

智慧型水庫即時操作控制系統 Intelligent Control System for Real Time Reservoir Operation

國立臺灣大學農業工程學研究所博士班研究生

國立臺灣大學農業工程學研究所教授

張麗秋

Li-Chiu Chang

張斐章

Fi-John Chang

摘要

傳統水庫操作系統具以下幾項特徵：蒐集歷史流量資料、藉助系統分析方法尋求水庫最佳操作策略(規線制定)、隨著新觀測資料的增加而予以逐步校正；但因規線的範圍大，無法進行精確操作以有效利用水資源，且未考慮入流量預測與極端事件之影響，往往限制了水庫的防洪與救旱機能。為改進傳統操作上的缺失，本研究以適應性網路模糊推論系統(ANFIS)模擬控制水庫操作之放流量。

ANFIS 係將模糊邏輯理論架構在類神經網路系統上，以便於處理數值資料與定性(語意)的知識；本文以模糊減法聚類作為模糊推論的架構，並建立相關隸屬函數，再經由 ANFIS 學習與自我調適求得函數參數最佳解；此模式運用在水庫操作系統的主要步驟有二：(一)資料前處理：收集歷史流量資料與建立適當的水庫操作目標函數，套用遺傳演算法求得最佳放流歷程作為類神經網路的訓練標型；(二)建立 ANFIS 控制模式：從網路訓練時期調整適當的參數後，以推求未來時期水庫之最佳放流量；本研究以石門水庫操作為例，結合上述方法，由歷史流量模擬操作結果，並與傳統的石門水庫 M-5 規線操作結果相比較。

關鍵詞：適應性網路模糊推論系統，水庫操作，模糊邏輯理論，遺傳演算法，類神經網路。

ABSTRACT

A common strategy in the traditional reservoir operation is to search rule curves through system analysis according to historical inflow data, then, step by step, to adjust rule curves with coming data. This strategy is easy and convenient for reservoir operation; however, the ranges between rule curves are too large to precisely operate outflow of reservoir for water usage. Moreover, the information of inflow and extreme events are

not taken into account. Consequently, the rule curves, in general, could not work very well for the prevention of flood or drought. From the aforementioned points, we propose an adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) to enhance the efficiency of reservoir operation.

By combining fuzzy inference systems and neural networks, ANFIS not only can handle both quantitative (numerical) and qualitative (linguistic) knowledge, but also can successfully deal with the control laws for a complex system. Two main procedures are performed in order to implement the model to reservoir operation system. First, the genetic algorithm is used to search the optimal reservoir operating histogram which is recognized as the training pattern is the next step. Second, the ANFIS model is built to create the fuzzy inference system, to propose the suitable parameters, and to estimate the optimal water release. The proposed model is intended to investigate its practicability and efficiency by using the Shihmen reservoir. The M-5 rule curves are also performed for the purpose of comparison. The results show that the ANFIS model has better performance than the M-5 rule curves.

Keywords: Adaptive network-based fuzzy inference system, Reservoir operation, Fuzzy inference systems, Genetic algorithm, Neural networks.

一、前言

水資源工作是國家整體建設之一環，其之良莠不齊不僅攸關國人生活與環境之品質，更影響國家整體經濟發展；近幾年來台灣地區水資源的調配與運用亦有多起紛爭引起社會大眾的關注，如近兩年的颱風肆虐橫掃全台、洪水氾濫或是早幾年前的久旱不雨、河水乾枯、分區停水等問題，再再顯示水資源經營管理的重要性。早期台灣地區以農業用水為主，建立許多大型水庫如石門水庫、曾文水庫等；由於社會結構的改變與工商業的快速發展，農業用水量逐年下降，而仰賴可靠穩定供水的民生與工業用水卻有持續成長的趨勢；在遭遇乾旱缺水時，農業因收益較低，用水常被調節移用，對農業的經營影響極大；對持續成長的工商業，其供水的高不確定性，嚴重影響開發的意願。

臺灣地區氣候四季分明，雨量則在時間與空間上的分配非常不均勻，多集中於 5 月至 10 月的梅雨季節及颱風時期，造成乾溼季節與南北地區的降雨差異性極為顯著；此外，地形屬山多、坡度陡急，河川多屬東西走向—河短流急，以致

於大部分的雨水迅速逕流入海，無法充分利用。而在天然河川中可供引用的可靠水源加上水庫調節蓄水，仍經常無法滿足目前的總需水量，若逢久旱不雨，乾旱情形就更加嚴重，水庫的水位降至嚴重下限，甚至呆水位形成嚴重缺水。因此，未來水資源的調配運用，除在節流方面應持續加強宣導外，在開源方面，水庫蓄水運用仍為主要途徑。惟良好壩址多已開發，且近年來因環保及社會問題，不但使興建水庫成本高昂，推動水庫計畫，亦舉步維艱，因此如何有效運用現有水庫資源，使水庫永續發展經營，乃為當前首要課題⁽¹⁴⁾。

目前國內外分析水庫操作策略時，多利用系統分析的模擬法（Simulation Approach）及優選法（Optimization Approach）。傳統水庫操作規線即為模擬法所得之結果；優選法應用於水庫操作，雖因電腦速度的提昇與記憶體之擴增，而日趨可行、逐獲重視；但以優選法建立水庫操作模型時，必須訂定出目標函數與各限制條件⁽¹⁵⁾，用以推求滿足各限制條件下，使目標函數為最大效益或最小缺額的規劃方案，往往限制式越多，水庫防洪與救旱機能也受限越大。

水庫操作系統除了考量天氣變化、雨量預測外，地質、地形、土地利用情況、植物覆蓋、逕流稽延時間、洪峰到達時間與逕流量等複雜問題無一不被列入考量，而模擬與預測如此錯綜複雜的水文現象遠遠超出傳統數學理論與物理模式所及之處。另外水庫操作往往又包含民生問題、社會與經濟活動、甚至是法令與政策考量的多目標決策問題；受限於上述情形，在傳統的水庫操作分析中，不論是模擬法或優選法，各有其優缺點與不足之處。傳統理論在無法突破瓶頸之處，也漸漸從目前廣為發展的人工智慧著手進行研究，以求解決之道。人工智慧乃源自於生物學、心理學、人類思考行為模式、人類大腦神經架構等，包括：模糊理論、類神經網路、遺傳演算法、專家系統與混沌理論等；再藉由資料分類與儲存，將龐大的歷史資料資訊化，以解決傳統模式面臨的瓶頸。ANFIS 模式則以模糊推論與模糊規則為主體架構在類神經網路中^(2,5-8)，以增加模糊理論所缺乏的學習(learning)與記憶(memory)能力，使得模式不但能處理不確定性(uncertainty)與不明確性(imprecisely)的彈性，而且結合類神經的自我學習、組織能力，同時本研究中再結合資料的模糊聚類(fuzzy clustering)分析處理龐大的資料，轉換為較小的模糊規則庫減少參數計算與資料儲存空間，增加程式執行的可行性。本文以模糊減法聚類為模糊規則庫來建構 ANFIS 模式，期能由數值資料獲得水庫操作的模糊規則庫，以供模糊推論控制系統控制水庫的水位與放流量，使得水庫操作系統具「智慧型」地處理資料與判斷資訊，強化水庫操作機能，以提昇水資源的利用效率。

二、理論概述

對於智慧型水庫即時操作系統模式建構流程中包括的幾種演算法：遺傳演算法、ANFIS 與模糊減法聚類，以下分別概要介紹各演算法的理論。

(一) 遺傳演算法：

遺傳演算法(Genetic Algorithm)主要目的在

於求解問題的最佳化^(3,9)，此演算法源自於自然淘汰法則，以遺傳學為基礎，模擬「自然遺傳」，建立人工的「物競天擇」法則發展而成的一種全域搜尋(global search)演算法，基本理論如下：

(1)基因編碼(Encoding)表示法：係將最佳化問題中的參數加以編碼成一個有限長度的字串或化為向量後，形成人工染色體，始能運用遺傳演算法運算元進行搜尋最佳解；編碼的方式可區分為灰色編碼法(Gray Coding)、二元編碼法(Binary Coding)、實數編碼法(Real Coding)^(3,12,16)；

(2)評估(Evaluation)：適合度函數(Fitness)的訂定是從最佳化問題中的目標函數(objective function)轉換而成，以模擬自然界生物對環境的適應性，此即將求解最佳化問題轉換求解最大解(maximum)的問題，因此適合度函數值大多以正值為宜，對於評估與機率比較時較為方便。

(3)GA 運算元：

複製(reproduction)：根據適合度函數值，拷貝單一染色體至下一子代，選擇方式由自然優選法加以淘汰選擇。

基因交換(crossover)：首先從篩選過的基因池中選擇兩個染色體為父代，選擇一點式(single-point crossover)或多點式(multi-point crossover)分割染色體，將兩個染色體的基因相互交換。

突變(mutation)：在染色體中，由極小的機率選中一或數個基因，改變原基因值，如二位元編碼法，基因值由 0 變 1 或 1 變 0 者，稱為突變。

(4)自然優選法(Selection scheme)：首先計算染色體的適合度函數值，其值越大表其存活或複製機率越大，因此，優勢基因存活機率高於劣勢基因，由此篩選、複製下一代子代，再進行基因交換與突變演算，如此重複上述過程直到獲得近似最佳解為止。

主要流程如下：

參數編碼⇒設定各參數值⇒染色體基因初始化⇒評估⇒優選⇒複製⇒基因交換⇒突

變 $\Rightarrow$ 評估 $\Rightarrow$ 優選 $\Rightarrow$ 複製 $\Rightarrow$ $\Rightarrow$ 達到收斂或終止條件

優點：遺傳演算法對於適合度函數或目標函數的數學限制條件相當少，幾無限制，不一定是低維度、連續性、可微分或單峰的特性；即可以是任意數學函數，或任何經變數疊代產生的函數值。遺傳演算法在不同的環境下生存，有高度的強健性(Robustness)，能在演算的效率(efficiency)與效能(efficacy)需求上取得平衡。

缺點：遺傳演算法在搜尋空間上(或可行解區間)產生大量的點，進行複製、基因交換與突變等運算，逐步演化趨近最佳解範圍內；如此降低演算法的效率，同時佔用許多記憶體空間。

(二) 調適性網路模糊推論系統

調適性網路模糊推論系統 ANFIS^(5,6)乃以模糊推論與模糊規則為主體，由於模糊推論系統缺乏學習與記憶，因此將此系統架構在類神經網路中，以發揮模式對於系統不確定性與不精確性處理的能力，亦具有自我學習與組織能力；同時模式亦可加入其它聚類分析改變模糊規則庫，將龐大的資料分成較小的模糊規則庫減少參數計算的負擔與資料儲存空間的浪費，並可加入專家的知識以彌補歷史資料建立的模糊規則庫對系統描述的不足，其後再從新資料的加入與新規則的產生，逐步完成系統模糊規則庫的完整性。

(1)模糊推論系統架構如圖 1 所示，此系統以模糊 If-then 規則為主體，經由系統資料或特性分類產生模糊規則庫與隸屬函數(membership function)，並決定適當的參數再經由下列過程獲得輸出值：

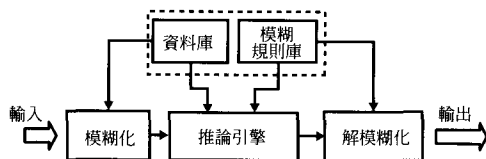


圖 1 模糊推論控制系統架構圖

I. 模糊規則庫：包含模糊邏輯規則 R 的集合 $R = \{R^1, R^2, \dots, R^n\}$ ；其模糊邏輯為

IF (x_1 is T_{x_1} and ... and x_p is T_{x_p})

THEN (y_1 is T_{y_1} and ... and y_q is T_{y_q})

II. 資料庫：包含模糊集中的隸屬函數如三角形函數、梯形函數、鐘型函數或高斯函數等。

III. 模糊化：在模糊 If-then 規則，前提(premise)部分作模糊化處理，乃將觀測輸入值映射到模糊集中，依設定之隸屬函數估算其隸屬度。

IV. T-norm 運算或 T-conorm 運算：在 If-then 規則中前提部分，可由單一輸入變數或多輸入變數組合而成，對於多輸入變數的模糊集合交集運算為 T-norm 運算可選取 min 或 product(乘積)運算；聯集運算則為 T-conorm 運算可選取 max 或代數和運算。If-then 規則前提部分由此運算產生 firing strength。

V. 推論引擎：先將前提部分與模糊規則庫之先決條件配對，其次可得到結論部分或隱喻(implication)規則。

VI. 解模糊化：轉換推論所得之模糊化結果。

(2)適應性網路：

本模式採用多層前饋式網路監督式學習模式，同一層的節點採相似的函數，if-then 規則與模糊推論則採用 Sugeno's type⁽¹⁰⁾；以下以二個輸入值、一個輸出值、五層架構與二階段學習為例作簡要說明，其架構如圖 2 所示。

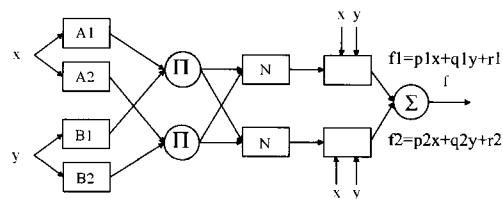


圖 2 ANFIS 架構圖

第一層：輸入層(Input Nodes)

將輸入變數轉化為模糊集合的隸屬函數表示，其中隸屬函數以鐘型(bell-shaped)表示。如下式所示

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i = 1, 2$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i = 3, 4$$

$$\text{其中 } \mu_{A_i} = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}}, \mu_{B_{i-2}} = \frac{1}{1 + \left| \frac{y - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}},$$

{a, b, c}為前提部分模糊隸屬函數的參數。

第二層：規則層

在第一層各輸入變數的模糊隸屬函數產生後，進行變數間的模糊邏輯規則之先決條件配對，因此 T-norm 進行模糊 AND 運算，以 T-norm 乘積運算：

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), i = 1, 2$$

第三層：權重平均

$$O_{3,i} = \overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2$$

第四層：結論推論層

$$O_{4,i} = \overline{w}_i f_i$$

$$= \overline{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i = 1, 2$$

其中{p,q,r}為 Sugeno's type 的參數，在此模式則為模糊推論的結論參數。

第五層：輸出層

節點為計算輸出變數值，一如解模糊化之功能；

$$\text{輸出值} = O_{5,1} = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

(三) 模糊減法聚類

聚類分析是將一群資料依其特性加以分類、區分成數個群別，將同質性高的資料聚集為一群、同質性低的資料則分離至他群中，使得同群間個體差異小，群與群間個體差異大。因此在運用上，不僅用於資料的組織與分類，亦可用於資料壓縮、模式建構上；本研究以模糊減法聚類分析^(1,6)將每一筆由輸入向量與輸出向量合成的資料加以分類並運用於模糊 If-then 規則中，以減少隸屬函數的參數數目，得以適當地建立模糊推論系統中的規則庫。

聚類演算法(clustering algorithms)包括：層級聚類法(hierarchical clustering method)、K-均值法(K-means clustering method)、模糊 C-均值法(fuzzy C-means clustering)、減法聚類法(subtractive clustering)，其中減法聚類為本研究所使用的模糊聚類演算法；以下簡略說明減法聚類的特性與演算。

減法聚類的計算量與系統維度的複雜性無關，僅與訓練資料數目多寡成正比；考慮在 M 維的空間中有 N 組資料為 $\{x_1, \dots, x_n\}$ ，並假設該資料皆已正規化(normalize)，此演算法視所有點都可能成為聚類中心點，因此其密度量度 D (density measure)定義為

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{(r_a/2)^2}\right)$$

其中半徑 $r_a (>0)$ 指中心點附近的距離；計算每一點 (x_i) 的密度量度，值最高者 (D_{c1}) 選為第一個聚類中心點 (x_{c1}) ；接著修正密度量度以選擇下一個聚類中心點，修正公式為

$$D_i = D_i - D_{c1} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_{c1}\|^2}{(r_b/2)^2}\right)$$

其中半徑 r_b 定義如 r_a ，為避免太靠近前一個聚類中心點，通常 $r_b = 1.5 r_a$ 。經第二個聚類中心點選定後，再度修正密度量度公式，選取聚類中心

點，如此重覆直到終止條件或聚類中心點數量足夠為止。被選定的聚類中心點可適用於 If-then 規則的前提部分，例如在 M 維度空間中，將第 i 個聚類中心點 x_{ci} ，分離出輸入向量 p_i 與輸出向量 (q_i) ，即可得任一輸入向量 p 之隸屬度為

$$\mu_i = \exp\left(-\frac{\|x - p_i\|^2}{(r_a/2)^2}\right)$$

，並由隸屬度對應獲得其輸出向量。

三、應用實例

(一) 石門水庫簡介

淡水河全長 159 公里、流域面積 2,762 平方公里為臺灣第三大河川，共有三條支流，其中以大漢溪最長，全長 126 公里、流域面積 1162.7 平方公里。石門水庫位於大漢溪上游如圖 3，為一兼具灌溉、發電、公共給水、防洪、觀光等多目標效益之水庫；其壩體型式為土石壩，壩高 133.1 公尺，集水區面積為 763.4 平方公里，滿水位面積為 8.15 平方公里，呆水位標高 195 公尺，滿水位標高 245 公尺，有效容量 2.51 億立方公尺，總蓄水容積達 3.09 億立方公尺，溢洪道開門六座。

水庫年運用量約 13.6 億立方公尺，運轉量約為總容量的 4.4 倍。水庫供水方式可由石門大圳取水，供應石門水利會所轄之農業用水及桃園臺地之公共用水（龍潭淨水場與石門淨水場）；桃園大圳則由石門水庫後池堰取水，供應桃園農田水利會所轄之農田用水及桃園地區部份公共用水（大湳淨水場）；另興建鳶山堰控制下游河道流量，以配合板新水場自大漢溪取水。

(二) 水庫操作系統分析

由於雨量在時間上分布不均，導致天然河川無法有效的提供全年各種活動的需水量，而水庫的功能主要是調節水量，在不同的時期施以防洪或救旱措施，在洪水時期，預防洪水暴漲危害下游居民，在乾旱時期，供給各種活動的需水量，避免嚴重的旱災造成缺水、疾病肆虐。水庫操作控制系統如圖 4 所示，其相關變數與限制條件分析如下：

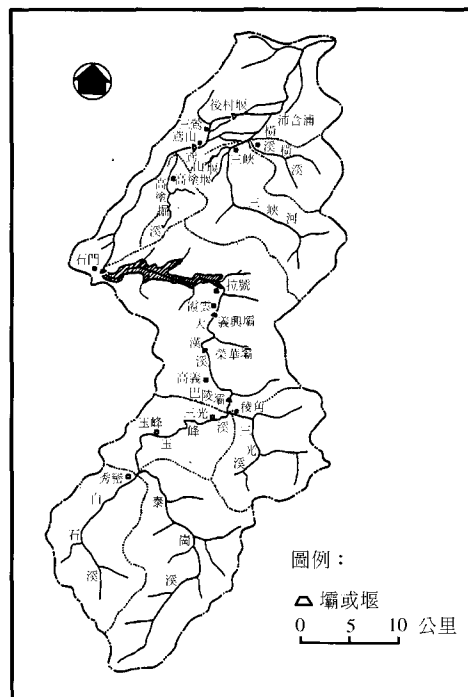


圖 3 石門水庫地理位置圖

控制變數：旬放流量 O 或水庫蓄水量 S 。

動態變數：旬入流量 I 與旬(目標)需水量 D 。

目標函數：水庫的主要功能在於維持公共給水與灌溉用水的穩定性，而水庫操作分析上大都以缺水標準為考量，即滿足最小的缺水量、缺水旬數等之缺水指標；而在防洪的功能，由於超放標準與洪災的定義並不明確，且洪災之操作應屬較短之時距，而本研究以旬為操作時距，因此，在分析上省略了流量超放的考量。

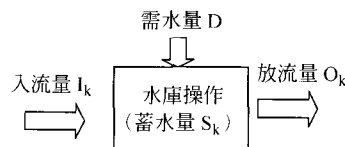


圖 4 水庫操作控制系統

限制條件：

1. 連續方程式(continuity equation)：

水庫蓄水量 $S(t)$

=入流量 $I(t)$ +前一時刻水庫蓄水量 $S(t-1)$ -放流量 $O(t)$

2. 滿足水利法第六章之蓄洩規定：

洪水時期：最高放水流量不得大於流入水庫之最高流入量

枯水時期：水庫之放水量不得小於流入水庫之天然流量。

3. 水庫操作策略是爲了長期維持水庫給水與防洪的穩定性，因此，水庫容量不應出現枯水年被超用或於豐水年異常儲水的情形，故每 36 句水庫操作後，水庫容量不能與操作初期水庫容量相差太大。

4. 在操作期間，水庫容量必須介於有效容量之間。

(三) 研究方法

石門水庫操作的歷史資料中，除了歷史入流量、水庫操作規線與需水量外，並沒有最好的放流量操作資料；過去的研究則多以模擬法或優選法逐步獲得特定條件下某一時段之水庫放流量。而本模式必須先獲得理想的放流量歷程與相對水庫容量資料，以作爲模式的訓練資料，因此，建立智慧型水庫即時操作控制系統之流程有三個步驟：

1. 資料前處理：

由於石門水庫三十年的歷史資料中並無理想的放流歷程資訊，因此，運用此模式前，必須先求得一組理想的(或最佳的)放流歷程資料以備模式訓練時期使用；本研究從歷史流量與預定需水計畫等資料，建立目標函數與限制條件，以滿足上節的限制條件並達缺水指數最小的要求，利用遺傳演算法從已知歷史入流序列情況下，分別求得三十年水庫的最佳放流歷程與相關的水庫容量變化資料。

目標函數：

$$\min(\text{ObjFunc}) = \sum_{i=1}^{36} \left[\max\left(0, \frac{D_i - O_i}{D_i}\right) \right]^2 \times n_i \quad (1)$$

限制條件：

$$S_i = S_{i-1} + I_i - O_i$$

$$S_o = 50.0$$

$$1.0 \leq S_i \leq 250.0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$0.99S_o \leq S_{36} \leq 1.01S_o$$

其中， D_i 爲第 i 句的需水量， O_i 爲第 i 句的放流量， n_i 爲第 i 句的累積之缺水句數， S_i 爲第 i 句的水庫容量， I_i 爲第 i 句的入流量。(1)式中平方是可以迅速增大函數值、擴大缺水量的效應，可避免缺水量過分集中於某一旬，再者， n_i 可擴大連續缺水效應，以避免產生連續缺水的情況發生；以上兩者可以避免極端缺水情況產生。對於枯水期的放流量限制已包含在(1)式中，故不再增加限制條件；但在洪水期，由於超放流量的定義不明確，且爲達到最佳解的情況下，在演算過程中自然對超放流量產生限制，因此本研究忽略洪水時期放流量的限制。

2. 建立 ANFIS 控制模式：

經資料前處理所得水庫最佳放流歷程後，可提供模式訓練時期所需資料，因此建立水庫操作之 ANFIS 架構如圖 5 所示，選擇蓄水量爲輸出變數，而非直接用放流量爲輸出變數，其原因爲蓄水量的變化率與範圍皆較放流量小；另外，決定 ANFIS 模式的輸入變數時，因無法從系統分析或直觀上獲得蓄水量、旬流量、需水量與放流量間的關係，因此，採用試誤法將上述變數以不同的組合代入模式中，搜尋訓練誤差值最小的組合方式，以確定模式的輸入向量。

(四) 實作問題與參數

在實作上，本研究對於每一個步驟必須調整適當的參數與修正相關演算法，以符合問題的特性並能應用於實作問題，解決傳統方法對於複雜系統無法提出有效解決之道的困境，以下分別提出相關參數與演算法的調整與修正。

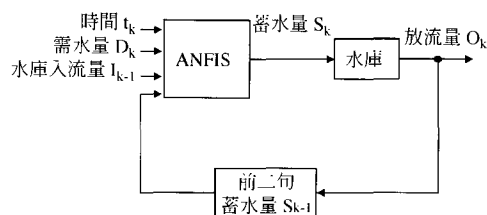


圖 5 ANFIS 運用於水庫操作架構圖

1. 遺傳演算法求最佳放流歷程：

在求解最佳放流歷程中，每年的目標函數(1)式與其限制式(2)式組合成遺傳演算法中的適合度函數，其變數為 36 旬的放流量，遺傳演算法相關參數設定有：

- 母體數：因變數多、求解空間維度大，所以將母體數設定為 1000，增加物種的多變性。
- 基因交換機率(Pc)：Pc=0.8。
- 突變機率(Pm)：因搜尋空間複雜，所以突變機率給定較大的值(Pm=0.1)，降低落入局部最小值(local minimum)的區域內。
- 優選策略：除了使用輪盤法(Roulette Wheel)外，結合精英策略以提高收斂效率，即將每代最優秀的個體無條件複製到下一代。
- 終止條件：為了控制程式執行時間，終止條件設定為執行超過 8000 代或其目標函數值小於 10^{-6} ，即停止執行。

傳統遺傳演算法無法得到收斂解，原因可能是變數多且搜尋空間太大、太複雜，而局部最小值過多且收斂解的範圍太小；為了改進上述原因，便改良遺傳演算法的初始化的隨機性，根據直覺上推測收斂解可能落在需水量、入流量等幾種範圍附近，因此將初始化分為四部分：

- 10%的點播散在需水量附近。
- 10%的點播散在入流量附近。
- 10%的點，播散在由 36 旬入流總量乘上各旬需水量比值附近。

- 70%的點隨機播散可行解範圍內，以防止上述範圍中落入局部解。

經過初始化的改良後，最終解已有很大的改進，其目標函數值也降低許多，而在直觀上近似收斂解，結果也優於傳統的規線操作結果。

- 建立 ANFIS 模式之初，輸入變數有五個，每個變數包括數個規則與所屬隸屬函數之參數；由於參數太多、規則太多，例如，每個變數各有 3 個規則，則其隸屬函數相關參數有 $3 \times 3 \times 5 = 45$ 個，規則運算後進行解模糊化之相關 Sugeno's type 參數有 $3^5 \times 6 = 1458$ 個，參數太多導致程式無法執行，但若減少模糊規則與簡化隸屬函數，又無法描述系統的特性與行為；故採用模糊減法聚類建立輸入變數與輸出變數間的模糊規則庫，減少參數量與規則數，再架於 ANFIS 模式上調整相關參數值。

3. 訓練 ANFIS 模式操作控制水庫放流量：

在訓練 ANFIS 模式的過程中，無論是改變輸入變數或模糊減法聚類的參數，誤差值都無法收斂，再試著將洪水時期過大的入流量扣除，即超過水庫有效容量 2.51 億立方公尺的流量視為無效入流量，亦無法改善誤差值；歸咎其原因可能是：

- 旬流量資料太複雜，其中包括十天內的雨型、地文、溫度、溼度等因子的變化情況；而三十年的歷史流量資料無法充分反應旬流量的變化特性。
- 旬流量資料的準確性：由於水文觀測上常有許多的困難與疏失，往往發生資料的遺漏與不正確性，因此旬流量資料有過多的雜訊與誤差，使得模式無法從中獲得系統的規則與特性。

在無法改進上述的情況下，放棄以三十年歷史流量為輸入之流量序列，而將歷史旬流量資料累加平均後，分別繁衍週期為 1、2、5 年之流量序列，並將其繁衍成二十次重複期現之流量序列(即分別繁衍 20、40、100 年)，再重新求其最佳放流歷程進行模擬。

4. 改變起始操作句：原以 1 月 1 日為起始操作句，惟因其規線上限水庫容量較大，操作結果受初始水庫容量影響較大；故改以 7 月 1 日為起始操作句，此期間為防洪期，水庫水位較低，因此操作結果受初始容量影響較小。

四、結果與討論

(一) 傳統規線操作比較

一般水庫利用操作規線來操作水庫，在操作上由於對水庫放流量的限制，僅依水庫水位的上下限決定，在長期操作往往因無法控制放流量，而產生透支水量，如今年預支明年的用水量，使得操作經常發生「極端乾旱」的情形，也就是無法將缺水量平均分配，並預留水量以達救旱之功能。因此在不同操作的比較上，不應該僅就短期操作結果比較，必須有長期或多年的操作結果比較，才能夠表現出一種操作策略的好壞。

(二) GSI 缺水指數

本研究採用徐享崑先生於 1995 年提出之 GSI (Generalized Shortage Index)⁽⁴⁾作為 M-5 規線操作與 ANFIS 操作結果的比較依據，原因是 GSI 較其他缺水指數對乾旱事件的缺水量與連續性較為敏感，對於乾旱事件評估較為客觀。

GSI 的計算如下：

$$DPD = \sum (DDR(\%) \times NDC)$$

$$GSI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{DPD_i}{100 \times DY_i} \right)$$

其中，

DPD (Deficit Percent Day Index)，包括缺水強度與連續性。

DDR 為日缺水率，在本研究修正為旬缺水率計算，也就是當該旬的放流量小於該旬的需水量時，旬缺水率等於(該旬的目標需水量-該旬的放流量)/目標需水量。

NDC 為該缺水事件目前已連續缺水的累積句數。

DY 為一年之句數，即等於 36。

N 為比較之年數，k 為參數，通常設為 2。

(三) 結果

一般而言，水庫操作目標函數皆以達到總缺水量最少、GSI 指標最小，而且為避免在少數幾句間產生大量的缺水，造成嚴重的乾旱問題，其目標函數亦期能將缺水量以分散而不連續地分佈於多句間，即達缺水總句數最多而單句缺水量最小；如此便可減少對工業用水、民生用水或農業灌溉的缺水衝擊。

1. 遺傳演算法搜尋結果

本研究所使用的輸入資料有：(1)民國 90 年計畫需水量的 1.2 倍(總需水量為 1329.385 百萬立方公尺)資料；(2)將石門水庫 30 年的歷史句流量資料，分別累加平均後繁衍週期為 1 年、2 年(如圖 6 所示)與 5 年(如圖 7 所示)之入流量繁衍資料；首先模擬石門水庫 M-5 規線水庫操作情形與 GA 搜尋之最佳放流歷程之結果比較如表 1，其中總缺水量與 GSI 指標顯示 GA 搜尋結果優於 M-5 規線操作，而缺水句數則顯示 GA 進 M-5 規線操作結果，亦可作為後續 ANFIS 之訓練資料。詳細結果分析如下：

2. ANFIS 模式預測結果

(1)入流量週期為 1 年的結果：模式訓練誤差值小於 0.8%，其預測水庫容量結果如圖 8 所示，由模擬預測水庫容量結果，推求水庫放流量並與 GA 之最佳放流歷程及需水量做一比較如圖 9 所示，預測之放流量結

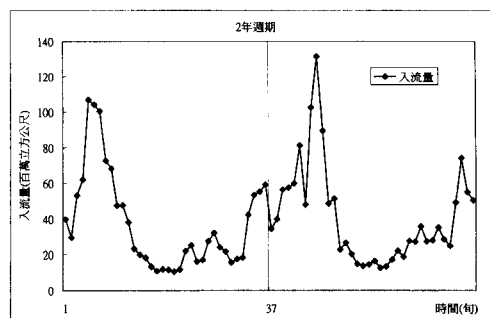


圖 6 週期二年之句流量類型

表 1 M-5 規線操作與 GA 模擬比較

週期 (年)			GA			M5 規線		
	年別	總入流量	缺水旬數	總缺水量	GSI	缺水旬數	總缺水量	GSI
一	1	1409.96	0	0.00	0.00	7	50.4065	2.140
二	1	1346.72	14	37.598	0.102	8	98.6119	14.661
	2	1477.72	0	0.00	0.00	1	1.3183	7.6×10^{-5}
五	1	1553.86	0	0.00	0.00	1	8.4782	0.0024
	2	1463.74	18	87.358	0.969	11	164.2267	52.235
	3	1297.78	18	106.368	1.810	9	124.4551	27.721
	4	1585.33	0	0.00	0.00	3	14.7627	0.033
	5	1096.94	22	314.704	18.501	21	321.595	252.027

表 2 M-5 規線操作與 ANFIS 操作結果比較(入流量週期 1 年)

年別	總入流量	M5 規線			ANFIS		
		缺水旬數	總缺水量	GSI	缺水旬數	總缺水量	GSI
1	1409.926	7	50.406	2.1396	0	0	0.00

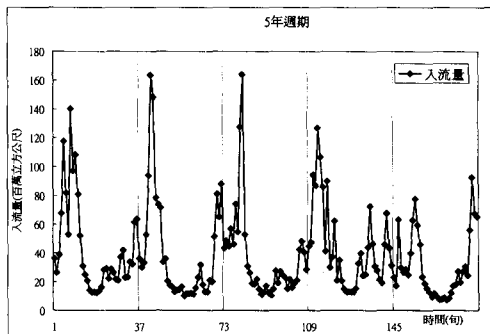


圖 7 週期五年之旬入流量類型

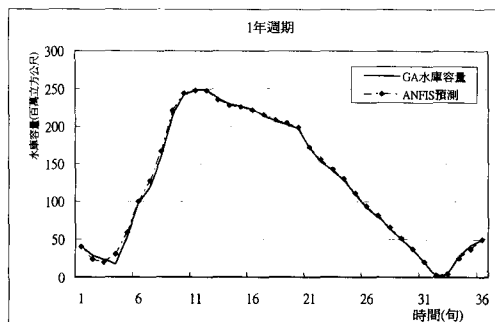


圖 8 ANFIS 預測水庫容量與 GA 模擬結果比較圖
(入流量週期 1 年)

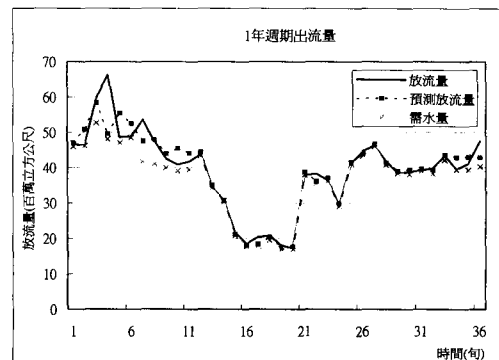


圖 9 ANFIS 預測放流量、GA 模擬結果與需水量比
較圖(入流量週期 1 年)

果如表 2 顯示本模式操作結果並無缺水狀況，而 M-5 規線操作結果則有 7 旬的缺水情形。

(2)入流量週期為 2 年的結果：訓練誤差值小於 1%，預測水庫容量結果如圖 10 所示，由模擬預測水庫容量結果，推求水庫放流量並與 GA 之最佳放流歷程及需水量做一比較如圖 11 所示；預測之放流量結果如表 3 顯示本模式操作結果亦優於 M-5 規線操作結果，且缺水量遠少於 M-5 規線操作。

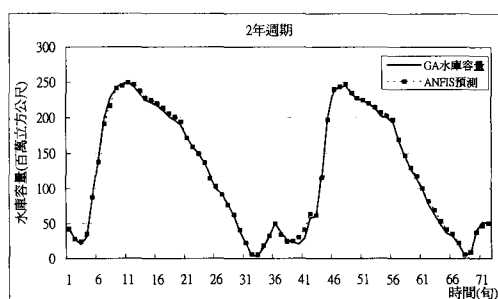


圖 10 ANFIS 預測水庫容量與 GA 模擬結果比較圖
(入流量週期 2 年)

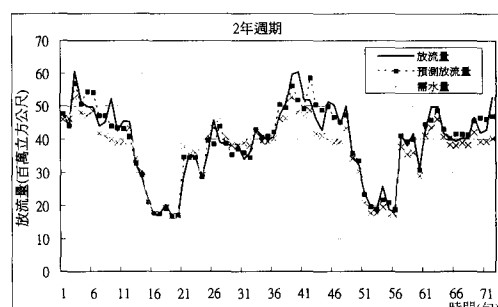


圖 11 ANFIS 預測放流量、GA 模擬結果與需水量比較圖(入流量週期 2 年)

(3)入流量週期為 5 年的結果：訓練誤差值小於 2.5%，預測水庫容量結果如圖 12 所示；由模擬預測水庫容量結果，推求水庫放流量並與 GA 之最佳放流歷程及需水量做一比較如圖 13 所示，預測之放流量結果如表 4 顯示本模式操作結果，不但是缺水量遠少於 M-5 規線操作，且能夠平均地分配到較多的旬數之中，而不產生單旬嚴重缺水的情況有效地降低 GSI 值。

五、結論與建議

本研究在水庫操作上，從資料前處理到放流量的控制，結合了多種人工智慧的演算法，在各階段中產生的結果可為後續在水庫操作系統之參考依據：

1. 本研究先做資料前處理，從目標函數與歷史流量資料的特性，由遺傳演算法獲得最佳的放流量歷程。其結果得知幾點水庫操作的特性：

表 3 M-5 規線操作與 ANFIS 操作結果比較(入流量週期 2 年)

年別	總入流量	M5 規線			ANFIS		
		缺水旬數	總缺水量	GSI	缺水旬數	總缺水量	GSI
1	1346.72	8	98.6119	14.661	20	33.6370	1.948
2	1477.72	1	1.3183	7.6×10^{-5}	0	0.00	0.00

表 4 M-5 規線操作與 ANFIS 操作結果比較(入流量週期 5 年)

年別	總入流量	M5 規線			ANFIS		
		缺水旬數	總缺水量	GSI	缺水旬數	總缺水量	GSI
1	1553.86	1	8.4782	0.0024	0	0.00	0.00
2	1463.74	11	164.2267	52.235	23	83.4724	14.744
3	1297.78	9	124.4551	27.721	19	101.1621	12.604
4	1585.33	3	14.7627	0.033	0	0.00	0.00
5	1096.94	21	321.5955	252.03	26	314.617	100.07

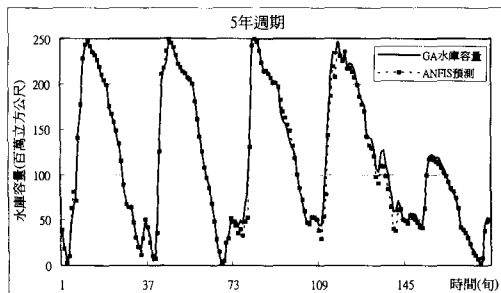


圖 12 ANFIS 預測水庫容量與 GA 模擬結果比較圖
(入流量週期 5 年)

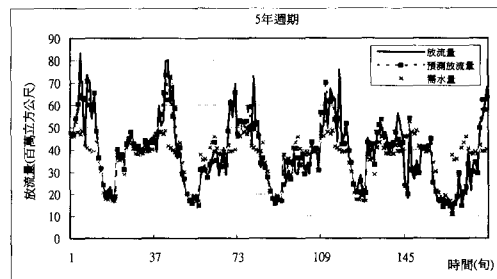


圖 13 ANFIS 預測放流量、GA 模擬結果與需水量比較圖
(入流量週期 5 年)

- (1) 在豐水年，不只一組放流量歷程可以滿足需水量要求，也就是說，最佳解不只一組；而在缺水年所獲得的 36 旬放流量解，則近似最佳放流歷程。從以上兩點特性得知，目前水庫操作的標的函數存在多組最佳解集合，皆具有相同之最小目標函數值，因而無法充分地描述水庫操作系統的特性。
- (2) 利用遺傳演算法搜尋最佳放流歷程，不但可以獲得訓練資料提供 ANFIS 模式之建立，而且其結果亦顯示水庫操作系統的特性，提供後續在水庫系統的研究與分析。
2. 從本研究所得到的結果可驗證本模式若有充分的資料或足夠的模糊規則庫，其操作結果優於規線操作。
3. 分析影響旬流量變化與水庫容量變化之變數，確定模式設定輸入向量，更能掌握系統的維度；從本研究建立模式時，利用試誤法所得的輸入向量，可確定時間、需水量、上一旬入流量及前二旬的水庫蓄水量皆為水庫操作系統的重要因子。
4. 旬流量變化比日或時流量變化較難掌握，若改以日操作可減少流量的變化，或者是應用於颱風時期，由時流量操作更可以簡化流量變化的複雜度。

本文提出建構一智慧型水庫操作系統的一種方法論，藉由遺傳演算法(GA)搜尋歷史流量之

最佳放水量歷程，再由調適性網路模糊推論系統(ANFIS)架構規則庫及網路組合之運算程序，水庫操作者即可依入流量、水庫水位、下游需求等決定放水量。研究結果顯示以繁衍之週期性序列，因流量序列有一定的規則可行，本方法可獲致良好的成效，而以實際流量則因流量特性變異無法掌握，ANFIS 無法於訓練過程獲致收斂，未能有理想的表現，尚待結合如現地水庫操作專家或操作規則等建構較理想、精準的規則庫，或能解決此一困境。

六、謝誌

本研究於研究期間承蒙台大電機所陳永耀教授提供諸多寶貴意見，謹致以衷謝忱。

七、參考文獻

1. Chiu, S. L., "Fuzzy model identification based on cluster estimation." Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2(3), 1994.
2. Farag, W. A., V. H. Quintana and G. Lambert-Torres, "A Genetic-Based Neuro-Fuzzy Approach for Modeling and Control of Dynamic Systems.", IEEE Trans. on Neural Networks, vol.9 .pp.756-767, 1998.
3. Goldberg, David E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.", Addison-Wesley., 1997.
4. Hsu, Shiang-Kueen, "Shortage Indices for

- Water-Resources Planning in Taiwan", J. of Water Resources Planning and Management, Vol. 121, N. 2, pp. 119-131, 1995.
5. Jang, J-S R., "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System.", IEEE Trans. On Syst. Man and Cyber., vol.23 no3, pp.665-685, 1993.
 6. Jang, J-S R., C.-T. Sun and E. Mizutani, "Neuro-Fuzzy and Soft Computing- A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence". Matlab curriculum series, 1997.
 7. Kasabov, N. K., "Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering.", Cambridge, Massachusetta: MIT Press, 1996.
 8. Lin, C-T, and C. S. G. Lee,"Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision System", IEEE Trans on Computer, vol. 40, no12, pp.1320-1336, 1991.
 9. Miachalewicz, Z, "Genetic Algorithms + Data Structure =Evolution Programs", New York: Springer-Verlag, 1996.
 10. Takagi, T., and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control.", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, pp.116-132, 1985.
 11. Tsoukalas, L. H., and R. E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering.", New York: John Wiley & Sons, 1997.
 12. Wright, A., "Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization", in Foundations of Genetic Algorithms, G. J. E. Rawlins (editor), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 205-218, 1991.
 13. Wurbs, "Optimization of Multiple-purpose Reservoir System Operations: A review of Modeling and Analysis Approaches", Hydrologic Engineering Center, U.S. Army corps of Engineers, RD-34, Davis, California, 1991.
 14. 吳建民, 「台灣水利事業之發展」, 第二屆海峽兩岸水利科技交流研討會專題演講論文, 1991。
 15. 張斐章、陳莉, 「目標函數對水庫即時操作之影響」, 台灣水利季刊, 第 39 卷, 第 2 期, pp.50-58, 1991。
 16. 陳莉, "以物件導向之一傳演算法優選水庫運用規線之研究", 國立台灣大學農業工程學系博士論文, 1995.

收稿日期：民國 88 年 9 月 22 日

修正日期：民國 88 年 10 月 18 日

接受日期：民國 88 年 11 月 4 日