

大型流量計之校正

Larger Flowmeters Calibration

陳彥璋

YEN-CHANG CHEN

張斐章

FI-JOHN CHANG

楊翰宗

HAN-CHUNG YANG

國立台灣大學生物系統工程學系 國立台灣大學生物系統工程學系 國立台灣大學生物系統工程學系
博士後研究 教授 博士班研究生

摘 要

本研究利用聲波都卜勒流速儀(ADV, Acoustic Doppler Velocimeter)，於直潭淨水場進行流量量測以校驗其大型量水設施之流量計，以提高直潭淨水場出水量之準確性。對於實際量測後之流量推估計算方式，乃應用流速-面積原理之平均區域法及 ADV 所測得之流速資料加以推求。流速-面積原理中需各子斷面之面積與平均流速資料，而面積可由水深推算，各子斷面之平均流速則由流速分佈加以推算。根據校驗結果顯示直潭淨水場嚴重高估出水量，因此第一座之電磁流量計及第二座至第四座淨水池之文氏管流量校驗係數皆需重新調整。

關鍵詞：聲波都卜勒流速儀，流量計，電磁式流量計，平均區域法，流速分佈，文氏管。

ABSTRACT

The Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) is applied in this study to take the velocities for determining the discharges in the open channels of the Chih-tan Purification Plant. Then the discharges are used to calibrate the parameters of the larger flowmeters for accurate estimating the amount of water supply. In this study, the discharge is determined by the mean-section method, which is the sum of the products of the strip multiplied the mean velocity of the strip. Owing to the regular artificial flume, the area can be easily determined by the water depth. The mean velocity of the strip is determined by the velocity distribution equation with the measured velocities at the vertical. The discharges obtained by the ADV and the flowmeters are used to calculate the coefficients for calibrating the flowmeters. The results show the four larger flowmeters of the Chih-tan Purification Plant overestimate the discharge. Thus all the flowmeters, including one magnetic flowmeter and the other three Venturi meters, are needed to be calibrated.

Keywords: Acoustic Doppler velocimeter, Flowmeter, Magnetic flowmeter, Mean-section method, Velocity distribution, Venturi meter.

一、前 言

由於現今高科技產業之迅速發展，工業用水量

相對的日益提升，而人民之生活水準日益在提高，生活用水量亦相對之日漸增加。另外，在全球氣溫日漸之提升的結果下，水資源的循環利用逐漸的不

尋常化，日漸造成水資源開發之不易，因而迫使水資源愈來愈缺乏，也因此迫使世界各國逐漸重視此問題，更為目前政府各相關單位所密切注意之焦點。

台北自來水事業處自民國八十五年之後，均未再做主體變更或增設，既然設備容量未改變，但所產出水量卻不斷持續上升，顯示主要量測出水量的大型流量計文氏管，存在有計量不準確的問題(www.twd.gov.tw)。臺北市 12 個行政區，以及臺北縣所轄之三重、中和、永和、新店，以及部分汐止市之供水來源，其主要均來自於台北自來水事業處，其肩負大台北地區四百餘萬人口供水之重責大任可想而知。目前台北自來水事業處共擁有長興、公館、陽明、直潭及雙溪等五座淨水場，而每日出水量約為 270 萬立方公尺，其中長興、公館及直潭淨水場之出水量佔總出水量的 97% (www.twd.gov.tw)，其重要性不言而喻。然而台北自來水事業處淨水場設備對於出水量之量測方式，至今仍以文氏管為主，其量測所得之數值與實際值有所誤差。因此對於大型量水設施流量量測之準確度評估及其校驗等工作之檢討有其必要性。

對於流量量測之方式，其原理與方法眾多。而本研究乃利用量測明渠水流之水中流速後，應用流速-面積原理之平均區域法，加以推算求得流量。然而，由於自來水系統之設計為避免招受垃圾、沙塵等污染源而影響自來水之水質，對於管線之埋設多為封閉之管流網路，因而對於大型流量計之流量量測校驗工作，需尋求適當之流量量測地點，以供實驗量測儀器之架設與資料之取得。在經勘查與瞭解後，乃直接於直潭淨水場之淨水池明渠流況下進行量測實驗。研究中除有系統的引進科學研究，以發展高效率、簡易且適用於大型量水設施流量之量測及推估方法，並引進觀測儀器 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)，藉此提高大型量水設施流量量測之精度，以及取得大型量水設施之水流流況資料等。

二、管流流量計之種類及原理

流量計之種類主要可依流體系統中取得之資料以推估流量而加以區分，其中主要分為間接量測(inferential)、直接量測(directly)與能量附加(energy-additive)三大類。間接量測之流量計主要

量測非流體流速之項目以推估流量，為最廣泛以量測流量之流量計，常見之此類之流量計有孔口計(Orifice plate)、文氏管(Venturi)、音波噴嘴計(Sonic nozzle)及皮托管(Pitot/Pitot-static tube)等，其主要通常藉由推論之壓力差間接量測流量。直接量測法主要為直接量測流體之流速或流量，可歸類於直接量測法之常見流量計有渦輪機(Turbine)與閘板(Paddle)流量計。能量附加法之流量計主要是在流場注入額外之能量以產生有用且可量測之參數，常見之能量附加法流量計有電磁式流量計(Magnetic flowmeter)、熱量流量計(Thermal mass flowmeter)、超聲波流量計(Ultrasonic flowmeter)、核磁性共振流量計(Nuclear magnetic resonance flowmeter)及追蹤劑法(Tracer dilution method)，而此些量測儀器導入不影響流體之能量，如電流、熱、超音波等能量，藉由觀測流體流動對這些能量之影響，以推測流量。

台灣常用之大型流量計通常為電磁流量計及文氏管，其中電磁流量儀主要之利用法拉第定律之電導體在磁場中運動會感應電流之原理，

$$E = \frac{1}{c} BDv \quad (1)$$

其中 E 為電壓； B 為磁場密度； D 為路徑長度； v 為流體速度；而 c 則為參數。因此由電導體所產生感應電流之強度與電導體速度成正比，而管中水流正可視為電導體，所以可以電磁流速儀推估流體之流速。

如圖 1 所示，典型之電磁流量計主要由非磁性且非導電性之管路組成，兩個磁性線圈則置於管路兩側，而兩個位於絕緣管路且垂直磁場之水平電極端子則用以接收感應電流，此外電磁流速儀有電流迴路以傳送感應電流至流量指示器以顯示即時流量。電磁流量儀之優點之一為可避免流量量測時之能量損失，且校正良好之電磁流量儀於流量推估時相當準確。

文氏管，如圖 2 所示，文氏管包含兩部分：(1) 入口截面及其後的收斂錐管；(2) 喉部及漸擴錐面。收斂錐管具有較陡削的錐角約為 20° ，但因流動的急驟加速是容許的，所以不會造成太大的能量損失。然為避免散流所造成的額外能量損失，漸擴錐

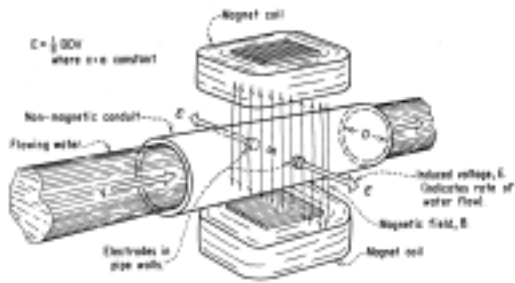


圖 1 電磁式流量計 (Bureau of Reclamation 1997)

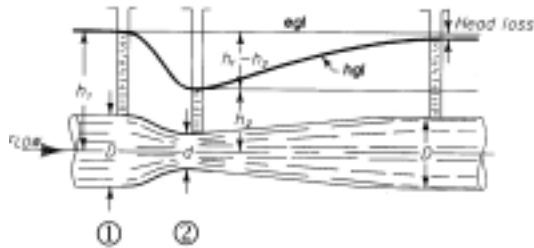


圖 2 文氏管構造 (Bureau of Reclamation 1997)

管必須緩慢放大，而文氏管的最小能量損失約在漸擴管錐角為 7° 時。文氏管主要利用管中流體由較大之斷面 (①) 進入較小之斷面 (②) 時，流速會因流體通過收縮處而增加，而降低收縮處之壓力並增加該處流體之動能，因此二斷面之壓力差則可用以推估流量。一個設計良好之文氏管，可降低能量之損失，所以此二斷面之能量關係將十分接近柏努利方程式之預測。然能量之損失無可避免，因此需經由實驗室或現地校正未知之管徑變化及能量損失。

文氏管乃應用連續方程式、能量方程式及截面①與②處之面積及壓力差，以計算管路中之流量。由連續方程式及能量方程式可得

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2)$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (3)$$

其中 A_1 及 A_2 為①與②處之斷面積； v_1 及 v_2 為①與②處之平均流速； p_1 及 p_2 為①與②處之壓力； g 為流體比重量； α_1 與 α_2 為係數； h_L 則水頭損失。由(2)及(3)可得流量

$$Q = A_2 \left[\frac{2g \left[(z_1 - z_2) - h_L + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right]}{\alpha_2 - \alpha_1 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

然 α_1 、 α_2 及 h_L 不易推求，但(4)可由下式表示

$$Q = C_D A_2 \left[\frac{2g \left[(z_1 - z_2) + \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \right]}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

其中 C_D 為流量係數，會受流體的雷諾數及流量計的幾何形狀有所不同，因此需經由實驗推求。

三、淨水池流量之量測

自來水系統多為封閉之管流網路，因此可用以量測流量之地點並不多，而直潭淨水場內可用以實際量測流量以校正流量計之穩定流場亦並不多，而每座淨水池於水流流入快濾池前之 4 公尺寬的明渠，除流況穩定外，亦可測得該淨水池之總流量，因此被選定為流量施測地點。為精準推算流量，本研究在每一量測斷面每隔 50 cm 量取一流速剖面，共量取 8 流速剖面，而每流速剖面，由距渠底 10 cm 處按水深每隔 25 cm 量測一資料點直到水面附近，因此每一場次之流量將可由約 96 點之流速資料推算；資料點之分佈情形如圖 3 所示。

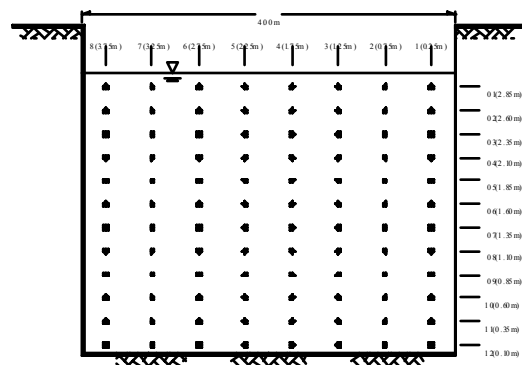


圖 3 斷面資料量測點數分佈情形

為準確量測各點之流速，台北自來水事業處特別建立可將儀器快速且準確固定於定位之量測平台，此外本研究使用 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 以量測各點之流速，其量測原理乃利用都卜勒效應 (Doppler effect)，而對水流進行速度之量測 (Lohrmann *et al.* 1994)。都卜勒效應為利用聲納發射器發射出一固定頻率之聲束於水體中，而當水體中之懸浮粒子以幾近於水體速度通過聲束時，乃反射聲束而形成回聲 (Echo)，藉由都卜勒效應的原理，此回聲之頻率與原入射狀態之聲束頻率，兩者有所不同。因此，再藉由聲納接收器 (Receiver) 予以接收回聲，並分析其頻率或相位之變化，即可測得水流之速度。ADV 應用超音波原理測取流速，因此當 ADV 探頭未經撞擊，而導致聲波發射器及接收器之角度發生改變時，應不需經常檢驗，且台灣並無法校驗此儀器，但為求量測結果之準確性，因此於實驗進行前，本研究所使用之 ADV 曾被送回美國校驗。

本研究應用流速-面積原理之平均區域法 (Rantz 1982, Chen 1998) 及 ADV 所測得之流速資料推算流量。圖 4 為用以計算名渠流量之速度-面積原理的示意圖，渠道斷面由數個子斷面所組成，因此需推估各子斷面之平均流速 (v_n) 及子斷面面積 (a_n) 以推求各子斷面之流量 q_n ，而河川流量 (Q) 即為各子斷面流量之合。因此

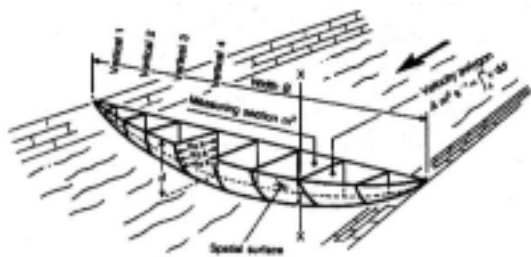


圖 4 流量計算之流速-面積原理 (Herschly 1999)

$$q_n = \bar{v}_n a_n \quad (6)$$

$$Q = \sum_1^n q_n \quad (7)$$

流速-面積原理中需各子斷面之面積及平均流速之資料，面積可由水深推算，而各子斷面之平均

流速可由流速分佈加以推算。本研究利用如下之流速分佈公式 (Chiu 1989) 推估流速之剖面

$$u = \frac{u_{max}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right] \quad (8)$$

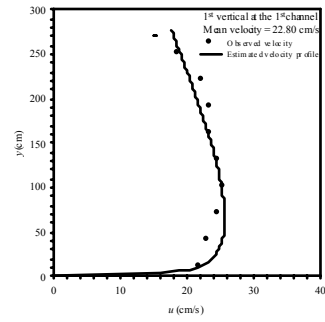
其中 u_{max} 為最大流速； M 為參數； ξ_{max} 與 ξ_{min} 分別為最大與最小之 ξ ； ξ 則如下式所示：

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp \left(1 - \frac{y}{D-h} \right) \quad (9)$$

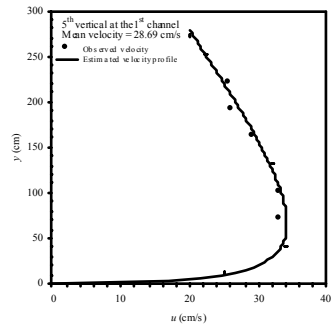
D 為水深； y 為距渠底距離； h 則表示最大流速發生之位置。為當 $h > 0$ 時之最大流速發生在距水面下 h ，而當 $h \leq 0$ 時最大流速則發生在水面。當找到最可能之流速剖面之流速分佈公式後，則對此流速分佈公式積分以求得垂線之平均流速 (Chiu and Chen 1998, Chen and Chiu 2002)。

四、流量計之校正

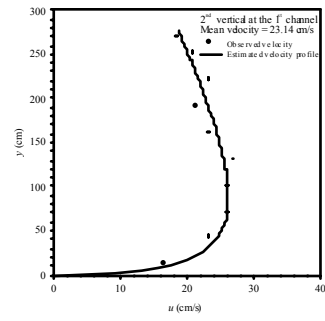
台北自來水事業處直潭淨水場之原水取自直潭壩，經由暗管藉由重力輸送至直潭淨水場之分水井，再分別分配至淨水場之四座淨水池，而流量則由位於分水井與各淨水池間之大型流量計所監測。除第一座淨水池採用電磁式流量計外，其餘三座淨水池皆採用大型文氏管量測流量。此四座淨水池之設計最大處理量為每日 50 萬噸，通常都處於滿載附近運轉，然 4 月與 5 月之限水措施則可使淨水池降載，以施測較低處理水量時之流況，使大型流量計之校正範圍得以擴大。本研究針對第一至第四座淨水池分別進行 5 次、8 次、5 次及 10 次之流量量測，而同時期大型流量計所測得之流量，則由直潭淨水場監控中心提供。圖 5 為 91 年 5 月 24 日直潭淨水場第一淨水池於日流量為每日處理 24.22 萬噸水時之各垂線流速剖面。淨水場之明渠比較類似實驗室之大型水槽，由圖中可看出流況與天然河道差異十分大，最大流速大約發生在距渠底約 1/3 水深處，而水面流速反而比較小，因此並無法以 Prandtl-von Karman 流速分佈公式 (Roberson and Crowe 1993) 加以描述。圖 6 則為四座淨水池之實測每日處理水量與自來水事業處之大型流量計所推估每日處



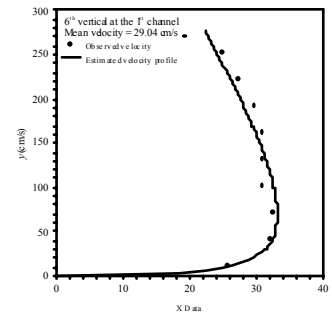
(5a)



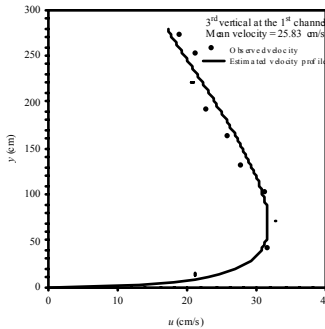
(5e)



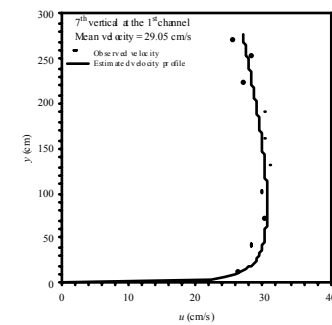
(5b)



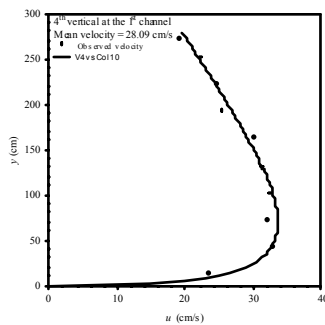
(5f)



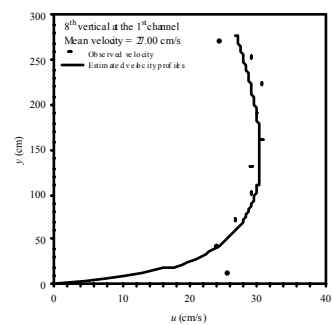
(5c)



(5g)

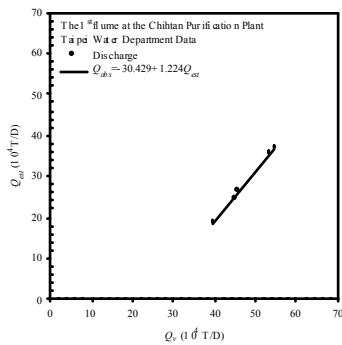


(5d)

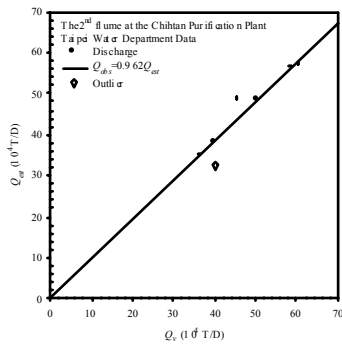


(5h)

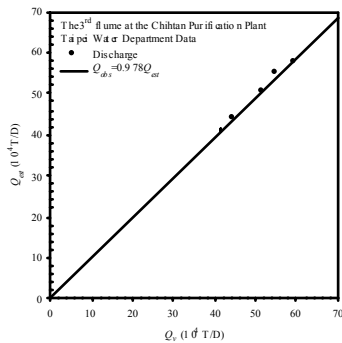
圖 5 直潭淨水場第一淨水池流速剖面；(5a)第 1 垂線流速剖面圖；(5b)第 2 垂線流速剖面；(5c) 第 3 垂線流速剖面；(5d)第 4 垂線流速剖面；(5e)第 5 垂線流速剖面；(5f)第 6 垂線流速剖面；(5g)第 7 垂線流速剖面；(5h)第 8 垂線流速剖面



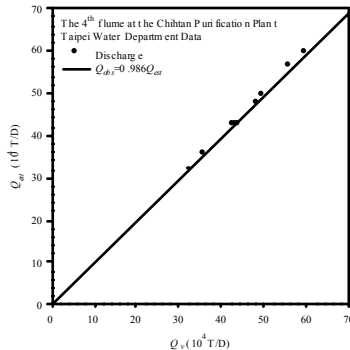
(6a)



(6b)



(6c)



(6d)

圖 6 直潭淨水場觀測流量與文氏管流量之比較；
(6a)第一淨水池；(6b)第二淨水池；(6c)第三淨水池；(6d)第四淨水池

理水量之關係，圖中之 Q_{bs} 為大型流量計所推估之每日處理水量，而 Q_{st} 則為由 ADV 量測所得之每日處理水量，圖 6b 中之離體觀測值為流量變化十分大時（每日處理水量變化範圍為 29 至 50 萬噸）所測得之結果，因此並未用以作為校正流量計之依據。由圖 6 可看出此四座大型流量計皆高估流量，其中以第一淨水池之電磁式流量計高估最嚴重，當其推估流量分別為每日處理水量 50 萬噸及 30 萬噸時，將分別高估每日處理水量 20 萬噸及 24 萬噸；所以所有之流量計皆需調整係數，以下修流量計所推估之每日處理水量值，方能準確推估直潭淨水場之出水量。此四座淨水場實測值與流量計所測得之流量皆為線性關係，其中第二、第三及第四座淨水池 Q_{bs} 與 Q_{st} 為通過原點之線性關係，而流量計之校正係數及方程式則如表 1。表 2 則顯示當每座淨水場原先出水量皆相等之狀況下之每日處理水量推估的誤差，而每日處理水量之誤差會隨出水量的變小而加大。

表 1 直潭淨水場文氏管校正係數

淨水池	校正係數
I	$Q_{est} = -30.429 + 1.224 Q_{obs}$
II	$Q_{est} = 0.962 Q_{obs}$
III	$Q_{est} = 0.978 Q_{obs}$
IV	$Q_{est} = 0.986 Q_{obs}$

註：流量單位為 $10^4 T/D$

表 2 直潭淨水場出水誤差

每座淨水池 現行出水量 ($10^4 T/D$)	現行總出水量 ($10^4 T/D$)	實際出水量 ($10^4 T/D$)	誤差 (%)
40	160	135.57	18.02
45	180	156.32	15.15
50	200	177.07	12.95
55	220	197.82	11.21
60	240	218.57	9.80

五、結 論

對於大型量水設施之流量計，其完成裝設後，隨著使用時間之增加，其準確度將會隨之降低。因此，對於各使用中之流量計等設施，一般而言均需在固定年限內，每隔一段固定時間便需進行校驗之

工作，以確保流量量測之準確性。

本研究利用 ADV 於流況良好之地點仔細量測明渠流速分佈，並以流速分佈公式模擬流速剖面，以期得到準確之垂線平均流速，之後再應用平均區域法以推算流量。於本研究之結果中顯示，針對直潭淨水場四座淨水池之四支流量計進行校正實驗之結果中明顯發現，四座大型流量計皆高估實際之流量，其中又以第一淨水池之電磁式流量計其誤差最為嚴重。因此需對所有之流量計進行係數之調整，以期能準確推估直潭淨水場之出水量，而此四座淨水場實測值與流量計所測得之流量皆為線性關係，而其中第二、第三及第四座淨水池之文氏管流量計所得之流量與由 ADV 所測得之流量關係，則為通過原點之線性關係。於每座淨水場原先出水量皆相等之狀況下，流量之誤差將會隨出水之變小而加大，以每座淨水池每日出水 50 萬噸為例，總出水量將為 200 萬噸，然而實際之總出水量將只為 177.07 萬噸，每日實際出水量比現行以大型流量計推估之出水量低甚多，也將影響到漏水率及由直潭壩取得原水量之估算。

在全球逐漸面臨無水可用之困境的情況下，水量的調配、利用與控制則日顯重要。流量計於使用一段時間後，會因諸多因素而使其係數不再能用於準確推估流量，因此對於大型量水設施流量量測之準確度評估等工作之檢討則有其必要性，且應立即全面性檢測現行之大型流量計以有效掌握供水之出水量，以準確推估線性之漏水率，方可提高受水率。

謝 誌

本研究承蒙台北自來水事業處之研究經費補助及國立中興大學土木工程系盧昭堯教授之協助，謹此致謝。

參 考 文 獻

- Bureau of Reclamation, 1997. *Water Measurement Manual*. U.S. Government Printing Office, Denver.
- Chen, Y.-C., 1998. *An Efficient Method of Discharge Measurement*. Ph.D. Dissertation, University of Pittsburgh.
- Chen, Y.-C., and Chiu, C.-L., 2002. "An efficient method of discharge measurement in tidal streams." *Journal of Hydrology*, 265(1-4): 212-224.
- Chiu, C.-L., 1989. "Velocity distribution in open-channel flow." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 115(5): 576-594.
- Chiu, C.-L. and Chen, Y.-C., 1998. "A fast method of discharge measurement in open-channel flow." *Water resources engineering '98*. Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference, ASCE.
- Hardy, J. E., Hylton, J. O., McKnight, T. E., Remenyik C. J., and Ruppel, F. R., 1999. *Flow Measurement Methods and Applications*. Wiley, New York.
- Herschy, R.W., 1999. *Hydrometry-Principles and Practices*. Wiley, Chichester, England.
- Lohrmann, A., Cabrera, R., and Krans, N.C., 1994. "Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use." *Hydraulic Engineering*, 1: 351-365.
- Rantz, S.E. and others, 1982. *Measurement and Computation of Streamflow. Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, U.S. Government Printing Office, Washington.
- Rantz, S.E. and others, 1982. *Measurement and Computation of Streamflow. Volume 2. Computation of Discharge*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175, U.S. Government Printing Office, Washington.
- Roberson J. A., and Crowe, C. T., 1993. *Engineering Fluid Mechanics*. Houghton Mifflin, Boston.
- www.twd.gov.tw, 2002. Web site of the Taipei Water Department.

收稿日期：民國 91 年 7 月 31 日

修正日期：民國 91 年 9 月 2 日

接受日期：民國 91 年 9 月 9 日