

多管式氣體流量計校正系統的校正方法

The Volumetric Calibration Methods of Automatic Flow Rate Calibrators

何傑

Chieh Ho

筆者服務單位的多管式氣體流量計校正系統，因經過長期使用，部分光源感測器故障，加上氣密用之水銀封環洩漏，必須更換維修，故藉此拆卸機會瞭解其內部構造並加以校正，由於中華民國實驗室認證體系 (CNLA) 對認證實驗室要求有不確定度分析，因此以氣體流量校正系統說明並分析其不確定度，提供讀者對此方面之了解，且希望本文能對從事氣體流量量測與校正工作之讀者提供參考。

The Brooks Automatic Gas Calibrator in Instrument Calibration Section is out of work after long-term use. The start-stop photocells were changed and the mercury in the mercury sealed pistons was also refilled again. This paper discussed the volumetric calibration methods of automatic flow rate calibrators and some uncertainty analysis. The operation procedure and mechanical structure of the gas calibrators were also introduced briefly. Any comments on this paper will be highly appreciated after reading it.

一、前言

在國際公制單位中有七個基本單位：分別為 1. 長度：公尺 (以 m 表示)，2. 質量：公斤 (以 kg 表示)，3. 時間：秒 (以 s 表示)，4. 電流：安培 (以 A 表示)，5. 溫度：克耳文 (以 K 表示)，6. 物質量：莫耳 (以 mole 表示)，7. 光強度：燭光 (以 cd 表示)，而流量是屬於導出單位，一般有兩種表示方法，傳統的為單位時間流過的體積，新興的為單位

時間流過的質量，因為體積會受溫度與壓力的影響，而質量卻是不變的，本文仍以傳統定義為考量，至於流量單位的表示方法，通常公制使用 LPM (litter/minute，即公升 / 分鐘)，英制為 (gallon/minute，即加侖 / 分鐘)。

流量計是量測或控制流量的儀器，一般可分為氣體或液體兩種，而液體又可因其介質不同再加以細分，如水或油等，其種類與品牌繁多，但因不在本文探討範圍故不詳述。至於其校正之原理則必須

安裝在管路上與校正系統串聯，進行互相比對校正。液體流量校正系統一般為封閉系統，以避免消耗介質，本文所述之氣體流量校正系統則為開放系統，使用氮氣為介質。

二、流量校正系統

本文所述之多管式流量計校正系統如圖 1 所示，包含兩大系統，一為標準體積之量測，另一則為時間之計算，如此即能求出流量。體積標準是使用五支精密加工的玻璃圓筒（詳如圖 2 所示），其內部直徑分別為 19 到 144 mm 不等，長度則約 1 公尺，其總體積分別為 0.2、0.45、1.2、3.5 與 12 公升。至於時間的控制係利用高壓空氣推動管內的活塞，當活塞由底部推往上部過程中，將通過一起點與終點，此起點與終點均安裝有光電感應裝置，因



圖 1. 多管式氣體流量計校正系統全圖。

活塞環之中間有一凹槽容納水銀，當水銀通過感測器時即激發計時器。起點之感測器為固定式，終點之感測器則為活動式（詳如圖 3 所示），因此每一管可以有六到十一個體積設定（不包含零點），本文所敘述的重點在介紹體積的校正與其不確定度分析。

三、體積的校正

1. 秤重法

體積的校正有許多方法，此處僅介紹兩種，一為秤重法，另一則為量測法。分別介紹如下。秤重法原理為以一標準狀態下固定質量的液體（此處使用蒸餾水）充入量筒中，可以與量筒上的刻劃比對，計算出標準體積與器示值（即量筒顯示值）的差異，在實際執行上標準狀態無法達成，因此監控環境以蒸餾水的溫度及大氣壓力等參數換算之，至

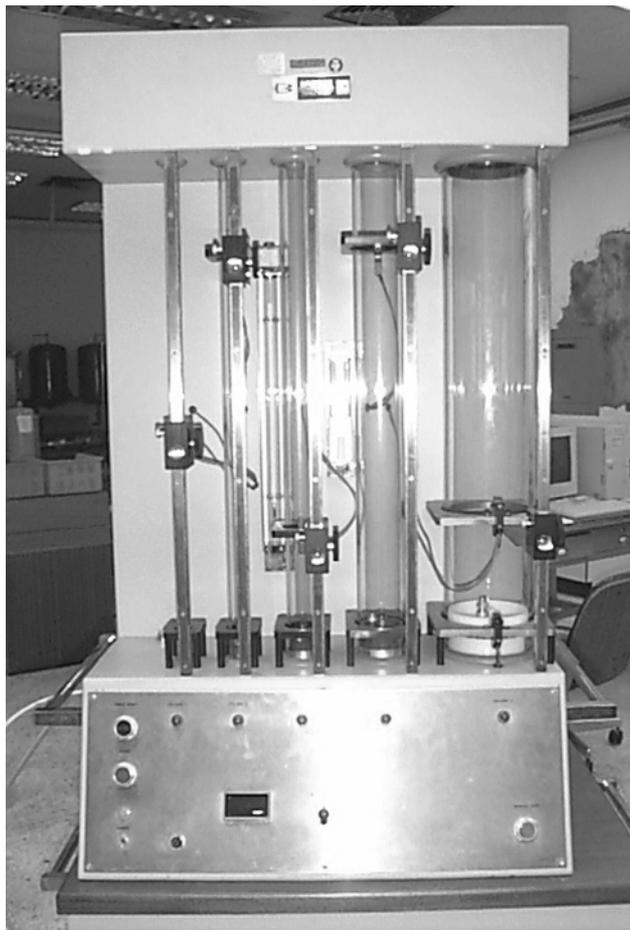


圖 2. 五支標準玻璃圓筒詳圖。

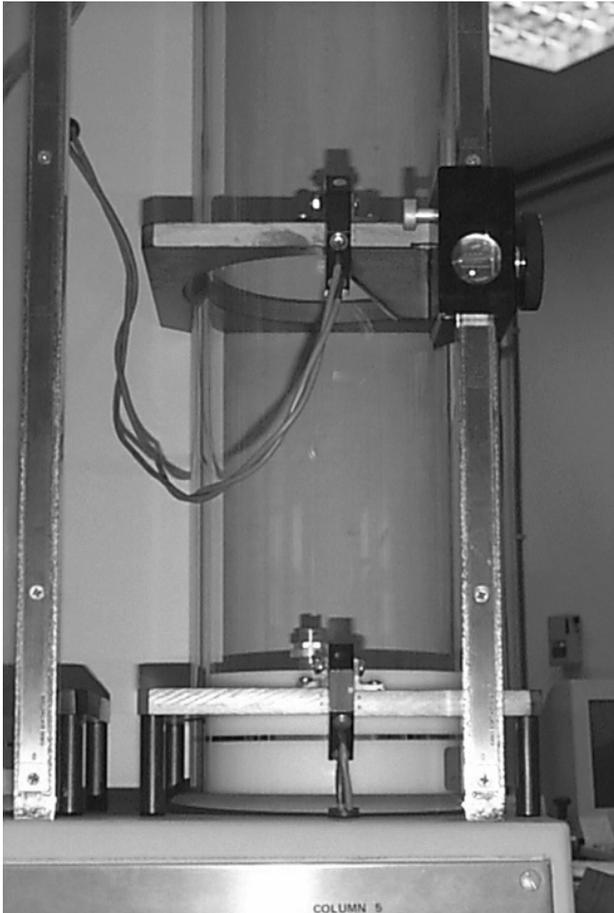


圖 3. 終點與起點之光電感測器詳圖。

於質量當然以電子秤秤之。有關重量與質量的差異，因標準重力加速度 (9.80665 m/s^2) 與量測點的重力加速度值 (實驗室測定值為 9.78870 m/s^2) 不同，但此處不予考量，此部份由本組質 / 力量實驗室執行校正。原理為透過溫溼度的監測，將水倒入量筒之中，以滴定管控制並觀察水位高度與標示刻劃切齊，再以電子秤求出加水前後之差異 (即所加之水重)，透過公式 (體積 = 水重 / 密度) 換算成體積，可求得顯示值與實際標準值之誤差。

2. 量測法

量測法原理為直接以尺寸量具將玻璃管中之內部體積量測出來，工研院量測中心⁽¹⁾ 使用三點分厘卡 (three point internal micrometer) 量測其內部管徑，本組為避免量測時傷及內壁，因此僅使用游標卡尺量測玻璃管兩端之內部直徑，並假設其尺寸變

異極小，以節省量測之工時。至於起點與終點之高度變化，則將標示刻度之表尺拆下 (共五支，每一管有七到十二個刻度線)，請本組長度實驗室執行校正，其方法為利用非接觸之三次元量床，將標示之刻線放大約五百倍，以校正其長度之誤差。

四、流量校正系統之操作原理⁽²⁾

流量校正系統之校正雖然如上述之說明，看似十分簡單，實際了解其操作原理後，就知道精確的校正並不容易。以上所述僅牽涉到兩個參數：體積與時間，實際上氣體之體積又受到溫度、壓力與種類不同之影響而有變化。爬過大山的登山客都知道，生力麵包裝袋的體積變大了，即使溫度低於山下或海平面，但是外部大氣氣壓降低，使得內部體積膨脹，所以即使是理想氣體，也會依照 $pV = nRT$ 的公式所敘述的條件來變化，此處 p 為壓力， V 為體積， n 為莫耳數， R 為氣體常數， T 為溫度 (克耳文)。

因此校正氣體流量計，除了將待校流量計安裝於校正系統之氣體管路外，其通路中必須以精密之溫度計 (玻璃溫度計解析度 0.1 度) 與壓力計 (U 型水柱壓力計) 量測通過氣體之溫度與壓力。活塞的驅動則利用高於大氣 2 到 5 英吋水柱的壓力來驅動，本組流量實驗室使用氮氣瓶，並以調壓閥控制壓力之大小，隨時提供潔淨之氮氣氣源。

活塞外圍中端有一凹槽，其外徑較玻璃管內徑略小，凹槽中灌入水銀，形成環狀氣密之液體油封，可以阻絕氣體滲出活塞與玻璃管之間隙，又由於水銀有較高的內聚力，可以使活塞緩緩上升並保持平衡。活塞頂端設計有一機械式閥門 (詳如圖 4 所示)，當活塞失控通過終點仍繼續上升時，由於玻璃管上端 (詳如圖 5 所示) 有封蓋將氣閥頂開後通至大氣，活塞即不再上升，可保護校正系統使不致於失控。

五、不確定度分析⁽³⁾

由於國際上推行 ISO 9000 系列的品質認證工作，以保證通過認證單位的工作品質，中華民國實

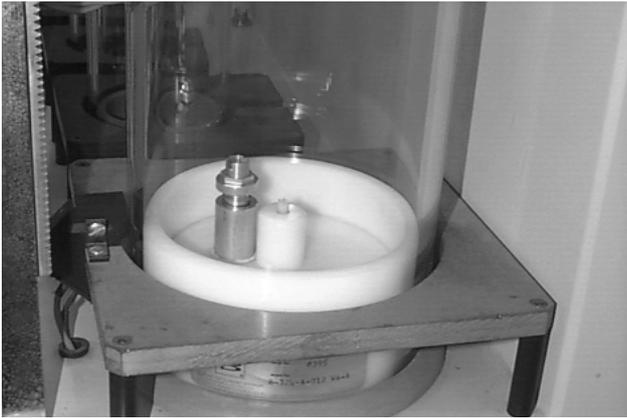


圖 4. 活塞機械閥門詳圖。

驗室認證體系 (CNLA)，為了保證實驗室的校正與量測品質，也要求針對校正系統提出不確定度分析，因此部分已在本刊 23 卷第 6 期 68 頁之「精密角度量測儀器 - 自準直儀的介紹」一文中說明，故不再贅述。為簡化不確定度分析步驟，本文僅針對體積參數之不確定度分析來進行說明，其餘參數可以以相同方式推演，流率方程式之建立說明如下。

1. 量測方程式之建立

量測不確定度評估之第一步驟應決定待測量，並建立量測之數學模式，亦即慣稱之量測方程式。依前述之流量計校正方法其方程式為：

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

其中

Q = 單位時間之流量，亦稱流率，體積 / 時間 (公升 / 分鐘, L / t)

V = 活塞由起點到終點所經過之體積 (公升, L)

t = 活塞由起點到終點之時間 (分鐘, m)

2. 不確定度方程式

依據 ISO GUM⁽⁴⁾ 對組合標準不確定度之定義如公式 (2) 所示：

$$dQ = \left[\left(\frac{dV}{t} \right)^2 + \left(-\frac{Vdt}{t^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其意義為流量 Q 函數之不確定度為針對其所有參數 V 與 t 進行偏微分後之不確定的總和，平方則是為了消除負數之影響。

保守方式亦可以直接將兩個分量之絕對值相加，其值必大於上述之平方根，如公式 (3) 所示：

$$dQ = \left| \frac{dV}{t} \right| + \left| \frac{Vdt}{t^2} \right| \quad (3)$$

由於一般流量計之校正，在流量量測範圍之兩端，例如零點與全尺度兩區將有無法執行與非線性發展之影響，因此其不確定度亦可以用量測的百分比來表示，以公式 (3) 分析比較方便，其結果如公式 (4) 所示：

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dV}{V} + \frac{dt}{t} \quad (4)$$

公式 (4) 之推演並不困難，讀者可自行演算。如果接受推論，可加入其它不確定度因素，如溫度、壓力等參數，結果將如公式 (5) 所示：

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{dV}{V} + \frac{dt}{t} + \frac{dp}{p} + \frac{dT}{T} + \frac{dx}{x} \quad (5)$$

將參數加以說明如下：

dQ/Q ：流量計流率之不確定度 (百分比, %)



圖 5. 玻璃管上方之氣體管路詳圖 (左邊中央白色圓形為玻璃管封蓋)。

Q ：流量計之流率 (公升 / 分鐘, L / m)

V ：設定之體積 (公升, L)

t ：校正之時間 (分鐘, m)

p ：氣體之壓力 (水銀柱高, mm)

T ：氣體之溫度 (克耳文, K)

x ：為其他原因 (如操作人員的經驗、情緒)

依據 ISO GUM 對組合標準不確定度之定義亦可推論如下式 (6) 所示：

$$\frac{dQ}{Q} = \left[\left(\frac{dV}{V} \right)^2 + \left(\frac{dt}{t} \right)^2 + \left(\frac{dp}{p} \right)^2 + \left(\frac{dT}{T} \right)^2 + \left(\frac{dx}{x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

3. 不確定度分項分析

將各參數之數值與最大變化量代入以上公式，即可求出公式 (5) 或 (6) 之組合標準不確定度，各參數之變異簡單分析如下。

以量測體積而言，其不確定來源有二，一為圓的面積，另一為活塞移動之距離，面積又由直徑計算而來，本文使用游標卡尺量測玻璃管內部直徑，計算出玻璃管內部之平均圓面積，再乘上高度方得到體積，因此其不確定度來自直徑與距離的量測不確定度。以上均為長度的量測，再將長度量測的不確定度來源分析之，有：(1) 追溯之不確定度，可由游標卡尺與三點分釐卡之校正報告中得知其不確定度；(2) 量測之變異，可經由多次之量測，計算出標準差；(3) 解析度，量測時可觀察到的最小讀值，此處僅略作說明，因數據資料龐大 (五個直徑，41 個長度，至少量測三次)，故不詳列。

4. 體積量測不確定度分析結果

表 1 係將量測中心、秤重法 (質量實驗室) 與量測法 (長度實驗室) 之不確定分析結果列出，體積量測不確定度 = [(器示值 - 標準體積) / 標準體積] × 100 %。

六、結論

本文旨在簡單的介紹氣體流量計校正系統 - 多管式氣體流量校正器的運作原理與校正方法，由於一般讀者對系統並不了解，因此進行不確定度分析

表 1. 量測中心、秤重法及量測法之不確定分析結果。

標稱值 (單位 C.C.)	量測發展 中心	秤重法 (質量實驗室)	量測法 (長度實驗室)
管一			
25	-	0.50	0.07
50	0.29	0.20	0.14
75	0.26	0.19	0.12
100	0.24	0.05	0.10
125	0.23	0.11	0.11
150	0.23	0.03	0.10
175	0.22	0.07	0.10
200	0.22	0.05	0.10
管二			
50	-	0.20	0.17
100	0.2	0.14	0.18
150	0.17	0.17	0.17
200	0.16	0.18	0.18
250	0.16	0.11	0.18
300	0.16	0.05	0.18
350	0.16	0.07	0.19
400	0.18	0.05	0.19
450	0.19	0.06	0.19
管三			
200	-	0.14	0.23
400	0.20	0.05	0.22
600	0.20	0.06	0.24
800	0.20	0.04	0.23
1000	0.19	0.04	0.22
1200	0.19	0.03	0.22
管四			
500	-	0.30	0.10
1000	0.12	0.16	0.08
1500	0.09	0.08	0.10
2000	0.08	0.08	0.10
2500	0.07	0.07	0.10
3000	0.07	0.06	0.10
3500	0.08	0.06	0.06
管五			
2000	-	0.09	0.05
3000	0.12	0.06	0.06
4000	0.10	0.09	0.05
5000	0.09	0.05	0.06
6000	0.08	0.06	0.05
7000	0.08	0.05	0.06
8000	0.07	0.02	0.06
9000	0.07	0.05	0.05
10000	0.07	0.02	0.06
11000	0.07	0.02	0.06
12000	0.06	0.02	0.06

時，有一定的困難度。本文嘗試將體積校正的不確定度進行簡化的分析，以便讀者瞭解，其結果並與工研院量測發展中心進行的評估報告做一比較。由表 1 可知，本組進行之秤重法與量測法比較結果，大體積的校正以秤重法為佳，僅在小體積的校正時，量測法有部分結果優於秤重法，至於量測中心，可能因方法並不相同，故結果亦與本組不同。

根據實際校正經驗與不確定度分析之結果可知，縮小不確定度的方法為：(1) 校正系統中之標準件，如體積、時間、溫度與壓力感測器必須定期校正；(2) 待校件之解析度與重複性要高；(3) 校正人員需熟悉校正程序與儀具操作，對於待校件出入口的管徑與管路的配接須有相當的經驗；(4) 實驗室環境需控制溫度 (23 ± 3 °C)、溼度 ($50 \pm 10\%$)、高壓氣源之壓力與大氣壓力等條件於規定範圍內；(5) 瞭解待校件實際使用之氣體種類、環境溫度與施用壓力，如不相同，須注意轉換；(6) 最後加上品保方案、技術與經驗的累積，方可達到最小的不確定度。

參考文獻

1. 編號：07-3-86-0094, 氣體流量管式校正器系統評估報告, 邱國銘等四人, 中華民國 85 年 11 月 07 日, 工業技術研究院量測技術發展中心.
2. *Installation And Operating Instructions: Automatic Flow Rate Calibrators Multi-Tube Model 1050*, Brooks Instrument Division, Jan. Issue 2 (1984).
3. 量測不確定度實務研討會 (基礎篇), 中華民國計量工程學會 (1998).
4. *ISO Guide (A Guide to the Assessment of Uncertainty in Measurement)* 第一版 1995 第二版亦稱 ISO GUM (1993).

何傑先生為美國壬色列理工學院機械博士，現任中山科學院系統維護中心儀具校正組技正。

Chieh Ho received his Ph.D. in mechanics engineering at Rensselaer Polytechnic Institute. He is currently an associate scientist in the Chung Shan Institute of Science & Technology.