



# 逢甲大學學生報告 ePaper

## 報告題名：揚聲器模擬與分析

作者：王姿云 陳奐中

系級：電聲碩一

學號：M9900815 M9983715

開課老師：黃錦煌教授

課程名稱：電聲換能器設計

開課系所：電聲碩一

開課學年：99 學年度 第一 學期



## 中文摘要

揚聲器的探討雖然在台灣起步較慢，但近幾年來受到各界的注意以及熱烈的討論，因為在這個越來越注重休閒生活的世代，陽春型的揚聲器已經滿足不了普遍的用戶，有人要求聲音的原音重現，有人追求低音的震撼，於是乎，揚聲器各組件的探討以及添加何種原件會造成聲音何種的表現，是近代大家研究的方向。此報告主要是針對單體和單體加上音箱去做等效電路的模擬，並利用量測儀器與實際量測做比對，研究產品的模擬與實測是否吻合，並針對有問題的部分做更深入的探討，看是否符合預期之結果並探討之。

**關鍵字：**揚聲器、等效電路、導音管

## 目 次

第一章	緒論	
1-1	研究動機與目的	4
第二章	等效電路	
2-1	單體的等效電路	5
2-2	單體的模擬曲線和量測曲線	11
2-3	封閉式音箱之等效電路模擬	13
2-4	開孔式音箱之等效電路模擬	15
2-5	導音管式音箱之等效電路模擬	18
第三章	等效電路模擬與實測比對	
3-1	單體增加質量的模擬與實測	21
3-2	單體與加箱體的模擬和實測	23
3-3	音箱有無開孔的模擬和實測	25
3-4	導音管的模擬和實測	28
3-5	箱體內加 L 形管的實測	31
第四章	LoudSoft 的模擬與 KLIPPEL 的 SCN	
4-1	LoudSoft 的 FINEMotor 模擬	33
4-2	KLIPPEL 單體 SCN 的量測分析	36

## 第一章緒論

揚聲器的探討雖然在台灣起步較慢，但近幾年來受到各界的注意以及熱烈的討論，因為在這個越來越注重休閒生活的世代，陽春型的揚聲器已經滿足不了普遍的用戶，有人要求聲音的原音重現，有人追求低音的震撼，於是乎，揚聲器各組件的探討以及添加何種原件會造成聲音何種的表現，是近代大家研究的方向。此篇報告用等效電路模擬單體和音箱，與實際量測做比對，看是否符合預期之結果並探討之。



圖 1. 為美隆公司所提供的單體



圖 2. 為美隆公司所提供的箱體

## 1-1 研究動機與目的

針對美隆公司提供的揚聲器與箱體，進行等效電路單體、單體加音箱、音箱開孔與音箱加導音管的模擬，並利用中科實驗室的量測儀器 KLIPPEL 和 SoundCheck 進行實際曲線的量測，希望模擬與實測的曲線值能吻合，並針對曲線較不良的地方進行探討，最後還利用了 LoudSoft 的 FINEMotor 進行 BI 的曲線模擬和 KLIPPEL 量測系統 LSI 的 BI 值比對，最後更利用 KLIPPEL 儀器 SCN 單體的模態，藉此了解揚聲器受激振後所產生的模態情況。



## 第二章 等效電路

### 2-1 單體的等效電路

等效迴路圖

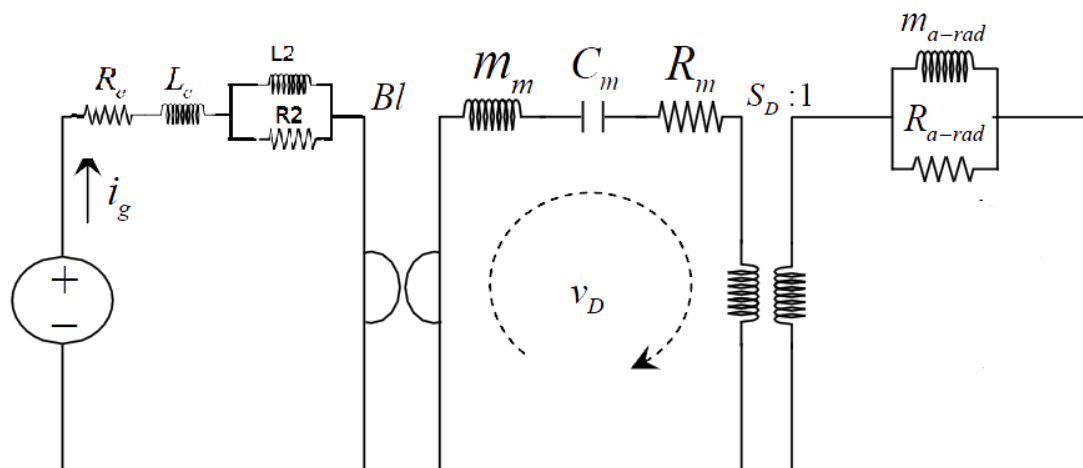


圖 3. 單體等效迴路圖

用 KLIPPEL 量測出來的 TS 參數

#### Electrical Parameters

$R_e = 6.18\Omega$	Electrical voice coil resistance at DC
$L_e = 0.304mH$	Frequency independent part of voice coil Inductance
$R_2 = 4.80\Omega$	Electrical resistance due to eddy current losses
$L_2 = 0.499mH$	Para-inductance of voice coil

#### Mechanical Parameters

$M_{ms} = 8.59g$	Mechanical mass of voice coil and diaphragm
------------------	---

揚聲器模擬與分析

$R_{ms} = 1.141 \text{ kg / s}$  Mechanical resistance of total-driver losses

$C_{ms} = 0.524 \text{ mm / n}$  Mechanical compliance of driver suspension

$Bl = 6.605 \text{ N / A}$  Force factor (Bl product)

Other Parameters

$A_d = 86.59 \text{ cm}^2$  Area of diaphragm

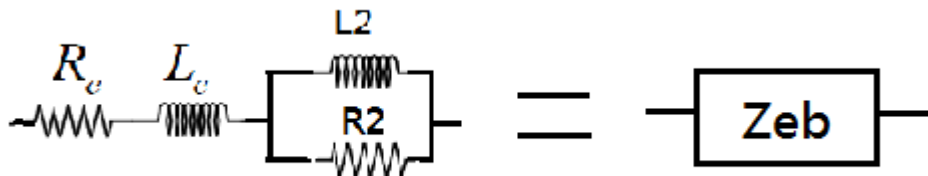
$e_g = 2.45 \text{ V}$  Rated volts

Name	Value	Unit	Comment
<b>Electrical Parameters</b>			
Re	6.18	Ohm	electrical voice coil resistance at DC
Le	0.304	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L2	0.499	mH	para-inductance of voice coil
R2	4.80	Ohm	electrical resistance due to eddy current losses
Cmes	196.93	μF	electrical capacitance representing moving mass
Lces	22.87	mH	electrical inductance representing driver compliance
Res	38.25	Ohm	resistance due to mechanical losses
fs	75.0	Hz	driver resonance frequency
<b>Mechanical Parameters (using laser)</b>			
Mms	8.590	g	mechanical mass of driver diaphragm assembly including air load and voice coil
Mmd (Sd)	8.135	g	mechanical mass of voice coil and diaphragm without air load
Rms	1.141	kg/s	mechanical resistance of total-driver losses
Cms	0.524	mm/N	mechanical compliance of driver suspension
Kms	1.91	N/mm	mechanical stiffness of driver suspension
Bl	6.605	N/A	force factor (Bl product)
Lambda s	0.055		suspension creep factor
<b>Loss factors</b>			
Qtp	0.494		total Q-factor considering all losses
Qms	3.549		mechanical Q-factor of driver in free air considering Rms only
Qes	0.573		electrical Q-factor of driver in free air considering Re only
Qts	0.493		total Q-factor considering Re and Rms only
Vas	5.5635	l	equivalent air volume of suspension
n0	0.394	%	reference efficiency (2 pi-radiation using Re)
Lm	88.15	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1m for 1W @ Re)
Lnom	88.02	dB	nominal sensitivity (SPL at 1m for 1W @ Zn)
rmse Z	2.43	%	root-mean-square fitting error of driver impedance Z(f)
rmse Hx	1.55	%	root-mean-square fitting error of transfer function Hx (f)
<b>Series resistor</b>			
Sd	86.59	cm <sup>2</sup>	diaphragm area

圖 4. TS 參數

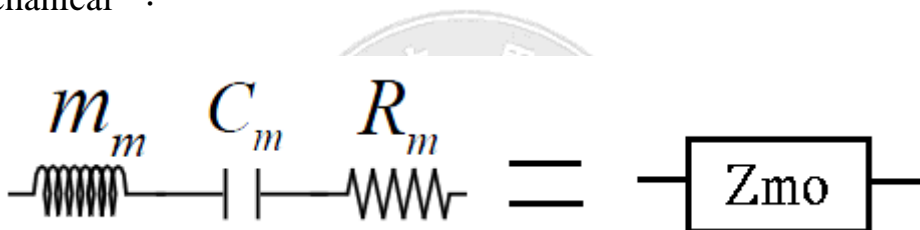
等效電路模型

1. Electrical :



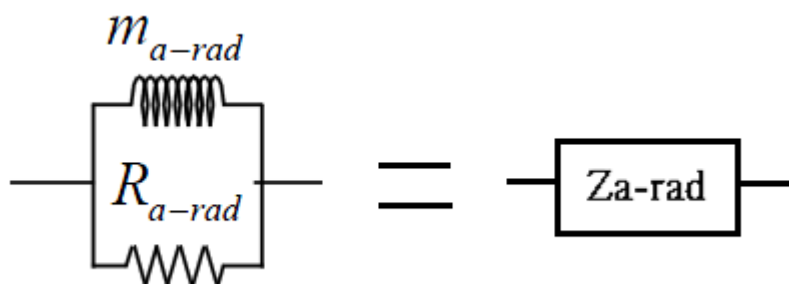
$$Z_{eb} = R_e + j\omega L_e + \frac{R_2 \times j\omega L_2}{R_2 + j\omega L_2}$$

2. Mechanical :



$$Z_{mo} = R_m + j\omega m_m + 1/j\omega C_m$$

3. Acoustical Radiation :



$$R_{a-rad} = \frac{\rho c}{Ad} * \frac{Bi^2}{Br} \quad M_{a-rad} = \frac{\rho a}{Ad} * Bi \quad Bi=0.613 \quad Br=0.25$$

$$Z_{a-rad} = R_{a-rad} \times j\omega M_{a-rad} / R_{a-rad} + j\omega M_{a-rad}$$



將上面 1.2.3. 整理後可以得到下圖

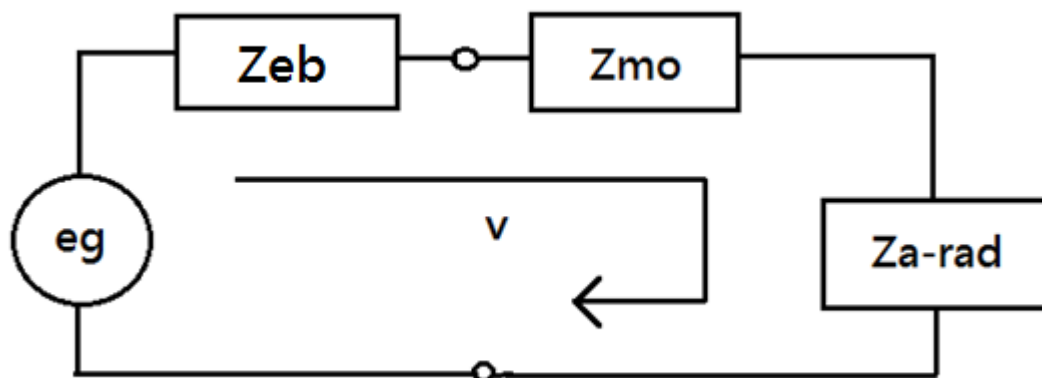


圖 5. 等效電路簡化

.轉換因子

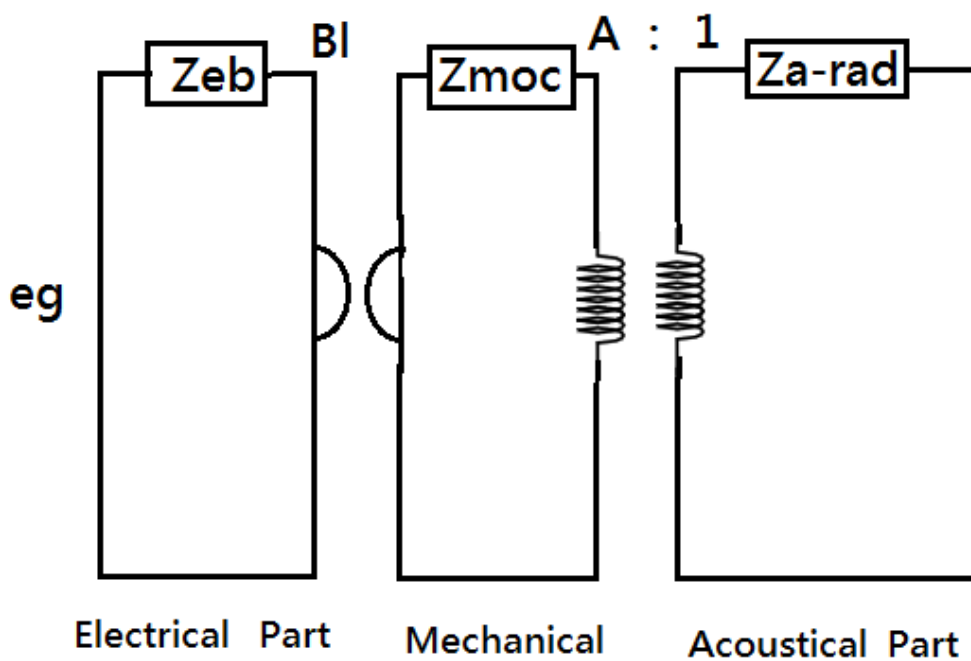
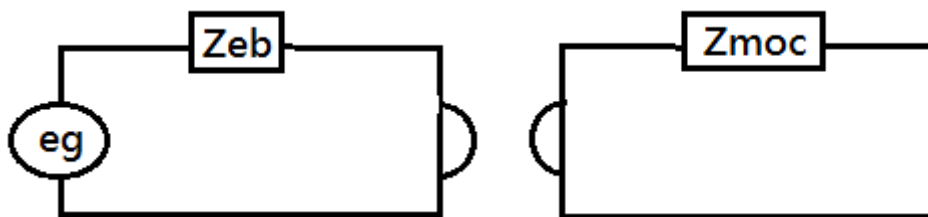


圖 6. 轉換因子



$$\begin{bmatrix} e_g \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Zeb \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -Bl \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ -v \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F \\ -v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Bl \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -Zeb \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_g \\ i_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Bl \\ -1 & \frac{Zeb}{Bl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_g \\ i_g \end{bmatrix}$$

$$F = (-Bl)i_g$$

$$-v = -\frac{e_g}{Bl} + \frac{Zeb}{Bl}i_g$$

$$Z_{eq} = \frac{F}{v} \Big|_{e_g=0} = \frac{(Bl)^2}{Zeb}$$

將電學、力學與聲學類比等效後：

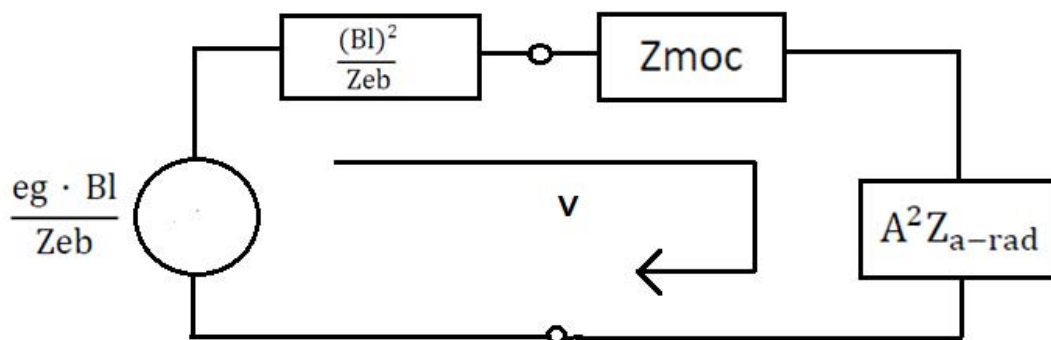


圖 7. 電學、力學與聲學類比等效

$$Z = \frac{(Bl)^2}{Z_{eb}} + Z_{moc} + A_d^2 Z_{a-rad}$$

振膜速度： $v_d = Z^{-1} \frac{e_s Bl}{Z_{eb}}$

體積速度： $U_d = A_d v_d$

將算出的體積速度帶入聲壓公式：

$$p = j \frac{\rho_0 kc U}{2\pi r} e^{-jkr}$$

再將 p 帶入：

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)$$



## 2-2單體的模擬曲線和量測曲線

等效迴路模擬SPL曲線和Impedance Curve的結果和KLIPPEL量測結果比對，發現有很高的準確性，因此可以藉由等效迴路模型幫忙輔助設計，降低開發時間與研發費用。

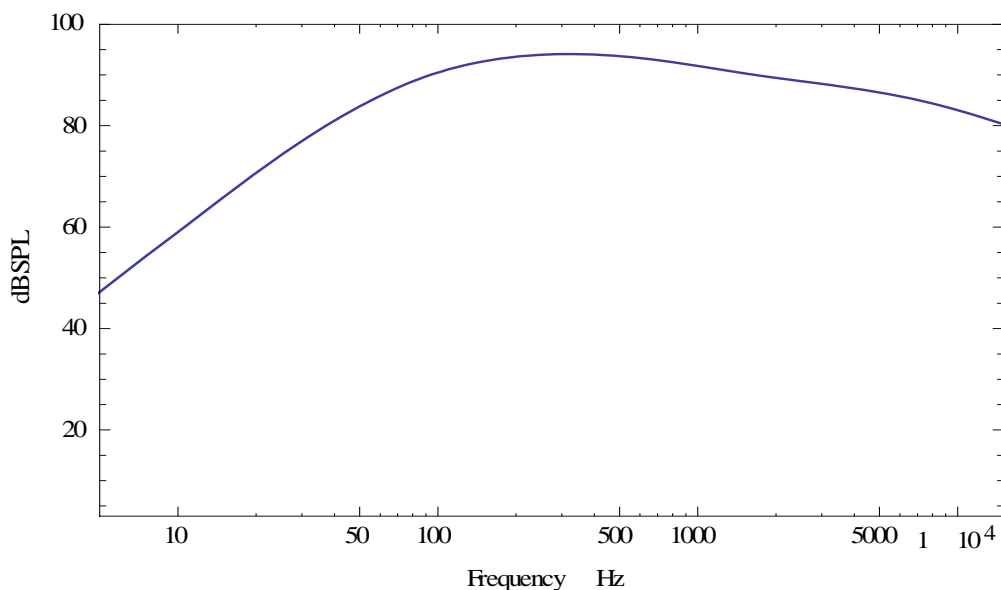


圖 8. 等效迴路模擬 SPL 曲線

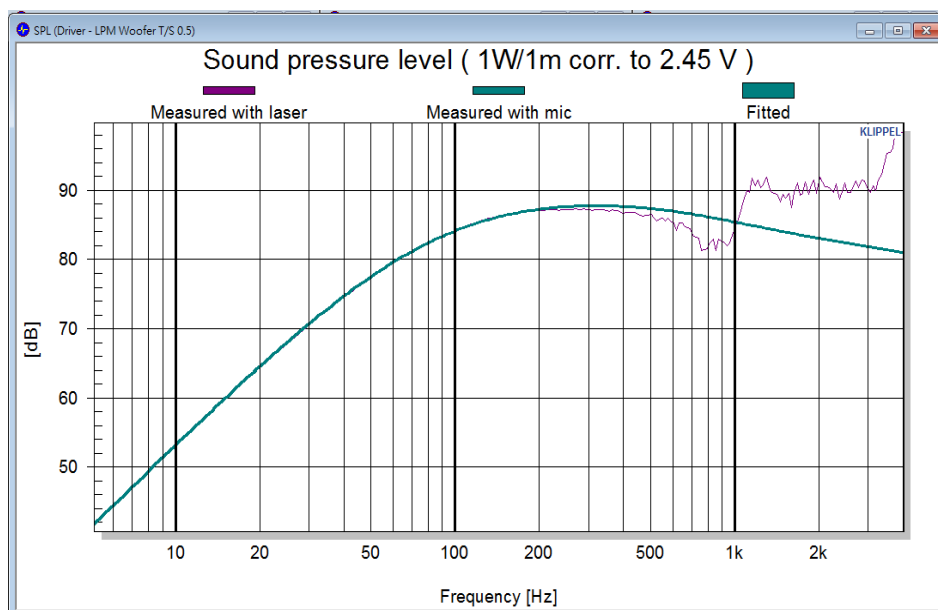


圖 9.KLIPPEL 量測 SPL 所得結果

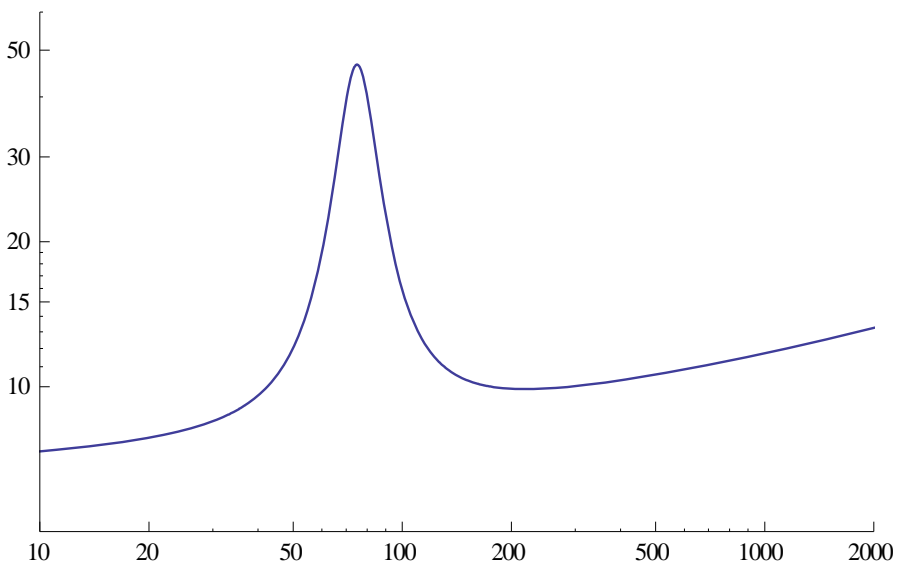


圖 10. 等效迴路模擬 Impedance 曲線

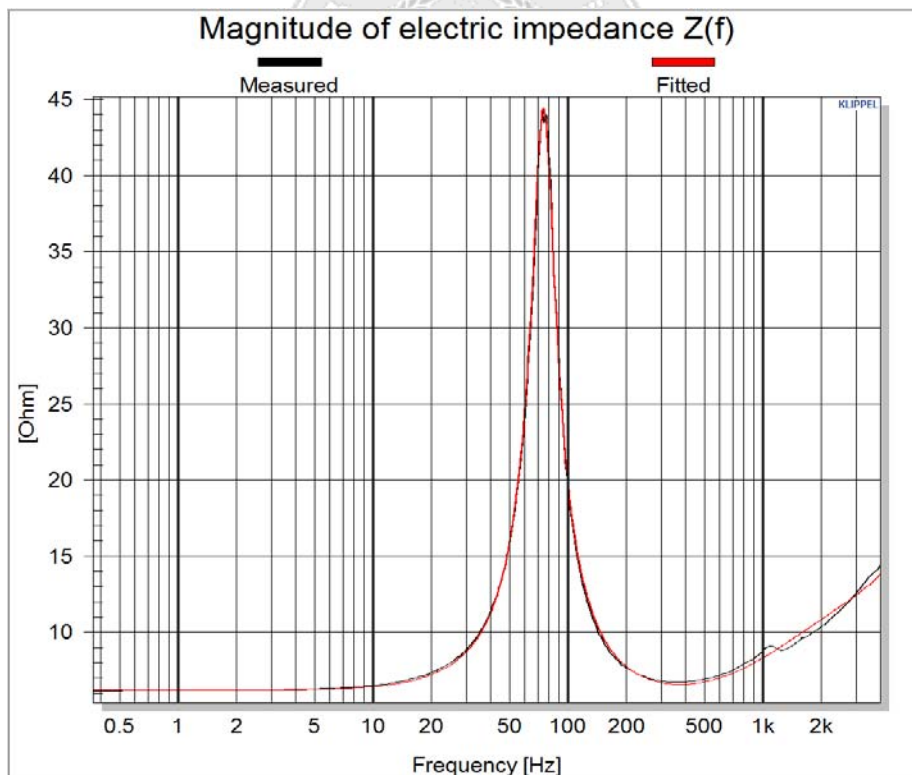


圖 11. KLIPPEL 量測 Impedance 所得結果

## 2-3 封閉式音箱之等效電路模擬

現實生活中的揚聲器幾乎都是裝在箱體內，而箱體的設計更是一門很大的學問，本節將用等效電路模擬箱體的曲線和實際量測做比較。

### 1. 等效電路

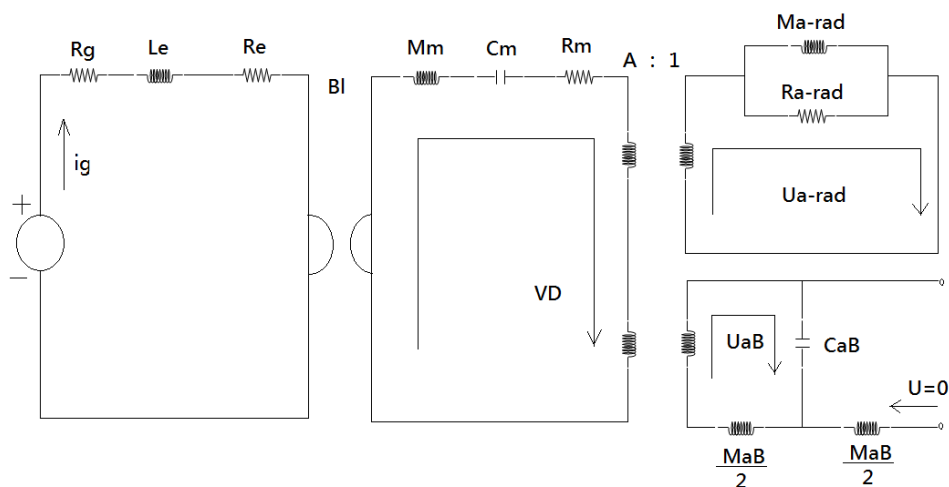


圖 12. 等效封閉式音箱

### 2. 等效電路: 將電與聲學的部分等效到機械

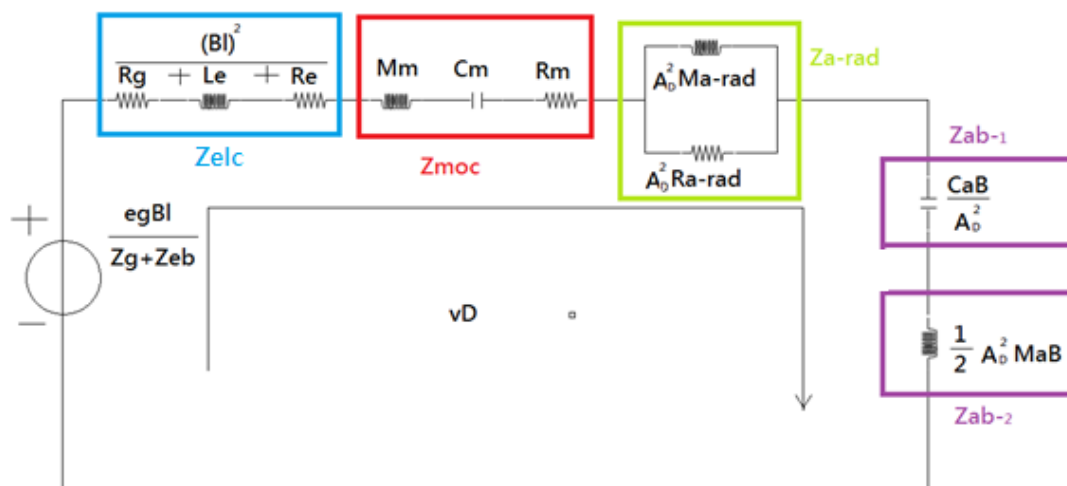


圖 13. 電與聲學的部分等效

### 3. 迴路分析:

電域的部分:

$$Z_g = R_g$$

$$Z_{eb} = R_e + j\omega L_e$$

$$Z_{elc} = \frac{(Bl)^2}{Z_g + Z_{eb}}$$

機械的部分:

$$Z_{moc} = j\omega m_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}$$

聲學的部分:

$$Z_{aB-1} = A_D^2 \left( \frac{1}{j\omega C_{ab}} \right)$$

$$Z_{aB-2} = A_D^2 \left( \frac{1}{2} j\omega m_{ab} \right)$$

$$Z_{a-rad} = A_D^2 \left( \frac{R_{a-rad} \times j\omega m_{a-rad}}{R_{a-rad} + j\omega m_{a-rad}} \right)$$



整個等效電路的總電阻:

$$Z_{total} = Z_{elc} + Z_{moc} + Z_{a-rad} + Z_{ab-1} + Z_{ab-2}$$

振膜速度: 
$$v_d = Z_{total}^{-1} \frac{e_g Bl}{Z_{eb} + Z_g}$$

體積速度: 
$$U_d = A_d v_d$$

將算出的體積速度帶入聲壓公式:

$$p = j \frac{\rho_0 kcU}{2\pi r} e^{-jkr}$$

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)$$

## 2-4 開孔式音箱之等效電路模擬

針對音箱開孔的設計做等效電路模擬，比較開孔與無開孔箱體的曲線

### 1. 等效電路

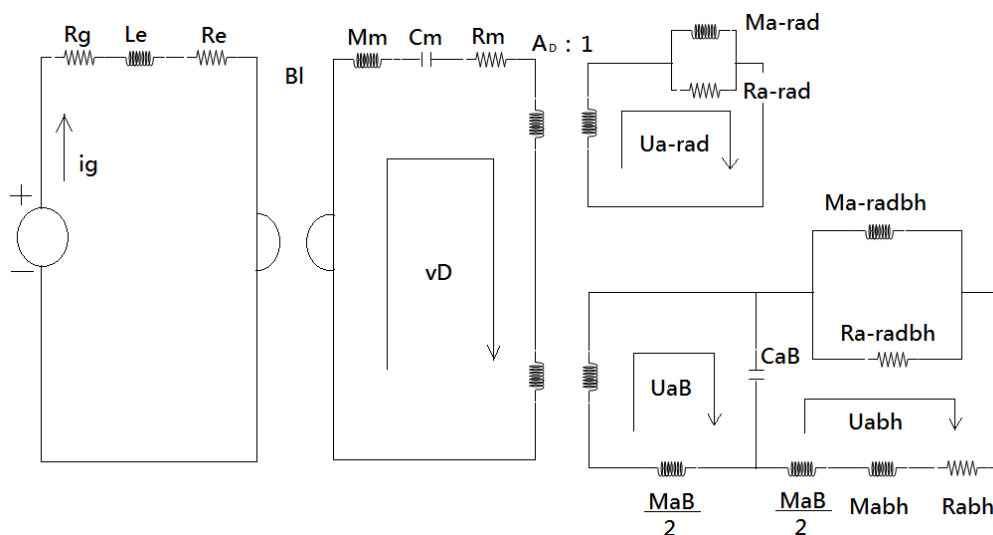


圖 14. 開孔式音箱等效

### 2. 等效電路：將電與聲學的部分等效到機械

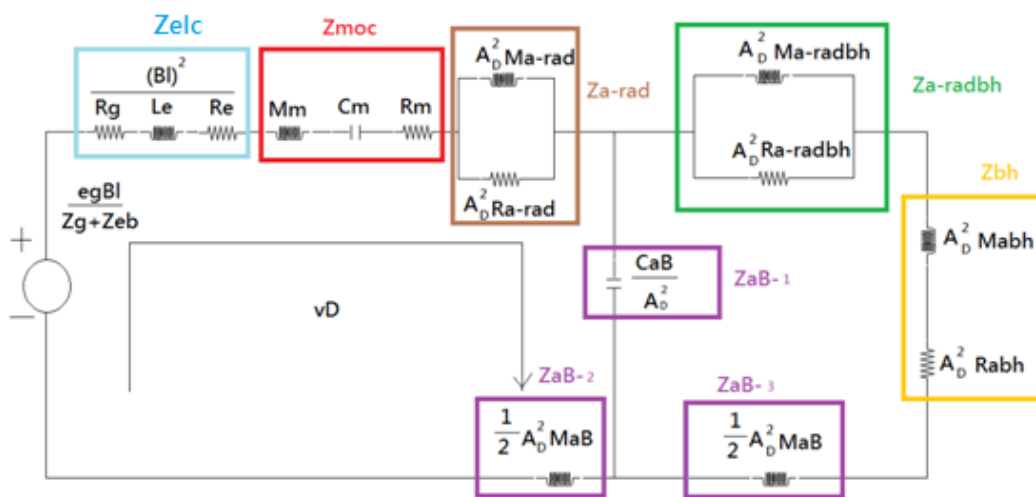


圖 15. 電與聲學的部分等效



## 2. 迴路分析：

$$Z_g = R_g$$

$$Z_{eb} = R_e + j\omega L_e$$

$$Z_{elc} = \frac{(Bl)^2}{Z_g + Z_{eb}}$$

機械的部分：

$$Z_{moc} = j\omega m_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}$$

聲學的部分：

$$Z_{aB-1} = A_D^2 \left( \frac{1}{j\omega C_{ab}} \right)$$

$$Z_{aB-2} = A_D^2 \left( \frac{1}{2} j\omega m_{ab} \right)$$

$$Z_{a-rad} = A_D^2 \left( \frac{R_{a-rad} \times j\omega m_{a-rad}}{R_{a-rad} + j\omega m_{a-rad}} \right)$$

$$Z_{abh} = A_D^2 (j\omega m_{abh} + R_{abh})$$

$$Z_{a-radbh} = A_D^2 \left( \frac{R_{a-radbh} \times j\omega m_{a-radbh}}{R_{a-radbh} + j\omega m_{a-radbh}} \right)$$

整個等效電路的總電阻為：

$$\frac{e_g}{Z_g + Z_{eb}} = (Z_{elc} + Z_{moc} + Z_{a-rad} + Z_{aB-1} + Z_{aB-2})v_D - (Z_{aB-1})v_{abh}$$

$$0 = -(Z_{aB-1})v_D + (Z_{a-radbh} + Z_{abh} + Z_{aB-1} + Z_{aB-2})v_{abh}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{e_g Bl}{Z_g + Z_{eb}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{elc} + Z_{moc} + Z_{a-rad} + Z_{aB-1} + Z_{aB-2} & -Z_{aB-1} \\ -Z_{aB-1} & Z_{a-radbh} + Z_{abh} + Z_{aB-1} + Z_{aB-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_D \\ v_{abh} \end{bmatrix}$$

迴路中的等效速度：
$$v_D = [1 \quad 0] Z_{all}^{-1} \begin{bmatrix} e_g Bl \\ Z_g + Z_{eb} \\ 0 \end{bmatrix}$$

體積速度：
$$U_d = A_d v_d$$

將算出的體積速度帶入聲壓公式：

$$p = j \frac{\rho_0 kc U}{2\pi r} e^{-jkr}$$

再將 p 帶入：

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)$$



## 2-5 導音管式音箱之等效電路模擬

單體除了加音箱以外，為了提升低音部份的表現，可以加上導音管，利用等效電路來模擬。

等效電路：

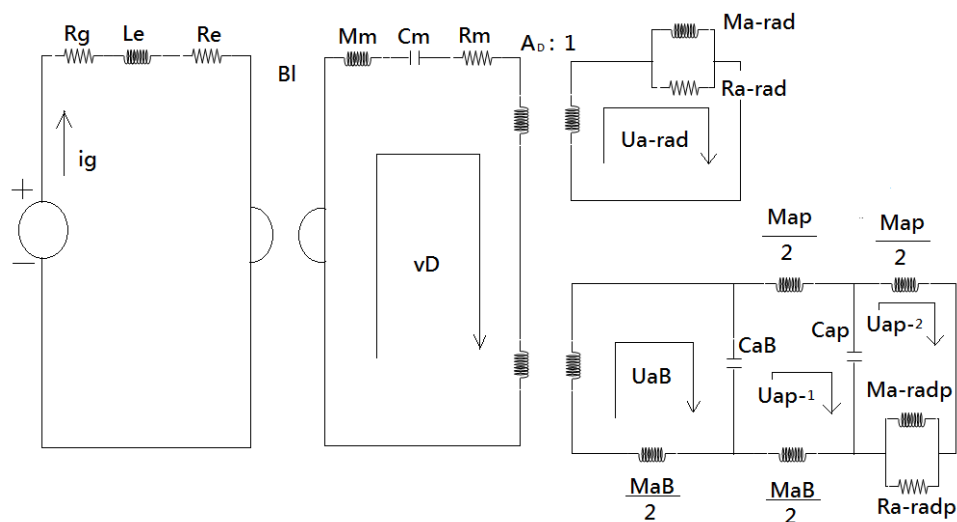


圖 16. 導音管式音箱等效

2. 等效電路：將電與聲學的部分等效到機械

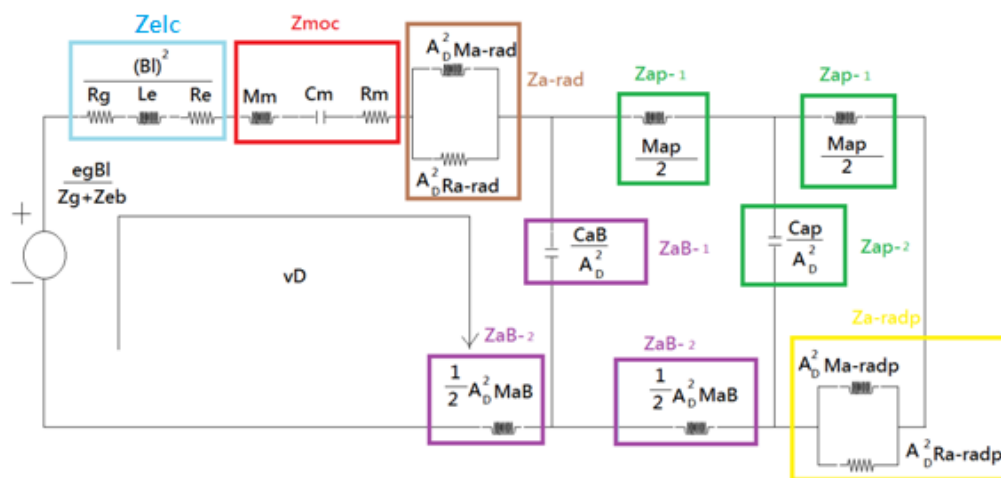


圖 17. 電與聲學的部分等效

電域的部分：

$$Z_g = R_g$$

$$Z_{eb} = R_e + j\omega L_e$$

$$Z_{elc} = \frac{(Bl)^2}{Z_g + Z_{eb}}$$

機械的部分

$$Z_{moc} = j\omega m_m + R_m + \frac{1}{j\omega C_m}$$

聲學的部分：

$$Z_{ab-1} = A_D^2 \left( \frac{1}{j\omega C_{ab}} \right)$$

$$Z_{ab-2} = A_D^2 \left( \frac{1}{2} j\omega m_{ab} \right)$$

$$Z_{a-rad} = A_D^2 \left( \frac{R_{a-rad} \times j\omega m_{a-rad}}{R_{a-rad} + j\omega m_{a-rad}} \right)$$

$$Z_{ap-1} = A_D^2 \left( \frac{1}{2} j\omega m_{ap} \right)$$

$$Z_{ap-2} = A_D^2 \left( \frac{1}{j\omega C_{ap}} \right)$$

$$Z_{a-radp} = A_D^2 \left( \frac{R_{a-radp} \times j\omega m_{a-radp}}{R_{a-radp} + j\omega m_{a-radp}} \right)$$

整個等效電路的總電阻為：

$$\begin{bmatrix} \frac{e_g Bl}{Z_g + Z_{eb}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{elc} + Z_{moc} + Z_{arad} + Z_{ab1} + Z_{ab2} & -Z_{ab1} & 0 \\ -Z_{ab1} & Z_{ab1} + Z_{ab2} + Z_{ap1} + Z_{ap2} & -Z_{ap2} \\ 0 & -Z_{ap2} & Z_{ap1} + Z_{ap2} + Z_{aradp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_{ap1} \\ v_{ap2} \end{bmatrix}$$

迴路中的等效速度： $v_D = [1 \ 0 \ 0] Z_{all}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{e_g Bl}{Z_g + Z_{eb}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

體積速度： $U_d = A_d v_d$

將算出的體積速度帶入聲壓公式：

$$p = j \frac{\rho_0 kc U}{2\pi r} e^{-jkr}$$

再將 p 帶入：

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)$$



### 第三章 等效電路模擬與實測比對

#### 3-1. 單體增加質量的模擬與實測

在單體的振膜上面加上黏土如(圖 18.)，約增加 2g 的質量如(圖 19.)，利用模擬與量測方法，驗證質量增加時共振頻率會下降。從模擬(圖 20.)可以看出紅色曲線為質量增加的 SPL，而實際上量測如(圖 21.)增加質量的曲線共振頻率會降低。



圖 18. 振膜上面加黏土



圖 19. 增加黏土

模擬曲線: 藍色為單體曲線，紅色為增加質量曲線

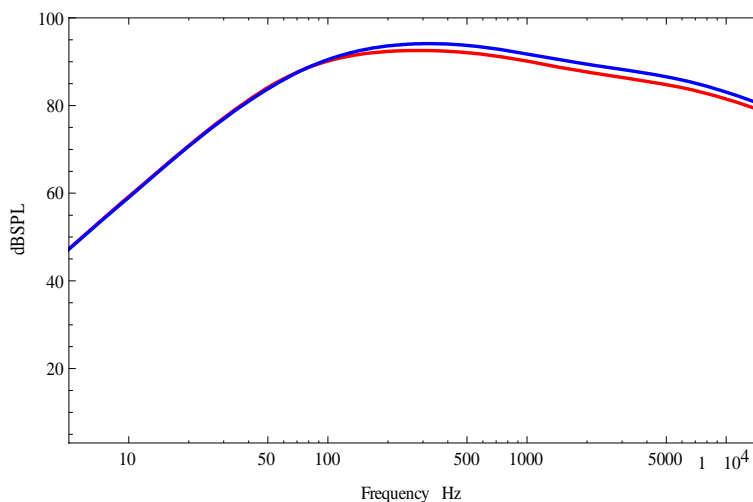


圖 20. 模擬單體與單體增加質量曲線

KLIPPEL 量測的曲線圖

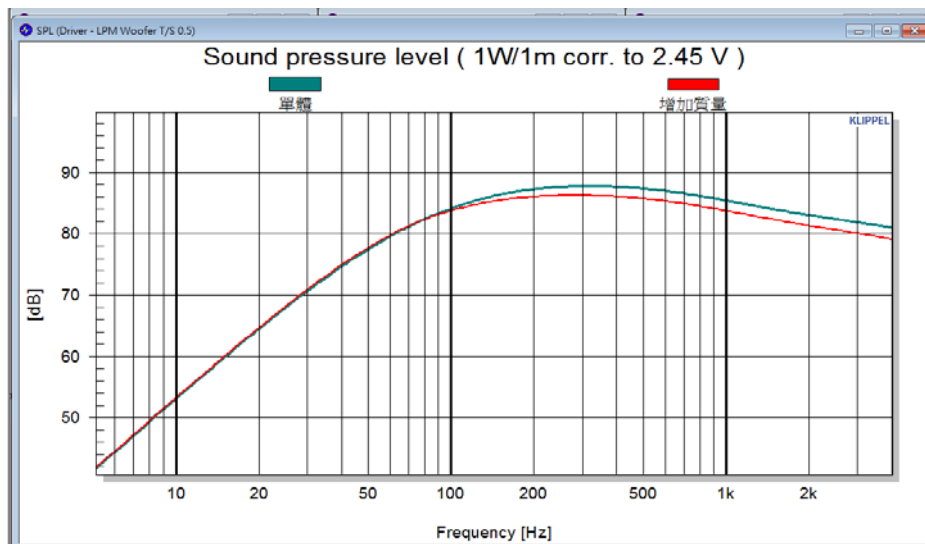


圖 21. 單體與增加質量單體曲線

### 3-2 單體與加箱體的模擬和實測

這是模擬出來的單體和單體加音箱的曲線(圖 22.)，紅色曲線為單體，綠色曲線為單體加音箱，不管是模擬或是量測，從模擬圖曲線中可以發現加上音箱後的曲線，綠色曲線較沒加音箱的紅色曲線優且平坦，而量測曲線(圖 23.) (圖 24.)也是加上單體後的曲線較好，所以市面上單體皆加上音箱讓揚聲器的效果更好。

模擬曲線：紅色曲線為單體、綠色曲線為單體加音箱

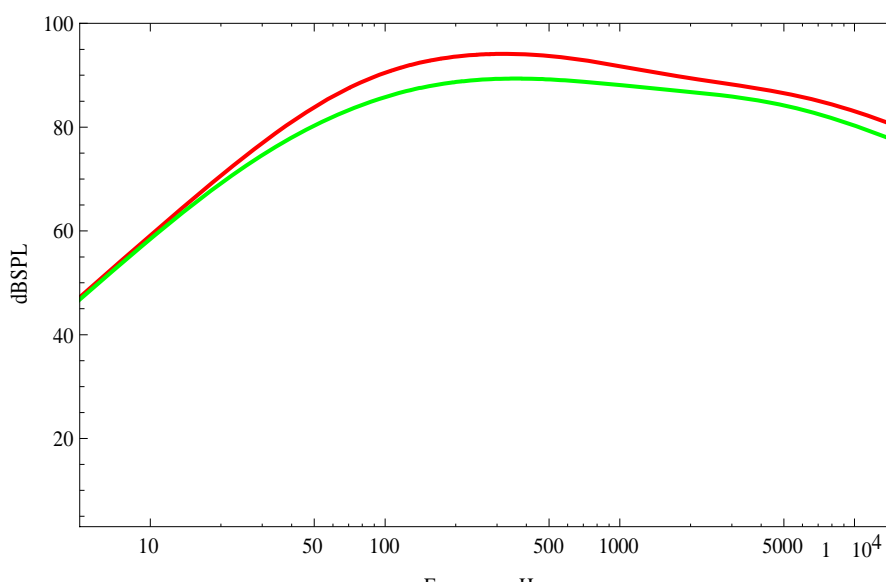


圖 22. 模擬單體與單體加音箱



KLIPPEL 量測的曲線圖：

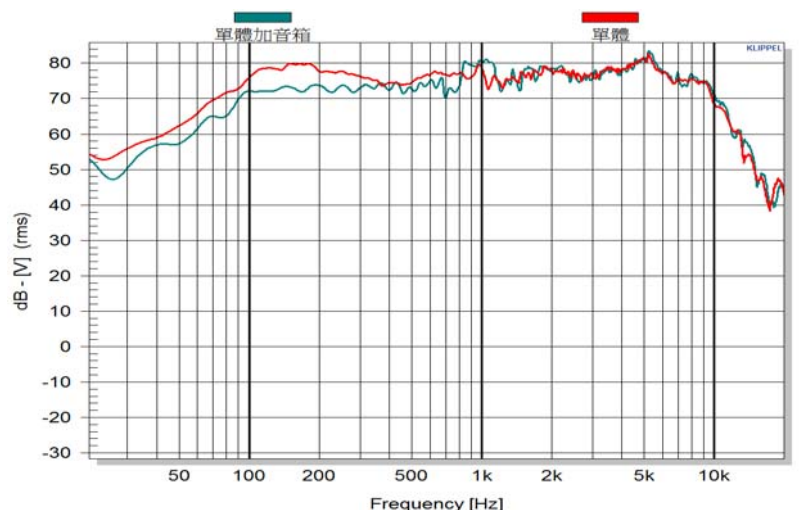


圖 23. KLIPPEL 量測單體與單體加音箱

SoundCheck 量測的曲線圖

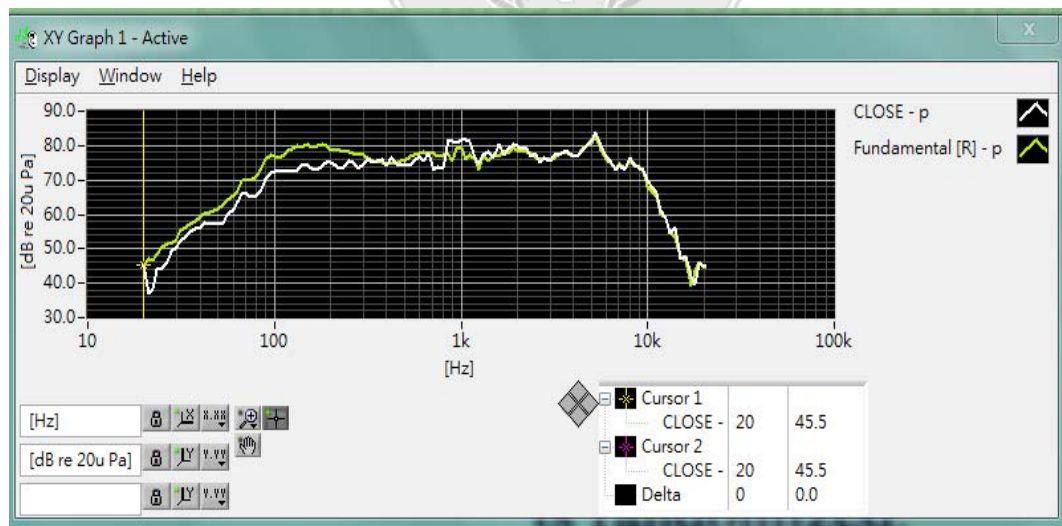


圖 24. SoundCheck 量測單體與單體加音箱

### 3-3 音箱有無開孔的模擬和實測

美隆公司提供的音箱下面有開一個孔，開孔的尺寸直徑約為 35mm。利用此箱體的開孔，結合模擬與量測分析開孔的利弊，從(圖 25.)模擬的曲線可看出在 600Hz 時有 dip 出現同時也出現一個 peak，(圖 26.)有無開孔的曲線比較可以發現音箱開孔的 dB 值有提高，但共振頻率卻也提高，比較起來還是無開孔的音箱設計較好。而開孔音箱模擬和實測的曲線如(圖 28.)。

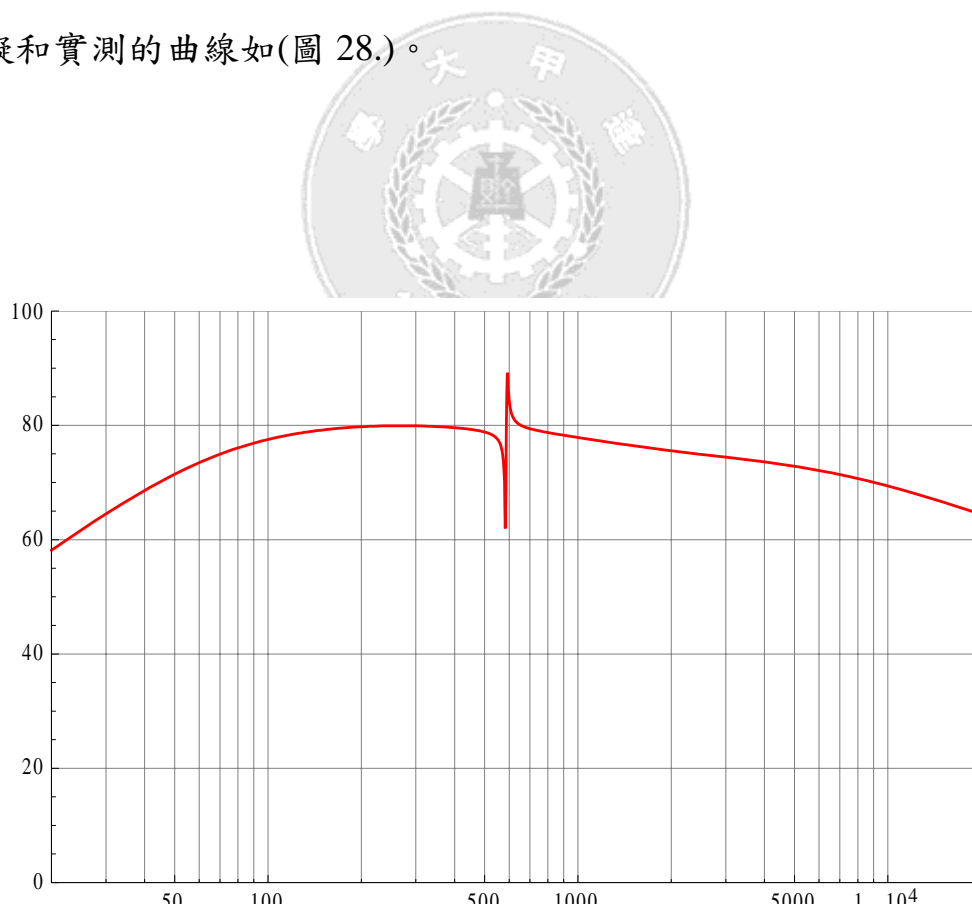


圖 25. 模擬出單體開孔的曲線

KLIPPEL 量測的曲線圖

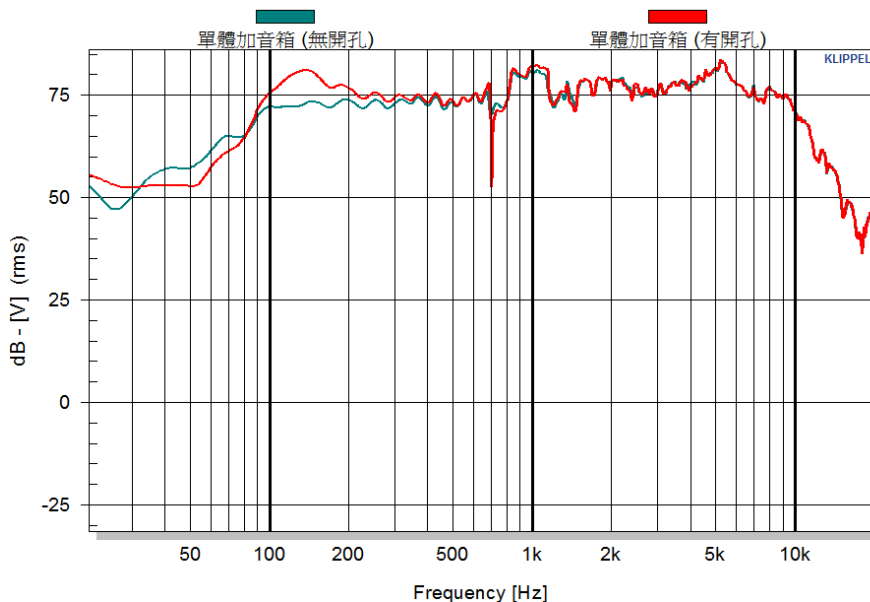


圖 26. KLIPPEL 實測有無開孔的曲線

SoundCheck 量測的曲線圖

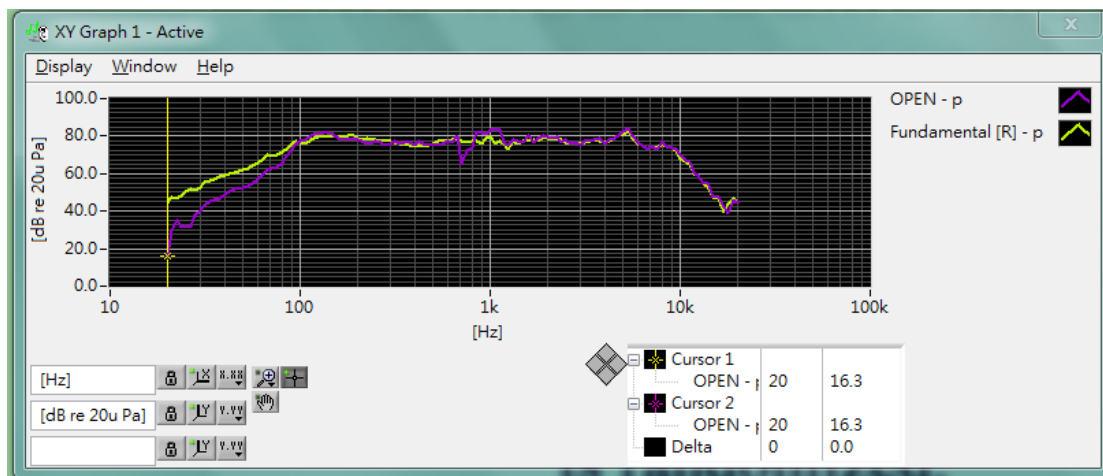


圖 27. SoundCheck 有無開孔的曲線

模擬與實測曲線:紅色曲線為模擬曲線，藍色曲線為量測

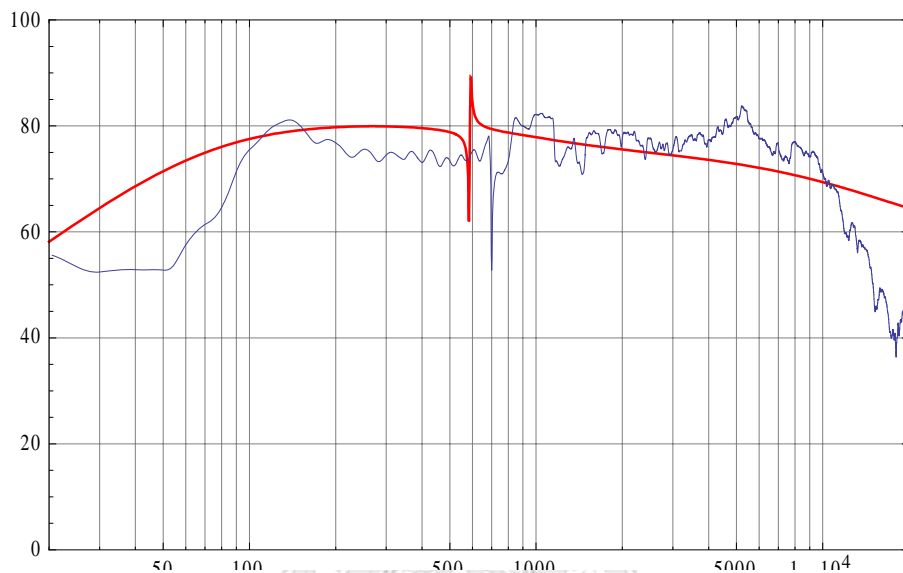


圖 28. 開孔音箱模擬與實測曲線

### 3-4 導音管的模擬和實測

針對導音管長度如(圖 29.)4.5cm、7.5cm、9.7cm、12.5cm 去做如(圖 30.)箱體加導音管模擬與量測的比較，(圖 31.)是導音管的模擬曲線，(圖 32.)KLIPPEL 的量測曲線從這張圖中看不出什麼規則的變化，有可能是因為我們箱體的開口和導音管沒辦法密合造成漏氣所以從曲線中看不出規則，但(圖 33.)則有做把管子壓較緊的動作，可看出導音管效果較明顯，從模擬(圖 31.)和量測(圖 32.) (圖 33.)可以發現其實曲線是不誤差有點大。



圖 29. 導音管



圖 30. 箱體加導音管

黑色曲線為:管長 12.5cm ，藍色曲線為:管長 9.7cm ，紅色曲線為:管長 7.5cm ，綠色曲線為:管長 4.5cm

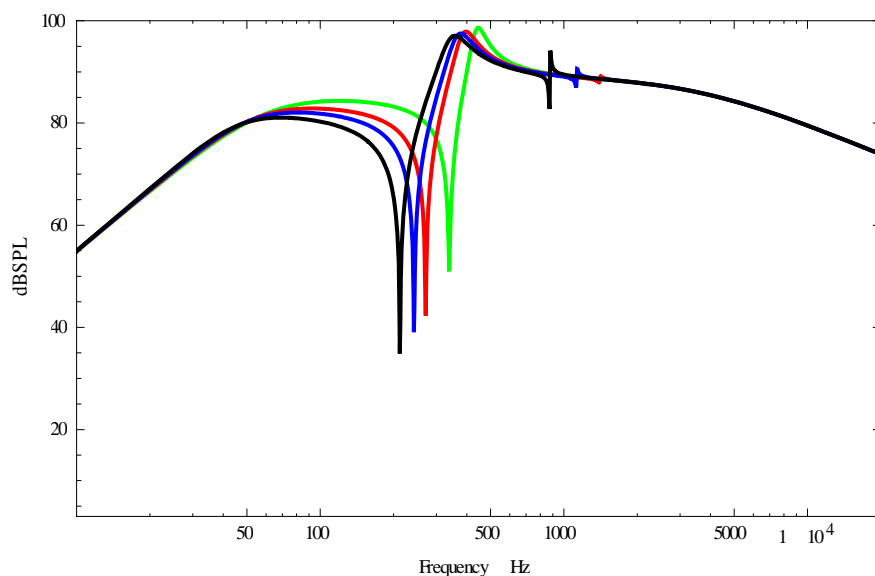


圖 31. 模擬導音管

KLIPPEL 量測的曲線圖

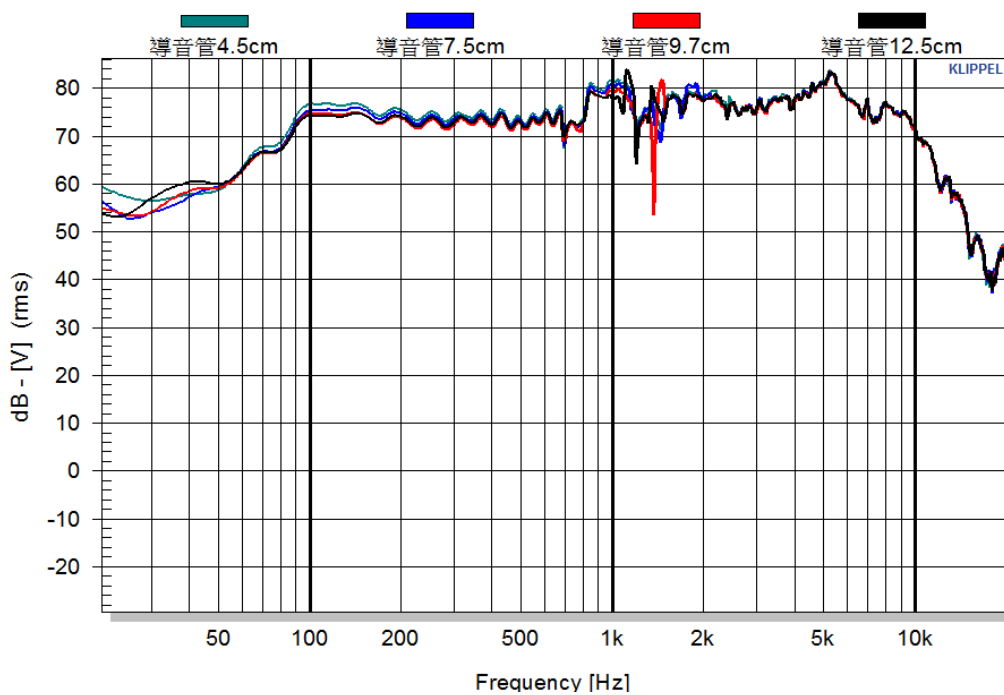


圖 32. KLIPPEL 導音管實測

SoundCheck 量測的曲線圖

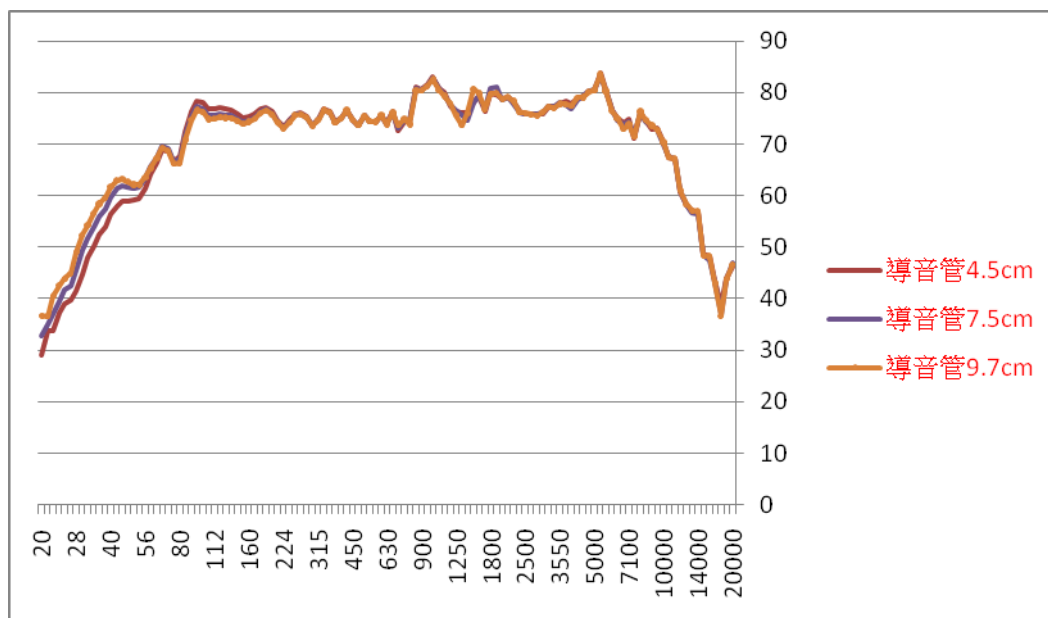


圖 33. SoundCheck 導音管實測

### 3-5 箱體內加 L 形管的實測

想針對箱體的設計做改變，在箱體內加一段 L 形管子如(圖 34.)，長度分別為 5cm、10cm、12cm、15cm 如(圖 35.)，針對長度的不同做 KLIPPEL 與 SoundCheck 的實測，從(圖 35.)可以發現管子較短時 dB 值較低一點，但大致上沒有很明顯的變化，可能和箱體的尺寸大小有關。



圖 34. L 形管



圖 35. 管子不同長度



KLIPPEL 量測的曲線圖

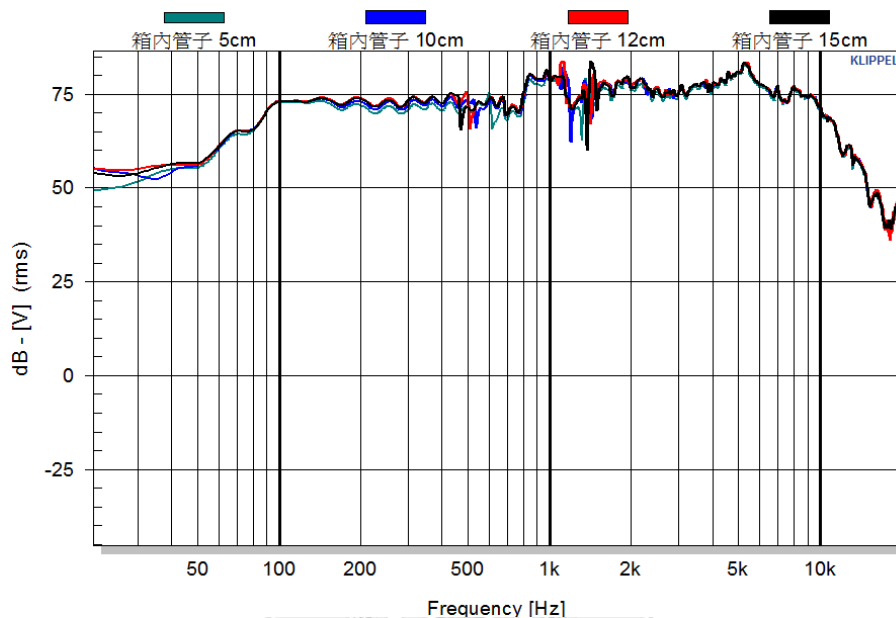


圖 35. KLIPPEL 箱內管子實測

SoundCheck 量測的曲線圖

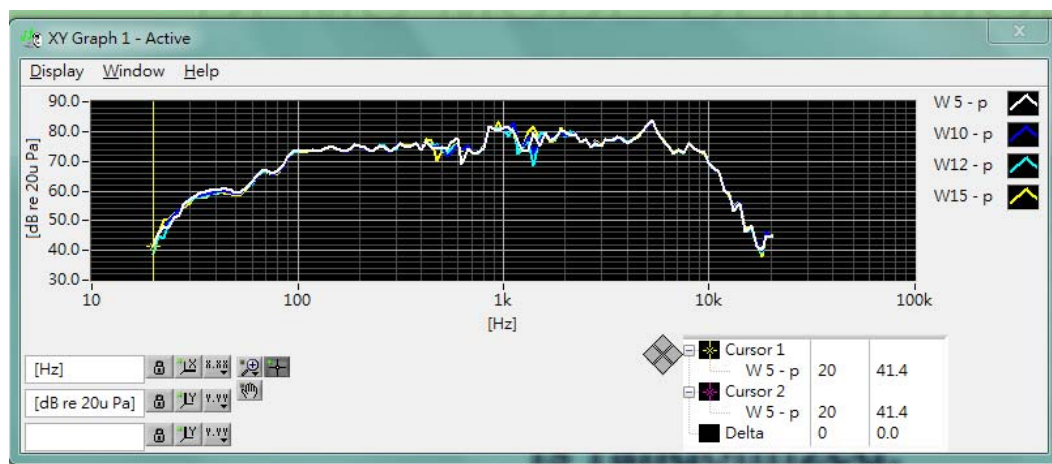


圖 36. SoundCheck 箱內管子實測

## 第四章 LoudSoft 的模擬與 KLIPPEL 的 SCN

### 4-1. LoudSoft 的 FINEMotor 模擬

首先利用實際的單體量測出來的數據, 輸入 FINEMotors 進行模擬, 在不破壞單體的前提下, 模擬出曲線。此單體的振膜直徑為 10.5cm, 共振頻率 75.8Hz  $Re:6.18\text{ Ohms}$ , 由外部量得隔磁罩高度約為 4.5cm, 直徑約為 9.5cm, 磁鐵高度為 4cm, 寬度為 2.21cm, 磁鐵距離 2.78cm,

最後再調整內部設定值得到模擬值  $Bl$  為 6.60Tm

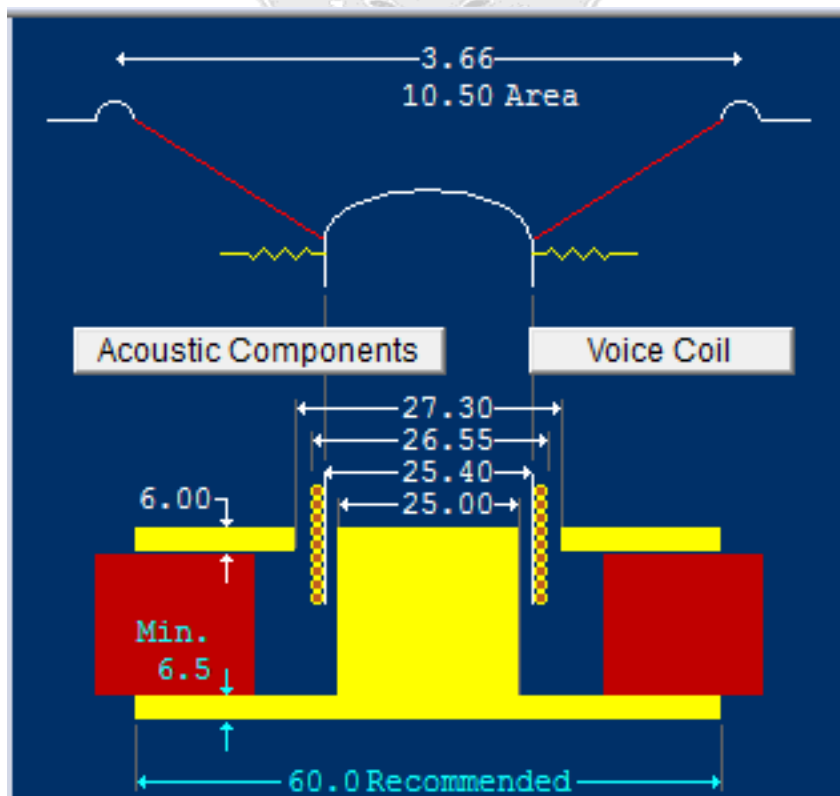


圖 37. FINEMotors 尺寸設定

Sensitivity (2.83V/1.00m)	SPL	64.43	dB
VC Resistance DCR	Re	6.18	Ohms
Resonance	Fs	75.80	Hz
Mechanical	Qms	3.00	
Electrical	Qes	0.96	
Total	Qts	0.73	
Equivalent air vol.	Vas	0.05	l
Compliance	Cms	0.31	mm/N
Moving Mass(incl. air)	Mms	14.22	g
Force Factor	Bl	6.60	Tm
Eff. diaphragm area	Sd	10.50	sq.cm
Lin. Excursion +/-	Xmlin	8.32	mm

圖 38. 模擬出 Bl 值為 6.60 Tm

LoudSoft 的 FINEMotor 模擬出單體的 Bl 值為 6.60 Tm 如(圖 39.)，KLIPPEL 量測出的 Bl 值為 6.61 Tm 如(圖 40.)，兩者比對之下 Bl 值非常相近，曲線也大略相同，模擬時若能有更詳細的尺寸規格，對於模擬的結果誤差將會更小。

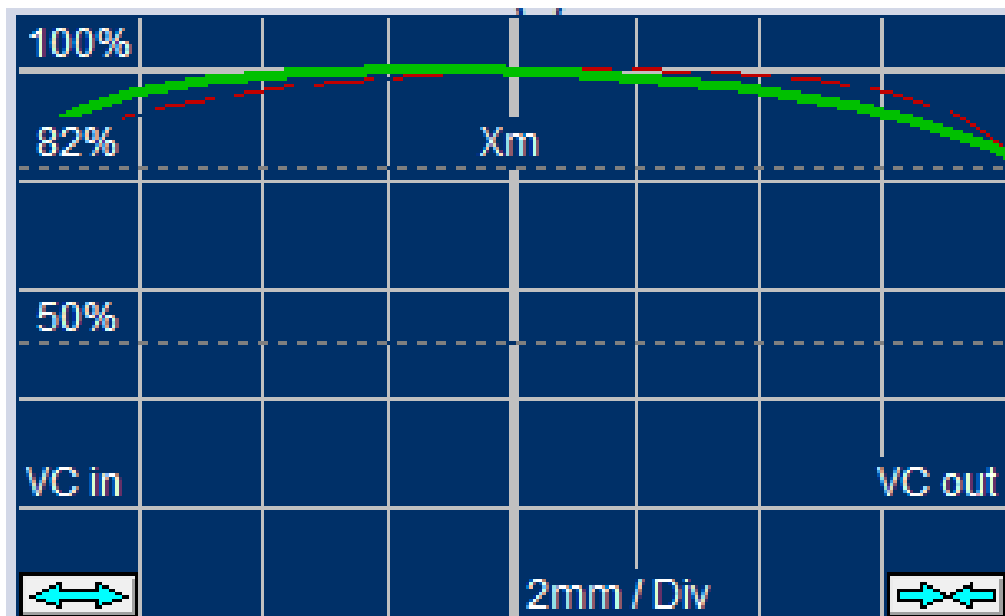


圖 39. 模擬的 B1 曲線

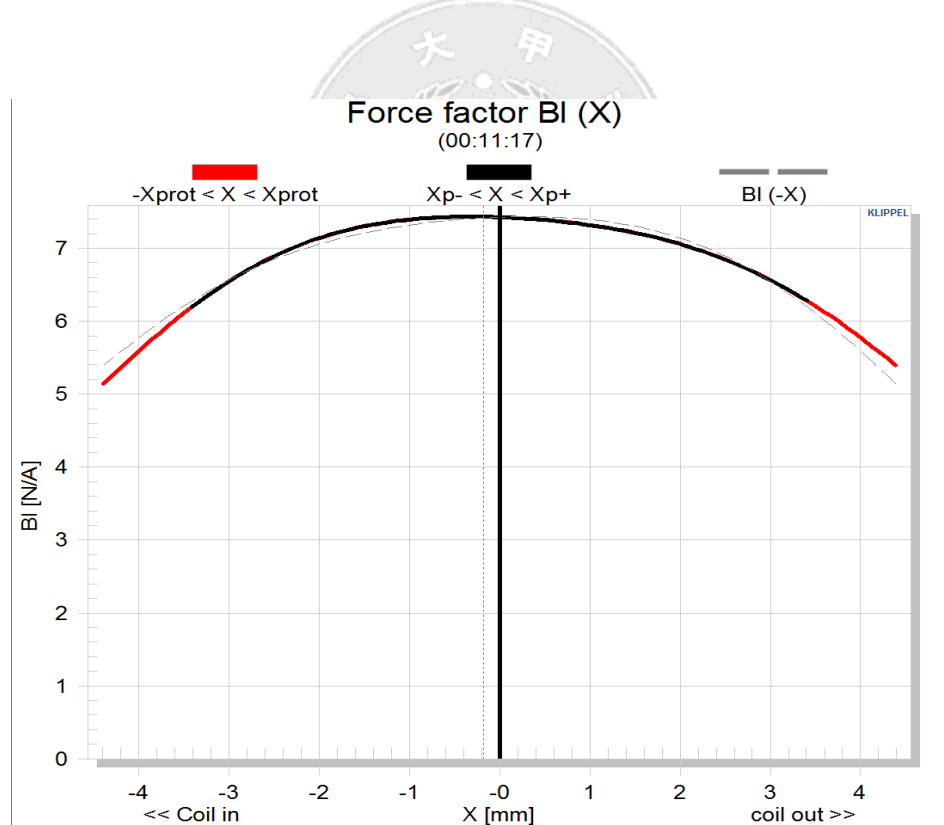


圖 40. KLIPPEL 量測的 B1 曲線

#### 4-2. KLIPPEL 單體 SCN 的量測分析

以雷射掃描儀器 KLIPPEL 量測揚聲器之模態，藉此了解揚聲器受激振後所產生的模態情況。關於振膜振動的方式，在 3D 幾何模式是用顏色來顯示信息。首先是基於色彩的振動幅度，向上的幅度是藍色，向下的幅度是紅色，強度的色彩表示是以振動幅度在相對於最大振幅的表面呈現。

從模態圖可以發現這個單體的在 500Hz 前，振膜幾乎是做剛體運動，直到 800Hz 左右才開始出現反共振模態。而徑向位移和切線方向位移為觀察振膜表面每個點上的振動變化，此單體的總位移圖如（圖 41），（圖 42.）為此單體的徑向位移，（圖 43.）為切線方向位移。

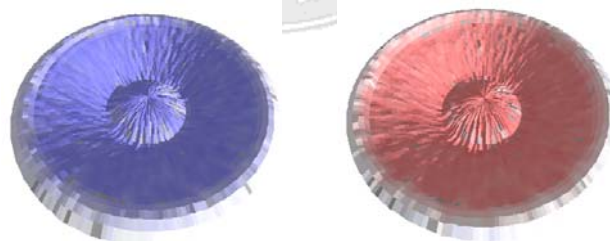


圖 41. 總位移

徑向位移：徑向方向可想像一個質點作圓周運動，保持半徑不變繞圓心旋轉，圓心與質點的連線方向就是徑向，由圓心往質點的方向為正，也可說半徑增加的方向為徑向的正方向。如（圖 43.）徑向示意圖。

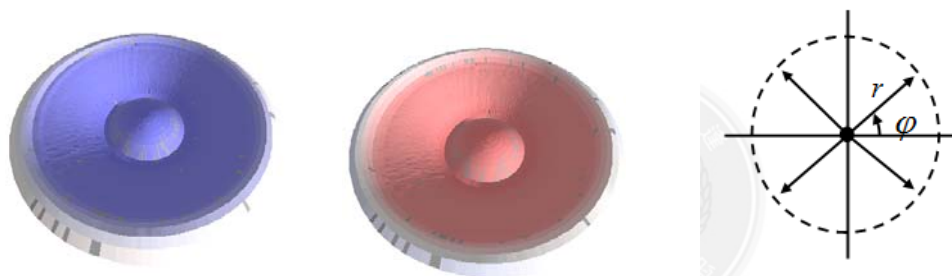


圖 42. 徑向位移

切線位移：切線方向可想像一個質點作圓周運動，保持半徑不變而作角度 $\phi$ 變化，所有角度變化點連接一起就是切線方向。如（圖 43.）為切線方向示意圖，虛線為質點方向，直線為切線方向。

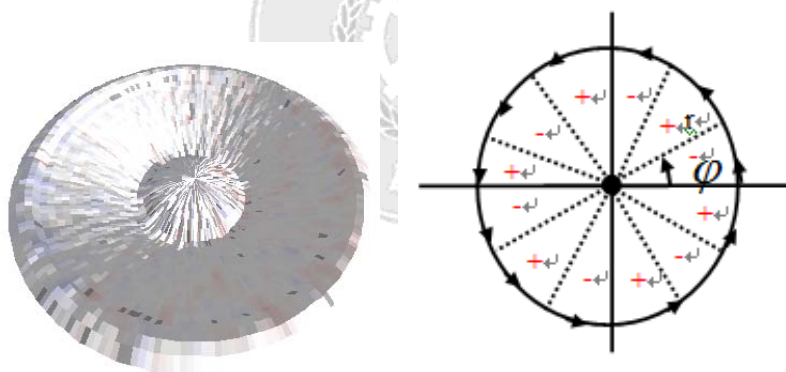


圖 43 切線方向位移

## 參考文獻

1. 杜功煥, 朱哲民, 鞏秀芬, “聲學基礎” 南京大學出版社
2. 周紹儒, “揚聲器的認識與製造” 徐氏基金會出版
3. 賴耿陽, 編譯 “揚聲器的設計與製作” 啟學出版社
4. 黃琮皓, “行動電話用揚聲器設計與分析”, 私立逢甲大學機械工程學系研究所碩士論文
5. 郭晟宇, “可攜式揚聲器之分析與模擬”, 私立逢甲大學機械工程學系研究所碩士論文
6. 白明憲, 編譯 “工程聲學” 全華科技圖書出版
7. F. J. M. FRANKORT “Vibration Patterns and Radiation Behavior of Loudspeaker Cones”
8. Christopher J. Struck “Analysis of the Nonrigid Behavior of a Loudspeaker Diaphragm Using Modal Analysis”
9. Mark H. Richardson “Is It a Mode Shape, or an Operating Deflection Shape?”
10. Wolfgang Klippel and Joachim Schlechter “Measurement and Visualization of Loudspeaker Cone Vibration”