

管理用水量計線上校驗方法之個案研究

李丁來¹、李宗坤²、陳郁仁²、陳添榮³、陳逸正⁴、楊正財⁵

摘要

台灣自來水公司為供輸配水與調度之需要，於全省各區處送水幹管與分支管線裝設管理用計量表，囿於地形區域之限制，造成水量計安裝位置可能不適當，使流量之計量產生偏差，本研究係藉由苗栗伯公坑計量站現況之評估，提供配管改善方案，以提昇計量之準確度。

伯公坑計量站之超音波流量計裝設在 DN800 旁通管線上，經由電腦流場模擬結果，發現流場分佈不適宜測速型流量計之計量，有必要重新選取適當位置。改善方案為計量管線選定在現有備用主管線 DN1200，再縮管至 DN600。現地開挖後量測實際管長，可用的 DN600 直管長度僅 14.85m (24.75D)，水量計安裝位置訂在漸縮管下游 10.8m(18D)處。另以插入式渦輪流量計作為查核參考件，其安裝位置訂在水量計下游 DN600 直管 1.65m 處以及後三通管下游主管線 DN1200 之下游 50m 處。參考點在下游 DN1200 實流測試結果，間接比較原 DN800 超音波流量計與新電磁流量計之計量，驗證原超音波流量計之計量偏高約 6.6%，參考點在 DN600 處，電磁流量計之量測值則較查核流量計高約 3%，在可接受之範圍，顯示改善方案可行。

關鍵字：水量計校驗、電腦流場模擬、插入式渦輪流量計、計量誤差

作者：1.台灣自來水公司供水處工程師兼組長 tinlai@mail.water.gov.tw 40425 台中市北區雙十路二段二號之一

2.台灣自來水公司供水處工程員

3.台灣自來水公司供水處技術士

4.台灣工業技術研究院量測中心流量研究室工程師

5.台灣工業技術研究院量測中心流量研究室主任

一、前言

1.1 研究緣起

自來水公司的供水計量，除了終端用戶直接使用水量度數的量測之外，尚包含原水的計量，以作為加藥用量之依據；也需對淨水場輸送出去的清水總量(即生產水量)計量，作為營運成本管控之參考數據。而由於台灣島地形關係，南北各地下雨量、溪流、可興建水庫之處及其儲水量等不一，極易發生地區性缺水；當某地區缺水時或無水庫區域，水公司就須由相鄰地區調撥水量，此亦成為常態性的供水管理。目前台灣自來水公司在全省的管理處分為十二個區管理處實施責任中心制度，各區處分別計算管銷成本，調撥水量之正確計量亦受到各區處重視。

而台灣自來水公司戮力投入檢修漏作業，提昇用水效率，舒緩水源開發壓力，並改善水表計量，加強查察竊水，提高用戶抄見量，截至 2008 年之售水率 70.0%，其中有效不計費水量率依據歷年經驗約佔 7%。其差異原因不外乎生產水量與銷售水量之計量不準確、漏水、被竊水，因此提升售水率實為供水管理的重要指標。有鑒於此，本研究乃探討受限於安裝場地環境限制，致水量計易受流場效應影響，而不能正確計量者，進行個案研究，以建立適當的相關作業規範，以提升供水管理計量之準確度。漏水率為自來水事業供水管理良窳的重要指標，其正確性有賴生產水量與銷售水量數據，達到一定程度之準確性，因終端用戶直接使用水量度數的量測，係由自來水事業每月或隔月抄表收費一次，其銷售水量數據值較客觀的評估漏水率。台灣自來水公司各區管理處為生產水量及供、配水調度之需要，於區處轄管區域內淨水場送水幹管與分支管線裝設管理用水量計，囿於地形區域之限制，造成水量計安裝位置可能不適當，使流量之計量產生偏差，本研究係藉由苗栗伯公坑計量站現況之評估，提供配管改善方案，以提昇計量之準確度。

1.2 研究主旨與內容

本研究為擬藉由台灣苗栗伯公坑計量站現況之解析與改善，探討管理用水量計線上校驗方法，以提昇水量計計量準確之可信度，研究內容如下：

- (一)、就個案水量計之安裝現況，辦理電腦流體動態模擬與裝置效應評估。
- (二)、依前項評估結果提出流量計安裝現況改善建議書，據以辦理改善施工，並於改善後之水量計及安裝管路進行水量計線上校驗與方法驗證，並提出標準作業方法，以完成準確度之校驗。

二 研究方法與實驗設備

2.1 研究方法

2.1.1 個案分析與模擬

- (1)伯公坑計量站現況調查評估，包括管線配置尺寸之訪查、未來流量需求、水量計型式與運轉之相關資訊，評估是否符合該型流量計準確度之需求。
- (2)依目前配置尺寸之現況建立模型，以過去最低、現在、未來擴充等三種流量需求條件，進行初步 CFD 分析，當管線配置改善建議方案完成之後，重新建立模型，

相同流量條件，再進行 CFD 分析。確認安裝位置點之流場條件，也是確認管路設計之原則與可行性。

(3)數值計算方面使用 CFD-ACE+ 為計算分析工具，此計算軟體主要架構為:

- a. CFD-GEOM: 此為幾何形狀及格點產生程式，檔案為CFD-DTF可讀取的資料檔案。
- b. CFD-GUI: 此程式為前處理圖形介面程式，主要提供CFD-ACE流場計算所需資料。
- c. CFD-ACE: 此程式用來做流場模擬計算。
- d. CFD-VIEW: 將計算所得到資料用二維或三維的圖形展現，同時分析其計算資料。
- e. CFD-DTF: 此為資料傳遞程式，使用者可用此程式增加特定的功能。

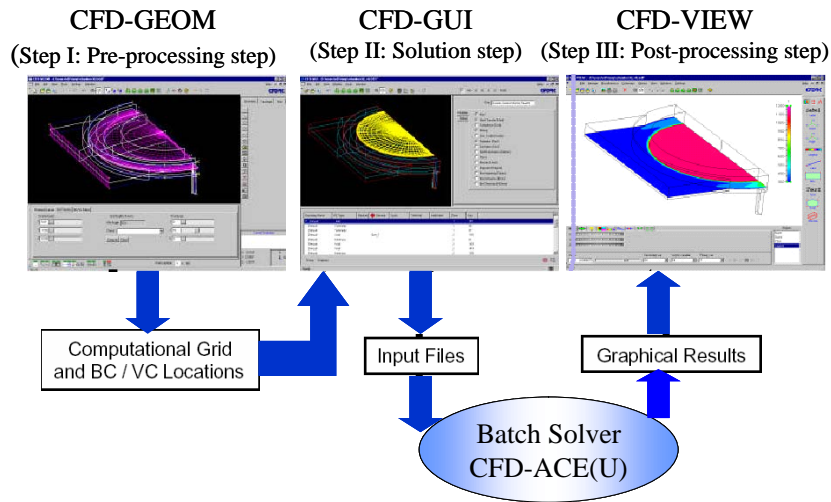


圖1 CFD-ACE+計算軟體主要架構

2.1.2 改善工程

- (1) 就管線配置改善建議方案，交發包施工，並採購或調撥必要之設備。
- (2) 施工階段，派員協助監督，確保承包商按設計圖施工，使流量計配置正確。

2.1.3 線上校驗技術建立

- (1) 蒐集已商用的插入式流量計的種類，及其操控計量方式。
- (2) 搜尋並詳研插入式檢測之 ISO 標準，包括 ISO 3966、ISO 3354，與國際上已發表之相關論文，參考已有之經驗。
- (3) 決定插入位置點，依測試管徑，以採用 5 點(半徑內路徑)與多點等間距為主，商用品設定的位置為輔，如 1/4 D 與 1/8 D 處。
- (4) 製作測試用短管，兩端法蘭為活動式，方便於改變插入方位。
- (5) 在臺灣工業技術研究院量測中心實驗室大水流量標準系統實際測試驗證，瞭解插入式流量計的特性，決定流量計 K 係數。
- (6) 在伯公坑改善後管線實測，確認現場操作方式與步驟，作為線上檢測 SOP 規範之依據。並進行線上流量計之校驗，確認此校驗方式沒有問題。

2.2 實驗設備

2.2.1 流量校正系統

使用台灣工業技術研究院量測中心流量研究室之大水流量校正系統，提供水流之標準流率。採用標準流量計比較法，以系統原有之查核流量計作為標準件，其型式為渦輪式流量計，廠牌：DANIEL。

2.2.2 線上檢測流量計

使用插入式渦輪流量計，作為線上檢測之研究驗證用，其廠牌/型式為EMCO/Turbo-Bar TMP600，此型規格為準確度 $\pm 1.0\%$ 、再現性 $\pm 0.25\%$ 、量測流速 0.5 m/s 至 9 m/s、流率範圍比 35:1、適用管徑：3" to 80" (80 mm to 2000 mm)、插入位置：1/4 D (12"及以上)、1/2 D (小於 12")。



全型圖



葉輪轉子正面圖



葉輪轉子側面圖

圖 2 EMCO 插入式渦輪流量計外觀

2.2.3 流場實測驗證裝置

使用雷射都卜勒測速儀(LDV)裝置，作為流場實測之驗證裝置。

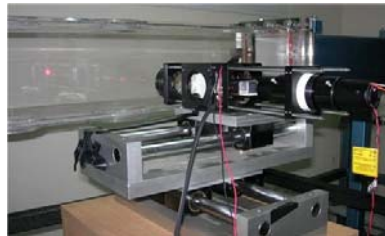


圖 3 雷射都卜勒測速儀裝置

三、研究結果與討論

3.1 伯公坑計量站現況調查

伯公坑計量站水量計安裝位置之管路配置，配水主管線為 DN1200，轉至旁通管 DN800，水量計上下游均安裝蝶閥。管線示意如圖 4 所示，因管線埋於地下，僅能約略測量配置尺寸，現況與實測尺寸如圖 5 所示，將實測尺寸作為 CFD 模擬依據。

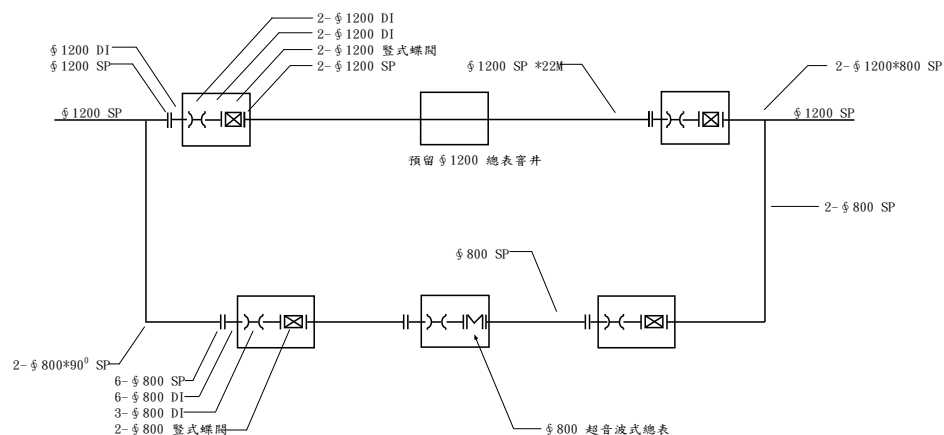


圖 4 伯公坑 $\phi 800$ 總表既設管線窰井配置

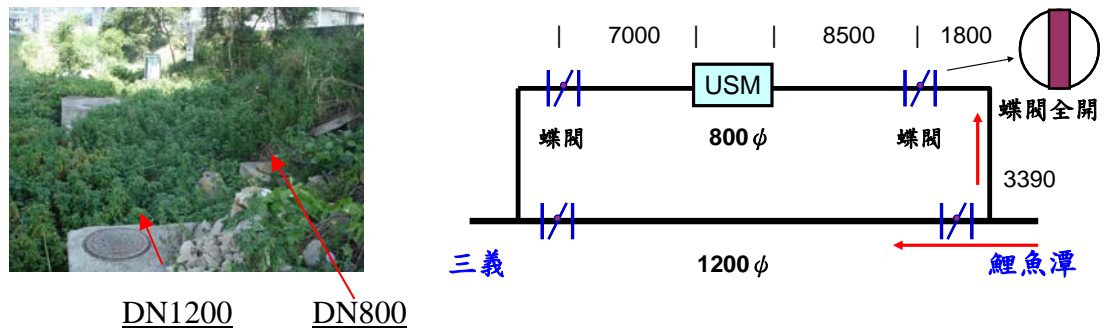


圖 5 伯公坑 $\phi 800$ 總表現況與實測尺寸

計量站總表前後裝設蝶閥，屬於全開全關之操作，至於流量的調節，則以下游伯公坑加壓站泵浦的啟動操控支援的配水量。現場實測值為瞬間 $3200 \text{ m}^3/\text{h}$ ，總量約 $72,000 \text{ CMD}$ (m^3/day)，近一年來最低約為 $51,000 \text{ CMD}$ ，預計未來將增加 $80,000 \text{ CMD}$ 。

水量計之廠牌/型號為 Danfoss/ Sitrans F US SONOFLO 雙軌式時間差超音波流量計，口徑 DN800，感測器為 SONO 3300，指示記錄器為 SONO 3000，超音波水量計廠商稱流速大於 1 m/s 以上時，器差約在 $\pm 0.5\%$ 。依流量計工作原理，流速愈快則時間差愈大，愈能測準確，故應操作在高流速區域。然依瞬間流率推算流速約為 1.77 m/s ，而最近一年最低流率推算流速約為 1.17 m/s ，處於低流速區，其誤差可能比廠商宣稱者為大。而且由參考條件可知其直管長度需在 $20 D$ 以上，若低於此長度，亦可能增加量測誤差。流量計構造圖與現場安裝如圖 6 所示：

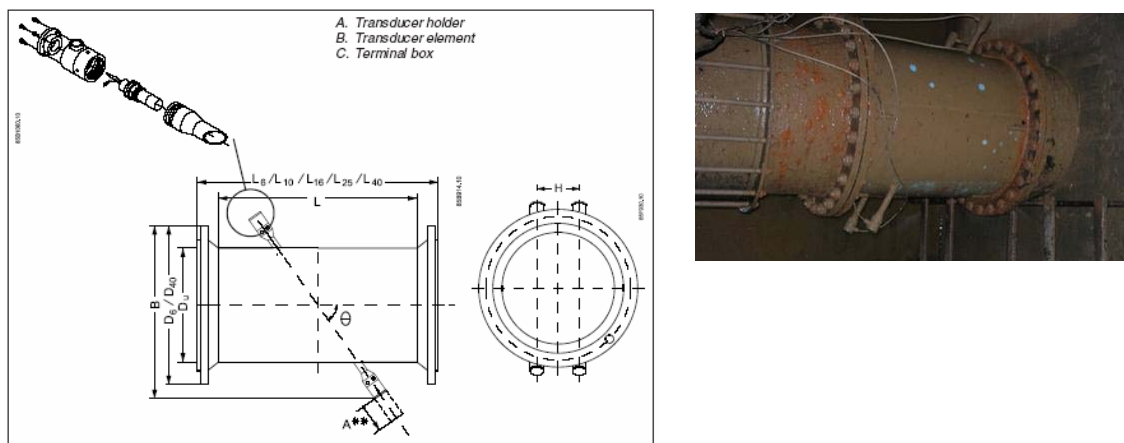


圖 6 雙軌型時間差超音波流量計構造與外觀

3.2 電腦流場模擬之模型建立

模擬流量分(a) $3200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.768 m/s)，(b) $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ (2.210 m/s)，(c) $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.216 m/s)，擷取流速數據之位置(a)經過蝶閥下游長度 2 m ，(b)經過蝶閥下游長度 5.4 m ，(c)經過蝶閥下游長度 8.5 m —流量計安裝位置，(d) 經過蝶閥下游長度 16 m 。以實測尺寸，出水管路之配置圖建立如圖 7，模擬插入方位之水流前進正視之截面如圖 8，插入方位分為 0° 、 90° 、 180° 、 270° 等處。

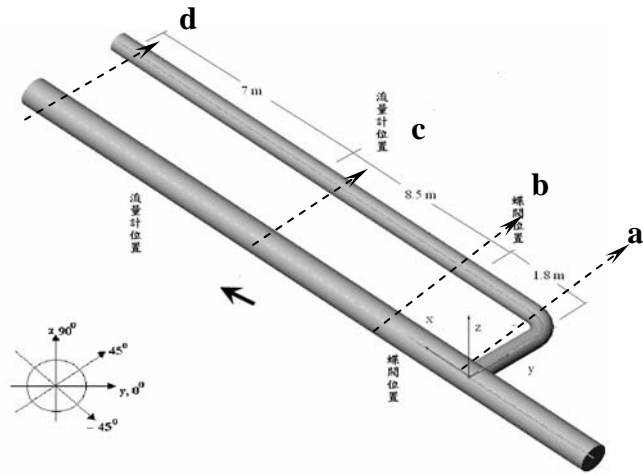


圖 7 DN800 水量計模擬示意

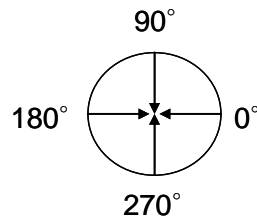


圖 8 模擬插入方位之水流前進正視截面

3.3 現況之電腦流場模擬結果與討論

3.3.1 圓管內軸向速度流場分佈

於 DN800 的 90°彎管出口後，由於有蝶閥本體之限制，類似整流板，使中間垂直方位之流速較低，蝶閥下游圓管內軸向速度流場分佈圖如圖 9 所示，流量為 3200 m³/h 時之速度流場分佈與速度曲線分佈如圖 10、圖 11 所示。

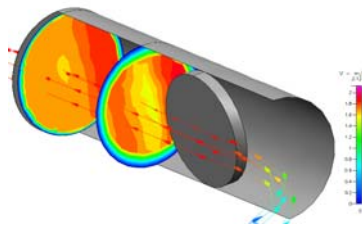


圖 9 蝶閥下游圓管內軸向速度流場分佈

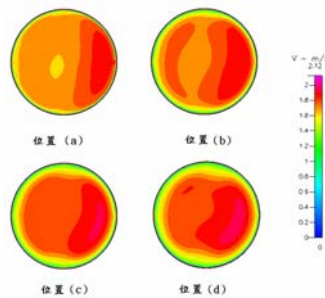


圖 10 圓管內(a)、(b)、(c)及(d)之軸向速度流場分佈圖

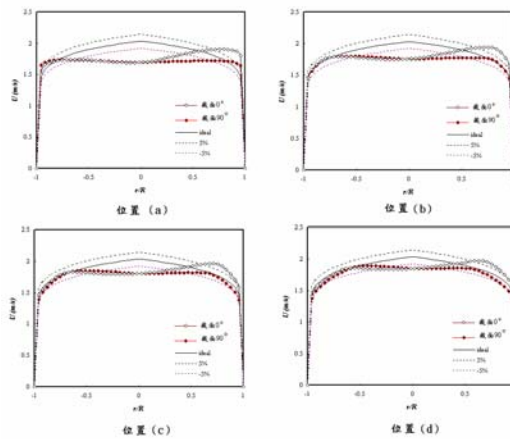


圖 11 圓管內(a)、(b)、(c)及(d)軸向速度曲線分佈

由位置(a)之軸向速度可發現通過蝶閥後流場最大速度分別在兩側附近，而受到傾斜彎管影響下，而以右外側軸向速度最大(約 1.7 m/s)分佈在 $r/R=0.7$ 附近位置，位置(b)經由 5.4 m 後發現右外側軸向最大速度位置移至圓管 $r/R=0.67$ 附近，而在全開蝶閥影響下，圓管中心附近軸向速度來不及發展全流，速度均較緩慢，然而流至位置(c)時，隨著管壁黏滯力影響下，兩側較快的軸向速度均會向圓管中心附近發展，但軸向速度分佈仍為非對稱流場，而位置(d)軸向速度仍未發展成全展流場，此外流場觀測在此位置範圍並沒有明顯渦流產生(Swirl)。圖 11 為對應圖 9 之圓管截面 0° 及 90° 之軸向速度曲線圖；圖中之實曲線為管流在完全發展狀態下之速度分佈，是取直管長度 $28D$ 時之速度為參考依據，虛線為完全發展管流速度分佈的 $\pm 5\%$ 包絡曲線，為 ISO 5167-1 中流量計量測時之流場分佈容許範圍，由結果可知蝶閥下游流場在圓管截面 0° 角度及 90° 角度之軸向速度曲線大部份曲線分佈均未能在完全擴展流 $\pm 5\%$ 之範圍內；故流量計量測時，會受複雜且非對稱流場而影響流量準確性。

流量為 $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ 時之速度流場分佈與速度曲線分佈圖如圖 12、圖 13 所示，流量為 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ 時之速度流場分佈與速度曲線分佈圖如圖 14、圖 15 所示。

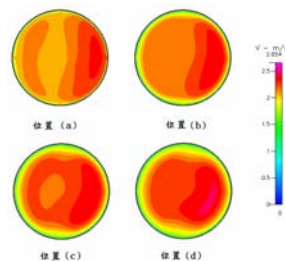


圖 12 位置(a)、(b)、(c)及(d) 圓管內之軸向速度流場分佈圖

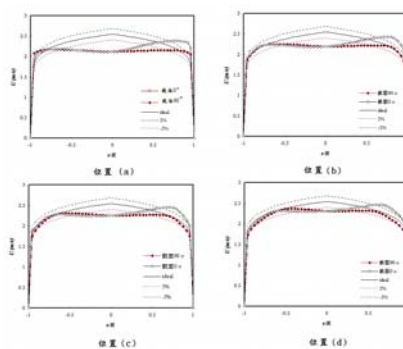


圖 13 位置(a)、(b)、(c)及(d) 圓管內軸向速度曲線分佈圖

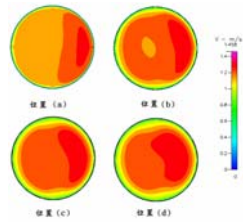


圖 14 圓管內(a)、(b)、(c)及(d)之軸向速度流場分佈

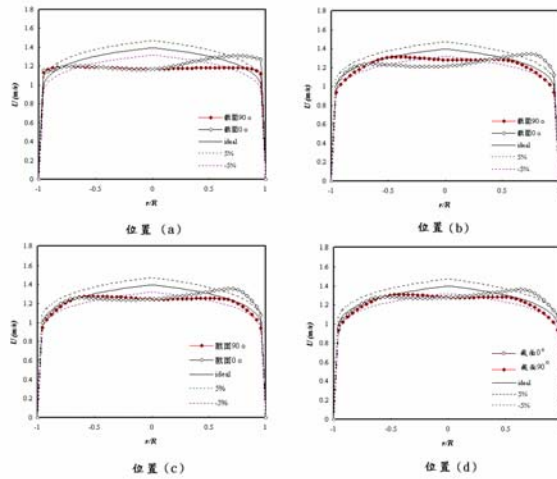


圖 15 圓管內(a)、(b)、(c)及(d)軸向速度曲線分佈圖

於流量計安裝處(c)，由圓管不同方位 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 等，擷取 log-linear 位置點之流速比較，藉由數值的顯示，可以對不對稱流場更有概念。以雙軌式超音波流量計之計量，此不對稱流場也會導致較大的誤差。其模擬流量為 $3200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.768 m/s)、 $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ (2.210 m/s)、 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.216 m/s)時之器差情況如表 1a、1b、1c。

表 1a 模擬流量為 $3200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.768 m/s) 之器差 單位：m/s

位置(r/R)	離管壁(m)	圓管 0°	圓管 180°	圓管 90°	圓管 270°
0.9620	0.015	1.713	1.557	1.414	1.407
0.8470	0.061	1.971	1.827	1.666	1.664
0.6950	0.122	1.910	1.820	1.857	1.827
0.5658	0.174	1.847	1.807	1.854	1.824
0.2776	0.289	1.821	1.813	1.825	1.815
平均		1.852	1.765	1.723	1.707
器差(%)		4.75	-0.20	-2.56	-3.45

表 1b 模擬流量為 $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ (2.210 m/s) 之器差 單位：m/s

位置(r/R)	離管壁(m)	圓管 0°	圓管 180°	圓管 90°	圓管 270°
0.9620	0.015	2.151	1.912	1.739	1.741
0.8470	0.061	2.462	2.283	2.095	2.081
0.6950	0.122	2.384	2.254	2.327	2.283
0.5658	0.174	2.305	2.305	2.318	2.279
0.2776	0.289	2.273	2.261	2.281	2.267
平均		2.315	2.203	2.152	2.130
器差(%)		4.73	-0.34	-2.65	-3.63

表 1c 模擬流量為 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ (1.216 m/s) 之器差 單位：m/s

位置(r/R)	離管壁(m)	圓管 0°	圓管 180°	圓管 90°	圓管 270°
0.9620	0.015	1.172	1.065	0.962	0.957
0.8470	0.061	1.360	1.260	1.144	1.142
0.6950	0.122	1.319	1.258	1.281	1.261
0.5658	0.174	1.277	1.249	1.282	1.260
0.2776	0.289	1.259	1.254	1.262	1.255
平均		1.277	1.217	1.186	1.175
器差(%)		5.07	0.12	-2.43	-3.35

3.4 伯公坑計量站計量改善

就伯公坑DN800 超音波流量計之安裝位置，經過電腦模擬評估，確認其流場條件將會造成量測誤差，需進行改善，改善方案乃依地點、流速、數值模擬結果、及流量計型式等加以綜合考量擬定，茲分析如下：

1. 裝設 DN1200 蝶閥搭配兩段式漸縮管且流量計安裝於直管下游 20D 或 23D 處，或裝設 DN600 蝶閥且流量計安裝於直管下游 23D 處，或裝設 DN1200 蝶閥搭配單一漸縮管且流量計安裝於直管下游 18D 處，均為可行之方案。
2. 再依管線現況配置，選用原有的 DN1200 蝶閥，可節省備料與施工之工期，並且可在不停水狀況下施工。
3. 上游蝶閥為 DN1200，流量計裝設位置建議於 DN600 直管下游 12 m (20D)處。
4. 建議流量計種類選用電磁式，口徑 DN600。其傳訊盒應選購密封良好等級，建議用防水等級 IP67 以上者，可避免溼氣進入盒內，影響計量功能。
5. 插入式流量計安裝位置，如果僅與改善後 DN600 流量計比對，則插入孔位置於流量計下游 3D 處，可與管路改善工程一併施工。如要與原來 DN800 流量計比對，則其位置需在三通管 DN1200×800 之前至少 5D 處，或是下游至少 30D 處。

根據原設計圖尺寸、上述研判結果與分析數據，建議管路配置如圖 16a，現地開挖後，實際直管長度不足，計量區配置修正如圖 16b。

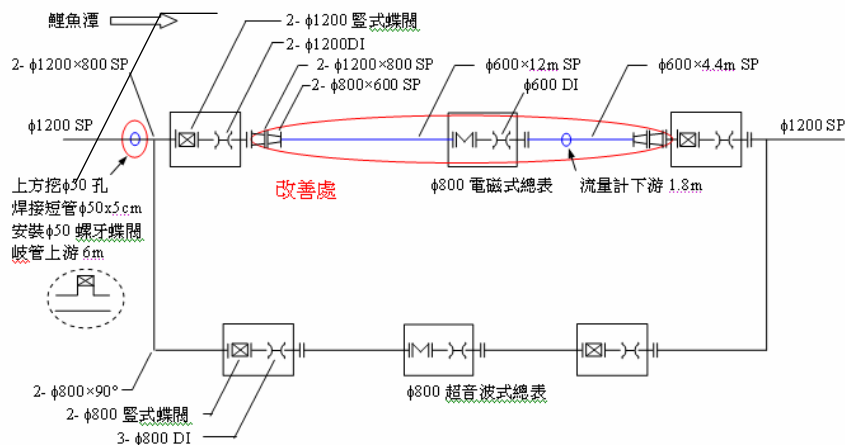


圖 16.a 管路配置

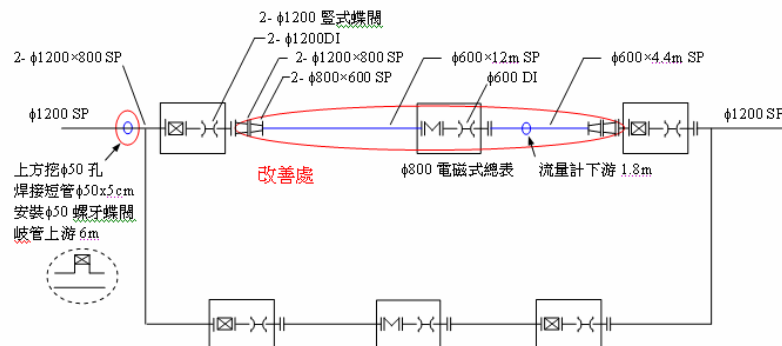


圖 16.b.管線改善配置

3.4.6 實流測試

新改設流量計實際選用 DN600 電磁流量計，其出廠測試時之試水管徑為 600 mm，前後直管距離分別為 3.0 m(5D)與 1.0 m(1.67D)，此直管段安裝條件與實際現場安裝條件並不相同，測試流量亦未能達到現場輸配水量，以 EMCO 插入式渦輪流量計作為參考流量計，將其安裝於下游三通管之下游 DN1200 直管 50 m 處，渦輪轉子插入至最低位置。此 DN1200 管線之外徑 1219.2 mm，壁厚 11.2 mm，故計算得內徑 1197.0 mm。由於插入位置並未能到達廠商指定之 1/4D 位置點，故插入式流量計之量測值並非標準值，但可作為 DN800 超音波流量計及 DN600 電磁流量計之比較基準。由測試數據顯示，舊總表(超音波流量計)量測值比參考值平均低 4%，新總表(電磁流量計)量測值比參考值平均低 10.6%，間接比較下，舊總表量測值比新總表量測值高約 6.6%。測試比較之數據，分別列如表 2a。

表 2a 實流測試結果

DN800 超音波流量計				插入式渦輪流量計			差異* E (%)
儀器流率 (m ³ /h)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vm (m ³)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vr (m ³)	
1830.0	6838378	6838546	168	2877.1	3053.1	176.0	-4.55
1895.6	6838797	6838964	167	3314.2	3487.3	173.1	-3.52
DN600 電磁波流量計				插入式渦輪流量計			差異 E (%)
儀器流率 (m ³ /h)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vm (m ³)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vr (m ³)	
1804.7	2695.15	2996.48	301.33	4512.7	4851.4	338.7	-11.03
1518.4	3404.50	3531.39	126.89	5288.1	5429.3	141.2	-10.13

*E=(Vm-Vr)/Vr

以 EMCO 插入式渦輪流量計作為參考流量計，將其安裝於 DN600 管線電磁流量計下游 1.65 m 處，相當於漸縮管下游直管 13.05 m(21.75D)處。此 DN600 管線之外徑 613.26 mm，壁厚 10 mm，故計算得內徑 593.26 mm。將渦輪轉子插入至 1/4D 位置，與電磁流量計量測值作比較，測試數據如表 2b 所示。

表 2b 實流測試結果

DN600 電磁波流量計				插入式渦輪流量計			差異 E (%)
儀器流率 (m ³ /h)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vm (m ³)	起讀數 (m ³)	終讀數 (m ³)	累計值 Vr (m ³)	
2868.1	5033.11	5511.13	478.02	6475.4	6939.2	463.8	3.10
2960.1	5835.26	6340.40	505.14	7206.0	7696.7	490.7	2.94

由上述數據顯示，新計量總表量測值之差異約在±3%，符合計量需求。此次校驗係新流量計安裝後首次查核，其差異值可作為未來定期查核之參考數據。如果未來查核值遠偏離數值，即可判定計量總表異常，需檢討原因將異常因素排除。

四、結論與建議

- 1.伯公坑計量總表超音波流量計裝設在 DN800 旁通管線上，經由電腦流場模擬結果，發現流場分佈不適宜測速型流量計之計量，有必要重新選取適當位置。此類型流量計例如超音波式與電磁式，其特性為流速愈大計量愈準確，預估未來支援輸配水量之需求，水量計口徑訂為 DN600 即可，表種則改用電磁式。
2. 改善方案為計量管線選定在現有備用主管線 DN1200，再縮管至 DN600。現地開挖後量測實際管長，可用的 DN600 直管長度僅 14.85m (24.75D)，總表安裝位置訂在漸縮管下游 10.8m(18D)處。
3. 以插入式渦輪流量計作為查核參考件，其安裝位置訂在水量計下游 DN600 直管 1.65m 處以及後三通管下游主管線 DN1200 之下游 50m 處。參考點在下游 DN1200 實流測試結果，間接比較原 DN800 超音波流量計與新電磁流量計之計量，驗證原超音波流量計之計量偏高約 6.6%，參考點在 DN600 處，電磁流量計之量測值則較查核流量計高約 3%，在可接受之範圍，顯示改善方案可行。

參考文獻

- 1.水量計檢定檢查技術規範，CNMV49，第二版，民國 94 年 4 月 1 日修正。
- 2.液體用量器檢定檢查技術規範，CNMV45，民國 92 年 7 月 1 日。
3. "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1: General principles and requirements," ISO 5167-1, 2002.
4. "Measurement of clean water flow in closed conduits — Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions," ISO 3354, 1988.
5. "Measurement of fluid flow in closed conduits, Part 2 Velocity-area methods, Section 2.1, Method using Pitot static tubes," ISO 3966, 1977.
6. "E.H. Johnson, In situ calibration of large water meters," Water SA Vol.25, No.2, April, 1999.