

定量緩變速流灌溉渠道流量計算之研究

Study on Water Measurement of Gradually Varied Flow in Irrigation Channels

國立臺灣大學農工系副教授

吳 銘 塘

Ming-Tarng Wu

Abstract

This is one of the methods for computing the flow discharge in irrigation channels based on the principle of conservation of energy. The required data for measuring discharge are the short channel length Δx , the channel bottom slope S_0 , and the flow depth y as well as the elements of channel section that can be defined entirely by the geometry of the section and the depth of flow. It is very easy to compute the flow discharge in channels by using this method as well as the Weirs and the Parshall flumes. But the costs of the construction and maintenance of this method are very low as compare with that of any other measuring instruments in irrigation channels.

本文為作者導出之灌溉渠道量水方法之一。乃藉平面測量方法測量渠流迴水曲線上各測點之斷面要素，底坡及水深等資料，再代入依據能量不滅原理導出之流量公式，即可算出所求之未知流量。本法計算流量與量水堰及巴歇爾水槽有同樣之方便，但建造與維護費用則遠比任何其他量水設施為低。

一、緒 言

水是我們賴以維生及生產的天然資源之一，因受氣候及地理環境的限制，我們維生和生產所需的水源並非取之不盡，用之不竭。近年來由於人口繼續不斷的膨脹和工業的快速成長，自來水和工業用水大量增加。農業、工業和自來水之間常為需水問題而引起許多爭端。臺灣每年總用水量有五分之四以上用於農田的灌溉⁽¹⁷⁾，所以如能在農田灌溉用水上，稍加以嚴密的管理和控制，使每一滴水都能產生最大的效益，則不但可節約用水量，工業與自來水和農業之間也可避免產生種種爭水糾紛。

管理和控制農田的用水，和量水問題有極密切的關係。各地水利會之所以不能妥善的控制農田的灌溉用水，主要是缺乏便利和準確的量水設施。因為量水是合理分配和計算水量的依據。在灌溉系統上如有準確和便利的量水設施，不但可以建立良好的適時適量灌溉制度，增加灌溉效率，避免用水的浪費，更可公平解決農民的爭水糾紛。

但因量水本身就是一件須待改善的問題，所以和量水有關的問題繼續存在。量水的設施須要便利普遍和準確。但便利和普遍就須投出能夠獲得便利和普遍的資金，資金缺乏則問題也就永遠存在。本文提供一種可以普遍設置，但不需要太多建造和維

護費用的量水方法，雖然其準確性和實用性尚待實驗檢討，但不失為一項可行和簡便方法。

二、灌溉量水設施及方法

灌溉量水的方法很多，根據美國墾務局出版的量水手冊 (Water measurement manual) 所載，用於灌溉量水的標準設施 (Standard devices) 有下列五種：(1)量水堰 (Weirs)。 (2)巴歇爾量水槽，傳統型及改良型 (Parshall flumes, conventional and modified)。 (3)潛孔口量水 (Submerged orifices)。 (4)流速儀水位站量水 (Current-meter gaging stations)。 (5)商用流量計 (Commercial meter)。

其他非標準的量水方法和設施計有：(6)浮標法 (Float method)。 (7)皮托管法 (Pitot tube method)。 (8)鹽速法 (Salt-velocity method)。 (9)鹽液稀釋法 (Salt-dilution method)。 (10)顏色流速法 (Color-velocity method)。 (11)顏色溶液稀釋法 (Color-dilution method)。 (12)音波法 (Acoustic method)。 (13)電磁法 (Magnetic method)。 (14)放射性同位素法 (Radioisotope)。 (15)轉輪計或尖管法 (Rotameter or tapered-tube and float)。 (16)經校核之閘門，水輪與活塞法 (Calibrated sluices, gates, water wheels, and valves)。 (17)文德利表法 (Venturi meter)。 (18)管嘴流量法 (Flow nozzles)。 (19)孔口流量法 (Orifice meter)。 (20)加州管式流量法 (California pipe method)。 (21)用於管流之流速儀法 (Current-meter method for pipes)。 (22)堰尺流量法 (Weir-sticks)。 (23)葉槳流量計法 (Propeller-meter)。 (24)商用流量計 (Commercial meters) 等。

嘉南水利會為使工作人員能熟悉，該會各種型式之灌溉量水設備的觀測方法及其應用，特於民國 67 年 7 月編印一冊「灌溉量水設備及觀測」，內含(A)堰口(B)孔口(C)巴歇爾量水槽(D)閘門(E)流速儀測法(F)浮標測法(G)比降法(H)水位流量曲線法等八種方法。

由上敘述，可知灌溉量水種類及其實際應用於臺灣農田灌溉之梗概。量水是執行灌溉管理和控制灌溉用水必要的工具，沒有量水設施則所謂管理和控制祇是徒具形式，毫無實際意義。但是量水設施和量水方法也須有適當的選擇：

(一)量水設施要經濟並具有適度的準確性：準確性可因量水的重要性和量水目的而允許有彈性及有限度的選擇。量水如果必須準確時，就必須選擇能達到該量水準確度的量水設施。量水不須要太準確時，也就不須要設置精度過高的量水設施。準確度高的設施，設置費和維護費也必相對增高，對量水雖然無害，但也於事無補。目前有許多現代化的技術如上述的電子、電磁、超音波及放射性同位素等等方法，都可應用於流量的測定，這些方法的準確性無人可以懷疑。但灌溉量水祇要應用傳統的設施也就能解決問題，似乎用不到採用昂貴的精密設備。不過準確性不足的傳統量水設施，同樣也不能接受。

(二)應用與操作及維護簡單便利：應用與操作都不便的量水設施最好不要選擇，例如上述的鹽速法、浮標法、顏色法等等，每次應用時都必須多人操作，常令操作者手忙腳亂並消耗許多觀測用的材料，及受到天氣等種種限制，故採用此種量水方法等於是自找麻煩。又如放射性同位素法等則因觀測材料來源、儀器維護及安全等等都有商榷之處，因此也不適合採用。

(三)具有實用性、直接性和普遍性：量水方法與設施須有實用性和普遍性，並須能直接測出所需要的流量資料。例如巴歇爾量水槽和量水堰等就有這種好處。但流速儀在這裏就顯出了它的缺點。雖然流速儀有它的特殊用途，但因流速儀觀測須採用分段多次操作並採分段平均計算後，才能算出所需的流量資料。其測量方法除了缺乏直接性外也不具普遍性。流速儀使用之前須經校驗，而有校驗設備的地方，並非到處可找到，除須付出校驗費用外，並須委請他人代理進行校驗。因此為了觀測渠道的一個流量，必須經過多層的手續，實在不是人人想測就可以測的量水方法。因此類似這種型式的量水方法盡量少採用為宜。

綜上所述，量水設施與方法如能同時具備上述三項優點，便可列為最佳的選擇對象。國內目前所採用的各種量水方法與設備中，也祇有量水堰和巴歇爾量水槽（包括它的改良型水槽）具有這種優點。所以除非特殊原因，所有的大小灌溉渠道之量水設施似可全部以量水堰和巴歇爾水槽取代。量水堰和巴歇爾量水槽量水的準確度，無論在理論和實用上都已無人可懷疑。臺大水工試驗所設置有一個實習用的巴歇爾量水槽和量水堰，每一位實習學生都

可以經由實驗證明同一種流量，經過巴歇水槽所測得之流量和經過量水堰所測得之流量幾無誤差。所以採用這兩種量水設施於灌溉渠道上，便足以解決量水的各種問題。如果有問題的話，那就是施工和工程測量技術不良所造成的後果。

三、流量觀測公式之推導

(一)人工渠道之渠流現象 人工建造的灌溉渠道，雖然大都應用定量等速流公式設計建造而成，但建造後却未必能形成定量等速流之條件。所謂定量等速流 (steady uniform flow) 乃指(1)渠流各斷面的水深 (depth)、流水斷面積 (water area)、流速與流量在該渠道中均保持不變。(2)能量線坡度 (S_r)、水面線坡度 (S_w) 及渠底坡度 (S_o) 均相等。實際上因測量與施工未能嚴密控制，施工後的渠道不但和設計渠道有很多的出入，渠道的邊坡、底坡和斷面等也難自上游至下游保持整齊均一。渠道長久使用之後又因遭受磨損、崩塌和沉陷等等，益使其斷面、底坡等產生更大的不均。作者曾測量桃園大圳一段長 300m 的直線渠道，每隔 20m 測一斷面，結果顯示，各斷面間的底坡、底寬、左右側坡和斷面等等都參差不齊，全長 300m 內各斷面間的底面凹凸不平，底坡升降不均，亦即降落一段後再升起，升起一段後又降落；斷面積也擴大又縮小，縮小再擴大。300m 之間沒有一段是整齊均一或順序漸變情形。所以雖然是直線渠道，但要形成良好的等速流條件並不是容易的事。何況輸水期間常又夾帶泥砂雜物等擾亂水流的穩定；因此如以直讀式流速儀放置於渠道內固定位置，則可發現該流速儀附設之流速指針始終左右擺動不停，證明渠道內的流速始終不穩定，所以穩定的等速流條件，並不容易形成。

渠流一遇障礙物，其水面便延着流距而產生變化，形成所謂變速流 (varied flow) 現象。灌溉渠道上常有許多水工構造物，因此變速流現象到處可見，其中在各種分水閘門上游常形成一種所謂迴水曲線 (backwater curve)。如能應用這種斷面計算渠道的流量，無形中便增添許多量水設備，實為一件頗值得研究之問題。

(二)定量緩變速流流量公式之推演 定量變速流 (steady varied flow) 有緩變速流 (gradually varied flow) 和急變速流 (rapidly varied flow) 之分。本文所論，僅限於緩變速流問題。

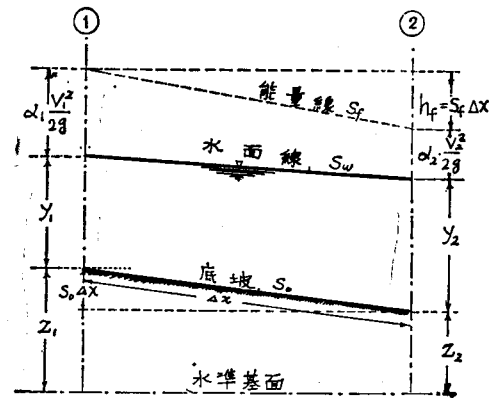


圖 (1)

如圖(1)所示，在渠道上截取一小段 Δx 的長度，根據能量不滅原理 (the principle of conservation of energy)，上游段①的總能量應等於下游段②的總能量再加兩段面間之能量損失 (the loss of energy) h_f ，即

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

$$(Z_1 - Z_2) = (y_2 - y_1) + \left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_f \quad (2)$$

$$S_o \Delta x = \Delta y + \left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_f \quad (3)$$

式中 Z (m) 為渠底與水準基面間的垂直距離。

α 為能量係數 (energy coefficient)

V (m/sec) 為渠流的平均流速

y (m) 為水深 (depth of flow)

S_o 為渠底底坡 (the bottom slope)

S_r 為能量線坡降 (Slope of energy line)

假設 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ，在定量流之下 $V_1 = \frac{Q}{A_1}$ ，

$V_2 = \frac{Q}{A_2}$ ，又設等速流之粗糙係數 (Coefficient of roughness) n 值和能量線坡降

$$S_r = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (4)$$

適用於定量緩變速流，代入(3)式可得

$$\frac{1}{2} \left(\frac{Q^2 n^2}{R_2^{4/3} A_2^3} + \frac{Q^2 n^2}{R_1^{4/3} A_1^3} \right) + \frac{1}{\Delta x} \left\{ \Delta y + \alpha \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right\} = S_o \quad (5)$$

$$n^2 \left(\frac{1}{R_2^{4/3} A_2^2} + \frac{1}{R_1^{4/3} A_1^2} \right) + \frac{\alpha}{g \Delta x} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) = \frac{2}{Q^2} \left(S_0 - \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (6)$$

$$\text{設 } -U_1 = \left(\frac{1}{R_2^{4/3} A_2^2} + \frac{1}{R_1^{4/3} A_1^2} \right) \quad (7)$$

$$U_2 = \frac{\alpha}{g \Delta x} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (8)$$

$$U_3 = 2 \left(S_0 - \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) \quad (9)$$

式中 R (m) 為水力半徑 (hydraulic radius)

A (m²) 為流水斷面積 (water area)

Q (cms) 為流量

Δy (m) 為水深差即 y₂-y₁

Δx (m) 為上下游兩斷面間的截距。

(7)(8)(9)代入(6)式得

$$-n^2 U_1 + U_2 = \frac{1}{Q^2} U_3 \quad (10)$$

$$\frac{U_2}{U_3} = n^2 \frac{U_1}{U_3} + \frac{1}{Q^2} \quad (11)$$

$$\text{設 } Y = \frac{U_2}{U_3} \quad (12)$$

$$n^2 = C_1 \text{ 或 } n = \sqrt{C_1} \quad (13)$$

$$X = \frac{U_1}{U_3} \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{1}{Q^2} \text{ 或 } Q = \frac{1}{\sqrt{C_2}} \quad (15)$$

(12)~(15)式代入(11)式得

$$Y = C_1 X + C_2 \quad (16)$$

由(6)式知，除流量Q和粗糙係數n為未知數外，其餘如渠底坡度S₀，渠道截距Δx，水深差Δy以及水深y₁與y₂等都可以應用平面測量方法實

測獲得所需要資料。式中水力半徑R和斷面積A均為水深y的函數。渠道如為矩形則R=by/(b+2y)，A=by。渠道如為梯形則R=(b+my)y/(b+2y√(1+m²))，A=(b+my)y，b為渠底底寬 (bottom width)，m為梯形斷面之側坡 (side slope) (橫：豎)。

整理第(6)式並化簡之，可得第(10)式之直線方程式。式中Y與X均為底坡S₀，水深y及截距Δx的函數，都可以從平面測量中實測求得。C₁及C₂為所欲求的未知數，解出C₁及C₂兩值後可得n=C₁^{0.5}及Q=(1/C₂)^{0.5}。但祇靠一個Y=f(X)的直線方程式尚解不出C₁及C₂兩個未知值，必須再從觀測中找出一個以上的觀測方程式，有一個適當截距Δx(m)的兩個斷面便可獲得Y=f(X)的一個觀測方程式，N個Δx截距便可獲得N個Y=f(X)的方程式，如有N個方程式則C₁與C₂的兩個未知數適合應用最小二乘法 (least square method) 求解，最小二乘法求解C₁與C₂兩值分別為

$$C_1 = \frac{N \Sigma(XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{N \Sigma(X^2) - (\Sigma X)^2},$$

$$C_2 = \frac{(\Sigma Y)(\Sigma X^2) - (\Sigma X)(\Sigma XY)}{N \Sigma(X^2) - (\Sigma X)^2} \quad (17)$$

式中N為觀測方程式次數，Σ為總和符號

(三)渠道測量與流量計算 某一控制精密，施工嚴格的新建梯形渠道，其底坡S₀=0.0016，底寬b=6.10m 梯形斷面邊坡m=2。(橫：豎) 300m內共設置七處水位觀測站，其水深(y)的觀測資料列表(1)

表 (1)

測 點	0+000.0	0+050.0	0+100.0	0+150.0	0+200.0	0+250.0	0+300.0
Δx (m)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
y (m)	1.068	1.084	1.105	1.131	1.163	1.201	1.245

假設能量係數 α=α₁=α₂=...=1.1，應用(16)式計算結果如表(2)

表 (2)

N	1	2	3	4	5	6
X	-13.0503	-13.3137	-13.4736	-13.8187	-14.1636	-14.5979
Y	-4.1711×10 ⁻⁴	-5.6073×10 ⁻⁴	-7.0607×10 ⁻⁴	-8.9656×10 ⁻⁴	-1.0989×10 ⁻³	-1.3218×10 ⁻³

應用(17)式計算結果得

$$C_1 = 5.9016 \times 10^{-4}$$

$$n = 2.4293 \times 10^{-2}$$

$$C_2 = 7.2731 \times 10^{-3}$$

$$Q = 11.7257 \text{ (cms)}$$

$$\text{相關係數 } r = 0.9981$$

上項計算應用逐步法 (Direct step method) 驗算結果如表(3)所示。

表 (3)

(1) 測 點	(2) Δx	(3) y	(4) $\alpha(V^2/2g)$	(5) E	(6) ΔE	(7) S_r	(8) \bar{S}_r	(9) $S_0 - \bar{S}_r$	(10) Δx
0+000.0	0	1.068	9.9783×10^{-2}	1.1677		1.3919×10^{-3}			
0+050.0	50.0	1.084	9.6063×10^{-2}	1.1801	1.2330×10^{-2}	1.3190×10^{-3}	1.3554×10^{-3}	2.4456×10^{-4}	50.417
0+100.0	50.0	1.105	9.1514×10^{-2}	1.1965	1.6451×10^{-2}	1.2305×10^{-3}	1.2748×10^{-3}	3.3252×10^{-4}	49.474
0+150.0	50.0	1.131	8.6272×10^{-2}	1.2173	2.0758×10^{-2}	1.1310×10^{-3}	1.1807×10^{-3}	4.1925×10^{-4}	49.512
0+200.0	50.0	1.163	8.0355×10^{-2}	1.2434	2.6083×10^{-2}	1.0219×10^{-3}	1.0764×10^{-3}	5.2356×10^{-4}	49.819
0+250.0	50.0	1.201	7.4009×10^{-2}	1.2750	3.1654×10^{-2}	9.0888×10^{-4}	9.6539×10^{-4}	6.3461×10^{-4}	49.879
0+300.0	50.0	1.245	6.7467×10^{-2}	1.3125	3.7457×10^{-2}	7.9682×10^{-4}	8.5285×10^{-4}	7.4715×10^{-4}	50.133

四、討 論

本文為作者從事灌溉量水研究推出的一種方法。本法之可行性，簡便和不需要太多設置及維護費用的事實已無庸置疑。惟其準確性尚待實驗觀測加以驗證，公式中所需要之改正係數亦有待繼續研究，茲先就以下各點討論之。

(一) 渠道水深、斷面各要素及底坡之測量 本法觀測所得之流量主要是依據渠流水深的變化、底坡和斷面各要素的測量資料計算而得。所以測量必須正確，所計算的流量才能正確。若測量發生很大的誤差，則所計算的流量亦必產生甚大偏差。又渠道兩斷面間的截距 Δx 的長短也須要合適， Δx 太長則能量消耗於摩擦之外的損失增加，此項損失並不包含於本法計算之範圍，故計算流量的誤差也必相對增加。但 Δx 太短則水深差 $\Delta y = y_2 - y_1$ 之值不顯著，因而不易測量，所以 Δx 的長度也不宜太短。水深 y 的測量如無自記水位計設施，則應用其他測量方式亦可，惟必須能精讀到公厘 (mm) 為止。

(二) 流量 Q 之計算 流量之計算最好採用全自動的方法計算。可應用微處理機，先將水位訊號轉換成數位訊號後，再經微處理機計算流量而輸出。此項設施財團法人農業工程研究中心於數年前便已開發研究成功，國內很多廠商均可製造，其組合方塊圖參閱附錄。若不能採用全自動的方法計算流量，應用特製計算機，或可寫簡單程式的袖珍型電子計

算機亦可。表(2)所示的 X 與 Y 各值及 n 與 Q 值均係應用聲寶牌 Model PC-1211 袖珍型電子計算機用 "BASIC" 語言計算而成。

(三) 能量係數 α 之值 α 之值依據前人實驗結果，平直整齊渠道最大值為 1.2，最小值為 1.1。大型渠道水深愈深者其值愈低，小型淺水渠道之 α 值反而較高。因本法較適合應用於大型之渠道，故 α 之值可採用 1.0 至 1.1 間之任何值，因在大型渠道流量之下 ($V^2/2g$) 對 y 之比值甚小，故 $\alpha = 1.0$ 至 1.1 間之微小差異，對流量計算之誤差影響甚微。

(四) 能量線坡度 S_r 之值 兩斷面間之能量損失是否僅以 $h_r = S_r \cdot \Delta x = \frac{n^2 V^3}{R^{4/3}} \cdot \Delta x$ 表示即能滿足本計算之需要？如有誤差則需要加入平衡或改正之係數如何？這都是尚待繼續研究的問題。在尚未收集足夠的實驗觀測資料以修正本公式之前，祇能繼續採用原式計算，不過原式是否必定有誤差，誤差又如何？日後必有一個明白的說明。

(五) 本法為作者一己之管見，是否可用？需要再作何種修正？都需要實際應用之後才能了解，故除在理論上繼續研究檢討之外，更需展開實驗觀測工作以求驗證。尚祈學者專家指正錯誤，俾能順利應用，則其裨益於臺灣的農田灌溉當非淺鮮。

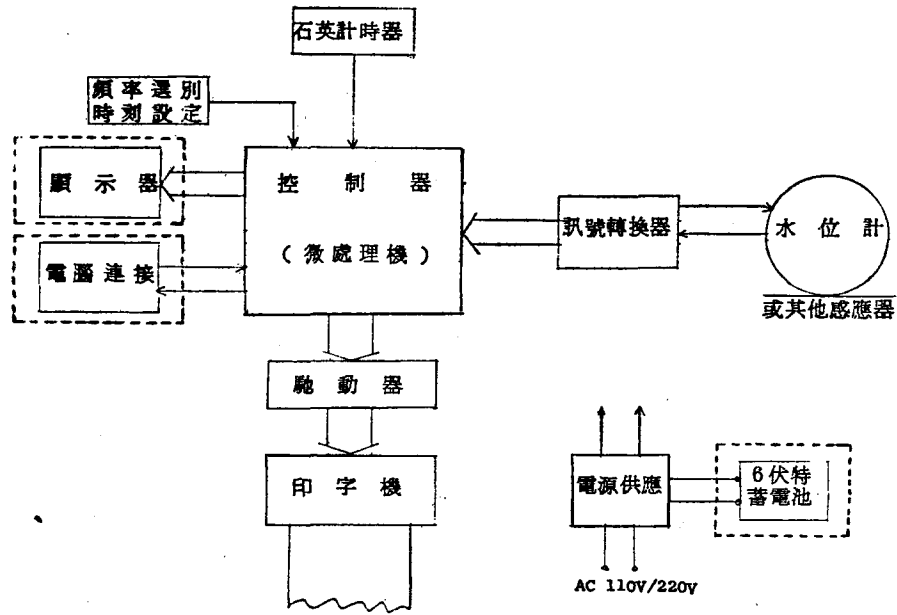
五、誌 謝

本文之完成承蒙農業工程研究中心提供一切研究設備，謹此誌謝。

參 考 文 獻

1. Adani, R. M., "Critical Depth in Trapezoidal Channels," Proc. ASCE, Vol. 88, No. Hy3, May, 1962, p. 69.
2. Birkhoff, G., "Calculation of Potential Flows with Free Streamlines," Proc. ASCE, Vol. 87, No. Hy6, Nov., 1961, P. 17.
3. Brater, F. E., and King, H. W., "Handbook of Hydraulics," 6th ed. McGraw-Hill, Inc., 1976.
4. Balloffet, A., "Critical Flow Meters (Venturi flumes)," Paper 743, Proc. ASCE, Vol. 81, July, 1955.
5. Chow, V. T., "Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1959.
6. Chow, V. T., "Integrating the Equation of Gradually Varied Flow," Proc. ASCE, Vol. 81, Separate No. 838, Nov., 1955, pp. 1-32.
7. Diskin, M. H., "End Depth at a Drop in Trapezoidal Channels," Proc. ASCE, Vol. 87, No. Hy4, July, 1961, p. 11.
8. Ezra, A. A., "A Direct Step Method for Computing Water-Surface Profiles," Trans. ASCE, Vol. 119, Paper 2679, 1954, pp. 453-462.
9. Henderson, F. M., "Open Channel Flow," Collier-MacMillan Ltd., 1966.
10. Herschy, R. W., ed., "Hyrometry," John Wiley & Sons Ltd., N. Y. 1978.
11. Keifer, C. J., and Chu, H. H., "Backwater Functions by Numerical Integration, Trans. ASCE, Vol. 120, Paper 2748, 1955, PP. 429-442.
12. Liggett, J. A., "Mathematical Flow Determination in Open Channels," Proc. ASAE, Vol. 94, No. EM4, Paper 6078, Aug., 1968, pp 947-963.
13. Nalluri, C., and Tomlinson, J. H., "Varied Flow Functions for Circular Channels," Proc. ASCE, Vol. 104, No. Hy7, Paper 13889, July, 1979.
14. Robinson, A. R., and Chamberlain, A. R., "Trapezoidal Flumes for Open Channel Flow Measurements," Trans. ASAE, Vol. 3, No. 2, 1960.
15. Pickard, W. F., "Solving the Equations of Uniform Flow," Proc. ASCE, Vol. 89, No. Hy4, July, 1963, Part I, p. 23.
16. "Water Measurement Manual," U. S. Bureau of Reclamation, May*1967.
17. "經濟部水資會" 六年經建計畫中之「水資源開發利用」民國 66 年。
18. 臺灣省嘉南農田水利會「灌溉量水設備及觀測」民國 67 年 7 月。
19. 「量水設備」，農復會特刊新 28 號，灌溉排水工程設計第五篇第二章，民國 67 年 12 月。
20. 朱榮彬、楊明風「烏山頭渠道系統量水工程改進之研究」，土木水利 5 卷 4 期，民國 68 年 2 月。
21. 臺灣省水利局「量水技術」，雜作灌溉手冊應用篇 pp 216-234 民國 69 年 11 月 30 日。

附 錄



電子數位型自記水位計
組合方塊圖

歡迎 會員先生惠賜

大作，充實學報內容