

智慧水務決策支援系統 (WatNET) 應用於分區計量管網 (DMA) 營運績效提升之案例研究

吳勇興¹ 林建財² 陳昭仁³ 蔡泰山⁴ 江舟峰⁵

1. 兼任研究員/中國醫藥大學風險分析中心

2. 市政顧問/宜蘭市政府

3. 主任技師/合城營造工程有限公司

4. 工程員兼股長/台灣自來水公司第一區管理處新山淨水場

5. 教授/中國醫藥大學公共衛生學院

摘要

2017年5月AlphaGo擊敗人類棋王柯潔，宣示全球人工智慧AI時代來臨。自來水供水管網有如圍棋棋盤密密麻麻，但是比圍棋更具挑戰性，因為管線暗藏地下，不像圍棋明顯可見。本研究開發智慧水務決策支援系統 (WatNET)，已取得臺灣發明專利許可，並針對國內某微小尺度 (micro-scale) 之分區計量管網 (District Metering Area, DMA)，完成案例營運績效之評估與診斷。首先以平時累積之人工抄表歷史數據為基礎，結合管網GIS配置圖，界定標的區之分區邊界。進而採用自動抄表裝置，即時監測標的區內所有表位之連續水量變化，並連續介接至WatNET系統，匯集成管網大數據 (big data) 資料庫，據以進行演算分析，即時展示管網營運4大績效指標：售水量/率、無收益水量/率 (NRW)、實際損失水量/率、表觀損失水量/率，讓管理者可隨時掌握全盤營運績效，並利用系統所提供之改善建議，快速、準確因應，且能於改善作業完成1 hr內，迅速掌握改善後之績效。

本案例研究結果顯示，其漏水率係由DMA未封閉所造成，於開挖封閉後，日均售水率立即由15-22% 上升至75-93%。此外，逐時數據分析結果顯示，2-hr均售水量對售水率呈現正比關係，且有逐漸飽和之趨勢，因此，若能避免水表操作低於分界流量，可提高售水率及售水營收至少6.6%。

關鍵詞：智慧水網、分區計量 (DMA)、決策支援系統 (DSS)、管網營運績效指標、無收益水量 (NRW)

1. 前言

2017年5月AlphaGo擊敗人類棋王柯潔，成功宣示全球人工智慧 (Artificial Intelligent, AI) 時代來臨，讓各界對未來充滿了希望及恐懼，可想見的是趕上AI列車就是希望。自來水供水管網有如圍棋棋盤密密麻麻，但是比圍棋更具挑戰性，因為管線暗藏地下，不像圍棋明顯可見。

供水管網相當於水務公司的銷售網，供水管網的水稽核 (water audit) 相當於營收稽核 (revenue audit)。近年來由於全球暖化及氣候變遷，造成水資源短缺，水資源開發越來越困難，激起各界日漸重視水資源相關環保意識。供水管網中所供應的是經過淨水場處理的乾淨飲用水，其價值比原水的水資源更高，原水水價與飲用水水價差異可能高達十倍，甚至更高，由此可見精準掌握供水管網之水稽核，方能做好營收稽核，提高水務公司的經營績效。有鑑於此，美國水工協會 (American Water Work Association, AWWA) 及國際水協會 (International Water Association, IWA) 於1997-2000共組水損失工作小組 (Water Loss Task Force)，終於在2003年發表了水損失控制的全球最佳管理實務 (Best Management Practices, BMPs)，提倡採用國際標準格式水稽核法 (water audit method) 作為所有水及營收損失控制技術 (water and revenue loss control technologies) 的核心基礎 (Kunkel, 2003; AWWA, 2009)。其中所謂國際標準格式水稽核法係由Alegre et al. (2000) 發表於IWA的供水企業績效指標最佳實務手冊。

Kundel (2003) 指出過去對於供水管網的水及營收損失缺乏統一的定義，突顯2000年以前，水質較受重視，而水損失則未受到應有的關注。過去，全球慣用未認定水 (unaccounted-for water) 來代表供水管網中未被認定的水量或百分比，但不管是已認定水 (accounted-for water) 或未認定水皆未曾被提出全球公認的定義，導致各國或各地水務公司對於供水管網的水損失或營收損失的評估基礎不同，彼此間的績效無法互相比較，當然也就難以做好營運績效管理。

雖然AWWA (2009) 已提倡採用國際標準格式水稽核作為管理工具，而且AWWA (2014a) 也提供了最新免費的水稽核軟體 (AWWA Free Water Audit Software) 可供下載使用，惟該軟體需要人工輸入大量數據，容易出錯，且要自行完整蒐集所需輸入之數據也相當困難。

本研究經多年研發，開發智慧水務決策支援系統 (WatNET)，已取得臺灣發明專利許可 (吳與林，2019)，並經現地驗證可行，採用創新AI儀表板 (AI dashboard, AIDB) 技術，可介接連續水量監測物聯網 (Internet of Thing, IoT) 所感測及蒐集之雲端大數據 (big data)，並以電腦自動演算法，隨時監控供水管網計量區 (District Metering Area, DMA) 之4大營運績效指標：售水 (revenue water, RW) 量/率、無收益水 (non-revenue water, NRW) 量/率、實際損失水 (real loss water, RLW) 量/率及表觀損失 (apparent loss water, ALW) 量/率。

2. 實驗方法

2.1 案例標的供水管網計量分區 (DMA) 及水量監測物聯網 (IoT)

本研究之案例標的DMA位於北臺灣，簡稱DH小區，其地理位置及水表IoT配置如圖1所示，管網中包含：1只B級機械式供水管理用表（口徑：80 mm）、16只B級機械式用戶總表或獨立表（口徑：2只40 mm及14只20 mm）及2個制水閥（ V_1 及 V_2 分別位於管網計量區之供水端及支援水端）。



註：未標示口徑水表皆為 $\phi 20$ mm

圖1、標的供水管網計量分區 (DMA) (簡稱DH小區) 及水量監測物聯網 (IoT) 配置圖

由於機械表本身缺乏水量自動紀錄及傳輸功能，本研究採用市售無線傳感器自動連續讀取機械式水表數據，並以無線集中器自動匯集各傳感器所傳輸之水表數據，再以行動數據機傳輸至雲端系統，即可由雲端的智慧水務決策支援系統 (WatNET) 執行各項模組運算及所需決策圖表之自動繪製、展示及即時更新。

2.2 DMA營運績效指標及其水稽核演算法 (water audit algorithm)

DMA之4大營運績效指標包含：售水 (revenue water, RW) 量/率、無收益水 (non-revenue water, NRW) 量/率、實際損失水 (real loss water, RLW) 量/率及表觀損失 (apparent loss water, ALW) 量/率。

售水量 (RW) 為標的DMA中所有用戶總表及獨立表，於特定數據擷取均期 (時間間距) 下，單位時間平均用水量加總，如：時均售水量 (hourly averaging RW flowrate) 即是以每小時為數據擷取均期之平均售水量。

無收益水量 (NRW) 為標的DMA中之供水量扣除售水量之結果，推估時所輸入之供水量及售水量必須採用相同均期方具意義。售水

量如上述，淨供水量 (net supply water, NSW) 則為標的DMA中所有供水 (其水流方向對DMA邊界為言為輸入，故取正值) 及支援水 (其水流方向對DMA邊界為言為輸出，故取負值) 之所有管理用表於特定數據擷取均期下，單位時間平均水量加總，如：時均淨供水量 (hourly averaging NSW flowrate) 即為以每小時為數據擷取均期之平均供水量。

實際損失水量 (RLW) 的推估較為複雜。其原理係假設管線有破漏，當用水戶都暫時沒有任何用水時 (如：半夜或凌晨)，此時供水量的最小值即為實際損失水量。這是過去無法同時連續監控供水量及售水量時的作法。本研究則採用自動抄表系統同時連續監控供水量及售水量，因此可推估指定均期之無收益水量 (NRW)，以電腦自動於指定之觀測期間，找出無收益水量最小值即為該指定均期之實際損失水量。

表觀損失水量 (ALW) 的推估則假設沒有其他無收益事件用水 (如：火災)，於指定觀測期間及數據擷取均期下，將無收益水量 (NRW) 扣除實際損失水量 (RLW) 即為該期間之指定均期表觀損失水量。

售水率 (RW%)、無收益水率 (NRW%)、實際損失水率 (RLW%) 及表觀損失水率 (ALW%) 則分別為：在相同指定均期下，依序以售水量 (RW)、無收益水量 (NRW)、實際損失水量 (RLW) 及表觀損失水量 (ALW)，除以淨供水量 (NSW)，乘以100% 而得。

2.3 智慧水務決策支援系統 (WatNET)

本研究開發建置WaNET決策支援系統 (Decision Support System, DSS)，其系統架構如圖2所示，包含：1個資料庫、3個查詢類模組、2個演算類模組、2個模擬類模組，以及1個無收益水量 (NRW) AI儀表板 (NrwdIS)，可彙整各項即時數據及模組演算結果，並整合為NRW管理所需之即時資訊。NrwdIS有別於AWWA (2014) 所提供之水稽核儀表板，因為NrwdIS可介接水表IoT大數據，所以稱為AI儀表板 (AI dashboard, AIDB)。

3. 結果與討論

3.1 案例標的計量分區封閉測試

本研究於2016年針對案例標的供水管網計量分區 (簡稱DH小區) 進行測試。DH小區位於北臺灣，原設置管理用表口徑為150 mm，其分界流量規範值為7.5 CMH，遠高於小區內前4期用戶抄表數據所統計之總用水量範圍2.25-2.98 CMH。為了提高水量測值準確度，將管理用表口徑調降為80 mm，其分界流量規範值為2.48 CMH。

智慧水務決策支援系統 (WatNET)

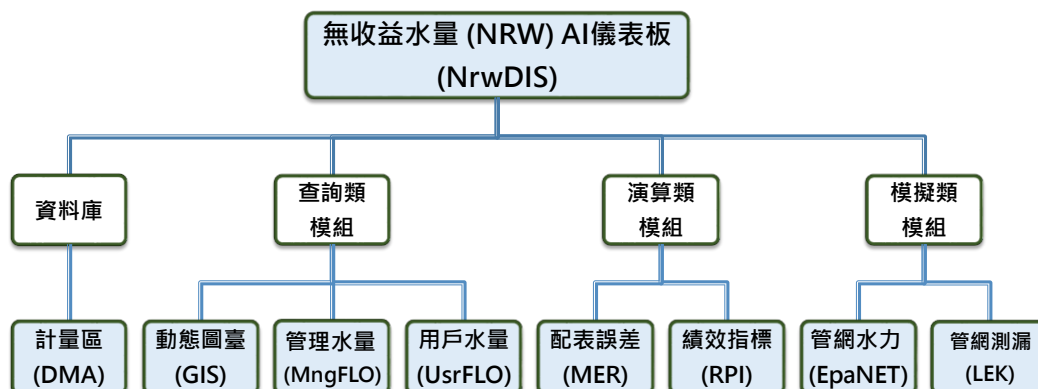


圖2、智慧水務決策支援系統 (WatNET) 之系統架構示意圖

2016/11/4-12進行DH小區封閉測試，如圖3所示，分為P1-P3共3階段執行。P1期間可見供水量遠高於售水量，顯示小區未封閉，日均售水率僅15-22%；P2期間開挖並新增制水閥處於過渡測試期間；P3期間關閉新增制水閥後，可見供水量隨即接近售水量，顯示已完成小區封閉，日均售水率也已攀升至75-93%。

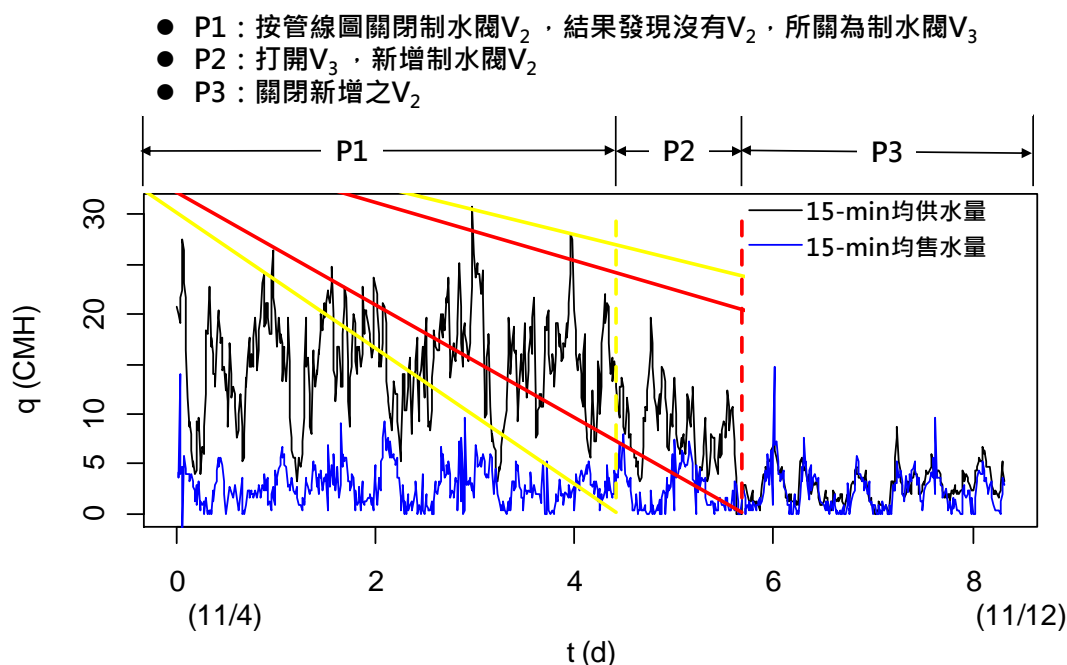


圖3、2016/11/4-12執行案例標的DH小區封閉測試結果

3.2 案例標的無收益水量AI儀表板 (NrwdIS) 建構測試

本研究針對DH小區，建構NrwdIS儀表板，整合所需之決策資訊，

如圖4所示，包含：(1) 輸入介面，(2) DMA配置地理資訊系統 (Geographic Information System, GIS) 圖，可設定觀測期間及均期之(3) 供水量及售水量時序圖，(4) 售水率時序圖，(5) 無收益水量 (NRW) 時序圖/實際損失水量檢核圖，(6) 4大績效指標 (售水率/無收益水率/實際損失水率/表觀損失水率) 長條圖，(7) 所有表位及特定表位配表誤差分析圖，可隨時自動提醒DMA管理者如何改善營收績效。

由圖4中的2-hr均NRW時序圖/實際損失水量檢核圖可見，NrwDIS根據指定觀測期間 (2016/11/09-12) 及均期 (2-hr均) 之NRW的最小值 (-1.2 CMH) 小於零流量，自動判斷實際損失水量為0 CMH，也就是沒有可觀測到的實際損失水量。因此，對於DH小區而言，於觀測期間，其NRW皆可歸屬於表觀損失水量，而非實際損失水量。

過去由於沒有同時連續監測供水量及售水量，而只是連續監測供水量，因此USAID (2008) 或其他常見NRW技術指引都只能建議採用夜間供水量之最小值 (假設此時用戶都沒有用水) 來推估實際損失水量。本研究同時連續監測供水量及售水量，並據以連續監測NRW (亦即供水量扣除售水量)，因此可採用NRW之最小值推估實際損失水量。

由圖4中的4大績效指標長條圖可見，本研究推估DH小區於指定觀測期間 (2016/11/09-12)，其4大營運績效指標：售水率、無收益水率、實際損失水率及表觀損失水率，分別為：88.3 %、11.7 %、0.0 % 及11.7 %。實作上，也可以改用售水量、無收益水量、實際損失水量及表觀損失水量作為營運績效指標，搭配營運成本及水價，以推估對營收之影響程度。

此處表觀損失水率高達11.7 % 遠高於一般認知的水表誤差值。一般認知水表誤差應小於2 %，經供水表及用戶表加總頂多誤差4 %。事實恐非如此，因為由圖4中的所有表位之配表分析圖可見，管理用表由於事先有調降口徑 (由150 mm降為80 mm)，其操作流量有37 % 數據處於最大誤差 < 5 % (操作流量介於最小流量至分界流量之間)，其餘63 % 數據則可維持在 < 2 % 流量誤差 (操作流量介於分界流量至超載流量之間)。但是16只用戶表中有高達13只 (占81 %) 之操作流量皆曾出現誤差 > 5 % 的情形 (操作流量介於啟動流量至最小流量)。

由於DH小區之管理用表最大誤差為5 %，加上有81 % 用戶表之最大誤差大於5 %，因此可研判DH小區之表觀損失水率高達11.7 % 確實是有可能的。圖4中的所有表位之配表分析圖可以自動預警通知DMA管理者有哪些表位需要調整口徑大小，以降低表觀損失水率，而能直接提高售水量及售水營收。

事實上，同樣找回1度水，管線破漏造成的實際損失水量的單價只是成本價 (cost)，而表觀損失水量的單價則是銷售價 (price)，銷售價可能是

成本價的5-10倍，而且降低表觀損失水量所需成本較低、作業也較簡易，是最有效且快速提高水務公司營收績效的管理策略。Wagoner (2018) 也曾以美國德州案例指出，找回實際損失水量的單價是成本價0.26美元，而表觀損失水量的單價則是銷售價2.5美元，二者單價相差近10倍。

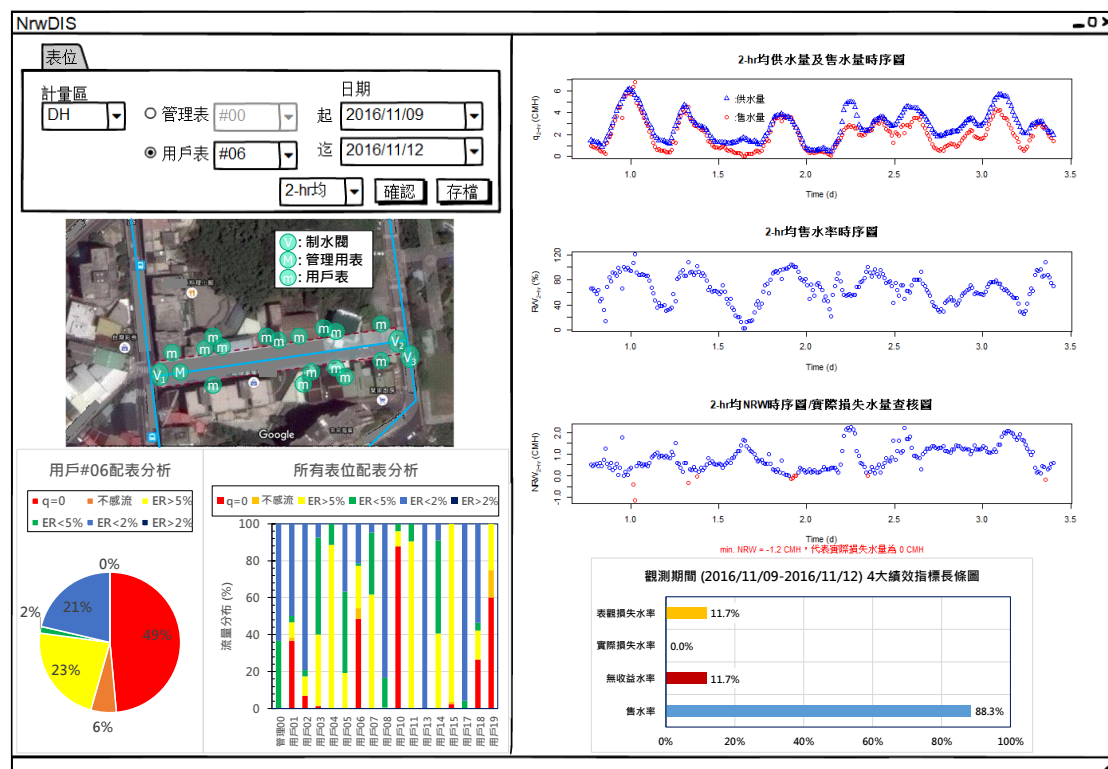


圖4、2016/11/9-12執行案例標的DH小區封閉後無收益水量AI儀表板 (NrwdIS) 建構測試結果

此外，DH小區案例及國外許多案例都顯示水表口徑不適當所造成的誤差往往是表觀損失水量最大的貢獻來源。AWWA (2014b) 就曾指出美國波士頓市於1990年執行縮小水表口徑計畫，成果顯示每天為該市增加抄表水量3,000噸，換算5年內，可增加自來水費及污水處理費總收入共680萬美元。國內隨水費徵收費用包含：水源保育與回饋費、垃圾清除處理費及污水處理費，表觀損失水量除造成水費短收，同時也會此三項代徵收費用短收。

3.3 案例標的之售水量變化對售水率的影響

由於圖4的2-hr均售水率時序圖顯示售水率處於動態變化，而非固定值，本研究進一步探討DH小區的2-hr均售水率與售水量的關係。圖5所示為DH小區於DMA封閉後之觀測期間 (2016/11/09-12)，2-hr均售水量對售水率之變化趨勢圖彙整結果。圖上可見2-hr均售水量對售水率之影響成正比上升趨勢，且逐漸飽和，研判係因較多用戶水表操作流量大於其分界流量規範值時，可降低表觀損失水率，同時提高售水率。

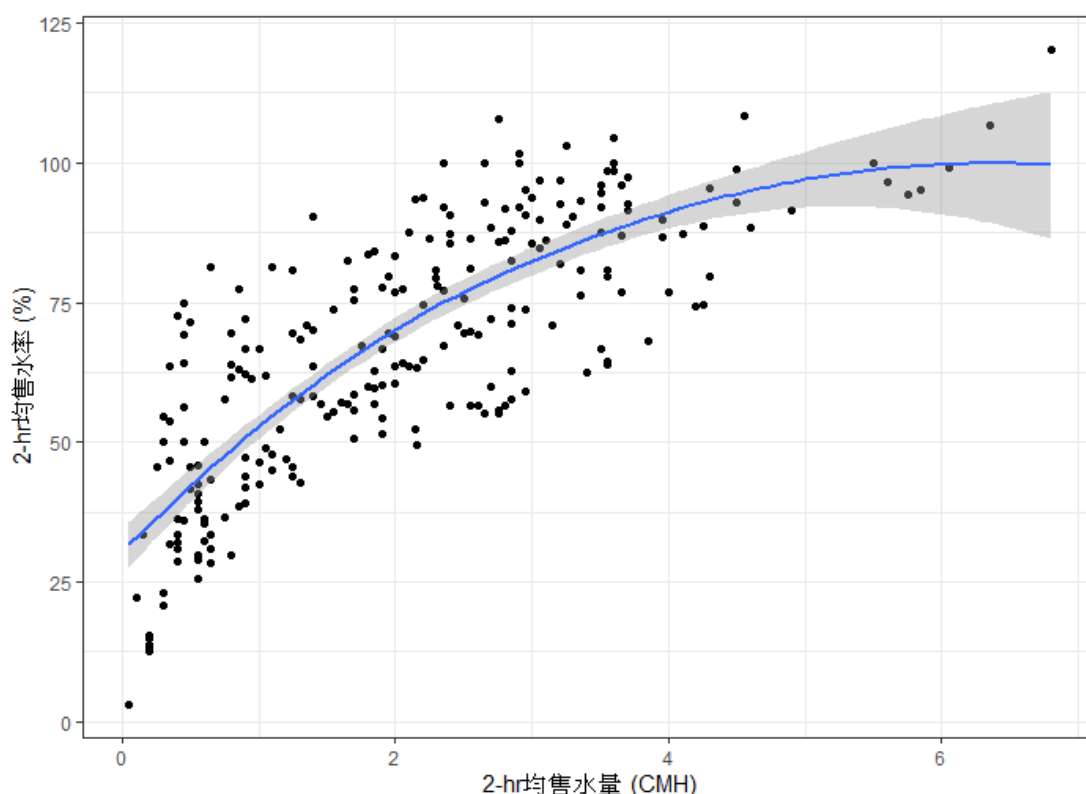


圖5、2016/11/9-12執行案例標的DH小區封閉後2-hr均售水量對售水率之變化趨勢圖彙整結果

圖5的趨勢圖顯示2-hr均售水率最高值可達100%，由此亦可推估實際損失水率為0%。此趨勢圖可提醒DMA管理者，DMA的售水率並非固定值，而是會隨著售水量的增加而上升，最後達到最高的飽和值。DMA管理者可藉此飽和值，研判可能之實際損失水率。

此外，即使現有DMA未執行連續密集的自動抄表，只要有定期抄表數據，如：現行每月或隔月人工抄表，亦可彙整長期的抄表數據，繪製類似圖5之售水率對售水量變化趨勢圖，並據以推估可能之實際損失水率及表觀損失水率，並初步研判是否需要進一步採用自動抄表及本研究所提供之無收益水量AI儀表板 (NrwdIS) 進行系統診斷。

3.4 案例標的水表不準確對營收之影響

本研究推估案例標的DH小區的表觀損失水率為11.7%，也就是說DH小區有11.7%的用戶用水量未被用戶表紀錄，或由於管理總表口徑略有過大所引起的誤差，而造成最多可能高達11.7%的營收損失。

根據圖4中之管理用表配表分析結果，顯示其水表誤差 < 5% 及 < 2% 數據分別占37% 及63%。據此可推估供水量之最大可能誤差為3.1% (= 5% × 37% + 2% × 63%)，而表觀損失水率為11.7%，扣除管理用表造成之供水量誤差，可推估用戶表造成之售水量誤差至少有8.6%。

由於現有常用營業用水表可控制之最小誤差為 $< 2\%$ ，而且從水表的規範來看，水表誤差 $> 2\%$ 之主因為水表未選用適當口徑，因此研判調降DH小區之用戶水表口徑後，可讓所有用戶水表之操作流量範圍都能介於分界流量至超載流量之間，使誤差控制 $< 2\%$ ，即可至少降低表觀損失水量6.6%，也就是至少可提高水費營收6.6%。

本研究於試驗期間所使用之所有水表皆為新裝，因此可排除水表老舊所造成之誤差。根據吳與江 (2018) 研究結果顯示，汰換老舊水表本身平均就能增加售水率5.2%。加上本研究所推估調降口徑可增加售水率6.6%。針對現有使用中水表，進行水表口徑評估，汰換為新的適當口徑水表，綜合此二研究成果，研判可增加售水率高達11.8%。

表1所示為國內不同口徑B級及C級水表流量規範之比較。由表中可見，調降水表之口徑及選用C級表二者皆可調降分界流量，以降低水表誤差。但是，水表的價格也是需要考量的。由於通常C級表的價格遠高於B級表，而且大口徑水表價格又高於小口徑水表，因此可合理研判選用B級表並調降水表口徑的作法，會比單靠改用C級表調降水表之分界流量規範值，更具營收改善效益。

表1、我國不同口徑B級及C級水表之流量規範比較

水表 界定 N	口徑 (mm)	超載流量 q_s (CMH)	常設流量 q_p (CMH)	分界流量 q_t (CMH)		最小流量 q_{min} (CMH)	
				B 級	C 級	B 級	C 級
1.5	13	3.0	1.5	0.12	0.0225	0.03	0.015
2.5	20	5.0	2.5	0.2	0.0375	0.05	0.025
3.5	25	7.0	3.5	0.28	0.0525	0.07	0.035
10	40	20	10	0.8	0.15	0.2	0.1
15	50	30	15	3	0.225	0.45	0.09
35	75	70	35	7	0.525	1.05	0.21
60	100	120	60	12	0.9	1.8	0.36
150	150	300	150	30	2.25	4.5	0.9
250	200	500	250	50	3.75	7.5	1.5
400	250	800	400	80	6	12	2.4
600	300	1,200	600	120	9	18	3.6

資料來源：經濟部標準檢驗局 (2008)；台灣自來水公司 (2018a; b)

中華民國自來水協會 (2018) 對於進階用戶抄表管理系統導入之研究結論顯示：全面導入進階用戶抄表管理系統，因整體架設成本較目前使用的機械表昂貴，且人工抄表工資低廉，整體節省人力不敷裝置成本，遑論智慧水表後續維護費用，考量成本收益，明顯誘因不足。

由此可見，目前推動本研究所開發之智慧水務決策支援系統

(WatNET) 可能也會面臨成本效益誘因不足之挑戰。針對成本效益誘因不足，本研究參考AWWA(2009) 所提出之水稽核管理方案及AWWA(2014b) 所提出之水表口徑評估方案，研擬解決方案如下：

1. 若能將WatNET定位為系統診斷工具，只需定期於評估期間自動抄表，針對售水率偏低之DMA，進行健檢，以找出問題表位清單，並據以調整為適當口徑，則能有效降低數據傳輸成本並提高營收效益。
2. 由於定位為定期評估工具，若採用全套電子式水表作為水表物聯網 (IoT) 之基礎架構，則無法降低設置成本。反之，若採用機械式水表搭配外掛式傳感器作為基礎架構，則只需針對售水率偏低之DMA，定期安裝外掛式傳感器進行系統診斷，則能大幅降低設置成本，提高益本比。

4.結論與建議

本研究以管網計量分區 (DMA) 為範圍，採用自行研發之專利技術，開發無收益水量 (NRW) AI儀表板 (NrwDIS)，介接DMA內所有水表物聯網 (IoT) 之連續水量大數據 (big data)，可隨時展示DMA之營運績效指標及水表誤差狀況，並能列印問題表位清單，自動提醒DMA管理者調整水表口徑，以降低NRW並提高售水營收。經案例小區測試後，具體結論與建議如下：

1. 即使全部換裝新水表且管線無破漏，案例結果顯示NRW仍高達11.7%，扣除管理用表NRW之3.1%，用戶表NRW貢獻為8.6%。
2. 有高達81%的用戶表口徑過大，若能全部調整為適當口徑，研判可增加售水營收6.6%。
3. 吳與江 (2018) 研究顯示汰換老舊水表能增加售水率5.2%。本研究發現調降口徑可增加售水率6.6%。總計可增加售水率及售水營收11.8%。建議針對使用中水表，定期進行水表口徑評估，以適時汰換不當口徑水表。
4. 本研究以水表流量曲線進行誤差分析，發現主要誤差來源為水表未操作於最適流量範圍 (分界流量至超載流量之間)。改善方案有二：(1) 調降水表口徑，(2) 改為C級水表。考量大口徑水表單價遠高於小口徑水表，且C級表單價遠高於B級表，建議採用B級表調降口徑，更能有效提高售水營收。
5. 中華民國自來水協會 (2018) 研究顯示全面導入用戶自動抄表會造成設置及數據傳輸成本過高。本研究建議採用機械式水表搭配外掛式傳感器作為水表物聯網 (IoT) 之基礎架構，且只針對售水率偏低之重點區位，定期安裝外掛式傳感器，執行自動抄

表，完成系統診斷，開列問題表位清單，據以改善，可大幅降低設備安裝及數據傳輸成本，提高益本比。

參考文獻

1. Kunkel, G. (2003) Applying Worldwide Best Management Practices in Water Loss Control. Committee Report—AWWA Water Loss Control Committee. Journal AWWA, 95(8) 65-79.
2. AWWA (2009) Water Audits and Loss Control Programs, AWWA Manual M36, 3rd Ed.
3. Alegre, H., Hirner, W., and Baptista, J.M. (2000) Performance Indicators for Water Supply Services. Manual of Best Practice Series, IWA Publishing, London.
4. AWWA (2014a) AWWA Free Water Audit Software, v5.0 (<https://www.awwa.org/Resources-Tools/Resource-Topics/Water-Loss-Control>).
5. 吳勇興、林建財 (2019) 配水管網預警系統及其方法，中華民國專利證書，發明I658350號。
6. USAID (2008) The Manager's Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses, United States Agency for International Development (USAID).
7. AWWA (2014b) Sizing Water Service Lines and Meters, AWWA Manual M22, 3rd Ed.
8. Wagoner, T. (2018) Non-Revenue Water Analysis, Real Loss Component Analysis, and Economic Gap Analysis for City of Galveston, Texas, Technical Memorandum Draft.
9. 吳勇興、江舟峰 (2018) 國內淨水廠清水水質腐蝕漏水分析及營運管理對策，第35屆自來水研究發表會，2018.11.15，台灣自來水公司第八區管理處。
10. 中華民國自來水協會 (2018) 進階用戶抄表管理系統導入之探討，中華民國自來水協會2018年度研究計畫成果報告。
11. 經濟部標準檢驗局 (2008) 水量計檢定檢查技術規範，CNMV 49，第3版。
12. 台灣自來水公司 (2018a) 台灣自來水公司小型水量計規範，2018.09.12修訂版。
13. 台灣自來水公司 (2018b) 台灣自來水公司大型電子式水量計規範，2018.11.13修訂版。