

自來水配水網路系統提高供水可靠度—破管監控系統建立之研究

*蕭宏民

*副理、博士後選人

台灣省自來水公司第一區管理處、國立臺灣海洋大學河海工程研究所

摘要

自來水配水網路常因破管無法及時修復，造成水質污染及流量損失，無法及時修復致用戶水壓降低或無法供水，產生用戶對自來水單位之不滿及誤解，此監測系統之建立，可用管線破管受污染餘氯之濃度，由監測站測得濃度異常變化，並由水壓之變化雙重檢測，而預估求得漏水點，並能及時修復。

本文係建立網路最佳監控系統及控制站之最佳設計方法，其涉及輔助網路的建立，依網路循環可控制點受污染餘氯濃度來推算因破管受污染之點，配合水壓變化點之檢測，使更能接近得知漏水點，並加以修復，期使在短期間可正常供水，本方法涉及輔助網路之建立，代表環路水流之可能流向及至該點之“連續徑線”依受污染領域可能最短路徑之演算系統，故在決定環路“連續徑線”之網數重要性，在最少之監測站可分配涵蓋整個管網之最佳演算方法，其擇部供水系統之一中等規模案例來說明此方法。

前言

飲用水的品質愈來愈受國人注意，其包括水質、水壓及水量，自來水從業者花在此經費上有十幾億，美國則高達美金四十億之多，故為防犯水質之變化及水壓、水量之下降，實有佈設監測站

之必要，且其佈設之位置、數量及涵蓋範圍作最佳之模擬演算，本案例則以動態水的品質模式模擬，以偵測氯濃度及水壓變化，來偵測管網破管之管段及水污染點與模式互相校準，並依取得資料速派人維修，使配水系統能在正常狀態下供水。

為此監測站之規劃，其應在發生異常瞬間，可接受時間及範圍內由時間點之差及範圍，推估管網破管及受侵入污染物之點，然因任何時間及任何點在系統內，皆可能發生破管或污染物侵入，故時間差之掌控在模擬上係非常重要也非常困難，且在整個運作中，監測站及監測系統人員皆應維一定之正常操作狀況，亦要及時反應及時處理，此為本控制系統最重要之存在，故網路“連續徑線”“初等徑線”之建立及最短路徑長度、資料之存檔，監測站涵蓋之範圍，皆能掌控及輸入在系統內，使監測站可控制水壓，亦可因異常狀況而演算到破管點或污源，使監控系統達到最佳狀態。

文獻資料

(一) Newton-Raphson 管網分析在水力模擬中有下列文獻資料可探討其水頭及水壓。

1、水力理論

(1) Hardy Cross Method

國外有關管網模擬方法發

展，最早是 Hardy Cross 於 1936 發表一管網分析方法，此法後經 Fair 改良，為一種試誤法，此法可以人工手算，最早被工程界採用，也最早被引用於電腦作業，其理論簡單易於了解，至今仍被廣範的使用。

(2) Modify Hardy Cross Method
係根據傳統之 Hardy Cross 原理，此法乃是先假設各節點操作水頭，再利用各節點流量平衡為驗算條件，求得節點操作水頭修正值，再以修正後的水頭代入驗算條件，反覆計算直到修正值在容忍值範圍內，可稱為「流量平衡法」。

(3) Linear Theory Method
基於配水管網的水力分析理論基礎，由流量平衡及能量平衡共同組成管網系統的控制方程式為一非線性聯立方程組，線性理論法其線性化的方式即是將計算水頭損失的計算式，流量與水頭損失關係式，藉由近似水頭損失的計算，線性化其非線性項來進行。

(4) Modify Newton-Raphson Method
Partial Pivoting 法改進 Wood 所發表 Linear Programming 中線性聯立方程組的求解。

(5) 美國環保署 EPANET 水力濃度模擬方法之建立

2、水力模擬式之相關資料

(1) Warga (1954) 討論兩種迭代程序求解配水管網，

Martin 和 Peter (1963) 則利用 Newton-Raphson Method 撰成求解節點未知水頭的電腦程式。

(2) Shamir 和 Howard (1968) 更進一步地利用 Newton-Raphson Method 求解包括節點水頭、節點流量、元件抗阻係數等管網參數，Lemieux (1972) 則在數值方法上改進 Newton Method 之求解效率。

(3) Lam 和 Wolla (1972) 將 Broyden 所發表的 Newton-Raphson Method 數值方法應用在配水管網的模擬上，而得修正 Newton-Raphson Method 管網模擬方法，Roger (1974) 亦以修正 Newton-Raphson 分析配水管網。

(4) Wolla 和 Charles (1972) 發表以 Linear Programming Method 法求解配水管網管線流量。Isaacs 和 Mills (1980) 基於 Wood 和 Charles (1972) Linear Programming Method 相同原理求解管網系統節點水頭。

(5) Demuren 和 Ideriah (1983) 更進一步利用數值方法，此乃利用 Newton-Raphson 數值分析法，以試算法求解配水管網各節點之流量大小之聯立方程式。

(6) EPANET 模擬系統之建立

(二) 監測系統之文獻資料

Lee 與 Deininger 以前曾作過監測站的選擇有直接關聯性的研究，期目的在於妥善佈設監測站，以便提供分送系統之水質狀況之詳細資料。他們的解決之道以一般特色為基礎，即水質的參數會隨著時間與距離而減少。透過路徑分析與整體規劃，監測站的位置可達到涵蓋最大範圍的效果，並可掌控各測站之水質變化。

Lee 與 Deininger 所倡導的方法，最適合內部或逐漸惡化的水質，但對於因外來的污染源所導致的水質迅速惡化最不適用。顯然地就外部的污染物之案例而言，偵測時間是最重要的因素，且應該在設計的過程中列入考慮，其亦為水質惡化因時間參數變化的參據方法。

研究目的

本文主要目的為自來水網路中由偵測水質受污染濃度及水壓變化，來推估破管點或受污染點的設計方法，目的在於演算監測站的最佳位置，數量及涵蓋範圍使將來監控系統可掌控水質、水壓狀況，而控制供水系統，以便在維修保養期間內偵測到意外侵入的污染源或破管點，及時搶修維護使正常供水。

研究範圍及限制

監測系統的最佳佈設位置數量之演算方式及範圍、限制性條件，是依照下列概念發展而成。

(一) 水質偵測系統是由一組散佈各處、以持續監督水質變化參數的監測站所組成。它的目的在於當破管污染物的意外侵入、而導致氯濃度正常減少下之異常下降可預測水質惡化並水壓降低，系檢測之其受污染之可能性，除推算

破管位置或水質變壞，並速派員修復，以維持供水品質。

(二) 監測系統的建立及維護程度，是以偵測前已降低的氯量及水壓來決定。若消耗少量的氯及水壓，則管線正常程度就愈高，並在水質變壞前就防止惡化，即水供送到用戶前，監測系統便可偵測出破管或受污染，即予修復，以表示供水效率及品質，並使供水可靠度達最大化。

(三) 因管線破管或污染物導致的不確定性污染，可用假設性的單一流量模式來解決。此模式是依照每個管線與每個流向的平均時間流量來作依據。平均時間則是依照典型的需求循環如一天或一星期來決定。而流向之間則以輔助網路來區分，即每個水管的另一個流向會以兩根平行的水管來取代，且一根水管一個方向。因此，兩個流向都可能有污染物的散佈，而每一個流向都有其對應的平均時間流量值，並依此推算破管點或受污染源。

(四) 某一連接點的偵測範圍包括了所有可能破管受污染的連接點。因此，在此範圍內的任一監測站都可監測到該污染物，使氯下降之濃度。涵蓋的領域指的是由某特定監測站所能偵測到的所有可能破管位置污染源及水壓下降。兩種偵測領域的規模會依據個別流量模式與維持氯濃度及污染源濃度的程度而定。

(五) 網路的路徑由最後的連接點為下一個開頭的連接點之連續徑線所組成。每一個徑線都有一個數值，而路徑的長度即為各徑線數值的總和。最短的路徑即為輔助

網路上兩個連接點之間的最小長度。

- (六) 管網的監測站在涵蓋範圍，在多重組合下常有多於一組的情形發生，也就是說數組同樣數量的監測站分佈在不同的位置上。在此種情況下，就必須有額外標準來確認最佳的監測系統。在本研究中，監測系統的完美性就依照涵蓋範圍之間的重疊性來決定。換言之，若有一個偵測站無法偵測出破管位置之污染物及水壓下降時，也不會使整個系統喪失了無法偵測出該破管位置污染源的能力。

以下的假設條件是發展本方法時所作出的：

- 1、管網之破管及受污染隨時隨地都有可能產生，其時間之掌控亦可由資料紀錄讀得。
- 2、破管受污染物入侵到分送系統使氣下降及水壓變小時，是在連續性的連接點處造成的，而非斷續不接之情況。
- 3、監測系統可執行即時的水質、水壓、水量監測。
- 4、每一個連接點成為破管或受污染的源頭之可能性是相等的。但卻只有一個連接點會一次成為破管或受污染的來源。

方法

以下介紹在有限的保養程度上，找出監測站最佳設置的方法。

(一) 水力之模擬

利用水力及液壓模擬器及餘氯累積監測器來實施自來水網路的各段水壓下降及受污染延長時間之模擬。延長時間涵蓋了一個正常需求的循環週期。

(二) 輔助網路

輔助網路為一引導式的曲線，包含了一組連線點與一組引導式的徑線。該組連接點的數量與網路原來的連接點數量相同，而該組徑線則依照模擬的結果來分配。

長度與輔助網路的每個徑線有關。總長度等於沿著徑線的平均行徑時間，也就是對應的徑線之實際長度由平均流速加以均分。

(三) 所有的最短路徑

假設破管污染分子的移動速度與流速相等的话，污染物從連接點散佈到連接點的時間，會與這兩點之間的最短徑時間一樣。

(四) 污染模型

監測的範圍與網路的每一個連接點所涵蓋的範圍。列出了因連接點的破管污染及水壓下降導致的所有破管及受污染之連接點，欄則列出了可能會破管及受污染連接點的所有受破管污染連接點。

(五) 最適化模式—最少涵蓋的數量

監測站的最少數量即成本最小化，惟其需能涵蓋全區供水範圍，模式分析如下：

$$\text{Max } U = f(\text{cost}, F)$$

$$\text{可靠度 } \text{Max } F = f(\alpha X_i)$$

$$i=1\sim n \quad n \text{ 為監測站數量}$$

$$\text{Minimized cost} = \sum_i^n F(X_i), i=1 \sim n.$$

案例

台北縣瑞芳系統城中區、小區管網說明方法

- (一) 瑞芳系統城中區、小區管網最大時、最小時水流徑線如圖一所示
- (二) 由 christofide 計算法求出最小涵數為 4 個控制點，其監控站如圖二。
- (三) 利用 EPANET 之系統模擬建立輔助網路中，可求出得各節點之流速及流經時間（如表一及圖三），由各監控站測得餘氯量之異常及水壓之下降預估，管線之受破壞或爆管之位置及時修。
- (四) 此系統由最大時員山淨水場供水 10560CMD，貢寮系統支援 15270CMD 最小時山淨水場供水 660CMD，貢寮系統支援 3505CMD。（如圖四）

預期效益

利用本研究模式，在最大效能及最小成本下，設置監測站，經全天候之量測比對，可在異常下得知供水系統之不正常狀態，並及時搶修減少漏水、停水時間，提供用戶較可靠之供水方式。

結論

水區管網系統配合監控系統之建立，並作最適化之佈設，可依此方法求得及證明，此提高供水可靠性之重要性，防止破管及受污染之不自性，而在佈設監控站經管路徑線上範圍控制供水系統，使配送系

統在水壓、水質上得到更進步之管控方式。

1. 此最佳化設計方案與傳統設計方案不同，其在符合設計規範及設計準則之條件下，找到較為經濟之設計方案並能有效供水提高可靠度。
2. 以多階段多選項系統所建立之最適化模式，可充考量實務工程之設計需求，瑞芳系統城中區小區管網為案例研究，對管網維護、管理上均可得到良好結果。
3. 最佳化模式應用小區管網監控站設計時，其需考量不同時段管線不同流向時，可由紀錄器雙管充分計量水壓、水量、餘氯量，大致存在一正比關係，提供異常之比對，使供水之穩定性相對提高。
4. 配水管網之規劃設計除了考慮成本外，其風險度之考量為現有實務設計所缺乏之一環，本研究案在設計需同時考量監控站設立之水力模擬分析可降低風險增加可靠度，其在供水管線斷管發生時可急速搶修及時供水，最適化模式之應用與可能之風險考量合併計算，將提供經濟與安全兩相之平衡最高點。

參考文獻

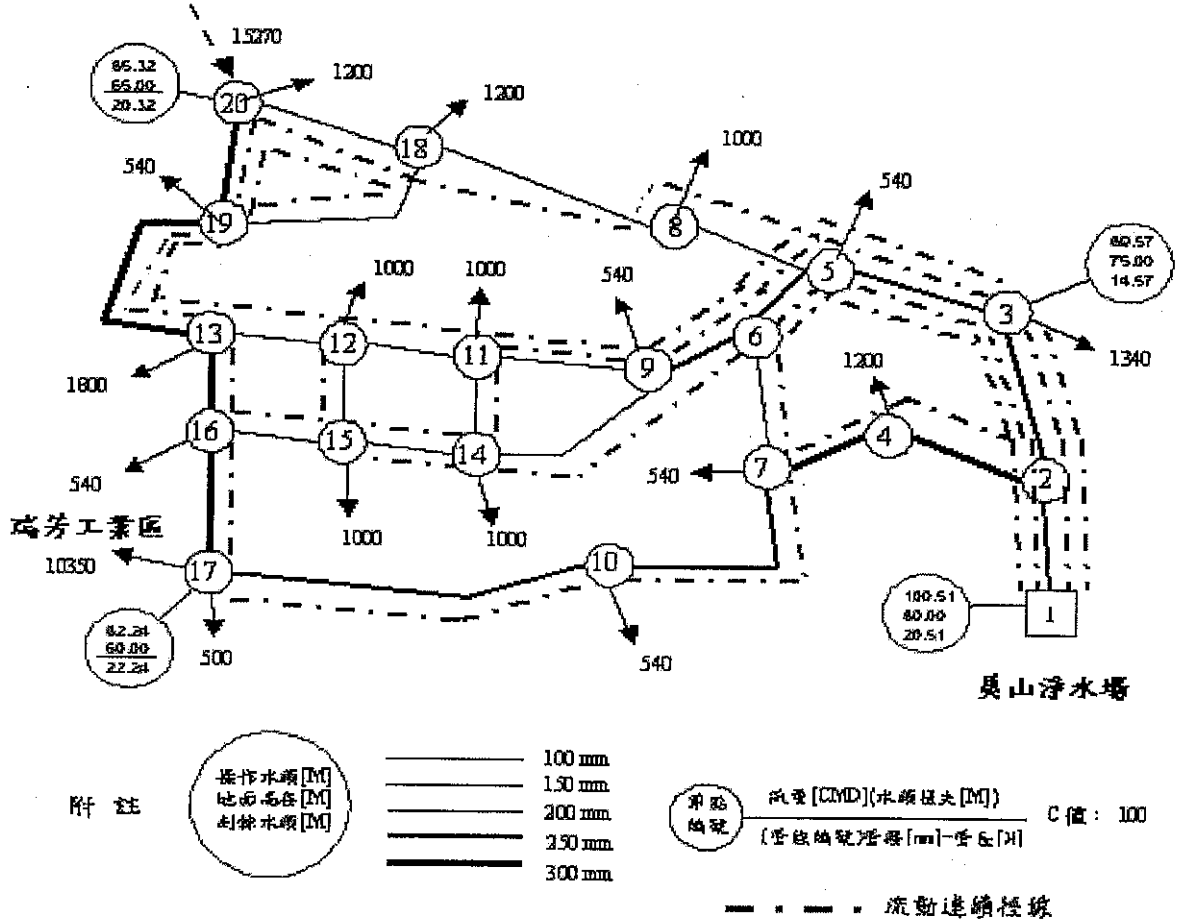
1. Artina.S. (1973) .The use of mathematical program techniques in designing hydraulic networks.Meccania.158-165.
2. Awumah, K., I. C. Goulter, and S. K. Bhatt, Entropy-based redundancy measures in water-distribution networks, /. Hydraul. Eng.117(5), 595-614,1991.
3. Brooke, A., Kendrick.D. And Meeraus, A. (1988).GAMS: a user's guide,The Scientific Press,Redwood City,Calif.
4. Boulos, P, F, Altman, T, jarrigc, P, A, and Collevall, F, (1994) "A event-driven method for modeling contaminant propagation in watenetwork J, Appl, Modelling, (18)

- 84-92 .
5. Bhave, P. R. (1981) , Node flow analysis of water distribution systems J Transp. Eng., 107(4), 457-467,.
 6. Bouchart, F., and I. Goulte (1991) r, Reliability improvement in design of water distribution networks recognizing valve location. Water Re. sour. Res., 27(12), 3029-3040 .
 7. Bouchart, F., N. Duan, I. Goulter, K. Lansey, L. W. Mays, Y. C. Su and Y. K-Tung (1989) , Reliability-optimization based models, in Reliability Analysis of Water Distribution Systems, edited by L. W. Mays pp 472-531, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va .
 8. Clark, R, M, Grayman W, M, Males, R, M, and Hess A,F, (1993) Modeling contaminant propagation in drinking-water distribution system J, Envir, Engrg ASCE, 119 (2) 349-364 .
 9. Christondes, N,(1975) Graph theory An algorithmic approach Academic Press, Inc, San Diego, Calif .
 10. Chang. S. Y. and Liaw, S. L. (1987). An efficient implicit enumeration algorithm for multistage systems. Paper presentation edited at the TIMS/ORSA joint national meeting. New Orleans. L. A.
 11. Cullinane, M. J., J. G. Goodrich, and I. C. Goulte (1989) r, Water distribution system evaluation, in Reliability Analysis of Water Distribution Systems, edited by L. W. Mays, pp. 85-122, Am. Soc. of Civ. Eng Reston, Va. .
 12. Dandy, G.C., Simpson, A.R. and Murphy, L.J. (1996). An improved genetic algorithm for pipe network optimization. Water Resources Research, 32(2), 449-458.
 13. Floyd, R, W, (1962) Algorithm 97, Shortest path, Communications ACM, 5, 345 .
 14. Fujiwara. O. (1987). A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution network. Water Resources Research, 23 (6), 977-982.
 15. Fowler, A.J. (1990). Water Municipal Hydraulics, Vancouver, British Canada.
 16. Fujiwara. O. (1987). A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution network. Water Resources Research, 23 (6), 977-982.
 17. Fowler, A.J. (1990). Water Municipal Hydraulics, Vancouver, British Canada.
 18. Fujiwara, O., and A. U. De Silva (1990), Algorithm for reliability-based optimal design of water networks,/. Environ. Eng., 116(3), 575-587
 19. Fujiwara, O., and T. (1993) , Ganesharajah, Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks, Water Resour Res., 29(8), 2917-2924 .
 20. Fujiwara, O., and T. T. Luong (1996) , Reliability-based analysis and design of water supply and distribution systems, part I: Reliability measures paper presented at International Conference on Urban Engineering Asian Inst. of Technol., Bangkok, Thailand .
 21. Fujiwara, O., and T. T. Luong (1996) , Reliability-based analysis and design of water supply and distribution systems, part II: Optimal design, paper presented at International Conference on Urban Engineering, Asian Inst. of Technol., Bangkok, Thailand, .
 22. Fujiwara, O., and H. D. Tung (1991) , Reliability improvement for water distribution networks through increasing pipe size. Water Resour. Res., 27(7), 1395-1402 .
 23. Hunt, W, A, and Kroon J, R, (1991) Model calibration for chlorine residuals in distribution systems Proc AWWARF/FPA Conf on Water Quality Modeling in Distribution Sys, 237-263 .
 24. Lee, B, H, and Deininger, R, A, (1992) Optimal location of monitoring stations in water distribution systems, J, Envir,

- Engrs, ASCE, 118 (4-16)
25. Goulter, I. C. (1986) Multi-objective optimization of water distribution networks, *CiV. Eng. Syst.*, 3, 222-231 .
 26. Gessler, J. (1985). Pipe network optimization by enumeration. *Proceeding, Computer applications for water resources, ASCE.*New York.572-581.
 27. Gupta, R., and P. R. Bhave (1994) Reliability analysis of water distribution systems, *J. Environ. Eng.*, 120(2), 447-460, .
 28. Gupta, R., and P. R. Bhave (1996) , Reliability-based design of water-distribution systems, *J. Environ. Eng.*, 122(1), 51-54, .
 29. Hobbs, B. F. (1989) An overview of integrated water supply system reliability, in *Reliability Analysis of Water Distribution Systems*, edited by L. W. Mays, pp. 299-339, *Am. Soc. of Civ. Eng.*, Reston, Va. .
 30. H.H.Apuclamofu (1984) The Water supply stability analysis.
 31. Jowitt, P. W., and C. Xu, (1993) Predicting pipe failure effects in waicr distribution networks, *S. Water Resour. Plann. Manage.*, 119(1), 18- 31 .
 32. Kessler,A.,and Shamir,U.(1989).Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks.*Water Resources Research*,25(7), 1469-1480.
 33. Lin B.L.,Wu R.S.and LIAW S.L. (1997) .A heuristic approach algorithm for the optimization of water distribution networks. *Water Science and Technology*, 36(5), 219-226.
 34. Lansey, K. E. and Mays, L.W. (1989). Optimization Model for Water.Distribution System Design. *Journal of Hydraulic Engineering*.115 (10), 1401-1418.
 35. Liebman, J, S., Lasdon.L.,Scharge. L. and Waren, A. (1986). Modeling and optimization with GINO.The Scientific Press, Palo Alto, Calif.
 36. Morgan, D.R. and Goulter, I. (1985). Optimal urban water distribution design. *Water Resources for water Resources Research*, 21(5), 642-652.
 37. Mays, L.W. (1989). *Reliability Analysis of Water Distribution System.*American Society of Civil Engineers.New York.
 38. Mays, L. W. (Ed.) (1989) , *Reliability Analysis of Water Distribution Networks*, *Am. Soc. of Civ. Eng.*, Reston, Va. .
 39. Martinez, F, R Perez, and J. Hydraul Eng,121.613-617,1995.in water distribution system , in *Improvement of Efficiency and reliability in water Distribution system (in Spanish)*. Edited by E. Cabrera and A Vela. Pp. 393-424, *Menedez Pelayo Univ.*, Valencia, Spanin, 1995.
 40. Michalewicz, Z., (1994) *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*,340 pp., Springer-Verlag, New York .
 41. Montesinos, M. P. (1995) , *Mathematical model for optimal design of water distribution systems (in Spanish)*, Doctoral thesis, 190 pp..*Fac. of Agric. And For. Eng.*, Cordoba univ , Cordoba, Spani, .
 42. Morgan, D. R., and I. C. Goulter (1985) , *Optimal urban water distribution design*, *Water Resour. Res.*, 21(5), 642-652,.
 43. Neukrug H, M, Burlingame G, A, Wankoff, W, and Picker M, (1995) *Water, qunliry regs, Staying ahead Civ Engrs (January)* 66-69
 44. Nielsen, H. B., *Methods for analyzing pipe networks*,*S. Hydraul Eng*115,139-157, 1989
 45. Oron.G.and Karmeli.D. (1979). Procedure for economic evaluation of water networks parameters. *Water Resources Bulletin*, 15(4), 1050-1060.
 46. Park, H@ and J. C. Liebman, *Redundancy-constrained*

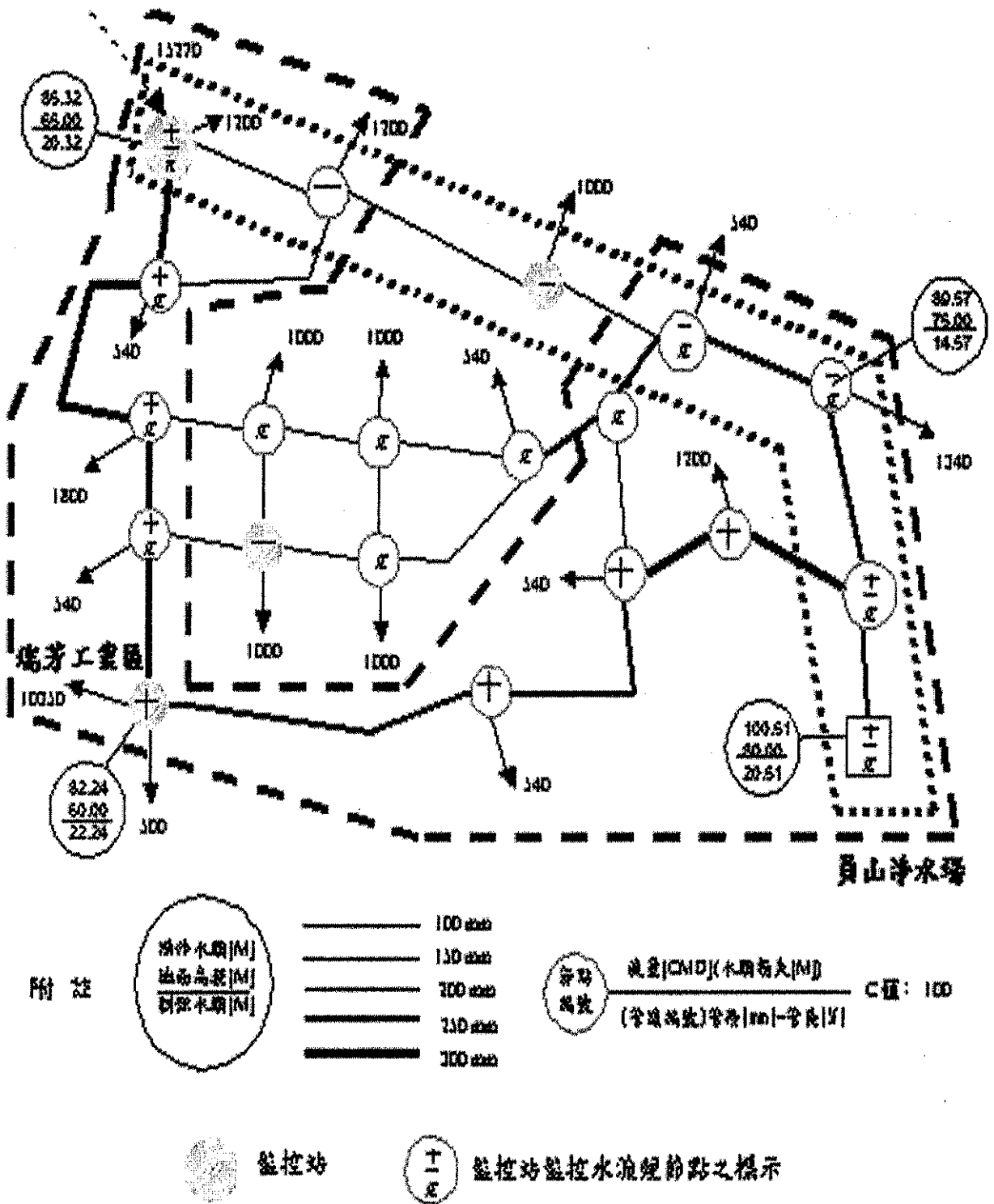
- minimum-cost design of water-distribution nets, 1. *Water Resour. Plann. MaMS*(t. 119(1), 83-98,1993.
47. Rossman L, A, (1994) EPLVET user's manual Reduction Engrl, Lub U, s, Envir Protection Agency Cincinnati Ohio .
 48. Russman, L, A, Clark R, M, and Grayman, W, M, (1995) Modelin chlorine residuals in drinking water distribution systems, J, Envi Engrg 120 (4) 803-820 .
 49. R. R. Yager and D. P. Filev (1994) . Generation of fuzzy rules by mountain clustering. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2:209-219 .
 50. Rossman L, A, and Boulos, P, P, (1996) Nmnrcrical method for modeling water quallry in distribution systems A comparison, J, Water Resour Plng and Mgmt ASCE, 122 (2) 137-146 .
 51. S. L. Chin. Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2(3), 1994..
 52. Simpson.A.R.Dandy, G.C.and Murphy, L.J. (1994) Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of water resources planning and management*.ASCE.120 (4), 423-443.
 53. Savic, D.A.and Walters, G.A. (1997). Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, ASCE.123 (2), 67-77.
 54. Su, Y. C., L. W. Mays, N. Duan, and K. E. Lansey, Reliability-based, optimization model for water distribution systems, *J. Hydraul. Eng.* 114(12), 1539-1556,1987.
 55. Windham, Michael P. (1982). "Cluster Validity for the Fuzzy C-Means Clustering Algorithm , " *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4 (4) , 357-363 .
 56. Walski. T. M., Gessler, J. and Sjostrom. J. W. (1988). Selecting optimal pipe size for water distribution system. *Journal of AWWA*, 80(2), 35-39.
 57. Wagner, J. M., U. Shamir, and D. H. Marks (1988) , Water distribution rell-ability: Analytical methods,/. *Water Resour. Plann. Manage.*, 114(3). 253-275, .
 58. Wagner, J. M., U. Shamir, and D. H. Marks (1988) , Water distribution rell-ability: Simulation methods, J. *Water Resour. Plann. Manage.*, 114(3) 276-294b.
 59. Wood, D. J. (1980) Computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulation. Off. of Continuing Educ. and Ext.,col. of Eng., Univ. of Ky., Lexington,
 60. Wood.D.J. (1980). User's manual computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulations. University of Kentucky, Lexington, KY
 61. Xie, Xuanli Lisa and Beni , Gerardo (1991) , " A Validity Measure for Fuzzy Clustering, " *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* , 13(8) , 841-847 .
 62. Yates.D.F.Templeman.A.B.and Boffey,T.B.(1984). The computational complexity of the problem of determining least capital cost for designs for water supply networks. *Engineering Optimization*.7 (2), 142-155.

頁寮系統支援



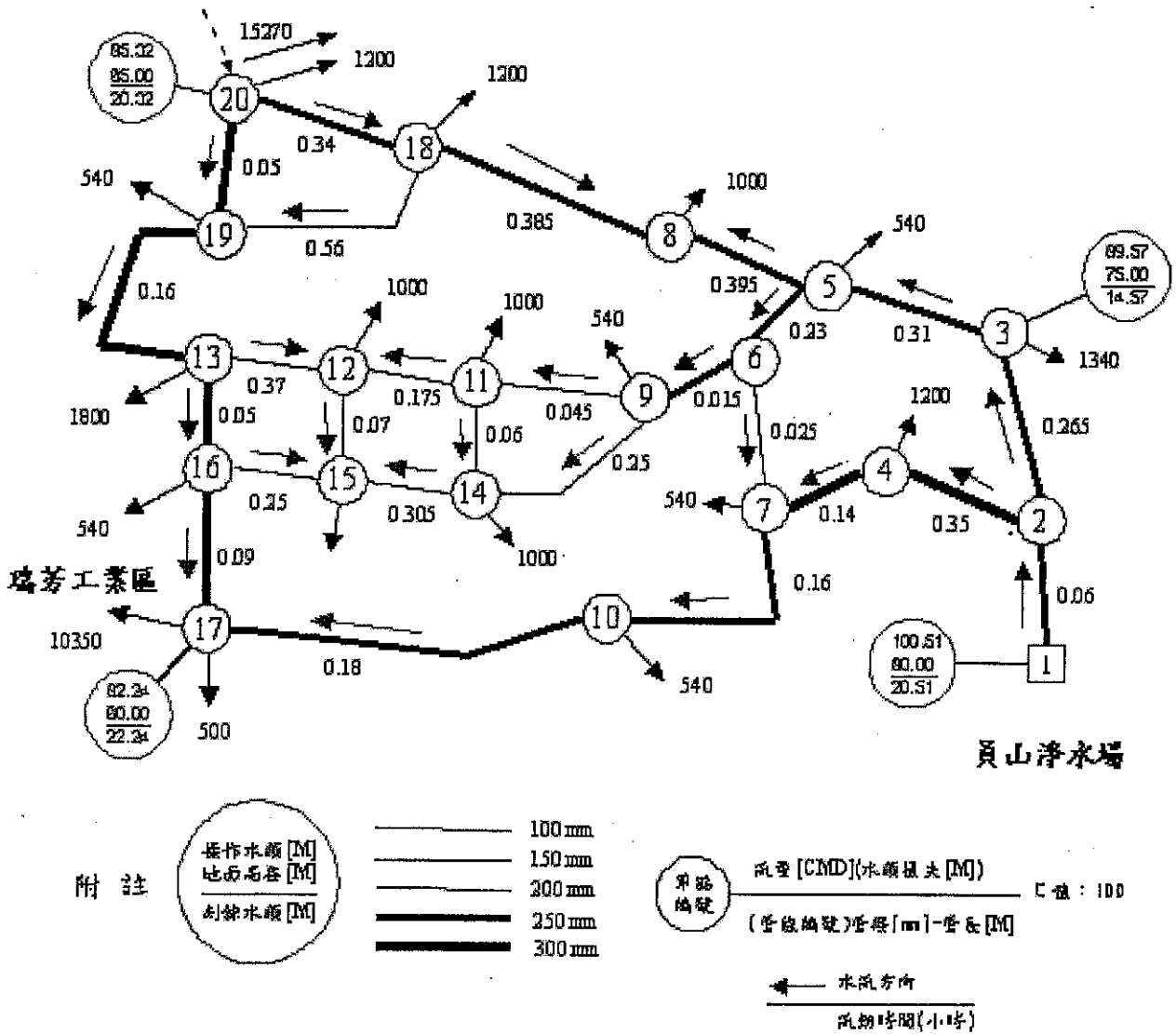
圖一：瑞芳系統城中區管網連續流動徑線圖

監察系統支援

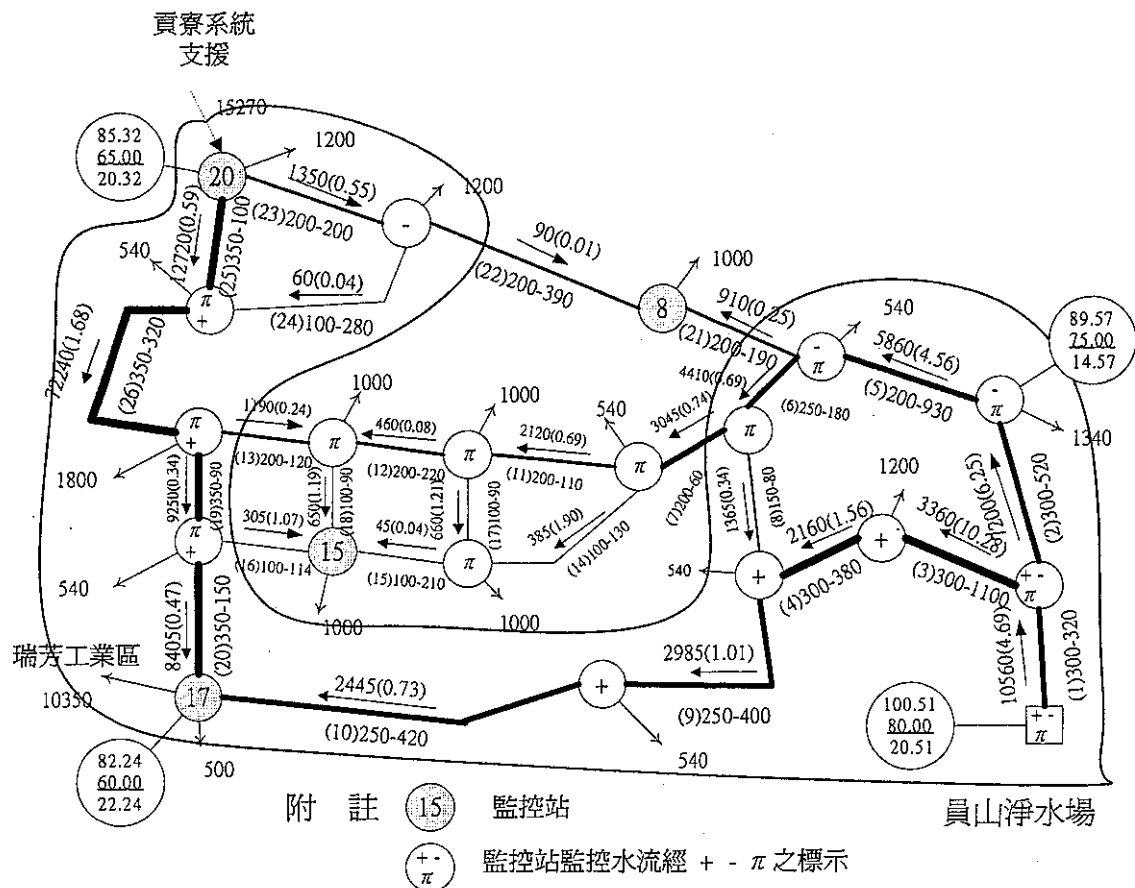


圖二：瑞芳系統域中區管網監控站配置圖

貢寮系統支援



圖三：瑞芳系統城中區管網流程時間圖(平均)



圖四-1 瑞芳系統監控站水流流徑及時間示意圖(最大時)

