

逢甲大學學生報告 ePaper

利用有限元素分析法模擬揚聲器之特性

Acoustic Analysis for Loudspeaker

with Finite Element Method

作者：陳俊諺

系級：電聲碩士學位學程 一年級

學號：M0602662

開課老師：劉育成 老師

課程名稱：基礎聲學

開課系所：電聲碩士學位學程

開課學年：一〇六 學年度 第一學期



內容

| | | |
|----|--------------------------------|----|
| 一、 | 中文摘要 | 2 |
| 二、 | Abstract | 3 |
| 三、 | 振膜材質對揚聲器性能的影響 | 4 |
| 四、 | 改變懸邊、音圈、以及磁迴系統幾何對低頻響應之影響 | 8 |
| 五、 | 短路環(Short ring)對高頻頻寬之影響 | 10 |
| 六、 | 結論與學習心得 | 12 |
| 七、 | 參考文獻 | 13 |



一、 中文摘要

「音樂」是許多人日常生活中不可缺少的要素，好聽的音樂可以使人心情放鬆，提升生活品質。欣賞音樂，除了聆聽現場表演之外，也可以在家裡、工作場合或是公共場所，設置一套音響系統，即能享受美妙旋律所帶給人的愉快感受；而「揚聲器」在音響系統裡，便扮演了最重要的角色。

揚聲器的工作原理是將輸入的電流經過音圈產生電磁場，此電磁場與永久磁鐵產生相吸相斥的作用力，進而帶動振膜振動，推擠與壓縮振膜前方空氣，進而產生輻射聲壓。揚聲器裡每個組成元件環環相扣，適當的設計與搭配，才能有高品質的聲音輸出；因此，瞭解每個組成元件各別對於輻射聲壓所造成的影響，有其必要性。有鑒於此，本次報告主要以市售一直徑為 6.5 英吋的動圈式揚聲器(Moving-Coil Loudspeaker)為研究標的，針對三個重要組成元素進行分析與討論：

1. 振膜材質
2. 懸邊、音圈、以及磁迴系統幾何
3. 短路環(Short ring)

由於本次的研究主題-動圈式揚聲器是一個具有機械、電子電路與聲場等三種物理域的多重耦合系統，因此，在分析過程中所採用的工具部分，乃選用具磁場、聲學與結構力學分析與耦合條件之商用有限元素模擬軟體 - COMSOL Multiphysics 為主要分析工具。

關鍵字： 有限元素分析法、振膜、揚聲器、短路環、磁迴、聲學、懸邊。

二、 Abstract

Loudspeakers play an important role in our life. People listen to the music, watch movies, or make a phone call to somebody, we always need loudspeakers. Thus, the development of high quality loudspeakers is necessary.

In order to analysis the characteristic of loudspeakers, there is three parts of study in this article, as shown below:

1. The materials of diaphragm: Comparison of sensitivity between composites and glass fiber.
2. The effect of low frequency response by changing the geometry of surround, voice coil, and magnetic motor.
3. Performance of magnetic shorting ring at high frequency.

In order to increase studying efficiency, we simulated with the commercial finite element analysis software – COMSOL Multiphysics to analyze the acoustic performance of loudspeaker.

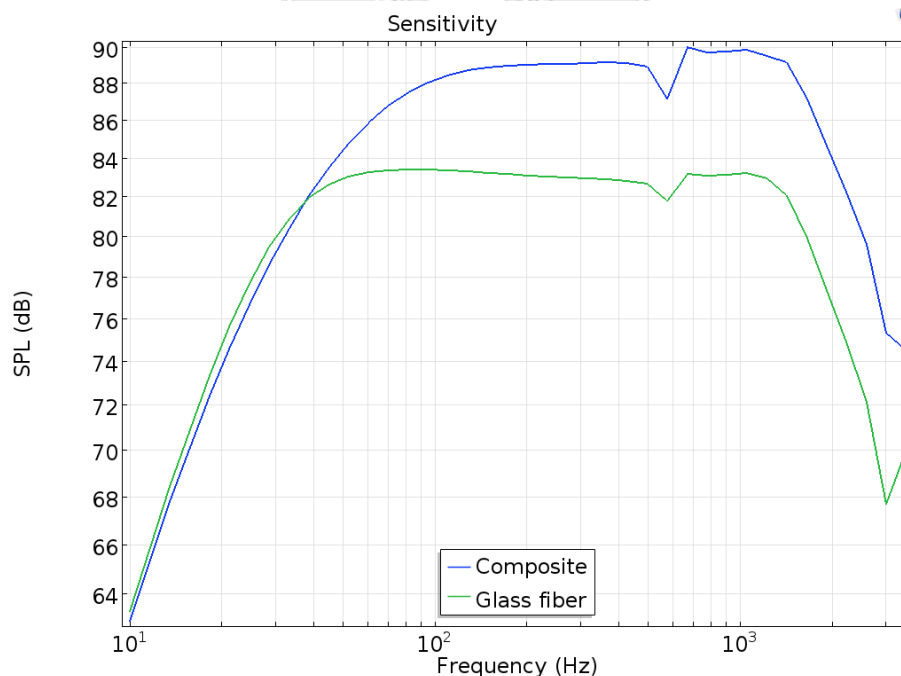
Keyword : Loudspeaker, diaphragm, voice coil, magnetic motor, shorting ring, acoustic, surround, finite element analysis.

三、 振膜材質對揚聲器性能的影響

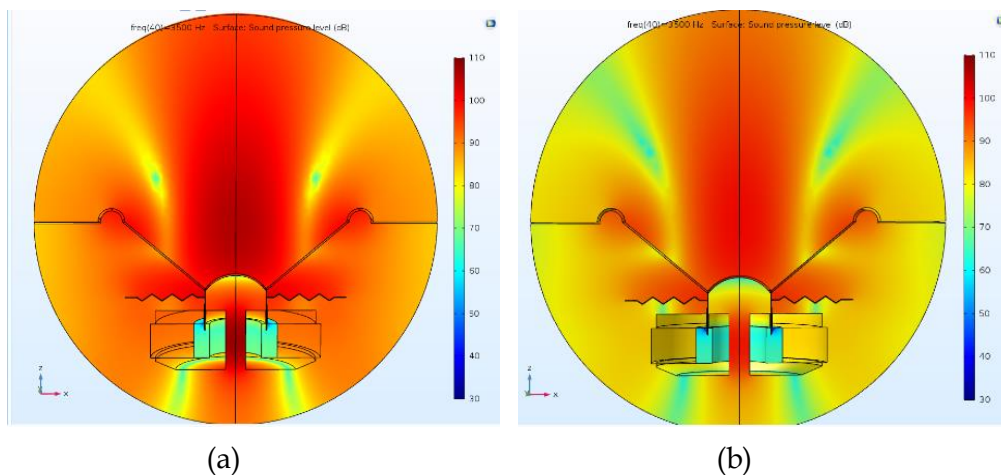
振膜(Diaphragm)是揚聲器推動空氣產生聲壓的關鍵零件，本階段探討改變振膜及防塵罩的材質，在不改變振膜幾何的條件下，比較複合材料與玻璃纖維對於揚聲器輸出頻率響應的影響。



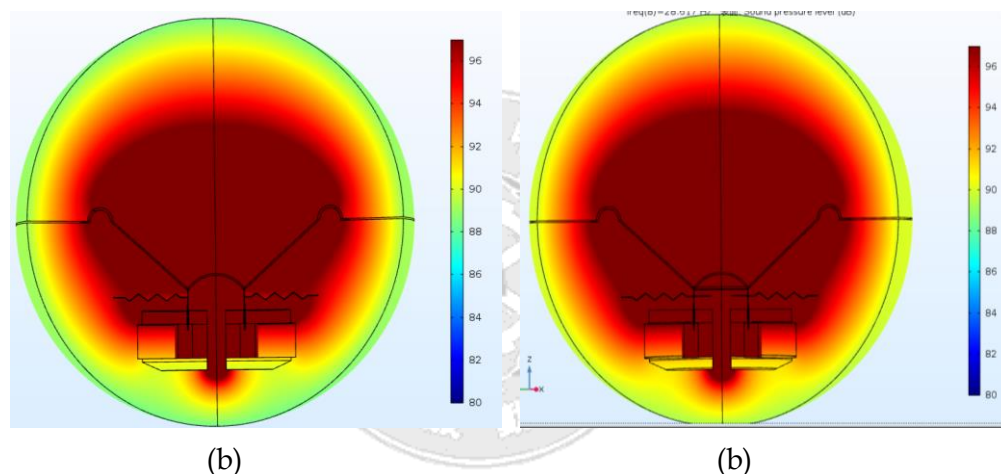
圖(一)、常見的市售不同材質振膜之揚聲器；(a) 複合材料振膜；(b) 玻璃纖維振膜



圖(二)、複合材料振膜與玻璃纖維振膜之輸出頻率響應比較圖



圖(三)、輸出聲壓模擬圖(f= 3.5 kHz)；(a) 複合材料振膜；(b) 玻璃纖維振膜



圖(四)、輸出聲壓模擬圖(f= 28 Hz)；(a) 複合材料振膜；(b) 玻璃纖維振膜

觀察圖(二)頻響曲線發現，複合材料振膜整體輸出靈敏度明顯高出玻璃纖維振膜許多，但玻璃纖維振膜在低頻 40 Hz 以後靈敏度略高於複合材料。

依照自由振動頻率公式推導：

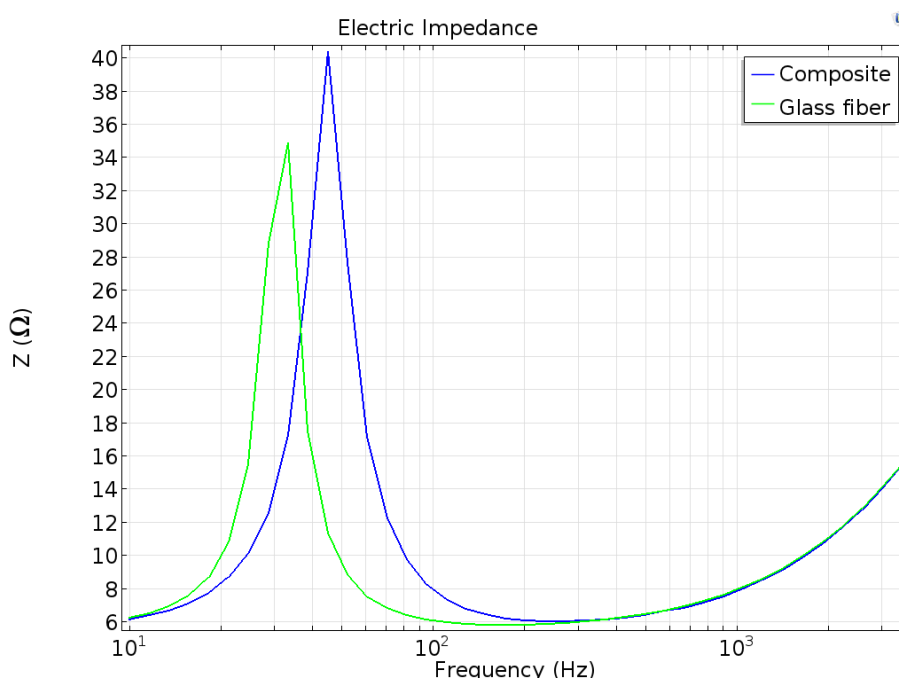
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} \tag{1-1}$$

其中 K_m 為彈性係數， M_m 為質量，當彈性係數 K_m 越大，共振頻率 f_0 就越高；而振動質量 M_m 越大，則共振頻率 f_0 越低。

進一步的比較材料參數發現，複合材料的楊氏係數(Young's Modulus)大於玻璃纖維，而密度則小於玻璃纖維，因此由公式(1-1)推論複合材料振膜的共振頻率高於玻璃纖維振膜的結果為合理。

表(一)、兩種 COMSOL 內建之振膜材料參數

| 材料名稱 | 楊氏係數 (Young's modulus) | 密度 (Density) |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 複合材料 (Composite) | 140 GPa | 720 kg/ m ³ |
| 玻璃纖維 (Glass fiber) | 70 GPa | 2000 kg/ m ³ |





圖(五)、複合材料振膜與玻璃纖維振膜之阻抗曲線比較圖，

其中複合材料(Composite) $f_0=45\text{Hz}$ ，高於玻璃纖維(Glass fiber) $f_0=33\text{Hz}$

最後將模擬結果與市售揚聲器作比對驗證，市售的揚聲器在振膜尺寸、音圈、磁鐵規格皆相同的條件下，玻璃纖維振膜的頻響範圍(Frequency Response)低於複合材料振膜，而前者的效率(Sensitivity)則低於後者，如表二所示。

表(二)、市售不同振膜材質之揚聲器特性比較

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---------------|----------------|-------------------|--------|--------------------------|-----|-------------------|----------|-------------------------|---------------|-----------------|---------|---|------------------|--------|----------------------|----------|----------------------|-----------|-----------|--------|--------------------|----------------|-------------|-------------------|---------------------|----|
|  | <p>Materials of Construction</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Cone Material</td> <td>Fiberglass</td> </tr> <tr> <td>Surround Material</td> <td>Rubber</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Wire Material</td> <td>CCA</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Former</td> <td>Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Basket / Frame Material</td> <td>Cast Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Magnet Material</td> <td>Ferrite</td> </tr> </tbody> </table> | Cone Material | Fiberglass | Surround Material | Rubber | Voice Coil Wire Material | CCA | Voice Coil Former | Aluminum | Basket / Frame Material | Cast Aluminum | Magnet Material | Ferrite | <p>Product Specifications</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nominal Diameter</td> <td>6-1/2"</td> </tr> <tr> <td>Power Handling (RMS)</td> <td>50 Watts</td> </tr> <tr> <td>Power Handling (max)</td> <td>100 Watts</td> </tr> <tr> <td>Impedance</td> <td>6 ohms</td> </tr> <tr> <td>Frequency Response</td> <td>50 to 4,000 Hz</td> </tr> <tr> <td>Sensitivity</td> <td>87.92 dB 2.83V/1m</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Diameter</td> <td>3"</td> </tr> </tbody> </table> | Nominal Diameter | 6-1/2" | Power Handling (RMS) | 50 Watts | Power Handling (max) | 100 Watts | Impedance | 6 ohms | Frequency Response | 50 to 4,000 Hz | Sensitivity | 87.92 dB 2.83V/1m | Voice Coil Diameter | 3" |
| Cone Material | Fiberglass | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Surround Material | Rubber | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Wire Material | CCA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Former | Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Basket / Frame Material | Cast Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Magnet Material | Ferrite | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nominal Diameter | 6-1/2" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Power Handling (RMS) | 50 Watts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Power Handling (max) | 100 Watts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Impedance | 6 ohms | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequency Response | 50 to 4,000 Hz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sensitivity | 87.92 dB 2.83V/1m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Diameter | 3" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | <p>Materials of Construction</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Cone Material</td> <td>Poly Composite</td> </tr> <tr> <td>Surround Material</td> <td>Rubber</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Wire Material</td> <td>CCA</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Former</td> <td>Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Basket / Frame Material</td> <td>Cast Aluminum</td> </tr> <tr> <td>Magnet Material</td> <td>Ferrite</td> </tr> </tbody> </table> | Cone Material | Poly Composite | Surround Material | Rubber | Voice Coil Wire Material | CCA | Voice Coil Former | Aluminum | Basket / Frame Material | Cast Aluminum | Magnet Material | Ferrite | <p>Product Specifications</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Nominal Diameter</td> <td>6-1/2"</td> </tr> <tr> <td>Power Handling (RMS)</td> <td>50 Watts</td> </tr> <tr> <td>Power Handling (max)</td> <td>100 Watts</td> </tr> <tr> <td>Impedance</td> <td>6 ohms</td> </tr> <tr> <td>Frequency Response</td> <td>60 to 5,000 Hz</td> </tr> <tr> <td>Sensitivity</td> <td>88.8 dB 2.83V/1m</td> </tr> <tr> <td>Voice Coil Diameter</td> <td>3"</td> </tr> </tbody> </table> | Nominal Diameter | 6-1/2" | Power Handling (RMS) | 50 Watts | Power Handling (max) | 100 Watts | Impedance | 6 ohms | Frequency Response | 60 to 5,000 Hz | Sensitivity | 88.8 dB 2.83V/1m | Voice Coil Diameter | 3" |
| Cone Material | Poly Composite | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Surround Material | Rubber | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Wire Material | CCA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Former | Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Basket / Frame Material | Cast Aluminum | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Magnet Material | Ferrite | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nominal Diameter | 6-1/2" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Power Handling (RMS) | 50 Watts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Power Handling (max) | 100 Watts | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Impedance | 6 ohms | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequency Response | 60 to 5,000 Hz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sensitivity | 88.8 dB 2.83V/1m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Voice Coil Diameter | 3" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |


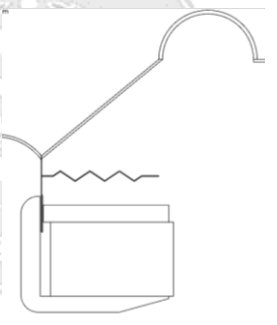
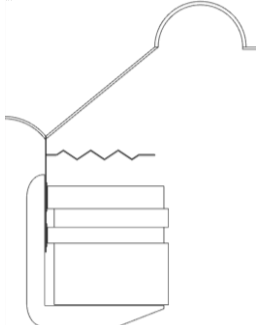


四、 改變懸邊、音圈、以及磁迴系統幾何對低頻響應之影響

懸邊是維持揚聲器振膜動態範圍的重要元件，懸邊的寬度將會影響振膜線性位移的範圍；音圈與磁迴是揚聲器發聲的核心元件，音圈通電後，與磁迴之間交互感應產生的勞倫茲力(Lorentz force)及音圈質量為影響揚聲器效率的關鍵因素之一。

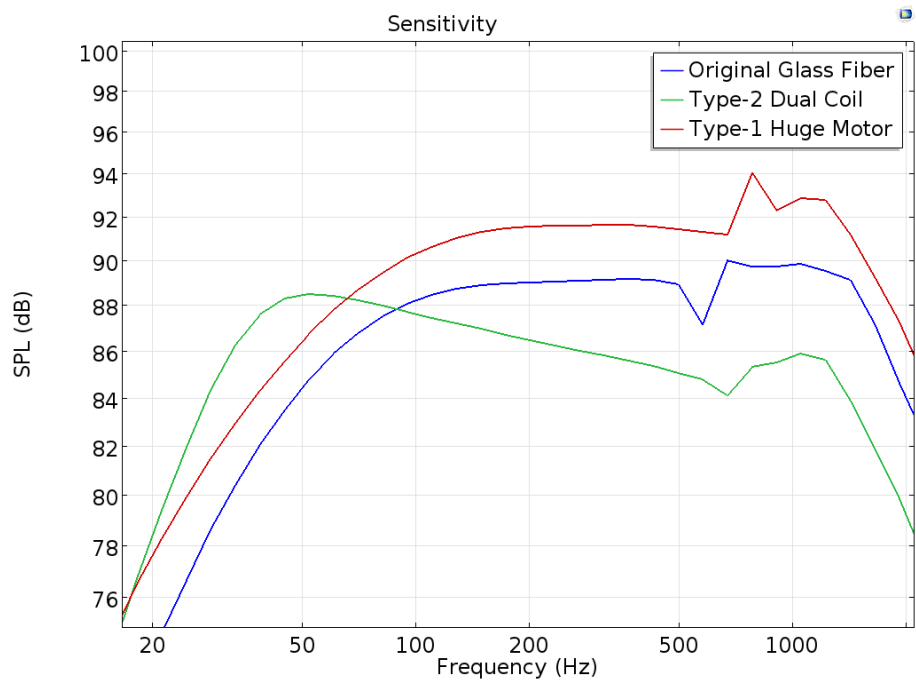
此階段自行設計兩款揚聲器結構，透過改變懸邊寬度，以及音圈與磁迴之幾何，並與原廠設定值比較，探討不同結構變化對於頻率響應與振膜位移量的影響。

表(三)、三種不同揚聲器之結構設計

| COMSOL 範例 | Type-1 | Type-2 |
|--|---|---|
|  |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ 小懸邊 ➤ 小磁迴 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ 超寬懸邊 ➤ 超大磁迴系統 | <ul style="list-style-type: none"> ➤ 超寬懸邊 ➤ 雙音圈 ➤ 加長音圈筒 ➤ 雙層大磁迴 |

觀察圖五可以發現，加大磁迴的 Type-1 整體效率增加約 2 dB，但低頻響應似乎未因加寬懸邊而有明顯增加，推斷是受限於音圈筒長度與磁隙高度，振膜無法產生更大的線性位移量。

基於 Type-1 的缺點，在 Type-2 模型做了改良：加高磁隙與加長音圈筒，由圖五觀察可知，Type-2 在 60 Hz 以下的低頻響應明顯優於前兩款模型，但在中頻段的效率卻是三者中最低，因此推斷可能是因為加長音圈筒與雙音圈結構增加了揚聲器的振動質量，導致振膜位移速度變慢，影響了中高頻段的靈敏度。



圖(六)、三種模型之頻響曲線比較圖：原廠(藍)、Type-1(紅)、Type-2(綠)

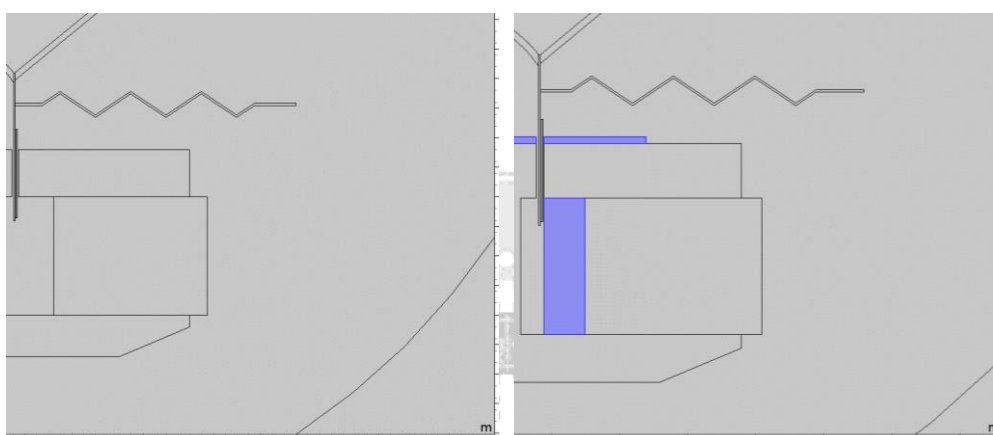


圖(七)、市售常見的大功率超低音單體都具有寬懸邊、長音圈筒，以及大型磁迴設計

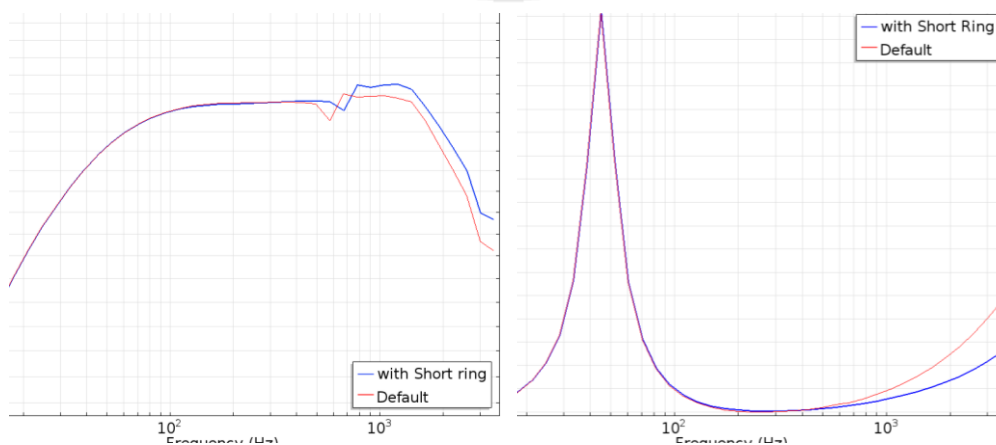
五、 短路環(Short Ring)對高頻頻寬(Bandwidth)之影響

一般音圈都是由漆包銅線繞製而成，屬於電感元件，而音圈在運作時所產生的「電感抗」，以及音圈與上片或下片兩者間互感產生的「渦電流」，其強度與頻率成正比，影響揚聲器在高頻段工作時的效率，且產生失真。

常見的解決辦法是在磁迴系統裡特定位置上覆蓋一層銅遮罩，以減緩音圈感抗在高頻上升的速度。以下將透過 COMSOL 模擬，探討短路環對高頻的影響。

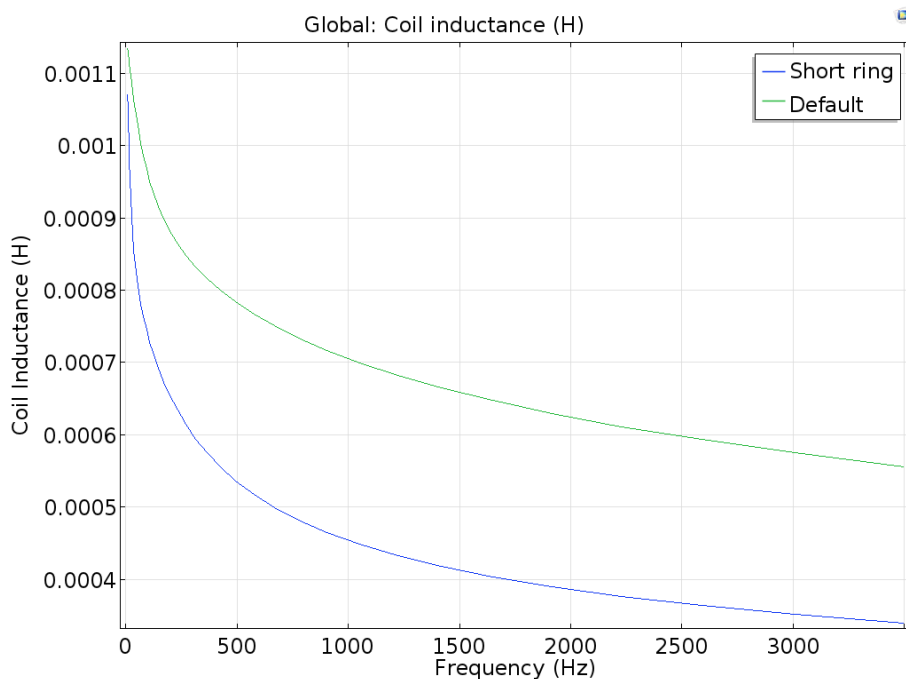


圖六、原廠磁迴幾何(左)與短路環位置(右)示意圖



圖七、短路環磁迴的頻響曲線與阻抗曲線比較圖

由圖七的頻響曲線顯示，增加短路環後，不僅使高頻的頻寬變寬，高頻的效率也明顯增加；觀察阻抗曲線發現，高頻的阻抗上升的幅度比原廠設定減緩了許多；加裝短路環可有效使線圈電感降低，提升高頻響應，如圖八所示：



圖八、音圈電感曲線比較圖

六、 結論與學習心得

在第一階段研究發現，將揚聲器振膜更換為不同材質，確實會影響揚聲器的輸出頻率響應，振膜勁度越高，高頻響應越好；質量重的振膜，低頻響應較好，但靈敏度相對降低。

第二階段改變揚聲器懸邊、音圈及音圈筒，以及磁迴結構，結果發現較大的磁迴可提高揚聲器的靈敏度，印證了音響老師傅「磁鐵越大就越大聲」的說法；而加寬懸邊必須搭配加長的音圈筒才能有效增加低頻響應。

業界將「短路環」稱為「高頻增幅裝置」，在第三階段的結果即可看出，加裝短路環的揚聲器，在不影響整體頻率響應特性的情況下，使高頻的表現更加突出，此設計常應用在全音域揚聲器單體上。

在本學期的基礎聲學課程中，教授帶我們從振動的原理開始了解聲音的傳遞、吸收與反射，進而延伸到揚聲器設計的基本概念，最後將課堂所學的理论，帶入 COMSOL 有限元素模擬軟體做分析。

經過本學期的修習，除了學到聲學的基本理論外，在模擬的過程中也學到了如何以科學的角度解釋揚聲器運作的物理現象，研究不同的振膜材質、懸邊幾何，以及音圈與磁迴結構設計對於揚聲器性能的影響，將理論與實務結合，也從研究過程得知，設計揚聲器時必須同時考慮電磁學、結構力學、聲學等多項物理量，才能設計出符合期待的揚聲器產品。

七、 參考文獻

- [1] A. J. Svobodnik, Roger S. and Marc-Olivier C., “Multiphysical Simulation Methods for Loudspeakers – Advanced CAE-based Simulations of Motor Systems”, 137th AES Convention, Los Angeles, USA, 2014.
- [2] A. J. Svobodnik, “Multiphysical Simulation Methods for Loudspeakers – A (Never-)Ending Story?”, 136th AES Convention, 2014.
- [3] A. Leeuwestein, “Calculation of the sound radiation of a nonrigid loudspeaker diaphragm using the finite-element method”, Journal of the Audio Engineering Society, vol. 36, 539-551, 1988.
- [4] COMSOL Multiphysics 5.3, Model Library, “Loudspeaker Driver”, © 1998-2017 COMSOL AB
- [5] W. M. Leach, Jr., “Loudspeaker Voice Coil Inductance Losses”, J. Audio Eng. Soc, Vol. 50, No. 6, pp442-450 (2002 June).
- [6] M. Dodd, “The Transient Magnetic Behaviour of Loudspeaker Motors”, 111th AES Convention, 2001
- [7] W. Klippel; W. Cardenas, et.al. “Modeling of Rocking Modes in Electroacoustic Transducers”, Journal of the Audio Engineering Society, 64(12), 962-968, 2016.
- [8] G. Pillpnet et al, “Distortion Improvement in the Current Coil of Loudspeakers”, 134th AES Convention, 2013.
- [9] Vance Dickason, “Loudspeaker Design Cookbook, 7th edition”, Audio Amateur Press, Peterborough new Hampshire, 2006
- [10] 杜功煥、朱哲民、龔秀芬編著, “聲學基礎”, 南京大學出版社出版, 90年3月。
- [11] 林谷昇, “動圈式揚聲器有限元素模擬流程之優化”, 私立逢甲大學電聲碩士學位學程碩士論文, 106年7月。