

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

整合性水資源最佳營運及規劃模式發展與應用(III)

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-019-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

計畫主持人：張良正（國立交通大學土木工程系教授）

計畫參與人員：葉明生（國立交通大學土木工程研究所博士班）

蔡瑞彬（國立交通大學土木工程研究所碩士班）

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告

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

執行單位：國立交通大學土木工程學系

中 華 民 國 92 年 07 月 31 日

整合性水資源最佳營運及規劃模式發展與應用(III)

Development of Integrated Water Resources Operating and Planning Model (III)

計畫編號：NSC 91-2211-E-009-019-

執行期間：91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

主持人：張良正（國立交通大學土木工程系教授）

計畫參與人員：葉明生（國立交通大學土木工程研究所博士班）

蔡瑞彬（國立交通大學土木工程研究所碩士班）

一、中文摘要

本研究第三年度的工作將以第一年整合微分動態規劃(Differential Dynamic Programming)與多目標遺傳演算法(Multi-objective Genetic Algorithm)所建立的多目標優選方法，對未來台灣南部地區水資源調配可能執行的策略即地表地下水資源系統聯合營運來發展多目標營運及規劃模式，並進行實例驗證。此外，為反應地下水系統的動態變化及解決模式整體計算量增加的問題，本研究將第二年所發展的地下水位模擬類神經網路嵌入上述整合模式中來計算抽水量或補注量對地下水位變化之影響。

關鍵詞：微分動態規劃，遺傳演算法，類神經網路

二、英文摘要

This research will develop a flexible and powerful operating and planning model on conjunctive water resources management. The computational kernel of the model is an integration of differential dynamic programming (DDP), genetic algorithms (GAs) and artificial neural network (ANN). The computational powers of the DDP and GAs facilitate the model to solve an unsolved optimal management problem that contains both the fixed costs and operation costs for a dynamic system. The objective of the model is to solve a conjunctive-use management problem including surface and subsurface water system. Unlike most of the other conjunctive-use management models that always simplify the groundwater system as a single storage node in the system without considering the complex dynamic relationship between the water level and the pumping and/or recharge, this research applies the ANN model to simulate the dynamic of the groundwater system. The ANN model can not only accurately describe the dynamic of the groundwater system but also keep the required computational resources under a manageable level. On the other hand, a direct embedding of a groundwater simulation model will greatly increase the computational requirement and restrict the model's practical application. Beside the development of the management model, this research will also apply the model to a selected region to demonstrate model capability and investigate the different role of the surface and subsurface water system for a regional conjunctive-use based water resources management. This is a three years research project. The first year will integrate the DDP and GAs to develop the DDP-GAs optimal algorithm. The second year will develop the groundwater ANN model and integrate with the DDP-GAs algorithm to complete the model development. The final year will apply the model to a selected region to verify and demonstrate the model capability.

Keywords : Differential Dynamic Programming, Genetic Algorithm, Artificial Neural Network

三、緣由與目的

本研究第一年度乃結合多目標遺傳演算法與可微分動態規劃，藉由兩者的組合搭配直接求解同時擁有離散型目標函數與連續型目標函數的多目標決策問題。這是因為採用的多目標遺傳演算法及限制型微分動態規劃分別為離散型與連續型的演算方法，故以多目標遺傳演算法處理具有離散函數型態的固定成本部份與非劣勢解的求得，以可微分動態規劃解決具有連續函數型態特性的操作成本部份。另一方面，若將可微分動態規劃求解操作成本的問題從地表水系統擴充至地表地下水聯合營運的系統，並且還需維持地下水系統抽水、補注及水位變化的動態性，此時可微分動態規劃會因變數數目增加太多而產生計算量大幅增加的困擾(因地下水位狀態變數數量與模擬網格數目變化一致，所以地下水區的模擬網格越多地下水位狀態變數也會越多)。所以本研究建議由多目標遺傳演算法先決定各時變之地下水位系統的抽水量與補注量，接著藉由嵌入於多目標遺傳演算法中能處理非拘限含水層的地下水位模擬類神經網路(已於第二年度完成)來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係。這樣的處理方式不僅可以維持抽水量、補注量與地下水位隨時變的動態性，而且還能避免地下水系統的變數出現在可微分動態規劃中，造成變數過多致使整體計算量劇增的缺失。由上述的討論可瞭解藉由多目標遺傳演算法、限制型微分動態規劃與地下水位模擬類神經網路的整合，將可進行地表地下水資源系統聯合營運之多目標規劃。

四、多目標水資源規劃模式建立

1. 多目標水資源規劃理論模式架構

多目標水資源規劃模式可表示成如下雙目標之非線性動態優選問題 \bar{J} ：[問題A]

$$\bar{J} = \underset{\bar{a}, \bar{u}, \bar{q}}{\text{Min}} \quad \bar{Z} = \underset{\bar{a}, \bar{u}, \bar{q}}{\text{Min}} \quad \left\{ Z_1(\bar{a}), Z_2(\bar{u}(\bar{a}), \bar{q}(\bar{a})) \right\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \bar{s}_{t+1} = T(\bar{s}_t, \bar{u}_t) \quad t = 1, \dots, n \quad (2) \quad \bar{h}_{t+1} = T(\bar{h}_t, \bar{q}_t) \quad t = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$f(\bar{s}_t, \bar{u}_t, \bar{a}) \leq 0 \quad t = 1, \dots, n \quad (4) \quad f(\bar{h}_t, \bar{q}_t, \bar{a}) \leq 0 \quad t = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$0 \leq \bar{a} \leq \bar{a}^{\max} \quad (6) \quad 0 \leq \bar{s}_t \leq \bar{a} \quad t = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\bar{h}^{\min} \leq \bar{h} \leq \bar{h}^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (8) \quad 0 \leq \bar{u}_t \leq \bar{U}_t^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$0 \leq \bar{q}_t \leq \bar{Q}_t^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (10)$$

其中

$$Z_1(\bar{a}) = F(\bar{a})$$

$$Z_2(\bar{u}(\bar{a}), \bar{q}(\bar{a})) = \sum_{t=1}^n \{g_t(\bar{u}_t, \bar{q}_t) | \bar{a}\}$$

$F(\bar{a})$ 為系統各單元建置成本之和； $\bar{a} \in R^{m \times 1}$ 為欲考量之系統各單元之容量變數，為一決策變數向量， m 為單元容量個數； \bar{u} 地表系統所有時刻之決策變數向量的集合； \bar{q} 地下系統所有時刻之決策變數向量的集合； $g_t(\bar{u}_t, \bar{q}_t)$ 為代表系統 t 時刻之操作成本； n 系統分析時刻； $\bar{s}_t \in R^{l \times 1}$ 為地表系統 t 時刻之狀態變數向量， l 為其個數； $\bar{h}_t \in R^{d \times 1}$ 為地下系統 t 時刻之狀態變數向量， d 為其個數； $\bar{u}_t \in R^{R \times 1}$ 為地表系統 t 時刻之決策變數向量， R 為其個數； $\bar{q}_t \in R^{v \times 1}$ 為地下系統 t 時刻之決策變數向量， v 為其個數； $T(\quad)$ 為系統轉換函數(Transfer Function)； $f(\bar{s}_t, \bar{u}_t, \bar{a}) \in R^{k \times 1}$ 為地表系統結

構化限制條件，k 為其個數； $f(\bar{h}_t, \bar{q}_t, \bar{a}) \in R^{y \times 1}$ 為地下系統結構化限制條件，y 為其個數。

由目標函數的定義可發現系統各單元之容量變數 \bar{a} 會影響地表地下的操作決策變數 \bar{u} 與 \bar{q} ，但這些操作變數卻無法回頭影響容量變數的變化。再者若利用一般較常用的權重法(Weighting Factor Method)來解此多目標問題，即將各目標給予一權重值以合併為單一目標函數來求解，藉由不同的權重組合來得到不同的非劣勢解，由於求解過程仍為單目標問題型態，所以亦會發生同時考量固定成本與操作成本的問題其在時間上變為不可分離，而使具有問題需可分離的動態規劃理論無法應用。若以非線性規劃解之，則又因為系統的動態特性使得變數的維度大增而使得計算量及複雜度大為增加。此外，可微分動態規劃因地下水系統的併入而造成狀態變數數目大量增加(受模擬網格數目之影響)，故地下水系統的狀態變數與轉換函數之影響將造成整體計算量劇增的缺失。為解決這樣的缺點，本研究將原問題A修正為問題B的型態並分成兩個部份(主問題部份與次問題部份)來求解，解了問題B就等於解了原問題A。問題B如下所示：

$$\text{Min}_{\bar{a}, \bar{q}} \{Z_1(\bar{a}), Z_2^*(\bar{a}, \bar{q})\} \quad (11)$$

$$s.t. \quad \bar{h}_{t+1} = T(\bar{h}_t, \bar{q}_t) \quad t = 1, \dots, n \quad (12) \quad f(\bar{h}_t, \bar{q}_t, \bar{a}) \leq 0 \quad t = 1, \dots, n \quad (13)$$

$$0 \leq \bar{a} \leq \bar{a}^{\max} \quad (14) \quad \bar{h}^{\min} \leq \bar{h} \leq \bar{h}^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$0 \leq \bar{q}_t \leq \bar{Q}_t^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (16) \quad Z_1(\bar{a}) = F(\bar{a})$$

(問題B之主問題部份)

$$Z_2^*(\bar{a}, \bar{q}) = \text{Min}_{\bar{u}} \sum_{t=1}^n \{g_t(\bar{u}, \bar{q}) \mid \bar{a}, \bar{q}\} \quad (17)$$

前述主問題中之 $Z_2^*(\bar{a}, \bar{q})$ 乃由解下列之次問題而得

$$s.t. \quad \bar{s}_{t+1} = T(\bar{s}_t, \bar{u}_t) \quad t = 1, \dots, n \quad (18) \quad f(\bar{s}_t, \bar{u}_t, \bar{a}) \leq 0 \quad t = 1, \dots, n \quad (19)$$

$$0 \leq \bar{s}_t \leq \bar{a} \quad t = 1, \dots, n \quad (20) \quad 0 \leq \bar{u}_t \leq \bar{U}_t^{\max} \quad t = 1, \dots, n \quad (21)$$

(問題B之次問題部份)

問題B之主問題部份仍為一多目標的問題，且其中的目標函數 $Z_1(\bar{a})$ 單純為容量大小的函數，為具有離散函數型態的固定成本，故採用具有離散型態及多目標解題特性之演算法即多目標遺傳演算法來求解此一主問題部份是最恰當不過的；問題B之次問題部份的 $Z_2^*(\bar{a}, \bar{q})$ 雖亦為容量之函數，惟其為在某一給定容量下系統之最佳操作值，由於其為動態優選問題，且此時 \bar{a} 為已知值不再是變數，故無不可分離之困擾，所以這個部份適合用微分動態規劃來解此問題。此外，為防止可微分動態規劃因地下水系統的併入而造成狀態變數數目大量增加，故地下水相關的變數與限制式均不讓其出現在可微分動態規劃中，所以在問題B之主問題部份，多目標遺傳演算法除優選固定成本之問題及整體非劣勢解的求得外，尚需求解地下水系統的決策變數。問題B之主問題部份的地下水處理即由多目標遺傳演算法先決定各時變之地下水系統的抽水量與補注量，接著藉由嵌入於多目標遺傳演算法中能處理非拘限含水層的地下水位模擬類神經網路來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係，即以地下水位模擬類神經網路取代地下水轉換函數(13)式。這樣的處理方式不僅可以維持抽水量、補注量對地下水位隨時變的動態性，而且還能避免地下水系統的狀態變數與限制式出現在可微分動態規劃中，造成整體計算量劇增的缺失。故問題B之次問題部份為

在某一給定容量與相關地下水變數下系統之最佳操作，即以微分動態規劃解此一由(17)~(21)式所定義的地表系統優選次問題。

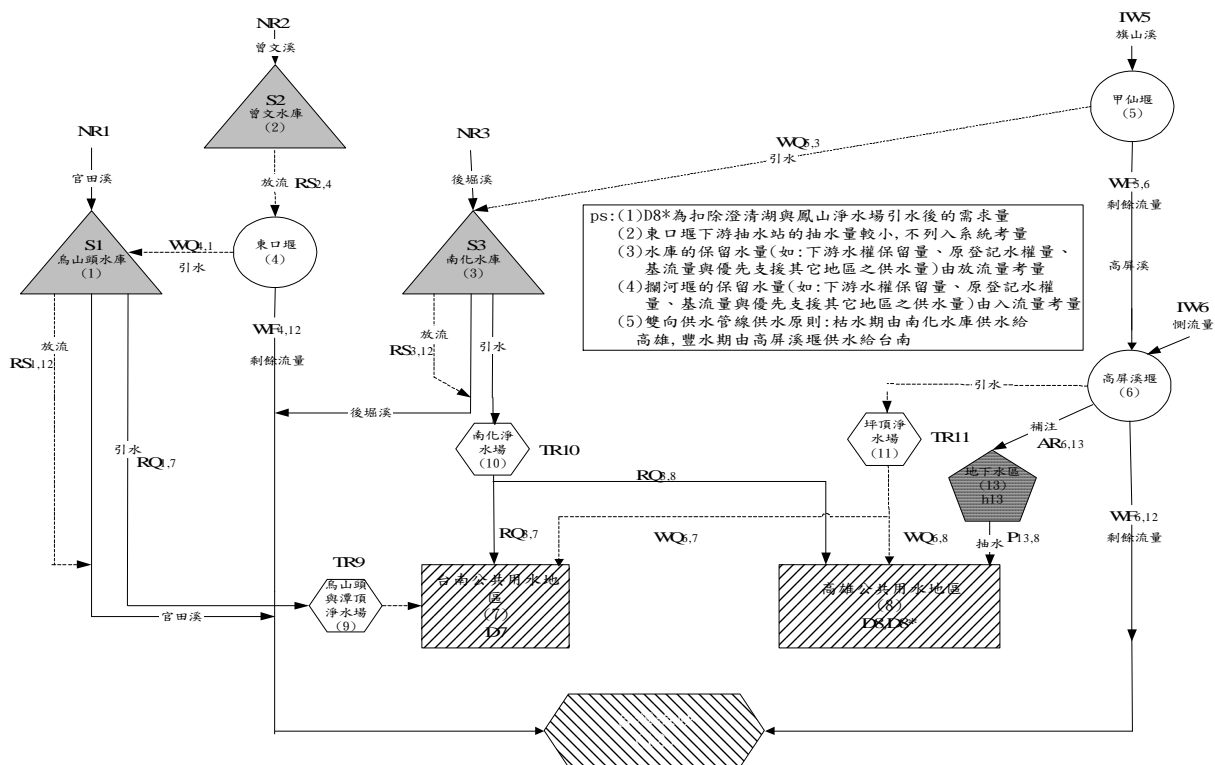
2. 多目標遺傳演算法、限制型微分動態規劃與地下水位模擬類神經網路之整合

整合模式之演算流程說明如下~**Step1 產生初始族群**：隨機產生 100 條染色體，每條染色體皆代表一個可能解，亦由數個決策變數以 0-1 二進位編碼組成，其組成變數除了為各水庫之規劃庫容、地下水區之抽水井群的建構容量、地下水區之補注井群的建構容量外，本研究為避免地下水系統的變數出現在可微分動態規劃中，造成求解微分動態規劃時變數過多致使整體計算量劇增的缺失，所以各時變之地下水系統的抽水量與補注量也設計為染色體的組成變數。**Step2 解碼**：Step1 為遺傳演算法之編碼過程，接著根據每一條染色體之編碼，將其解為對應之十進位數值，進而求出各個決策變數代表值。**Step3 地下水流模擬模式與相關地下水限制條件之判斷**：此步驟主要工作為針對解碼後的抽水量與補注量進行是否滿足抽水能力限制式、補注能力限制式與地下水總量管限制式之判斷。此外，地下水水位限制式因涉及地下水水位轉換函數故無法直接處理，所以本研究藉由嵌入於多目標遺傳演算法內的地下水位模擬類神經網路來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係。任何一條染色體只要發生相關地下水限制條件不滿足的情形，則不再繼續下一個步驟(計算目標函數)，即直接令其對應的兩目標函數值均為極大值，使其在爾後複製的過程中首先被淘汰掉。**Step4 計算目標函數**：通過 Step3 之判斷的染色體即可分別計算其目標函數 Z_1 、 Z_2 值，亦即將每一條染色體之容量決策變數加總後，乘以對應的單位開發成本，此即為目標函數 Z_1 (固定成本)之值；接著同時，經由微分動態規劃模式加以優選在這些已知的容量及抽水與補注量下其最佳操作成本函數值(Z_2)。**Step5 非劣勢解集合搜尋**：此時所有的染色體皆有其對應的兩目標函數值，利用窮舉比較法，即每一條染色體均和其他染色體互相比較各目標函數值，來求得當代之非劣勢解集合，並將非劣勢解集合紀錄下來。**Step6 適合度評估**：將每一染色體經由適合度函數評估其適合度之值，若任一染色體(可行解)距離任一非劣勢解越近，即表示其越接近非劣勢解，故適合度越大。**Step7 菁英策略**：本模式利用柏拉圖最佳分級法(Pareto Optimal Ranking Method)，先將族群中之非劣勢解集合指定為第一級，再將第一級之染色體移開，從剩餘之族群中找出非劣勢解集合指定為第二級，級數高者表示有較高之適合度。優先保留第一級及第二級之非劣解，再依剩餘染色體之適合度大小補滿至本研究所設定之 30 條染色體，作為菁英策略。**Step8 複製、交配及突變**：利用每條染色體之二個目標函數，計算其適合度(fitness)，並以比較(杜魯門)選取法決定族群中可生存下來的染色體，以使子代的染色體也有更多的機會保有親代染色體內品質良好的基因；本研究仍採比較(杜魯門)選取法，從母代中選擇出兩個染色體進行交配(crossover)，交配的總數則視交配率而定，交配的方式為採用均勻交配的方法以形成新的染色體，交配率在此處定為 0.65；同時，為了避免優選限入局部最佳解，訂定在某一機率下(即突變率定為 0.01)，選擇性地進行染色體的基因突變，即在 0 至 1 之間隨機產生一長度與染色體相等之陣列，陣列中與染色體位置對應之各元素值若小於所設定之突變率，則該位置之染色體基因即進行突變。**Step9 收斂標準**：經過複製、交配與突變以產生新的族群後，回到 Step2 以進行下一世代的優選，直到滿足事先設定的收斂條件為止即可停止。本研究的收斂條件訂定方式如下：將每代的完整非劣勢解集合以一檔案紀錄之，此檔案中若發生連續 10 代間的非劣勢解取代變動百分比均小於 5%以下之情形，則判定程式達到收斂。

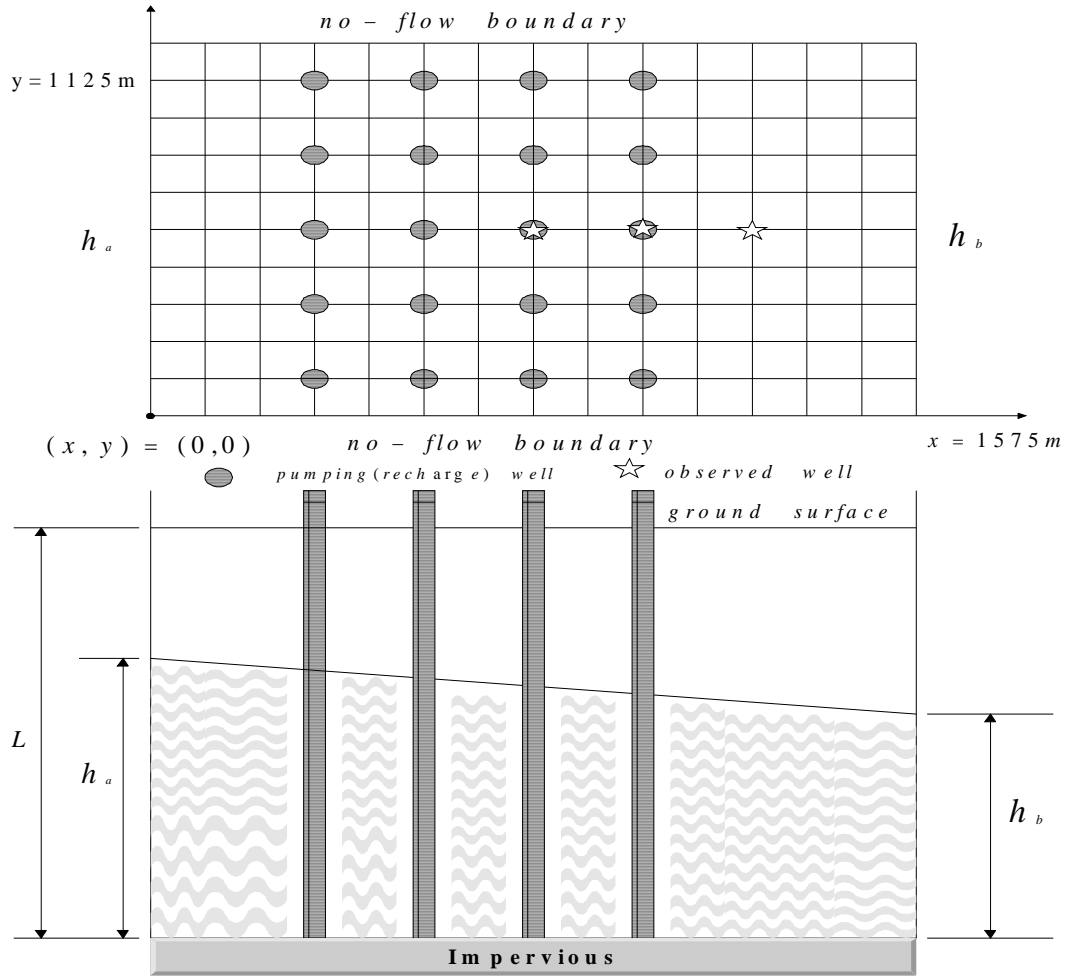
五、實例應用

1. 研究區域概述

本研究之模式應用區域為台灣南部地區之曾文溪及高屏溪水系，其地表地下水資源系統聯合營運流網圖如圖一所示，而本研究區域內現行營運中之供水設施計有曾文水庫，烏山頭水庫，南化水庫三座水庫及甲仙攔河堰、高屏溪攔河堰二座攔河堰。本案例所假設的地下水區具有非拘限含水層且其地下水流區域圖如圖二所示，於圖二之165個節點中，設置20口抽水井，3口觀測井，北邊及南邊為不透水邊界，東邊及西邊分別為定水頭邊界，含水層地質參數：水力傳導係數 $=5.0 \times 10^{-4} m/s$ ；貯水係數 $=0.1$ ；孔隙率 $=0.2$ 。每一口井之抽水下限為 $0 m^3/sec$ ，而抽水上限為 $0.1 m^3/sec$ ，由於假設此20口井亦有補注之功能，所以補注上下限與抽水相同。非拘限含水層水量管理之總規劃時間仍為10年，並將10年時間切成120個時刻，每一個時刻之時間間距為1個月。而初始水頭與相關限制條件如下所示： $h_a=75m$ ， $h_b=61m$ ， $L=100m$ 。其中 L 為地表到含水層底部的高度，參閱圖二。 h_a 及 h_b 為非拘限含水層的初始水位高度。當觀測井之水位掉落至47m以下即視為超抽，水位升高至100m以上即視為超灌。上述地下水區的相關資訊將可用來建置地下水位模擬類神經網路，此網路將能反應各種不同的抽水補注型態是否符合安全水位的限制。



圖一 地表地下水資源系統聯合營運流網圖



圖二 簡化之非拘限含水層，地下水流區域圖

2. 解法說明

(a) 目標函數一[固定成本]

$$Z_1 = \underset{Y, YP}{Min} \left\{ \sum_{i \in m} a \cdot Y_i + \sum_{f \in \psi} b \cdot YP_f \right\}$$

其中 Y1 烏山頭水庫的建構容量；Y2 曾文水庫的建構容量；Y3 南化水庫的建構容量；YP13 節點代號為 13 之地下水區其抽水井群的建構容量；a 單位水庫開發成本(2.62 元/噸)(吳, 1997)；m 水庫總數(m = 3)；b：抽水井群建構的單位成本(若水井使用年限為 10 年，單位成本為 0.48 元/噸；若水井使用年限為 30 年，單位成本為 0.11 元/噸)(吳, 1997)； ψ 地下水區集合($\psi = 1$)

(b) 目標函數二~操作成本(缺水指標)~

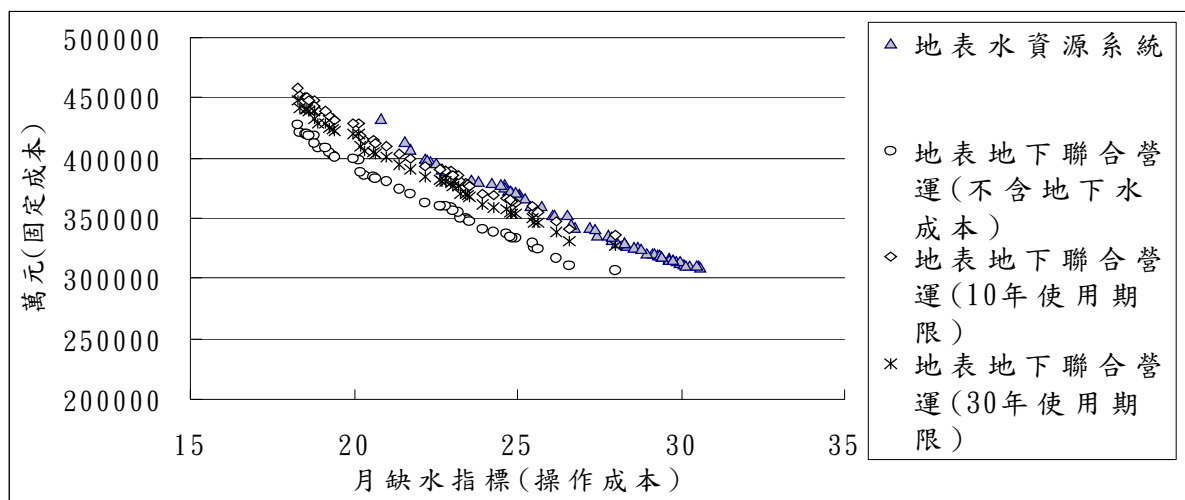
$$Z_2 = \underset{RQ, RS, WQ, P, AR}{Min} \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{RQ_{1,7,t} + RQ_{3,7,t} + WQ_{6,7,t} - D_{7,t}}{D_{7,t}} \right]^2 + \left[\frac{RQ_{3,8,t} + WQ_{6,8,t} + P_{13,8,t} - D_{8,t}^*}{D_{8,t}} \right]^2 \right\}$$

其中 $RQ1, 7, t$ 第 t 時刻由烏山頭水庫流出至台南公共用水地區的水庫引水量； $RQ3, 7, t$ 第 t 時刻由南化水庫流出至台南公共用水地區的水庫引水量； $RQ3, 8, t$ 第 t 時刻由南化水庫流出至高雄公共用水地區的水庫引水量； $WQ6, 7, t$ 第 t 時刻由高屏溪堰流出至台南公共用水地區的引水量； $WQ6, 8, t$ 第 t 時刻由高屏溪堰流出至高雄公共用水地區的引水量； $D7, t$ 第 t 時刻台南公共用水地區的需求量； $D8, t$ 第 t 時刻高雄公共用水地區的需求量； $D8^*, t$ 第 t 時刻高雄公共用水地區的修正需求量(為扣鳳山淨水場與澄清湖淨水場之每日穩定供水後的需求量)； $P13, t$ ：第 t 時刻節點代號 13 之地下水區的抽水量

本研究採用民國七十六年至八十五年共十年之入流量資料，並以民國一百年台南地區與高雄地區的需求水量為系統欲滿足之標的。因操作的方式為月操作，故目標函數二即為月缺水指標。此外，本案例之目標函數一(固定成本)的求解由遺傳演算法來處理，其決策變數~各水庫規劃容量~的優選區間為現有水庫容量的 2 倍至現有水庫容量的一半，而確切之決策變數值則將各染色體解碼即可獲得。此外，由於地下水區僅有一區且設井的位置與數目已預先決定，所以此處的地下水區建置容量將不當作決策變數來處理，故地下水的固定成本在目標函數一中可視為是一常數值。為避免地下水系統的變數與相關限制式出現在限制型微分動態規劃中，造成變數過多致使整體計算量劇增的缺失。故各時變之地下水系統的抽水量與補注量也設計為染色體的組成變數，並藉由嵌入於遺傳演算法中能處理非拘限含水層的地下水位模擬類神經網路來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係。

3. 非劣勢解結果說明

本案例於第 31 代達到收斂標準，優選出的非劣勢解如圖三所示，整個研究地區之固定成本(暫不考慮地下水成本)介於 427966.6(萬元)~306788.2(萬元)，而其所對應之月缺水指標則介於 18.29~28.02 之間。另外，圖三並探討了抽水井群建構的單位成本該如何選擇的方式，圖中地表水資源系統的非劣勢解與暫不考量地下水固定成本之地表地下水資源系統聯合營運的非劣勢解構成的帶狀區間即意謂著抽水井群建置成本的有效性，亦即加入了抽水井群建置成本後的固定成本若超出此一範圍則代表地表地下水資源系統聯合營運的整體效益尚不如只有地表水資源系統獨自營運。本研究以水井使用年限為 10 年，單位成本為 0.48 元/噸及水井使用年限為 30 年，單位成本為 0.11 元/噸來進行抽水井群是否應建置之評估。圖三顯示兩種單位成本的非劣解均有落至有效範圍內，其表示本研究區域在增加地下水區的設計後對整個系統之規劃及營運是有相當程度的助益。



圖三 考量不同抽水井群建置單位成本的非劣勢解

六、結論

本研究藉由多目標遺傳演算法、限制型微分動態規劃與地下水位模擬類神經網路的整合，將可進行地表地下水資源系統聯合營運之多目標規劃。由於採用的多目標遺傳演算法及限制型微分動態規劃分別為離散型態與連續型態的演算方法，故相當適用於求解同時擁有離散型目標函數與連續型目標函數的多目標決策問題。因此對於規劃中的水工結構物或水利設施將能同時考量其固定成本與操作成本的影響，而現存的水工結構物或水利設施亦可進行擴建成本與操作效益的整體評估。所以這樣的整合優選模式不僅能制定地表地下水資源系統聯合營運的操作策略，還能針對系統中任一蓄水、非蓄水、需水與地下水節點作短期或中長期的調配規劃。

七、參考文獻

1. 吳惠如 (1997)，「水源開發成本與水價關聯之研究」，合理用水與造水技術研討會，第 41-48 頁，。
2. David W. Watkins Jr & Daene C. McKinney (1998), "Decomposition Methods for Water Resources Optimization Models with Fixed Costs", WATER RESOURCES 21, pp.283-295,.
3. Dean Randall, Leasa Cleland, Catharine, S. Kuehne., George, W. BuzzLink., and Daniel, P. Sheer. (1997), "Water Supply Planning Simulation Model Using Mixed-Integer Linear Programming Engine ", Journal of Water Resources Planning and Management, pp.116-124,.