

應用水聽器陣列於充水阻抗管之吸音量測技術發展

蔡承霖^{1*} 吳柏賢*

*國立成功大學 系統及船舶機電工程學系

關鍵詞：水聽器陣列、充水阻抗管、吸音係數、三參數校正法

摘要

三參數校正法在充水阻抗管中已被證明具有優於轉移函數法和交換麥克風法的準確度，並可有效修正麥克風靈敏度、麥克風位置等誤差。然而，仍需面對一些潛在的影響因素，如平面波假設、水溫導致波速、密度變化以及實驗操作中可能出現的人為誤差，這些因素影響著測量的精確度和實驗效率。本研究致力於提升充水阻抗管測量正向吸音係數的精確度，我們嘗試調整不同的測量參數，包括測量時使用的水位高度、測量水位的方式、安裝材料的過程優化、校正週期等等，並以自由液面理論值為基準進行誤差比較。實驗結果顯示，透過調整實驗流程、改良測量方式以及其他相關設定，有助於提升測量的準確性。利用秤量重量取代觀察刻度以及選用彼此接近的水面進行校正，在半年內的 12 次的測量之中，自由液面反射係數振幅的方均根誤差達到 0.004，相位為 0.397 度。本研究期望建立一套標準量測流程於充水阻抗管試驗，供後續研究和實際應用參考。

前言

1. 研究動機

在日常人類活動中，電磁波，如光、紅外線和無線電波，廣泛應用於信息的傳輸和通信。然而在水中，由於水的吸收和散射，電磁波在水中難以長距離傳輸。相反地，聲波在水中擁有比電磁波更強的穿透力，甚至能實現全球的跨洋傳輸。因此，聲波在水下應用變得不可或缺。本研究旨在改進水中阻抗管的測量方法，以提升水中吸音材料的精確性和效率。

2. 文獻回顧

阻抗管是常用於空氣中測量聲學性質的工具。目前通過阻抗管測量吸音率的許多方式已經得到了成熟的發展，包含駐波比法和轉移函數法。

駐波比法需要向管道持續發射單一頻率波，同時在測量期間移動麥克風的位置，以測量各個位置的聲壓，並且計算材料的反射係數[3]。由於駐波比法需要移動麥克風位置，因此只能測量單一個頻率的聲波，直到麥克風移動完畢。若是要測量多個頻率則必須進行多次測量，相當耗費時間。轉移函數法不需要移動麥克風，而是在兩個固定的位置安裝兩個麥克風，並搭配數位訊號分析進行快速傅立葉轉換，最終計算得出反射係數[4]。如此一來，便可

以利用白噪音同時測量多個頻率，或是在短時間內測量多組單一頻率，因此提高測量效率。

Seybert 和 Rose 使用高斯白噪音產生隨機波，用於轉移函數法測量。結果顯示，轉移函數法不僅相較於駐波比法擁有更高的測量精度，也大幅縮短了測量時間[5]。而 Chung 和 Blaser 使用寬頻波，得到了類似的結論，並且考慮到每個麥克風的靈敏度具有差異，提出了交換麥克風用於校準阻抗管的概念[6, 7]。Seybert 和 Soenarko [8] 分析了轉移函數法的測量誤差，並認為麥克風的間距應當盡可能降低，且安裝於靠近測量面的位置。同時，降低寬頻波的頻寬可以提升精度。Bodén 和 Åbom [9] 則根據麥克風位置分析了不同情況下阻抗管的工作頻率範圍。

除了在空氣中，水中的聲學特性也受到關注。為了量測材料在水下的吸音性能，Corbett 利用充水的阻抗管取代原先的空氣阻抗管，使用轉移函數法搭配交換麥克風校正，驗證了水和空氣界面的反射係數，並分析了測量值與理論值的差異[10]。為了提高準確性與便利性，Wilson 等人參考了原本用於在空氣中用於校正樂器的三參數校正法[12]，並將其用於水中阻抗管的測量。在不需要交換麥克風的情況下，利用水與空氣介面的反射特性，消除充水阻抗管的測量誤差[13]。此後，Jones 和 Stiede 使用了偽隨機雜訊和單頻音兩種聲源種類用於阻抗管之中，結果顯示單頻音取得了較好的準確性[15]。

阻抗管實驗的基本假設是聲場符合平面波的傳播特性，這點在空氣中由於空氣與不鏽鋼的特徵阻

抗差異極大，不鏽鋼可以視為剛體，因此通常能夠滿足。然而，在水中因為水與不鏽鋼的特徵阻抗較為接近，使得不鏽鋼必須被視為彈性體，並因此對聲波的傳遞造成影響。為了將非軸向的模態納入考慮，Del Grosso 針對水中阻抗管提出了彈性波導現象的理論解，後來由 Lafleur 和 Shields 實驗驗證[16, 17]。Wilson 和簡通過比較不同壁厚的阻抗管確認了平面波理論的可行性[18, 19]，並且提出了針對彈性波導的有效波速進行校正的複數波數。在此基礎之上，董比較了水平或直立的充水阻抗管以及白噪音與單頻音兩種聲源類型對測量的影響[20]。水平的阻抗管使用交換麥克風較為方便，但是無法使用三參數校正法，容易殘留氣泡干擾無法排出且移動試片位置困難；垂直阻抗管則因為具有與軸向垂直的水面能夠使用三參數校正法，且不易殘留氣泡，安裝材料也較為方便。聲源種類方面，單頻音較白噪音具有更高的精度。

3. 研究方法

基於董昌銘的結論[20]，本研究利用垂直的充水阻抗管測量水中材料的聲壓反射係數。考慮到先前文獻中提到的測量方法和潛在影響因素，本研究通過改變測量條件並比較計算結果，為充水阻抗管試驗的測量流程建立一套標準，供後續實際應用參考。

在實驗中，利用自由水面的測量結果驗證了測量系統的準確性和重復性。為了改善阻抗管的使用效果，本研究通過選擇不同的參數設置，如水高度選擇、校準和測量之間的時間以及水位誤差等，進行了實驗，對每個參數設置進行了實驗結果的比較和討論。

理論介紹

1. 駐波比法

在進行材料聲學性質的研究時[3, 4]，討論通常涉及複數的反射係數、法向入射聲吸收係數和材料的法向聲阻抗。這些值可以通過在聲波正向入射時測量不同介質界面的入射聲壓和反射聲壓來獲得。圖 1 顯示了駐波比阻抗管的測量方式。

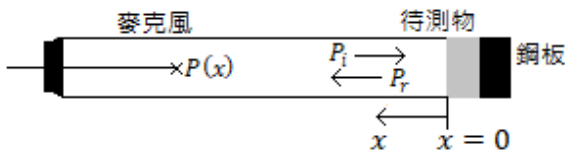


圖 1 駐波比法示意圖

假設阻抗管中聲音皆沿著軸向以平面波傳遞，只由入射波和反射波互相疊加而成，並且聲音為簡諧運動：

$$P = P_i(\omega) \times e^{i(\omega t - kx)} + P_r(\omega) \times e^{i(\omega t + kx)} \quad (1)$$

每個位置的聲壓振幅絕對值可以表示為：

$$|P(x, \omega)| = \sqrt{|P_i|^2 + |P_r|^2 + 2|P_i||P_r|\cos(2kx + \theta)} \quad (2)$$

其中 $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}(P_r/P_i)}{\text{Re}(P_r/P_i)}\right)$ 。定義駐波比 σ ：

$$\sigma = \frac{|P(x, \omega)|_{\max}}{|P(x, \omega)|_{\min}} = \frac{|P_i| + |P_r|}{|P_i| - |P_r|} \quad (3)$$

定義聲壓反射係數：

$$|R| = \frac{|P_r|}{|P_i|} = \frac{\sigma - 1}{\sigma + 1} \quad (4)$$

正向入射的聲功率反射係數

$$R_w = |R|^2 \quad (5)$$

根據能量守恆，在反射介面上，反射回聲源方向的聲功率加上繼續沿原來方向行進的聲功率會等於進入反射介面的聲功率，即：

$$R_w + T_w = 1 \quad (6)$$

對於厚度趨近於無限的材料(例如空氣和開放邊界)或是在材料背後貼上足夠厚的鋼板，可以假設從材料後方穿透出阻抗管的功率為 0。亦即，所有並未反射回聲源方向的聲音皆可以視為被材料所吸收。此時正向入射吸音率：

$$\alpha = T_w = 1 - R_w = 1 - |R|^2 \quad (7)$$

位於介面處的特定聲學阻抗可以用管中介質的聲阻抗 z_1 和 R 表示為：

$$\tilde{z}(0) = z_1 \times \frac{1+R}{1-R} \quad (8)$$

2. 轉移函數法

在聲阻抗管測量的早期階段，實驗通常使用單麥克風的駐波管原理進行。然而，隨著轉移函數法[5-7]的發展，該方法被證明較為精確和方便，因此廣泛應用於測量空氣阻抗管中材料的反射係數。該測量系統的架構如圖 2 所示：

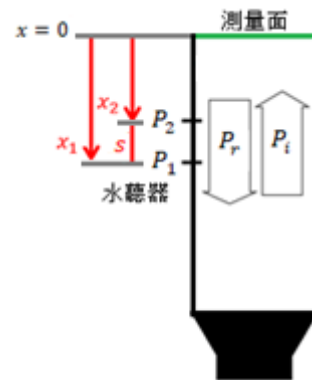


圖 2 直立式充水阻抗管示意圖

在 x_1 、 x_2 兩處安裝的水聽器，其測量得到之聲壓皆為入射波與反射波之和，即：

$$\begin{cases} P_1 = P_i e^{-ikx_1} + P_r e^{ikx_1} \\ P_2 = P_i e^{-ikx_2} + P_r e^{ikx_2} \end{cases} \quad (9)$$

轉移函數 (H) 被定義為兩個麥克風的壓力響應的複數比值，可以表示為：

$$H = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} = \frac{P_i e^{-ikx_2} + P_r e^{ikx_2}}{P_i e^{-ikx_1} + P_r e^{ikx_1}} \quad (10)$$

令反射係數 $R = \frac{P_r}{P_i}$ 帶入(10)式：

$$H = \frac{P_2(f)}{P_1(f)} = \frac{e^{-ikx_2} + R e^{ikx_2}}{e^{-ikx_1} + R e^{ikx_1}} \quad (12)$$

$$H e^{-ikx_1} - e^{-ikx_2} = R (e^{ikx_2} - H e^{ikx_1}) \quad (13)$$

將 $x_2 = x_1 + S$ 帶入(13)式：

$$e^{-ikx_1} (H - e^{-ikS}) = R e^{ikx_1} (e^{ikS} - H) \quad (14)$$

$$R = \frac{(H - e^{-ikS})}{(e^{-ikS} - H)} e^{-2ikx_1} \quad (15)$$

求得 R 後，吸音率與特徵阻抗之計算同駐波比法。

3. 三參數校正法

基於轉移函數法的概念，三參數校正法除了校正麥克風之間的靈敏度誤差和接收系統中的電路誤差外，它還考慮了在聲波在阻抗管中傳播過程中引入的振幅衰減和相位變化的誤差。

假設麥克風測得的聲壓、獲取系統獲得的電壓信號以及麥克風接收系統的靈敏度與標準測量狀態相同，兩個測量點之間的複雜電壓比被重新定義轉移函數 \tilde{H} ：

$$\tilde{H} = \frac{V_2}{V_1} \quad (16)$$

其中，兩個電壓值皆為該點聲壓乘上麥克風靈敏度 (α)，而聲壓又是入射波與反射波經由不同距離之音傳誤差因子 (β) 之加成：

$$\tilde{H} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{P_2 \times \alpha_2}{P_1 \times \alpha_1} = \frac{(P_i \beta_{i2} + P_r \beta_{r2}) \times \alpha_2}{(P_i \beta_{i1} + P_r \beta_{r1}) \times \alpha_1} \quad (17)$$

將反射係數 $R = \frac{P_r}{P_i}$ 帶入(17)式：

$$\tilde{H} = \frac{\alpha_2 (\beta_{i2} + R \beta_{r2})}{\alpha_1 (\beta_{i1} + R \beta_{r1})} \quad (18)$$

反射係數可以改寫為：

$$R = \frac{-\tilde{H} \alpha_1 \beta_{i1} + \alpha_2 \beta_{i2}}{\tilde{H} \alpha_1 \beta_{r1} + \alpha_2 \beta_{r2}} = \frac{\lambda_1 \tilde{H} + \lambda_2}{\tilde{H} + \lambda_3} \quad (19)$$

其中， $\lambda_1 = -\frac{\beta_{i1}}{\beta_{r1}}$ ， $\lambda_2 = \frac{\alpha_2 \beta_{i2}}{\alpha_1 \beta_{r1}}$ ， $\lambda_3 = -\frac{\alpha_2 \beta_{r2}}{\alpha_1 \beta_{r1}}$ ，即為一組三個校正參數。 λ 與 R 和 \tilde{H} 的關係可以表示如下：

$$R \tilde{H} = \lambda_1 \tilde{H} + \lambda_2 - R \lambda_3 \quad (20)$$

由於水/空氣界面的聲阻抗存在顯著差異，當聲波從水中正入射此面時，可以視為釋壓邊界。因此，水/空氣的反射係數可以表示為：

$$R = -1 = e^{j\pi} \quad (21)$$

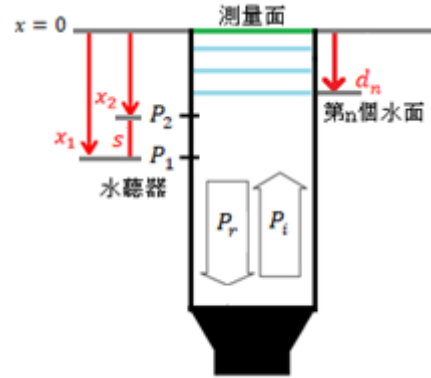


圖 3 三參數校正示意圖

在阻抗管之中選定一個固定的位置作為測量面，此時改變水面的高度如圖 3，便相當於測量一個高度 d_n 的水柱作為材料。此水柱在測量表面上的反射係數為：

$$R_n = e^{j\pi + 2jk d_n} \text{ (水/空氣)} \quad (22)$$

通過測量三個不同的已知水高度，可以獲得三組已知的 R_1 、 R_2 、 R_3 和 \tilde{H}_1 、 \tilde{H}_2 、 \tilde{H}_3 ，將式(20)重複三次以形成三個方程：

$$\begin{bmatrix} R_1 \tilde{H}_1 \\ R_2 \tilde{H}_2 \\ R_3 \tilde{H}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{H}_1 & 1 & -R_1 \\ \tilde{H}_2 & 1 & -R_2 \\ \tilde{H}_3 & 1 & -R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

經過移項，可以利用反矩陣求得 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 ：

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{H}_1 & 1 & -R_1 \\ \tilde{H}_2 & 1 & -R_2 \\ \tilde{H}_3 & 1 & -R_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_1 \tilde{H}_1 \\ R_2 \tilde{H}_2 \\ R_3 \tilde{H}_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

待 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 求得以後，測量未知材料得到 \tilde{H}_4 ，便可將四個變數代入下式(19)求得材料在指定的測量面上反射係數 R_4 ：

$$R_4 = \frac{\lambda_1 \tilde{H}_4 + \lambda_2}{\tilde{H}_4 + \lambda_3} \quad (25)$$

考慮材料厚度，如果測量時材料表面與測量面之間距離 d_4 ，則在材料表面的反射係數 R_m 為：

$$R_m = R_4 e^{-2jk d_4} \quad (26)$$

實驗方法

1. 設備架構

電腦連接到 cDAQ-9174 機箱，其上裝有信號輸入和輸出模組。輸出模組將數位訊號轉換為類比訊號，並控制一個 T-335 水下聲源，其工作頻率範圍為 3 kHz 到 7 kHz，深限為水下 600 公尺。聲壓訊號將由三個 TC-4013 水聽器接收，該水聽器在 1 Hz 到 170 kHz 的頻率範圍內有效，並能夠承受深度為 700 米以內的水壓。水聽器傳出的電壓訊號，每個通道將分別通過 EC-6081 mk2 濾波/放大器，這可以減少在我們測量範圍 (3 kHz 到 7 kHz) 之外的噪音，將

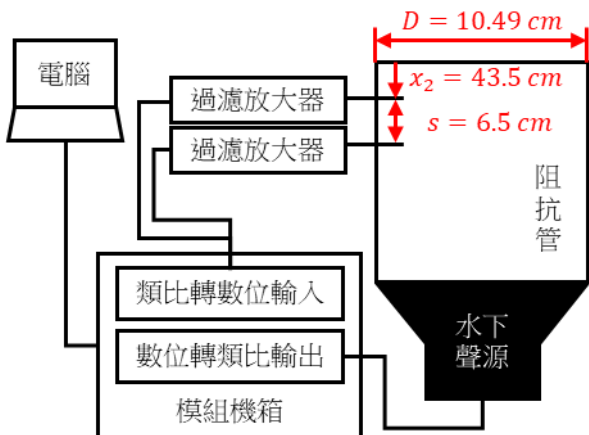


圖 4 實驗設備的架構簡圖

訊號放大，使輸入模組將其轉換為數位訊號。這兩個模組決定了採樣頻率，輸出為 51.2 kHz，輸入則是 102.4 kHz。

根據 ASTM E1050-98[21] 規範，此阻抗管的管徑以及麥克風間距，使其可以在 230 Hz 到 8379 Hz 的頻率範圍內可靠，因此在這個實驗架構中，工作頻率受到聲源的限制，即 3 kHz 到 7 kHz。

2. 量測方法

2.1 轉移函數法的測量程序

使用 LabVIEW 程式來控制輸入和輸出。對於每個選定的頻率，將發射一個 1.2 秒長的信號，然後等待 1 秒，再切換至下一個頻率。裝置將同時記錄所有 3 個通道接收到的信號並存檔。測量完成後，檔案可由 MATLAB 讀取和分析，並且依照前述方法求得反射係數。

2.2 三參數校正法的測量程序

執行三參數校正的測量需要兩個步驟：校正和測量。

在開始校正時，測量水溫並查表輸入聲速和水密度。由阻抗管上方目視確認水面位於測量面(阻抗管頂端)。發射和接收訊號以測量位於“測量面”的自由液面，由於在計算中此次測量將視為水柱高度為 0 cm，此時的水位實際上決定了接下來測量時所定義的測量面位置，若是沒有仔細確認水位位於頂部，將會導致測量材料時材料安裝的位置不等於測量面。將此次測量結果存檔後，打開閥門使水從管內流出，以此降低水位。記錄流出的水柱重量以計算水位。水面位置變化後，靜置 1 分鐘，然後再次測量。包含起始的測量面，總共測量至少四個水位之後，便可讀取其中三個水位求得校正參數 λ ，並且以第四個水位驗證本次校正的準確性。倘若節

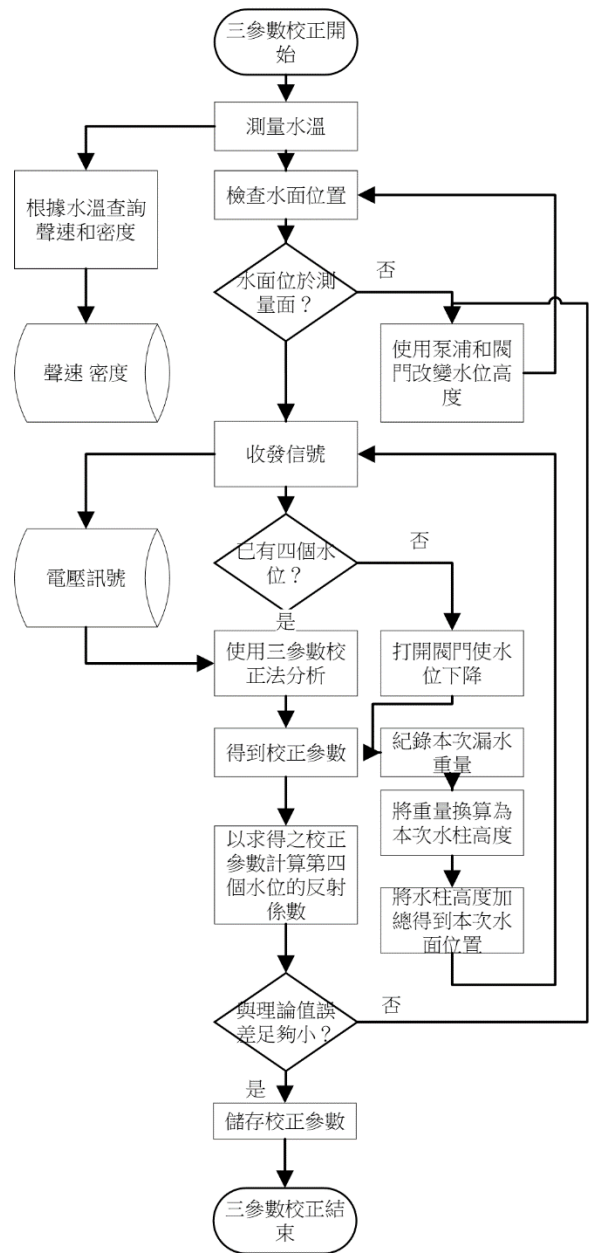


圖 5 三參數校正流程圖

果可以接受，則儲存校正參數待測量材料時使用。否則，將水位重新補滿，靜置 1 小時後再重新實驗。

在進行測量時，只能測量與校正時相同的頻率，否則某些頻率將無法獲得對應的 λ 。將圓柱狀材料黏貼在鋼板上，以確保聲音只會在管中折射和吸收，避免透射出管外而被視為受到吸收的部分。將試片與鋼板的結合體垂直放置在管子的頂部。使用泵浦從下方將水緩慢加入管中，使水位逐漸升高，直到淹沒材料，完全浸泡在水中，以避免氣泡產生。此時保持材料完全浸泡於水中，並將其蓋入管中，穿過鋼板上預留的孔將其以螺絲鎖於阻抗管上。接著，

將材料背後、測量面以上殘留的水抽乾。發射並接收訊號，並且讀取校正時所得到的校正參數測量出吸音率。為了消除隨機誤差，將材料從管中解鎖後拔起，重新加水淹沒並鎖上，然後再次測量，至少 3 次測量並計算平均值。

結果與討論

1. 自由液面重複性驗證

為驗證測量方法的可重複性，本研究量測了自由液面的反射係數，將其與理論值(絕對值 1、相位 180 度)相比對。以下數據來自於 2023 年 8 月 23 日至 2024 年 2 月 20 日之間的 12 次測量。以下圖 6、圖 7 之折線表示該頻率上 12 次測量之平均值，而垂直之誤差線表示 12 次測量的最大、最小值。圖 8、圖 9 則表示在該頻率上測量 12 次之方均根誤差。

在整個頻率範圍內進行的 12 次測量，三參數校正的振幅的方均根誤差為 0.004，相位為 0.397 度。轉移函數法的振幅的方均根誤差為 0.094，相位為 55.055 度。本實驗再次驗證了三參數校正法遠較轉移函數法精確。

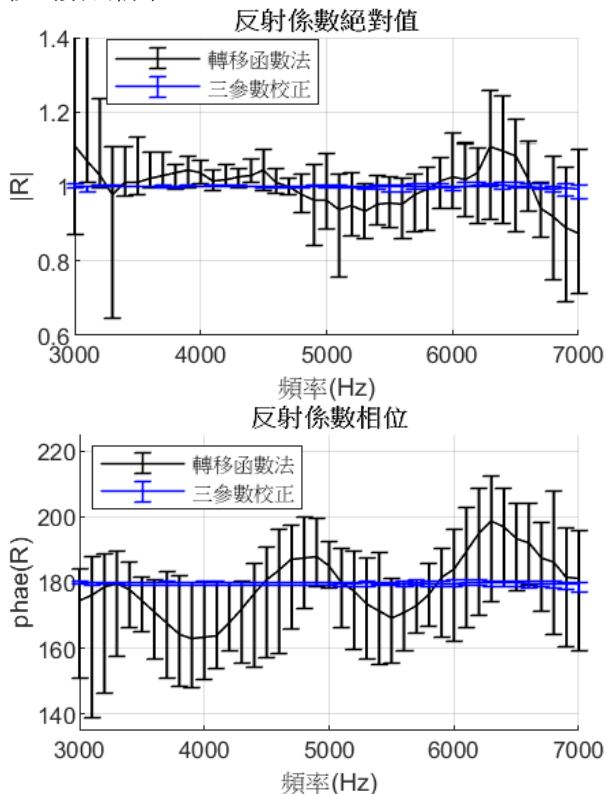


圖 6 自由液面測離結果

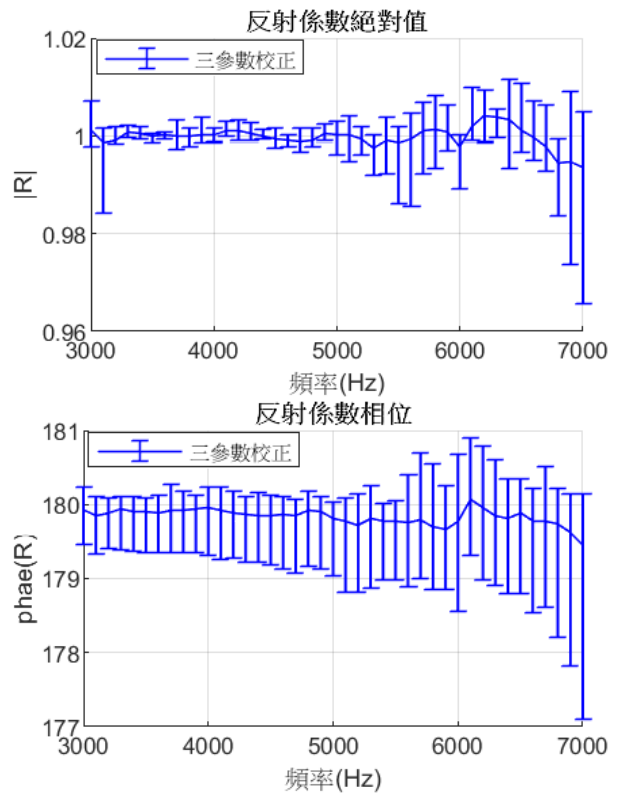


圖 7 對於三參數校正的結果局部放大絕對值誤差

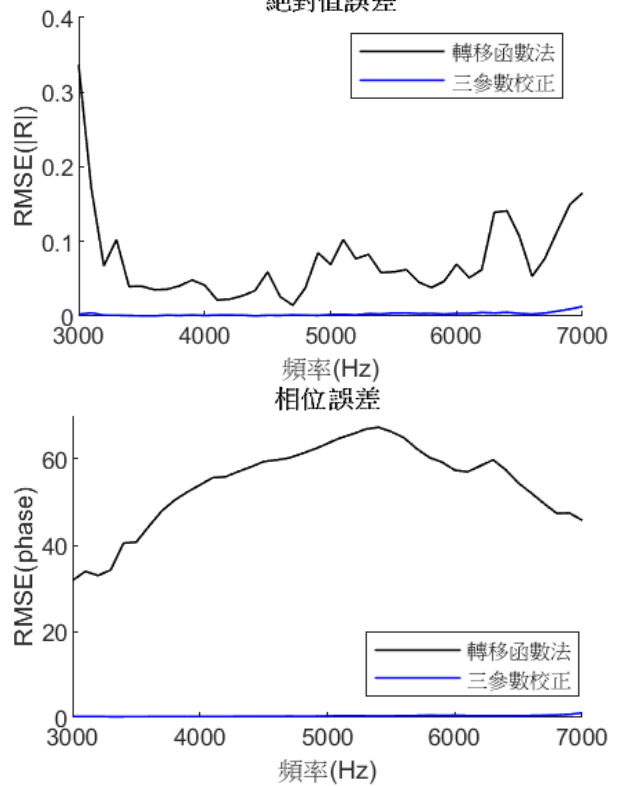


圖 8 自由液面誤差分布

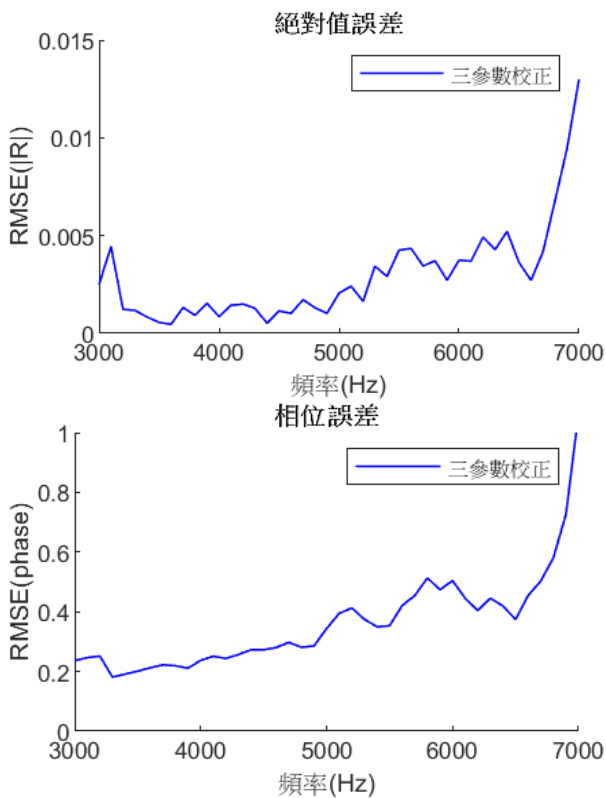


圖 9 對於三參數校正的誤差局部放大

表 1 各文獻量測誤差比較

研究者	Wilson [13]	簡志宇 [19]	董昌銘 [20]	本研究
校正方法	三參數校正	交換麥克風法	三參數校正	三參數校正
頻率範圍	5 kHz~9 kHz	1 kHz~8 kHz	2 kHz~7 kHz	3 kHz ~ 7 kHz
振幅誤差	0.02	0.1	0.02	0.035
相位誤差	0.8 deg	30 deg	4 deg	1.8 deg

註：本研究僅能從圖表上找到最大誤差加以比較。

2. 水位高度誤差

文獻[13][19][20]中都呈現出一個現象：隨著頻率上升，相位的測量值會逐漸遠離理論值。董[20]在他的研究中認為，在測量已知高度的水柱作為已知材料時，反射係數的理論值表示為 $e^{j\pi-2jkd_i}$ ，而由於水高度 d_i 與波數 k 相乘，而波數隨頻率增加，因此 d_i 的誤差也會相應增加

為了驗證這一猜想，本研究選取了 2023 年 11 月 20 日的測量結果，並且人工輸入錯誤的水位高度

數據，以探討水位高度的誤差對測量的影響。以下包含四組數據：

原始數據：依照實驗時秤量得到之水重量細算的結果。

起始誤差：在位於測量面的第一個水面增加 50 克水重量，使得計算時使用的水位高度比實際水位高度降低約 5 毫米。

系統誤差：在每一個水柱重量都增加 10 克，使得計算時每個水面的間距都比實際情況大 1 毫米。這使得水位高度的誤差隨著測量進行逐漸增加，在第四個水位的誤差達到 4 毫米。

隨機誤差：在每個水面增加 ± 5 克範圍內的隨機亂數，使得水位高度在與實際值的 ± 0.5 毫米之間隨機變動。

在以下圖 10 中，所有四組數據在振幅上完全重合；然而，相位誤差卻有明顯不同。

具有起始誤差的數據相較於原始數據幾乎沒有相位誤差，因為這同時也改變了測量表面，因此每個水柱的高度並未改變。實際上這仍是需要避免的情形，因為材料只能安裝在相對於阻抗管上固定的一個位置，但測量面卻會是由三參數校正開始時水面實際處在的高度決定。因此，在實驗開始時確定水面位於材料安裝面仍十分重要。

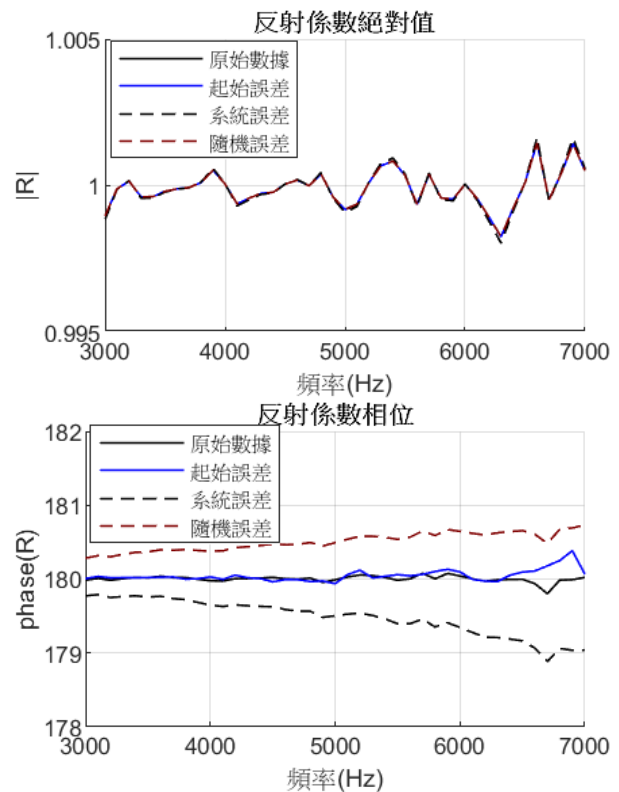


圖 10 錯誤水霧測量結果

對於另外兩組數據，每一個水柱高度都有誤差。這兩組數據都可以觀察到相位誤差隨頻率升高而增加，因此確認了隨頻率增加的誤差確實是由水位測量的誤差引起。

本實驗中使用的電子秤最小刻度是 0.01 克，根據此阻抗管的管徑 10.49 公分換算，相當於 0.0012 毫米的水柱高。前述的 5 克水重量誤差使用一般市售電子秤測量幾乎不可能發生，但是若是使用直尺、在管壁畫刻度測量高度，乃至於使用一般電子材料行販售的超音波測距，0.5 毫米的誤差是很難以避免的。因此本研究建議，應測量水的重量而非水的高度，此舉可以大幅提升測量的精確性。

3. 水柱高度探討

進行三參數校正時，改變水位的高度是關鍵步驟。為了探討如何選擇這些水位高度，本實驗比較了三次測量。三次測量分別使用 1 cm、2 cm、4 cm 作為校正時每個水面之間的距離，並且在校正完成後測量自由液面驗證精確度。

根據圖 11，較小的水位間隔可以得出更加準確的結果。由於出水量為人工控制，對於較 1 cm 更小的水位間隔難以精確把握，因此尚不得知在更小的間隔是否還能更加改善。

對於較大水位間隔會導致較大誤差的原因，有可能是水面上方空管造成與開放邊界不同的聲學特

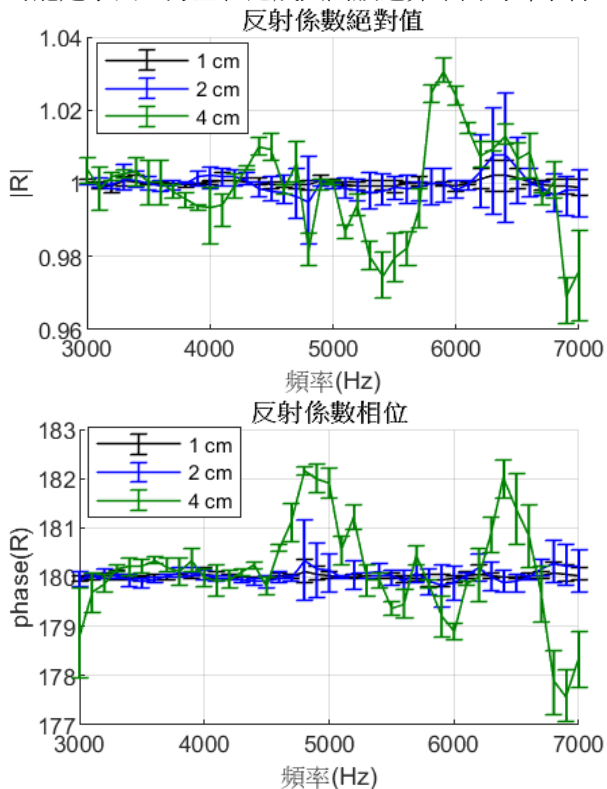


圖 11 三種間隔自由液面量測結果

性，或是因為水體的擾動和水位下降後管壁殘留的水珠。本研究進行了一次「空管靜置」實驗，此實驗開始前先將水位下降 9 cm，靜置一天，接著再以 1 cm 作為水位高度的間隔進行三參數校正。本次實驗的水位間隔是 1 cm，而當完成位置量測後，其上方殘存的空管長度與水位間隔 4 cm 時相同，為 12 cm。如果誤差是源自於空管，那麼本次實驗的結果應當於 4 cm 水位類似；如果誤差來源是擾動或殘餘水珠，那本次實驗結果應當與 1cm 水位類似。

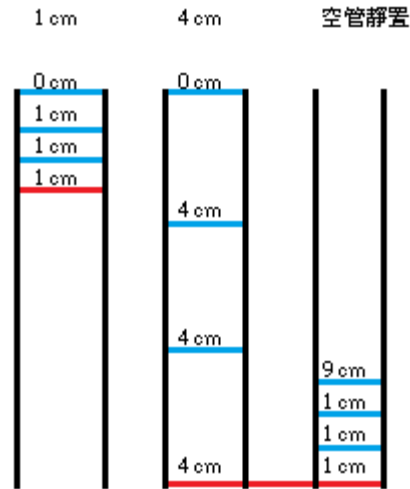


圖 12 空管靜置實驗示意圖。

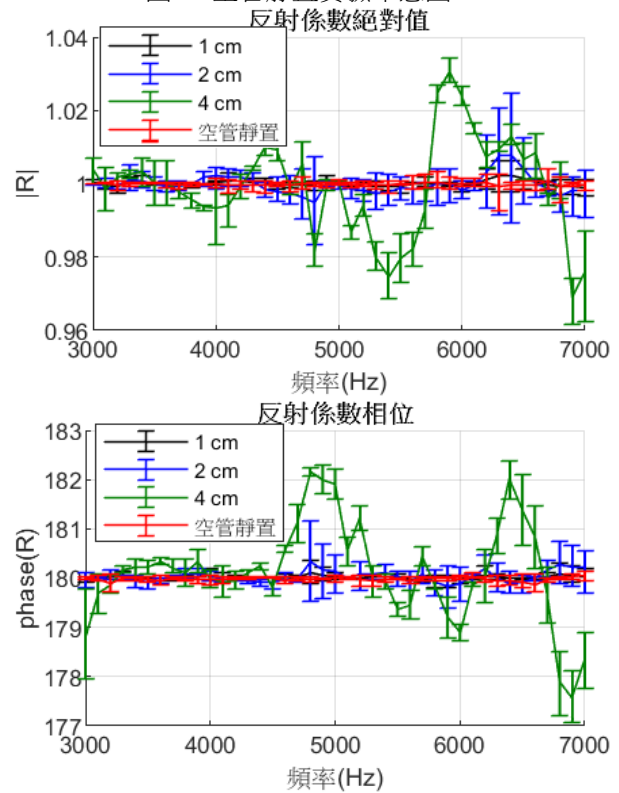


圖 13 空管靜置實驗與其他三組實驗比較。

表 2 四組實驗中，測量自由液面的方均根誤差。

方均根誤差	震幅	相位(度)
1 cm	0.001621	0.088863
2 cm	0.00529	0.248688
4 cm	0.013648	1.04972
空管靜置	0.001233	0.072233

根據圖 13 以及表 2，本實驗所得到的結果與水位間隔 1 cm 時類似。因此誤差並非來自於空管，而是來自於水珠和水體擾動。當未來設計其他充水阻抗管時，若是需要將管身延伸至測量面後方，應當不會有所影響。

4. 三參數校正週期分析

在最理想的情況下，應當於每次測量之前都進行三參數校正。如此可以確保測量盡可能精確，但會十分耗費時間以及水資源。然而，如果校正間隔過長，校正與測量之間可能實驗條件無法恆定。

在以下分析中，三組數據皆使用於 8 月 30 日測得的校正參數，用於計算不同日期的自由液面。

表 3 在三個不同的日期測量水面和相應的水溫。

日期	水溫(°C)
2023/08/14	28.0
2023/08/23	27.0
2023/08/30	27.2

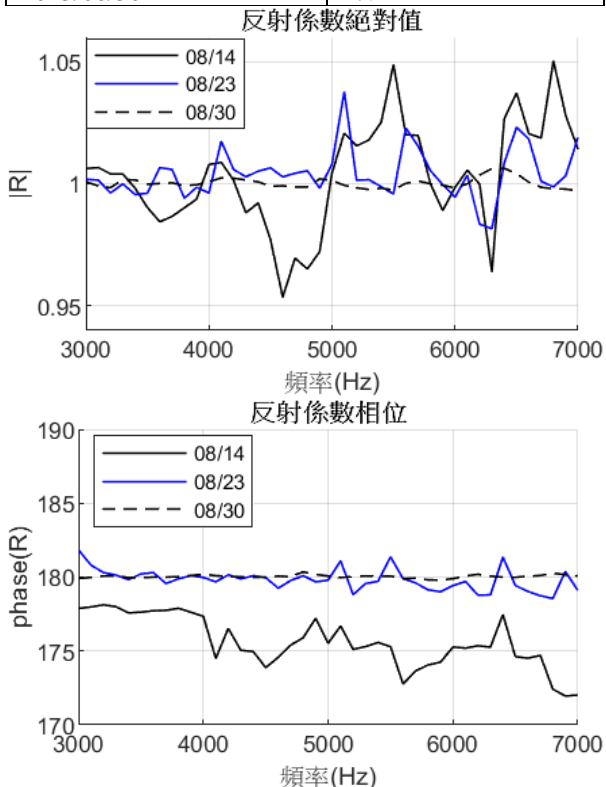


圖 14 使用不同校正參數的自由液面反射係數

使用當天的校正參數進行測量有著最好的結果。與校正相差一周的 8 月 23 日的振幅和相位都有較大誤差，但是仍維持在振幅 0.95~1.05、相位 178 度~182 度之間。與校正相差兩周的 8/23 日雖然振幅沒有明顯誤差，但是相位的偏離十分嚴重，且出現了隨著頻率上升的趨勢。根據本實驗結果，建議至少每周校正一次，若是遇上天氣的突然變化可能需要校正更頻繁。

由於實驗環境的溫度取決於外界天氣變化，目前尚無設計僅改變溫度的實驗。

結論

本研究參考 ASTM E1050-98(2006)設計直立充水阻抗管，利用三參數校正法測量材料於水中的吸音率。利用水與空氣界面的反射係數作為標準試片，本研究驗證了三參數校正法的可重複性。與轉移函數法相比，測量結果與理論值更加吻合。

透過輸入帶有已知誤差的水位高度，本研究確認了水位高度誤差對實驗結果的影響。結果表明，三參數校正對於水位量測的精度相當敏感，因此需要十分精確的測量水位。相較於使用肉眼觀察刻度，秤量重量再換算為高度是一種可以大幅提升精度的方式。

在嘗試了不同高度組合的水位用於測量之後，本研究發現，較小的水位間隔可以得到較好的結果。透過進行空管靜置實驗得知，由於水位上升下降時會造成管壁殘留水珠以及水體擾動，同一次實驗使用較大水位間隔時干擾更加明顯，而靜置、乾燥的空管的長度不會造成影響。

為了找出合理的校正間隔，本研究使用了同一天的校正參數對不同天的自由液面進行測量。當校正與測量的日期相差超過一周的時候，誤差便會十分嚴重，因此若是不能每天校正，至少一周應校正一次。

參考文獻

1. 劉金源, 水中聲學: 水聲系統之基本操作原理: 國立編譯館出版, 2001
2. W. H. Munk, R. C. Spindel, A. Baggeroer, and T. G. Birdsall, "The Heard Island Feasibility Test," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 96, pp. 2330-2342, 1994.
3. "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method," ed: ASTM International, 1998.
4. "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System," ed: ASTM International, 2006.
5. A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone

- random-excitation technique," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 61, pp. 1362-1370, 1977.
6. J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, pp. 907-913, 1980.
 7. J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, pp. 914-921, 1980.
 8. A. F. Seybert and B. Soenarko, "Error analysis of spectral estimates with application to the measurement of acoustic parameters using random sound fields in ducts," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 69, pp. 1190-1199, 1981.
 9. H. Bodén and M. Åbom, "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 79, pp. 541-549, 1986.
 10. S. S. Corbett III, "A two-hydrophone technique for measuring the complex reflectivity of materials in water-filled tubes," DTIC Document 1982.
 11. J. I. Dunlop, "Measurement of acoustic attenuation in marine sediments by impedance tube," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, pp. 460-469, 1992.
 12. V. Gibiat and F. Laloë, "Acoustical impedance measurements by the two-microphone-three-calibration (TMTTC) method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88, pp. 2533-2545, 1990.
 13. P. S. Wilson, R. A. Roy, and W. M. Carey, "An improved water-filled impedance tube," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 113, pp. 3245-3252, 2003.
 14. 周城光, 白国锋, 刘碧龙, 和 李晓东, "充水阻抗管中测量材料声学性能的校准方法研究," *声学学报*, pp. 154-161, 2010.
 15. M. G. Jones and P. E. Stiede, "Comparison of methods for determining specific acoustic impedance," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, pp. 2694-2704, 1997.
 16. V. A. Del Grosso, "Analysis of Multimode Acoustic Propagation in Liquid Cylinders with Realistic Boundary Conditions—Application to Sound Speed and Absorption Measurements," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 24, pp. 299-311, 1971.
 17. L. D. Lafleur and F. D. Shields, "Low-frequency propagation modes in a liquid-filled elastic tube waveguide," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97, pp. 1435-1445, 1995.
 18. P. S. Wilson, "Sound propagation and scattering in bubbly liquids," Ph.D. Dissertation, College of Engineering, Boston University, 2002.
 19. 簡志宇, "以注水彈性阻抗管測量材料之水中聲學特性之研究," 碩士論文, 工程科學及海洋工程學研究所, 臺灣大學, 2005.
 20. 董昌銘, "利用充水阻抗管及三參數校正法量測材料在水中的聲音阻抗," 碩士論文, 水利及海洋工程研究所, 國立成功大學, 2017.
 21. "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using A Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System," ed: ASTM International, 2006

Development of Sound Absorption Measurement Technology Using Hydrophone Array in Water-Filled Impedance Tube

*Cheng-Lin Tsai and Po-Hsien Wu**

* Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University

Keywords: Hydrophone array, water-filled impedance tube, sound absorption coefficient, three-parameter calibration method

ABSTRACT

The three-parameter calibration method has been proven to be more accurate than the transfer function method and the microphone exchange method in water-filled impedance tubes, and can effectively correct errors such as microphone sensitivity and microphone position. However, there are still some potential factors that need to be addressed, such as the plane wave assumption, the change of wave speed and density caused by water temperature, and human errors that may occur during the experiment. These factors affect the measurement accuracy and experimental efficiency. This study is dedicated to improving the accuracy of measuring the positive sound absorption coefficient in water-filled impedance tubes. We tried to adjust different measurement parameters, including the water level height used during measurement, the way of measuring the water level, the optimization of the material installation process, the calibration cycle, etc., and compared the errors with the free liquid surface theoretical value as a reference. The experimental results show that adjusting the experimental process, improving the measurement method, and other related settings can help improve the measurement accuracy. By replacing the observation of the scale with weighing and selecting water surfaces that are close to each other for calibration, the root mean square error of the amplitude of the free liquid surface reflection coefficient reaches 0.004 and the phase is 0.397 degrees in 12 measurements within half a year. This study aims to establish a standard measurement process for water-filled impedance tube experiments for reference by subsequent research and practical applications.