

電子式水表的原理與特性

The Principle and Characteristic of Electronic Water Meter

黃佑仲

壹、前言

以電子線路取代傳統機械式的齒輪組，是近年來世界各先進國家發展水表的趨勢。透過微電腦的複雜計算，不但提高了水表的精確度。更因為電子式水表在本質上具有的通訊功能，使抄表業務的自動化具體可行。

電子式水表的開發工作，是一項複雜的科技整合。除了流體力學、量測技術之外，材料技術、感測技術、電子技術、通訊技術、軟體工程等，都是開發過程中需要逐一克服的難題。

一、流體力學

Miller [1]依理論的觀點，將流量計分成2類，壓差式流量計(Differential Producers)與線性流量計(Linear Flowmeters)。孔口流量計(Orifice)與文氏管(Venturi Tube)是常見的壓差式流量計，而渦輪式流量計(Turbine Flowmeter)則是線性流量計的代表。

上述2類流量計在理論上最大的差別，在於壓差式流量計有明確的理論推導。而線性流量計由於計量室與葉輪的形狀過於複雜，目前都以K因子(K Factor)來描述。K因子則定義為每單位體積有多少訊號(Pulses/Unit Volume)。

壓差式流量計常因其簡單的幾何形狀，因此在流體力學上有明確的理論可做為設計流量計的根據。但是反觀線性流量計，由於其複雜的幾何形狀，造成了流體力學在理論上難以描述的流場。因此，線性流量計在開發的過程中，就得比壓差式流量計付出更多的嘗試錯誤以累積經驗。

※弓銓企業股份有限公司總經理

二、量測技術

水表要準確，除了水表本身的性能要好之外，水表使用的環境也是重要因素。依 Miller 的看法，所謂水表適當的使用環境，應該滿足下列 3 個條件。1. 穩定流場 (Steady Flow) 2. 均相牛頓流體 (Homogeneous, Single-Phase Newtonian Fluid) 3. 完全發展流場 (Fully Developed)。

所謂穩定流場，簡單的說，就是流速分佈 (Flow Pattern) 不隨時間改變。例如幫浦打水，因而造成水流的時快時慢，就不是穩定流場。至於完全發展流場是從位置座標的觀點來看的，如果速度分佈不再隨位置改變而改變，就是完全發展流場。我們時常要求在水表的前端應有某一長度的直管，其目的就在確保水流進入水表之前，已達到完全發展的狀況。牛頓流體是指黏度 (Viscosity) 不隨流速變化而改變的流體 (一般黏度是溫度、壓力的函數)。水就是一種牛頓流體。至於均相 (Homogeneous) 是一個極易混淆的觀念，在熱力學上，它是指在系統內以我們所關心的數量級 (Scale) 隨意切割成小區間，而每一個區間的組成仍然是均一的，該系統就稱為均相。例如，水流裡面如果含有氣泡就不是均相。這也就是為什麼要在水表裝上試水台之後要先通水的原因，因為要將水表及管路內的氣泡帶走。

除了水表的使用環境之外，有關水表器差的統計特性也是一個非常重要的觀念。在完全相同的測試環境下，以同一個水表重複多次試驗。水表的器差將是一種統計上的分佈，而不是單一的數值。因此，要了解水表的性能之前，必需先要有量測之不確定性的觀念 [2]。

一般水表製造商都會提供所謂的性能曲線，內容不外是描述流量計在各種不同流速下的器差與水頭損失。就量測之不確定性的觀念而言，應該了解曲線上的任何一點，器差絕不是很明確的一個數值，而是一種分佈。

深究造成這種分佈的原因，除了水流本身就是一種隨機的特性外，各種系統誤差與人為誤差也是因素之一。因此在 ISO 5168 [3] 就特別規定了一套統計分析的方法，合理的描述流量計量測的不確定性。

三、材料技術

對水表而言，主要是靠葉輪的轉動來達到計量的目的。因此，要提高水表的使用壽命，材料的磨損將是問題的關鍵。由於近年材料科技的突飛猛進，無論是金屬材料或是精密陶瓷，都足以滿足此一耐磨的要求。更由於水表葉輪磨耗情形減少，使得水表在經過長期運轉後仍能保持其原有的精確度要求。

四、感測技術

機械式水表多半以葉輪帶動一套複雜的齒輪組，來達到計量的目的。但是電子式水表以電子線路取代了複雜的齒輪組之後，就必需以電子的方式將葉輪的轉動情形傳遞給電子線路。這就有賴於各種感測技術的應用。聲(音波)、光、磁的應用是我們常見的感測技術。但是在設計一種感測方式時，流體的特性、雜訊的免疫力、訊號處理方式、環境的干擾...等，都是應該深加考慮的重點。

反過來站在使用者的觀點而言，對於各種感測方式的特性與限制應該要有基本的了解。如此才能確保『適當的流量計，裝設在適當的環境』。免得鬧出裝錯了水表，遷怪水表不準的笑

話。

五、電子技術

省電、即時反應、可靠度高是電子式水表設計的重點。就省電的要求而言，一般我們常見以微電腦控制的洗衣機、冷氣機，僅是微電腦本身就得耗用數百毫安培的電流。但是為了使水表只靠本身所攜帶的電池就能工作8年以上，所有水表內部的電子線路的總耗電量必需在幾十微安培以下。毫安培是微安培的一千倍，換句話說，水表的耗電情形是一般微電腦的萬分之一。

電子式水表除了計量功能之外，時常兼具通訊、流速計算、反向流動偵測...等功能。當水表正在運轉時，同時又要執行通訊功能。這時候，如何做好工作的規劃將是一個非常重要的技巧。

水表安裝在用戶家中，是水公司計量收費的依據。如果水表本身經常故障的話，勢必造成水公司極大的困擾。近年來由於電子科技的突飛猛進，大大的提升了各種電子零件的品質。因此，現今的電子產品除了已達到“輕薄短小”的境界。只要生產廠商能加強品質管制，相信在產品的可靠度方面，將可大為提升。

因此，電子式水表的發展，不僅只是以電子線路取代傳統機械表的齒輪組。它更代表著整個水表品質要求的提升。

六、通訊技術

傳統上我們對水表的定位，就僅止於計量收費的用水設備。但是當電子式水表與通訊網路結合在一起的時候，它將成為給水工程中重要的一環。

電子水表在通訊上的應用主要分為2種——遠隔顯示 (Remote Display) 與自動讀表 (Automatic Meter Reading)。

所謂遠隔顯示，簡單的說，就是從水表拉出一條訊號線到附近較方便察看的地方，接上另一個顯示器，方便抄表人員讀表。例如，將大樓樓頂所有的水表都拉一條訊號線到一樓，再以另一顯示器在一樓集中顯示。這時候抄表人員就不需要爬到頂樓，頂著大太陽辛苦的抄表了。

遠隔顯示雖然方便我們抄表，但是抄表人員還是得走到水表現場。根據統計 [4]，完成抄表全部作業時間內，走路時間佔全時比例為53% (密集區)~70% (市郊區)。因此，要徹底解決抄表的問題，唯有實施自動讀表。

所謂自動讀表，就是從遙遠的某地，藉由某種媒介，以讀取用戶家中計量裝置的內容。在此，就這句話所提到的幾個名詞做個說明。所謂“遙遠的某地”，是指自來水公司、電力公司、瓦斯公司等公用事業 (Utilities)。藉由某種“媒介”，則是指透過電話線、電力線、電纜線 (第四台)、無線電波、光纖等通訊媒體，以達到傳遞資訊的目的。而“計量裝置”所指的是，具有通訊能力的水表、電表、瓦斯表。至於計量裝置的“內容”，除了水表積算值以外，表號、各種狀態 (磁干擾、漏水警告...等)，都可讀取。

七、軟體工程

為了滿足電子水表的各種需求，我們在水表內安裝了一顆微電腦 (一台具體而微的電腦)。一切的控制、計算、通訊功能，都透過這顆微電腦來完成。而這顆微電腦能否順利運作，就有

賴軟體程式的執行。因此，在開發電子水表的時候，需要一位對水表有“感覺”的軟體工程師，才能透過微電腦有效的執行電子水表的各種功能。

貳、感測原理與防磁功能

基本上電子式水表必需透過感測器，將葉輪的轉動情形傳遞給電子線路。就電子式水表而言，光及磁是2種常用的感測技術。由於光感測元件耗電量大，再加上容易受到水質不潔的干擾。因此，目前電子式水表的發展趨勢，都是以磁感應方式來達到計量的目的。

如圖一所示，我們只需要在葉輪軸上安裝一顆永久磁石，另外在葉輪軸的上方(即圖一感測元件的位置)放置一根磁簧開關(Reed Switch)。如此，就完成一種簡單的磁感應機構。雖然目前市面上有些電子式水表的感應機構與此稍有不同，但其基本的原理是不變的。

雖然磁感測方式非常省電，而且不受水質不潔的干擾。但是當葉輪正在轉動的時候，如果在水表外面放一顆磁石，水表葉輪的轉動將會受到外加磁場的影響，轉動因而變慢甚至停止。此一現象在低流速時更為明顯(如起動流量)。為了克服此一缺點，在永久磁石的四週，施予適當的磁遮蔽是必需的 [5]。

表一是以2000高斯左右的強力磁石，在精密設計的磁場環境下，對電子式水表起動流的測試報告[6]。該項試驗有2點值得注意的地方：

1. 首先是一般市面上能拿到的磁石，其強度到底有多大？

就目前磁石發展的趨勢來看，市面上時常看到的磁石多半是 Ferrite 系列。此一系列的磁石，磁場強度大約在幾十到數百高斯之間。另外有一種在製造業，用來製造高扭力、小體積馬達，所使用的強力磁石。其主要材料為鈹鐵硼系列。這類磁石以目前一般的製造技術與充磁設備而言，磁場強度大約在二、三千高斯之間已是極限。

2. 其次是以目前一般導磁材料，配合適當的磁遮蔽設計。對外加磁場到底能達到多大的防磁效果？

根據工研院的測試報告可看出，就算外加2000高斯以上強力磁場，只要有適當的磁遮蔽措施，對水表的起動仍不影響。當起動流不受外加磁場干擾時，以力學的觀點而論，水表的器差也不會受到影響。茲推論如下。

假設葉輪在起動時受力 F_s ，葉輪軸的摩擦力 F_1 ，流體阻力 F_2 (此時為 Creeping Motion Drag Force)，外加磁場所造成的阻力 F_3 。

在葉輪剛要起動時的條件是： $F_s = F_1 + F_2 + F_3$ 。

當葉輪開始轉動後， $F_s > F_1 + F_2 + F_3$ 。 F_1 將立刻由靜摩擦變成很小的動摩擦。另假設葉輪軸與水流同速轉動，則流體阻力 F_2 也會很小。至於外加磁場 F_3 應是定值。當水流速率越來越快時，流體所提供的動量 (Momentum) 變化量將遠大於 $(F_1 + F_2 + F_3)$ 。換句話說，當外加磁場對水表的起動都不發生影響時，那麼對水表各點的器差更不會有影響。

基於以上的討論，我們了解到適當的防磁功能對電子式水表是必需的。但是就防磁能力的要求上，到底多少高斯才恰當則又見仁見智。以我們實際測試的經驗顯示，如果採用一般鐵材

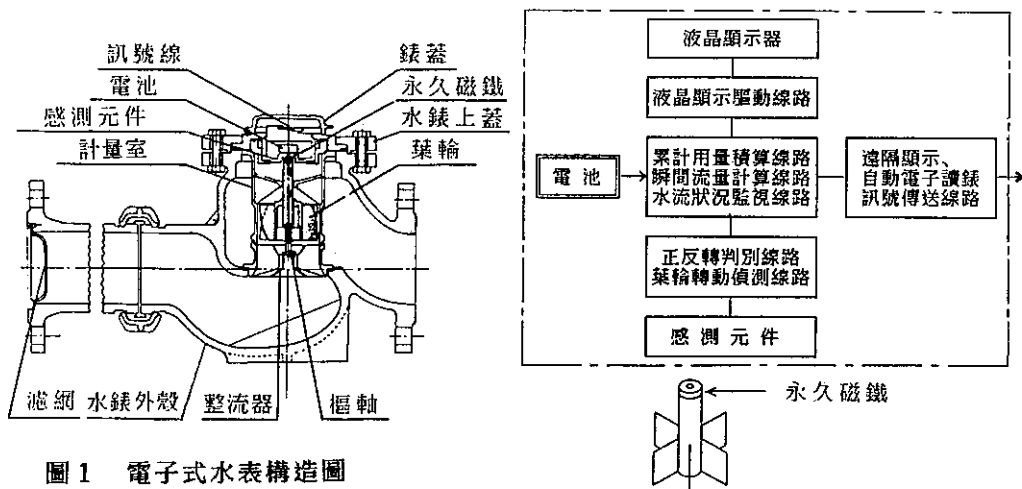


圖 1 電子式水錶構造圖

表 1 外加磁場對電子式水量計啟動流量之影響量測結果

流量 (ml/min)	測試部位 (記號所在位置)	水量計表面 磁場強度 (gauss)	磁場產生方式	對啟動流量之 影響 (動與否)
260 ± 10	1	2080	固定平行磁場	動
260 ± 10	2	2168	"	動
260 ± 10	3	2314	"	動
260 ± 10	4	-2068[註]	"	動
260 ± 10	5	-2151	"	動
260 ± 10	6	-2294	"	動
250 ± 10	1	2087	"	動
250 ± 10	2	2178	"	動
250 ± 10	3	2324	"	動
250 ± 10	4	-2073	"	動
250 ± 10	5	-2160	"	動
250 ± 10	6	-2287	"	動
240 ± 10	1	2085	"	動
240 ± 10	2	2170	"	動
240 ± 10	3	2322	"	動
240 ± 10	4	-2069	"	動
240 ± 10	5	-2164	"	動
240 ± 10	6	-2286	"	動

[註] 正負號表示相對的磁場極性方向

料來製作防磁罩。就水表的要求(起動流要能動)標準，要防一、二仟高斯的外加磁場絕對沒有問題。如果水公司採用能防二仟高斯以上外加磁場的電子式水表，就算自來水用戶刻意要用磁石來干擾水表的正常使用，也是不大可能。

要求水表具有防磁能力是一種積極的做法。但是，如果水表本身除了具防磁能力之外，也能兼具磁干擾偵測的功能，更可達到主動嚇阻竊水行為的功效。只要自來水用戶在水表旁邊放置磁石，水表馬上自動記錄磁干擾天數，並立即顯示在液晶顯示幕上。如此，電子水表的防磁效果就更為完備。

參、通訊方式

電子式水表可經由訊號線，將水表訊息傳送給遠隔顯示器或讀表介面(自動讀表)。這裡所謂的水表訊息，主要透過脈波(Pulse)或編碼(Encoder)方式傳送。以上2種傳送方式最大的差別就在於，一旦訊號線被剪斷再接回去之後，以脈波方式傳送的水表，其遠隔顯示器所顯示的積算值，會與水表上的積算值不同。但是以編碼方式傳送的水表，不論訊號線被剪斷多久，只要再接回去，遠隔顯示器所顯示的積算值絕對與水表同步。我們可以用一個簡單的比喻，來說明為什麼會有這樣的差別。

假設有甲、乙兩人，甲有手錶，乙沒有手錶。乙可以用2種方式從甲得知現在的時間。一種是乙要求甲每經過一小時就拍他一下肩膀(一個脈波訊號)，理論上只要乙每被拍一下肩膀就在心裡將現在的時間增加一小時，這就是目前的時間了。但是，萬一某甲剛好有事外出因而錯過了拍肩膀的工作(訊號線被剪斷)，就算後來某甲又再回來。這時某乙心裡的時間已經比某甲手錶上的時間慢了。

第2種方式就是當乙想要知道時間的時候，就拍一下某甲的肩膀。某甲就直接告訴他現在是幾點幾分(編碼訊號)。如此某乙不但不必費心去記住現在的時間，同時也不怕萬一某甲外出(訊號線被剪斷)，再回來以後時間會亂掉。

基於以上的了解，當我們在選擇水表通訊方式的時候，應當有下列幾點基本觀念。

- 1.如果選用脈波方式通訊的水表，一定要特別注意訊號線的維護工作。包括防止訊號線不小心被剪斷、雜訊干擾(如馬達、引擎、雷電) ... 等。都會造成遠隔顯示器無法與水表同步顯示的困擾。
- 2.如果在流量監控系統中，選用脈波方式通訊的水表。負責監控工作的電腦必需額外負擔水表積算的功能。換句話說，電腦必需隨時儲存每一個水表目前的積算值，一旦收到某一水表的脈波訊號之後，立即將該表的積算值累進一個體積單位。如此才能得知目前的積算值。
- 3.由於近年來數據通訊技術的突飛猛進，使得數據通訊的穩定性大為增加。再加上各種防錯的技巧(如 Check Sum, Parity Check等)，使得編碼方式傳送資訊的可靠度大為提升。因此，在許多不容出錯的場合(如自動抄表業務)，經常是以編碼的方式來傳送水表的積算值。
- 4.目前水公司監控系統大都是採用電流(DC 4-20mA)、電壓(DC 1-5V)的通訊方式。因此，

如果要增加數據通訊(編碼方式)的功能,就不能以現有規格的輸出入接腳執行控制功能。但是可以利用個人電腦上面的標準配備 — RS-232, 直接進行數據通訊。

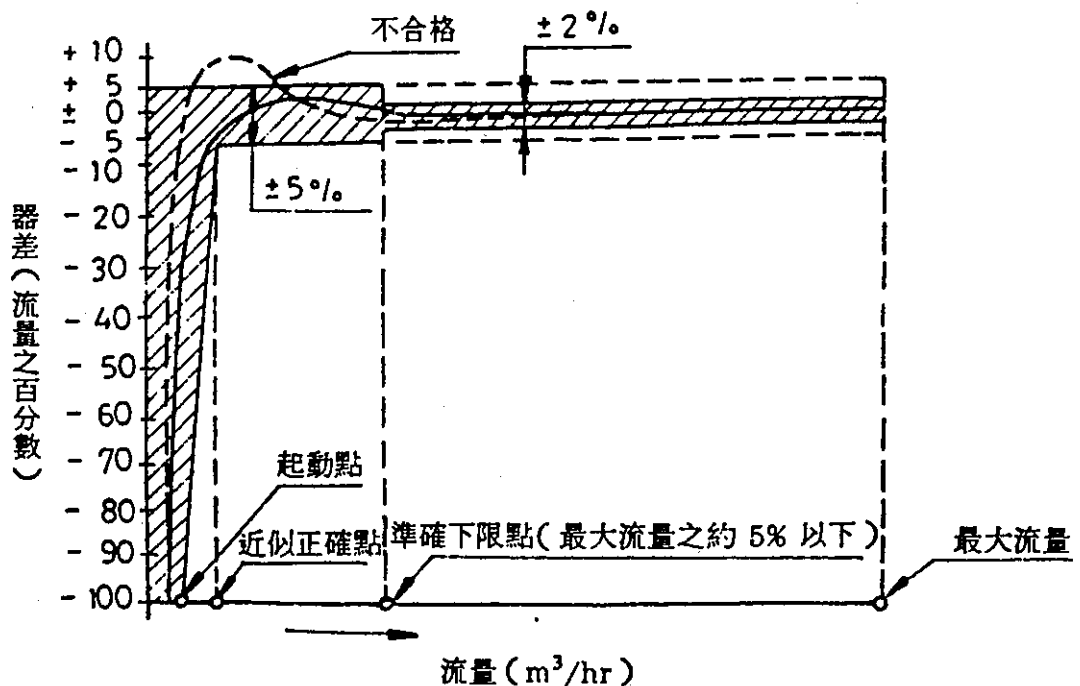
水表的通訊方式是採脈波或編碼,表面上看來似乎沒什麼差別。但是誠如以上的說明,如果我們在選擇水表時,乎略了兩者的差異,將會造成日後使用上的困擾。

肆、精確度與功能

電子式水表與傳統機械式水表最大不同的地方,就是以電子線路取代了複雜的齒輪組。這一取代絕非只是一種替代品,而是我們可以透過各種電子線路的設計與電腦軟體的開發,來提高水表的精確度及功能。

一、精確度的提高

根據 CNS 565『水量計檢驗法』規定 [7], 近似正確流到準確下限流量器差需在 $\pm 5\%$ 以內。從準確下限流到最大流量器差需在 $\pm 2\%$ 之內(圖二)。而電子式水表從近似正確流到最大流量,都能保持 $\pm 2\%$ 以內的器差值。



由於水表乃自來水公司計量收費的依據，如果說水表跑得快比較準(器差±2%)，跑得慢就比較不準(器差±5%)。對買賣雙方來說似乎有失公平。更何況一般推測式機械式水表在低流量時，較偏向於負器差。換句話說，就是用戶用的水較多，水公司收的錢較少。全省以307萬自來水用戶計算，如果全部改用電子式水表，因為精確度的提高，估計每年可增加水費收入三千八百多萬[8]。

二、功能的增加

電子式水表除了和機械式水表同樣具有積算值顯示的功能之外，它還具有下列各種功能。

1. 瞬間流量：流量計可當流速計使用。

2. 漏水偵測：記錄水表長時間連續不停轉動(可能是漏水)的天數。除水表本身會顯示漏水天數外，同時將狀況傳送給遠隔顯示器，或透過自動讀表存入水公司的電腦。當印製水費單時，可同時提醒用戶注意改善。如此不但可節約水資源，更可避免用戶不知漏水，因水費突然巨增，而造成水公司的困擾。

3. 移位偵測：記錄水表長時間不轉動的天數。由此研判可能有以下幾點原因：(1) 水表被移開水管(竊水)(2) 水表故障(如葉輪卡死)(3) 用戶不使用自來水。當水公司發現有移位狀況，可主動派人到用戶地點，了解水表安裝及使用情形，避免日後發生糾紛。

4. 反向安裝偵測：記錄水表長時間反轉的天數。水表會發生長時間反轉，很可能是人為因素(竊水)。當水公司發現有此情況，可主動派人到用戶地點，了解水表安裝及使用情形，避免日後發生糾紛。

5. 磁干擾偵測：一般電子式水表加以適當的磁遮蔽之後，應可具有抵抗2000高斯以上外加磁場的能力。但是主動記錄磁場干擾，更具有積極嚇阻的作用。只要用戶拿一塊磁力稍強的磁鐵放在水表旁邊，雖然對水表的計量功能毫無影響。但水表仍會主動偵測出磁干擾，馬上在水表及遠隔顯示器的液晶顯示器上，顯示"磁"的警告訊息。同時會將磁干擾的天數記錄下來，隨時可從水表、遠隔顯示器與自動讀表得知。

6. 電力不足警示：雖然電子式水表的耗電量非常小，使用自備電池，可維持八年以上不需更換。但為了確保計量水表功能正常，當電池電力因長期的消耗而降至警戒線以下時(尚可使用四至五個月)，水表會主動偵測出電力不足的情況。馬上在水表及遠隔顯示器的液晶顯示器上，顯示"■"電池符號。同時在進行自動讀表時，會將此訊息一併送回水公司，讓公司方面可以立即派人處理。

傳統機械式水表一旦安裝在用戶家中，除了每2個月例行抄表之外，其餘時間可說是任其自生自滅。用戶在這2個月期間內是否有竊水行為(如水表移位、反向安裝等)? 水公司也不易察覺。但是，如果安裝的是電子式水表，水公司將可化被動為主動。不但可隨時偵測用戶是否有竊水的嫌疑。當水公司發現用戶家中有漏水的可能時，還可以主動提醒用戶防治漏水。這對水公司服務品質的提升，應當有很大的幫助。

伍、結論

以電子線路取代傳統機械式的齒輪組，是近年來世界各先進國家發展水表的趨勢。透過微電腦的複雜計算，不但提高了水表的精確度。更因為電子式水表在本質上具有的通訊功能，使抄表業務的自動化工具體可行。

電子式水表的開發工作，是一項複雜的科技整合。除了流體力學、量測技術之外，材料技術、感測技術、電子技術、通訊技術、軟體工程等，都是開發過程中需要逐一克服的難題。

本文除了概略介紹上述各項技術之外，我們也針對電子水表的感測原理與防磁功能，做一番深入的探討。發現適當的防磁功能對電子式水表是必需的。至於要能抵抗多少高斯以上才是恰當。以作者實際測試的經驗，以及考量目前國內一般家庭所能拿到的強力磁石。建議二仟高斯以上的防磁能力，應當是個合理的要求。

另外我們也探討了電子水表的2種通訊方式——脈波(Pulse)與編碼(Encoder)。要確保遠隔顯示器(或讀表介面)的積算值與水表同步，編碼的訊號傳送方式是唯一的選擇。

最後，我們討論了電子式水表的精確度與各種功能。就精確度方面而言，從近似正確流到最大流量，都能保持±2%的器差範圍以內。如此，對自來水買賣雙方來說，才是公平合理的度量衡器。其次，就電子式水表的各種功能而言，除了具有積算功能之外，它還具有瞬間流量、漏水偵測、移位偵測、反向安裝偵測、磁干擾偵測、電力不足警示等功能。傳統機械式水表一旦安裝在用戶家中，就不容易掌握水表的使用情形。但是，如果安裝的是電子式水表，水公司將可化被動為主動。不但可隨時偵測用戶是否有竊水的嫌疑。當水公司發現用戶家中有漏水的可能時，還可以主動提醒用戶防治漏水。這對水公司服務品質的提升，應當有很大的幫助。

陸、參考文獻

1. R. W. Miller, Flow Measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York (1983)。
2. 黃佑仲, "電子式水量計開發及遙測技術", 流量量測技術研習會講義, 第4-1~4-29頁, 度量衡國家標準實驗室, 民國80年。
3. ISO 5168, Measurement of Fluid Flow - Estimation of Uncertainty of a Flow-Rate Measurement, International Organization for Standardization, Germany, 1978.
4. 林建財, "自來水用戶抄表作業與工作能量研究報告", 第七屆自來水論文發表會論文集, 第215-230頁, 中華民國自來水協會, 民國79年11月。
5. 張煦、李學養譯, 磁性物理學, 聯經出版事業公司, 臺北 (民國76年)。
6. 電子式水量計之防磁效果及外在磁場強度對起動流量之影響研究, 工業技術研究院量測技術發展中心, 臺北 (民國80年)。
7. CNS 565, 水量計檢驗法, 經濟部中央標準局, 臺北 (民國76年)。
8. 黃佑仲, "抄表作業自動化之研究", 第九屆自來水論文發表會論文集, 中華民國自來水協會, 民國81年。