

逢甲大學學生報告 ePaper

揚聲器模擬與分析

作者：張瑋芸、劉泰志

系級：電聲碩士學位學程碩一

學號：M9901256、M9903879

開課老師：黃錦煌 教授

課程名稱：電聲換能器設計

開課系所：電聲碩士學位學程

開課學年：99 學年度 第 1 學期



中文摘要

隨著科技的日新月異與資訊傳播多媒體迅速發展的影響，生活品質日益提升，人們對於聲音品質的要求亦更加嚴苛。由於電聲元件大量用於3C產品，追求更高的性能，包括良好的聲音品質、高效率、輕薄短小、平面化、低電壓及省電等皆為電聲產業發展的趨勢。在分辨揚聲器的好壞時，我們會去看它的感度曲線，感度越大則就是越好的揚聲器。這次的報告利用Mathematica做等效迴路，模擬曲線的趨勢並跟用KLIPPLE實際量測來做一個比較與對照。本報告流程收集相關研究與揚聲器相關文獻，設計揚聲器結構，加以模擬分析驗證，並針對物理特性及電性特徵下去討論。

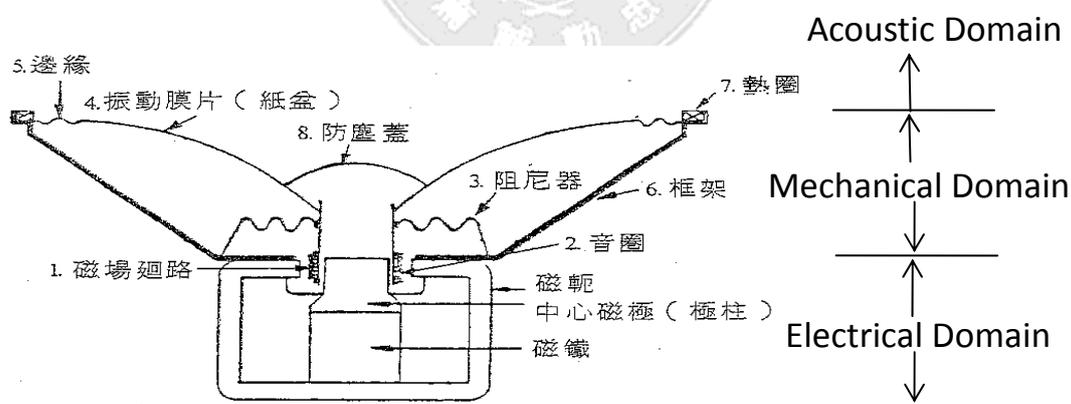
關鍵字：換能器、單體、揚聲器

目 次

一、	揚聲器結構與原理.....	3
二、	揚聲器種類.....	4
三、	電聲揚聲器之發展趨勢.....	6
四、	使用之揚聲器.....	7
五、	揚聲器等效電路模擬與實際測量.....	8
六、	以 KLIPPEL 量測導音管全部長短比較曲線.....	26
七、	以 Klippel 量測開放式音箱加上吸音棉與不同導音管長度之 變化曲線.....	27
八、	以 Klippel 量測 4.5cm 導音管長度與不同吸音棉表面形狀不 同之變化.....	28
九、	導音管式音箱加上 Horn 之模擬.	29
十、	導音管式音箱加上不同材質之吸音模擬.....	32
十一、	KLIPPEL 實際量測參數.....	36
十二、	參考文獻.....	39

一、揚聲器結構與原理

所謂的電聲換能器是 Microphone (麥克風) 與 Speaker (揚聲器) 具備可逆向換能的特質原理，則相逆而已；也能夠說將一種形式的能量(訊號)轉換為另一種形式的能量(訊號)裝置。電聲換能器能量轉換過程為電→聲的轉換，是先將電信號轉換成機械振動，然後由機械振動產生聲波；而對於聲→電轉換，則是先將聲信號轉換成機械振動後，在轉換成電信號。因此可知電聲換能器則是在機械、電場、磁場、聲場中能量形式為主要訴求。由於轉換器經常用於迴路徑上，用以感測輸出信號的大小，並將其轉換為他種形式的信號，所以也被稱為感測器(Sensor)。



(圖一)揚聲器基本構造

舉例：一個動圈式揚聲器接受一個電信號會使此揚器的音圈做動，此音圈影響著揚聲器的振膜振動而產生聲音。此段說明有兩個轉導階段，先從電能轉換到機械能，再由機械能轉換到聲能，最後結果由聲波輸出。

二、揚聲器種類

A.

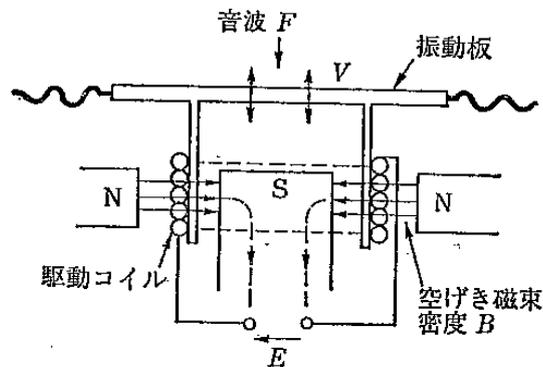
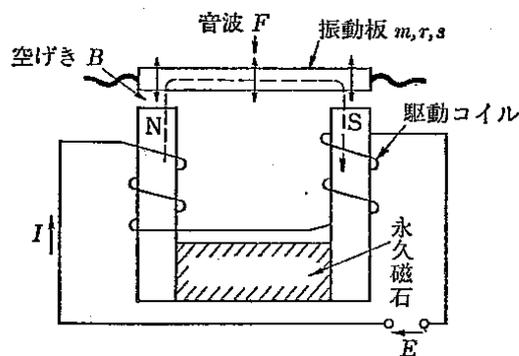


圖 6.1 動電電氣-機械(音響)變換器

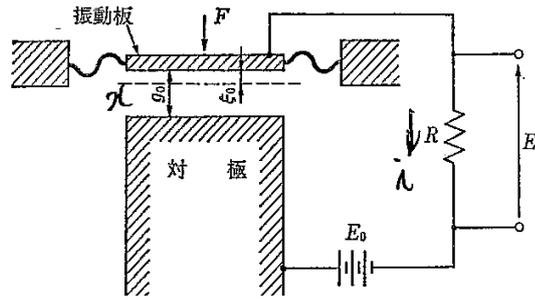
(圖二) Dynamic-Moving Coil 揚聲器原理

B.



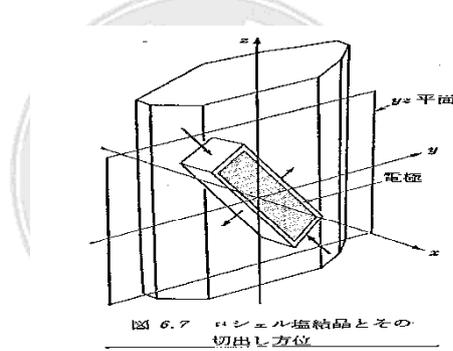
(圖三)電磁式揚聲器原理

C. 靜電電容式揚聲器原理：在兩電極間放入絕緣材料，此材料稱為介質 (Dielectric)，其分子內皆有帶負電荷的電子，和帶正電荷的正子，受到電場的斥力與吸力，而順著電場的方向掛列著，且兩端呈現出“+”和“-”極性，此作用稱之為極化作用或雙極作 (Dipole) 。



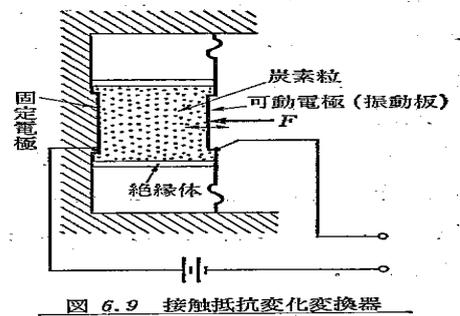
(圖四)靜電電容式揚聲器原理

D. 壓電式 (piezo) 揚聲器：早期的 (Rochelle Salt, Crystal) 的壓電效應，到近期的壓電陶瓷 (Piezo Ceramic)，利用壓電材料受壓力產生的變形量，在其垂直面產生的電壓成正比的特性。



(圖五)壓電式揚聲器

E.



(圖六)電阻式揚聲器

三、 電聲揚聲器之發展趨勢

A. 換能效率高：

我們可改變振動系統質量值的大小、結構材料的不同、降低阻尼等皆可以提高揚聲器的靈敏度。

B. 逼真度高 (Hi-Fi, High Fidelity)：

在電→聲的換能器或聲→電的換能器過程中都會造成失真，為避免失真，應使得頻響曲線平坦，並保持反應時間快、活塞運動 (Piston Motion) 等之高傳真度。平坦區大，也就是頻寬大，頻寬大就可以感受到比較多的頻帶，指高音、低音都不損失。

C. 微小化

運用等校電路模擬，可加其他設計如開孔或被動輻射設計，配合微機電技術可以將體積微小化，卻不失其性能，並可降低雜散電容的影響。

四、 使用之揚聲器



(圖七) 正視之單體



(圖八) 側視之單體

以上感謝美隆公司提供

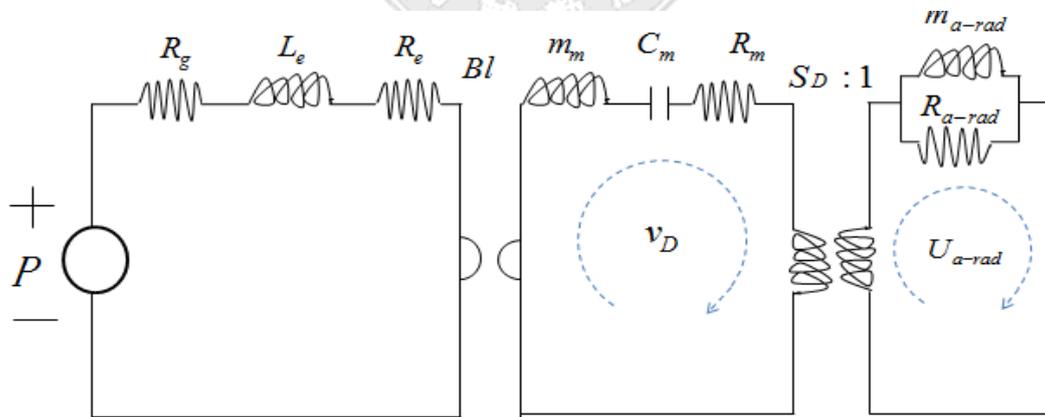
五、揚聲器等效電路模擬與實際測量

A. 揚聲器單體之等效電路模擬

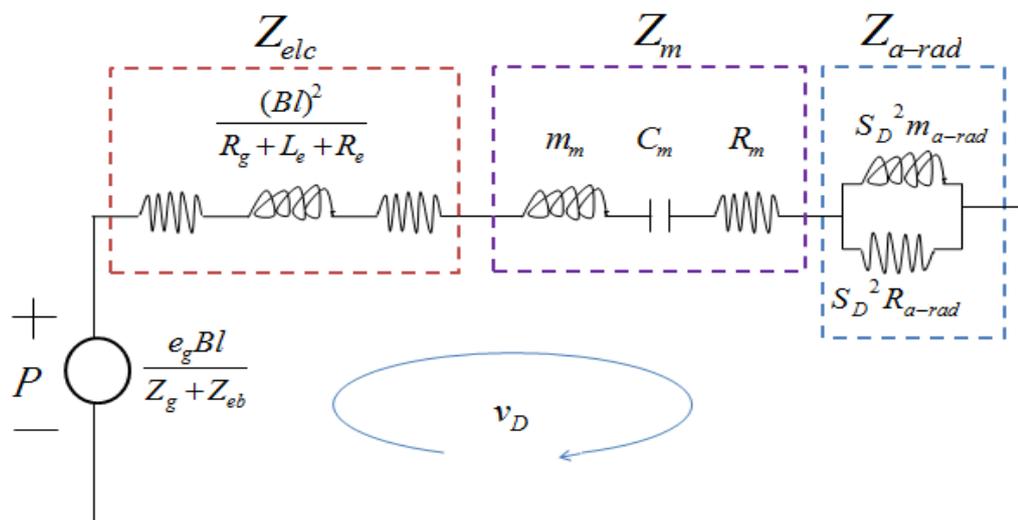


(圖九)加上障板單體的量測

1. 等效電路圖(含Transformer及Gyrator)：



2. 等效電路(不含 Transformer)



3. 迴路分析:

電域的部份(Electrical domain):

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e$$

$$Z_{elc} = \frac{Bl^2}{Z_{eb}}$$

機械域的部份(Mechanical domain):

$$Z_m = R_m + i * \omega * m_m + \frac{1}{i * \omega * C_m}$$

聲學的部份(Acoustic domain):

$$Z_{a-rad} = \frac{S_D^2}{\frac{1}{R_{a-rad}} + \frac{1}{i * \omega * m_{a-rad}}}$$

整個等效電路的總電阻為:

$$Z_{total} = Z_{elc} + Z_m + Z_{a-rad}$$

迴路中的等效速度:

$$V_D = \frac{e_g * Bl}{Z_{eb}} * \frac{1}{Z_{total}}$$

體積速度:



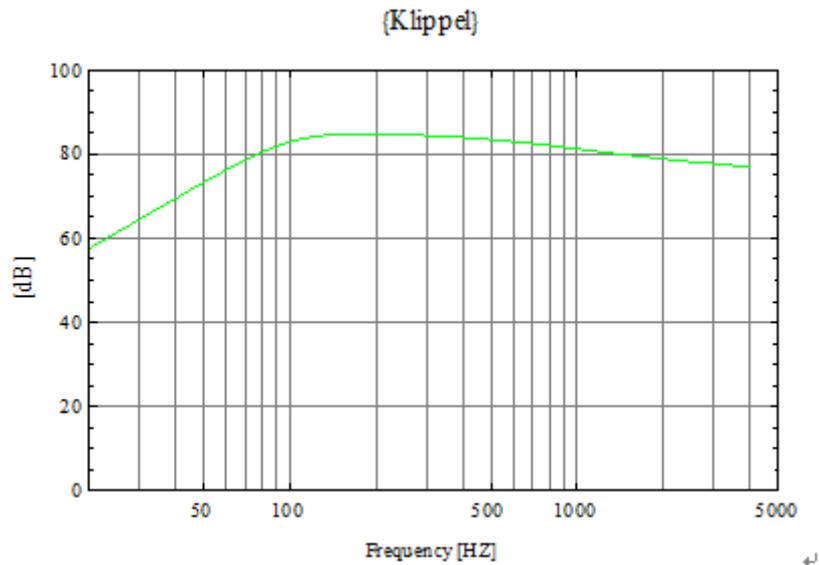
揚聲器模擬與分析

$$U_D = V_D * S_D$$

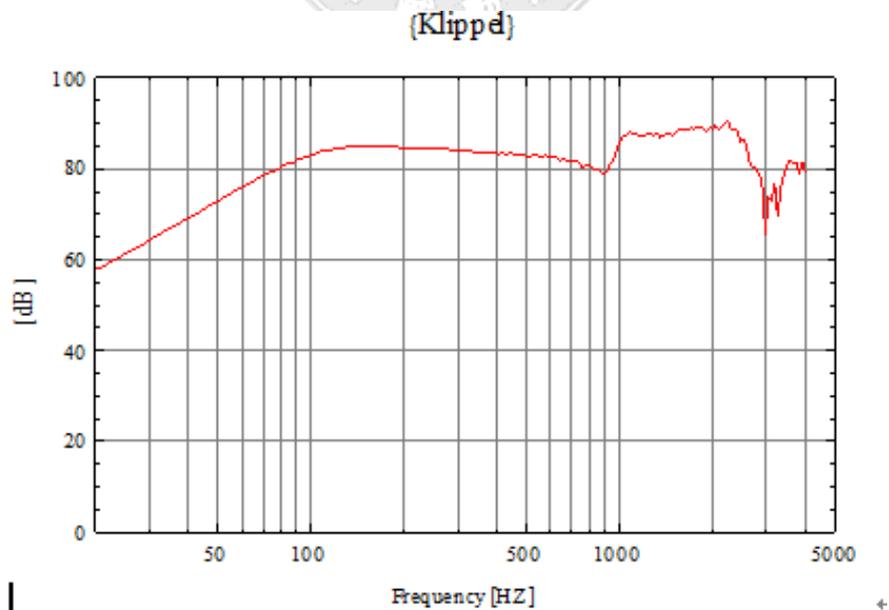
軸向遠場聲壓：

$$p = \frac{i * \omega * \rho_0 * U_D}{2 * \pi * R} * e^{-i * k * R}$$

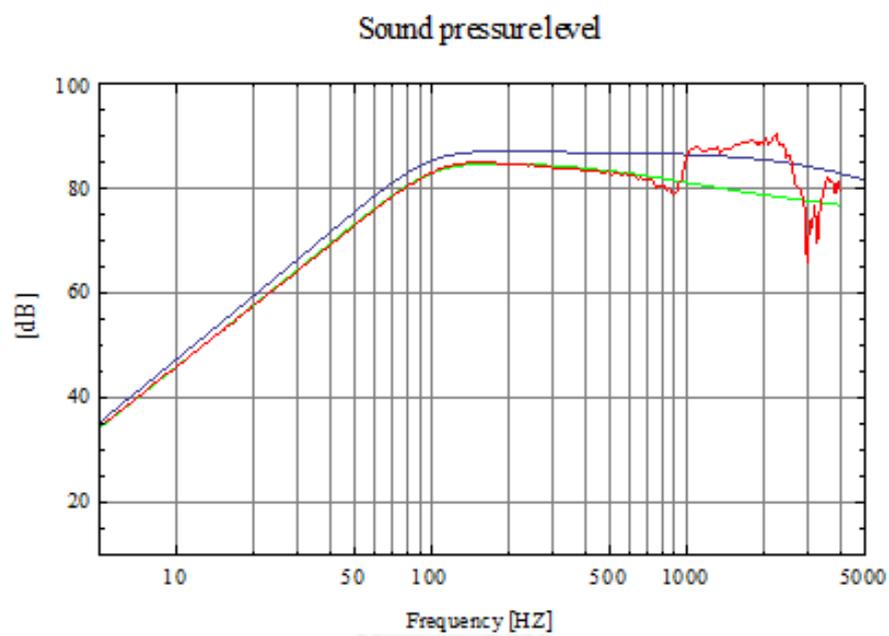
4. 揚聲器的音壓分佈曲線：



(圖十)Klippel 模擬單體曲線



(圖十一)Klippel 量測單體曲線



(圖十二) Mathematica(藍)模擬單體曲線

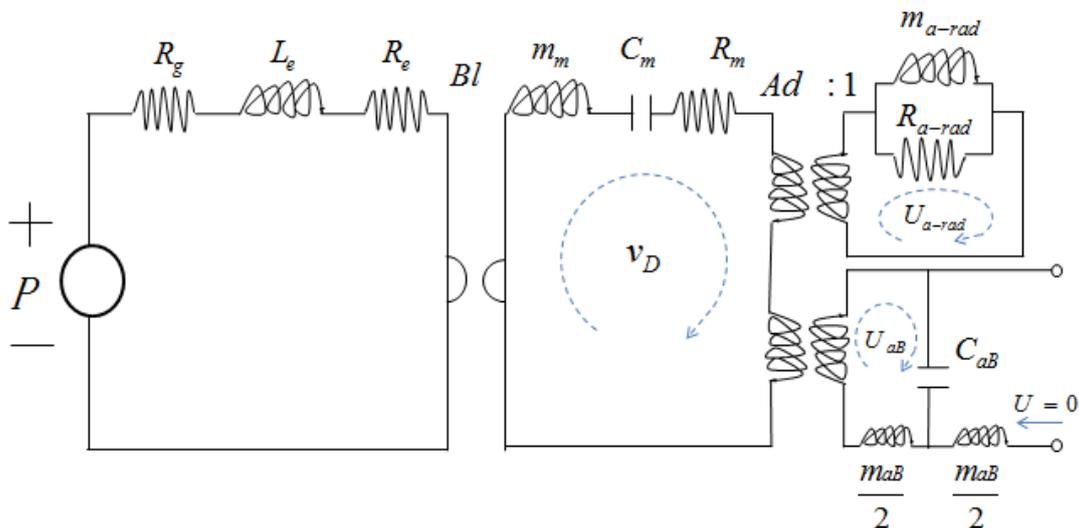
Klippel(綠)模擬單體曲線、Klippel(紅)量測單體曲線

B. 封閉式音箱在等效電路之模擬

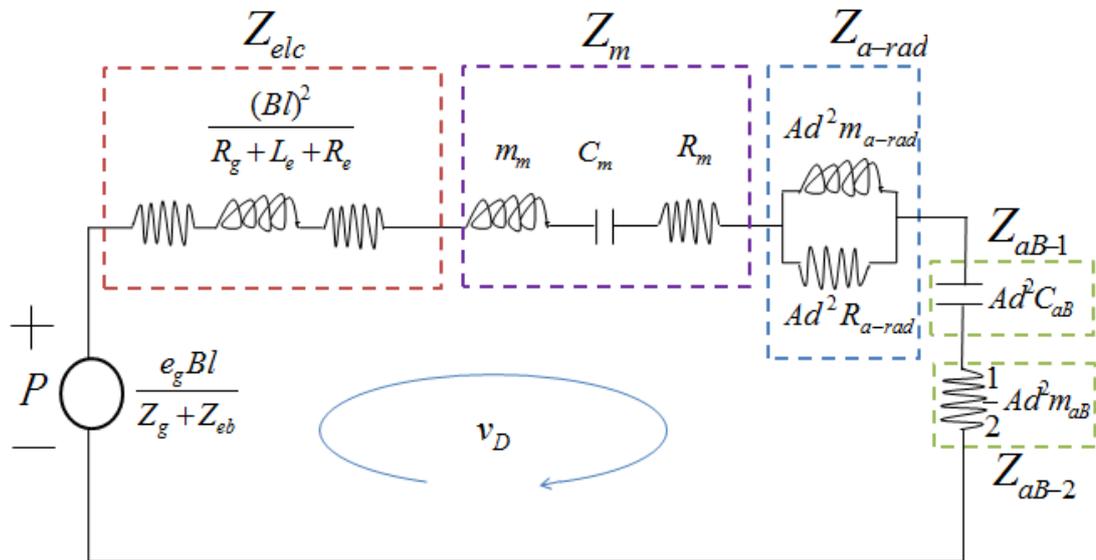


(圖十三) 封閉式音箱

1. 等效電路(含 Transformer 及 Gyrator) :



2. 等效電路(不含 Transformer): 將電與聲學的部份等效到機械的部份。



3. 迴路分析:

電域的部份(Electrical domain):

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e$$

$$Z_{elc} = \frac{Bl^2}{Z_{eb}}$$

機械域的部份(Mechanical domain):

$$Z_m = R_m + i * \omega * m_m + \frac{1}{i * \omega * C_m}$$

聲學的部份(Acoustic domain):

$$Z_{a-rad} = \frac{1}{\frac{1}{R_{a-rad}} + \frac{1}{i * \omega * m_{a-rad}}}$$

$$Z_{aB-1} = Ad^2 * 0.5 * \frac{\rho_0 * Vb}{Ab^2} * (i * \omega)$$

揚聲器模擬與分析

$$Z_{aB-2} = Ad^2 * \frac{1}{\frac{Vb}{\rho_0 \times c^2}} * \frac{1}{i * \omega}$$

整個等效電路的總電阻為：

$$Z_{total} = Z_{elc} + Z_m + Z_{a-rad} + Z_{aB-1} + Z_{aB-2}$$

迴路中的等效速度：

$$V_D = \frac{e_g * Bl}{Z_{ab}} * \frac{1}{Z_{total}}$$

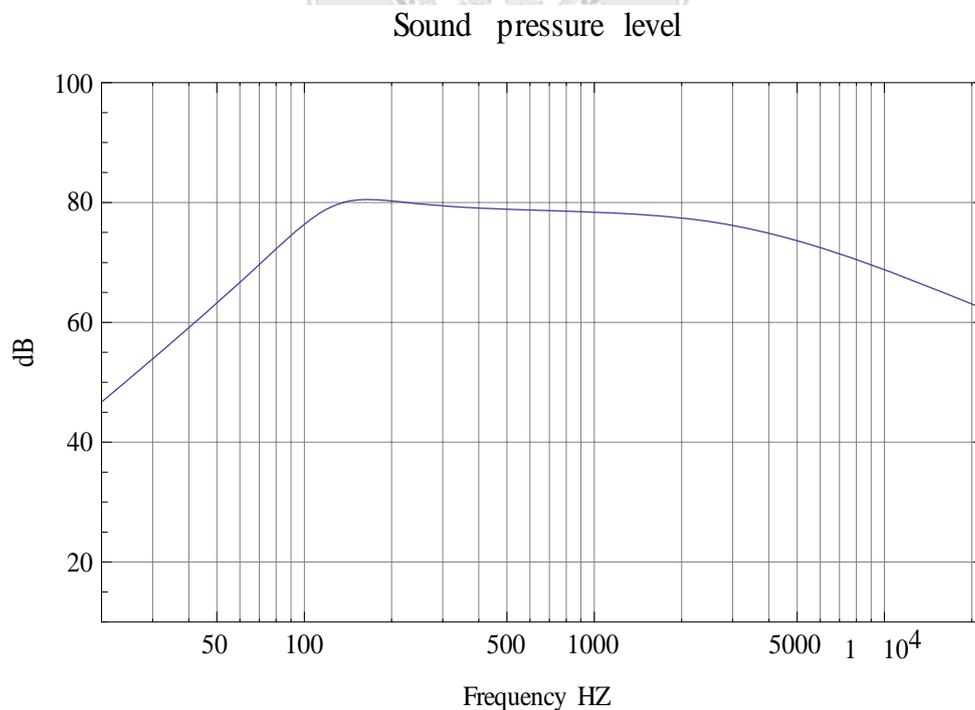
體積速度：

$$U_D = V_D * Ad$$

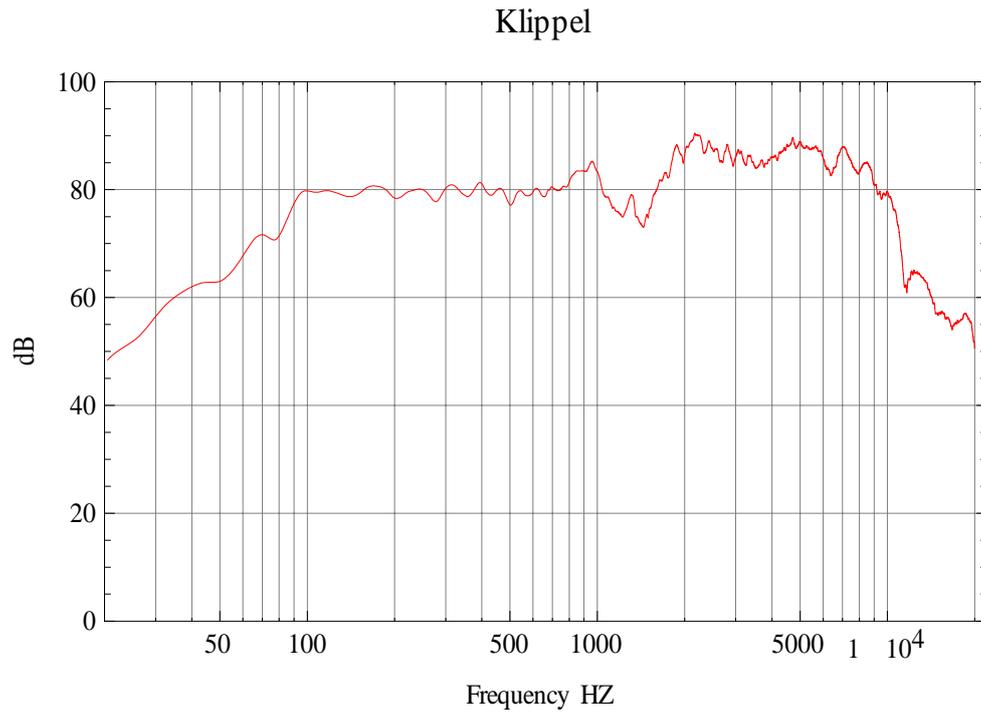
軸向遠場聲壓：

$$p = \frac{i * \omega * \rho_0 * U_D}{2 * \pi * R} * e^{-i * k * R}$$

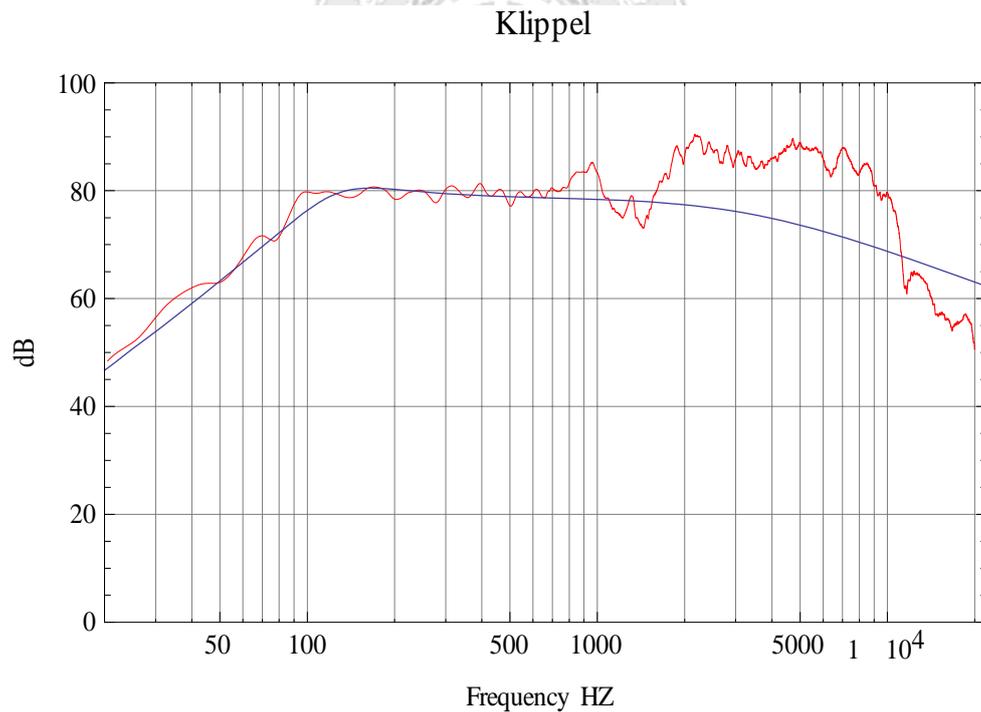
4. 揚聲器的音壓分佈曲線：



(圖十四) Mathematica 模擬封閉式音箱曲線



(圖十五) Klippel 量測封閉式音箱曲線



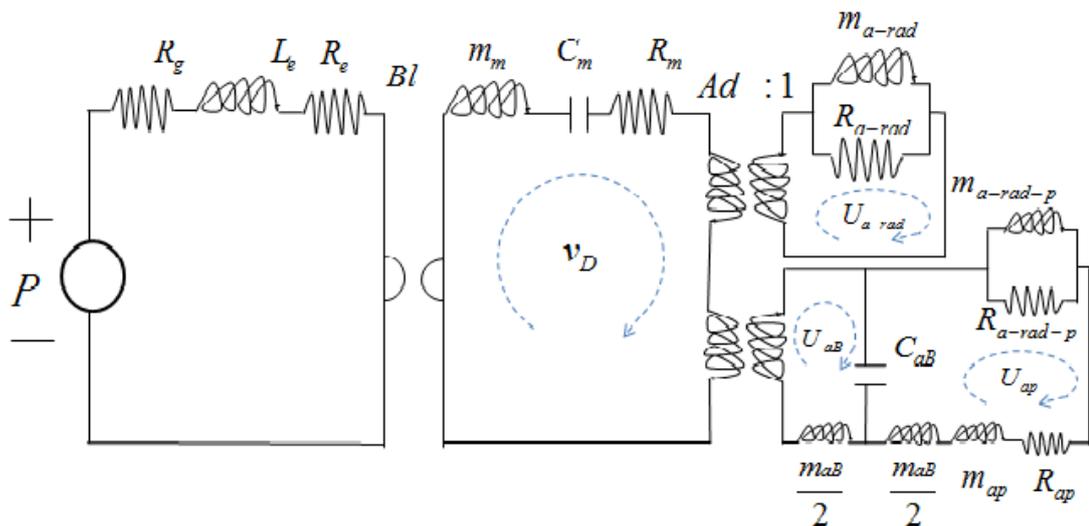
(圖十六) Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬封閉式音箱曲線趨勢
比較

C. 開孔式音箱在等效電路之模擬

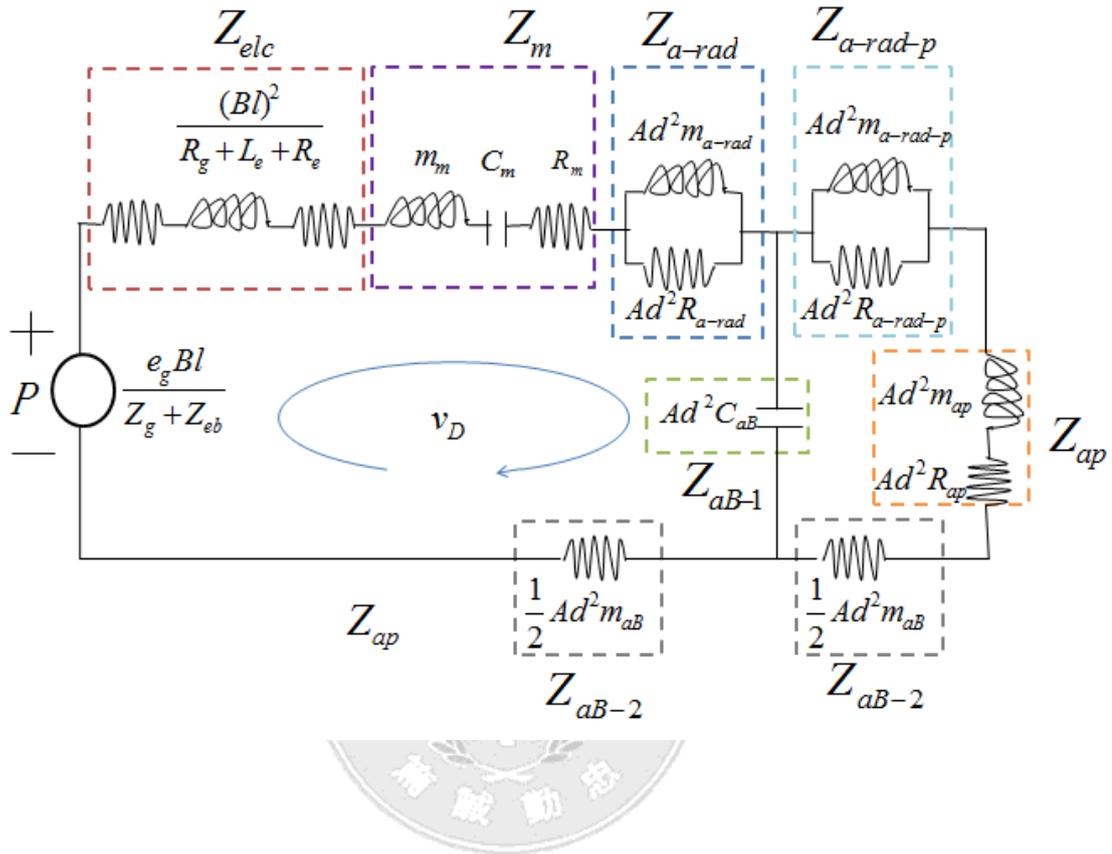


(圖十七) 開孔式音箱

1. 等效電路(含 Transformer 及 Gyrator) :



2. 等效電路(不含 Transformer)：將電與聲學的部份等效到機械的部份。



3. 迴路分析：

電域的部份(Electrical domain)：

$$Z_{eb} = R_e + i * \omega * L_e;$$

$$Z_{elc} = \frac{Bl^2}{Z_{eb}}$$

機械域的部份(Mechanical Domain)：

$$Z_m = R_m + i * \omega * m_m + \frac{1}{i * \omega * C_m}$$

聲學的部份(Acoustic Domain)：

$$Z_{a-rad} = \frac{Ad}{\frac{1}{R_{rad}} + i * \omega * m_{rad}}$$

$$Z_{aB-1} = Ad^2 * 0.5 * \frac{\rho_b * V_b}{Ab^2} * (i * \omega)$$

$$Z_{aB-2} = Ad^2 * \frac{1}{V_b} * \frac{1}{\rho_b * c^2} * i * \omega$$

$$Z_{tubeB} = Ad^2 * 0.5 * \frac{\rho_b * V_{tube}}{A_{tube}^2} * (i * \omega)$$

$$Z_{tubeC} = Ad^2 * \frac{1}{V_{tube}} * \frac{1}{\rho_b * c^2} * i * \omega$$

整個等效電路的總電阻為：

$$Z_{kk} = \begin{pmatrix} Z_{a1c} + Z_{a1} + Z_{a2ad} + Z_{b1bc} + Z_{b1bm} & -Z_{b1bc} & 0 \\ -Z_{b1bc} & Z_{b1bc} + Z_{b1cm} + Z_{tubeC} + Z_{tubeB} & 0 \\ 0 & -Z_{tubeC} & Z_{tubeC} + Z_{tubeB} + Z_{a2ad} \end{pmatrix}$$

迴路中的等效速度：

$$Z_{k1} = (1 \ 0 \ 0) \cdot \text{Inverse}[Z_{kk}] \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \frac{\rho_b * B1}{Z_{eb}}$$

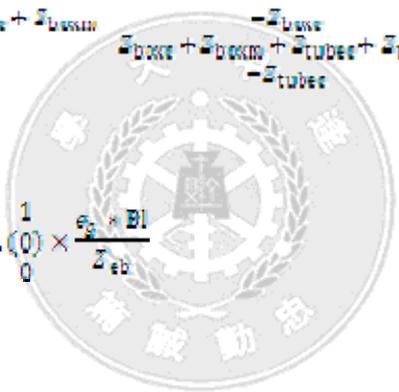
體積速度：

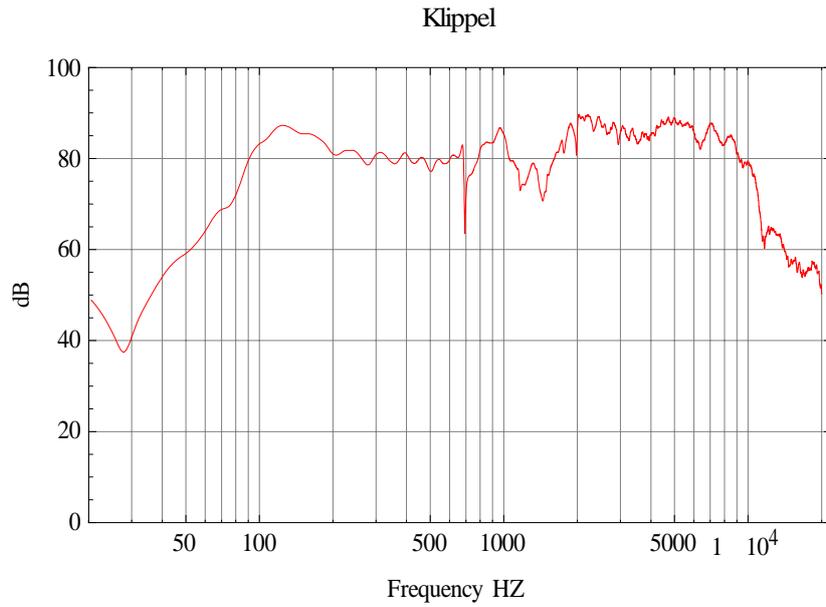
$$U_D = Z_{k1} * Ad$$

軸向遠場聲壓：

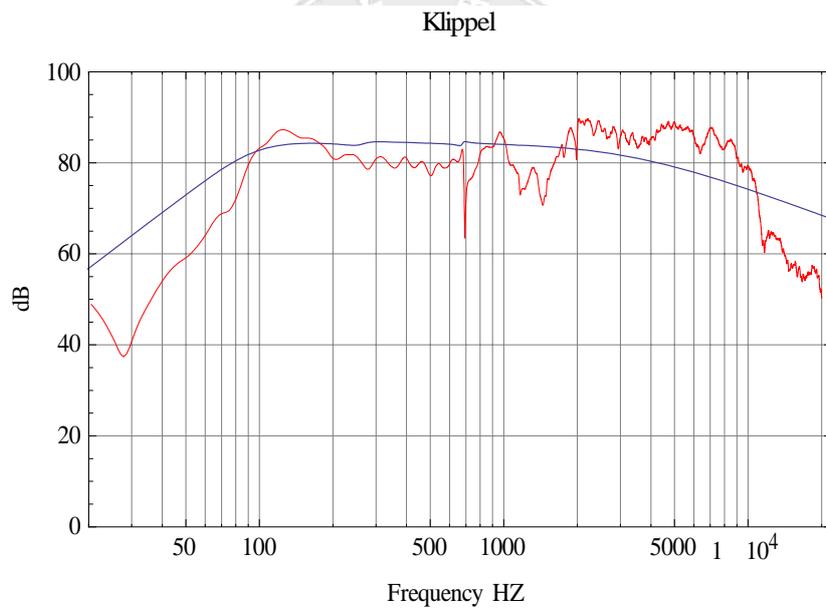
$$p = \frac{i * \omega * \rho_0 * U_D}{2 * \pi * R} * e^{-i * k * R}$$

4. 揚聲器的音壓分佈曲線：





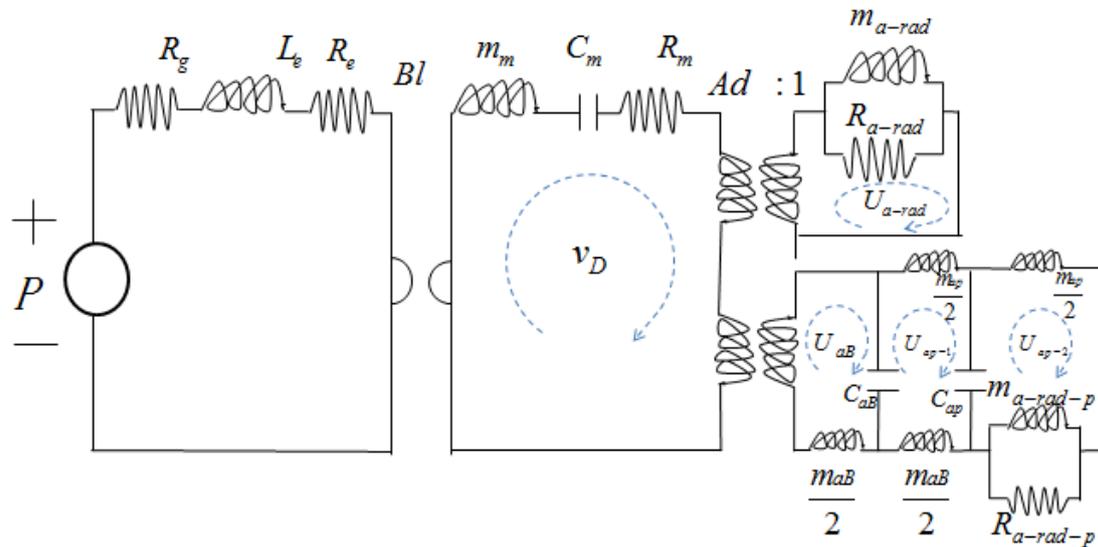
(圖十八)Klippel 模擬開放式音箱曲線



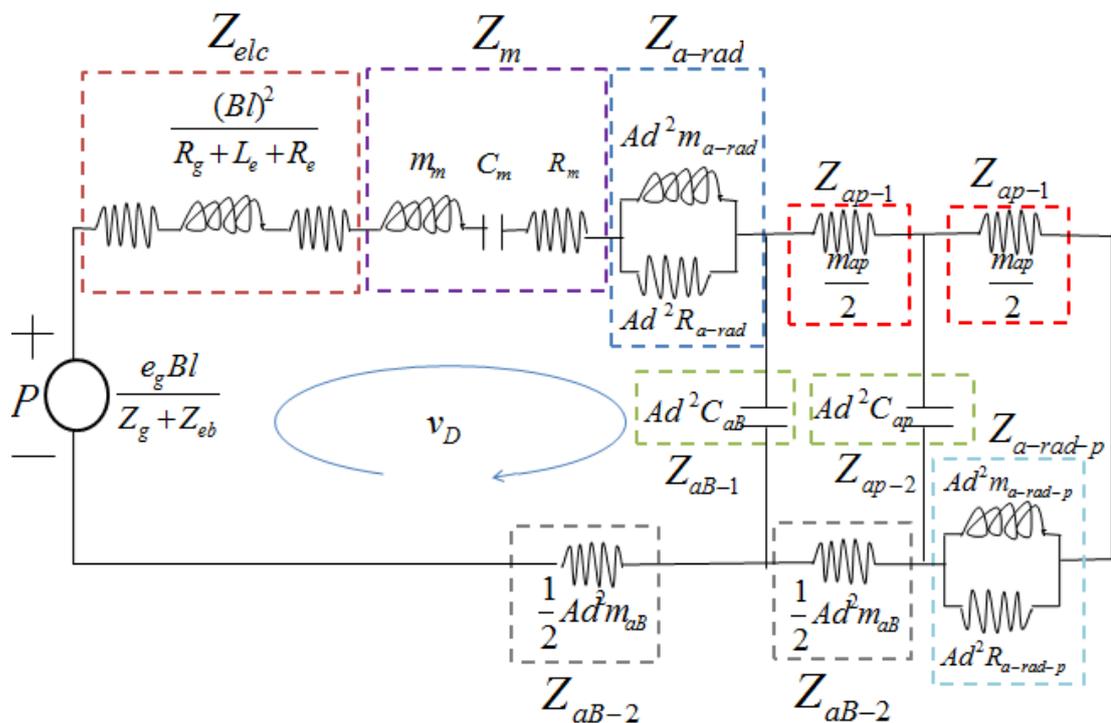
(圖十九)Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬開放式音箱曲線趨勢比較

D. 導音管式音箱在等效電路之模擬

1. 等效電路(含 Transformer 及 Gyrator) :



2. 等效電路(不含 Transformer) : 將電與聲學的部份等效到機械部份。



3. 迴路分析：

電域的部份(Electrical domain)：

$$Z_{elc} = R_e + l * \omega * L_e$$

$$Z_{elo} = \frac{Bl^2}{Z_{eb}}$$

機械域的部份(Mechanical Domain)：

$$Z_m = R_m + l * \omega * m_m + \frac{1}{l * \omega * C_m}$$

聲學的部份(Acoustic Domain)：

$$Z_{arad} = \frac{Ad}{\frac{1}{R_{arad}} + \frac{1}{l * \omega * m_{arad}}}$$

$$Z_{borkm} = Ad^2 * 0.5 * \frac{\rho_0 * Vb}{Ab^2} * (l * \omega)$$

$$Z_{bort} = Ad^2 * \frac{1}{Vb} * \frac{1}{l * \omega * \rho_0 * c^2}$$

$$Z_{tubem} = Ad^2 * 0.5 * \frac{\rho_0 * V_{tube}}{A_{tube}^2} * (l * \omega)$$

$$Z_{tubes} = Ad^2 * \frac{1}{V_{tube}} * \frac{1}{l * \omega * \rho_0 * c^2}$$



整個等效電路的總電阻為：

$$Z_{kk} = \begin{pmatrix} Z_{elc} + Z_m + Z_{arad} + Z_{bort} + Z_{borkm} & -Z_{bort} & 0 \\ -Z_{bort} & Z_{bort} + Z_{borkm} + Z_{tubes} + Z_{tubem} & -Z_{tubes} \\ 0 & -Z_{tubes} & Z_{tubes} + Z_{tubem} + Z_{aradp} \end{pmatrix}$$

迴路中的等效速度：

$$Zk1 = (1 \ 0 \ 0) \cdot \text{Inverse}[Zkk] \cdot (0) \times \frac{e_b * Bl}{Z_{eb}}$$

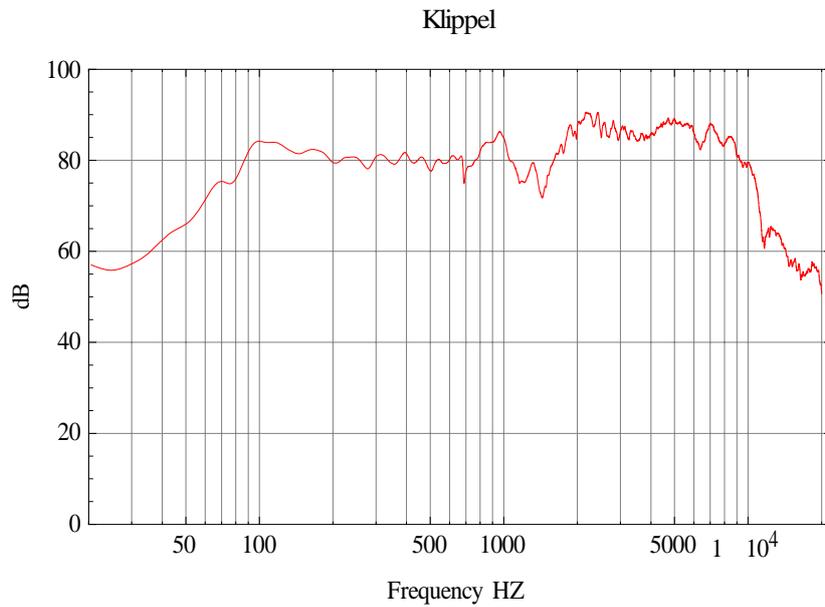
體積速度：

$$U_D = Zk1 * Ad;$$

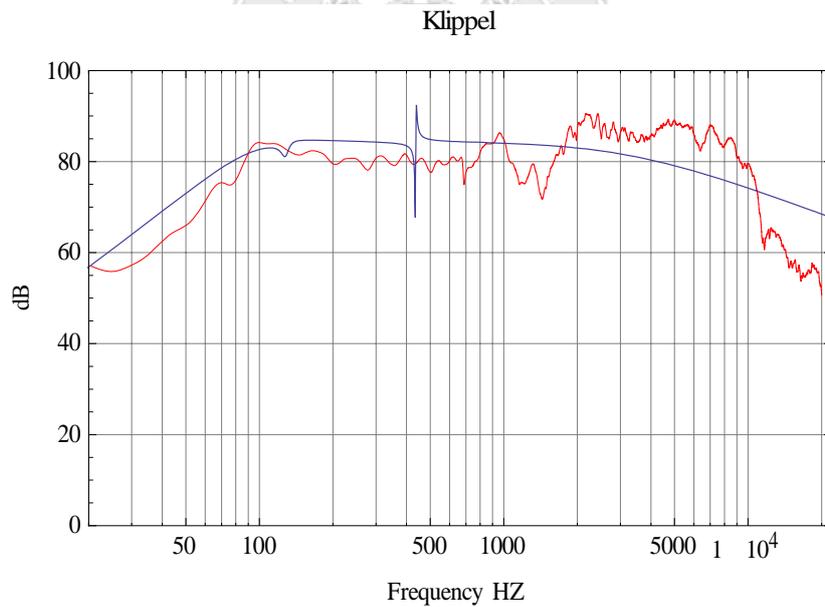
$$\text{軸向遠場聲壓} : p = \frac{l * \omega * \rho_0 * U_D}{2 * \pi * R} * e^{-l * \omega * R};$$

4. 揚聲器的音壓分佈曲線：

導音管4.5cm (內直徑3.15)



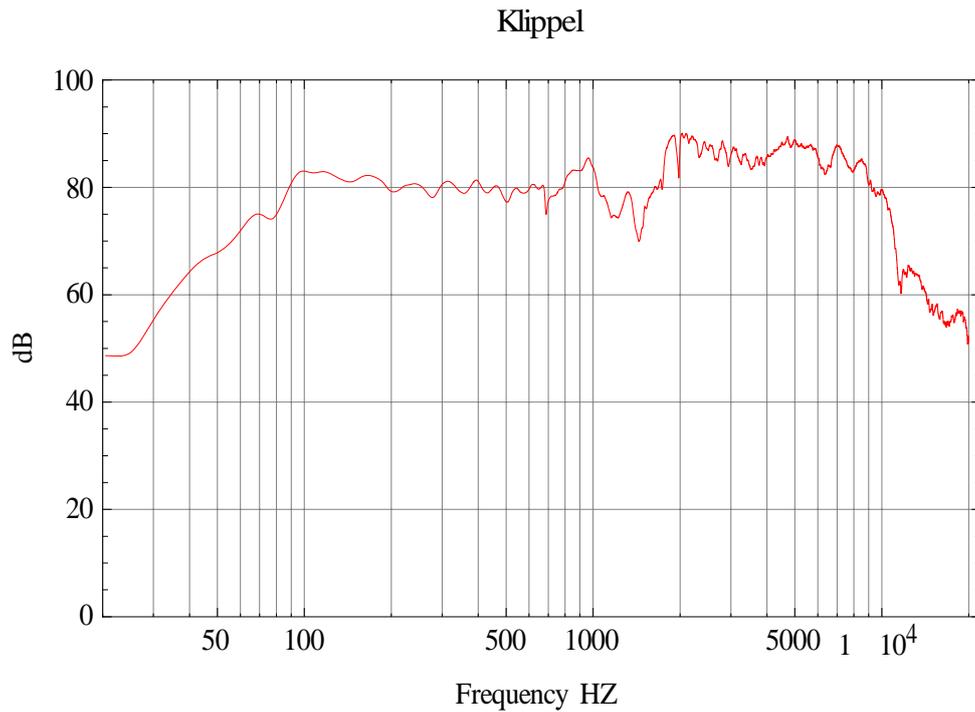
(圖二十)Klippel 量測導音管 4.5cm 曲線



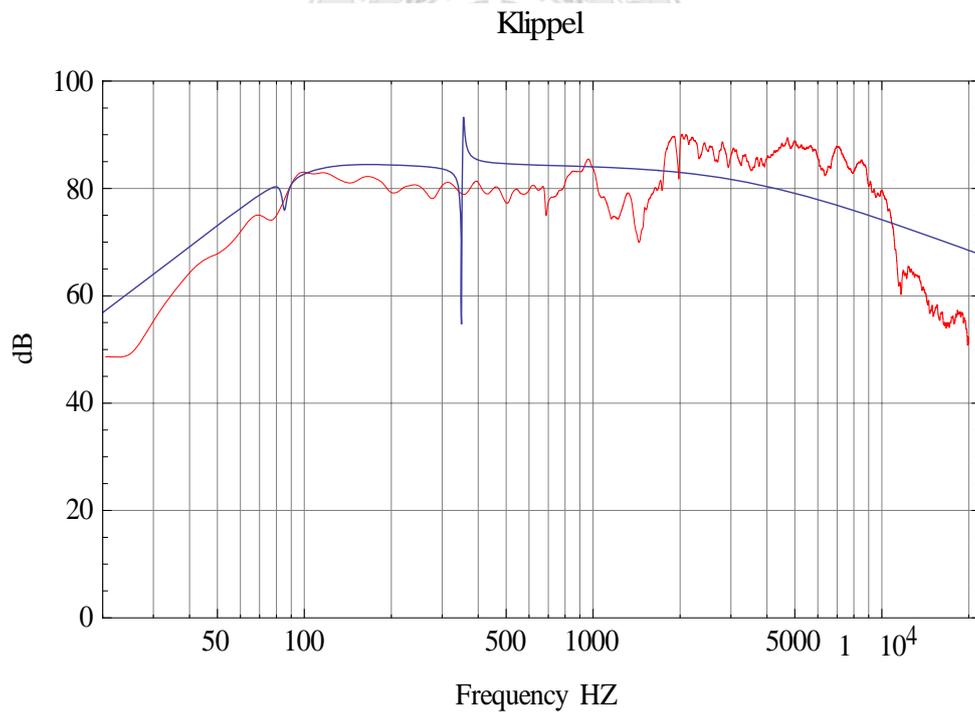
(圖二十一)Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬導音管 4.5cm 曲線

趨勢比較

導音管 7.5cm(內直徑 3.15)



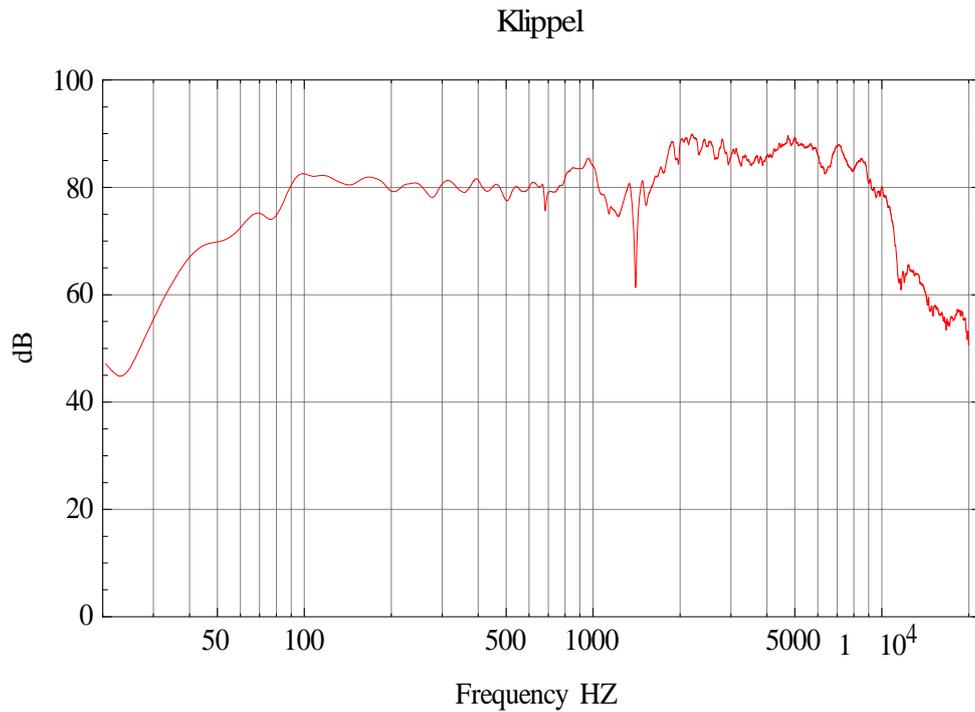
(圖二十二) Klippel 量測導音管 7.5cm 曲線



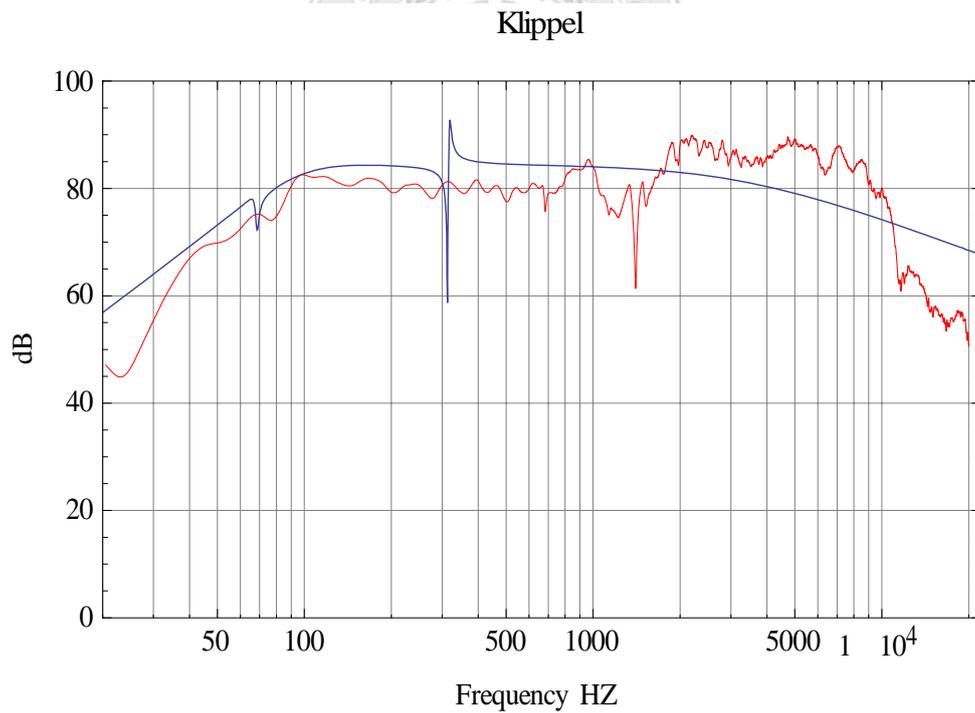
(圖二十三) Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬導音管 7.5cm 曲線

趨勢比較

導音管 9.7cm(內直徑 3.15)



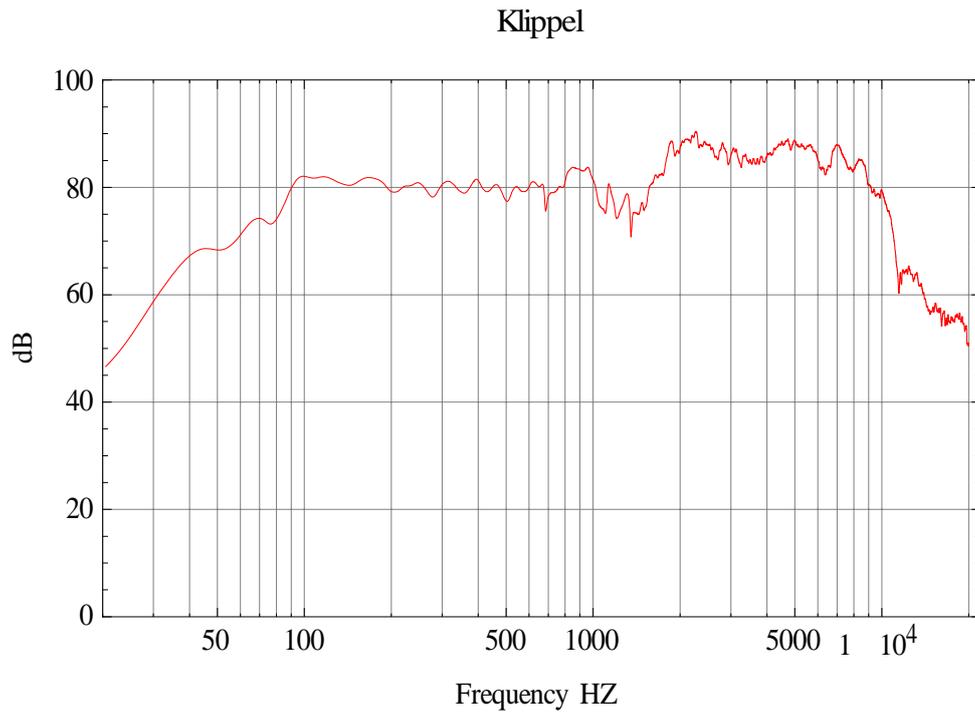
(圖二十四) Klippel 量測導音管 9.7cm 曲線



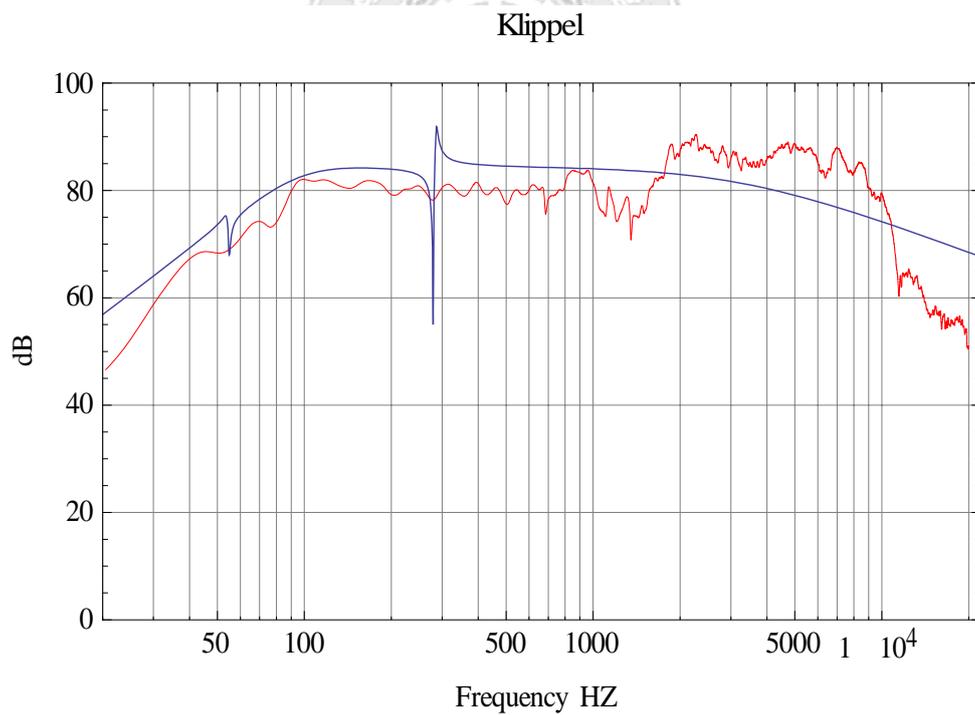
(圖二十五) Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬導音管 9.7cm 曲線

趨勢比較

導音管 12.5cm(內直徑 3.15)

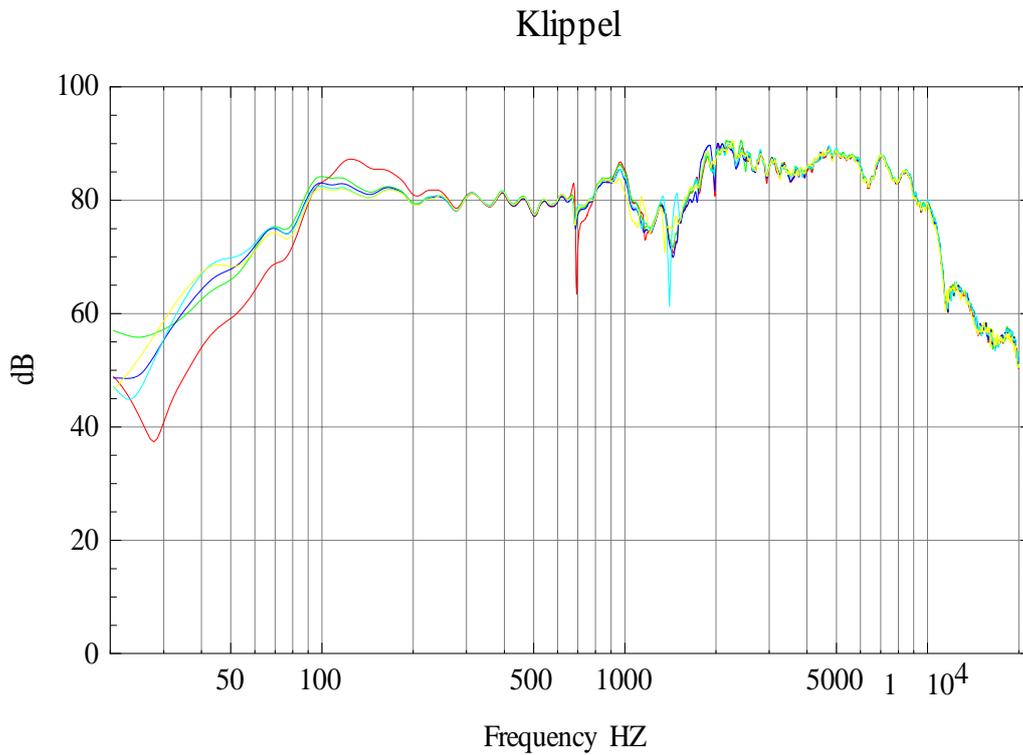


(圖二十六)Klippel 量測導音管 12.5cm 曲線



(圖二十七)Klippel(紅)與 Mathematica(藍) 模擬導音管 12.5cm 曲線趨勢比較

六、以 KLIPPEL 量測導音管全部長短比較曲線



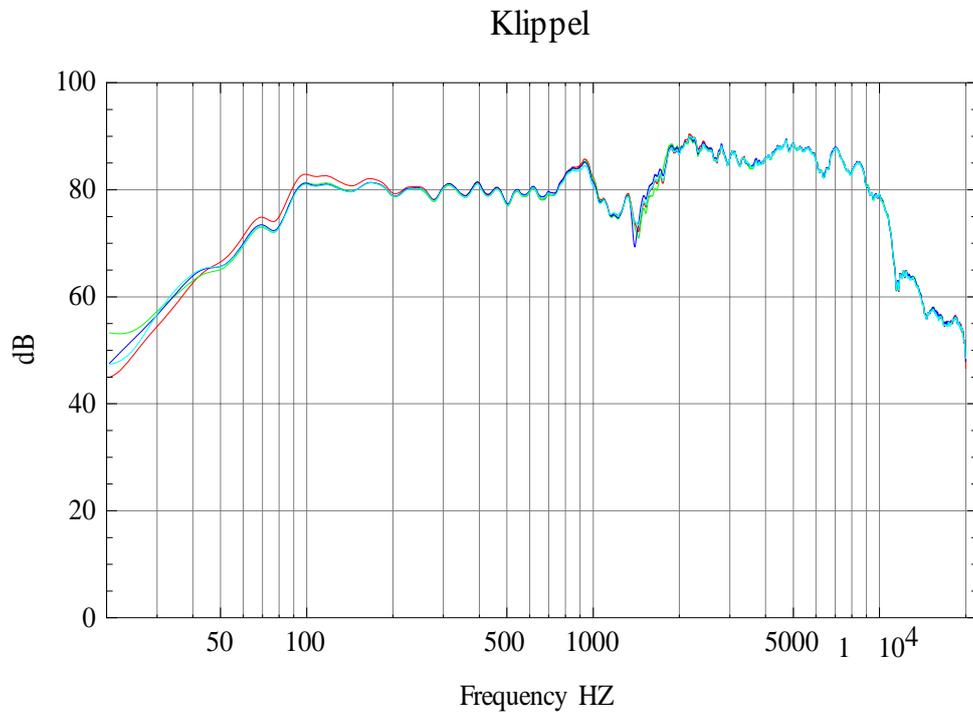
(圖二十八)以 KLIPPEL 量測導音管全部長短比較曲線

- 紅：無導音管
- 綠色：4.5 cm
- 藍色：7.5 cm
- 淺藍色：9.7 cm
- 黃色：12.5 cm

結果：

在無導音管時，在低頻的感度下降，如果加上了導音管我們可發現越短的導音管長度它的共振頻率會越往低頻，且在低頻時它的 Sound Pressure Level 會往上提升，意指 dB 值增加。

七、以 Klippel 量測開放式音箱加上吸音棉與不同導音管長度之變化曲線



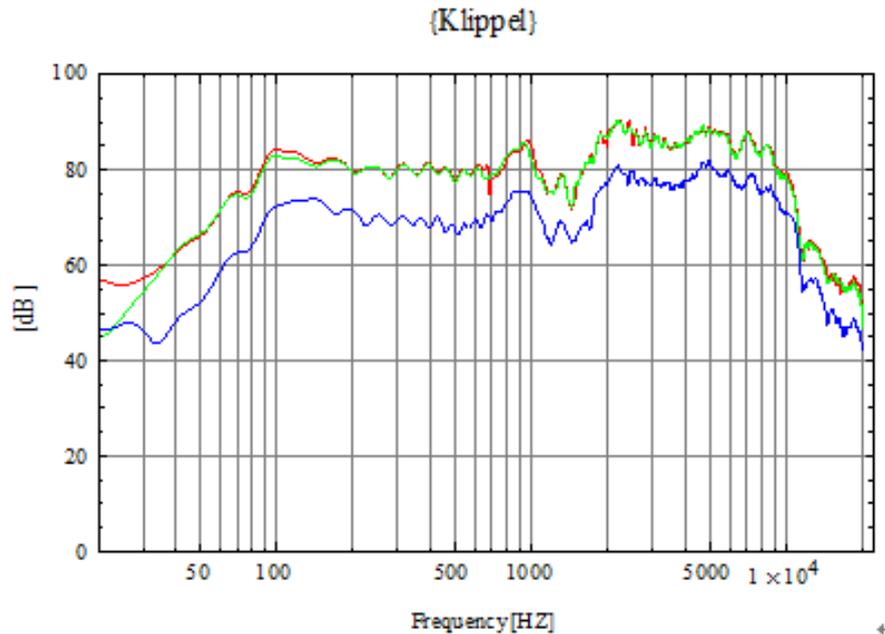
(圖二十九) 以 Klippel 量測開放式音箱加上吸音棉與不同導音管長度之變化曲線比較

- 紅：4.5 cm
- 綠色：7.5 cm
- 藍色：9.7 cm
- 淺藍色：12.5 cm

結論：

加吸音棉後的導音管長度變化改變曲線的變化不大，發覺只在低頻時較短的導音管 Sound Pressure Level 較低，但在約 100Hz 時整個感度提高，高頻就較無差異。

八、 以 Klippel 量測 4.5cm 導音管長度與不同吸音棉表面形狀不同之變化



(圖三十) 以 Klippel 量測 4.5cm 導音管長度與不同吸音棉表面形狀不同變化曲線比較

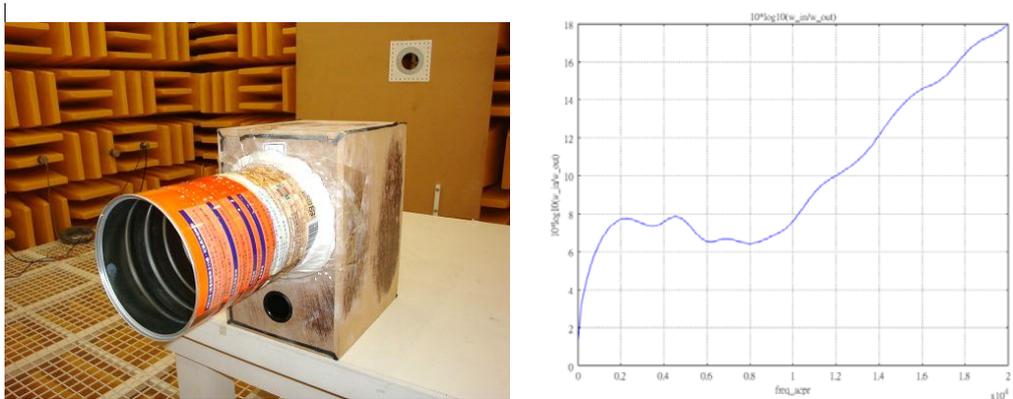
- 紅：無吸音棉
- 綠色：平面吸音棉
- 藍色：凹凸吸音棉

結論：

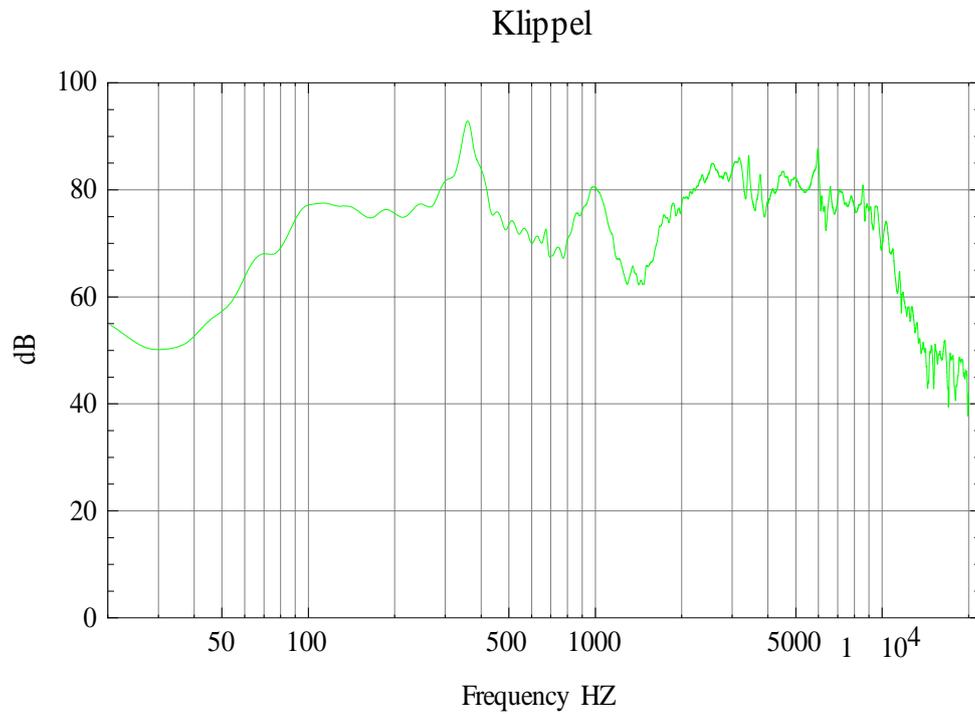
在無吸音棉時低頻 Sound Pressure Level 比有吸音棉者來的高許多，但與平面面積的吸音棉較無差異；因量測時間不同，校正有落差。

九、 導音管式音箱加上 Horn 之模擬

Horn(長度 20cm，半徑 6.25)

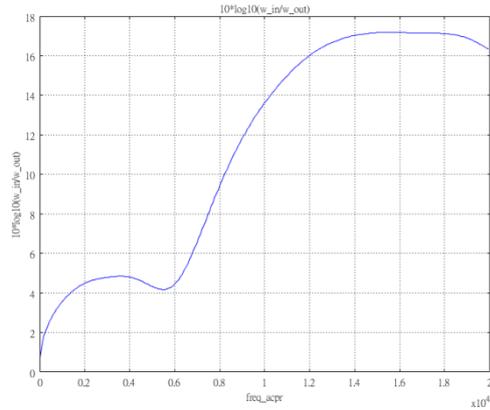


(圖三十一)以 COMSOL 模擬阻抗曲線

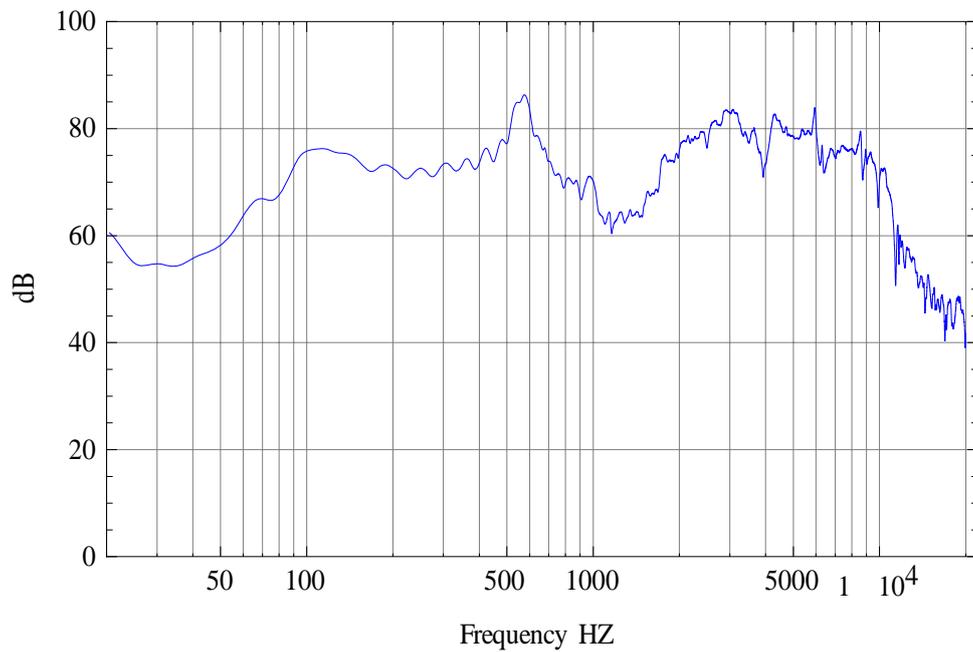


(圖三十二)以 Klippel 量測曲線

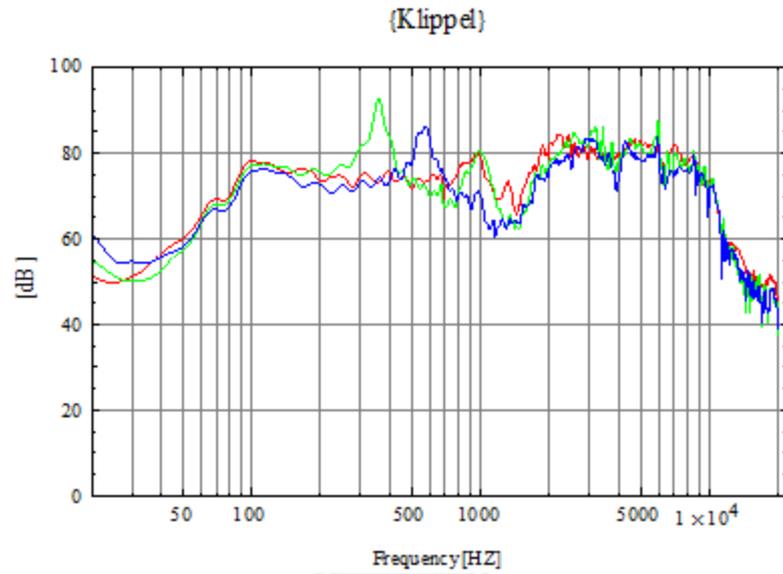
Horn(長度 11cm，半徑 6.25)



(圖三十三)以 COMSOL 模擬阻抗曲線



(圖三十四)以 Klippel 量測曲線



(圖三十五)以 Klippel 量測導音管式音箱加上 Horn 之

曲線比較

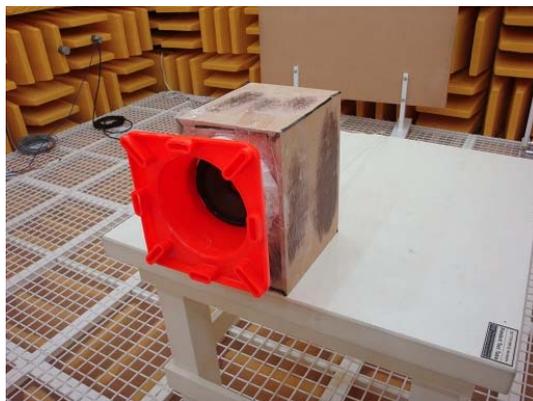
紅：無 Horn(導音管 4.5cm)

藍色：Horn11 cm(導音管 4.5cm)

綠色：Horn20 cm(導音管 4.5cm)

結果：

會改變單體得頻率響應，號角越長時低頻的 Sound Pressure Level 越往下掉，而開口處的反射也較少，Peak 也會提早出現。



(圖三十六)角錐

十、 導音管式音箱加上不同材質之吸音模擬

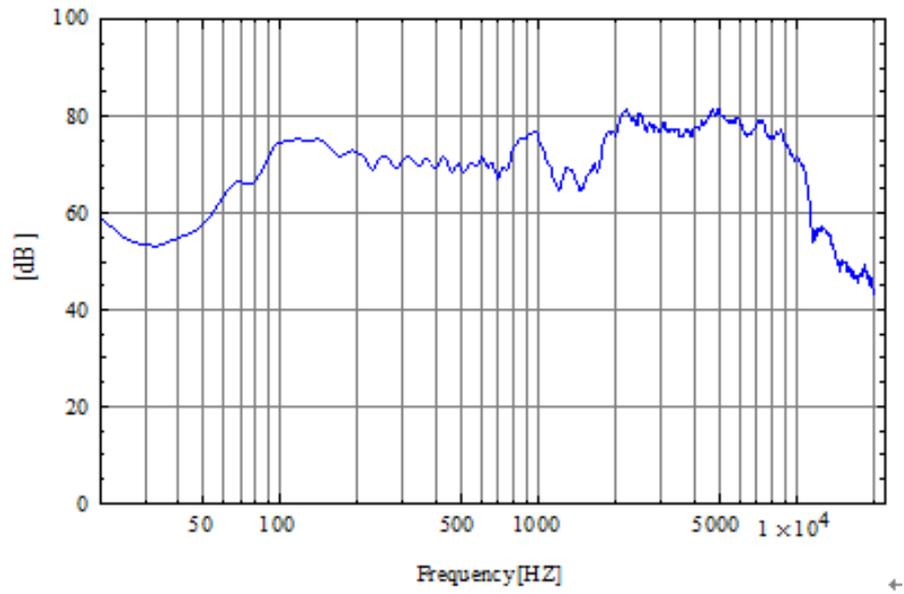
吸音棉(導音管 4.5cm)



(圖三十七)凹凸吸音棉



(Klippel)

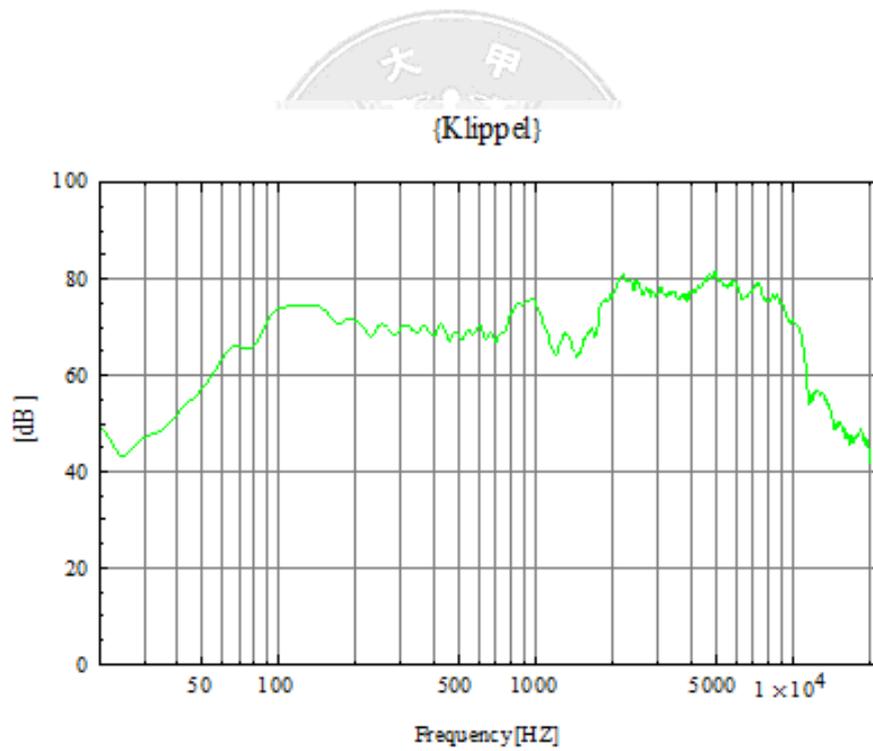


(圖三十八)以 Klippel 量測曲線

泡棉(導音管 4.5cm)

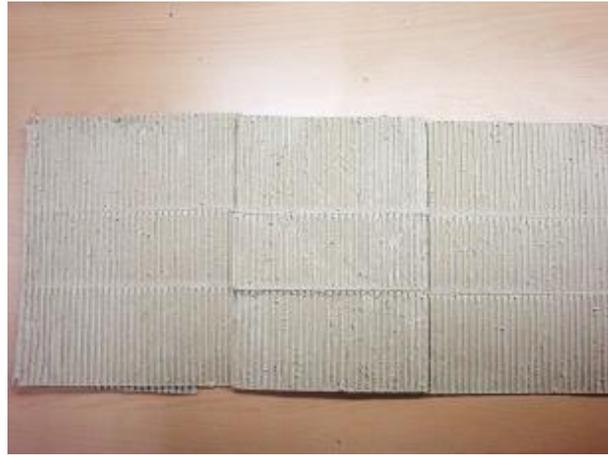


(圖三十九)泡棉

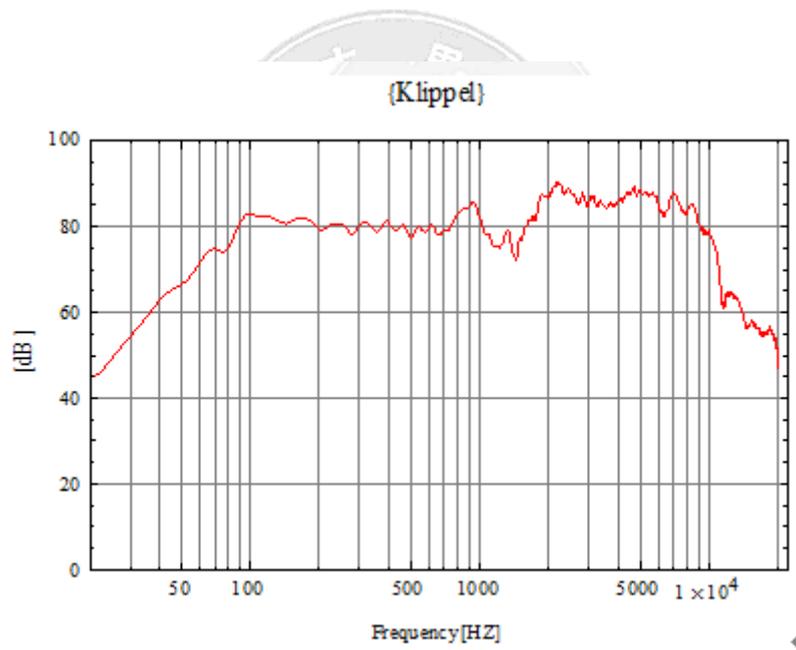


(圖四十)以 Klippel 量測曲線

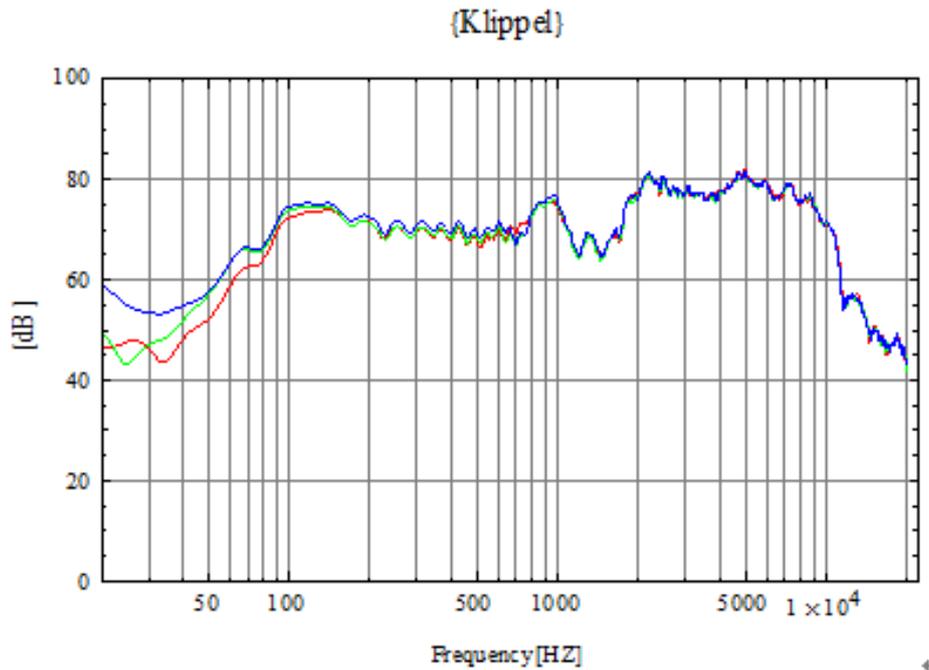
紙板(導音管 4.5cm)



(圖四十一)波浪紙板



(圖四十二)以 Klippel 量測曲線



(圖四十三) 以 Klippel 量測導音管式音箱加上不同材質之吸音棉
曲線比較



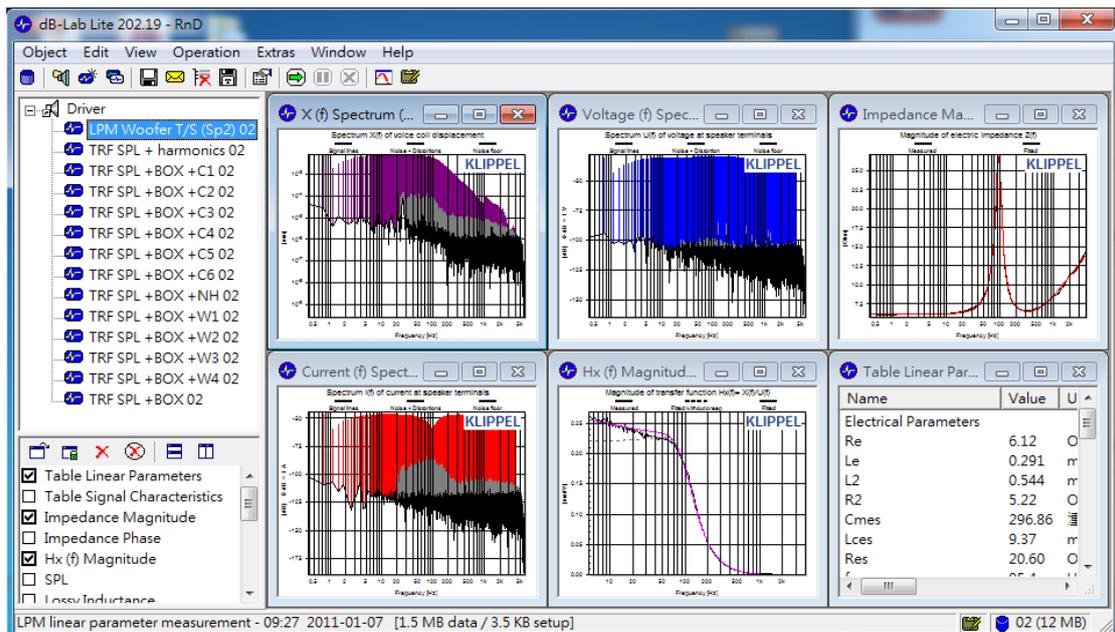
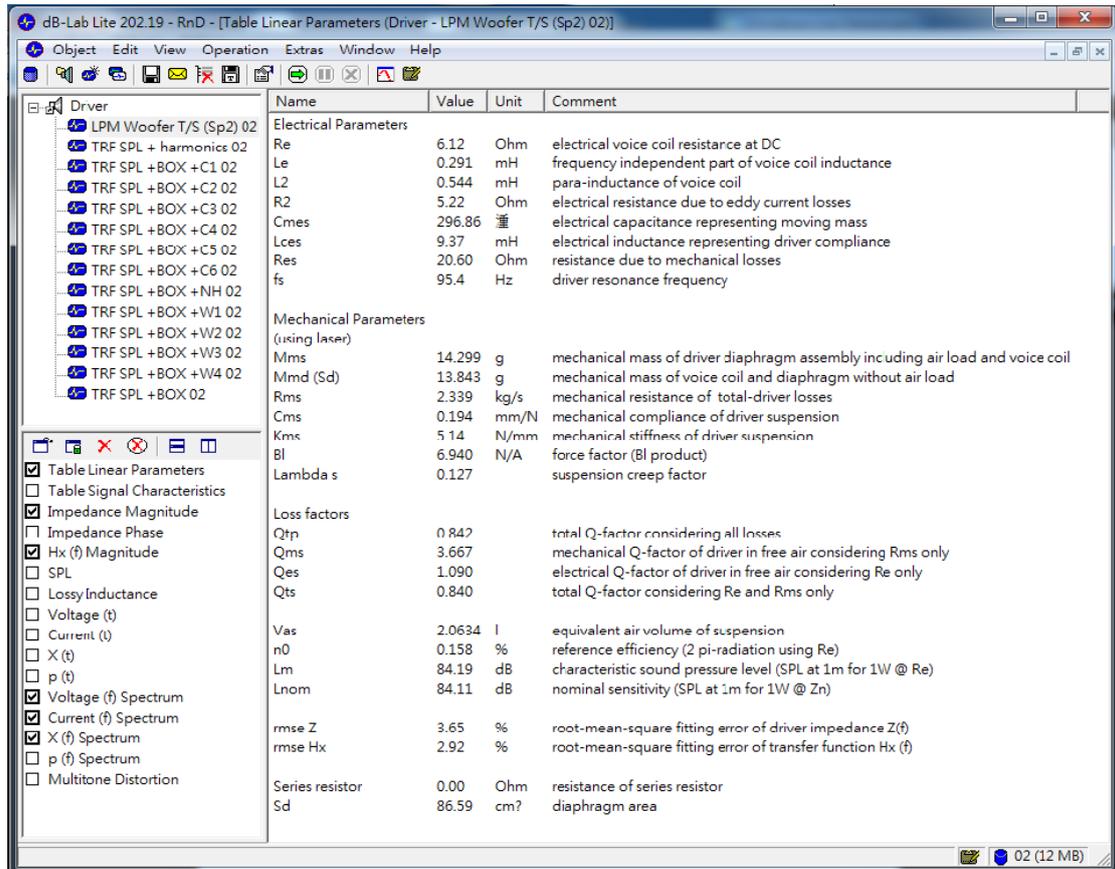
結果：

我們可以發現吸音棉把整個低頻的 Sound Pressure Level 給
往下拉，消弱了駐波。

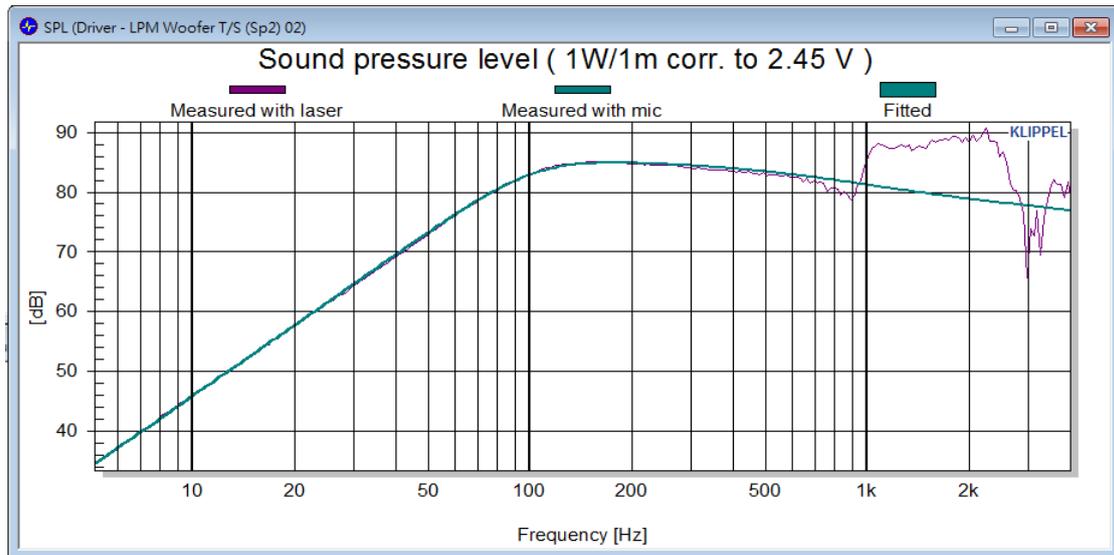
十一、KLIPPEL 實際量測參數

Name	Value	Unit	Comment
Electrical Parameters			
Re	6.12	Ohm	electrical voice coil resistance at DC
Le	0.291	mH	frequency independent part of voice coil inductance
L2	0.544	mH	para-inductance of voice coil
R2	5.22	Ohm	electrical resistance due to eddy current losses
Cmes	296.86	漣	electrical capacitance representing moving mass
Lces	9.37	mH	electrical inductance representing driver compliance
Res	20.60	Ohm	resistance due to mechanical losses
fs	95.4	Hz	driver resonance frequency
Mechanical Parameters (using laser)			
Mms	14.299	g	mechanical mass of driver diaphragm assembly including air load and voice coil
Mmd (Sd)	13.843	g	mechanical mass of voice coil and diaphragm without air load
Rms	2.339	kg/s	mechanical resistance of total-driver losses
Cms	0.194	mm/N	mechanical compliance of driver suspension
Kms	5.14	N/mm	mechanical stiffness of driver suspension
Bl	6.940	N/A	force factor (Bl product)
Lambda s	0.127		suspension creep factor
Loss factors			
Qtp	0.842		total Q-factor considering all losses
Qms	3.667		mechanical Q-factor of driver in free air considering Rms only
Qes	1.090		electrical Q-factor of driver in free air considering Re only
Qts	0.840		total Q-factor considering Re and Rms only
Vas	2.0634	l	equivalent air volume of suspension
n0	0.158	%	reference efficiency (2 pi-radiation using Re)
Lm	84.19	dB	characteristic sound pressure level (SPL at 1m for 1W @ Re)
Lnom	84.11	dB	nominal sensitivity (SPL at 1m for 1W @ Zn)
rmse Z	3.65	%	root-mean-square fitting error of driver impedance Z(f)
rmse Hx	2.92	%	root-mean-square fitting error of transfer function Hx (f)
Series resistor	0.00	Ohm	resistance of series resistor
Sd	86.59	cm	diaphragm area

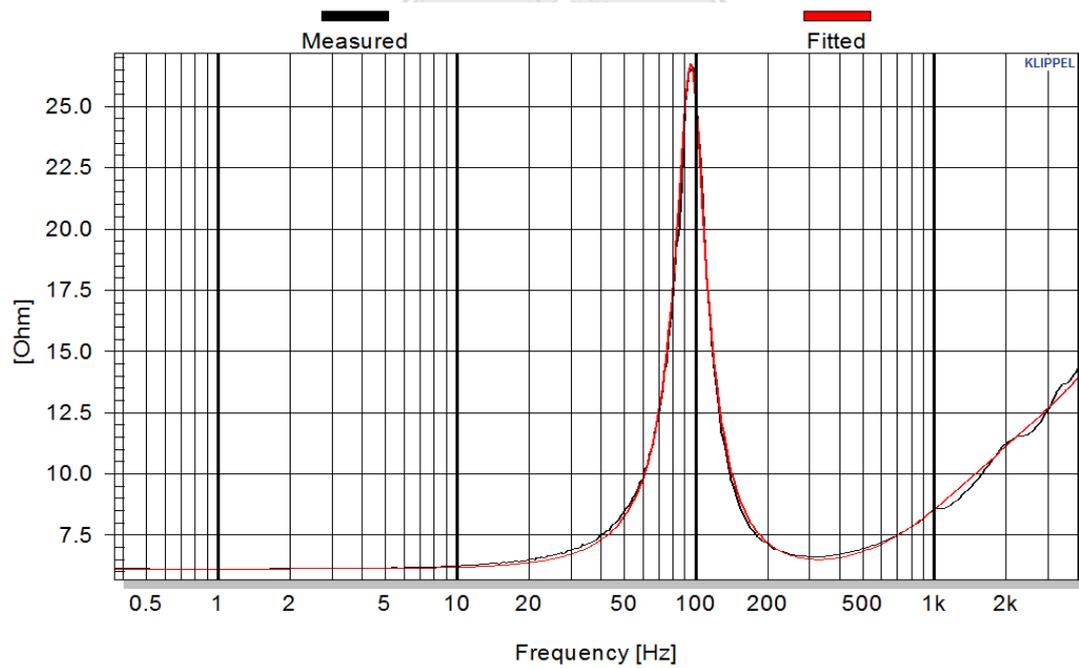
KLIPPEL 實際數據



KLIPPEL 量測 SPL 曲線



KLIPPEL 量測 Impedance 曲線



十二、參考文獻

1. J. H. Huang , ” ElectroAcoustic Transducers ” , 2010 。
2. 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研究所碩士論文 , 96年7月 。
3. 杜功煥(2001) , 聲學基礎課本 , 南京大學出版社 。
4. 白明憲編著 , “ 聲學理論與應用-主動式噪音控制 , ” 全華科技圖書股份有限公司出版, 90年9月 。

