

遺傳演算法求解配水管網設計最佳化之應用

蕭宏民¹ 林碧亮² 黃文吉³ 吳瑞賢⁴ 廖述良⁵

摘要

目前在文獻上有許多應用最佳化方法求解管網系統之設計問題，包括列舉法、線性規劃、非線性規劃、動態規劃與遺傳演算法(GA, Genetic Algorithm)等，配合哈弟-克勞斯法、修正哈弟-克勞斯法或牛頓-勒佛森法等水力模擬方法，建立其最佳化模式來求解自來水管網設計的問題，各有其優劣點。例如線性與非線規劃之主要缺點為其所用之管徑變數通常為連續變數，而非商用管徑；而列舉法求解時則因組合數太大，在系統較大時，合理之時間內難以求得最佳解，需作部份系統簡化與修整。本研究以遺傳演算法與哈弟-克勞斯法水力模擬方法建立自來水管網系統設計最佳化模式，試圖克服目前實務與工程上所面臨的問題，經案例演算與文獻之比較驗證，顯示其求解速度與獲取最低成本方案上，具優越的特性，其應用在自來水管網之最佳化設計上，實有研究應用之價值。

關鍵詞：遺傳演算法、管網系統、最佳化、設計

-
- 1 經濟部台灣省自來水公司第一區管理處副理
國立台灣海洋大學河海工程研究所博士候選人
 - 2 私立明新科技學院土木工程研究所助理教授
 - 3 國立台灣海洋大學河海工程研究所副教授
 - 4 國立中央大學土木工程研究所教授
 - 5 國立中央大學環境工程研究所教授

一、前言

遺傳演算法(Genetic Algorithm)的概念源自達爾文演化論中「物競天擇，適者生存」的道理，在 1970 年代由賀蘭(John Holland)所提出來的。其應用目前正方興未艾，經理論與實務之探討與應用，已經成功的解決了大部份傳統的解析(analytic)與數值(numerical)的最佳化技術所難以求解的非連續(dis-continuous)或不可微分(non-differentiable)、以及非凸(non-convex)、多峰(multiple peaks)的函數最佳化問題(Goldberg, 1989)。基於自來水管網系統為一複雜之系統，同時其管徑變數可以容易的予以編碼，因此遺傳演算法求解管網系統設計最佳化，在文獻上已有數篇文章進行探討如下：

1. 在初步求解自來水管網系統的最佳化問題上 Goldberg(1989)；Michalewicz (1994);Martinez et al. (1995)；Halhahl et al. (1997)等均定義良好的架構，基本上求管網最佳化問題，GA 是使用隨機選擇過程偽裝其後的生物增殖操縱基因，選擇，交配，和突變，來求取不受拘束的函數之極小值和極大值的搜尋步驟。
2. Pilar Montesinos 等人(1999)提出了對簡單 GA 修訂的一個聚合有效運用。介紹改變被選擇、突變以形成下一族群的方法。遺傳演算法是一種可應用於很多不同問題的最理想解法的搜尋步驟。當問題被公式化成第(1)至第(6)式，每一種解法為一組 0 和 1 的二元碼來表示的 N_p 直徑。因此族系長度為 $N_p \times K_c$ ，其中 K_c 是管線數目。基於處罰函數的連結效應，該效應與壓力和流速界限(方程式(5)和(6))之違反，選擇，交配，和突變操縱基因相關。依水力因素的地面區劃與節點需求，最理想的環狀網路重力系統設計由導致最低投資費用的一組輸送管尺寸來界定。
3. Simpson et al. (1994)則應用遺傳演算法求解管網系統，並與完全列舉法和非線性規劃比較，以探討其成效。Dandy et al. (1996) 則改良 Simpson 直接應用簡單遺傳演算法(simple genetic algorithm)之效率，並以文獻上紐約幹管系統(New York tunnels problem)之案例與之前研究文獻比較，結果顯示遺傳演算法較之前應用之方法可以求得較低之成本設計方案。

基於文獻探討與研究，GA 應用在自來水管網之最佳化設計上，有其進一步本土化與研究改善空間，因此，本研究乃應用遺傳演算法於管網系統設計最佳化上，以謀求在有限的時間及資源下，求得管網系統最佳化設計，並以其結果與以前之文獻比較與探討。

二、方法論

1.最佳化模式之建立

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。

2. 遺傳演算法簡介

遺傳演算法(Genetic Algorithms; GAs)是在 1975 年由美國密西根大學(University of Michigan)的 John Holland 與其同僚共同發展出來的, 迄今約二十年, 可以算是一個新的研究領域。這種模擬自然界適者生存(The Survival of Fitness)進化法則的最佳化方法, 由於具備許多獨特的優異性能, 所以在各種領域中逐漸受到重視, 應用的範圍也愈來愈廣泛, 可說是一個十分具有潛力的方法。

GA 在求解時, 必須先確定目標函數、設計變數及搜尋空間。利用 GA 求解自來水管網系統設計最佳化問題, 首先將每個階段管線設計變數, 以模擬生物學中染色體(Chromosome)方式轉換成字串的型式(用 0 或 1 的數字表示), 字串中的各個位元即相當於基因(Gene)。染色體上的基因排列狀況, 將依據目標函數來決定具有這種染色體的個體(Individual)之適合度(Fitness)。在 GA 開始運作之初, 一般是透過隨機方式(或依實際需要)產生初始的解, 亦即為最原始的親代(Parents)。而往後的演化過程則由複製(Reproduction)、交配(Crossover)及突變(Mutation)等三個主要的運算子(Operators)來推動。

3 遺傳演算法應用於管網系統設計之流程

本研究所採用之遺傳演算法, 以灰階編碼與結合精英策略, 相較於基本之遺傳演算法更能提高搜尋到整體最佳值(Global Maximum)之機率。其應用於管網系統設計見圖 1 所示, 其流程如下:

(1).將管徑變數編碼:

一條染色體要能夠儲存正確的訊息，就必須讓染色體中的基因有一定的編碼方式。編碼的重要性是不容忽視的，若是染色體中的所帶的訊息必需依照一定的先後次序來表現，則順序倒置的基因是毫無意義的。基本上管徑編碼可用二元數的基本編碼形態與使用灰階編碼。所謂的灰階碼 (Gray Code) 就是說與前一組數字只有一個數目字不同。管徑變數編碼對應關係如表 1 所示。

表 1 管徑變數編碼對應關係表

	管 徑	8 根管對應字串		16 根管對應字串	
		二元數編碼	灰階編碼	二元數編碼	灰階編碼
1	0.10	000	000	0000	0000
2	0.15	001	001	0001	0001
3	0.20	010	011	0010	0011
4	0.25	011	010	0011	0010
5	0.30	100	110	0100	0110
6	0.35	101	111	0101	0111
7	0.40	110	101	0110	0101
8	0.50	111	100	0111	0100
9	0.60			1000	1100
10	0.70			1001	1101
11	0.80			1010	1111
12	0.90			1011	1110
13	0.95			1100	1010
14	1.00			1101	1011
15	1.10			1110	1001
16	1.20			1111	1000

(2).產生初始群集(Initial Population)

以隨機的方式產生初始群集作為初始解。產生之群集數視系統大小而定。

(3).計算目標函數值(Evaluation)

將初始群集解碼後對應的管徑變數，一一計算其成本，其總和即為目標函數值。

(4).計算適合度(Fitness)

適合度愈高表示該染色體具有較優的特質，將來被複製(Reproduction)的機會也較

大，以搜尋最大化目標值的問題來說，適合度可直接以目標函數來表示，對管網系統設計而言，求最低成本屬於最小化目標函數之問題，適合度函數需以目標函數經進一步之處理，本研究以目標函數之倒數做為適合度，目標函數值愈小，適合度愈大。當系統設計方案之水力分析不符設計規範時，予以一懲罰函數因子，本研究依案例取 1,000,000 NT\$/m 左右。

(5).複製(Reproduction)或選取(Selection)

由目前之親代群集中依一定之方法選取交配對，進一步繁衍為子代，親代被選取的機率一般常用以轉盤法(Roulette Wheel Method)來設計選取，本研究則以競爭選取法(tournament selection method)進行來選取。將親代群集經混合均勻後，選出其中兩個比較其適合度，產生一個可進演化之親代，再選出另外兩個比較其適合度，產生另一個可進演化之親代，以此對適合度較高的親代進一步演化，因此較好的基因得以流傳與繼承。

(6).精英(Elitist)策略

因為遺傳演算法係以適合度決定子代字串之複製機率，然而適合度最佳之子代字串雖然複製機率較高，但並非一定能得到複製，故可設定永遠保留至到目前為止最佳的個體，保留最佳個體數目依實際問題而定。

(7).基因交換(Crossover)或重組(Recombination)

由上一項所選取的兩兩配對染色體，經由彼此間所進行之基因交換產生子代。藉此，子代可同時具有父母雙方部份之優良基因，合組成更具有適應能力之染色體。進行基因互換，一般常採用的方式有三，即單點交配、雙點交配與均勻交配。其中單點交配為隨機產生一配對點，親代保留配對點前之基因，互換其後之基因而形成下一代。以二進位編碼為例，某兩組染色體為 1011010 與 1111000，先以亂數選取交換點(Crossover Point)，如選取的交換點在第 5 與第 4 位元之間，則交換後之子代為 1011000 與 1111010。雙點交配則係產生兩配對點，親代交換兩點間之基因，而保留其餘部份。藉由雙點交配理念可擴充成多點交配，均勻交配則依序以一個個位元，以亂數值來決定其是否交換，本研究採用單點交配與均勻交配兩種。

(8).突變(mutation)

突變即從染色體中隨機任取基因做修正，以防止染色體於複製及交配過程中，遺漏重要訊息或落入局部最佳解。一般處理方式有兩種：(1) 基因突變，當產生之亂數低於

設定之突變率時，隨機任取基因更動基因值。(2) 移轉突變，即變動染色體某一段之基因位置，而不改變其值。突變率之設定直接影響尋優結果，該值過小，將無法發揮突變功能，可能發生過早收斂現象，反之將破壞子代繼承親代之優良基因。突變率大小隨問題之不同有不同之值，通常以試驗得到適用之數值。

至此，原來的群集已經演化為第二代，重複上述步驟 3~8，經多代的演算後可望得到較佳的變數解，甚至能夠收斂逼近於整體最佳解。

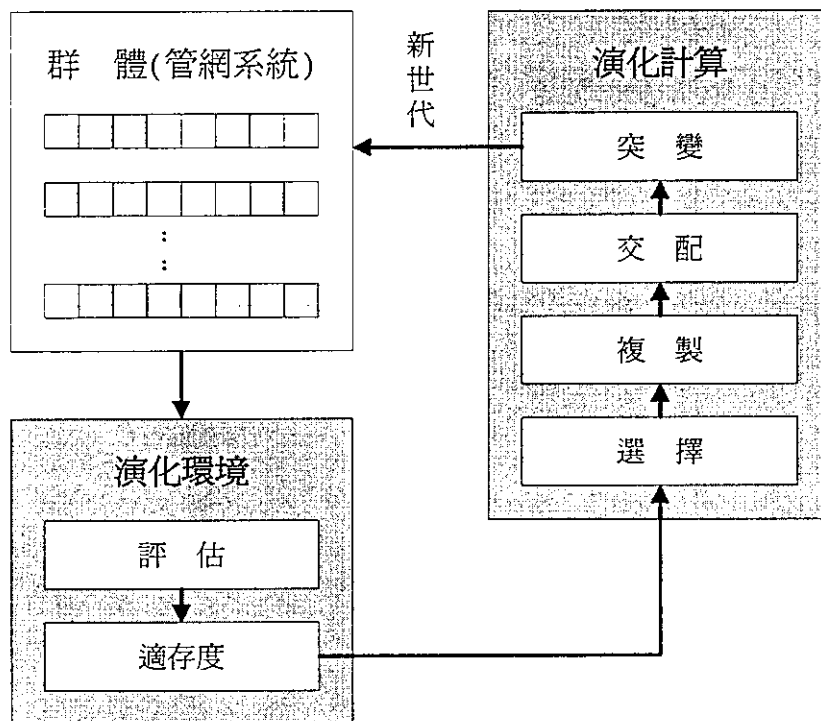


圖 1 遺傳演算法應用於管網系統設計之流程

4 遺傳演算法應用於管網系統設計之參數選擇

參數的敏感度分析與案例之特性與大小有關，為進一步取得較適合之參數，本研究先進行初步之敏感度分析，再進行相關的參數安排與選擇。

(1). 族群大小(Population Size)

population 的大小依管網系統之大小而定，在較大的 population 中每一代 training 的時間較長，但是較大的 population 的 training 品質較好，較小的 population 則每一代 training 的時間較快，但其 training 品質可能較差。選擇一適當的 population size 可以使得遺傳演算法兼顧效率和效用。本研究依所應之案例選用在 10~100 之間。

(2) 基因交換率(Crossover Rate)

Crossover 主要是爲了讓 chromosomes 互相交換有用的資訊，使得 chromosomes 獲得更高的 fitness，以期望能在下一代有更好的 chromosomes，而獲得更好的 performance。但是有時爲了讓某些 chromosomes 的基因可以完全保留給到下一代，所以便有了 crossover rate。其大小依照各問題而定，適當的 crossover rate 對於訓練品質是非常重要的。本研究選用 0.5。

(3) 突變率(Mutation Rate)

mutation 是爲了得到更多的資訊，但是通常來說 mutation rate 的值是很小的，因爲太高的 mutation rate 反而會使 chromosomes 中的有用資訊因爲 mutation 而遺失。而 mutation rate 是可以動態的，例如當連續一段時間 chromosomes 都沒什麼進步時，便可以將 mutation rate 調大，以期有更多變化。本研究選用 0.02。

三、案例研究與討論

1. 應用案例

爲驗證規則庫啓發式演算法之效率，本研究以包含直線管徑系統在內的五個系統案例進行比較求解。圖 2 案例 #1 爲有 4 段管線之直線管徑系統。案例 #2 如圖 3 所示，包含 7 根管子 2 個環路的配水管網系統。案例 #3 包含 12 根管子 4 個環路的配水管網，節點進水量及取水量爲已知之固定值，如圖 4 所示。案例 #4 則包含 14 根管子 4 個環路，圖 5 中節點 11 爲水源，其操作水頭爲固定值。案例 #5 如圖 6 爲台中港特定區平地系統配水管網，本例包含 21 根管子及 7 個環路的配水管網。

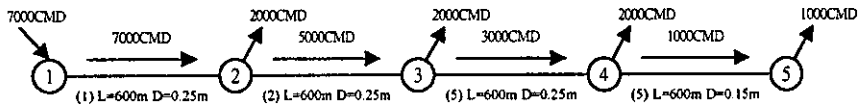


圖 2 案例 #1 管網系統配置圖

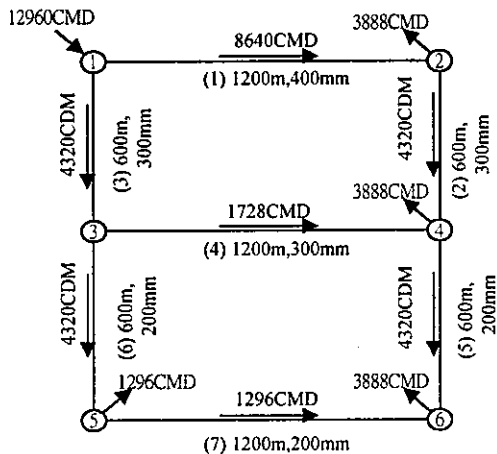


圖 3 案例 #2 管網系統配置圖

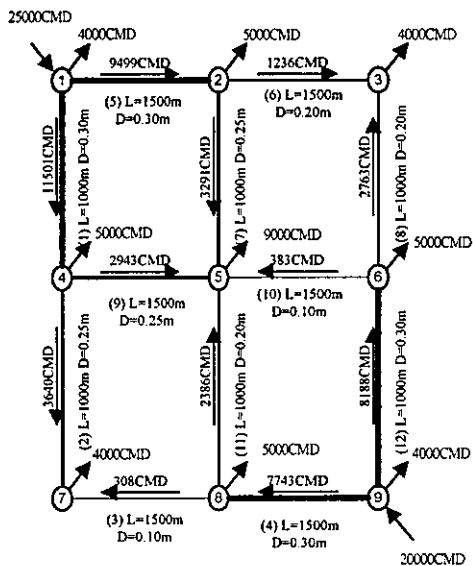


圖 4 案例 #3 管網系統配置圖

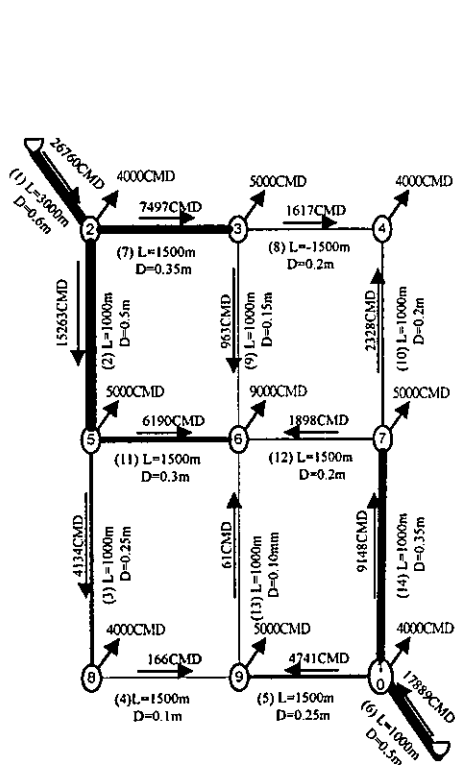


圖 5 案例 #4 管網系統配置圖

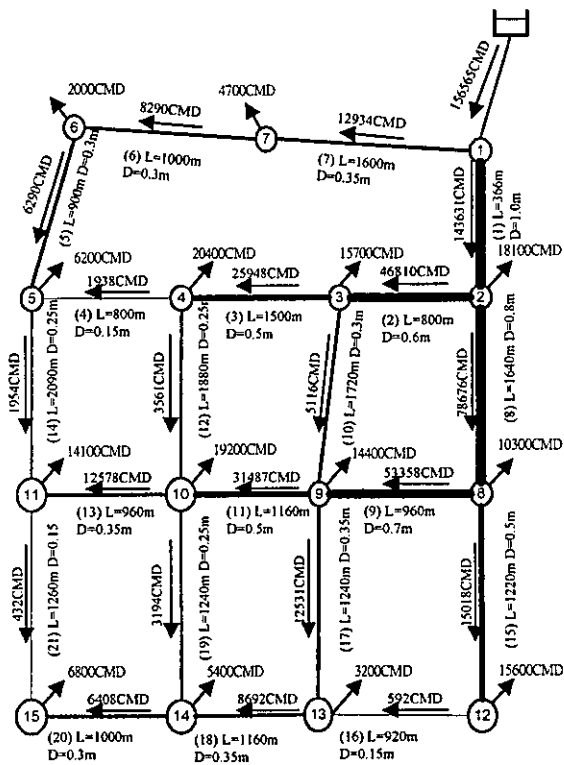


圖 6 案例 #5 管網系統配置圖

2. 結果與討論

- (1) 求解之結果：當選定之參數適當時，GA 可以找到很低成本之經濟方案，其結果甚至較之前所使用列舉法所求之解還好，表示之前所訂之可行管徑範圍可以再探討調整。
- (2) 求解時間：從案例之結果來看，基本上可以很快找到良好之解，其求解之時間主要與演化世代數和族群數有關。
- (3) 族群數：系統較大時，所需之族群數同樣需較大，這樣散布在解域內之點才足夠，故案例#3、案例#4 與案例#5 主要取 100 個，而小案例之案例#1 案例#2 則取 10 個即可。

表 2 遺傳演算法之執行結果

案例	迴圈數	管線數	成本(萬元)	已知最佳解(萬元)	CPU (sec)	演化世代數	族群數	懲罰函數值	管徑位元數	編碼方式
#1	0	4	298.3	266.2	3.1	100 或 1000	10	1.0E06	4bits	灰編碼
#1	0	4	265.8	266.2	2.0	100	10	1.0E06	3bits	灰編碼
#1	0	4	256.3	266.2	1.6	100	10	1.0E05	3bits	灰編碼
#2	2	7	636.7	621.9	2.5	100 或 1000	10	1.0E06	4bits	灰編碼
#2	2	7	575.5	621.9	1.5	100	10	1.0E06	3bits	灰編碼
#3	4	12	1792.5	1815.8	1.7	100	10	1.0E06	3bits	灰編碼
#3	4	12	1795.2	1815.8	10.0	1000	100	1.0E06	4bits	灰編碼
#4	4	14	3172.9	3070.9	2.5	100	10	1.0E06	3bits	灰編碼
#4	4	14	2892.2	3070.9	179.0	1000	100	1.0E06	4bits	灰編碼
#4	4	14	2836.7	3070.9	169.0	1000	100	1.0E06	4bits	二元碼
#5	7	21	4690.1	4953.2	1340.0	1000	100	1.0E07	4bits	灰編碼
#5	7	21	4705.4	4953.2	1359.0	1000	100	1.0E07	4bits	二元碼

註：時間之計算使用之 CPU 為 PentiumII-400，速度為 42.3Mflops。

- (4) 懲罰函數值：主要在於將不符水頭限制式之解，減少其適合度，而在演化的過程中予以淘汰，故最佳解位於水頭限制 15 公尺之左右，有可能是不符水頭限制式之解，故懲罰函數值對於最佳解有很大之影響。
- (5) 管徑位元數：代表系統組合建立之規模大小，3bits 表示每根管線有 8 個商用管徑選擇項，4bits 表示每根管線有 16 個商用管徑選擇項，以 3bits 之案例#1 為例，其所建立之系統組合數為 $8^4=4096$ 個，以 4bits 案例#5 為例，其所建立之系統組合數為 $16^{21}=1.93E25$ 個。
- (6) 編碼方式：編碼之方式影響執行之結果，在其它參數相同之條件下，案例#5 以灰階碼所得之結果較好，案例#4 以二元碼所得之結果較好。

四、結論與建議

1. 遺傳演算法應用於不同大小之管網系統案例時，以不同之參數值（演化代數、每代之群集數、懲罰函數因子、編碼方式...等）進行演化會得到有所差異之解，本研究以五個案例驗證其各自適合之參數值，顯示遺傳演算法具不斷改善之特性，雖然其不保證求得總體最佳解，但部份案例總是可以找到已知的最佳解，並在短時間內找到令人滿意的解。
2. 單就遺傳演算法優選之結果，發現遺傳演算優選模式不需搜尋大量組合僅需搜尋少量組合便可得到不錯結果，故可證明遺傳演算法的確是一具有高效率的優選方法。
3. 不管以遺傳演算法或界限隱式列舉法求解管網系統，均可以求得指定數目之替代方案，這些替代方案將可以進一步分析比較，以獲取對於整個系統更深入之了解 (insight)，並提供所展現有意義之資訊(meaningful information)，有助提昇決策品質。
4. 自來水配水系統在實務工程設計上，除管線考量外，需納入配水池、抽水站與相關附屬設施等、同時在配置上與地理資訊系統關係密切，故最佳化模化與地理資

訊系統之結合應用為解決目前規劃設計問題之解方案，值得進一步予以研究探討。

5. 在水力模擬模式的結合應用上，由於水頭損失與流量之需求，以速度平衡的概念來修正水力模擬方法，有助於取得良好且符合實際之水頭與流量值，在研究上有進一步探討之空間。

五、參考文獻

1. Lin, B. L., S. L. Liaw, and R. S. Wu, (1997). "A Heuristic Approach Algorithm for the Optimization of Water Distribution Networks," WATERMATEX 97: 4th International Symposium "System Analysis and Computing in Water Quality Management," Quebec City, Canada. pp.89-96.
2. Lin B. L., R. S. Wu and S. L. Liaw (1997). "A heuristic approach algorithm for the optimization of water distribution networks," Water Science and Technology, Vol. 36, No. 5, pp.219-226.
3. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1989).
4. Michalewicz Z, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, pp340, Springer Verlag, New York.
5. Simpson A.R., Dandy G.C. and Murphy L.J. "Genetic Algorithms Compared to other Technoques for Pipe Optimization", Journal of Water Resource Planning and Management, Vol. 120, No. 4, pp. 423-443, July/August, 1994.
6. Monte4sinos, M.P. and J. Izquierdo, Optimal design and reliability 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 Pelay0o Univ. Valencia. Spain. 1995.
7. 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.
8. Coit, D. W., "Penalty Guided Genetic Search for Reliability Design Optimization," Computers Industrial Engineering, Vol.30, No.4, pp. 895-904, 1996.
9. Gen, M. and Cheng, R., "A Survey of Penalty Techniques in Genetic Algorithms, "

- Proceedings of IEEE International conference on Evolutionary Computation, pp. 804-809, 1996.
10. Gen, M. and Cheng, R., "Foundations of Genetic Algorithms," Genetic Algorithms & Engineering Design, pp. 1-41, 1997.
 11. 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.
 12. Reis, L.F.R., Porto, R. M. and Chaudhry, F. H. (1997). Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of water resources planning and management, ASCE*. **123**(6), 317-326.
 13. Halhal, D., Walters, G. A. and Savic, D. A. (1997). Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of water resources planning and management, ASCE*. **123**(3), 137-146.
 14. Pilar Montesino, water resources .vol.35.no.11 pages 3467-3437. November 1999
 15. 張斐章，陳莉，「遺傳演算法於專家系統中參數優選之研究」，農業工程學報，第 39 卷，第 2 期，pp. 1-12(1993)。
 16. 張斐章，陳莉，「遺傳演算法優選水庫運用規線之研究」，農業工程學報，第 41 卷，第 4 期，pp. 20-30(1995)。
 17. 林碧亮，廖述良，吳瑞賢，(1995). "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。
 18. 林碧亮，廖述良，吳瑞賢，陳榮藏，(1996). "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。
 19. 林碧亮，吳瑞賢，廖述良，(1997). "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。

六、附錄：各案例之最佳執行結果

1. 案例 #1 最佳解

generation =100
 population size =10
 penalty function factor = 10^5
 coding=3bits(8 種商用管徑)
 OBJ FUNCTION VALUE= 2657999

表3 案例 #1 最佳解管網系統之管線與節點基本資料

管線	起始節點	終點節點	管長(M)	管徑(M)	C值	流 量 (CMD)
1	1	2	600	0.25	100	-6997.9
2	2	3	600	0.25	100	-4998.53
3	3	4	600	0.2	100	-2999.24
4	4	5	600	0.2	100	-999.24
節點	連接管數	水源	供水量 (CMD)	總水頭 (M)	地面高程(M)	操作水頭(M)
1	1	1	6997.9	60	20	40
2	2	0	-2000	49.67	20	29.67
3	2	0	-2000	44.12	20	24.12
4	2	0	-2000	37.74	20	17.74
5	1	0	-1000	36.91	20	16.91

2. 案例 #2 最佳解

合規範解亦為最佳目標函數值

generation =100

population size =10

penalty function factor = 10^6

coding=3bits(8 種商用管徑)

OBJ FUNCTION VALUE= 5754929

表4 案例 #2 最佳解管網系統之管線與節點基本資料

管線	起始節點	終點節點	管長(M)	管徑(M)	C值	流量(CMD)
1	1	2	1200	0.35	100	-11052.7
2	2	4	600	0.3	100	-7164.62
3	1	3	600	0.15	100	-1674.59
4	3	4	1200	0.1	100	-292.02
5	4	6	600	0.25	100	-3633.47
6	3	5	600	0.15	100	-1386.39
7	5	6	1200	0.1	100	-171.35
節點	連接管數	水源	供水量(CMD)	總水頭(M)	地面高程(M)	操作水頭(M)
1	2	1	12727.25	52	20	32
2	2	0	-3888	42.64	20	22.64
3	3	0	0	43.2	20	23.2
4	3	0	-3888	38.2	20	18.2
5	2	0	-1296	36.99	20	16.99
6	2	0	-3888	35.13	20	15.13

3. 案例 #3 最佳解

合規範解亦為最佳目標函數值

generation =100

population size =10

penalty function factor = 10^6

coding=3bits(8種商用管徑)

OBJ FUNCTION VALUE= 17924916

表5 案例 #3 最佳解管網系統之管線與節點基本資料

管線	起始節點	終點節點	管長(M)	管徑(M)	C值	流量(CMD)
1	1	4	1000	0.35	100	-9119.21
2	4	7	1000	0.25	100	-3831.74
3	7	8	1500	0.1	100	112.58
4	8	9	1500	0.35	100	10176.59
5	1	2	1500	0.4	100	-12232
6	2	3	1500	0.3	100	-3837.55
7	2	5	1000	0.25	100	-3413.73
8	3	6	1000	0.1	100	123.97
9	4	5	1500	0.1	100	-297.43
10	5	6	1500	0.1	100	154.27
11	5	8	1000	0.35	100	5134.01
12	6	9	1000	0.25	100	5219.78
節點	連接管數	水源	供水量(CMD)	總水頭(M)	地面高程(M)	操作水頭(M)
1	2	1	21351.23	52	25	27
2	3	0	-5000	44.63	25	19.63
3	2	0	-4000	41.14	25	16.14
4	3	0	-5000	46.54	25	21.54
5	4	0	-9000	40.08	25	15.08
6	3	0	-5000	41.99	25	16.99
7	2	0	-4000	40.89	25	15.89
8	3	0	-5000	41.96	25	16.96
9	2	1	15396.37	52	25	27

4. 案例 #4 最佳解

合規範解亦為最佳目標函數值

generation =100

population size =10

penalty function factor = 10⁶

coding=4bits(16種商用管徑),用 binary coding 方式

OBJ FUNCTION VALUE= 28366841

表6 案例 #4 最佳解管網系統之管線與節點基本資料

管線	起始節點	終點節點	管長(M)	管徑(M)	C值	流量(CMD)
1	1	2	3000	0.3	100	-4811.34
2	2	5	1000	0.1	100	-375.77
3	5	8	1000	0.3	100	4601.41
4	8	9	1500	0.4	100	8635.65
5	9	10	1500	0.6	100	27556.26
6	10	11	1000	0.8	100	40488.48
7	2	3	1500	0.1	100	-354.21
8	3	4	1500	0.1	100	55.25
9	3	6	1000	0.3	100	4589.43
10	4	7	1000	0.3	100	4064.77
11	5	6	1500	0.1	100	106.02
12	6	7	1500	0.1	100	-63.22
13	6	9	1000	0.4	100	13836.65
14	7	10	1000	0.3	100	8932.17
節點	連接管數	水源	供水量(CMD)	總水頭(M)	地面高程(M)	操作水頭(M)
1	1	1	4811.34	60	25	35
2	3	0	-4000	49.38	25	24.38
3	3	0	-5000	40.44	25	15.44
4	2	0	-4000	40.73	25	15.73
5	3	0	-5000	42.73	25	17.73
6	4	0	-9000	43.69	25	18.69
7	3	0	-5000	43.32	25	18.32
8	2	0	-4000	45.99	25	20.99
9	3	0	-5000	49.86	25	24.86
10	3	0	-4000	54.46	25	29.46
11	1	1	40488.48	56	25	31

5. 案例 #5 最佳解

合規範解亦為最佳目標函數值

generation =1000

population size =100

penalty function factor = 10^7

coding=4bits(16種商用管徑),用 gray coding 方式

OBJ FUNCTION VALUE= 46901237

表7 案例 #5 最佳解管網系統之管線與節點基本資料

管線	起始節點	終點節點	管長(M)	管徑(mm)	C值	流量(CMD)
1	1	2	366	0.95	110	-151822
2	2	3	800	0.9	110	-96261.1
3	3	4	1500	0.9	110	-79909.6
4	4	5	800	0.3	120	-8371.32
5	5	6	900	0.3	110	-1817.59
6	6	7	1000	0.1	110	259.13
7	1	7	1600	0.25	110	-4997.56
8	2	8	1640	0.5	110	-37460.5
9	8	9	960	0.3	110	-7678.98
10	3	9	1720	0.1	110	-588.4
11	9	10	1160	0.3	110	6029.74
12	4	10	1880	0.6	120	-51074.4
13	10	11	960	0.6	120	-20817.9
14	5	11	2090	0.1	120	-346.18
15	8	12	1220	0.5	110	-19427.9
16	12	13	920	0.3	120	-3764.99
17	9	13	1240	0.1	120	166.92
18	13	14	1160	0.1	120	-328.51
19	10	14	1240	0.25	120	-5010.73
20	14	15	1000	0.1	120	121.81
21	11	15	1260	0.3	120	-6997.53
節點	連接管數	水源	供水量(CMD)	總水頭(M)	地面高程(M)	操作水頭(M)
1	2	1	156819.2	48.4	10	38.4
2	3	0	-18100	46.03	10	36.03
3	3	0	-15700	43.14	4	39.14
4	3	0	-20400	39.3	4	35.3
5	3	0	-6200	33.66	4	29.66
6	2	0	-2000	33.22	4	29.22
7	2	0	-4700	36.02	4	32.02
8	3	0	-10300	27.94	4	23.94
9	4	0	-14400	21.17	4	17.17
10	4	0	-19200	26.4	4	22.4
11	3	0	-14100	25.15	4	21.15
12	2	0	-15600	23.95	4	19.95
13	3	0	-3200	22.48	4	18.48
14	3	0	-5400	18.19	3	15.19
15	2	0	-6800	18.78	3	15.78