

## 平面波耦合腔內之波動行為與其對麥克風靈敏度校正不確定度之影響

涂聰賢<sup>1</sup>、蕭榮思<sup>1</sup>、鄭維德<sup>2</sup>、游祥維<sup>3</sup>、王仁宏<sup>3</sup>、余仁方<sup>2</sup>

### 摘要

標準麥克風校正技術分為絕對校正及比較校正；絕對校正為以基本物理量特性所發展出來的原級標準，直接進行儀器校正工作，以得到校正標準件之誤差值為量測參考。比較校正則透過經絕對校正完畢之標準麥克風進行之校正。標準麥克風音壓靈敏度互換校正，為原級校正的一種，適用於耦合器(coupler)空腔測試獲得麥克風壓力音場(pressure field)之音壓靈敏度。本研究之目的為針對音壓校正之耦合器空腔以電腦模擬分析之方式，探討耦合腔內之徑向波動行為，後續用以修正麥克風之音壓靈敏度。以ANSYS<sup>®</sup>有限元素分析軟體在麥克風膜面承受聲壓值而產生位移量為邊界值，探討耦合腔內空氣的壓力變化探討平面波耦合腔內之波動行為，研究結果顯示，模型中確實可觀察到耦合腔內徑向波動行為的發生，其結果可做為麥克風校正技術之對波動行為所造成的麥克風聲壓靈敏度值之不確定修正之參考。

**關鍵字：**標準麥克風、音壓靈敏度、耦合腔、波動行為、校正

---

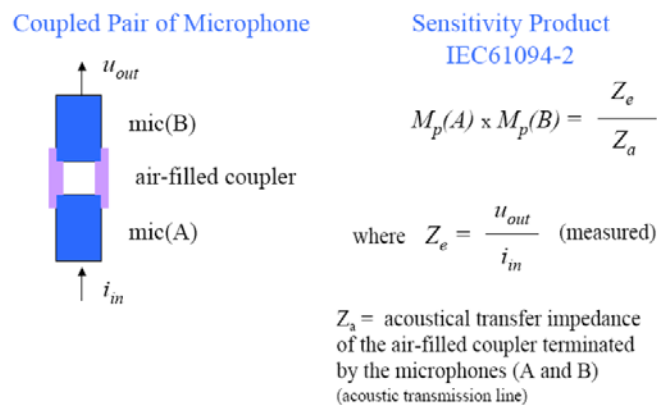
<sup>1</sup>工業技術研究院量測技術發展中心

<sup>2</sup>長庚大學-耳科學實驗室

<sup>3</sup>中華大學機械與航太工程研究所

## 一、研究背景與目的

麥克風校正技術分為絕對校正，以及比較校正；絕對校正為以基本物理量特性所發展出來的原級標準，直接進行儀器校正工作，以得到校正標準件之誤差值為量測參考。比較校正則透過經絕對校正完畢之標準麥克風進行之校正。互換校正法需要可互換性感測器，而電容式麥克風即是具可互換性之麥克風。目前在空腔中壓力音場中進行互換校正有兩種方法：一種為 NIMA 所開發之三埠法(Three port method)及 B&K 之雙埠法(Two port method)；其中雙埠法之原理將麥克風對至於耦合空腔中，一支麥克風(A)為聲音發生器，而另一支麥克風(B)為聲音接受器所示(如圖一)，在互換校正中麥克風(A)與麥克風(B)之靈敏度之乘積(Sensitivity product,  $MP(A) \times MP(B)$ ) 為麥克風(B)之輸出電壓( $u_{out}$ )與麥克風(A)之輸入電流( $i_{in}$ )之商(electrical impedance)與耦合空腔之聲傳導阻抗(acoustic transfer impedance)。所以任三支同類型之麥克風且其中兩支麥克風具有互換性，三支麥克風分別配對進行互換校正可得到三個麥克風間兩兩之靈敏度乘積之方程式，由靈敏度乘積方程式之聯立解即可獲得三支麥克風之壓力音場靈敏度。



圖一 麥克風靈敏度方程式之獲得

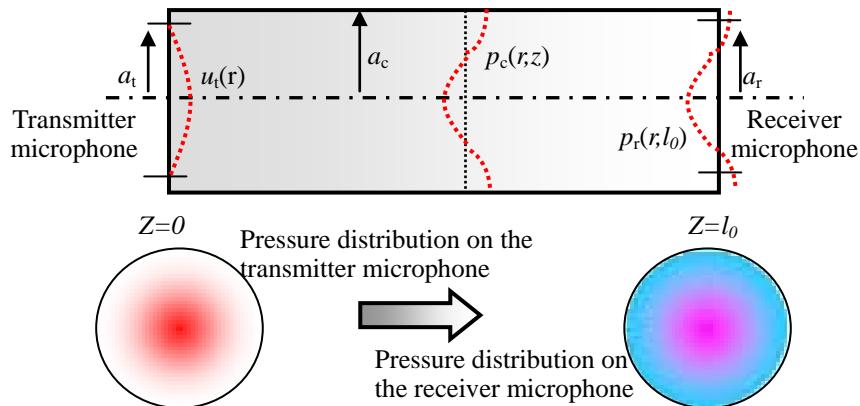
在低頻時聲壓平面波之傳遞在耦合腔中為均勻的，但是在高頻時將會發生數種波動行為(如圖二)，為了要獲得耦合腔之聲傳遞阻抗必須對耦合腔內之波動現象加以控制，所以耦合腔之設計均為圓柱型降低波動行為。目前使用的平面波耦合腔(plane wave coupler)在設計上考量僅有軸向之聲波傳遞而沒有徑向波發生。所以耦合腔外型、麥克風對薄膜平行度等，均會造成耦合腔內產生不預期波動行為。

一般而言耦合腔中之波動行為包括三種種類[2]：(1) 縱向波動(沿耦合腔之縱向)、(2) 徑向波動(radial waves)及(3) 不對稱波動(asymmetrical waves)，一般會造成耦合腔內聲壓不均勻傳遞之波動行為原因有

- (1) 傳音麥克風與收音麥克風之薄膜平行度
- (2) 耦合腔體內部表面粗糙度改變甚至幾何形狀改變
- (3) 耦合腔體之壁面之熱傳導行為(heat conduction)，因為希望聲音在一種等熵絕熱

過(adiabatic to isothermal conditions)程中傳遞，而耦合腔之壁面之溫度梯度造成氣體密度等特性之改變，造成波速與聲壓值之改變。

(4)發音麥克風受到之驅動電壓後，薄膜面產生非平面波前之振動行為[3]，依據 Morse 之研究在具互換特性麥克風當發音麥克風時，使薄膜產生振動而發出聲壓，其受張力之薄膜振動行為為零階之 Bessel function (Morse, 1948, Chap V.19-V.20)，耦合腔內之徑向波動行為是因為麥克風膜面非均勻之速度分佈，或是薄膜有效振動面積小於均稱(nominal diameter)面積，麥克風膜面之速度分佈在麥克風共振頻率 1.2 倍以下可以零階之 Bessel function 表示，若不考慮徑向波動行為在高頻之不確定度將會增加。



圖二 耦合腔及麥克風與平面波傳遞之幾何示意圖

平面波之耦合腔內之聲傳遞阻抗(acoustical transfer impedance)表示式如 IEC 61094-2 方程式(4) 表示如下，式中已針對低頻部分進行正規化，而聲傳遞阻抗隨  $KL/\sin(KL)$  變化，其中 L 為耦合腔之長度。

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[ \left( \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left( 1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right]$$

軸向之波動行為會隨頻率之增加而增加耦合腔內之壓力，當  $KL=\pi/2$  時聲壓增加約 4 dB，所以平面波之耦合腔對可用頻率範圍介於  $kL=2.3$  至 2.6 間，而耦合腔內之聲壓值可能會增加 10 至 15 dB。若對一長度為 5 mm 之耦合腔進行長度量測時誤差為 10  $\mu\text{m}$ ，會導致在傳遞阻抗時 0.02 mm 之長度誤差、及在  $kL=\pi/2$  麥克風壓力聲場靈敏度造成 0.01 dB 之誤差，且頻率越高其誤差量越大，所以在耦合腔長度之不確定度應小於幾個  $\mu\text{m}$ 。

在高頻部分，耦合腔內之聲壓值會因耦合腔之熱傳導與空氣黏滯而損失，空氣黏滯之損失與空氣粒子之速度及耦合腔內壁之粗糙度直接相關。若是沒有考慮黏滯損失則會降低麥克風壓力音場靈敏度之計算值(校正值)，且在高頻時之不確定度將會增加。

麥克風音壓靈敏度可能受到各因素影響(如圖三)。本研究之目的為修正各不確定度因子影響，以進行校正技術之深化。因此針對音壓校正之耦合器空腔測試中，耦合器空腔音場特性，嘗試以電腦模擬分析之方式，探討耦合腔內之徑向波動行為，用以修正麥克風之音壓靈敏度。

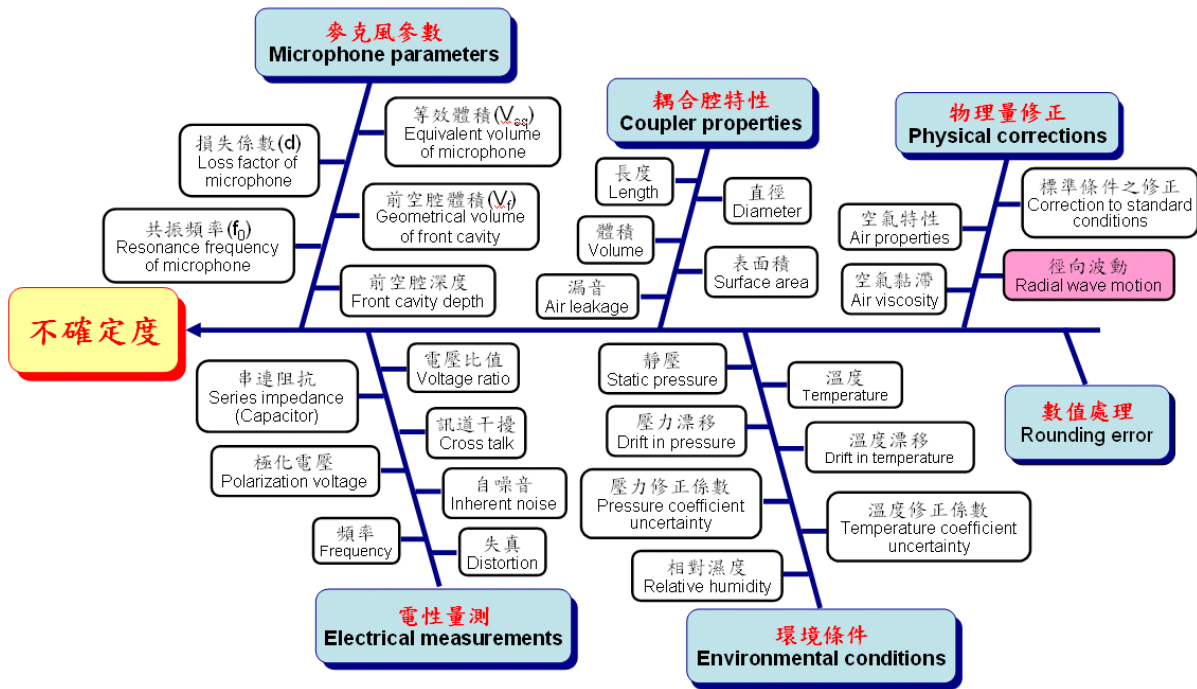


圖 三 麥克風原級校正不確定度因子

## 二、方法與材料

### (1) 建立耦合腔數學模型

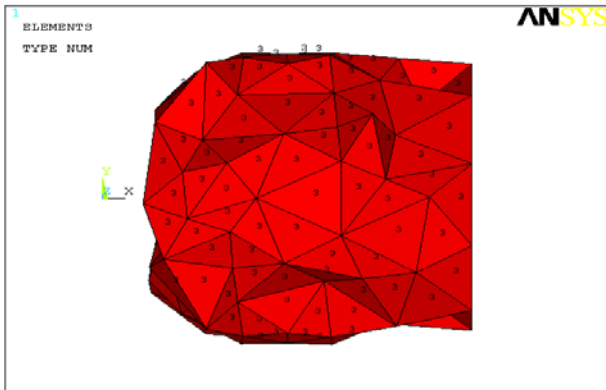
依據 CMS/NML 現有之平面波耦合腔(如表一)，建立耦合腔之結構模型(熱傳)與空腔內之聲學模型(波傳與聲壓傳播)。耦合器模擬採用 ANSYS®有限元素分析軟體進行分析，在元素類型方面則採用 FLUID30 8-Node 之六面體元素，將耦合空腔分為內層流體元素與外層與耦合腔內壁接觸之流體元素(如圖四)，建立有限元素模型並進行網格，網格後模型，施與一固定位移值觀察耦合器內空氣的壓力變化，並且檢視 250Hz、500Hz、1kHz、2kHz、4kHz 及 8kHz 這 6 個頻率在各頻率下的調和外力分析反應，以了解耦合器空腔內平面波之傳遞現象。在模擬中將採二維傳遞模型，將模擬之收音麥克風表面之聲壓分佈與速度與實際量測結果進行比較，分析其差異必要時進行模型之調整與邊界條件之修改。

### (2) 發音麥克風薄膜變形邊界條件帶入

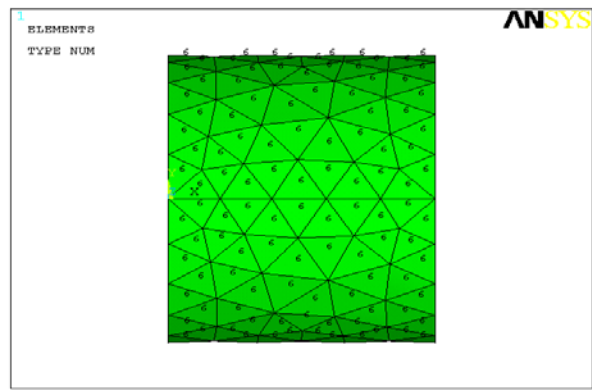
建立發音麥克風在不同頻率與不同聲壓驅動下之薄膜變形與振動特性，將此邊界特性帶入耦合腔之邊界條件(如圖五)。以發音麥克風驅動下之薄膜運動特性當作邊界條件，獲得收音麥克風薄膜面上之聲壓分佈與速度分佈。

表一 模擬平面波耦合腔尺寸

	頻率範圍 [Hz]	直徑 [D]	長度 [L]	腔內 表面積 [A]	體積 [V]	L/D [R]	V/A [I]
CPL 3048 UA 1413	20 – 7k	18.6	15	876.5	4075.7	0.806	4.650
CPL 3044 UA 1429	20 – 12.5k	18.6	7.5	438.3	2037.9	0.403	4.650
CPL 3088 UA 1430	20 – 25k	9.3	4.7	137.3	319.27	0.505	2.325
CPL 3098 UA 1414	20-12.5k	9.3	9.4	274.6	638.53	1.011	2.325

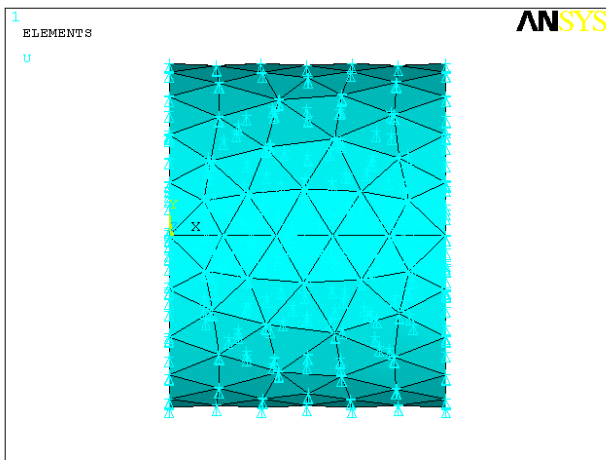


左圖：內層流體元素

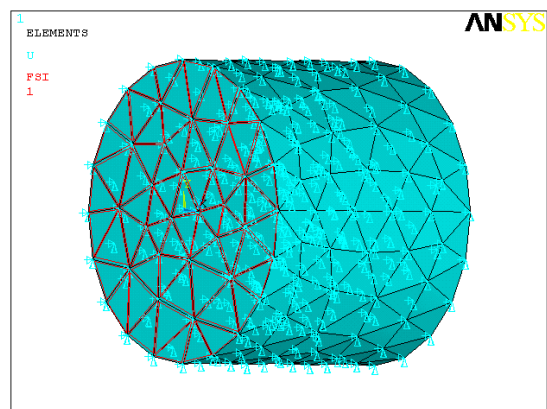


右圖：外層與空氣接觸之流體元素

圖四 元素之設定



左圖：X、Y 軸自由度 位移固定為 0



右圖：變形與負載施加設定

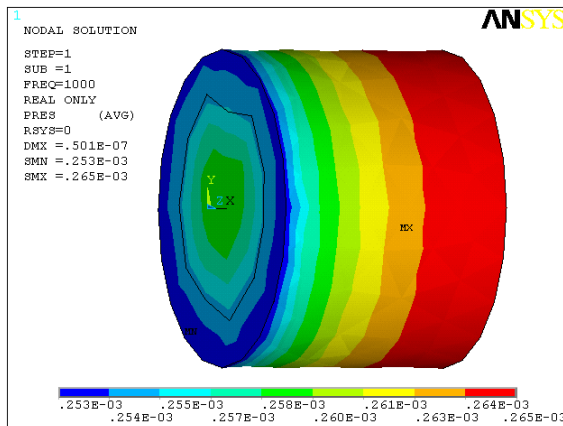
圖五 邊界條件設定

表二 材料參數表

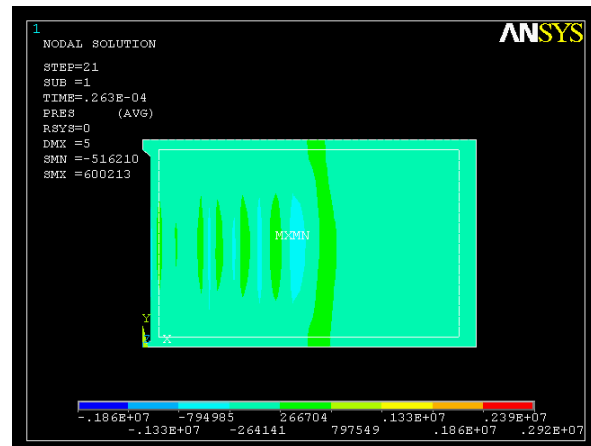
FE MODEL	空氣密度 (g/mm <sup>3</sup> )	聲速 (mm/s)	阻抗
Coupler	1.21E-6	3.43E5	0.02

### 三、結果與討論

具互換特性之麥克風於耦合腔內進行音壓靈敏度之原級標準與標準比對校正[4]時，耦合腔內之波動傳遞特性往往影響結果之不確定，以往對耦合腔內之不確定度之評估，通常採用設備供應商所提供之均稱值進行，本研究藉由有限元素分析方式進行耦合腔波動與波傳特性之探討，建立耦合腔之模型與分析結果，可觀察到壓力波在耦合器中傳遞時，受兩側內壁之黏滯性影響，而產生不規則之曲面波。在圖六中之模擬結果為平面波耦合腔內 1000 Hz 之聲波傳遞暫態結果，在小於  $1/4 \lambda$  波長下在軸下並無發現特定之聲學模態、在徑向之聲壓分佈下因為邊界條件作用下平面波會產生扭曲。在圖八中為聲波在平面波耦合腔內傳遞之行為。因為發音麥克風(transmitter microphone)薄膜表面與收音麥克風(receiver microphone)薄膜表面之邊界設定之差異，在圖八左端之發音麥克風左膜面聲波已產生扭曲，而聲波往右傳遞至無反射端之收音麥克風，扭曲之聲波有緩和之趨勢。在此模擬之結果中發現因麥克風膜面之變形造成平面波耦合腔產生扭曲之現象，此定性上之描述在後續會輔以定量上之量測探討在平面波耦合腔內聲壓值不均勻分佈與差異。



圖六 耦合腔內之聲波傳遞



圖七 耦合器空腔中平面波之傳遞行為

### 四、結論

聲量之絕對標準在實現上以互換校正進行，而聲音在耦合腔中之傳遞過程為絕熱(adiabatic)過程，但實際上耦合腔表面確實會有熱傳遞現象發生，熱傳導現象造成體積改變對麥克風靈敏度之低頻部分影響很大。在低頻範圍中，因為聲音之波長大於耦合腔之長度，所以在耦合腔之縱切面上之聲壓值與相位為相同的，所以可以滿

足麥克風壓力音場靈敏度校正之需求；在高頻時，因為波長短在耦合腔中可能會發生不同型態之波動行為(wave action)，此種波動行為造成麥克風互換校正程序中決定聲傳遞阻抗之困難性。且耦合腔內之波動特性與其聲源之粒子速度分佈(particle velocity distribution of the source)與耦合腔之幾何尺寸、聲波頻率範圍具有密切之關連性，所以詳細地解析與掌握耦合腔內之波動行為將是確保校正之正確性與降低校正結果之不確定度必要之工作與課題。

## 五、參考文獻

- [1] IEC 61094-2 Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique
- [2] K. Rasmussen, "Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers", *acta acoustica* 1(1993) 145 - 151
- [3] Morse Ph. M., "Vibration and Sound", McGraw hill 2nd ed. (1948)
- [4] IEC 61094-5 Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison
- [5] George S. K. Wong, Tony F. W. Embleton, "AIP Handbook of condenser microphone microphones, Theory, Calibration and Measurements", American Institute of Physics.
- [6] Reciprocity Calibration System Type 9699/ Reciprocity Calibration Apparatus Type 5998, User manual, B&K
- [7] MP.EXE Microphone Pressure Sensitivity Calibration Calculation Program, Ver 3, September 1999, B&K
- [8] Reciprocity Measurement Program BZ 5226 Installation Guide, Ver 2.10
- [9] Microphone Handbook. Vol (1) Theory, B&K Technical Documentation (BE 1447-11)
- [10] 陳兩興、盧奕銘、郭淑芬，"聲量標準國際比對" 中華民國音響學會第十七屆學術研討會論文集，2004年。
- [11] 陳兩興、鍾招騰、黃河潤、林學錦，"互換校正技術在聲量標準的應用"，中華民國音響學會第五屆學術研討會論文集，1992年。
- [12] 李政寬、陳兩興，"麥克風音壓靈敏度與自由音場靈敏度絕對校正原理"，研究報告07-3-91-0061工研院量測技術發展中心，2004年。
- [13] 陳兩興等 "標準麥克風互換校正系統"，中華民國音響學會第七屆學術研討會論文集，1994年。
- [14] 麥克風音壓靈敏度校正系統校正程序—互換法，研究報告 07-3-83-0046，工研院量測技術發展中心，2002年。
- [15] 麥克風音壓靈敏度校正系統校正程序—互換法，研究報告 07-3-83-0068，工研院量測技術發展中心，2002年。