

絲帶喇叭單體音響特性及其在廣播喇叭設計的應用

The Characteristics of an Isodynamic Ribbon Tweeter and Its Application in PA Speaker Design

林建榮¹、蕭毅²

摘要

絲帶喇叭單體具有優越的靈敏度、低失真特性及特殊的音場指向特性，可以應用於高語言清晰度需求的各種廣播喇叭設計。本文比較絲帶喇叭單體與傳統動圈式喇叭單體音響特性的差異，並比較不同絲帶音膜材料，包括聚醯亞胺(Polyimide)、聚對苯二甲酸乙二酯(Mylar)及聚萘二甲酸乙二酯(Polyethylene naphthalate)等材質絲帶音膜對絲帶喇叭單體音響特性的影響。最後再利用 MLSSA 量測喇叭系統的指向特性，並實際應用於演藝廳設計比較絲帶喇叭與傳統的喇叭系統對於語言清晰度的差異。

關鍵字：絲帶喇叭、語言清晰度、絲帶音膜

Abstract

Ribbon Tweeters have excellent sensitivity and sound distortion characteristics, and also own special sound directivity. It can be applied in the design of PA audio systems used in high speech intelligibility environment. This paper intends to compare the difference of sound quality between the ribbon tweeter and the traditional moving-coil type driver. In addition, the effects of different kinds of ribbon diaphragms such as Polyimide, Mylar and Polyethylene Naphthalate on the performance of a ribbon tweeter are studied too. Moreover, the difference in speech intelligibility of an auditorium by using the ribbon speaker system and the traditional PA speaker system is compared too.

Keywords: Ribbon tweeter、Speech Intelligibility、Ribbon Diaphragm、PA Speaker

¹ 春耕科技有限公司

² 聯全貿易有限公司

前言

絲帶喇叭單體(ribbon tweeter)的發展及使用的已經有很久的歷史¹⁻⁵，從喇叭單體的音膜(diaphragm)結構來區分，可以區分為全金屬帶式(Truth Ribbon)及複合軟性基材式(Flexible Printed Circuit Laminate)等兩種絲帶喇叭單體，前者以帶狀薄片金屬取代傳統動圈式喇叭單體(Moving Coil Loudspeaker Driver)的音膜及音圈(Voice Coil)做為喇叭的振動發聲結構，而後者則是利用複合軟性基材做為喇叭音膜並利用音膜上的金屬電極線路取代喇叭單體的音圈。由於絲帶喇叭單體的振動質量低，暫態響應(Transient Response)及高頻特性比一般動圈式喇叭單體(Moving Coil Loudspeaker Driver)優越。全金屬帶式絲帶喇叭單體由於電阻極低必須要搭配匹配變壓器使用，因此使用匹配變壓器衍生的失真問題也會影響絲帶喇叭單體的音響特性，同時也使絲帶喇叭單體的體積及成本變大。複合軟性基材式絲帶喇叭單體依照磁性迴路可以區分為等磁式(Isodynamic Type)^{4,5}及海爾式(Heil AMT type)³，等磁式及海爾式絲帶喇叭單體各有其優點，等磁式絲帶喇叭單體的磁路效率較高，而海爾式絲帶喇叭單體則具有較大的線性動態衝程。上述幾種絲帶喇叭單體以等磁式帶喇叭單體最具備量產性，因此也容易推廣應用於各種喇叭系統上，本文以下針對等磁式帶喇叭單體之音響特性及其在廣播喇叭設計的應用進行探討。

2. 等磁式絲帶喇叭的結構及絲帶音膜特性

目前最常使用之等磁式絲帶喇叭單體的結構有圓形(圖1)及帶式(圖2)兩種，前者採用圓形鈷鐵硼系磁鐵形成的磁性迴路，後者則採用多條長方形鈷鐵硼系磁鐵形成的磁性迴路。春耕科技生產，產品編號為RT003C及RT002A絲帶喇叭單體即分別為圓形及帶式兩種絲帶喇叭單體。圓形絲帶喇叭的指向性和一般球頂型高音單體(Dome Tweeter)較為接近，帶式絲帶喇叭的指向性在軸向及水平方向則有明顯差異，同時帶式絲帶喇叭可以隨長度加長使喇叭的指向性呈現線音源方式傳播，或是更進一步擴大絲帶音膜面積及磁鐵排列數成為面音源。

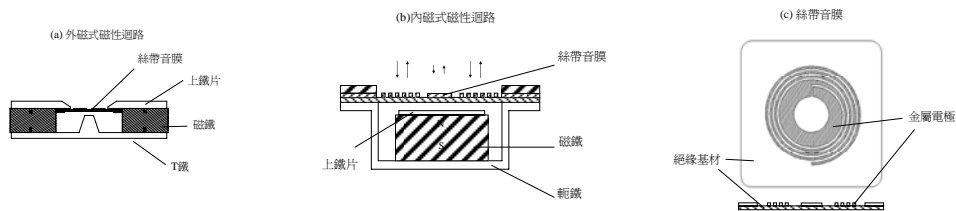


圖1 圓形等磁式絲帶喇叭單體(a)外磁式磁性迴路(b)內磁式單體磁性迴路及(c)絲帶音膜結構

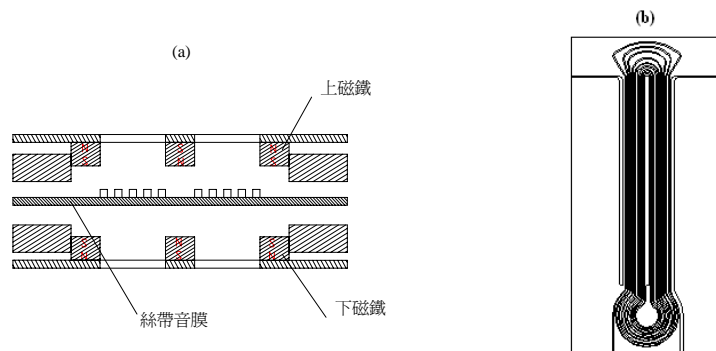


圖2 帶式等磁式絲帶喇叭單體(a)磁性迴路及(b)絲帶音膜結構

喇叭單體的結構元件中影響音質特性最關鍵者為音膜^{4,6,7}，絲帶音膜隨使用的材料及製作程序不同，絲帶喇叭單體的音響特性亦不相同。製造絲帶音膜使用的材料有Mylar(Polyethylene terephthalate, PET)，PEN(Polyethylene naphthalate)及

Kapton(poly-4,4'-oxydiphenylene-pyromellitimide)等絕緣基材膠合銅、鋁等金屬箔所形成的三層式軟性複合基材或是 Kapton 直接貼合銅、鋁等金屬箔所形成的二層式軟性複合基材。絲帶音膜的製造程序如圖 3 所示，依照絲帶喇叭單體的特性需求再適度調整絲帶音膜的材料、電極線路及製程。

Ribbon Diaphragm Manufacture

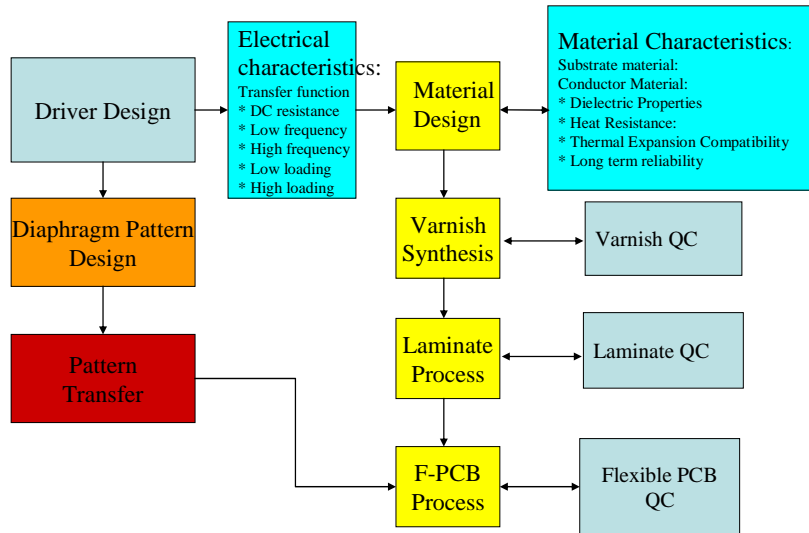


圖 3 絲帶音膜製程

絲帶音膜的材料選用對絲帶喇叭單體所能承受功率的大小有決定性的影響，Mylar，PEN 及 Kapton 等基材的動態彈性模數(Storage Dynamic Modulus)^{8,9} 與溫度的相對關係圖如圖 4 所示，Mylar 及 PEN 的玻璃轉換溫度分別約在 70°C 及 120°C 左右，而 Kapton 的玻璃轉換溫度則超過 300°C 以上。

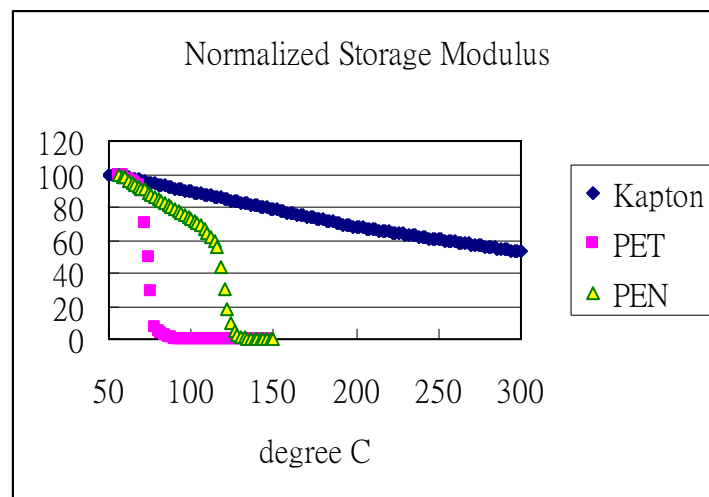


圖 4 基材動態彈性模數與溫度的相對關係圖

使用(I) Mylar/Acrylic adhesive 膠合層/鋁三層式軟性複合基材(厚度依次為 12micron/3micron/22micron，以下簡稱 Mylar 三層基材) 及(II) Kapton/鋁二層式軟性複合基材(厚度依次為 12micron/22micron，以下簡稱 Kapton 二層基材)製作圖**的絲帶音膜，分別製作的帶式絲帶喇叭單體，使用 MLSSA 音頻測試系統^{10,11} 搭配 B&K 4133 麥克風，測試條件為 1 米/1W、頻寬 40K Hz，SPL (Sound Pressure Level)圖及瀑布圖

(Waterfall Plot, Cumulative Decay Spectra)^{12,13} 測試結果如圖 5 及圖 6 所示，在小功率條件下兩者並無顯注差異。但是當喇叭測試功率提高至 15W 時，在連續驅動 1 分鐘後，以 Mylar 三層基材製作之絲帶音膜，金屬電極由複合基材上剝離；而採用 Kapton 二層基材製作之絲帶音膜，即使驅動功率提高至 25W，金屬電極依舊無剝離現象產生，因此針對廣播喇叭不同功率設計的需求，絲帶音膜材質的選用必須要加以考量。其次，Mylar 三層基材及 Kapton 二層基材製作之絲帶喇叭單體暫態特性上的些微差異，雖然一般喇叭音頻測試系統測試差異並不明顯，但是經過訓練的人耳是可以分辨出來，這個部份做為 hi-fi 喇叭系統設計是必須要考慮的，我們會再另文討論。

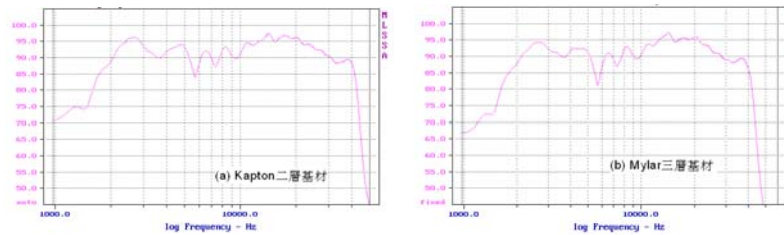


圖 5 SPL 比較圖(a) Kapton 二層基材 (b) Mylar 三層基材

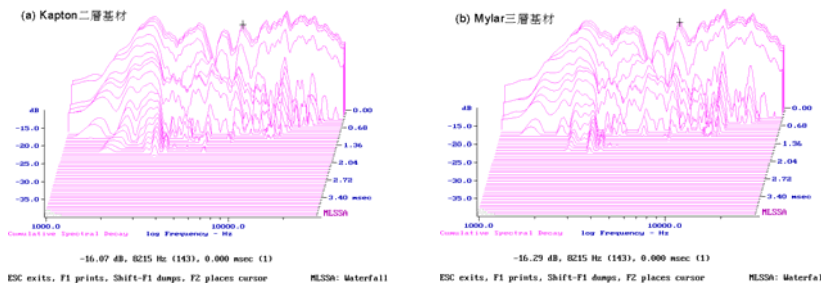


圖 6 Waterfall 比較圖(a) Kapton 二層基材 (b) Mylar 三層基材

3. 等磁式絲帶喇叭的音響特性

(I) 高頻特性及阻抗相位特性：等磁式絲帶喇叭單體的振動系統的質量只有一般球頂型高音單體的十分之一，因此暫態特性及高頻響應優於傳統球頂型高音單體，圖 7 比較春耕科技 RT002A 絲帶喇叭高音單體與傳統球頂型高音單體靈敏度(Sensitivity, SPL@1m/1W)及阻抗、相位特性，RT002A 絲帶喇叭高音單體高頻響應可以達到 40K Hz 以上。

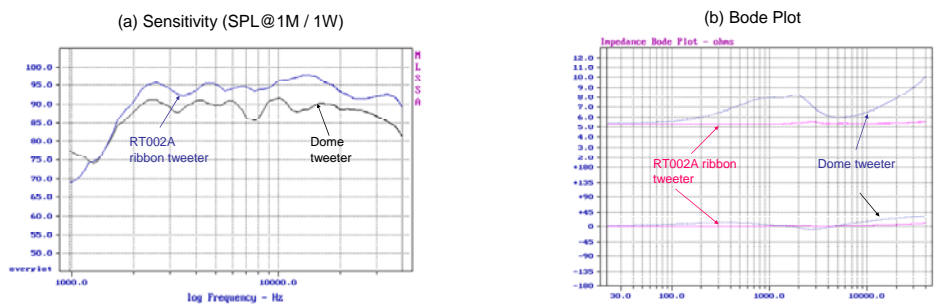


圖 7 絲帶喇叭高音單體與傳統球頂型高音單體音響特性比較圖(a) Kapton 二層 Sensitivity (b) Bode Plot

其次，平坦的阻抗及相位特性為絲帶喇叭高音單體的另一項優點，振動系統的質量輕及電極線路的低感抗，使電氣阻抗幾乎不受頻率影響，因此有助於減少傳統球頂型高音單體分音器高頻等化時所衍生的失真問題。

(II) SPL Compression: 等磁式絲帶喇叭單體由於音膜四周都是固定不動，因此承受低頻及大功率時，音膜線性振幅會小於傳統球頂型高音單體。圖 8 比較絲帶喇叭單體使用不同功率驅動下量測得的靈敏度。隨驅動功率增加，SPL Compression 現象逐漸放大。要減少此一現象的影響可以提高分頻點設計或是加大絲帶喇叭單體的尺寸使有效低頻使用下限可以向下延伸。

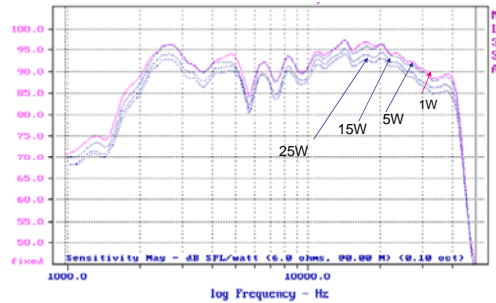


圖 8 絲帶喇叭單體在 1W，5W，15W 及 25W 功率驅動下量測之靈敏度

(III) 喇叭指向性(Directivity): 絲帶喇叭單體和動圈式喇叭單體另一個不同點在於整個絲帶音膜幾乎是同步振動，因此可以利用帶式絲帶喇叭長度及面積設計的改變，或是利用帶式絲帶喇叭單體在軸向及水平方向的指向性差異，以模組方式堆疊製作成列陣狀喇叭(Line Array Speaker)，依實際應用需求配合音場模擬來解決大空間廣播喇叭設計時的語言清晰度問題。圖 9 是 RT002A 絲帶高音單體搭配 5 吋低音喇叭製作成的兩音路喇叭(編號 BT20501A)的指向性分佈圖。目前這一種喇叭在國內的會議廳使用結果發現，對於清晰度 RASTI 參數及實際聆聽效果都比傳統兩音路喇叭來得優越。

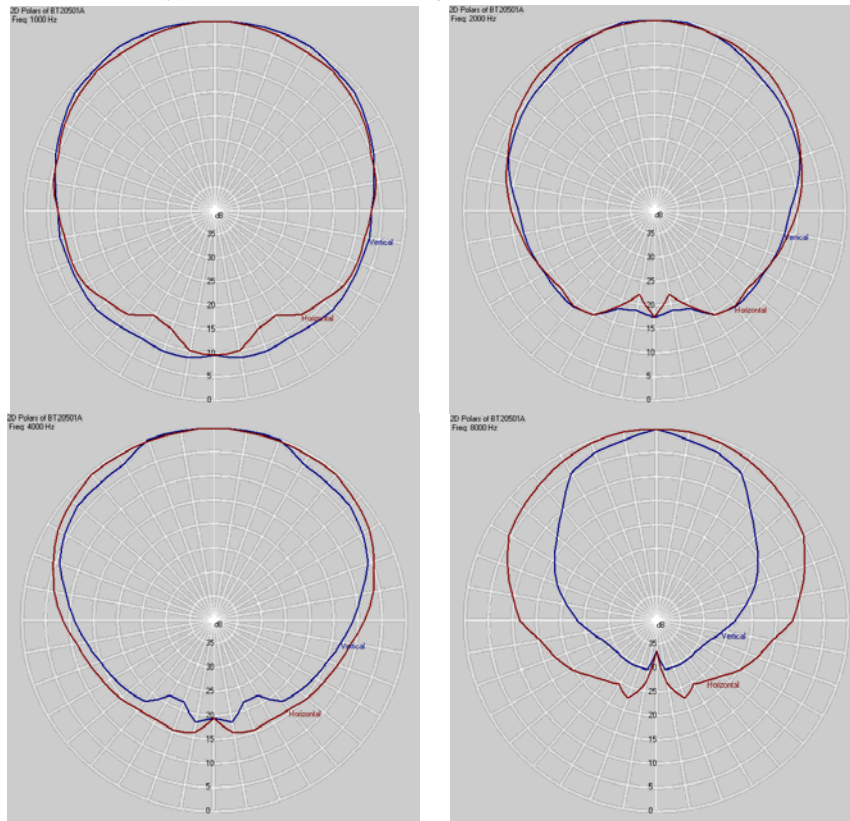


圖 9 BT20501A 兩音路喇叭指向性分佈圖

4. 結論

我們在國內建立全製程絲帶喇叭單體的製造能力，並利用本文介紹絲帶喇叭單體的特性及設計的一些經驗，並說明各種絲帶音膜材料對絲帶喇叭單體特性的影響。希望能借此推展出更多絲帶喇叭的設計及應用。

5. 參考文獻

1. L. L. Beranek, "Acoustics" McGraw-Hill, New York, 1954
2. M. Colloms, "High Performance Loudspeakers" John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991
3. O. Heil, U.S. Patent No. 3832499, 1974
4. H. Nakajima, M. Ugaji, H. Suyama, "Tweeter Using New Structure and New Material for Diaphragm", J. Audio Eng. Soc., Vol. 29 pp.705-710, 1981
5. J. A. M. Nieuwendijk, "Compact Ribbon Midrange Tweeter Loudspeaker", J. Audio Eng. Soc., Vol. 36 pp.776-787, 1988
6. C. R. Lin, "Injection Loudspeaker Diaphragm: Design and Fabrication", 材料與社會, 58, pp.72-75, 1991
7. C. R. Lin, "Sound and Composite Materials", 材料與社會, 70, pp.51-56, 1992
8. J. F. Mano, Z. Denchev, A. Nogales, M. Bruix, T. A. Ezquerro, "Confined crystallization in phase-separated poly(ethylene terephthalate)/poly(ethylene naphthalene 2,6-dicarboxylate) blends", Macromol. Mater. Eng., vol.288, pp778-788, 2003
9. J. C. Coburn and M. T. Pottiger, in Polyimides: Fundamentals and Applications M. K. Ghosh and K. L. Mittal ed.), Marcel Dekker, Inc., New York, pp207-247, 1996
10. D. D. Rife, "Transfer-Function Measurement with Maximum Length Sequences," J. Audio Eng. Soc., Vol.37, No.6, pp. 419-443, 1989
11. D. D. Rife, "Modulation Transfer Function Measurement with Maximum- Length Sequences", J. Audio Eng. Soc. Vol 40, No. 10, pp779-789, 1992
12. J. M. Berman and I. R. Fincham. The Application of Digital Techniques to the Measurement of Loudspeakers. J. Audio Eng. Soc., vol. 25, pp. 370-384, 1977
13. J. D. Bunton and R. H. Small. "Cumulative Spectra, Tone Bursts, and Apodization", J. Audio Eng. Soc. Vol 30, No. 6, pp386-395, 1982