



逢甲大學學生報告 ePaper

報告題名：揚聲器之等效電路模擬

作者：許時偉，陳宇智

系級：電聲碩士學位學程 99 級

學號：M9906311，M9906266

開課老師：黃錦煌

課程名稱：電聲換能器設計

開課系所：電聲碩士學位學程

開課學年：99 學年度 第 1 學期



中文摘要

(1)目的：在電聲換能器課堂中，我們學習到了如何利用等效電路模擬麥克風及揚聲器，為了節省公司成本不必要的浪費，從現有之音箱及揚聲器單體中，利用等效電路方式由 Mathematica 繪製，藉由 KILPPEL 量測揚聲器的 TS 參數匯入模擬數據，欲探討出最佳的情形。

實驗主要改變其幾何形狀及加入各變數如：導音管長度、吸音棉藉由模擬與量測結果比對，探討 SPL 曲線的差異及趨勢。透過比對會發現模擬與量測趨勢發展大致相同。

(2)過程及方法：首先我們先介紹揚聲器的測試，並且對測試結果進行性能比較與分析，在這當中我們會介紹測試環境、架構與儀器規格，然後對我們要量測之揚聲器進行量測。測試環境：在量測當中，我們必須將揚聲器放置於無響室中。無響室為模擬一個無限大的自由球體空間，室內所有邊界，在所有測試之頻域內，幾乎為 100%高度吸音的玻璃纖維或吸音棉所構成，也就是該室對最低截止頻率以上的任何聲波的散佈，都可以呈現完全無聲音反射的自由音場特性，使振動、轉動或壓縮類等音源所輻射的聲音功率和聲音強度，可以在音源之遠聲場的球體表之特定的參數座標位置上經由聲場的測試儀的配合與應用，得到最精密，完整的聲場數值。量測儀器：KLIPPEL

關鍵字：TS 參數、揚聲器、等效電路

目 次

一、研究方法.....	p.1
二、結果與討論.....	p.20
三、改變箱體.....	p.25
四、參考文獻.....	p.30



一、研究方法

首先我們先介紹揚聲器的測試，並且對測試結果進行性能比較與分析，在這當中我們會介紹測試環境、架構與儀器規格，然後對我們要量測之揚聲器進行量測。

3-1 量測儀器與設備介紹

1. 測試環境：在量測當中，我們必須將揚聲器放置於無響室中。無響室為模擬一個無限大的自由球體空間，室內所有邊界，在所有測試之頻域內，幾乎為 100% 高度吸音的玻璃纖維或吸音棉所構成，也就是該室對最低截止頻率以上的任何聲波的散佈，都可以呈現完全無聲音反射的自由音場特性，使振動、轉動或壓縮類等音源所幅射的聲音功率和聲音強度，可以在音源之遠聲場的球體表之特定的參數座標位置上經由聲場的測試儀的配合與應用，得到最精密，完整的聲場數值。

2. 無響室規格:無響室的規格是消音效果的高低指標，規格下：

內部噪音:20dB(A)以下； 公差規格： $\leq 125\text{Hz} \pm 2.0\text{dB}$ ；

160 ~ 630 Hz ± 1.5 dB； 800Hz ~ 5kHz $\pm 1.0\text{dB}$ ；

6.3kHz $\leq \pm 1.5$ dB； 消音效果：如表 2-1

表 2-1 無響室各頻率區間之消音效果

頻率(Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	8k
消音量(dB)	60	65	75	80	80	80	80

(1) 量測儀器：Klippel

3-2 T-s 參數

NAME	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters			
Re	6.36	Ohm	electrical voice coil resistance at DC
Le	0.789	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L2	1.294	mH	para-inductance of voice coil
R2	13.66	Ohm	electrical resistance due to eddy current losses
Cmes	135.41	漚	electrical capacitance representing moving mass
Lces	48.44	mH	electrical inductance representing driver compliance
Res	68.26	Ohm	resistance due to mechanical losses
fs	62.1	Hz	driver resonance frequency
Mechanical Parameters (using laser)			
Mms	12.587	g	mechanical mass of driver diaphragm assembly including air load and voice coil
Mmd (Sd)	12.131	g	mechanical mass of voice coil and diaphragm without air load
Rms	1.362	kg/s	mechanical resistance of total-driver losses
Cms	0.521	mm/N	mechanical compliance of driver suspension
Kms	1.92	N/mm	mechanical stiffness of driver suspension
Bl	9.641	N/A	force factor (Bl product)
Lambda s	0.049		suspension creep factor
Loss factors			
Qtp	0.309		total Q-factor considering all losses
Qms	3.609		mechanical Q-factor of driver in free air considering Rms only
Qes	0.336		electrical Q-factor of driver in free air considering Re only
Qts	0.308		total Q-factor considering Re and Rms only
Vas	5.5302	l	equivalent air volume of suspension
n0	0.379	%	reference efficiency (2 pi-radiation using Re)
Lm	87.99	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1m for 1W @ Re)
Lnom	87.73	dB	nominal sensitivity (SPL at 1m for 1W @ Zn)
rms Z	3.75	%	root-mean-square fitting error of driver impedance Z(f)
rms Hx	1.96	%	root-mean-square fitting error of transfer function Hx (f)
Series resistor			
Sd	0.00	Ohm	resistance of series resistor
	86.59	cm	diaphragm area



Fig.1 T-s 參數圖

(揚聲器之等效電路模擬)

3-3 等效電路模擬

1. 等效電路模擬是揚聲器低頻分析的重要工具，透過它可以分析揚

聲器的聲音表現，這裡介紹等效電路的概念：

(1) 等效電路分為三部分：電學、機械和聲學部分

(2) 全部都等效到聲學端，用於揚聲器輸出的分析，推導出體積速度，

再將其結果帶入音壓公式，可以求得音壓的頻率響應曲線。

(3) 下面介紹揚聲器在三種不同的情況下，等效電路的不同，可得

表 2-2 的公式。

Domain	符號	名稱	表示式
Acoustic domain	m_{a-rad}	輻射質量	$B_1 \frac{\rho_0 \Gamma_D}{A_D}$
	R_{a-rad}	輻射聲阻	$\frac{B_1^2 \rho_0 \Gamma_D}{B_r A_D}$
	$m_{a-radbh}$	洩音孔輻射質量	$B_1 \frac{\rho_0 \Gamma_{bh}}{A_{bh}}$
	$R_{a-radbh}$	洩音孔輻射聲阻	$\frac{B_1^2 \rho_0 c}{B_r A_{bh}}$
	m_{aB}	音箱空氣質量	$\frac{\rho_0 V_B}{A_B^2}$

(揚聲器之等效電路模擬)

	C_{aB}	音箱電容	$\frac{V_B}{\gamma P_0}$
	m_{abh}	洩音孔空氣質量	$\frac{\rho_0 V_{bh}}{A_{bh}^2}$
	R_{abh}	洩音孔聲阻	$\frac{8\pi\eta l_{bh}}{(A_{bh})^2}$
	m_{ap}	導音管空氣質量	$\frac{\rho_0 V_{ap}}{A_{ap}^2}$
	C_{ap}	導音管電容	$\frac{V_{ap}}{\rho_0 c^2}$
Mechanical Domain	m_m	振膜質量	量測值
	C_m	振膜機械電容	量測值
	R_m	振膜聲阻	量測值
Electric domain	R_g	信號源內阻	理論值

(揚聲器之等效電路模擬)

	R_e	音圈電阻	量測值
	L_e	音圈電感	量測值

表 2-2

2. 等效電路圖

(1) 揚聲器單體



Fig.2 單體圖(感謝美隆公司提供)

(揚聲器之等效電路模擬)

等效電路圖

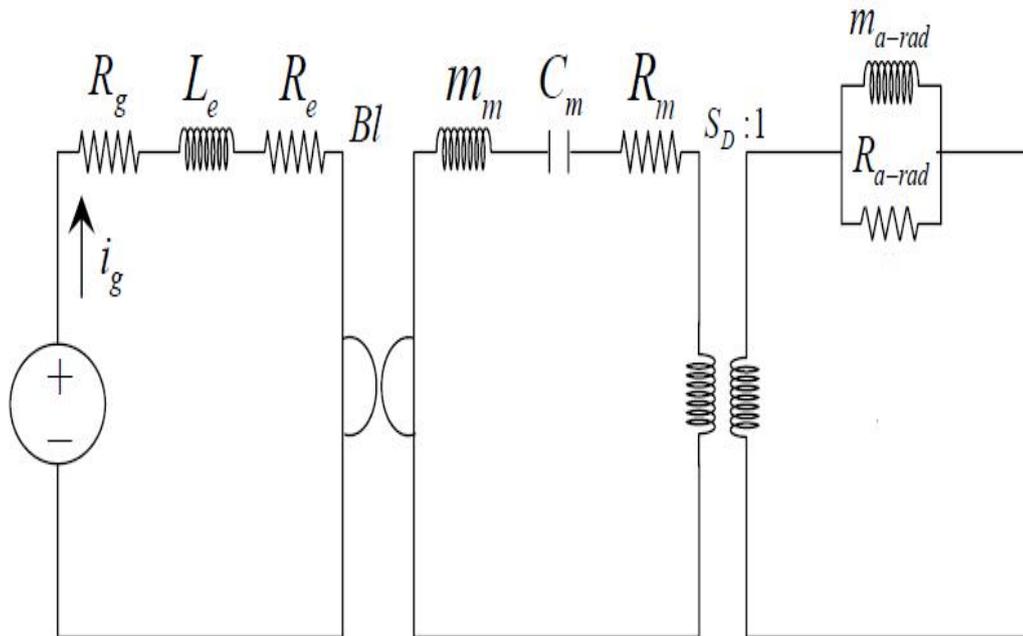


Fig.3 揚聲器單體等效電路圖

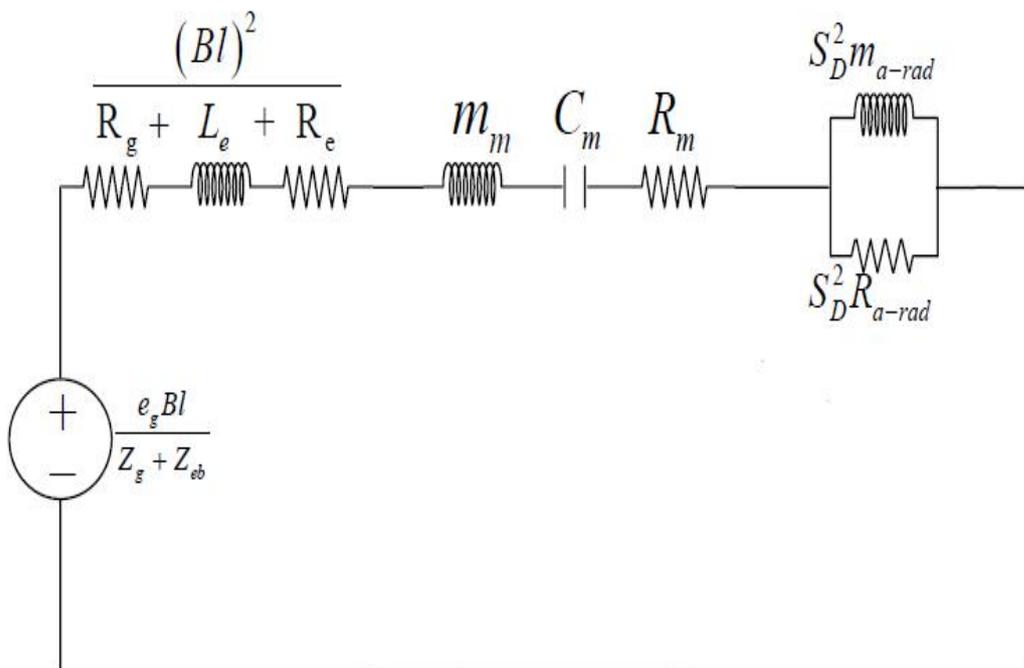


Fig.4 揚聲器單體等效電路圖

(揚聲器之等效電路模擬)

A. 等效電路分析

a. 電的部分:

$$Z_g = \frac{1}{R_g} + \frac{1}{i\omega L_g} \quad (2-2.1.1)$$

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e \quad (2-2.1.2)$$

$$Z_{elc} = \frac{Bl^2}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.1.3)$$

b. 機械的部分:

$$Z_m = i * \omega * m_m + R_m + \frac{1}{i * \omega * C_m} \quad (2-2.1.4)$$

c. 聲音的部分:

$$Z_{arad} = \Lambda_D^2 * \left(\frac{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}}{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}} \right) \quad (2-2.1.5)$$

d. 整個等效電路總電阻:

$$Z_Z = Z_{elc} + Z_m + Z_{arad} \quad (2-2.1.6)$$

e. 等效電路中速度:

$$V_d = \frac{1}{Z_Z} * \frac{eg * Rl}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.1.7)$$

f. 體積速度:

$$U_D = V_d * S_d \quad (2-2.1.8)$$



(揚聲器之等效電路模擬)

(2) 揚聲器單體加音箱



Fig.5 單體加封閉音箱(感謝美隆公司提供)

(揚聲器之等效電路模擬)

等效電路圖

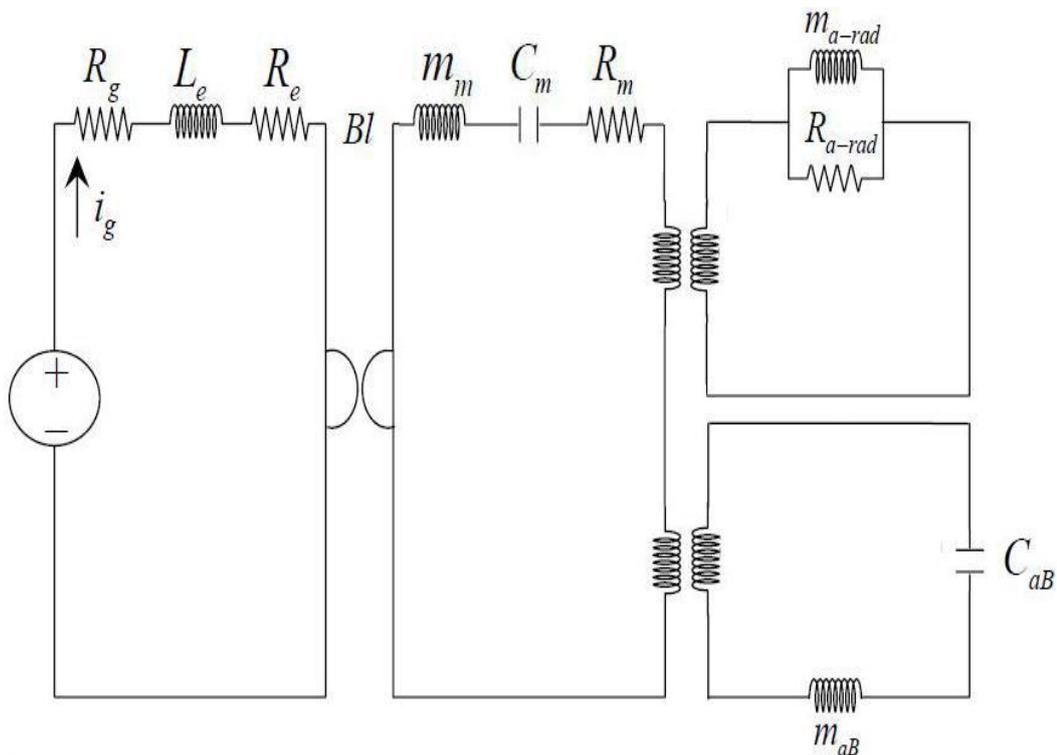


Fig.6 模擬揚聲器音箱封閉之等效電路圖

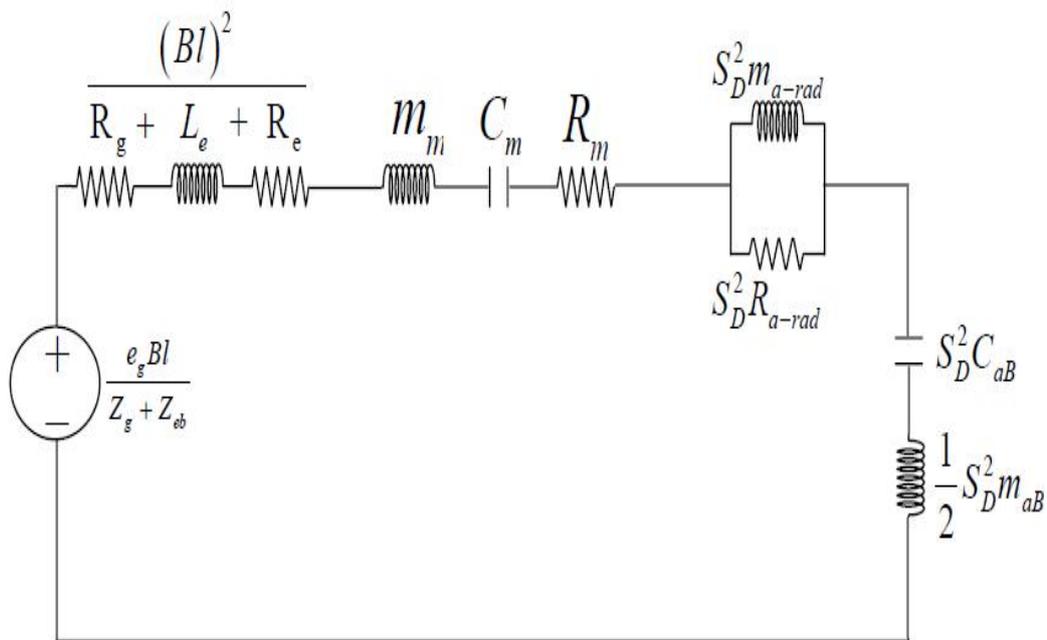


Fig.7 模擬揚聲器音箱封閉之等效電路圖

(揚聲器之等效電路模擬)

A. 等效電路分析

a. 電的部分:

$$Z_g = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{i\omega L_g}} \quad (2-2.2.1)$$

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e \quad (2-2.2.2)$$

$$Z_{elc} = \frac{Bl^2}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.2.3)$$

b. 機械的部分:

$$Z_m = i * \omega * m_m + R_m + \frac{1}{i * \omega * C_m} \quad (2-2.2.4)$$

c. 聲音的部分:

$$Z_{arad} = A_D^2 * \left(\frac{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}}{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}} \right) \quad (2-2.2.5)$$

$$Z_{ab} = S_d^2 * \left(i * \omega * m_{aB} + \frac{1}{i * \omega * C_{aB}} \right) \text{ (箱體阻抗)} \quad (2-2.2.6)$$

d. 整個等效電路總電阻:

$$Z_Z = Z_{elc} + Z_m + Z_{arad} + Z_{ab} \quad (2-2.2.7)$$

e. 等效電路中速度:

$$V_d = \frac{1}{Z_Z} * \frac{e_g * Bl}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.2.8)$$

f. 體積速度:

$$U_D = V_d * S_d \quad (2-2.2.9)$$

(揚聲器之等效電路模擬)

(3) 揚聲器音箱洩氣



Fig.8 洩氣孔(感謝美隆公司提供)

(揚聲器之等效電路模擬)

等效電路圖

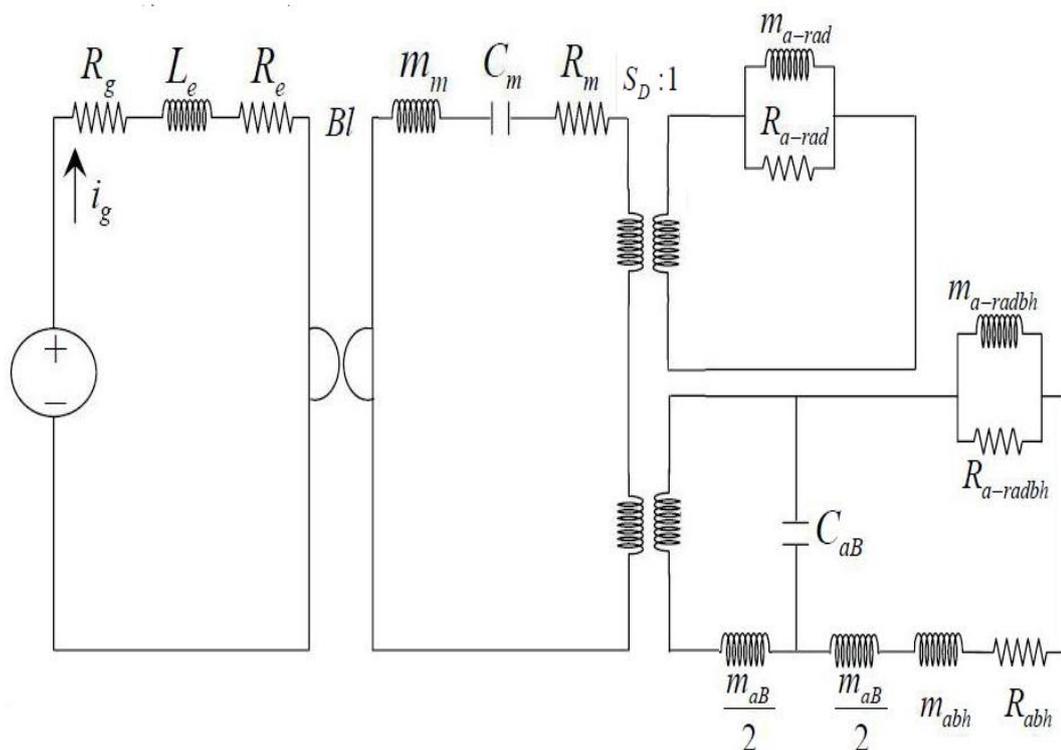


Fig.9 揚聲器音箱洩氣等效電路圖

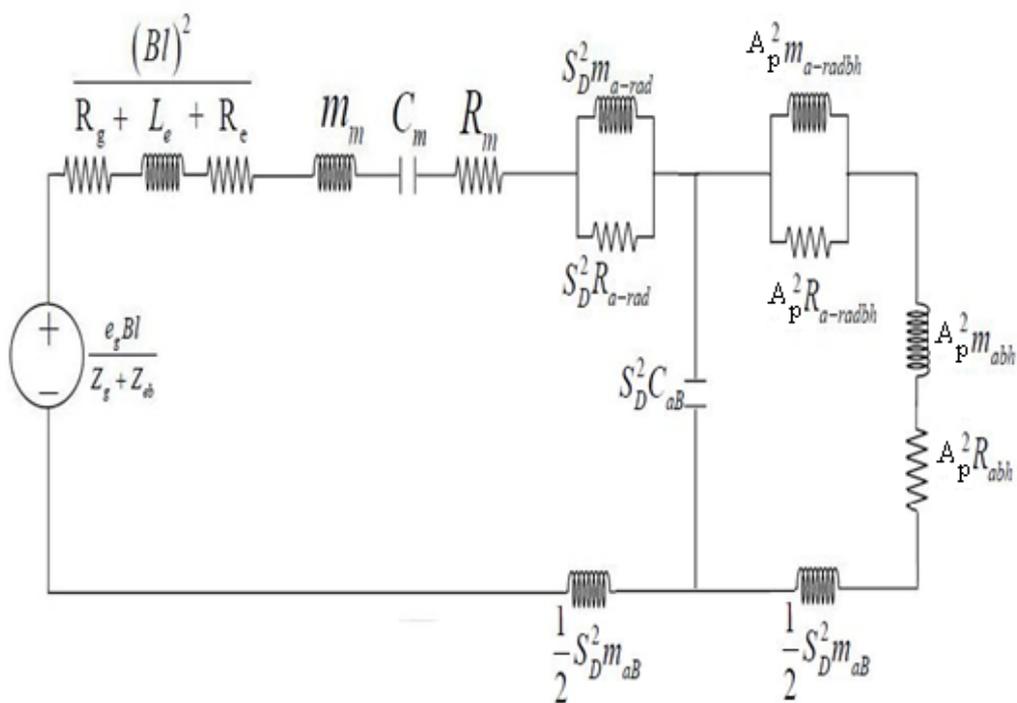


Fig.10 揚聲器音箱洩氣等效電路圖

(揚聲器之等效電路模擬)

A. 等效電路分析

a. 電的部分:

$$Z_g = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{i\omega L_g}} \quad (2-2.3.1)$$

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e \quad (2-2.3.2)$$

$$Z_{etc} = \frac{Bf^2}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.3.3)$$

b. 機械的部分:

$$Z_m = i * \omega * m_m + R_m + \frac{1}{i * \omega * C_m} \quad (2-2.3.4)$$

c. 聲音的部分:

$$Z_{arad} = A_D^2 * \left(\frac{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}}{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}} \right) \quad (2-2.3.5)$$

$$Z_{aB1} = S_d^2 * \left(i * \omega * m_{aB} + \frac{1}{i * \omega * C_{aB}} \right) \quad (2-2.3.6)$$

$$Z_{aB2} = S_d^2 * \left(\frac{1}{2} * i * \omega * m_{aB} \right) \quad (2-2.3.7)$$

$$Z_{aB3} = S_d^2 * \left(\frac{1}{2} * i * \omega * m_{aB} \right) \quad (2-2.3.8)$$

$$Z_{aparad} = A_p^2 * \left(\frac{R_{aparad} + i * \omega * m_{aparad}}{R_{aparad} + i * \omega * m_{aparad}} \right) \quad (2-2.3.9)$$

d. 整個等效電路總電阻:

(揚聲器之等效電路模擬)

$$Z = \frac{Bl^2}{Z_g + Z_{eb}}$$

$$= \left(\begin{array}{c} Z_{elc} + Z_m + Z_{\text{rad}} + Z_{sB1} + Z_{sB2} \\ -Z_{sB1} \end{array} \quad \begin{array}{c} -Z_{sB1} \\ Z_{\text{aparad}} + Z_{\text{abh}} + Z_{sB1} + Z_{sB3} \end{array} \right)$$

(2-2.3.10)

e. 等效電路中速度：

$$V_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \text{Inverse}[Z] \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} * \frac{eg \cdot Bl}{Z_g + Z_{eb}}$$

(2-2.3.11)

f. 體積速度：

$$U_D = V_d * S_d$$

(2-2.3.12)

(4) 揚聲器音箱加導音管



(揚聲器之等效電路模擬)

Fig.11 加導音管音箱(感謝美隆公司提供)

等效電路圖

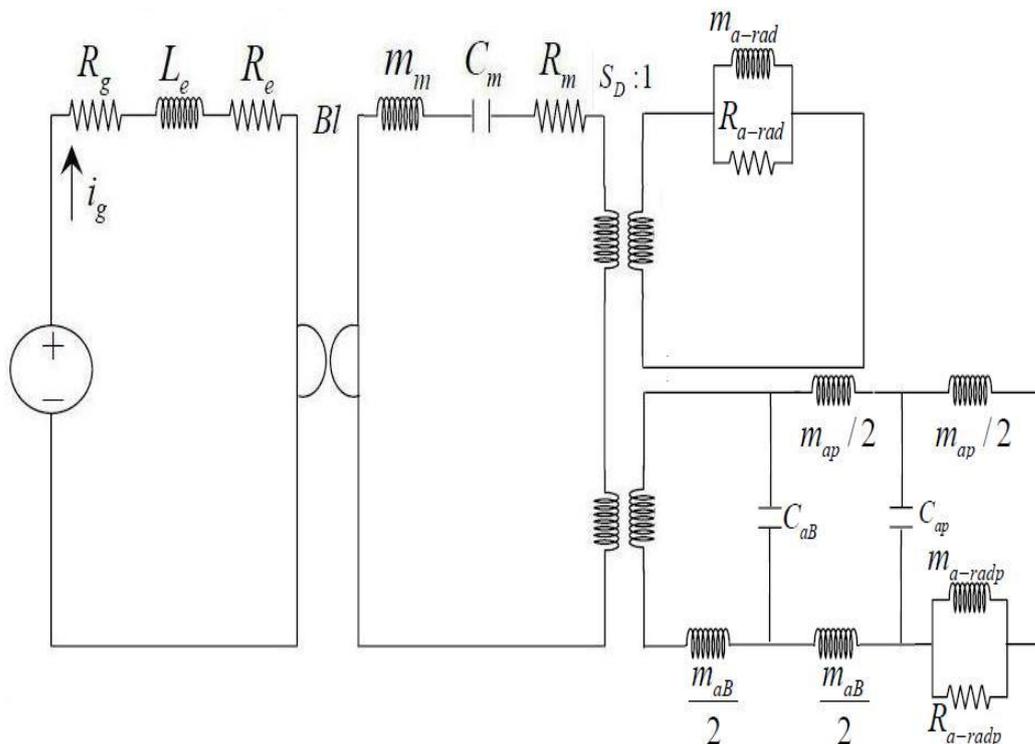


Fig.12 揚聲器音箱加導音管等效電路圖

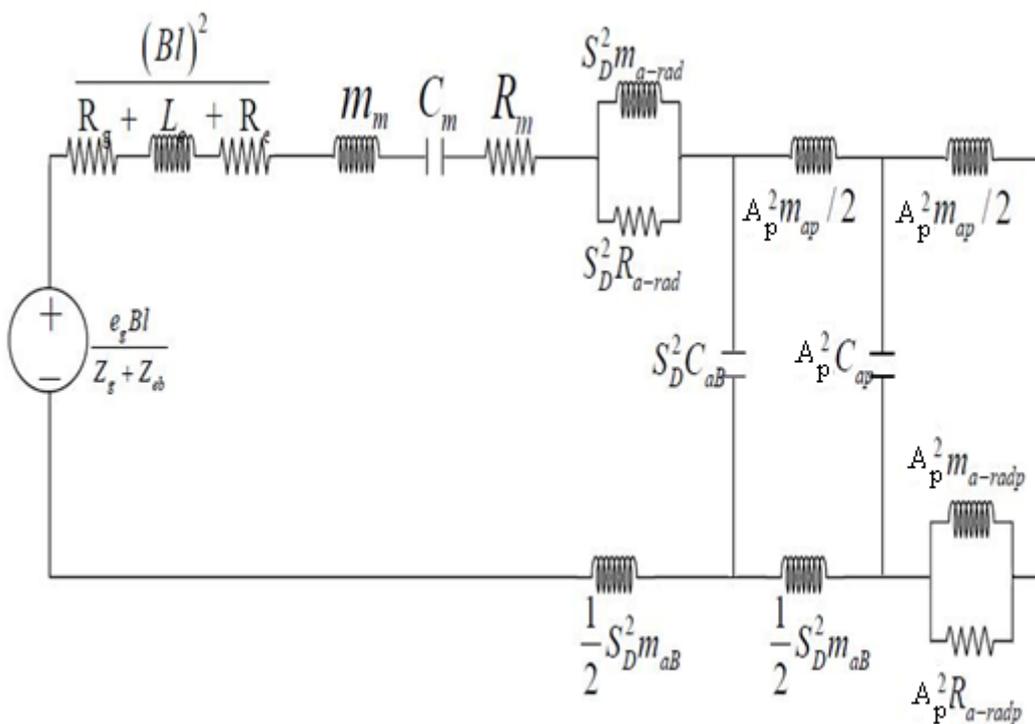


Fig.13 揚聲器音箱加導音管等效電路圖

(揚聲器之等效電路模擬)

A. 等效電路分析

a. 電的部分:

$$Z_g = \frac{1}{\frac{1}{R_g} + \frac{1}{i\omega C_g}} \quad (2-2.3.1)$$

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e \quad (2-2.3.2)$$

$$Z_{etc} = \frac{Bf^2}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.3.3)$$

b. 機械的部分:

$$Z_m = i * \omega * m_m + R_m + \frac{f}{i * \omega * C_m} \quad (2-2.3.4)$$

c. 聲音的部分:

$$Z_{arad} = A_D^2 * \left(\frac{R_{arad} * i * \omega * m_{arad}}{R_{arad} + i * \omega * m_{arad}} \right) \quad (2-2.3.5)$$

$$Z_{aB1} = S_d^2 * \left(i * \omega * m_{aB} + \frac{1}{i * \omega * C_{aB}} \right) \quad (2-2.3.6)$$

$$Z_{aB2} = S_d^2 * \left(\frac{1}{2} * i * \omega * m_{aB} \right) \quad (2-2.3.7)$$

$$Z_{aB3} = S_d^2 * \left(\frac{1}{2} * i * \omega * m_{aB} \right) \quad (2-2.3.8)$$

$$Z_{aparad} = A_p^2 * \left(\frac{R_{aparad} * i * \omega * m_{aparad}}{R_{aparad} + i * \omega * m_{aparad}} \right) \quad (2-2.3.9)$$

$$Z_{wap1} = A_p^2 * \left(\frac{f}{i * \omega * C_{wap}} \right) \quad (2-2.3.10)$$

(揚聲器之等效電路模擬)

$$Z_{wap2} = A_p^2 * \left(\frac{l}{2} * i * \square * m_{wap}\right) \quad (2-2.3.11)$$

$$Z_{wap3} = A_p^2 * \left(\frac{l}{2} * i * \square * m_{wap}\right) \quad (2-2.3.12)$$

d. 整個等效電路總電阻：

$$Z = \frac{Bl^2}{(Z_g + Z_{eb})} = \begin{pmatrix} Z_{elc} + Z_m^0 + Z_{arad} + Z_{aB1} + Z_{aB2} & -Z_{aB1} & 0 \\ -Z_{aB1} & Z_{aB1} + Z_{wap1} + Z_{wap2} + Z_{wap3} & -Z_{wap1} \\ 0 & -Z_{wap1} & Z_{wap1} + Z_{aparad} + Z_{wap3} \end{pmatrix} \quad (2-2.3.13)$$

e. 等效電路中速度：

$$V_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \text{Inverse}[Z] \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} * \frac{eg * Bl}{Z_g + Z_{eb}} \quad (2-2.3.14)$$

f. 體積速度：

$$U_D = V_d * S_d \quad (2-2.3.15)$$

二、結果與討論

揚聲器在封裝之前為一單體，在此單體在無限大的障板下，測試麥克風(B&K)在揚聲器的軸向距離 1 公尺狀況下，實際量測與模擬的結果。

模擬與實測的趨勢符合，可藉由模擬較明顯的看出差異性。但在較高頻段時下降並沒那麼快速，而且 dB 值上有較大的差異，必須考慮更多的參數。

(1) 單體模擬與量測圖

如 Fig.9，單體第一共振頻率約發生在 90-100 左右，且對於低頻的效果較好。

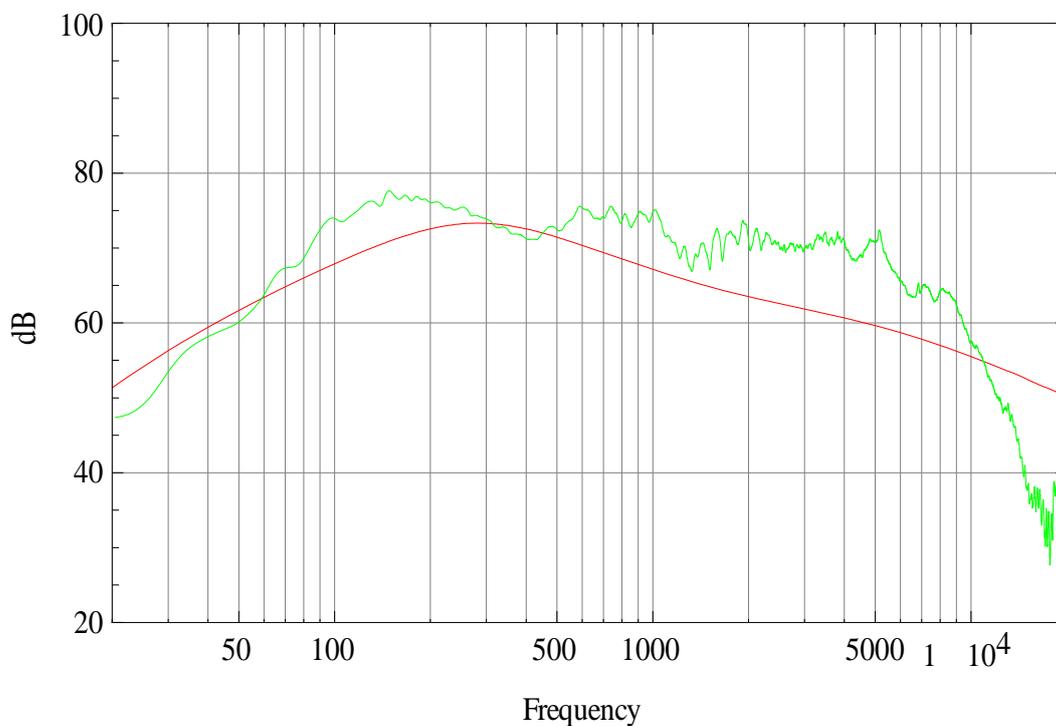


Fig.14 單體 紅:模擬 綠:量測

(揚聲器之等效電路模擬)

(2) 單體加封閉音箱

如 Fig.10，加上音箱以後，趨勢會往高頻移，且在約 1000Hz 時會產生一個 Peak。影響較多的在於低中頻比較明顯，比單體少約 5 - 10 dB，而越往高頻走越無影響。

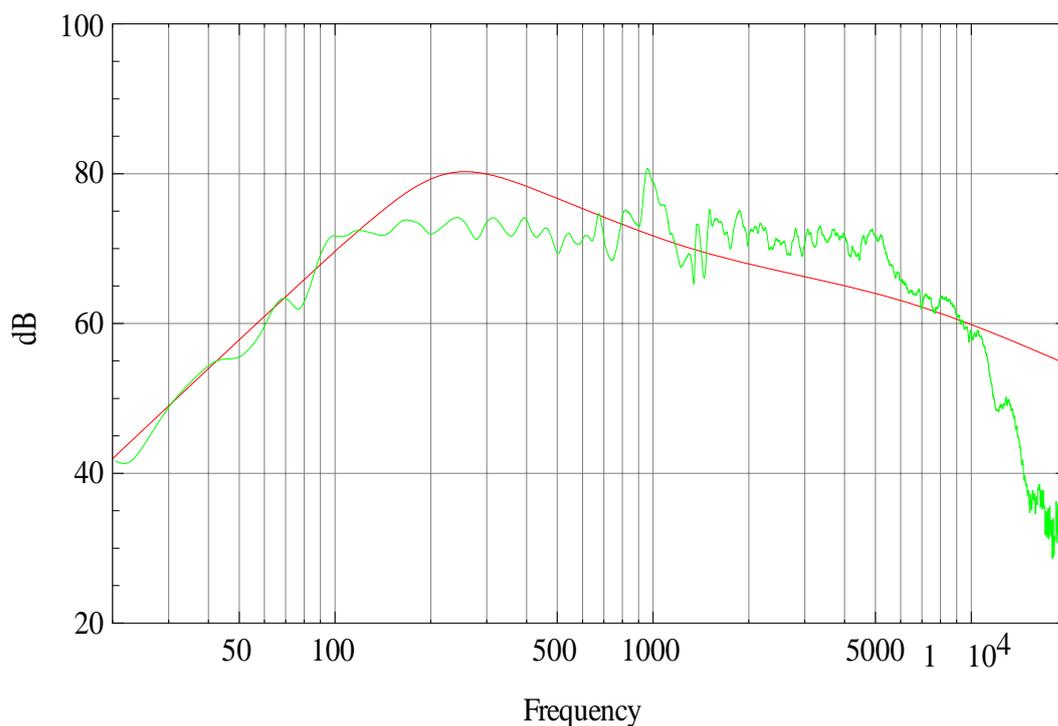


Fig.15 單體加音箱 紅:模擬 綠:量測

(揚聲器之等效電路模擬)

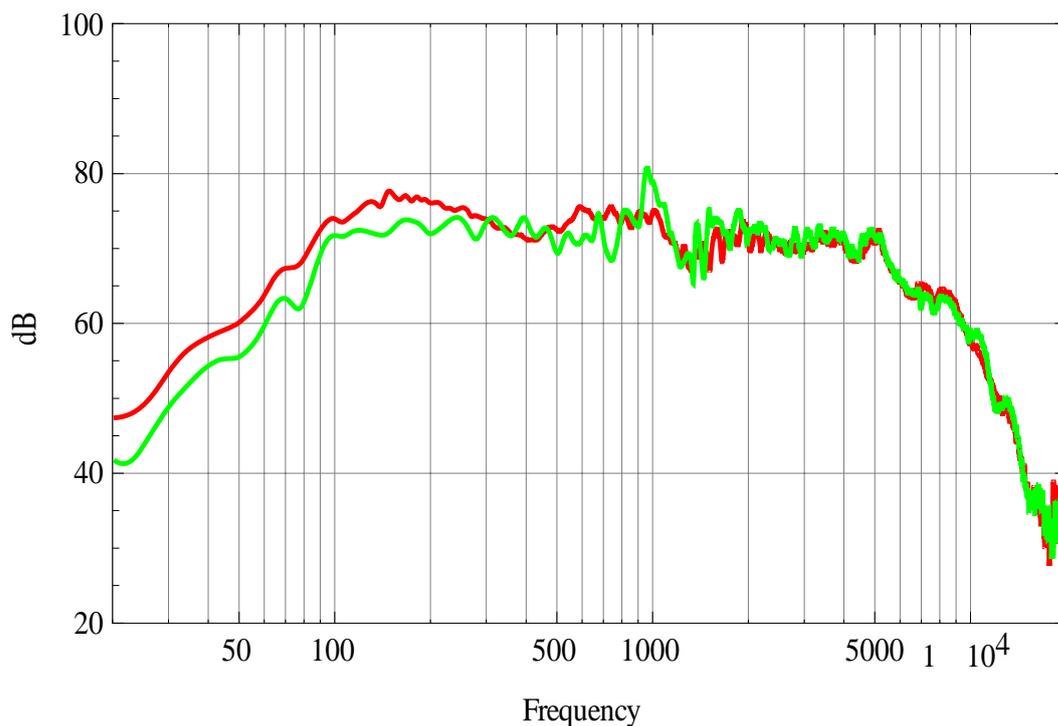


Fig.16 單體與音箱比對 紅:單體 綠:量測

(3) 單體加音箱洩音孔及導音管

增加導音管會在中頻部份產生一 peak，變更長度當導音管越長時，peak 值會往高頻移動，並且在 500Hz 後的震盪較大。量測兩加不同導音管音箱，分別為 7.5 公分與 9.7 公分，9.7 公分的 peak 產生處較 7.5 高頻，並且在約 400Hz 時也產生一小小 deep。

(揚聲器之等效電路模擬)

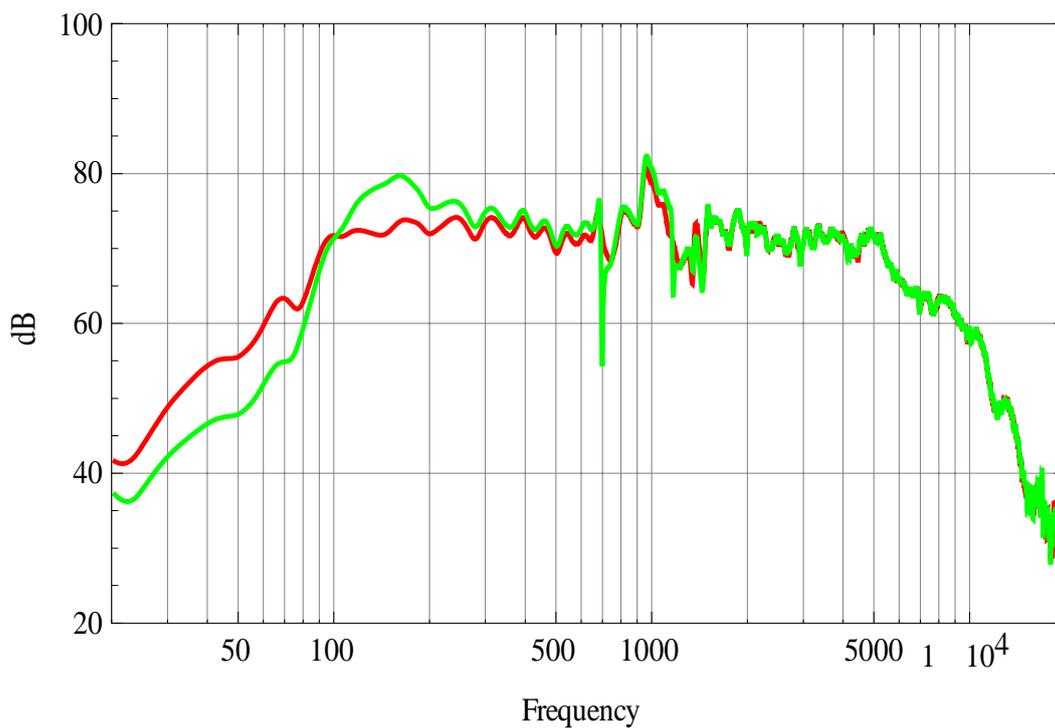


Fig.17 量測洩音孔與封閉音箱比較 紅:封閉音箱 綠:有洩音孔

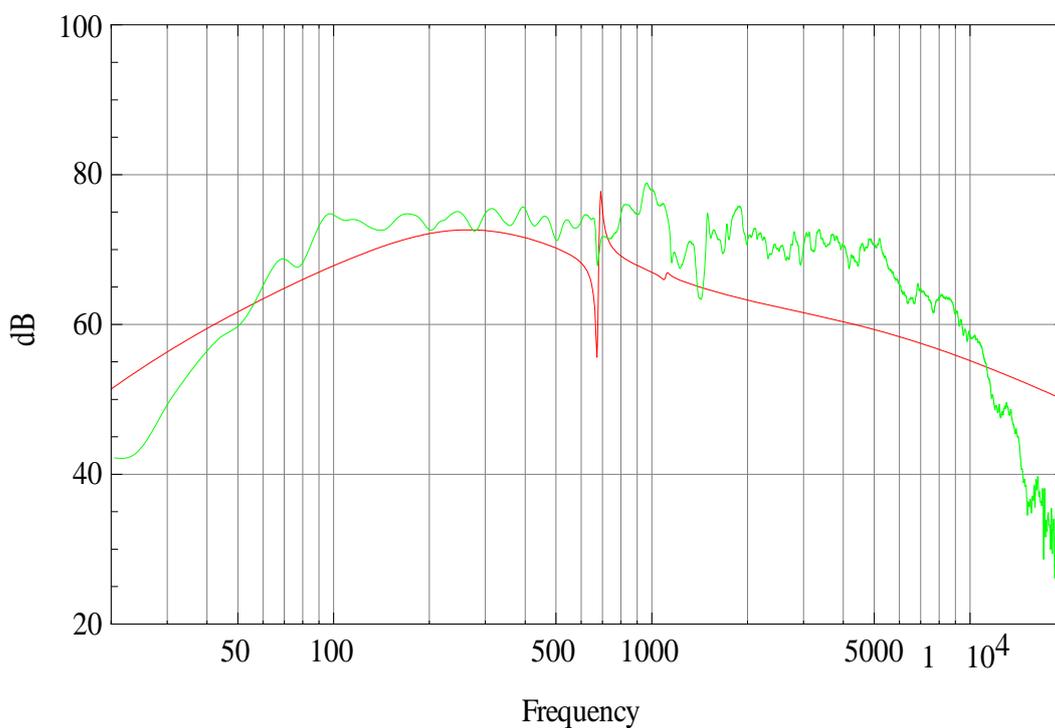


Fig.18 導音管長 7.5 公分 紅:模擬 綠:量測

(揚聲器之等效電路模擬)

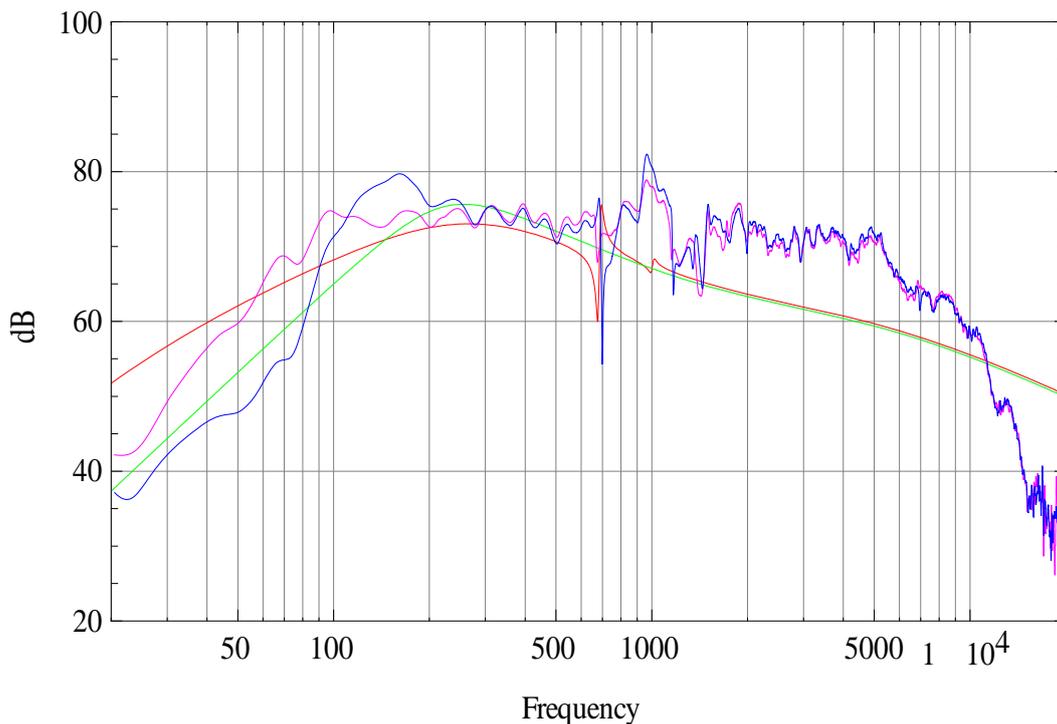


Fig.19 導音管有無的模擬與量測比較

(紅:模擬 7.5CM 導音管 綠:模擬封閉音箱 藍:量測 7.5CM 導音管 紫:量測封閉)

模擬數值 7.5 公分導音管在約 20Hz 時就高出封閉音箱約 10dB，並且在 600Hz 時產生一 deep，與實際值趨勢相同，並兩者在大約 5000Hz 時降低。

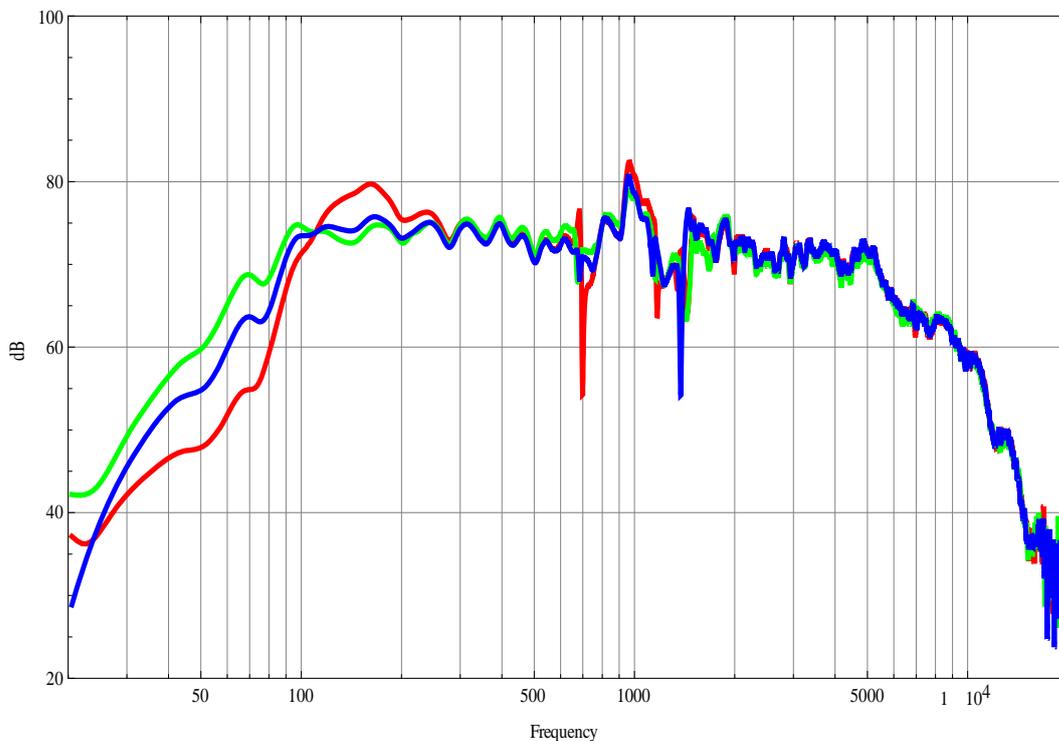


Fig.20 實測無導音管不同長度比對 紅:無 綠:7.5 公分 藍:9.7 公分

(揚聲器之等效電路模擬)

三、 改變箱體幾何形狀

我們這次選擇的變化為改變揚聲器箱體，因考慮箱體內低音反射的設計，及是將箱體內的 U 型設計設計成一個箱體。

我們把原本長方體之箱體改變為 U 型管箱體與圓柱管箱體，並利用 comsol 模擬其消音效果並與 klippel 所量測出來之 SPL 曲線做比對。

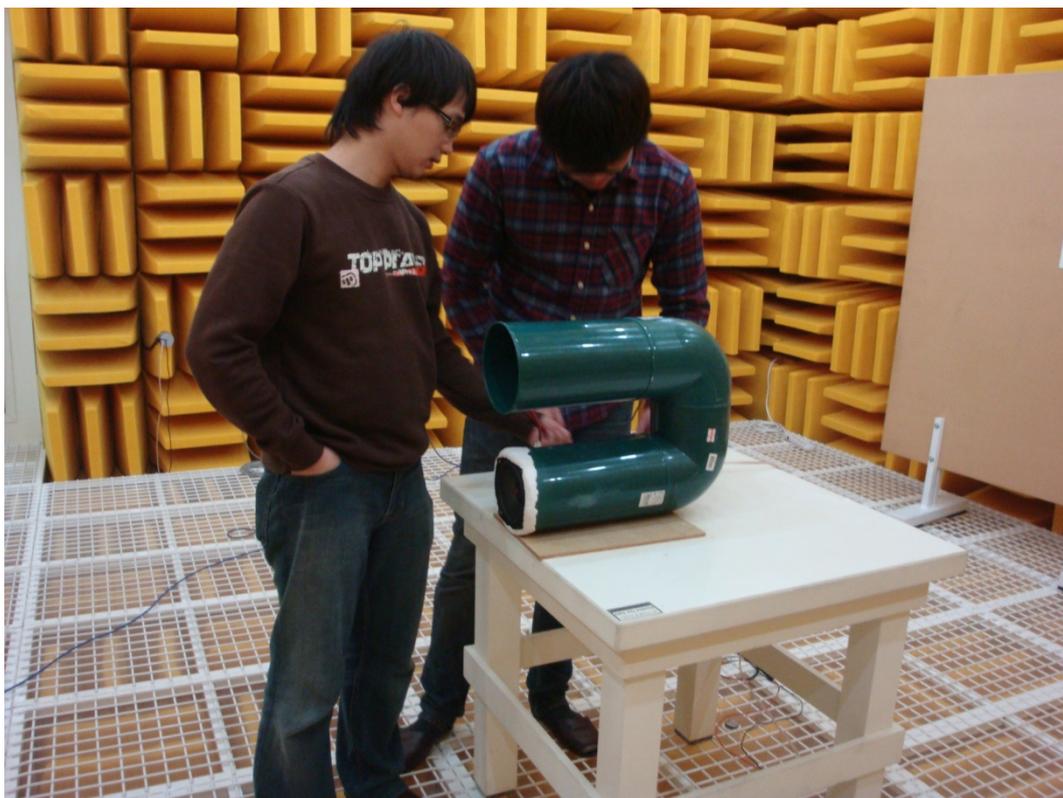


Fig.21 U 型音箱圖

(揚聲器之等效電路模擬)

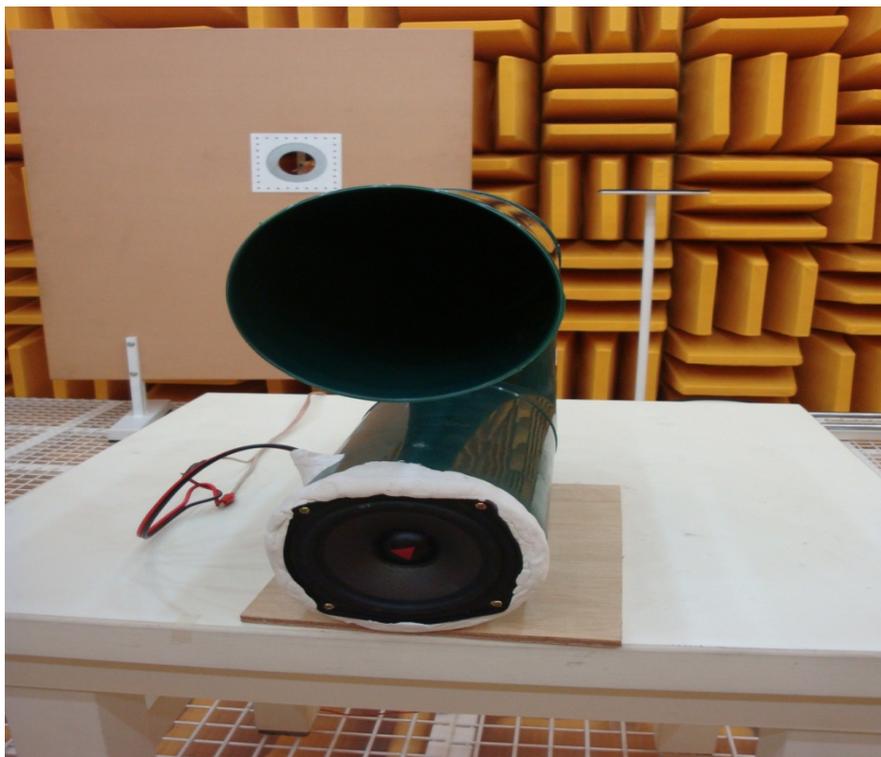


Fig.22 U 型音箱圖

1. 模擬與量測比較圖

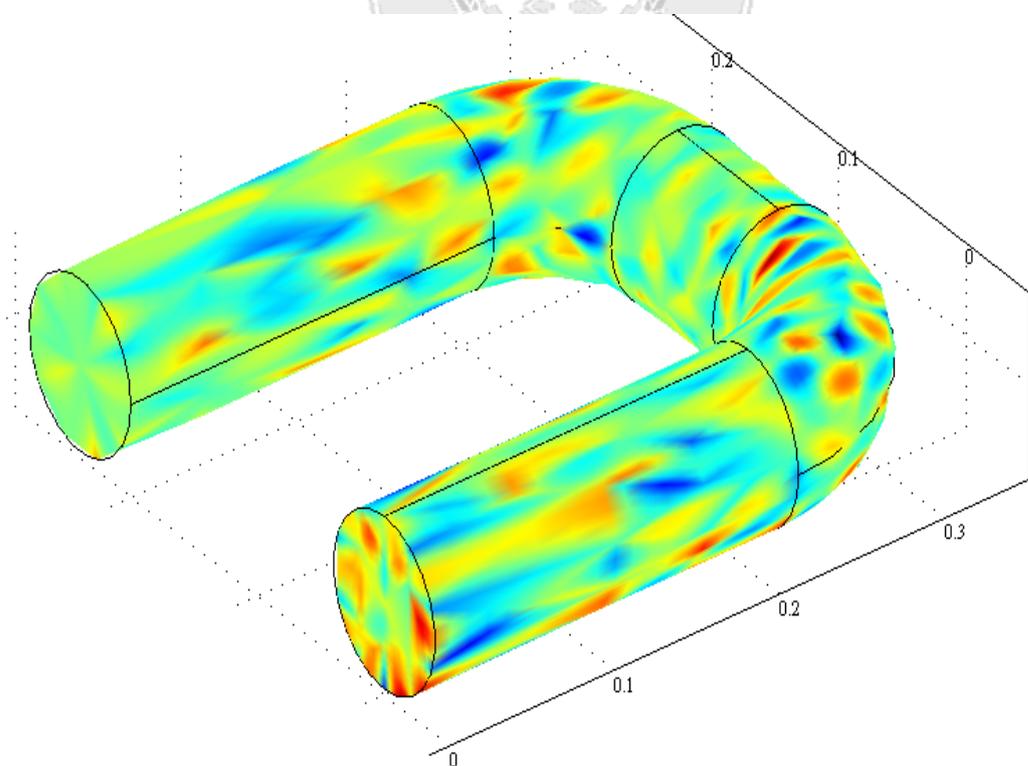


Fig.23 U 型管模擬圖

(揚聲器之等效電路模擬)

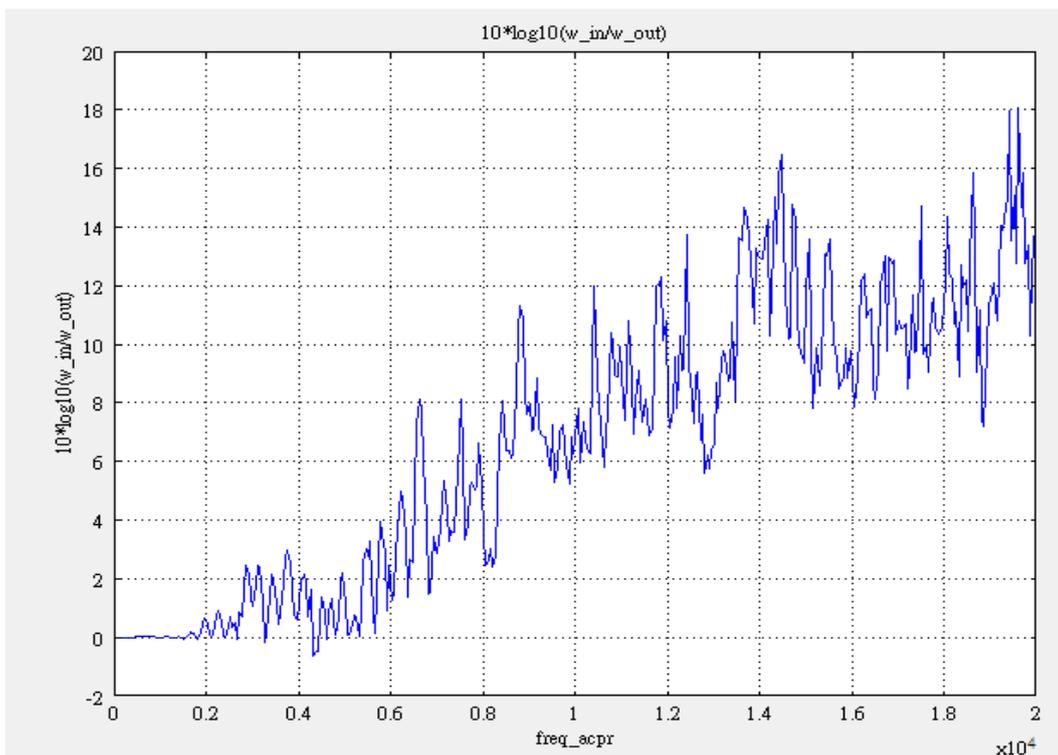


Fig.24 U 型管模擬曲線

Magnitude of transfer function $H(f)$
 $H(f) = \text{Signal at IN1} / \text{Stimulus}$

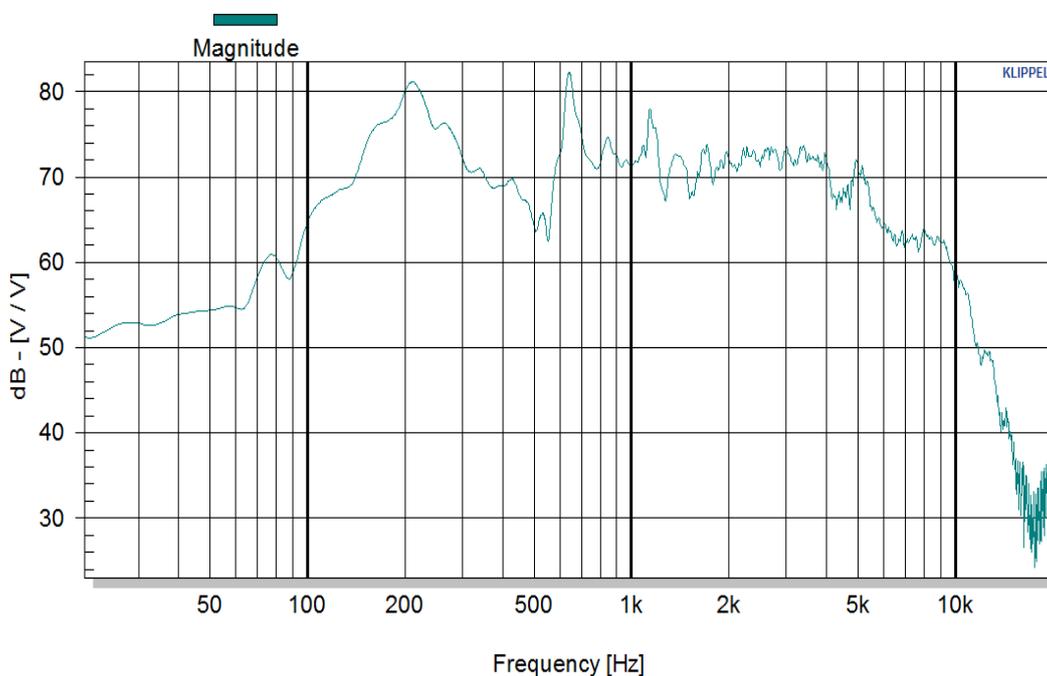


Fig.25 U 型管 klippel 量測曲線

(揚聲器之等效電路模擬)

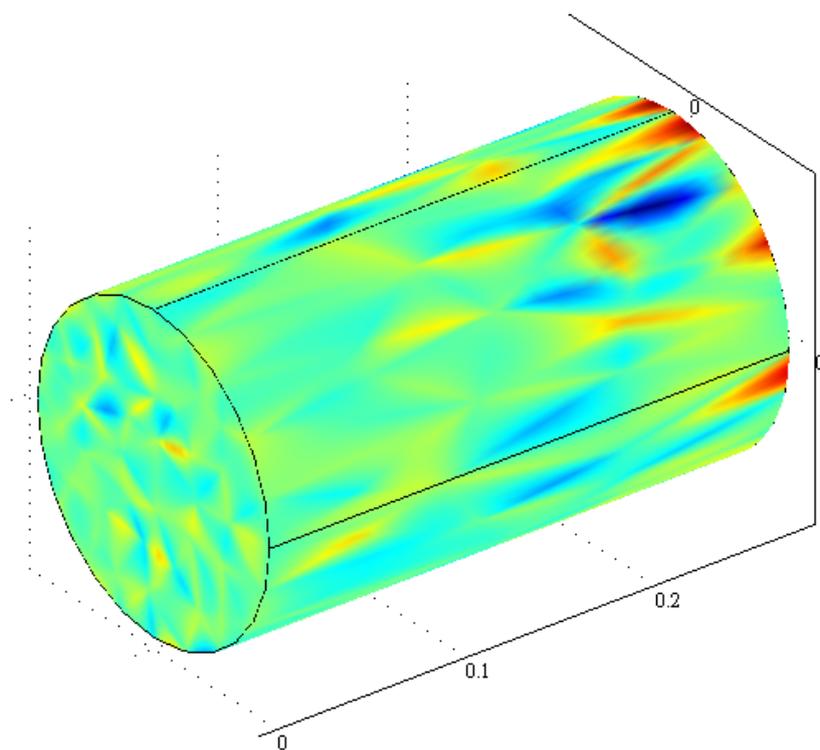


Fig.26 圓柱管箱體模擬圖

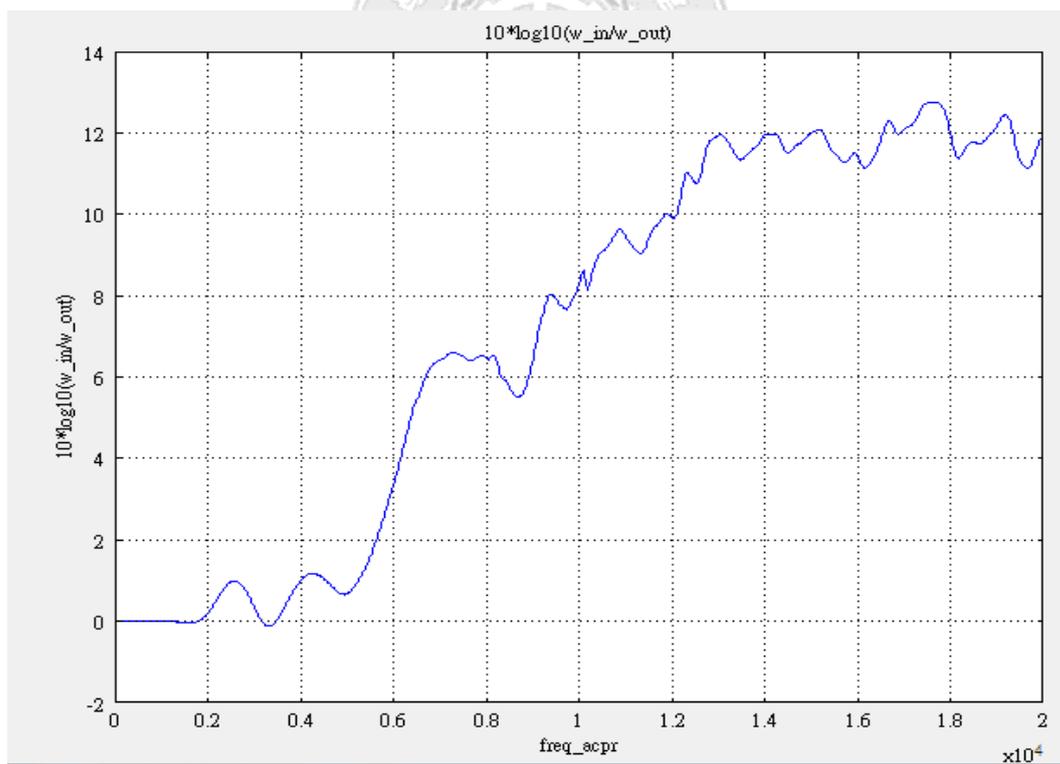


Fig.27 圓柱管模擬曲線

(揚聲器之等效電路模擬)

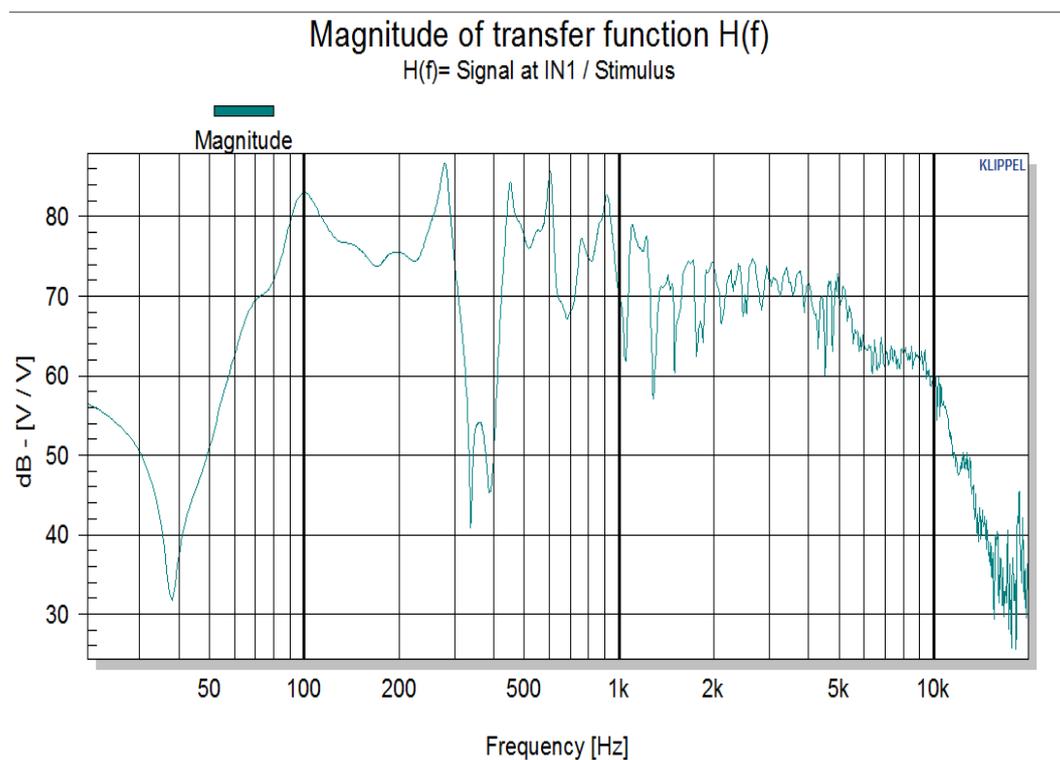


Fig.28 圓柱管 Klippel 量測曲線圖

2. 結果：

由於 COMSOL 中所模擬的為消音管，我們可以從上面圖形中發現，當模擬曲線有 peak 時，量測曲線就有 deep，尤其是高頻影響最大，頻率越高，消音越好。而且我們還可以從兩張 klippel 量測出來的圖做比較發現，U 型管整體曲線較圓柱管曲線平穩，是由於 U 型管造成相位相同，讓聲音進行疊加，而圓柱管相位不同，造成很多頻率段有 deep 的產生。

(揚聲器之等效電路模擬)

參考文獻

- [1] 郭晟宇,“可攜式揚聲器之分析與模擬”,逢甲大學機械工程研究所碩士論文,96年7月
- [2] 廖耀宇,“高功率中小型揚聲器之設計與分析”,逢甲大學材料與製造工程機械工程組碩士論文,97年元月

