

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

管網可靠度提升決策支援系統

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-009-010-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學環境工程研究所

計畫主持人：高正忠

計畫參與人員：李沛濠

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 18 日

管網可靠度提升決策支援系統

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94 - 2211 - E - 009 - 010 -

執行期間：94年 8月 01日至 95年 7月 31日

計畫主持人：高正忠

共同主持人：

計畫參與人員：李沛濠

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：

中華民國九十五年十月 日

一、摘要

改善自來水管網可靠度，必須進行合理的供水可靠度分析，以決策可靠的改善策略。然而過往供水可靠度多以單一管線為單位進行分析，且未考量管網損壞後，供水取水量改變的影響，造成供水可靠度的誤估。本研究因而考量制水閥分區與關閉分區所造成的供水能力影響，發展一可模擬管網損壞影響之供水可靠度分析決策支援系統，以有效輔助管網供水可靠度改善策略決策分析。所發展的決策支援系統應用物件導向技術有效整合管網元件，以提升分析效能。並採用多行程技術發展協同決策模組以有效分析複雜的管線損壞管理策略，增進系統之協同決策能力與效能。且發展一圖形化之決策分析模組，結合地理資訊系統有效呈現決策結果之空間分佈特性，並透過所發展之統計分析圖表模組，快速判識損壞影響較重要的管件，以有效提升系統之決策輔助效能。本研究亦應用決策樹分析技術，分析三重區自來水管網監控記錄，發掘出隱藏在管網監控資料中的操作規則，並分析其操作規則的合理性，進一步根據決策樹特性建議可能改善方向，探討發展更合理的管網操作策略的可行性。

關鍵詞：自來水管網、供水可靠度、決策支援系統、管網操作、決策樹、環境系統分析

Abstract: Appropriate reliability analysis is required to determine an effective strategy for improving the reliability of a water distribution network (WDN). However, conventional reliability analysis generally treats a pipe as an independent unit and ignores the effect of unsatisfied demands at nodes while a pipe breaks. The conventional approach could thus misestimate the shortage impact of a pipe failure event. A WDN reliability decision supporting system was thus developed in this study to determine proper improvement strategies based on the impacts from shutting off valve-enclosed segments and unsatisfied demands. A WDN is represented by object-oriented components for managing WDN related information efficiently. A multi-tasking module is developed for implementing multiple decision analysis tasks simultaneously by a multi-thread technique to enhance the computational efficiency of the system. Geographical information tools are applied to present spatial properties of the results obtained by using the system. Functions for drawing statistical charts and tables are provided for identifying critical components. A decision tree method was also applied to analyze the monitoring records of the Sangchun WDN to reveal pump operation rules. These operation rules were analyzed further according to the properties of the decision trees constructed from the monitoring data, and possible strategies for improving these rules were also discussed and suggested.

Keywords: Decision support system; water distribution network; network analysis; environmental systems analysis; pump operation; decision tree.

二、前言與研究目的

自來水事業單位應有效提升自來水管網之供水可靠度，以提升自來水輸送水的效能，增加水資源利用效益及減少事業單位之供水成本。有鑑於此，本研究第一年即發展應用基於制水閥損壞影響，發展一個以提昇管網供水可靠度為目標的換管規劃優選模式。並改善 Kessler 等(1998) 所提出模式及其求解效率，以建立有效的水質監測站網。第二年則發展基於制水閥分區之污染偵測演算程序。並分析上述各模式的適用性及進行適當的修正，第三年(本年度)則發展線上決策支援系統模組，以輔助進行相關決策分析。

管網供水可靠度改善策略之擬定，必須結合合理的可靠度分析，才能決策出有效的改善策略，然而過往供水可靠度的影響分析多是以單一管線為單位進行分析(Fujiwara and Li,1998; Shamir and Howard,1979)，但在實際管網中卻少有所有管線兩端皆設有制水閥的管網配置(Walski, 1993)，且過往供水可靠度模擬一般假設管件損壞前後損壞區以外之取水量並無差異，以此為基礎進行模擬，事實上當管網損壞時周邊節點的壓力及供水量亦將隨之變化，因此將造成供水可靠度評估上的誤差，而影響決策的品質。本研究今年度因而除了結合過往所發展的制水閥分區判識演算法，並進而發展一個可評估管網損壞影響之供水可靠度分析模組，以輔助決策分析尋求合理的改善策略，有效提升管網之供水可靠度。雖然以制水閥分區為單位之供水可靠度分析，可有效簡化原始的複雜管網模擬，然水利模擬模式仍需要大量運算，特別是損壞事件的影響分析，因此本研究發展一個伺服端決策支援管理分析系統，應用物件導向技術將管網物件化，便利系統之整合運用，並結合多行程等技術，發展協同決策模組，以有效提升決策支援之效能。

自來水事業花費不少經費在供水系統上，若不能有效供水不僅使得成本增加，管線損壞或缺水都會造成水壓過小而造成水質劣化，進而降低自來水管網之供水可靠度。國內自來水管網之操作，傳統上是根據操作人員之經驗進行調配，此方式無法有效傳承給新進人員，亦較不易進一步驗證評估與校正。因此如何有效的進行自來水管網供水調配，為提升自來水管網供水可靠度的重要課題之一。自來水管網供水操作模式，可結合自來水管網模擬模式、需水量預估模式與加壓操作優選模式，以進行決策分析。

自來水事業為有效調配加壓泵，建立 SCADA 系統即時回報管網監測站點之水壓狀態，供監控中心之調配人員之參考，以進行加壓操控之合理調配而累積大量資料，其中並隱含操作人員之調配經驗以及取水特性等水理資訊，卻缺乏有效之分析以輔助自來水管網供水操作決策之應用。因此，本研究嘗試應用資料探勘技術，根據自來水管網之取水屬性以判識出自來水管網之供水特性模式，並搭配過往自來水供水操作模式之考量，嘗試發展一可反應自來水管網水理變化屬性之加壓操作決策模式，以輔助管網供水操作人員調配自來水加壓供水泵，改善自來水管網之經驗法則，並提升自來水供水效能。

三、文獻回顧

雖然過往管網供水可靠度相關研究曾提出一些優選模式或演算程序(Dandy and Engelhardt, 2001; Fujiwara and Li, 1998; Shamir and Howard, 1979)，唯這些模式都是針對特定問題而建立，實際管網供水可靠度之提升及決策分析均需要考量管網管線連通以及水利特性改變狀態，因而 Goulter(1992)指出有必要發展一個適當的決策支援系統，輔助決策者進行決策分析。過往雖然也有學者發展整合管網模擬模式與地理資訊系統的圖形化模組系統，以輔助自來水管網的規劃設計工作。比如 Huang 等(1995)與 Taher and Labadie (1996) 即整合管網水力模擬模式、地理資訊系統以及管網設計優選模式，提供決策分析模組。Makropoulos et al.(2003) 整合 Fuzzy 優選演算模式與管網地理資訊系統，發展管網供水管理輔助系統，並將分析結果呈現在管網圖形上，以便利決策結果之解讀。但這些系統均缺乏可有效模擬管網損壞供水可靠度之分析模組。因此，本研究今年度發展可分析供水可靠度之模組與決策分析模組，並發展決策管理伺服系統，提升決策支援的效能，進而改善決策品質。

管網供水可靠度的提升，必須有效掌握管網實際特性，以決策有效的改善策略。然因管網為一個複雜的系統，建立適當的評估模式較費時。其實由管網水利、操作狀態變化的記錄或監測資訊亦可呈現管網之特性，Babovic et al. (2002) 即曾利用自來水管線爆管紀錄

資料庫，應用可包含專業知識(domain knowledge)的 Bayesian Network 資料探勘技術建立管線風險模式(risk model)，根據管線之長度、管齡、爆管次數、管徑等因子，預估管線損壞的機率，並進一步分析出影響管線爆管的重要因子。Ailamaki et al (2003) 則提出一個空間性資料探勘技術，分析自來水水質監測紀錄資料庫，並應用關聯性分析處理空間性的資料，辨識出水質污染事件的形式(pattern)，以輔助偵測自來水水質污染事件，其所提出的技術可應用於時間性與空間性的資料探勘問題上。Bessler et al (2003) 應用決策樹(decision tree)資料探勘技術，以分析蓄水池操作紀錄資料庫，尋找及分析操作的關聯規則，並建立一個考量不同供水月份與進水量的決策樹，且驗證此決策樹的預估準確度，發現較一般線性回歸與經驗式操作準則為佳。由這些研究可看出應用資料探勘技術分析管網狀態資訊及操作規則，是一個頗值得探討的領域。尤其是國內自來水事業處所使用的 SCADA 系統能產生大量自來水管網操作狀態的紀錄資料，甚為適合用以探討管網操作監控特性，本研究因而應用資料探勘技術於自來水管網供水監測紀錄資料，並據以評估與改善自來水管網操控的原則與策略。

四、研究方法

管網供水可靠度分析模組

雖然因管線損壞所關閉的制水閘分區不會直接關閉其他供水區域，但是卻會影響管網各部分的供水壓力，因此降低供水品質。本研究前三年的研究已初步發展出可有效判識管網制水閘分區以及關鍵分區之演算程序，並整合至所發展的決策支援系統中，然為有效分析管網損壞所可能造成的影響，進一步發展可更合理模擬分析此類損壞影響之供水可靠度分析模組。此模組結合 EPANET2 程式庫 (Rossman, 2000)，以模擬當管網在正常狀況或者有部分損壞情況下的整體水利型態。其部分損壞模擬進一步採用 Gupta and Bhawe (1996) 所提出的模擬演算程序，並採用下列由 Wagner et al. (1988)所提出在不同水壓下取水節點可取得的供水量之估算方程式：

$$Q_d = \left(\frac{H - H_m}{H_s - H_m} \right)^{1/2} \cdot c \quad (1)$$

其中 Q_d 為在節點可取得的供水量； H 為模擬模式模擬移除損壞供水區之後在該節點的水壓； H_m 該節點要求的最小供水壓力； H_s 則為該節點可完全供水的壓力值； c 則為該節點的取水量值。節點受損壞之後可得供水量之估算模擬程序，則使用前次模擬所得之可得供水量為其下一階段之取水量值，此程序一直到下一次的模擬可取得供水量與上次估算值相當接近值為止。最後評估模式則可以應用此程序在各節點所估算的可取得水量，計算其與需求水量的差異，加總之後即為整體管網之缺水衝擊量。

決策分析模組

上述發展之損壞影響模組所模擬評估之損壞衝擊，常具有空間變異性，隨著損壞關閉分區在不同管網位置，所造成的損壞分佈亦不同，本研究以線上地理資訊系統公用程式 GeoTools (2005)發展損壞分析模組，以利於分析損壞影響程度及分佈，並以下式估算各別節點之缺水衝擊比例：

$$S_n = \frac{Q_d}{Q_s} \quad (2)$$

其中， Q_d 為管網損壞後節點可得供水量， Q_s 則為節點原始需水量。藉由不同漸層顏色變化，呈現各節點之缺水影響衝擊程度。而各別單一制水閥分區損壞所可能造成的缺水損壞則可透過所發展之模擬分析模組以及分析模組進行有效的分析，然不同制水閥分區因其所在位置以及管網之連結拓撲關係，亦有不同程度的影響衝擊，為便利管網操作維護，具有較大損壞影響之制水閥分區必須有效的率定出來，因此亦結合 JFreeChart (Gilbert and Morgner, 2005)統計圖表公用程式庫發展分區損壞分析模組，將個別制水閥分區損壞所造成的缺水衝擊，以直條圖與排序圖表呈現，以便於分析及比較管網損壞的衝擊。

伺服器端決策支援管理模組

為提升決策支援系統使用端之分析效能，本研究發展一個伺服器端決策管理分析模組，將需要大量運算的管網模擬與決策模式分散至具有較強運算效能之伺服器端，因此除將上述所發展之損壞評估模式整合至伺服器端之決策支援系統，亦將優選決策模式整合至系統中。然為便於分析及未來擴增的需求，本研究應用物件導向技術，將自來水管網資料模型，物件化為管線、取水節點、供水節點、儲水槽、制水閥等，並藉由階層化統一界定線狀以及點狀等物件具共通特性之功能與存取系統，便利伺服器端決策支援管理模組之整合應用。

伺服器端與使用者端間互動溝通，乃採用 JAVA SOCKET (SUN, 2005)技術，設計資料傳輸、命令執行、資料回傳等溝通模組，讓使用者端與伺服器端能有效互動，進而提升決策支援系統之效能與穩定性。

協同決策模組

管網供水可靠度分析有時需要同時進行數個不同分析及優選工作，或管網操作管理有時會有較複雜的模擬需求，如可能需要同時執行多種損壞型態，以進行更精確的決策，因此本研究結合多行程(Multi-thread)之運算技術，發展協同決策模組，可接受使用者之多重決策需求，及同時執行多個獨立的模式決策分析，以便利不同優選模組與供水可靠度之分析比較，且為便利整合分析過往所發展之優選模組，如制水閥優選模組、換管決策模組、監測站網優選模組等，因此亦設計具有共通邏輯之執行機制，如模式呼叫、管網狀態輸入、模擬分析結果回傳、視覺化呈現等，便利優選決策之呼叫執行以提升決策支援之效能。

管網操作決策樹之分析

監控資料之清理修整

應用資料探勘技術分析管網操作規則，可能因實際管網監控資料的雜亂或是錯誤，而造成後續分析結果的偏差或不易解讀。且管網監控點壓力變化記錄為連續變動的資料值，更造成操作規則探勘上的困難。因此進行操作規則分析之前，首先將錯誤訊息以及明顯離群值刪除，並將監控點壓力值離散化為 very low, low, high, very high, extreme high 五個等級。且將多維度的加壓泵操作組合，化約為同種加壓泵的組合，如變頻*1, 定頻*2 等操作組合。初步亦僅考量每小時平均監控記錄變化，以簡化模式分析之困難度。

決策樹(decision tree)之建立

決策樹為一應用貪婪演算法(greedy algorithm)以 divide-and-conquer 的方式，從上到下遞迴的方式來分析原始資料，以發現存在於資料中的規則(Han and Kamber, 2000)。因此，可應用於發掘管網監控點壓力分佈狀況與加壓操作間複雜維度的規則性與相關性。決策樹的建立程序為不斷搜尋目前可最有效分類資料的屬性類別為其新節點，透過計算 information gain 以決定這些節點，直到所有資料都被分類。

本研究採用 Quinlan (1992) 所發展出的 C4.5v8 決策樹分析公用軟體，其為基於 ID3 決策樹演算法的擴充版本，軟體以 C 語言撰寫，可處理大量資訊，適合應用於複雜大量的管網系統監控資訊上。本研究將該公用決策樹軟體整合至所發展的操作模式分析模組中，並將各項監控資訊轉為其輸入檔案，進而根據所建立的決策樹探勘出合理的操作規則。

五、結果與討論

為測試所發展決策支援系統及研擬合理的管網操作模式，本研究採用台北縣三重區自來水管網為研究案例區。其總供水戶數為 382,934 戶，每日供水量為 128,850 CMD，總管線長度為 5,834,572 公尺，包括有 6,040 條管線，8,550 個節點，並有 2,766 個制水閥，並有五個監控點包括 S511, S512, S513, S514, S515，且取得 2003 年一月至 2003 年九月間之監控記錄。

管網損壞分析

應用所發展的損壞分析模組可將管線損壞所造成的缺水分佈狀態以視覺化的方式呈現，如圖一所示，當管線損壞之後，必須要關閉周圍制水閥切斷供水，以便於進行維修，應用所發展之伺服端決策支援管理模組，可判斷出必須截斷的分區範圍，如圖一中以橘色標示之圓形，若所關閉分區為關鍵分區，則需進一步關閉下游分區，應用所發展的系統，可以快速判定出影響的區域，如圖一中藍色圓形所標示之處。而關閉損壞分區後所對各節點之缺水影響，則如圖一所示，根據損壞影響模組所計算出之結果，以藍色至紅色的漸進顏色變化標示缺水程度，若沒有或輕微影響則以綠色標示之，以所標示顏色可迅速判識損壞事件對於管網各區域供水狀態之衝擊程度。根據損壞影響缺水分析可以發現，愈是管網尾端處之節點，愈容易受到管網損壞事件的影響，而有較多嚴重缺水的節點。透過視覺化的呈現模組，管網損壞影響的空間分佈可以有效的掌握，並可做出快速的因應措施。該系統亦可應用於分析不同區域的損壞影響。而為進一步瞭解管網各部位分區的損壞影響，則可透過分區損壞統計模擬模組，其分析結果如圖二所示，根據各分區的損壞影響程度統計繪製成直條圖，據此瞭解是否有損壞影響特別大的分區，以研擬有效的管網維護策略。如圖二所標示的紅色方塊，可發現管網損一些分區的損壞影響相對較大，對於此類分區可點選跳出如圖右下方之分區列表，供管網管理者之進一步定位，以利於研擬有效的改善策略。

管網操作規則分析

本研究將九個月每小時監控記錄進行決策樹分析，並以將月份當作及不當作屬性值，進行決策樹分析，所決策出不同時段下的決策樹特性變化如圖三所示，而決策樹的決策結果如圖四所示。由圖三(a)之分析結果可以發現，在用水較多的時段，如六點、下午六點、八點等時段，決策樹之決策節點數量有下降趨勢，而同樣用水量較大的中午時段卻有明顯增加的趨勢，由於決策樹之決策節點主要為藉由分類監控節點壓力屬性，來判斷歸納可能的加壓操作組合，因此愈多的節點，表示該時段的壓力有較多變化，其不確定性也較高，因此如上午六點與下午六點、八點時，可能因為晨間用水以及晚間用水固定，且可能皆在住家或者固定之商家，因此空間分佈亦較為穩定。然如中午時段，則可能因為繁雜的日常生活用水而造成壓力分佈變化較為明顯。其他用水量較少的時段，卻可能因為用水量小，因此較容易受到管網中些微的用水型態變化而有明顯的改變，因此亦有較多的決策節點數。由於用水型態亦受到氣候影響，因此另外將月份當作一個決策屬性進行分析，可得如圖三(a)另外一變化曲線，可以發現雖然其節點數明顯較多，其節點數變化趨勢與不考量月

份的情況下相類似，亦即用水時段對於管網用水的影響較大。考量月份為決策屬性，可更詳細反應在不同時段用水下的壓力變化。然若以圖三(b)的決策錯誤率變化來看，雖然多考量月份屬性，可以明顯提升分類準確率，不過最大錯誤率仍然有 35%，因此除月份的影響之外，應該尚有其他因子的影響。若以時段來看，則同樣可以發現在用水型態較穩定的時段其準確率亦較高。

若進一步研究所分析出之決策樹，如圖四所示，可以發現雖然 c4.5 將不同管網壓力分佈與其相應的管網操作型態進行分類，但其最終操作組合可能相同，如 fix_p*2 表示定頻加壓泵兩台運作，是決策樹中常出現的優勢操作型態，如圖四中之 fix_p*2(202/33)即表示總計有 202 個案例屬於此類。因此可以推論，管網加壓操作雖然應該考量水壓變化進行即時性的調整，不過根據決策樹所顯示的結果可以發現，在各特定時段下，操作人員常以固定的加壓組合供水，雖然這樣子的作法可以確保大部分情況的供水需求，不過根據決策樹因應不同壓力分佈卻常對應相同的加壓組合，可以發現此類定時固定型態的操作方式並無法維持供水品質的穩定，更無法避免有些供水不佳的情形出現。後續研究將針對如何改善現行操作策略進行研討，並以更詳盡的管網監控記錄來輔助建立更合理的操作策略。

六、成果自評

本計畫成果符合原進度規劃。所發展的管網損壞模擬模組，可合理評估管網損壞所造成的影響衝擊，所發展伺服器端管網決策支援管理系統可有效提升決策分析之運作效能，地理資訊系統模組與統計圖表，可有效輔助進行管網決策分析，研擬可靠的管網改善策略。應用決策樹分析管網監控系統記錄，可辨識出自來水管網操作經驗規則。結果發現操作規則主要隨特定時段而有固定之操作組合，並未考量不同用水季節性的影響，因而供水效率仍有提昇的空間。所建立的決策樹，可呈現管網操作之穩定性與適用性，以輔助研擬更合理的操作規則提升管網之供水可靠度。

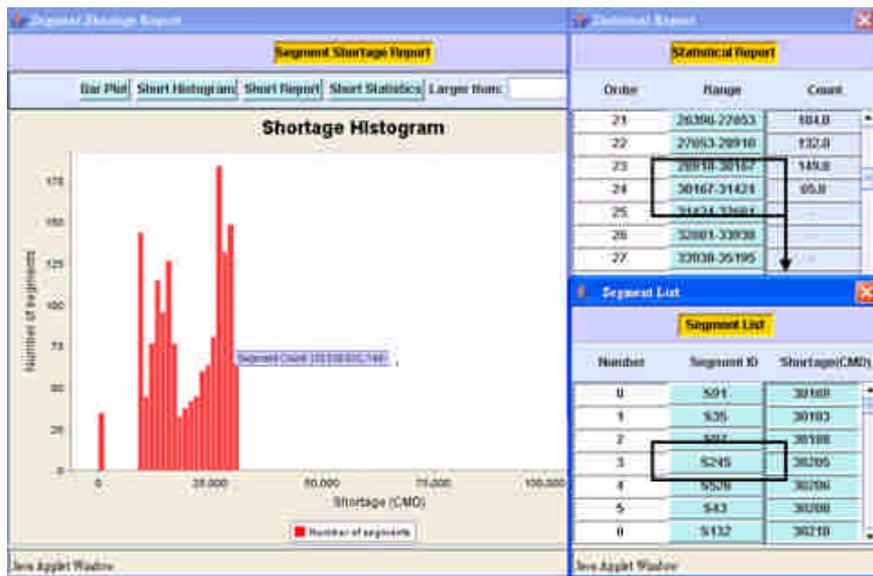
七、參考文獻

- Ailamaki, A., Faloutsos, C., Fischbeck, P. S., Small, M.J., and VanBriesen, J. (2003). "An Environmental Sensor Network to Determine Drinking Water Quality and Security," *SIGMOD Record*. 32(4), 47-52.
- Babovic, V., Drecourt, J.-P., Keijzer, M., and Hansen, P. F. (2002). "A Data Mining Approach to Modeling of Water Supply Assets," *Urban Water*, 4, 401-414.
- Bessler, F. T., Savic, D. A., and Walter, G. A. (2003). "Water Reservoir Control With Data Mining," *Journal of Water Resources Planning and Management*. 129(1), 26-34.
- Dandy, G. C., and Engelhardt, M. (2001). "Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms." *Journal of Water Resources Planning and Management*. 127(4), 214.
- Fujiwara, O., and Li, J. (1998). "Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand." *Water Resources Research*, 34(7), 1834-1850.
- Geotools Project Management Committee (Geotools PMC). (2005). "Getting Started." <[http://www.geotools.org/display/GEOTOOLS/Getting+ Started](http://www.geotools.org/display/GEOTOOLS/Getting+Started)> (Nov. 21, 2005).
- Gupta, R., and Bhawe, P.R. 1996. "Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance." *Journal of Water Resources Planning and*

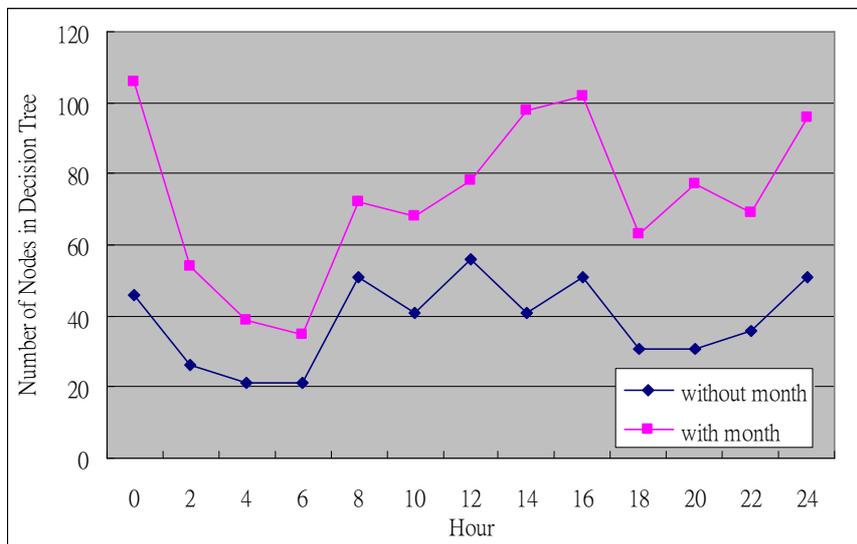
- Management*, ASCE, 122(3), 214-217.
- Sun Microsystems, Inc. (2005). "Java Technology." <<http://java.sun.com/>> (Nov. 21, 2005).
- Gilbert, D. and Morgner, T. (2005). "JFreeChart." <<http://www.jfree.org/jfreechart>> (Nov. 21, 2005).
- Goulter, I.C. (1992). "Systems Analysis in Water-Distribution Network Design: From Theory to Practice." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113(3), 238-248.
- Huang, P.-Y., Diekmann, J. E., and Fenis, S. M. (1995). "Pipeline Planning System." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9(2), 134-140.
- Markropoulos, C.K. Butler, D. and Maksimovic, C. (2003). "Fuzzy Logic Spatial Decision Support System for Urban Water Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(1), 69-77.
- Mays, L.W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- MySQL AB. (2005). "Why MySQL?" <<http://www.mysql.com/why-mysql/>> (Nov. 21, 2005).
- Pezeshk, S., and Helweg, O. J. (1996). "Adaptive Search Optimization in Reducing Pump Operation Costs," *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 57-63.
- Quinlan, J.R. (1992). C4.5: Programs for Machine Learning, Morgan Kaufmann, San Mateo CA.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET2 users manual*, Risk Reduction Engineering laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Shamir, U., and Howard, C.D.D. (1979). "An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement." *Journal of The American Water Works Association*, 71(5), 248-258.
- Solomatine, D. P. (1996). "Object Orientation in Hydraulic Modeling Architectures." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 19(2), 125-135.
- Taher, S. A., and Labadie, J.W. (1996). "Optimal Design of Water Distribution Networks with GIS." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), 301-311.
- Walski, T.M. (1987). Discussion of "Quantitative approaches of reliability assessment in pipe networks" by Goulter and Coals. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 113(5), 585-587.
- Walski, T.M. (1993). "Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis." *Reliability Engineering and System Safety*, 42, 21-27.



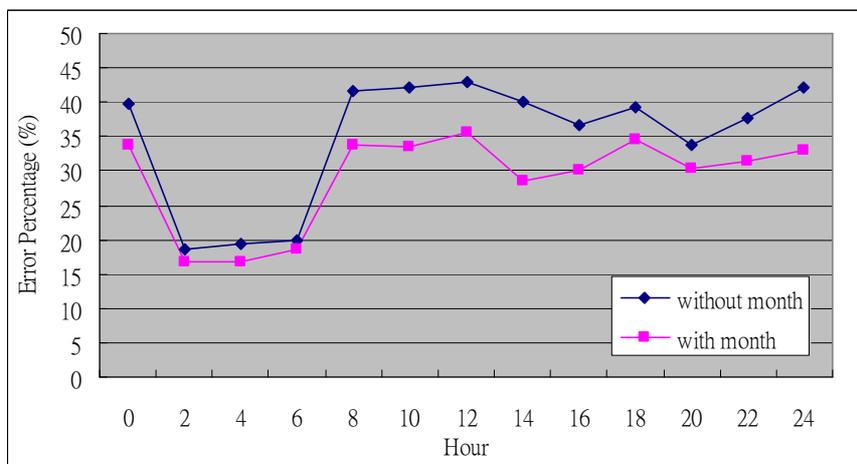
圖一 管網損壞關閉區域及節點缺水分佈



圖二 分區損壞影響缺水量統計分析模組



(a)



(b)

圖三 考量與不考量月份影響之(a)決策樹節點總數與(b)決策樹準確度隨不同時段之變化

```

hour = 6:
| S513 = very_low: fix_p*2_ (4.0)
| S513 = high: fix_p*3_ (3.0/1.0)
| S513 = very_high: fix_p*2_ (0.0)
| S513 = ext_high: fix_p*2_ (0.0)
| S513 = low:
| | S515 = very_low: fix_p*2_ (0.0)
| | S515 = low: fix_p*3_ (2.0/1.0)
| | S515 = ext_high: fix_p*2_ (0.0)
| | S515 = high:
| | | S514 = very_low: var_p*1_fix_p*1_ (3.0/1.0)
| | | S514 = low: fix_p*2_ (4.0/1.0)
| | | S514 = high: fix_p*2_ (202.0/33.0)
| | | S514 = very_high: fix_p*2_ (35.0/13.0)
| | | S514 = ext_high: fix_p*2_ (0.0)
| | S515 = very_high:
| | | S514 = very_low: fix_p*2_ (1.0)
| | | S514 = low: fix_p*2_ (0.0)
| | | S514 = high: var_p*1_fix_p*1_ (2.0/1.0)
| | | S514 = very_high: fix_p*2_ (5.0)
| | | S514 = ext_high: fix_p*2_ (0.0)

```

圖四 決策樹在時段六之分析結果