

超音波式流量計壓力效應研究

郭景宜¹ 何宜霖¹ 羅仁聰²

¹ 工業技術研究院量測技術發展中心

² 台灣中油公司煉製研究所

E-mail: EllyKuo@itri.org.tw

摘要

本文係就台灣中油公司煉製研究所（煉研所）氣體大流量校正實驗室使用為工作標準件之四部超音波式流量計 (Elster-Instromet/Q.Sonic-4 Series-IV QL)，研究在不同工作壓力下，流量計藉由外部輸入對應之工作流體密度來進行內部雷諾數(Reynolds, Re)等參數修正所得到之壓力效應修正效果。此四部超音波流量計係於 10 bar 壓力下追溯校正至國家度量衡標準實驗室，之後便藉由設定工作壓力對應之空氣密度來進行客戶流量計的校正工作。往例研究指出，超音波式流量計由於無被動組件，傳遞之超音波經流場速度分佈修正後應可有效反應壓力效應所造成的影響進而進行計量體積值的修正，但超音波式流量計的內部參數修正方法屬於流量計製造商的關鍵技術與商業機密，修正的效果仍須透過實測來瞭解。本研究透過一台德國聯邦技術物理研究所 (Physikalisch Technische Bundesanstalt, PTB) 所提供的 6 吋渦輪式流量計 (Elster-Instromet/TRZ-IFS G650) 為標準流量計與煉研所四部超音波式流量計分別於工作壓力 10 bar 與 50 bar 下進行比對驗證，探討此型超音波式流量計之壓力效應修正效果。研究結果顯示煉研所的四部超音波式流量計透過流體密度修改後與 PTB 的渦輪式流量計比對器差為 $\pm 0.2\%$ 以內。

關鍵詞：超音波式流量計，壓力效應，量測比對

Abstract

This paper investigates pressure effects on measurement results for four ultrasonic flow meters (USMs) (Elster-Instromet/Q.Sonic-4 Series-IV QL) served as working standards of gas flow calibration laboratory of Refining & Manufacturing Research Institute (RMRI) of CPC.

These four USMs have traceable calibration by the national flow standard at CMS at 10 bar, and then they are used to calibrate meters from customers through changing the internal density settings corresponding to the practical working pressure. The internal corrections for USMs include the corrections for Re , flow profile, and effects of gas pressure and temperature on meter body itself. The technology for internal corrections for USMs are kind of knowhow for each USM manufacturer. To find out the behaviors of these four USMs under working pressure other than 10 bar, an additional pressure test of 50 bar together with a transfer standard supported by PTB was conducted. Through comparison of the test results between these four meters and the PTB transfer standard, the performance of these four USMs operated at different working pressure conditions can be obtained. Results showed that the difference between two test pressures of these four USMs were fell within $\pm 0.2\%$, indicating great internal corrections for these USMs.

Keywords: ultrasonic flow meter, pressure effect, comparison

1. 前言

超音波流量計為近幾十年來快速發展的氣體流量計，隨著天然氣計量要求的提升，超音波流量計由於有高量測精度、高量程比 (Turn down ratio)、無壓損、無內部可動元件、安裝容易等特性，因此目前市場佔有率已占各種流量計之總量 15% 以上，而且逐年增加逐漸汰換舊式的孔板與渦輪流量計。目前超音波流量計主要分為都普勒及時間差式流量計，尤以時間差式流量計廣泛應用於氣體流量量測 [1-4]，其量測原理如圖 1 所示，係由各音軌訊號傳遞時間差求出該音軌的量測速度，再透過各音軌的權

重求得平均速度，最後再計算量測體積，數學式可寫成

$$v_{\text{path},i} = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_{AB}} - \frac{1}{t_{BA}} \right) \quad (1)$$

$$v_{\text{avg}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i v_{\text{path},i} \quad (2)$$

$$Q_V = v_{\text{avg}} \cdot A = v_{\text{avg}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3)$$

式(1)中 $v_{\text{path},i}$ 、 L 、 $\cos \alpha$ 、 t_{AB} 及 t_{BA} 分別為第 i 具傳感器量測到的流體速度、音軌 A 與 B 之間的距離，以及超音波在流場順向及逆向的接收時間；式(2)中 v_{avg} 、 N 及 w_i 分別為所有音軌計算得到的平均速度、音軌數量與第 i 具音軌於量測上所佔有的權重；式(3)中 Q_V 、 A 及 D 分別為超音波流量計量測的流體體積、流量計本體截面積與流量計本體的直徑。

式(3)計算到的流體體積為原始量，必須再透過 Re 、流場剖面如渦流角度(swirl)或對稱性(asymmetric)與環境溫度及工作壓力等使用條件的影響來進行修正，才會是最後流量計顯示的輸出值。這個內部參數修正的方法屬於流量計製造商的關鍵技術與商業機密，修正的效果仍須透過實測來瞭解。

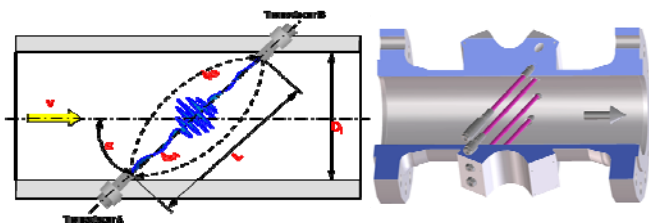


圖 1 超音波流量計量測原理

自 1980 年以來，台灣為了提升能源使用效率、落實環境保護、降低二氧化碳排放量並穩定經濟成長，改用污染性較低的天然氣作為發電燃料，且使用量持續增加。台灣中油公司為提昇燃氣電廠的天然氣計量準確度，於 2005 建置完成氣體大流量校正實驗室，並於隔年 9 月取得 TAF 認證。煉製研究所氣體大流量校正實驗室的四部工作標準件皆追溯自國家度量衡標準實驗室 (National Measurement Laboratory, NML) 之高壓氣體流量校正系統，但受限於 NML 流量標準設備的校正能量，四部工作標準

件只能在 10 bar 壓力下進行校正，之後在實際業務需求所涵蓋之工作壓力範圍，即 10 bar 至 55 bar 範圍內，係透過將流量計密度設定為對應之工作壓力下的實際空氣密度的方式來進行客戶送校流量計的校正。為了深入了解此型流量計的壓力效應以及此效應所造成之計量器差，本研究透過一台 PTB 所提供的 6 吋渦輪式流量計為標準流量計與煉研所四部超音波式流量計分別於工作壓力 10 bar 與 50 bar 下進行比對驗證，探討此型超音波式流量計的壓力效應修正效果。

2. 量測設備與方法介紹

2.1 傳遞標準件

PTB 傳遞標準件為 Elster-Instromet 公司贊助的 6 吋渦輪式流量計組件，除了流量計本體，上下游還固定有 10D、3D 之前、後直管，如圖 2 所示。法蘭磅數為 ANSI600，下游直管距流量計本體 1.5D 處配備取溫孔。此流量計於 2005 年前後分別用作 CCM.FF-5.b 與 APMP.FF-5 活動的傳遞標準件，在 PTB 與 *pigsar*TM 共同維護下於 2003 年至今持續累積完整的校正數據，如圖 3 所示。在上游前直管距入口不遠處的內部以特殊設計安裝一片固定式整流板 (Zanker)，此作法可避免組件於拆裝時因人為誤差造成整流片角度變動的問題。



圖 2 PTB 遞標準件：6 吋渦輪式流量計

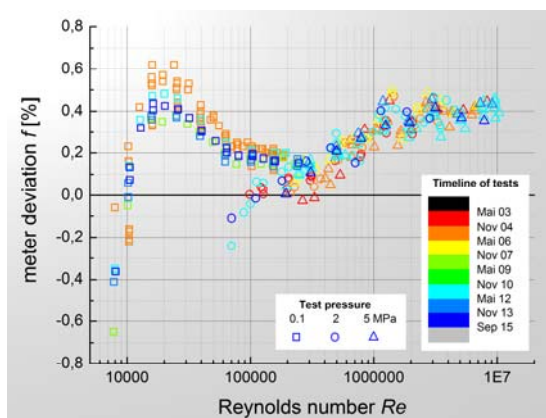


圖 3 PTB 傳遞標準件歷年校正結果
(2003 年 5 月至 2015 年 1 月)

PTB 針對這台傳遞標準件建立了一個特定的增強型模型 (Enhanced model) [5]，其器差來自於諸多參數的貢獻，第一項為流體直接撞擊流量計葉片並推動其轉動的慣性力 $f_{\text{flow_force}}$ ，基本上是 Re 的函數；第二項為流體帶動葉輪轉動時軸承產生的摩擦力 $f_{\text{bearing_friction}}$ ，軸承摩擦力主要受到軸承內潤滑劑的黏滯流動行為所影響，當此流動為層流，軸承摩擦產生的力矩 M_B 會與葉輪的轉速 ω 及流體撞擊葉輪產生的動壓呈一次方正比關係，數學式表示如下

$$M_B = k_1 \cdot \omega + k_0 \quad (4)$$

其中 k_1 與 k_0 係透過流量計製造商的實驗數據所推導得到的常數。因此 $f_{\text{bearing_friction}}$ 可表示為

$$f_{\text{bearing_friction}} = k \cdot \frac{M_B}{\rho \cdot \bar{u}^2} \approx \frac{k_1 \cdot \omega + k_0}{\rho \cdot \bar{u}^2} \quad (5)$$

其中 \bar{u} 為流量計葉輪處的平均速度。

第三項器差來源是流體行為與流體性質對流量計量測結果所造成的誤差，因為溫度是在流量計下游量測而不在流量計本體的葉輪附近，兩個量測位置處由於流體流動所造成的等熵 (isentropic) 與絕熱 (adiabatic) 壓縮過程，造成速度出現差異，進而使量測溫度無法反映葉輪處的實際溫度，此溫度差會隨流率增加而上升，同時不同氣體亦會造成不同程度的影響。此外，流體靜壓的量測也會與實際葉輪處的靜壓不同，將來自溫度與壓力量測所造成的誤差歸類為系統差異 $f_{P,T\text{-sys_dev}}$ 。縱整上述三項的器差來源，PTB 傳遞標準件的器差可寫成

$$f_{\text{turbine}} = f_{\text{flow_force}} + f_{\text{bearing_friction}} + f_{P,T\text{-sys_dev}} \quad (6)$$

2.2 煉研所氣體大流量校正實驗室

煉研所氣體大流量校正實驗室之工作標準件為四台經 NML 校正過之 6 吋超音波流量計，校正系統採用迴圈式操作的高壓氣體流量校正系統進行待校件校正，系統示意圖如圖 4 所示，空氣流體系由鼓風機 (Howden/ W-DF315L-D) 推動空氣迴圈，體積流率設定為 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 至 $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。被校區管路口徑為 6 吋至 12 吋，各工作標準件上游 10D 處裝有整流片 (NEL-plate, Spearman) 以降低氣體擾動效應造成之流場影響；管路以氣冷式高壓壓縮機 (BAUER/I22.0-22) 建壓使系統內之高壓環境達到 20-50 bar；溫度控制則由一冰水製造機冷卻管徑外緣之冷熱交換水管使管內溫度達到 $(19 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$ ；使用之溫度計 (PT 100 Ω class A) 及壓力計 (DHI/RPm4) 採用自校方式與經國家度量衡實驗室校正過之溫度計及壓力計標準件比對而算出器差，並於圖控軟體上修正差異，各流量計下游 1D 處有二支溫度計分別以 0° 與 180° 角插入管路中，透過直接與流體接觸的方式量測管路內流體的平均溫度。流量校正系統之量測不確定度經評估為 0.3% ($k=2$)，流經各流量計體積計算方法為記錄校正時間中收集到的流量計脈波累積量，再除以校正係數 K factor，即可求得體積量。校正系統的量測原理是導源於質量不減定律，意即流經標準流量計的總質量應當等於流經被校流量計的總質量，流量計依其量測輸出，可分成體積計量、質量計量、體積流率和質量流率四種方式，其校正結果的表示，可以是相對器差、器差、流量計係數或 K 係數等不同的量測參數。

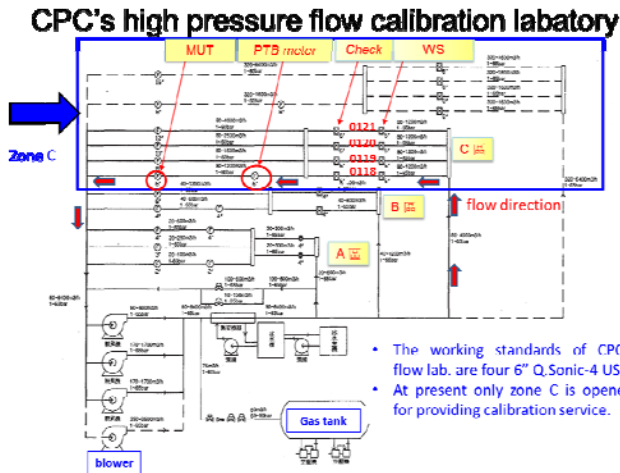


圖4 煉研所氣體大流量校正實驗室管路配置示意圖

3. 研究結果

使用PTB傳遞標準件分別於工作壓力10 bar與50 bar下進行煉研所四部工作標準件的校正，結果如圖5至圖8所示。校正結果顯示煉研所四部工作標準件皆追溯至NML的10 bar校正結果，但透過實際校正時的工作壓力所對應的流體密度來修改內部密度設定值，得到的校正器差除了圖8中編號4的工作標準件其器差稍微偏高之外，其他三台在工作流率大於0.1倍 Q_{max} 時其器差皆在 $\pm 0.2\%$ 以內。（以六吋超音波流量計而言 Q_{max} 約為1600 m^3/h ，因此對應之0.1倍 Q_{max} 為160 m^3/h 。）編號4的工作標準件於10 bar校正所得到的器差偏高是來自於標準追溯或搭配之量測儀器，如溫度計與壓力計等的問題，可透過校正來修正，而本文要探討的主要是流量計於不同工作壓力下內部 Re 修正的效果，因此需關注的焦點為10 bar與50 bar兩筆校正之間的差異。因此由圖5至圖8可以觀察到工作流率大於0.1倍 Q_{max} 時，四部流量計的器差差異皆為 $\pm 0.2\%$ 以內，顯示此型流量計可透過設定內部工作流體密度對應於實際工作壓力的動作來使用。

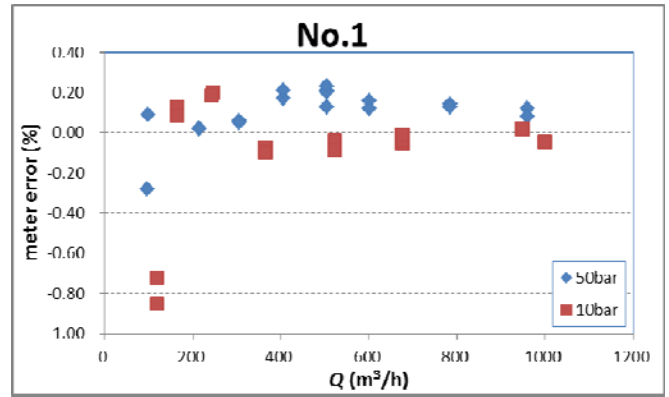


圖5 PTB傳遞標準件校正煉研所工作標準件 (編號1)

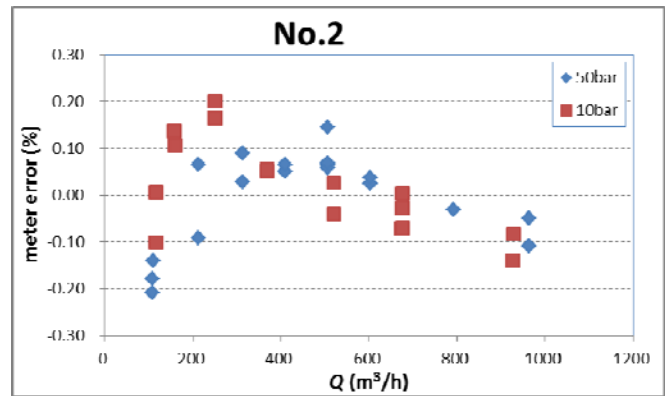


圖6 PTB傳遞標準件校正煉研所工作標準件 (編號2)

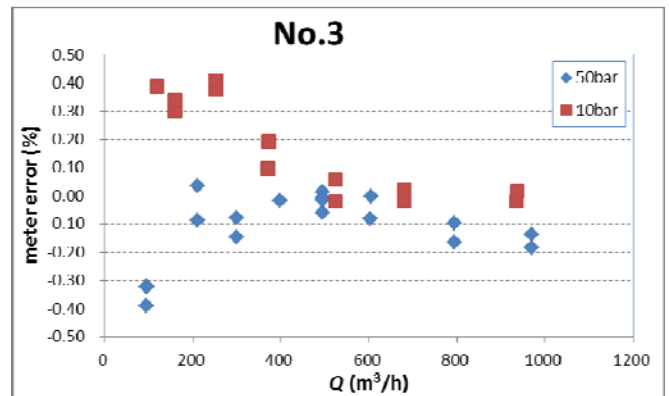


圖7 PTB傳遞標準件校正煉研所工作標準件3 (編號3)

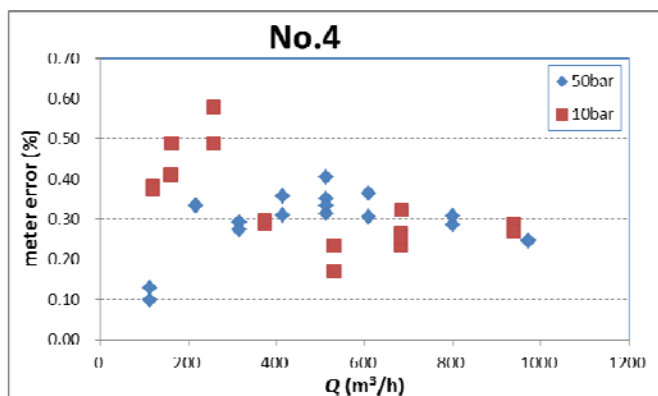


圖8 PTB傳遞標準件校正煉研所工作標準件
(編號4)

4. 參考文獻

- [1] M. Willatzen, 2001, Perturbation theory applied to sound propagation in a flowing media confined by a cylindrical wall, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.109, pp.102.
- [2] L.C. Lynnworth, Ultrasonic flowmeters for process control, Academic press, 1989.
- [3] Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas -- Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement, ISO 17089-1: 2010 International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2005.
- [4] Technical Information FLOWSIC600, Part No.: 8010125, V.2.0, Release: 2010-01, SICK MAIHAK GmbH.
- [5] B. Mickan, R. Kramer, D. Dopheide, The Linking of the CIPM Key Comparisons CCM.FF-KC5a (for Natural Gas) and CCM.FF-KC5b (Compressed Air/Nitrogen) using Model Based Analysis of the data, 14th International Flow Measurement Conference 2007: Flomeko 2007, Sandton, Gauteng, South Africa, 18 - 21 September 2007.