

小區管網之最佳化設計與擴建分析

林碧亮¹ 吳瑞賢² 廖述良³ 蕭宏民⁴ 林永敏⁵

摘 要

目前我國在自來水管網的規劃設計上趨向於分區設計，以便於日後之操作、管理與維護，其相關之理論與實務探討不多，有進一步了解與研究之必要。本文針對小區管網最佳化設計的問題，建立自來水管網系統設計最佳化模式，以列舉法進行求解，在符合各項設計規範下，以台中市小區管網第五小區為案例進行研究與比較，探討系統新建、擴建更新與主副取水點之考量等。結果顯示管網設計最佳化模式之建立求解，可充分考量小區管網之實務需求，成為小區管網最低成本設計方案之有用工具。

關鍵詞：自來水、小區管網系統、最佳化、列舉法、設計

一、前 言

近年來我國在人口增加與都市之擴展之環境下，需水量不斷增加，除了現有老舊管線更新外，新供水區之擴建增設使得配水管網系統變得錯綜複雜，造成水量調配、供水安全、操作營運與管理上諸多問題，因此小區管網系統之建

-
- 1 私立明新技術學院土木工程系助理教授
 - 2 國立中央大學土木工程研究所教授
 - 3 國立中央大學環境工程研究所教授
 - 4 國立台灣海洋大學河海工程研究所博士生
 - 5 國立中央大學土木工程研究所碩士

立與供水區之“區畫化”乃成為問題解決的方法。小區管網系統以主幹管線為依據，分成小型獨立之配水分區，每分區除設計主、副取水點各一處與送配水幹管連接外，其他各處完全予以隔絕，如此可以得到良好之送配水效果，同時在日後配水管理與維護上，能獲得良好之管理及檢修漏之便利。

小區管網設計與一般實務工程管線設計一樣，同樣需嘗試以不同管線管徑組合進行水力計算，經多次反覆計算，以求得較低成本之設計方案，在考量上不同的地方是主取水點與副取水點之水力分析。目前電腦應用在自來水管網系統規劃設計上日益密切，配合管網系統設計最佳化模式之建立，不但可以節省繁複計算所須人力及時間以提高效率，亦在符合設計規範之要求下，從許多的可行方案中尋求最低成本之設計方案。本文即依實務規劃設計工作與文獻，建立設計最佳化模式，並以列舉法求解，在符合設計規範下求得最低成本之設計方案。基於前人研究之基礎[7]，以台中市小區管網系統第五小區為案例研究，進行最佳化設計與擴建分析相關問題之探討，並求取小區管網系統最佳設計方案。

二. 方法論

1. 小區管網實務設計[6,8]

小區管網係將大區域之複雜管網，予以分區與簡化。其重點在於將大供水區管網，劃分為若干小型獨立供水管網，便於檢修防漏工作之執行，進而有效控制水量、水壓及系統之管理操作，從而增進營運效益，提高供水品質。惟在實務考量上，在進行規劃與設計時需考慮幾個問題：(1)小區管網分區原則，(2)現有管線之整備、劃分與變更，(3)主副取水點之位置，(4)小區內新建、擴建與更新管網之不同考量等。在進行最佳化設計時，這些因素需能進行考量與探討，當系統在規劃階段配置予以固定時，其主要考量後面兩點，以茲做為建立最佳化模式之基礎。

2.最佳化模式之建立[10,11]

在配置固定的管網系統中，每條管線及附屬設施可視為一個階段，在設計時一個階段均有多種尺寸的商用管徑供選擇設計，故配水系統之設計，乃是在選擇不同組合的替代元件下，在不同的負載要求下進行管網模擬，以求取系統之壓力分佈，並得到各節點之水頭。依據理論與實務之需求，配合各項配水元件，建立自來水配水系統規劃設計最佳化模式，其最佳化模式表示如下：

$$\text{Minimized Cost} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_i(D_{ij}) L_i X_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_k Q_{in} - \sum_k Q_{out} = Q_k \quad , k \in \text{node} \quad (2)$$

$$\sum_l h_l - DH_l = 0 \quad , l \in \text{loop} \quad (3)$$

$$HMIN_k \leq H_k \leq HMAX_k \quad , k \in \text{node} \quad (4)$$

$$VMIN_i \leq V_i \leq VMAX_i \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$X_{ij} = 0, 1 \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad \text{and} \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} = 1 \quad , i = 1, 2, \dots, n \quad \text{and} \quad j = 1, 2, \dots, m_i \quad (7)$$

$$\text{and} \quad L_i, D_i \geq 0 \quad (8)$$

其中： D_i = 第*i*個階段管徑； L_i = 第*i*個階段管長； n = 管網系統中管線之數目； m_i = 第*i*階段的選擇項數； $F_i(D_{ij})$ = 系統中管線之成本函數，其為管徑 D_{ij} 之函數； D_{ij} = 第*i*個階段，第*j*個選擇項的管徑； Q_{in} = 節點*k*的入流量(inflow rate)； Q_{out} = 節點*k*的出流量(outflow rate)； Q_k = 節點*k*的需水量(demand)； h_l = 迴路*l*之水頭損失； DH_l = 開放迴路*l*中起始節點與最終節點之水位差； $HMIN_k$ = 在節點*k*的最小水頭限制； $HMAX_k$ = 在節點*k*的最大水頭限制； $VMIN_i$ = 在節點*i*的最小流速限制； $VMAX_i$ = 在節點*i*的最大流速限制； X_{ij} = 第*i*個階段，第*j*個選擇項的0-1存在決定變數。

3.界限隱式列舉法

列舉法為求解離散最佳問題或組合最佳化問題之簡單方法，其搜尋效率可用不同之上下限值予以提高，本研究所採用界限隱式列舉法(Bounded Implicit Enumeration, BIE)為改善隱式列舉法之效率而發展改善之方法(Chang 和 Liaw)[12]。自來水管網設計最佳化問題，當系統組合數不大時，如小區管網或一些擴建更新的最佳化設計問題，即很適合用此一演算法進行搜尋與求解。上下限值之計算與設定對於搜尋效率有很大的影響，上限值是一可行組合解的目標函數值，在搜尋的過程中會不斷的更新。假如整個系統的組合數目很龐大，上限值在達到最佳解之前一直保持較高的值，則其所能削去的次系統必然較少而需要較多的搜尋時間。因此在搜尋過程中需加上下限值予以改良，將一下限值(lower bound)加到次系統上再和上限值比較，如此將可削去更多的次系統，減少需要搜尋的組合數(次系統)，因而提升了搜尋的效率，一般下限值為次系統每個階段最低成本之和。

三、程式發展與建立

1.程式說明

本文依據前章所述之方法論，同時考量水力模擬與最佳化設計方案，發展自來水管網最佳化設計程式，程式由FORTRAN語言寫成，作業系統為Microsoft Windows NT (4.0中文版)，發展平台為Microsoft FORTRAN Power Station (專業版4.0)。管網水力分析方法採用可考量平行管徑之修正哈第-克勞斯法[3]。在實務應用上，如新建工程設計、擴建與更新工程設計、主副取水點之水力分析、平行管線之埋設、不同供水負載考量、施工方式選用、管材與成本函數計算等等問題，均可依需求予以更換或增減，視實務需求而定。

2.程式流程

程式流程如圖1所示，基本上其思考邏輯與實務工程設計相同，先以一起始系統管徑進行初始流量之計算，再依流速限制式進行條管線可選用商用管徑之確立，如果是可埋設平行管徑之管線亦同，如此則固定配置下之系統設計組合即建立完成。基於此一系統設計組合，在進行列舉法之搜尋前，為改善其搜尋效率，先計算其管線成本、管線下限值、起始可行解與系統下限值等，再進入最佳模式之搜尋求解程序。在求解程序中，BIE演算法進行管徑之選擇，並將系統設計參數(管徑，系統配置，供水負載)等值傳給管網水力分析模式進行水力模擬。管網水力分析(含平行管徑水力模擬)包括主取水點水力模擬與副取水點水力模擬，其分析結果(節點水頭，管線流量)再傳回BIE演算程序，水力分析結果可以進行判斷是否合乎設計規範或設計需求，若是可行解則儲存起來，若不是可行解則放棄，再繼續演算程序直到BIE完成其搜尋程序，即可得到符合設計規範之最低成本設計方案。

四、案例研究與結果討論

研究案例以台中市小區域管網計劃報告書[6]中的第五小區為例，其管線配置圖如圖2所示，共有32條管線位置，21個節點與11個迴圈，依新建系統設計與擴建更新系統設計而予以不同之考量，本研究以修正哈弟-克勞斯法進行水力分析模擬，其節點水量收斂精度採用0.00001CMS，其餘引用之相關數據均與報告書中相同。

1.求解組合數

管網系統於規劃設計時，需嘗試以不同管線管徑組合進行水力計算，每一段管線可以有幾個商用管徑可供選擇，需進行多次反覆計算，以求得較低之成本設計，本研究以列舉法發展之設計最佳化程式即基於此。表1 為第5小區管網

以新建系統為考量時，依流速限制計算得每段管線可用之商用管徑，以16號管線為例，可選用0.20M、0.25M、0.30M、0.35M與0.4M等五種商用管徑，32段管線之系統總組合數為3,600,000。在執行程式時，輸入檔中的初始假設管徑對結果有影響，因此若能配合實務狀況予以合宜之選定，有助於求得最低成本之方案。

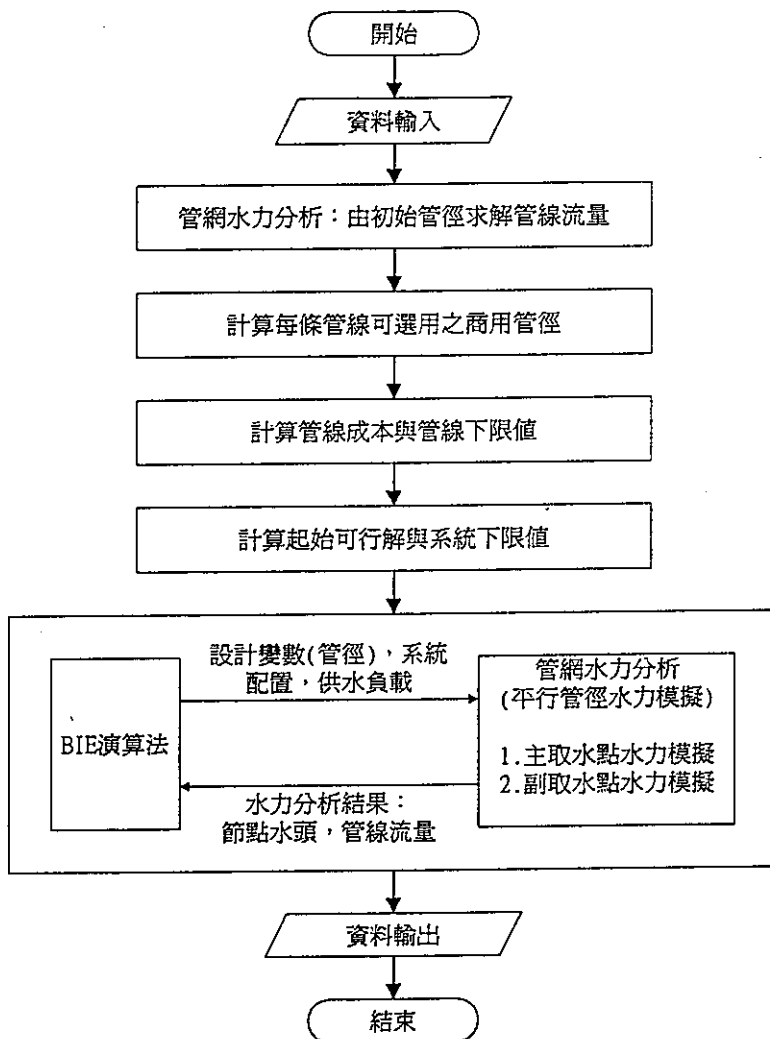


圖 1 自來水管網系統設計最佳化程式流程圖

表 1 第5小區新建管網系統每段管線可用之管線數及其管徑

管線編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
管線數	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	1	2	2	5	5	5
可用商用管線管徑(M)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20
									0.15	0.15		0.15	0.15	0.25	0.25	0.25
										0.20				0.30	0.30	0.30
														0.35	0.35	0.35
														0.40	0.40	0.40
管線編號	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
管線數	5	5	2	1	4	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1	1
可用商用管線管徑(M)	0.15	0.20	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	0.20	0.25	0.15		0.20			0.15				0.15				
	0.25	0.30			0.25			0.20								
	0.30	0.35			0.30											
	0.35	0.40														
總組合數	3,600,000															

2. 新建管網系統設計

(1) 最低成本設計方案

第5小區以新建管網系統為考量時其設計結果如表2所示，若不考慮副取水點之模擬，其可得最佳解成本(即最低成本設計方案)為2,517,000元，其結果與報告書[6]或文獻[7](其自行加入之第19管線並未計入成本之內)比較可知，在相同之設計準則與條件之下，可求得較低成本之設計方案，其系統水力分析如圖3所示。其節點操作水頭與地面高程值相減所得的剩餘水頭分布在15.61~35.10公尺之間，由於其進水點之操作水頭較高，只要剩餘水頭在15到40公尺之間，便符合了“自來水設施工程指南”的要求。故幾乎以每條管線之可用最小商用管徑予以設計即可。

新建管網在水力模擬考量時，若同時考慮主取水點與副取水點之水力分析，其最佳解之成本為2,635,500元，與報告書上之成本3,382,500元，相比較節省約22%，顯現最佳化設計所具有之良好功效，其系統水力分析如圖4所示。最佳解節點剩餘水頭主取水點之水力分析在23.66~35.10公尺之間，副取水點之水力分析在19.63~36.68公尺之間，與報告書之設計結果相比較，報告書上部份節點之剩餘水頭較高，故可知成本與最低節點剩餘水頭存在一權衡(trade off)關係，較高之節點剩餘水頭需付出較高之成本。

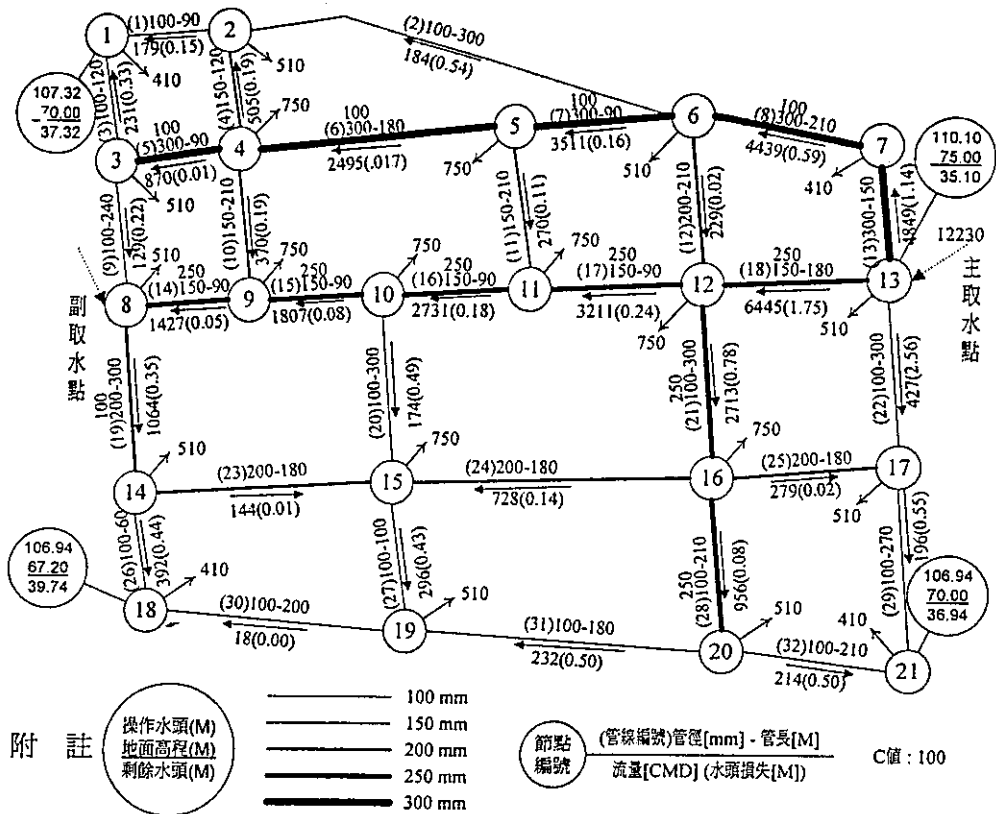


圖 2 台中市小區管網第5小區系統水力分析圖
(自來水公司計劃報告書, 主取水點)

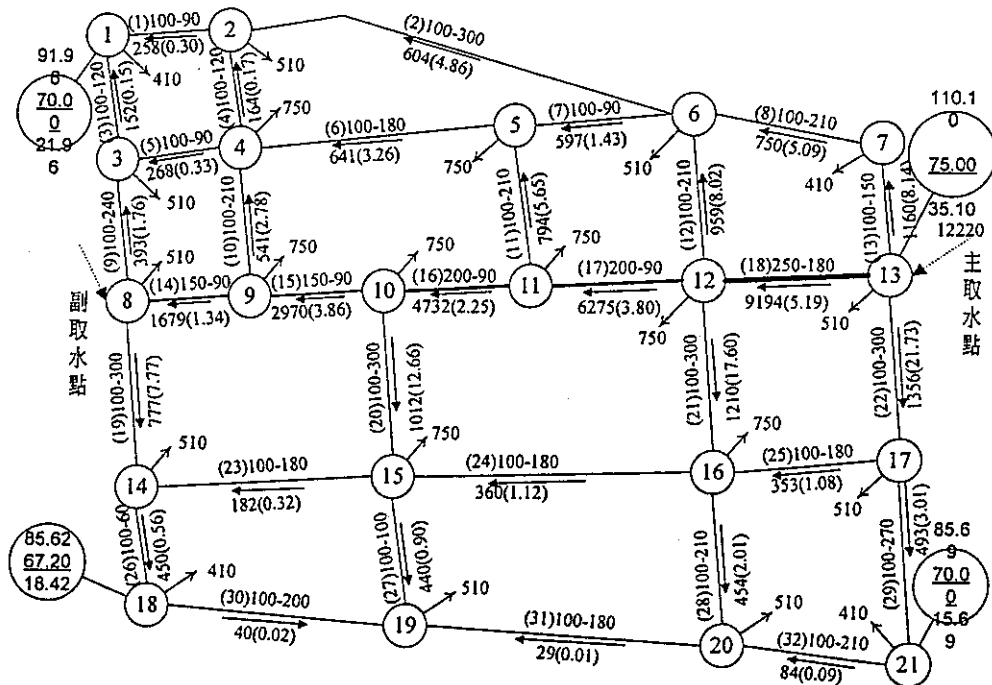
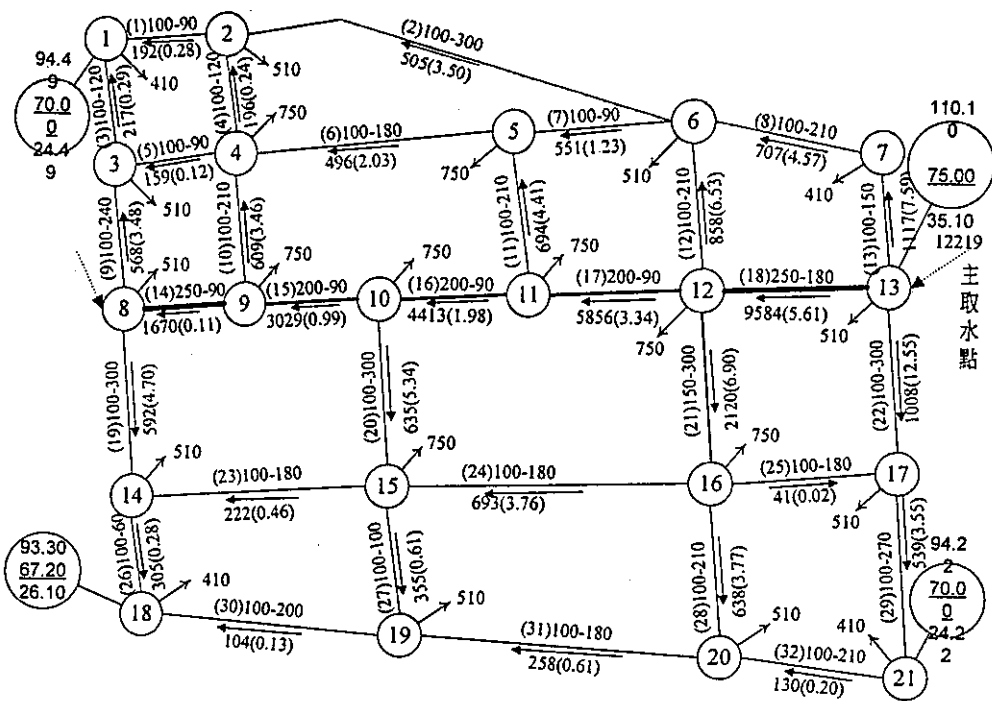
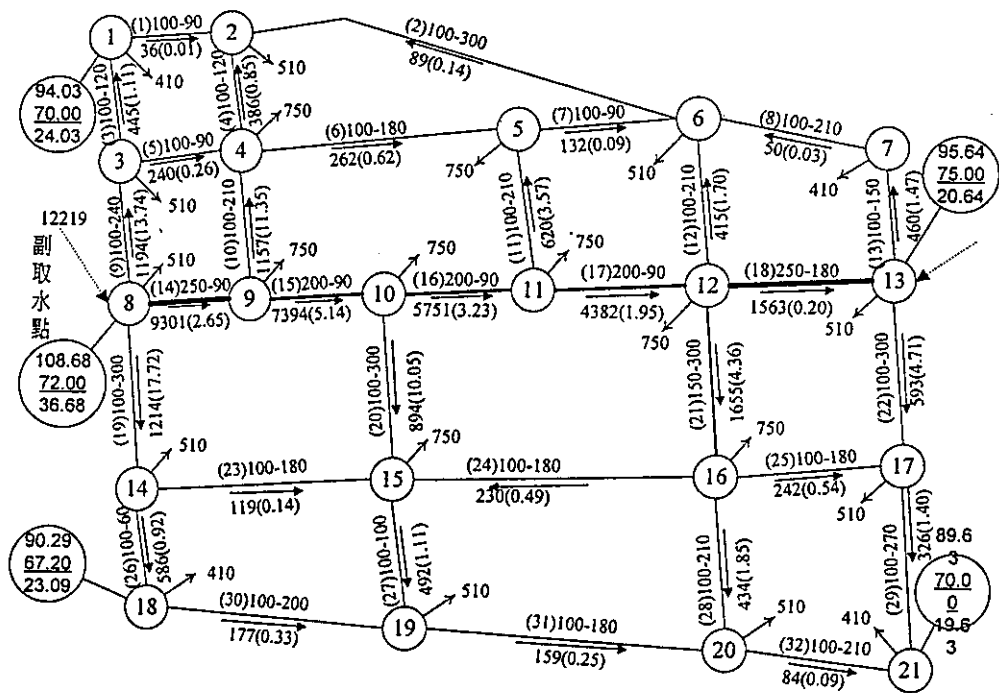


圖 3 第5小區系統水力分析圖(主取水點, 新建管網成本=2517000NT\$)



(a) 主取水點



(b) 副取水點

圖 4 第5小區系統水力分析圖(新建管網成本=2635500NT\$)

表 2 第5小區新建管網管線設計成本比較表[7]

		剩餘水頭(M)	建造成本(元)
小區管網報告書[6] (考慮副取水點)		29.61~35.10(主)	3,382,500
文獻[7]* (不考慮副取水點)	初始管徑200mm,假設 剩餘水頭38m	12.43~37.02	2,625,797
	初始管徑200mm,假設 剩餘水頭32m	14.34~37.01	2,669,311
	初始管徑250mm,假設 剩餘水頭38m	15.15~37.22	2,799,597
	初始管徑300mm,假設 剩餘水頭38m	18.65~38.86	3,154,280
列舉法 (不考慮副取水點)		15.61~35.10	2,517,000
列舉法 (考慮副取水點)		23.66~35.10(主) 18.00~36.68(副)	2,635,500
註：*在案例中節點13處多加上一100公尺管線，並以114公尺為進水口高程。			

(2)成本與剩餘水頭之權衡

由於第5小區之進水點之操作水頭較高，故在進行選擇設計時，有很大彈性行各種不同之考量與探討，諸如求解總水頭損失控制在10公尺之內之方案，或探討最低成本與剩餘水頭之權衡關係等，提高最小壓力水頭之限制，將可提高供水之穩定性，但相對的成本需提高，相反若放鬆水頭限制條件則可降低建造成本，其為一成本與水頭兩個相互權衡之問題，為了解其相互影響之大小，將水頭限制以一公尺之級距予以降低與提高，進行管網系統最佳化設計，以求解最低成本之設計方案，結果如表3。由表3可以看出，最低水壓限制與最佳建造成本間，大致存在一正比關係，每提高水頭限制式，大致上將需付出較高之成本。

最低限制水頭19公尺與20公尺之最佳解成本相同，均為2,658,000元，但為不同之方案(管線15與16有相同之管長90公尺，在限制水頭19公尺時，管線15與16之管徑分別等於0.2M與0.25M，在限制水頭20公尺時，管線15與16之管徑分別等於0.25M與0.20M)，最低限制水頭21公尺與22公尺亦產生相同同之情形，顯示在相同之成本下亦可選用較高剩餘水頭之方案。若求取總水頭損失在10公

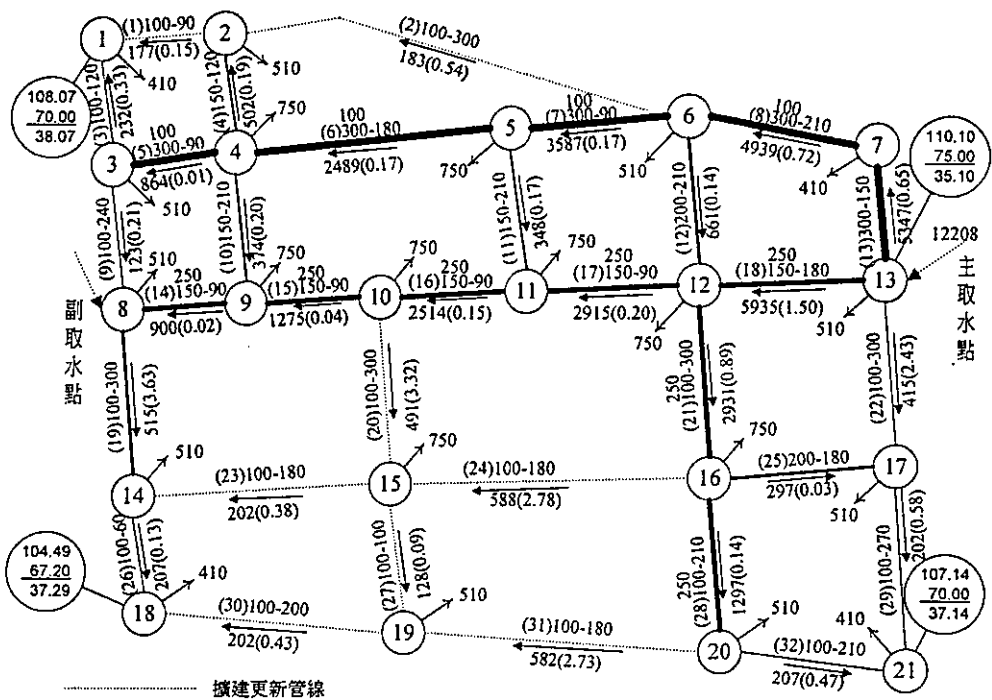
尺內之解，其方案成本為2,989,500元，主取水點之水力分析在30.70~35.87公尺之間，副取水點之水力分析在29.03~36.68公尺之間，與在限制水頭15公尺時之最佳解成本相比較，成本增加354,000元，約13.4%，其最低剩餘水頭主取水點之水力分析增加7.04公尺，副取水點之水力分析增加11.03公尺。這些不同條件下之替代方案可提供決策者更多之資訊，有助於提高策品質。

表 3 最低限制水頭與成本之權衡比較表

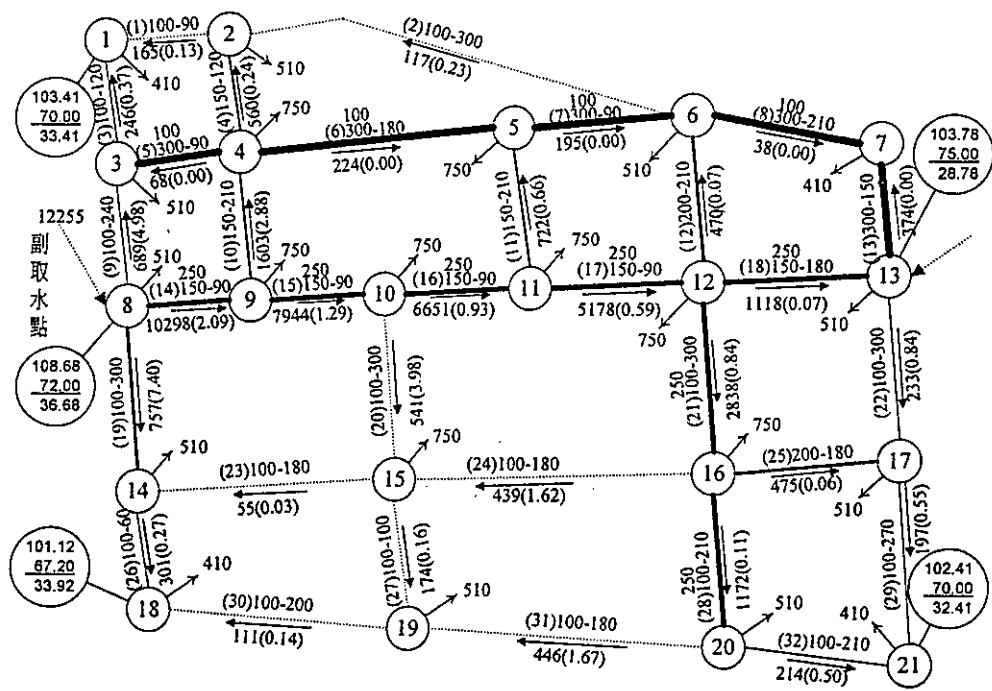
最低限制水頭(M)	剩餘水頭(M) (主取水點)	剩餘水頭(M) (副取水點)	建造成本 (元)	成本差 (元)	備註
15	23.66~35.10	18.00~36.68	2635500		
16	23.66~35.10	18.00~36.68	2635500	0	
17	23.66~35.10	18.00~36.68	2635500	0	
18	23.66~35.10	18.00~36.68	2635500	0	
19	24.21~35.10	19.31~36.68	2658000	22500	
20	23.99~35.10	20.56~36.68	2658000	0	管線15,16不同
21	24.88~35.10	21.47~36.68	2680500	22500	
22	24.40~35.10	22.06~36.68	2680500	0	管線16,17不同
23	25.39~35.10	23.08~36.68	2703000	22500	
24	25.43~35.10	24.01~36.68	2734500	31500	
25	25.58~35.10	25.99~36.68	2763000	28500	
26	26.14~35.10	26.14~36.68	2788500	25500	
27	27.02~35.10	27.02~36.68	2836500	48000	
28	28.21~35.10	28.12~36.68	2898000	61500	
29	30.70~35.22	29.03~36.68	2989500	91500	總水頭損失 10M內之解
30	30.70~35.10	30.07~37.22	3039000	49500	
31	31.95~36.09	31.03~37.14	3129000	90000	
32	32.57~36.53	32.06~37.59	3327000	198000	

2. 擴建更新管網系統設計

第5小區以擴建更新管網系統為考量時，其系統配置與最低成本之設計方案如圖5所示，現有系統之擴建更新需考量很多相關因素，本文僅針對報告書[6]中之設計方案進行探討，虛線為表示可以擴建更新之位置，包含管線1, 2, 20, 23, 24, 27, 30與31等8條管線，系統中管線19之位置考慮可以埋設平行管線，其設計結果如表4所示，由於擴建更新之位置屬管線系統之末端區域，加上主



(a) 主取水點



(b) 副取水點

圖 5 第5小區系統水力分析圖(擴建更新管網成本=612000NT\$)

副進水點之水頭較高，以最佳化模式進行求解，其可選擇設計之商用管線不多，結果以最小管線100mm進行設計即可符合設計規範，管線19亦不用埋設平行管徑，其剩餘水頭主取水點之水力分析在34.61~39.40公尺之間，副取水點之水力分析在28.78~36.68公尺之間，最低成本為612,000元。

表 4 第5小區擴建更新管網管線設計比較表

	剩餘水頭(M) (主取水點水力分析)	剩餘水頭(M) (副取水點水力分析)	建造成本 (元)
小區管網報告書[6]	35.05~39.74	29.02~38.33	996,000
列舉法	34.61~39.40	28.78~36.68	612,000

3.主副取水點之比較

主副取水點之設置為小區管網之特色，在主取水點發生供水問題時能有替代之副供水口，以確保能正常供水，降低可能造成之風險，故設計方案必需對主副取水口均進行水力分析，確認其符合設計要求，第5小區以最佳化模式進行新建管網之設計求解時，不考慮副取水點所減少之成本為118,500元，約佔4.5%。

4.小區管網最佳化設計之探討

小區管網設計為整體配水管網系統規劃設計之一環，理論上供水區之區畫依地形、供水特性、水源、河川與道路等分成三個層次的大、中、小區畫，小區畫以配水管長2~5公里左右，給水人口2000~4000人為單位[8]，其管線數基本上不多，對於現有管線之擴建更新，管線數更是有限，故最佳化模式以列舉法進行求解在效率上不會發生太大的問題，將可提供求得最低成本設計方案之有力工具。目前最佳化模式之應用主要限制在於實務工程之設計要求上，包括主副取水點之考量，平行管徑之水力分析與設置，特殊障礙物之考量，資料修改之難易與求解效率之快慢等，這些若能克服，將可提高最佳化模式普及應用之接受度。本研究依多階段多選項系統所建立之最佳化模式，基本上與實務工程

之設計之程序相同，對於上述所提各種實務工程需求，均可在此一架構下予以個別考量設計。

五、結論與建議

- 1.比較最佳化設計方案與傳統設計方案之建造成本，在符合設計規範下，第5小區最低成本方案之建造成本，較之以經驗設計節省22%左右，顯示最佳化程式確實可在符合設計準則之條件下，找到較為經濟之設計方案。
- 2.以多階段多選項系統所建立之最佳化模式，可充考量實務工程之設計需求，本文以第5小區為案例研究，對新設管網或擴建更新管網均可得到良好結果。
- 3.最佳化模式應用於第5小區之新設管網設計時，由於水頭充足，故可進行最低限制水頭與成本之權衡探討，最低水壓限制與最佳建造成本間，大致存在一正比關係，提高供水之穩定性，但相對的成本需提高，相反若放鬆水頭限制條件則可降低建造成本。
- 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，小區管網之設計需同時考量主取水與副取水點之水力分析是否合乎規範，即是風險考量的一環，另外亦可配合多負載供水型態之要求，斷管之發生或緊急消防用水之需求等，考量其可能增加之風險。設計最佳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難之平衡點。

參考文獻

- 1.陳榮藏，“配水管網分析方法之研討與應用”，自來水會刊雜誌，第十六期，第15~36頁，民國74年11月。
- 2.葉弘德，李厚達，“大型自來水管網分析”，自來水會刊雜誌，第二十八期，民國77年11月。
- 3.陳榮藏，配水管網分析，訓練叢書(自來水工程技術類01)，臺灣省自來水員工訓練所編印，民國71年6月。

- 4.林偉田，配水管網之佳化設計，成功大學環境工程研究所碩士論文，民國73年8月。
- 5.吳瑞賢，林永敏，”結合水力計算與線性規劃應用於自來水管網最佳化”八十四年電子計算機於土木水利工程應用論文研討會論文集，第1203~1214頁，民國84年10月。
- 6.臺灣省自來水公司，台中市小區域管網計劃報告，中區工程處，民國74年10月。
- 7.吳瑞賢，林永敏，”自來水管網之最佳化設計及擴建分析”，自來水會刊雜誌，第五十五期，第42~55頁，民國84年8月。
- 8.朱健行，”自來水配水區畫之探討”，自來水會刊雜誌，第六十五期，第78~88頁，民國87年2月。
- 9.林碧亮，廖述良，吳瑞賢，”自來水管網系統最佳化設計之初步研究”，八十四年電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集，第417~428頁，民國84年10月。
- 10.林碧亮，廖述良，吳瑞賢，陳榮藏，”管網系統最佳化設計模式之發展與建立”，第十三屆自來水研究發表會論文集，第235~249頁，民國85年11月。
- 11.林碧亮，吳瑞賢，廖述良，”列舉法求解自來水管網最佳化設計之效率探討”，八十六年電子計算機於土木水利工程應用研討會論文集，第141~152頁，民國86年10月。
- 12.Chang, S. Y. and Liaw, S. L., “An efficient implicit enumeration algorithm for multistage systems,” Paper presentation edited at the TIMS/ORSA joint national meeting. New Orleans, L. A. (1987).
- 13.Park, H. and Liebman, J.C., “Redundancy-Constrained Minimum-Cost Design of Water-Distribution Nets,” Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 119, No. 1, pp.83-98 (1993).
- 14.Sonak, V.V., and Bhawe, P.R., “Global Optimum Tree Solution for Single-Source Looped Water Distribution Networks Subjected to a Single Loading Pattern,” Water Resource Research, Vol. 29, No. 7, pp.2437-2443 (1993).
- 15.Lin B. L., Wu R. S. and Liaw S. L., “A heuristic approach algorithm for the optimization of water distribution networks,” Water Science and Technology, Vol. 36, No. 5, pp.219-226 (1997).