了振動模態以及 $\underline{H}_i(j\omega)$ 的局部分佈狀況；而每一個振動態的頻率響應為：

$$\underline{H}_i(j\omega) = \frac{\omega^2}{1 + \eta_i j\omega / \omega_i - (\omega / \omega_i)^2} \quad (6)$$

模態損失因子

$$\eta_i = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_i} = \frac{f_2 - f_1}{f_i} \quad (7)$$

在得到圖 4所顯示的3 dB 頻寬($f_2 - f_1$)後，可獲得自然頻率(ω_i)。

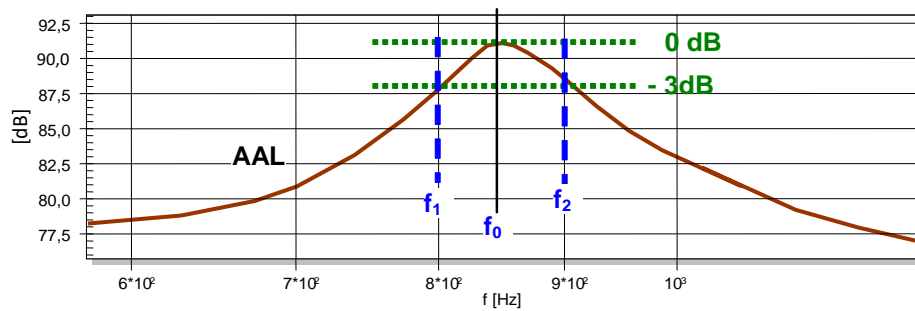


圖 4: 在 AAL 曲線上獲得 3 dB 頻寬大小

4.2.2 軸對稱分解(Axial Symmetrical Decomposition)

倘若揚聲器振膜為圓形，則所有的振動將可拆解成徑向(radial)與周向(circumferential)兩部份。徑向上的模態傳播可針對速度(v)除以周向角度(φ)後所獲得的徑向速度利用取平均的方式計算獲得，如圖 5。而周向的模態則是總振動量與徑向振動量的差值：

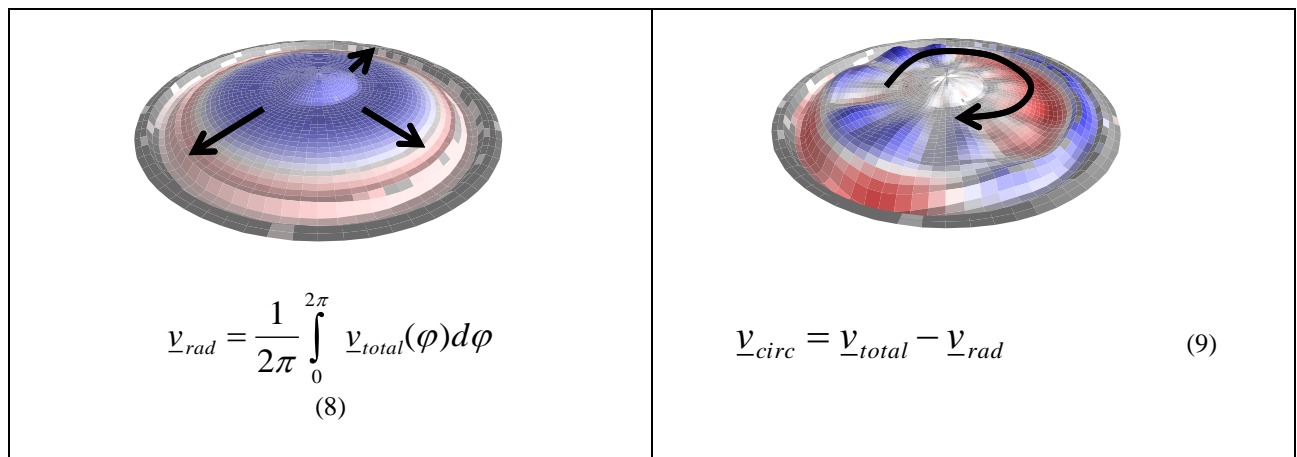


圖 5: 在圓形振膜換能器上分離徑向與周向模態

圖 6. 顯示周向模態的 AAL 將會隨著頻率的增加而提高。具有高振幅量的周向模態將會產生顯著的非線性失真，但是卻會降低軸向(on-axis)的 SPL。然而，周向模態將會在低指向索引(Directivity Index ; DI)上產生顯著的旁瓣(side lobes)。最低的周向大小式在搖擺模態處，此處可能對導致音圈在溝槽上的摩擦。

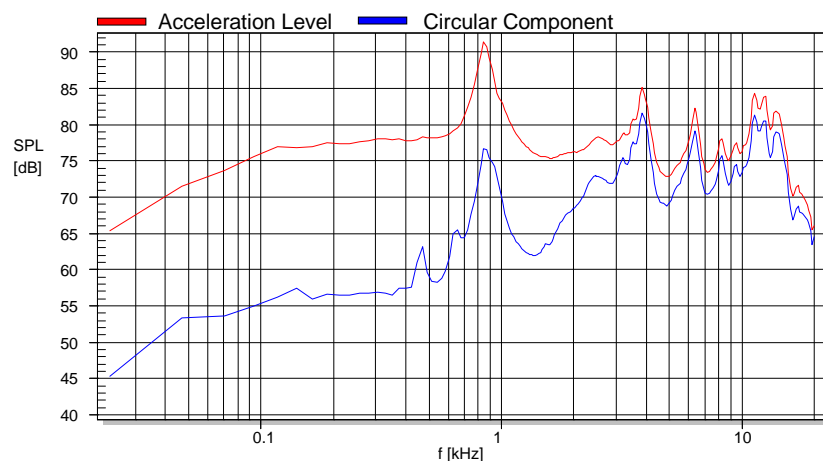


圖 6: 總振動(紅色)與周向模態(藍色)的 AAL 與頻率間的關係

4.3 聲波輻射

利用單極聲源型式(monopole)的振動速度(v)與相對應的面積(dS_c)所組成的體積流, $dQ = v(\mathbf{r}_c)dS_c$, 即可透過計算振動面上(S_c)每個點(\mathbf{r}_c)的聲輻射, 進而獲得振動面(S_c)對於觀測點(\mathbf{r}_a)所產生的聲壓($p(\mathbf{r}_a)$)。

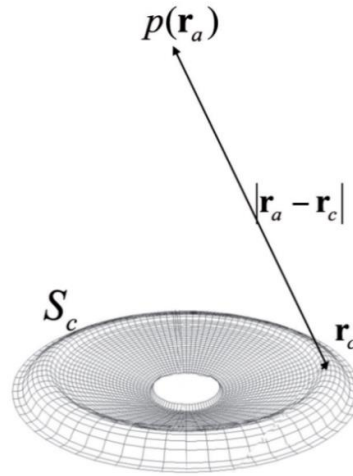


圖 7: 聲輻射可利用在振膜表面所形成的單極(monopoles)型式模擬之

假設輻射源的面積是固定在障板上, 則在遠場一點(\mathbf{r}_a)的總聲壓可利用 the first Rayleigh integral (10)針對所有單極聲源的分佈進行積分計算得之

$$\underline{p}(\mathbf{r}_a) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \int_{S_c} \frac{v(\mathbf{r}_c)}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} e^{-jk|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} dS_c \quad (10)$$

ρ_0 為空氣密度。指數項($e^{-jk|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|}$)產生相位的偏移, 這個相位偏移的原因是由於聲波由源點到觀測點傳播所須的時間所造成。分母項($|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|$)主要描述聲波隨著聲源與觀測點距離的增加產生衰減的現象。SPL 利用以下公式加以定義:

$$SPL(\omega, \mathbf{r}_a) = 20 \log \left(\frac{|p(j\omega, \mathbf{r}_a)|}{\sqrt{2}p_o} \right) \text{ dB} \quad (11)$$

p_o 為參考聲壓。

4.3.1 波束方向圖(Beam Pattern)

圖 8. 是一個波束方向圖, 它是在遠場球面方位角(azimuthal angle ϕ)與高度角(elevation angle θ)相對聲壓的變化量。

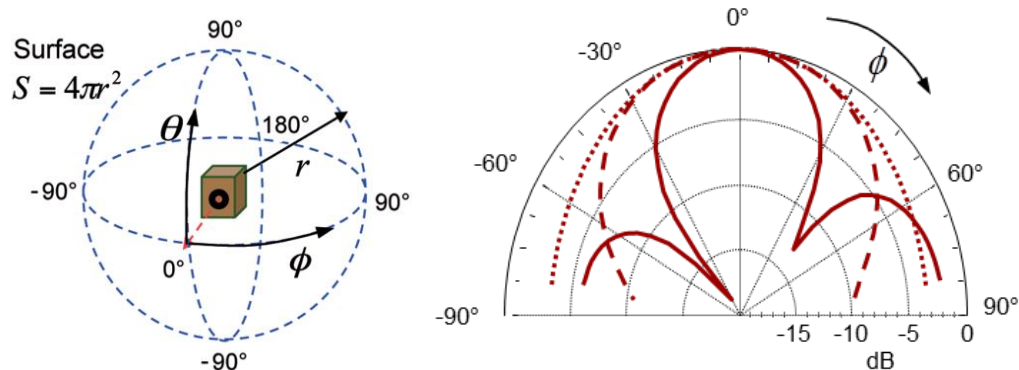


圖 8: 波束方向圖

波束方向圖的定義如下：

$$b(\theta, \phi) = 20 \log H(\theta, \phi) dB = 20 \log \left(\frac{p(r, \theta, \phi)}{p(r, 0, 0)} \right) dB \quad (12)$$

類似方向因子($H(\theta, \phi)$)的大小一樣，這是一個在觀測點位置為 $\{\phi, \theta, r\}$ 的聲壓($p(r, \theta, \phi)$)與在距離(r)的軸向聲壓($p(r, 0, 0)$)兩者的比例關係。因此，軸向聲壓級($SPL_{ax}(r)$)可描述如下：

$$SPL_{ax}(r) = 20 \log \left(\frac{p(r, 0, 0)}{p_o} \right) dB \quad (13)$$

4.3.2 聲功率

遠場中，聲源輻射的總聲功率(Π)可以利用在位置 $\{\phi, \theta\}$ 處表面(S)的平均平方聲壓結果進行積分後獲得，方程式如以下所示：

$$\Pi = \frac{1}{\rho_0 c} \int_S p(r, \theta, \phi)^2 dS \quad (14)$$

c 為聲速。聲功率級(L_{Π} ，in dB)定義如下：

$$L_{\Pi} = 10 \log_{10} \left(\frac{\Pi}{P_0} \right) dB \quad (15)$$

$P_0 = 10^{-12}$ W 為參考聲壓。

4.3.3 指向性

指向性定義如下：

$$D = \frac{S}{\int H^2(\theta, \phi) dS} \quad (16)$$

並推導指向性索引(Directivity Index ; DI，in dB)

$$DI = 10 \log_{10}(D) dB \quad (17)$$

描述聲源的波束。對於一具有全向性輻射特性的單極聲源來說，DI 為0 dB。

控制一個在無窮大障板上的輻射聲源(如振膜)並輻射到半空間中，觀察一距離聲源與觀測點距離為 $r \approx 0.4$ m 處，則此處的聲壓與聲功率的 DI 是不一樣的：

$$DI \approx SPL_{ax}(r = 0.4m) - L_{\Pi} \quad (18)$$

圖 9.顯示了聲源在障板上最重要的三條曲線關係。低頻段(聲波波長遠大於幾何長度)，由於輻射源振動為類似剛體運動使得揚聲器產生一個全向性的輻射圖，使得這三條曲線大小皆相同。高頻段，由於模態分裂產生，聲波的相消造成了 AAL 與 SPL 的差異。而高頻處軸向 SPL 與聲功率的差異與上升的 DI 以及聲源波束相同。

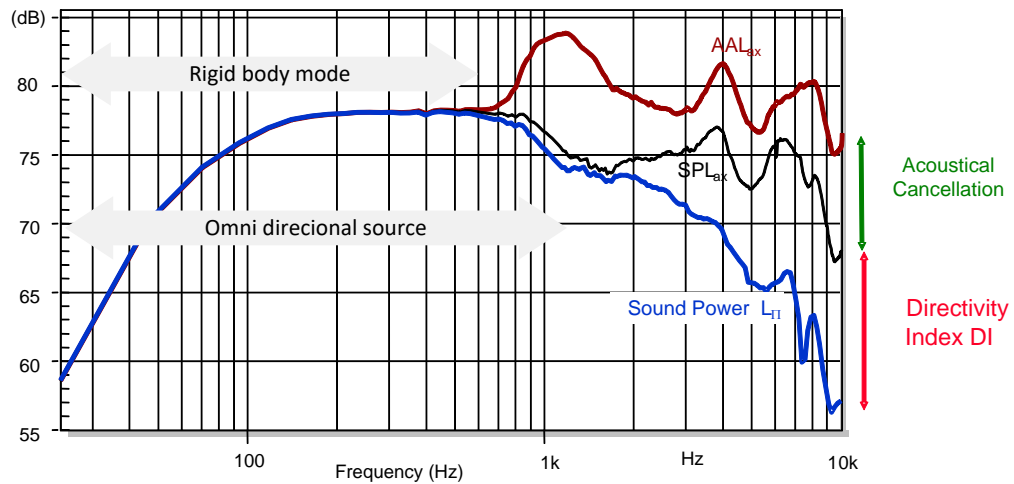


圖 9: 一輻射聲源在障板上距 $r = 0.4 \text{ m}$ 處的 AAL, 聲功率與軸向 SPL

4.3.4 聲壓相關的分解(Sound-Pressure-Related Decomposition)

為了解釋聲波箱消，將總振動分解成三個振動分量的方式是相當有用的：

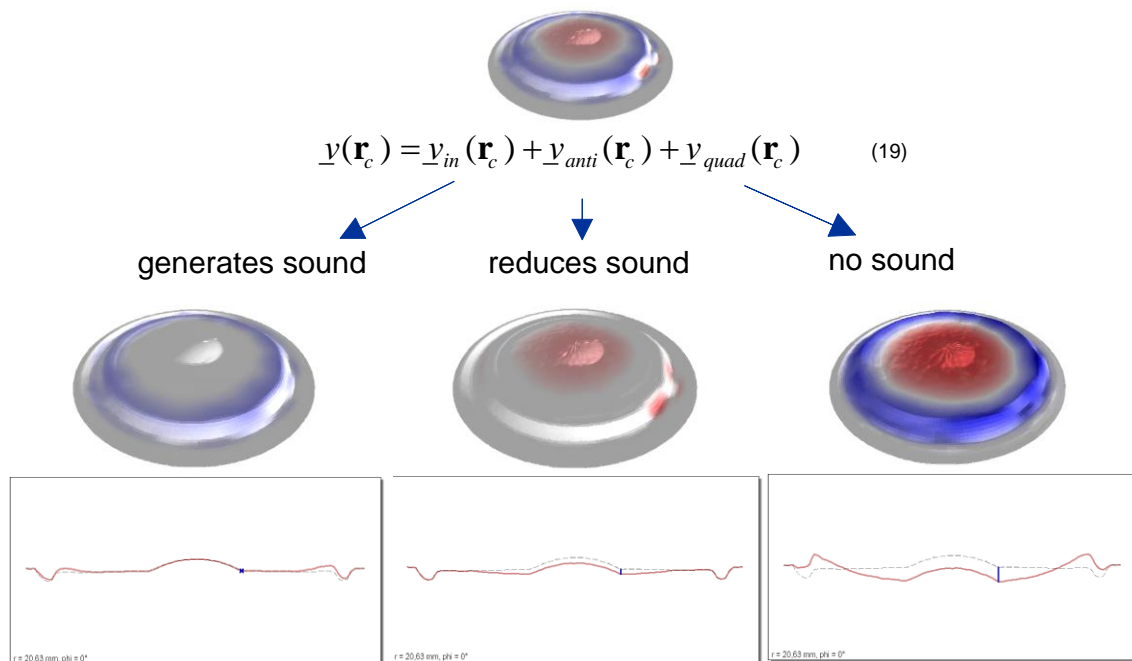


圖 10: 聲壓相關的分解

同相(in-phase)的成份($v_{in}(\mathbf{r}_c)$)對觀測點(\mathbf{r}_a)的聲壓($p(\mathbf{r}_a)$)是有建構性的貢獻。反相(anti-phase)的成份($v_{anti}(\mathbf{r}_c)$)是一種破壞性的貢獻，並會造成聲壓($p(\mathbf{r}_a)$)的降低。求積(quadrature)的成份($v_{quad}(\mathbf{r}_c)$)可以利用輻射源面上其它點的貢獻完全補償，並且不會影響到觀測點(\mathbf{r}_a)的聲壓($p(\mathbf{r}_a)$)。KLIPPEL 工程海報上的“Loudspeaker Sound Radiation”對於分解的方法有詳細的描述說明。

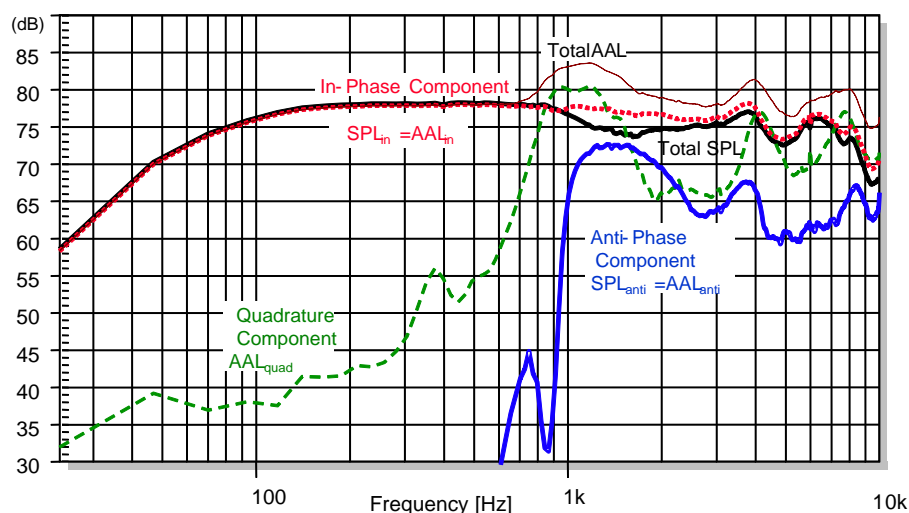


圖 11: AAL 與 SPL 的聲壓比較

三個振動的分量可利用圖 11對於 AAL 與 SPL 的比較進行更詳細的說明：

1. 同相的 $SPL_{in}=AAL_{in}$ 可大於 SPL 但不會超過總 AAL。在振膜分裂前，也就是不考慮反相成份與求積成份的條件下，這些曲線都會同時產生。
2. 反相的 $SPL_{in}=AAL_{in}$ 在模態分裂頻率(此處為 1 kHz)會快速的上升，但不會超過同相 $SPL_{in}=AAL_{in}$ 的值。
3. 求積成份不會產生聲壓，但是 AAL_{quad} 可以超過同相的成份。在 380 Hz 的峰值描述的是搖擺模態。

4.3.5 聲波的抵消

倘若在不能忽略反相成份以及在同相 SPL_{in} 與反相 SPL_{anti} 的差異如圖 12所示小於 10 dB 時，SPL 曲線上明顯的谷點(dips)是由聲波的抵消所造成。

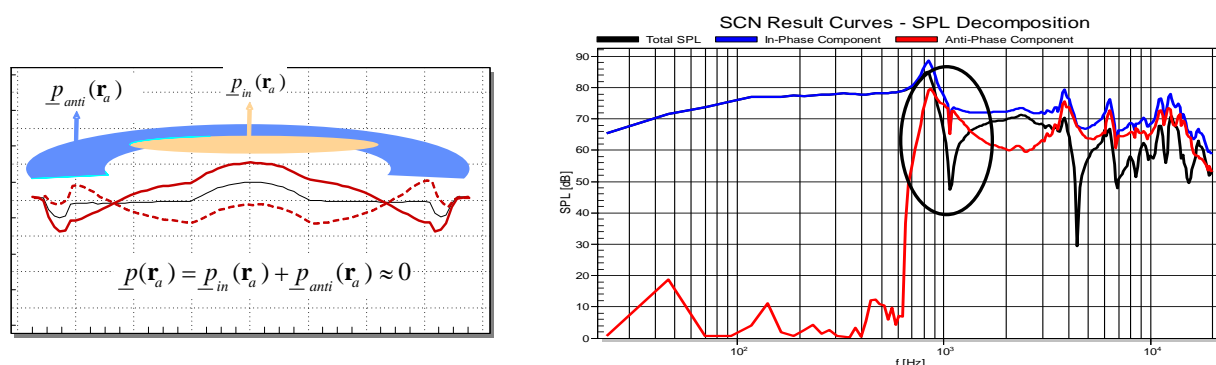


圖 12: 總 SPL 曲線上由於聲波相抵消所產生的谷點

4.4 搖擺模態(Rocking Mode)

在低頻段，懸邊上的第一個周向模態會導致振膜的搖擺以及使得音圈紙傾斜。這可能是由於音圈在溝槽間的摩擦造成的衝擊失真所引起的現象。



圖 13: 搖擺模態(左)以及音圈摩擦(右)

搖擺模態會導致聲輻射的情況變差，這是由於輻射表面的表現就好兩個聲源(聲偶極)一樣，而這兩個聲源在低的軸向聲壓上產生一正一反且大小相同的體積速度。求積的成份(AAL_{quad})對於任一形狀輻射源的搖擺模態來說，是一個非常好的指標(如矩形振膜)。

4.5 有效的輻射面積

有效輻射面積(S_D)對於描述聲波輻射來說是一個重要的集中參數，對於此聲波輻射的部份主要利用活塞運動的形式取代原本的輻射面積；此處所謂活塞運動的表現說明了音圈的振動速度為平均速度的形式，並且以活塞表面(S_D)作為輻射表面(S_c)所產生的體積速度相同的假設條件下。音圈速度(v_{coil})的平均值可利用積分音圈半徑為(r_{coil})的周向速度獲得，這個半徑上可以抑制搖擺以及其它非對稱的振動模態。

replaced by a

$$\underline{S}_D(\omega) = \frac{\int_{S_c} \underline{v}(\omega, \mathbf{r}_c) dS_c}{\underline{v}_{coil}(\omega)} \quad (20)$$

using mean voice coil velocity

$$\underline{v}_{coil}(\omega) = \frac{\int_0^{2\pi} \underline{v}(\omega, r_{coil}, \phi) d\phi}{2\pi} \quad (21)$$

圖 14: 計算有效面積 $S_D(\omega)$ 與頻率間的關係

依循上述的定義，有效輻射面積($S_D(\omega)$)是一個頻率(ω)的函數。這個函數可使用來預測在輻射軸上任一距離處的聲壓。在大部分的情況下，可從取得共振頻率(ω_0)處相對應的值推導獲得此單值的輻射面積($S_D = S_D(\omega_0)$)。

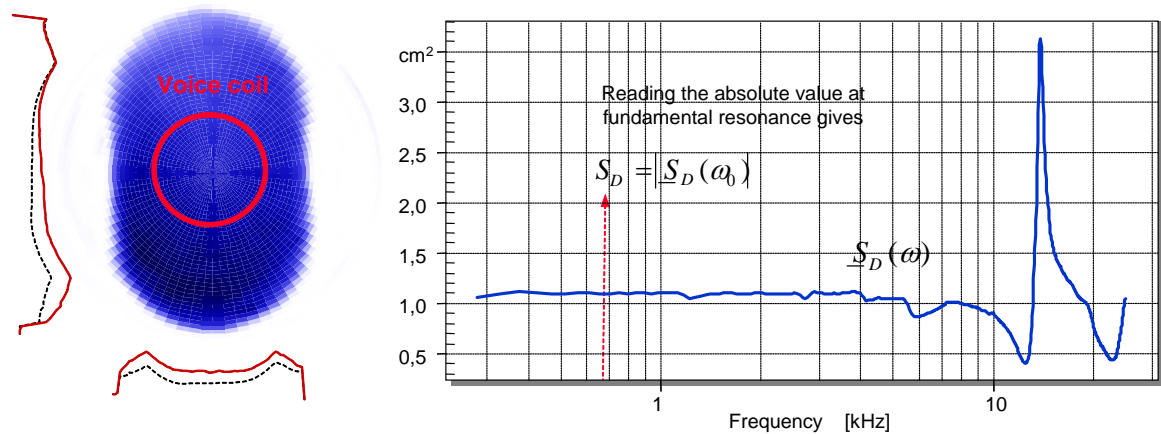


圖 15: 音圈位置(左)與有效輻射面積圖(右)

對於低音揚聲器而言，由於懸邊的寬度小於振膜的內徑，有效輻射面積可利用平均懸邊的內外徑方式近似獲得。這個近似並不適用於微型揚聲器或是頭戴式耳機及雙耳式耳機的換能器，主要原因在於這些換能器的懸邊面積相對上來說較大，並且具有曲率的幾何形式會對於懸邊位移產生一個非線性的衰減。

5 預備的問題

在開始此次訓練前請確認你的理論知識。針對以下的問題選擇正確的答案(有可能複選)。

QUESTION 1: 在低頻段的振膜與防塵蓋是如何的運動？

- ☐ **MC a:** 振膜與防塵蓋的運動如同剛體運動，所有的點將產生相同的大小與相位
- ☐ **MC b:** 振膜與防塵蓋的運動如同彈性體，所有的點將產生不同的大小與相位
- ☐ **MC c:** 振膜與防塵蓋在某些頻率點可能有不同的大小與相位，這是由於懸邊以及彈波變形所造成搖擺模態的影響，但是傾斜後的振膜與防塵蓋是一個剛體運動。

QUESTION 2: 在振膜與接收點的距離增加一倍時，遠場接收點(ra)的 SPL 會有甚麼變化? (利用方程式(11)來回答)

- ☐ **MC a:** 聲壓增加 2 dB.
- ☐ **MC b:** 聲壓增加 6 dB.
- ☐ **MC c:** 聲壓降低 2 dB.
- ☐ **MC d:** 聲壓降低6 dB.

QUESTION 3: 比較方程式(11)對於觀測點聲壓級(SPL)的計算以及方程式(2)AAL 的計算。哪一種關係會存在於 AAL 以及 SPL?

- **MC a:** AAL 與 SPL 在低頻處具有相同的大小，這是由於輻射源(振膜)的振動型式如同剛體一般，並且在此條件下聲波的波長遠大於輻射源的幾何形狀
- **MC b:** 在相同的觀察點處(\mathbf{r}_a)， SPL 從不會大於 AAL
- **MC c:** SPL 的計算考慮的機械振動的相位角以及由於聲源(\mathbf{r}_c)與觀測點(\mathbf{r}_a)處傳播所造成的相位偏移
- **MC d:** 假如在振膜上所有的點對於觀測點(\mathbf{r}_a)的總聲壓(SPL)具有建設性的貢獻，則 AAL 的算可忽略相位的部分並且與最大聲壓具有相同的大小

QUESTION 4: 哪一個關係會存在於同相、反相以及求積成份?

- **MC a:** 同相的 AAL_{in} 絕對不會小於反相的 AAL_{anti}
- **MC b:** 反相的 AAL_{anti} 總是大於反相的 SPL_{anti}
- **MC c:** 求積成份的 SPL_{quad} 總是大於同相的 SPL_{in}
- **MC d:** 求積成份的 AAL_{quad} 與求積成份的 SPL_{quad} 相同
- **MC e:** 同相的 AAL_{in} 與同相的 SPL_{in} 相同

6 掃描數據的解釋(無須硬體)

Step 1: 觀察示範影片的 *Vibration and Radiation Behavior of Loudspeaker Membrane* 藉以了解如何完成一個實務的分析

Step 2: 從網頁中 www.klippel.de/training 下載 *Klippel Scanning System SCN* 以及 *dB-Lab*，並安裝在自己的電腦中

建議: 建議在無須硬體的條件(offline)下完成以下的練習並且將複選的答案註記在紙上!

6.1 輻射面積的位移

Step 3: 執行檔案 **honeycomb.ksp** 進而開啟 *SCN Analysis Software* 來觀看應用到蜂巢材料的平面輻射源的雷射量測結果

Step 4: 選擇“**Cross Section View**”選項，按“**Animation**”以及調整“**Amplitude Enhancement**”進而產生輻射源的“原始”振動

Step 5: 在圖形上按滑鼠右鍵並開啟“**Show Current Point**”。設定游標到輻射源的中心觀看端子電壓($U(f)$)以及特定觀測點(\mathbf{r}_c)位移($X(f, \mathbf{r}_c)$)所組成的轉換函數($H_x(f)$)大小

QUESTION 5: 在增加兩倍頻率的條件下($70 \text{ Hz} < f < 5 \text{ kHz}$)，轉換函數($H_x(f)$)的大小該是如何變化?

- **MC a:** 轉換函數($H_x(f)$)的大小以近似每音程6 dB 的大小下降
- **MC b:** 轉換函數($H_x(f)$)的大小以近似每音程12 dB 的大小下降

- **MC c:** 轉換函數($H_x(f)$)的大小以近似每音程18 dB 的大小下降

Step 6: 檔案 **honeycomb.ksp** 中，在圖形下緣處的 “*Displacement Transfer Function*” 設定到140 Hz，利用設定藍色的標識在振膜上半部斷面不同位置點的方式，觀看轉換函數($H_x(f = 140 \text{ Hz}, r)$)與半徑(r)的關係

QUESTION 6: 在低頻段($f = 140 \text{ Hz}$)，轉換函數($H_x(f)$)與半徑(r)間的關係為何？

- **MC a:** 由於在此振膜區域上具有較高的撓曲徑度(bending stiffness)以及低頻剛體運動的情況，使得大小差不多
- **MC b:** 懸邊內部到外部的變形將以線性變化的趨勢下降；因此，懸邊的中點位移總是低於振膜的位約6 dB 的大小。這是利用懸吊系統內外徑平均值的計算方式獲得正確的等效輻射面積(S_D)的基礎
- **MC c:** 大小從懸邊內部到外部邊界呈現非線性的下降。在蜂巢式揚聲器懸邊中點的位移比振膜位移低約3 dB。這在等效輻射面積(S_D)量測上有許多主要的結果(聲學量測的結果與幾何量測結果)

6.2 模態分析

Step 7: 選擇在 **honeycomb.ksp** 檔案中圖形下緣選項以及 *Cross-sectional View* of the **honeycomb.ksp** 並且在圖形上按滑鼠右鍵關掉“*Show current point*”。在 *Modeling Mode* 上選擇“*Acceleration*”選項。利用在加速度級曲線(紅色)圖形下緣移動頻率游標到峰值點，藉以找到自然頻率。

QUESTION 7: 對於自然頻率843 Hz 與6,14 kHz 處之模態振動來說，揚聲器的哪一個部份的貢獻最明顯？

- **MC a:** 843 Hz：懸邊與蜂巢式振膜; 6,14 kHz：蜂巢式振膜
- **MC b:** 843 Hz：懸邊; 6,14 kHz：蜂巢式振膜
- **MC c:** 843 Hz：懸邊與蜂巢式振膜; 6,14 kHz：懸邊與蜂巢式振膜;
- **MC d:** 843 Hz：懸邊; 6,14 kHz：懸邊
- **MC e:** 843 Hz：蜂巢式振膜; 6,14 kHz：蜂巢式振膜

QUESTION 8: 哪一個頻率點提供最大的 AAL？

- **MC a:** 6.1 kHz.
- **MC b:** 5 kHz.
- **MC c:** 2.5 kHz.

Step 8: 在 **honeycomb.ksp** 檔案中的 AAL 曲線，利用游標讀取自然頻率為6.14 kHz 的3 dB 頻寬

QUESTION 9: 利用方程式(7)決定在6.14 kHz 處的模態損失因子

- **MC a:** $\eta \approx 0.03$

- **MC b:** $\eta \approx 0.3$
- **MC c:** $\eta \approx 0.003$

QUESTION 10: 為何模態損失因子在6.14 kHz 時會小於5 kHz?

- **MC a:** 因為在6.14 kHz 時懸邊的振動量非常小，並且蜂巢材料共線的阻尼小於懸邊的貢獻
- **MC b:** 因為在6.14 kHz 時懸邊的振動量非常小，並且蜂巢材料共線的阻尼大於懸邊的貢獻

QUESTION 11: 模態損失因子在6.14 kHz 時是如何被增加?

- **MC a:** 採用不同的懸邊材料以提高阻尼
- **MC b:** 採用不同的彈波材料以提高阻尼
- **MC c:** 採用不同的蜂巢材料以提高阻尼

QUESTION 12: 低模態損失因子對於聲壓輸出方面的影響結果為何?

- **MC a:** SPL 曲線上明顯的峰值表現，這現象符合在累積衰減頻譜中長時間響鈴(long ringing)的現象(暫態失真)
- **MC b:** 高擾動量會導致聲壓輸出非線性失真
- **MC c:** 低模態損失因子只會影響機械振動，不會影響聲波的輻射以及聲壓的輸出

6.3 軸對稱分解

Step 9: 打開 **piston driver.ksp** 檔案，選擇 **Animation**。轉換 **Modelling Mode** 至“**Acceleration**”。；主換 **Decomposition** 至“**Radial**”並且選擇 “**Total Vibration**”。執行“**Animation**”選項

Step 10: 在圖形下緣處設定頻率游標到140 Hz；利用選擇 **Decomposition**，比較“**Total Vibration**”中的“**Radial**”及“**Circular**”；調整“**Amplitude Enhancement**”進而觀看每個組成成份

QUESTION 13: 在140 Hz 處的振動行為是由哪一種模態所決定?

- **MC a:** 全部由對稱模態控制
- **MC b:** 由於周向模擬的成份低於總振動 AAL 的20 dB 以上，因此可被忽略
- **MC c:** 周向模態影響彈波與懸邊，導致活塞模態產生微量傾斜(搖擺模態)
- **MC d:** 在這個頻率點，周向與徑向模態具有相同的 AAL
- **MC e:** 此頻率點沒有周向模態

Step 11: 在圖形下緣處設定頻率游標總 AAL 的第二個峰值點(3.9 kHz 處)；利用選擇 **Decomposition**，比較“**Total Vibration**”中的“**Radial**”及“**Circular**”；調整“**Amplitude Enhancement**”進而觀看每個組成

QUESTION 14: 在3.9 kHz 處的振動行為是由哪一種模態所決定?

- **MC a:** 軸對稱模態決定整體振動(忽略周向模態)
- **MC b:** 周向模態決定整體 AAL(忽略徑向模態)
- **MC c:** 周向模態影響彈波與懸邊，導致活塞模態產生微量傾斜(搖擺模態)
- **MC d:** 在這個頻率點，周向與徑向模態具有相同的 AAL

6.4 聲壓

Step 12: 打開 **piston driver.ksp** 檔案並選擇 *Animation*；選擇在 *Modelling Mode* “**Acceleration**” 以及在 *Decomposition* “**SPL related**”與“**Total Vibration**”；設定角度 $\theta = 0^\circ$ 與 $\phi = 0^\circ$ 進而觀看軸向的反應以及比較 AAL 與總 SPL

QUESTION 15: SPL 與 AAL 間存在的關係為何？

- **MC a:** 小於800 Hz 時，由於輻射源的振動類似剛體運動，所以 SPL 與 AAL 幾乎相同
- **MC b:** 在相同的頻率時，AAL 上呈現急遽變化的峰值與 SPL 上所呈現的高點相同
- **MC c:** 在相同的頻率時，SPL 上呈現急遽變化的峰值與 AAL 上所呈現的高點相同

6.5 波束方向圖

Step 13: 在檔案 **piston driver.ksp** 觀看 *Radiation Analysis*，在 *Modeling Mode* 選擇 “**SPL**” 並且在 *SPL related Decomposition* 選擇“**Total Vibration**”；利用變化角度 ϕ (旋轉右上方圖形的游標)，進而比較左上方的指向性圖(polar pattern；在不同角度 θ 的)

QUESTION 16: 在700 Hz, 1.1 kHz 以及1.5 kHz 頻率點處，SPL 如何隨著角度 ϕ 與 θ 變化？

- **MC a:** 在700 Hz 與1.5 kHz 頻率點 SPL 隨著角度 θ 的變化非常小(< 3 dB)，形成近似全向特性的指向性圖
- **MC b:** 在1.1 kHz 處，軸上($\theta = 0^\circ$)的 SPL 小於非軸上(舉例： $\theta > 50^\circ$)
- **MC c:** 對於上述三個頻率點來說，SPL 的指向性圖與角度 ϕ 無關(旋轉右上方圖形的游標)
- **MC d:** 對於上述三個頻率點來說，全都是全向性圖(在任何 ϕ 與 θ 皆具有相同的 SPL)

QUESTION 17: 在11.2 kHz, 12.5 kHz 以及14 kHz 頻率點處，波束圖如何變化？

- **MC a:** 高頻處，揚聲器呈現全向性
- **MC b:** 高頻處，揚聲器在軸上($\theta = 0^\circ$)比非軸上($\theta > 50^\circ$)產生更多的 SPL；此時的角度 ϕ 幾乎不變

Step 14: 在 *Decomposition* 模態選擇 “**Radial**” and then “**Circular**” 藉以觀察在 *Radiation Analysis* 呈現的周向模態波束圖。改變角度 ϕ (旋轉右上方圖形的游標) 並且在圖形下方變化頻率游標

QUESTION 18: 傳統的周向模態輻射特性為何？

- **MC a:** 對任一角度 φ 與頻率來說，波束在軸上的大小為零($\theta=0^\circ$)，這是因為周向模態會在周向上產生一個矩形的振動型態，而這個振動形態是由數目相同並且強度上也相同的正向與反相聲源所組成，對於遠場軸上的聲壓剛好形成抵消的結果
- **MC b:** 在低頻處，由於非軸向上的抵消情況消失，因此 SPL 隨著 $|\theta|$ 增加而提升
- **MC c:** 周向模態產生全向性

6.6 指向性索引

Step 15: 在檔案 **piston driver.ksp** 中執行“**Tools**”，選擇 “**Sound Power**” 並執行“**Start Calculation**”；尋找指向索引為負的頻率點

QUESTION 19: 指向索引為負(DI = -10 dB)的意義為何？

- **MC a:** 在相同的聲功率條件下，軸上的 SPL 比全向聲源產生的 SPL 小10dB
- **MC b:** 在相同的聲功率條件下，軸上的 SPL 比全向聲源產生的 SPL 大10dB
- **MC c:** 無限障板上的輻射源在軸上距離0.4 m 處產生的 SPL 小於聲功率級10dB
- **MC d:** 無限障板上的輻射源在軸上距離0.4 m 處產生的 SPL 大於聲功率級10dB
- **MC e:** 揚聲器在軸上是一個束的形式

6.7 聲壓分解

Step 16: 在檔案 **piston driver.ksp** 分析的 *Decomposition* 中選擇 “**SPL related**”；設定角度($\theta=0^\circ$)分析軸向的聲壓；選擇“**In-phase Component**”並觀察在843 Hz 處的振動形態



QUESTION 20: 843 Hz 產生聲音的位置在何處？

- **MC a:** 活塞中心對於軸上的聲壓輸出呈現建設性的貢獻
- **MC b:** 活塞外部面積與懸邊對於軸上的聲壓輸出呈現建設性的貢獻
- **MC c:** 完整的懸邊與振膜面積對於軸上的聲壓輸出產生貢獻

Step 17: 比較在843 Hz 量測所得“**Quadrature Component**”、“**Anti-phase Component**”以及“**In-phase Component**”的振動形態。固定角度($\theta=0^\circ$) 進而分析軸向的聲壓

QUESTION 21: 在某一個特別的頻率，振膜上點(r_c)處可貢獻甚麼模態？(看圖 10.)

- **MC a:** 此點可以貢獻求積模態以及同相或反相兩者其一
- **MC b:** 此點可以同時貢獻同相或反相
- **MC c:** 此點可以貢獻全部 (求積、同相、反相)。

Step 18: 按“**Export Curve**”儲存曲線到.kdbx 檔，並在 dB-Lab 中打開此檔；打開在主題  “**Piston Driver**”中的操作  **CAL Scanner Results** 並且檢視結果視窗“**Result Curve 1**”。比較 *In-Phase* 以及 *Anti-Phase* responses

QUESTION 22: 哪些頻率點的 *In-Phase* 與 *Anti-Phase* 具有差不多的 SPL 值?

- ☐ **MC a:** 在換能器的第一共振頻率
- ☐ **MC b:** 在總聲壓曲線中呈現谷點處的頻率(聲壓抵消點).
- ☐ **MC c:** 在頻率1.078 kHz 與4.429 kHz
- ☐ **MC d:** 在高階模態的自然頻率點這些在 AAL 上呈現局部最大(共振峰值).
- ☐ **MC e:** 同向總是比反向來得大

6.8 搖擺模態

Step 19: 回到 SCN 分析軟體並選擇 *Animation.* ; 在 *Decomposition* 選擇 “*Quadrature Component*” 並且固定角度($\theta=0^\circ$)進而分析軸上的 AAL。轉換 *Modeling mode* 到 “*Acceleration*” ; 觀察在 AAL 中局部峰值的輻射圖 ; 調整 “*Amplitude Enhancement*” 進而可看到振動情況

QUESTION 23: 哪個頻率點產生搖擺模態?

- ☐ **MC a:** 搖擺模態發生在140 Hz 且小於 AAL 總量約28 dB ; 因此，搖擺模態並不重要
- ☐ **MC b:** 搖擺模態發生在468 Hz 且小於 AAL 總量約17 dB ; 因此，搖擺模態並不重要
- ☐ **MC c:** 搖擺模態發生在890 Hz 且小於 AAL 總量約12 dB ; 因此，搖擺模態並不重要
- ☐ **MC d:** 搖擺模態發生在2.5 kHz 且小於 AAL 總量約4 dB ; 因此，由於差異小於10 dB 以內，搖擺模態顯得很重要

Step 20: 打開檔案 **headphone.ksp** 並遵循 Step 19:.

QUESTION 24: 頭戴式耳機換能器的搖擺模態在哪裡?

- ☐ **MC a:** 搖擺模態發生在1.8 kHz 且小於 AAL 總量約3 dB，並且同向(in-phase)幾乎相同 ; 因此，搖擺模態控制著所有的振動並且很重要
- ☐ **MC b:** 搖擺模態發生在398 Hz 且小於 AAL 總量約 2 dB 與高於同向約3 dB ; 因此，搖擺模態控制著所有的振動並且很重要
- ☐ **MC c:** 搖擺模態發生在4.5 kHz 且小於 AAL 總量約 13 dB ; 因此，搖擺模態並不重要
- ☐ **MC d:** 搖擺模態發生在8.3 kHz 且小於 AAL 總量約6 dB ; 因此，，由於差異小於10 dB 以內，搖擺模態顯得很重要

6.9 有效輻射面積

Step 21: 在檔案 **headphone.ksp** 中按 “*Tools*” 並在功能條中按 “*SD Calculation*”。在左上方圖形中設定藍測游標到 $r_{\text{coil}} = 7.5 \text{ mm}$ ，此處微音圈所在。觀察與頻率相關的有效輻射面積 $S_d(f)$

QUESTION 25: 為何在高頻處($>10 \text{ kHz}$)的輻射面積 $S_d(f)$ 會增加?

- ☐ **MC a:** 因為音圈移動量大，但是在振膜其它面積在更高頻處的振動量卻很小

- **MC b:** 因為音圈在高頻的移動量小，而其它部分所產生的體積速度大(振膜中心)
- **MC c:** 在高頻處求積分量持續的提高進而降低高頻的聲壓輸出

Step 22: 在左上方圖形中設定藍色的游標到懸邊的中心 ($r=12\text{ mm}$) and in the centre of the diaphragm ($r=3\text{ mm}$)並且調查半徑對於有效輻射面積(S_d)的影響

QUESTION 26: 指定的半徑(r)是如何影響 S_d 值?

- **MC a:** 假設指定的半徑(r)大於音圈半徑(r_{coil})，音圈的平均速度可在懸邊面積(速度隨半徑增加而降低)的方式計算獲得；因此，音圈速度(v_{coil})將小於實際的大小，並且有效輻射面積(S_d)將大於實際的值
- **MC b:** 假設指定的半徑(r)小於音圈半徑(r_{coil})，音圈的平均速度可在振膜的 centre (速度為常數)的方式計算獲得；因此，音圈速度(v_{coil})可正確的量測獲得，而在計算有效輻射面積(S_d)上產生的誤差也可以被忽略
- **MC c:** 半徑(r)對於 S_d 的影響很小

7 完成振動掃描(需要硬體)

倘若有掃描的硬體，建議針對與會者所提供的換能器完成一次的掃描。這個實驗的目的在於決定掃描格線的影響以及決定掃描時間的點數。

7.1 掃描硬體的資訊

示範影片 *Vibration and Radiation Behavior of Loudspeakers Membrane* 將給予如何使用掃描硬體與軟體等實務的指引。詳細的描述可參考手冊。

7.2 完成外觀概略性的掃描

Step 23: 開起 Klippel Scanning System SCN 軟體

Step 24: 在 *File* 選單中選擇 **Perform New Scan**。最短的掃描是 profile scan，這是只針對單一角度採用一個非對稱格線方式

Step 25: 在初始化後，開始一個新的掃描規畫。鍵力 *Project File* 並給定一個名子“**profile scan.ksp**”。

Step 26: 離開 *Scan Setup* 採用預設的設定並進到 **Measurement Grid Setup**。

Step 27: 在 *Grid* 選項中在 *Preset* 選擇 **Profile Grid** 進行單一線段的量測並且輸入待測物的 **Outer Radius**，並執行“**Save and Start**”。

Step 28: 根據 **Scan Preparation** 設定並開始掃描

Step 29: 完成後，開啟 *SCN Visualization Software*.

Step 30: 選擇 **SPL** 內的反向成份，尋找模態分裂的頻率($f_{break-up}$)，這個頻率點反相成份的 **SPL** 將會快速的提升並且低於總 **SPL** 約30 dB

$$SPL(f_{break-up}) - SPL_{anti}(f_{break-up}) = 30dB$$

Step 31: 在 **AAL** 選擇總成份(total component)，尋找 **AAL** 選是各別最大的自然頻率，決定模態損失因子；材料是否有提供最佳的阻尼給此模態？看振動的模態。哪一個元件(懸邊、振膜、防塵蓋)對於總模態損失因子具有明顯的貢獻？

7.3 完成一個正規探索的掃描

Step 32: 重複 Step 23: - Step 26: 取一個名子“**explore scan.ksp**”

Step 33: 在 **Preset** 選擇 **Manual Grid** 客製化掃描格點

Step 34: 選擇 **Circular Scan Area**，輸入待測物 **Radius** 以及採用規則間距 **Radius Steps** 與 **Angle Steps**.

Step 35: 根據 **Scan Preparation** 步驟

Step 36: 掃描後利用軟體觀看量測結果

Step 37: 比較在 **profile scan.ksp** 的軸向量測與 **explore scan.ksp** 量測結果的 **SPL**，並解釋其差異

Step 38: 調查格線對於揚聲器周向模態的影響

選擇在 **AAL** 的求積成份。找到代表搖擺模態且顯示在 **AAL** 求積成份中第一個最大值的頻率點(f_{rock})。

$AAL_{rock}(f_{rock}) = AAL_{quad} - AAL_{in}$ 的差異是否大於 -5 dB？

Step 39: 在 **TOOLS** 選單下開始 **Sound Power Calculation**。觀看指向性索引以及找到 **DI=6 dB** 的頻率點(f_{6dB})

Step 40: 在 **TOOLS** 選單下開始 **SD** 計算。設定游標在音圈的位置並且讀取有效輻射面積值(S_D)。

8 更多的參考文獻

KLIPPEL R&D SYSTEM使用手冊 – SCN Vibrometer

Specification C5 Scanning Vibrometer (SCN):

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our_Products/R-D_System/PDF/C5-Scanning_Vibrometer.pdf

Poster Loudspeaker Cone Vibration:

http://www.klippel.de/uploads/media/KLIPPEL_Cone_Vibration_Poster_01.pdf

Poster Loudspeaker Sound Radiation:

http://www.klippel.de/uploads/media/KLIPPEL_Sound_Radiation_Poster_01.pdf

Application Note AN31 Cone Vibration and Radiation Diagnostics:

http://www.klippel.de/uploads/media/AN_31_Cone_Vibration_and_Radiation_Diagnostics.pdf

Paper *Distributed Mechanical Parameters Describing Vibration and Sound Radiation of Loudspeaker Drive Units*:

http://www.klippel.de/uploads/media/Klippel_Schlechter_Distributed_parameter.pdf

Paper *Visualization and Analysis of Loudspeaker Vibrations*:

http://www.klippel.de/uploads/media/Visualization_and_Analysis_of_Loudspeaker_Vibration_01.pdf