

結合人工智慧與專家知識之智慧型水庫操作系統

Integrating AI with Expert Knowledge to Build Intelligent Reservoir Operation System

國立台灣大學生物環境系統
工程學系教授

張 斐 章

Fi-John Chang

國立台灣大學生物環境系統
工程學系博士班研究生

張 雅 婷

Ya-Ting Chang

淡江大學水資源及環境
工程學系助理教授

張 麗 秋

Li-Chiu Chang

摘 要

面對台灣地區水資源時空分佈不均及日益不足等問題，如何在安全條件下進行水庫操作使其儘可能滿足各標的，以善用水資源、維持環境永續性是當前首要課題。本研究以新穎的人工智慧相關理論，並結合現行規線操作的專家知識提出智慧型水庫操作策略，以石門水庫過去 36 年之水文狀況為例，進行實務模擬測試；首先利用遺傳演算法(GA)尋求歷史流量之水庫最佳放水量歷程，以茲作為調適性網路模糊推論系統(ANFIS)之訓練樣本與標的。為增加系統操作規則庫之完整性與合法性，乃研議水庫操作規線與模糊規則庫之間的轉換方式與機制，將操作規線所代表之蓄放標準轉換為規則(if-then)形式，建構出模糊規則知識庫，成功的將水庫傳統的操作策略與智慧型操作模式進行結合，藉由加入傳統操作方式的專家知識使系統更具『智慧』地處理資料與判斷資訊，進而有效地控制水庫水位與其放流量，提供水庫管理單位於蓄水利用運轉時有所參考及依據，測試結果顯示本研究發展的模式較傳統規線操作方式在各項檢測指標上皆有大幅的改善，亦印證了模式的合理性與適切性。

關鍵詞：水庫操作，人工智慧，遺傳演算法，模糊規則庫，調適性網路模糊推論系統。

ABSTRACT

Resulting from the continuous increase in water demand and uneven water distribution both on time and space, the efforts of pursuing integrated optimal water resource management become critical. In this study, we propose a novel intelligent control methodology that includes the genetic algorithm (GA), fuzzy rule base (FRB), and the adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) to enhance the

efficiency of reservoir operation. The Shihmen reservoir in north Taiwan is used as a case study, and its last thirty-six years hydrological data are used to train and/or verify the models' performance. GA and FRB are used to extract the knowledge based on the historical inflow data with a design objective function and the traditional rule curve operating strategy, respectively. The ANFIS is then used to implement the knowledge, to create the fuzzy inference system, and then to estimate the optimal reservoir operation. The practicability and effectiveness of the proposed approach is tested on the operation of the Shihmen reservoir. The results show that the ANFIS models built on different types of knowledge have better performance than the traditional M-5 rule curves in reservoir operation. Moreover, we demonstrate that the ANFIS model can be more intelligent for reservoir operation if more information (or knowledge) is involved.

Keywords: Reservoir operation, Artificial intelligent, Genetic algorithm, Adaptive network-based fuzzy inference system, Fuzzy rule base.

一、前言

水資源不僅是維持人類生存所不可或缺的重要資源，更是經濟發展的關鍵要素。而台灣因天然環境限制，水資源受氣象水文、緯度、地形條件等諸多因素影響，具有高度不確定性，不僅季節性之雨量豐枯分佈不均勻，復因地形之地勢陡峭，水資源蓄積不易，造成水資源運用日益困難。

早期台灣地區之水資源利用乃是以農業用水為主，到了民國 60 年代後期，則因社會結構改變，除了對水源穩定性要求較低之農業用水量正逐年下降外，民生與工業用水需求均迅速成長，然而新水源開發取得日益困難，島上水資源已面臨「缺水」臨界點，不僅對於國家未來經濟發展形成瓶頸，亦對台灣永續發展形成障礙，近幾年的水荒問題既為明證。

在地表水利用方面，水庫為一重要蓄水措施，在枯水季(河川流量低，引水不足)可提供調豐濟枯的功效，惟良好壩址多已開發，因此近年來水資源基本策略已修正為以調度管理為優先。由於不同的水庫操作方法對水庫的整體使用效率會造成重大影響，操作不良將會降低水庫供水效率，造成水資源無法充分利用且易導致下游之缺水現象。因此，研究如何在安全條件下對水庫進行操作使其儘可能滿足各服務標的，且有效

運用現有水庫資源使水庫永續發展經營，實為一重要研究課題。

為求適用於過去未曾或很少發生之極端水文現象，及因應各標的用水需求已因社會經濟結構變遷而改變之情勢，本文延續過去之研究(張麗秋、張斐章, 1999)提出一考慮層面較大且較有系統之分析方式，即利用人工智慧理論之彈性結合傳統規線操作之優點建構水庫操作系統，使系統具備足夠的智慧進行判斷與決策，並進一步使水庫管理單位於蓄水利用運轉時有所參考及依據。

系統架構如圖 1 所示，為建立智慧型水庫操作系統，首先需要歷史最佳放流歷程作為模式之訓練資料，然而實際水庫操作並無一套『最佳』之放流歷程，因此研究首先建立水庫操作之目標函數與限制條件，再根據水庫歷史入流序列以遺傳演算法優選出一組系統最佳解，作為水庫之歷史最佳放流歷程，則此歷程可作為後續智慧型控制系統之輸入—輸出訓練資料。智慧型水庫操作系統以調適性網路模糊推論系統(ANFIS)為架構，包含了三種規則庫，分別為(1)由 GA 所優選出的最佳放流歷程，選用合適之模糊聚類方法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，建構出模糊規則庫 GA；(2)加入傳統操作方式的專家知識，即將水庫操作規線轉換為模糊規則知識庫 FRB；(3)以上二種規則庫之結合(GA & FRB)。本研究重點

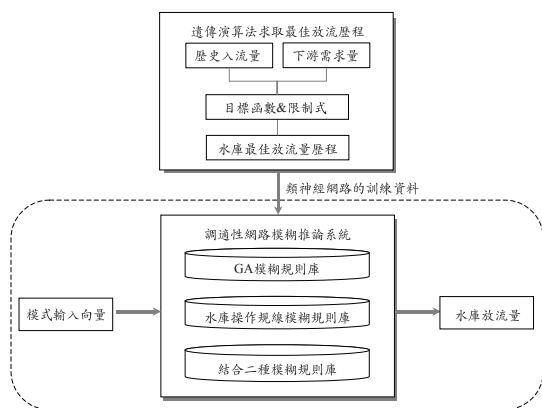


圖 1 智慧型水庫操作系統架構圖

即是研議水庫操作規線與模糊規則知識庫之間的轉換機制，將傳統規線操作之專家知識與過去研究所建立之智慧型水庫操作系統結合，則模式不僅包含歷史資料所隱含的資訊，同時也具備了專家操作之知識與經驗，使系統可智慧地控制水庫水位與放流量。

二、文獻回顧

由於社會結構之改變，國人用水需求日增，使得水資源之調配、運用越來越依賴水庫的儲存與調節。水庫操作策略之訂定一般有模擬法及優選法二種。傳統水庫操作規線(operating rule curves)；HEC-3、HEC-5 模式(由 Hydrological Engineering Center 分別於 1971 與 1979 年發展)皆為模擬模式所得之結果；朱壽銓等(2000)也曾探討模擬法在水庫操作規線之應用。操作規線乃是水庫在設計規劃階段即根據完工時的蓄水量、供(用)水量，並配合集水區每旬進水量之氣象資料等進行模擬，再藉由試誤法(try & error)演算，由多組可能之候選規線中挑選出一組既滿足各標的用水又易於操作者所使用之操作規線。

台灣地區現有水庫在操作上多採運轉規線方式，即將水庫蓄水空間分為若干個區域如「上限」、「下限」、「嚴重下限」及「呆水位」等，分隔各蓄水區域之蓄水量界限即為操作規線，通常各區間大小隨季節變化而有所差異，操作規則中並制定各時期不同蓄水量所對應之放水原則。由於各水庫之特性與下游用水需求不同，除

呆水位固定外，各旬水位之操作規線標高皆有一定的規定，則水庫之水位控制需根據操作規線進行管理，以確保水庫的彈性支援與調豐濟枯之功能。

利用優選法建立水庫操作模式，則須以數理方程式敘述目標函數與系統運作程序，利用求解技術尋求滿足限制條件下，使目標函數表現最佳的一組決策變數。近年來由於電腦記憶容量與速度迅速提昇，運用優選法進行水庫的最佳規劃日趨可行，各種演算法對複雜的規劃問題亦有不錯的優選能力。

將優選法應用於水庫操作策略之相關研究有：郭振泰、張武訓(1984)；Kelman et al.(1990)；周乃昉(1997)；Thomas et al.(1997)；Perera & Codner(1998)；蕭金財、張良正(1998)將序率最佳操作模式應用於多目標水庫系統；陳韻如(2001)以模擬退火法優選大甲溪下游最佳調蓄水池之操作規線；徐年盛、黃敏智(2001)結合模擬退火法與水庫操作模擬模式，決定日月潭之最佳操作規線；Chang et al.(2002)；Chandramouli et al.(2002)等人將動態規劃應用於多目標或多水庫系統最佳操作策略之研議；邱昱禎(2003)則是以混合式遺傳退火演算法搜尋水庫長期操作之最佳營運策略。

為研議水庫即時操作策略，張麗秋、張斐章(1999)選用近年來廣為發展的遺傳演算法、模糊推論及類神經網路等智慧型控制理論，建立一適應性模糊控制系統進行水庫操作。智慧型控制理論主要包含人工智慧、專家系統、模糊理論、遺傳演算法與類神經網路等技術，可模擬人類學習、適應、回想等諸多能力，解決模式不確定系統、非線性與時變系統等傳統方法不易解決之問題，目前已成功應用於控制各式馬達與機構，如機器人、無人駕駛車輛、捷運、電梯與各式飛行器等(Davies & Watton, 1995；Lin and Su, 2000；Becerikli et al., 2003)。

三、理論概述

在建構智慧型控制系統之前，首先需對系統的知識或資訊有所了解，這些知識或資訊的表現

方式可以是規則型式，明確地表現出系統對於輸入值的反應情形，或藉由歷史資料的收集，從中獲得輸入—輸出間之關係。由於智慧型水庫操作系統需藉此資訊進行模式之架構與訓練，但歷史資料中缺乏此訊息，因此須求取一組理想的水庫放流歷程資料以備未來模式訓練時期使用。待模式架構完成，一旦未來發生類似的水文狀況，智慧型水庫操作系統即可參考過去的知識作判斷。

以下簡單介紹研究採用之遺傳演算法、模糊推論系統以及調適性網路模糊推論系統等智慧型控制理論的部分基本概念；若希望獲得更深入的了解，可參考張麗秋、張斐章(1999)之著作。

3.1 遺傳演算法(genetic algorithm)

遺傳演算法係 John Holland 於 1975 年發表其論著“Adaptation in Natural and Artificial Systems”中所提出，其觀念源於達爾文進化論中『物競天擇，適者生存』之學說，強調以基因代替過往之運算元數字，將問題轉換為自然界演化程序，並於求解最佳化問題過程中模擬「物種演化」的行為，因而發展成一種全域搜尋(Global Search)的演算法則，這種學習系統乃是模擬群集遺傳與適應者生存之過程來增進其結果表現，至今已成功解決了大部分傳統解析與數值的最佳化技術所難以求解之函數最佳化問題。

遺傳演算法整個優選流程大致為：遺傳過程中群集受制於周遭環境，使適應力佳的成員被選為配對與複製之親代，因此表現較好之子代通常是由較優秀之親代雙方遺傳而來，到了第二代適應良好的成員又被選來進行配對、複製，持續進行這種競爭式循環，將使表現差者遭到淘汰，表現優良者則產生更佳之後代，如此代代繁衍，數代後所存活之群集即為最適於環境生存者。

近年來許多研究指出遺傳演算法對於複雜的規劃問題具有良好的求解能力，相關研究有：章盛傑(1994)將其應用於水文化學系統參數之優選；黃振聖(1995)以遺傳演算法優選曾文水庫操作規線並探討水庫風險；許少瑜(2001)應用遺傳演算法優選水庫操作規劃問題的控制點模式。Chang 等(2004)運用於石門水庫操作規線之

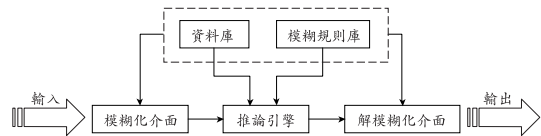


圖 2 模糊推論系統之基本架構

優選；國外亦有不少研究應用遺傳演算法來解決各種水資源問題(Wang, 1991；Mantawy et al., 1999；Cai et al., 2001)。

水庫操作的規劃問題由於變數較多且目標函數與限制式複雜，傳統的線性或非線性規劃不易求解。由於本研究應用實例之歷史資料僅有歷年水庫入流量、計畫需水量、水庫操作規線等，而缺乏最佳放流量資料作為後續 ANFIS 模式之訓練資料，故利用遺傳演算法優選出歷年相關的水庫容量變化資料與最佳放流歷程。

3.2 模糊推論系統(Fuzzy Inference System)

模糊推論系統又稱為模糊規則庫系統、模糊控制或是模糊聯想記憶(FAM)，其架構如圖 2 所示，包括：模糊化(fuzzifier)、模糊規則(fuzzy rules)、隸屬函數(membership function)資料庫、推論引擎(inference engine)與解模糊化(defuzzifier)等五大部分，目前已成功地應用於自動控制、資料分類、決策分析、專家系統等不同領域。在水資源方面之應用有：張斐章等(1993)建立模糊推論模式，將其應用於水文系統之研究；梁晉銘等(2000)則進一步結合類神經網路，以複合演算類神經—模糊推論模式進行洪水預測之研究，皆有相當不錯的研究成果。

模糊推論之步驟為：(1)模糊化：比較輸入變數前提項(premise)部分之隸屬函數，以獲得每個語意之隸屬度；(2)結合每個規則之前提項部分的隸屬度，以得到 firing strength(即權重值)；(3)依據 firing strength 產生每個規則之結論項(consequent)參數；(4)解模糊化：由結論項參數產生一明確輸出值。

3.3 調適性網路模糊推論系統(adaptive network-based fuzzy inference system)

3.3.1 調適性網路

調適性網路乃是一多層前饋式網路，網路結構中包含了節點與節點間之連結，且各節點函數相似、具調適性，而節點輸出乃是依據其參數所決定，因此網路學習法則是在調整參數使誤差降低。欲建立模糊模式，首先需訂出輸入與輸出變數的種類、數量與類型：

- (1) 輸入變數：由於影響水庫放水因素眾多，無法直覺判斷或透過系統分析找出蓄水量、入流量、需水量與放流量間的關係，因此需要自輸入與輸出資料中，利用試誤法將上述變數以不同的組合代入模式中，找出訓練誤差值最小的組合方式，作為模式的輸入變數，以確保訓練得之模式可有效的描述出數據的特性。
- (2) 輸出變數：輸出變數只有一個，即水庫放水量，而建構的模式採用一階 sugeno 模糊推論模式，故輸出變數為輸入變數的線性函數。

輸入與輸出變數決定後，設定各個變數的隸屬函數類型與數量，利用訓練資料來調整各項參數，盼此模糊模式的輸出結果能更為符合原始數據。

3.3.2 調適性網路模糊推論系統

調適性網路模糊推論系統(Jang, 1993)是以模糊推論系統為網路模式基礎，並結合神經網路自我組織的特性架構而成。模糊推論系統藉由模糊 If-then 規則對於人類知識與推論過程(reasoning processes)進行定性描述與分析，但是卻缺乏準確的定量分析與數值校正；而類神經網路雖無法處理定性的知識與邏輯推論過程，卻具有極佳的自我學習與組織能力，其強大的調整能力正可用來作模糊系統的結構與參數之調整。因此，ANFIS 結合了二種演算法，可充分發揮模式對於系統不確定性(uncertainty)與不精確性(imprecisely)的處理能力，透過 ANFIS 學習與自我調適進而求得參數最佳解。

以下以二個輸入值、一個輸出值為例、說明系統架構與二階段學習，架構如圖 3 所示。

第一層 輸入層：將輸入變數映射至模糊集合，以設定之隸屬函數估算其隸屬度，假設採用

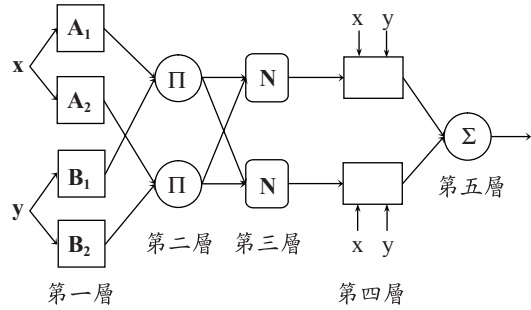


圖 3 ANFIS 架構圖

S 型(Sigmoidally-shaped)隸屬函數，如下式所示：

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x) \quad \text{for } i=1,2 \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y) \quad \text{for } i=3,4 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

其中 O_1 為輸入值相對於模糊集合之隸屬函數，
 $\mu_{A_i} = \frac{1}{1 + e^{-a_i(x-c_i)}}$, $\mu_{B_{i-2}} = \frac{1}{1 + e^{-a_i(y-c_i)}}$,
 $\{ a_i, c_i \}$ 為模糊隸屬函數的參數，即前提項 (premise) 參數。

第二層 規則層：進行變數間模糊邏輯規則之先決條件配對，以得到各規則之 firing strength(即權重值)，再利用 T-norm 乘積運算，即輸出值為所有輸入訊息之乘積：

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

第三層 權重平均：此層各節點計算該規則相對於所有規則的 firing strength 之比例。

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

第四層 結論推論層：

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i=1,2 \quad \dots\dots (4)$$

其中 $\{ p_i, q_i, r_i \}$ 為模糊推論之結論參數，即推論項(consequent)參數。

第五層 輸出層：將前層訊息加總以計算輸出變數值，一如解模糊化之功能：

$$\text{輸出值} = O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ANFIS 結合了前饋式類神經網路的監督式

學習法，在代入訓練範例後，比較真實輸出值與模式推估值間的誤差，在求得誤差的最小平方和過程中，使模糊推論系統中的所有參數作適當的調整。參數的修正方法是採用二階段的混合式學習演算法：(1)在訊號向前傳的部分，各層節點輸出值往前傳至第四層後，藉由最小平方推估法(Least squares estimate)來調整推論項參數。(2)誤差訊號逐層逆向傳導至第一層，再利用最陡坡降法(Gradient descent approach)更新前提項參數。藉由二階段學習程序，ANFIS 即可透過輸入一輸出資料與人類知識(化為模糊 If-then 規則形式)建立起輸入一輸出之映射關係。

以本研究所建立之水庫操作系統為例，系統之輸入變數包含：時間 T_k (單位為旬)、需水量 D_k (單位為百萬立方公尺)、前期入流量 I_{k-1} 、前二期蓄水量 S_{k-1}, S_{k-2} 、前期放流量 O_{k-1} 等；一個輸出值：放流量 O_k 。由於每個變數包含數個規則和所屬隸屬函數之參數，當參數與規則數量太多，若直接減少模糊規則數或簡化隸屬函數，可能導致系統特性與行為描述不完整，故須研議適當的聚類方法，將輸入與輸出向量合成之各筆資料分類，以有效減少參數個數所造成之繁複計算與資料儲存空間之浪費。本研究採用模糊減法聚類分析(Chiu, 1994)決定模式中模糊規則庫的規則個數以及各規則之組合，得以適當地建立模糊推論系統中的規則庫。

四、應用實例

4.1 石門水庫簡介

淡水河是台灣第三大河川，全長 159 公里，流域面積 2,762 平方公里，共有三條支流，大漢溪為淡水河支流最長者。石門水庫位於大漢溪上游，集水區面積 763.4 平方公里，呆水位標高 195 公尺，滿水位標高 245 公尺，有效容量 2.357 億立方公尺，其地理位置如圖 4 所示。

石門為一多目標水庫，以灌溉、發電、公共給水為主要目標，在洪水期並有防洪功能，於一般時期亦開放供民眾遊憩。自民國 53 年興建完成後，即根據水庫運用五大基本原則及年用法為基準，訂定出一年中各時期之水庫水位限制曲

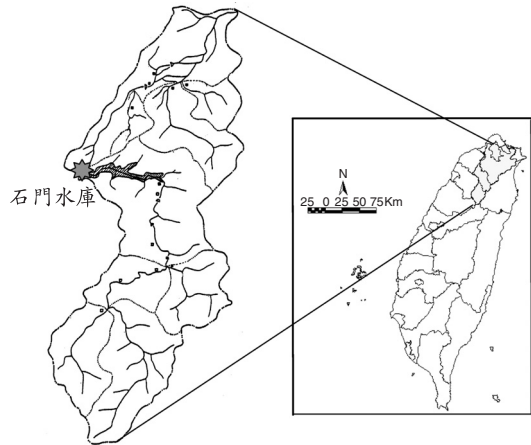


圖 4 石門水庫位置圖

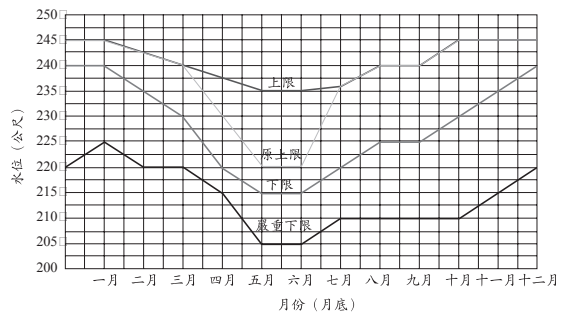


圖 5 石門水庫運用規線圖

線，即石門水庫運用規線(M-5 規線)，規線分為上限、下限及嚴重下限，上限之定義為有效蓄水量處於豐盈狀態之最低水位，主要關係著防洪操作；下限是指有效蓄水量處於缺水狀態之最低水位，關係著洪水季後的用水儲蓄；嚴重下限則是有效蓄水量處於嚴重缺水狀態之最低水位，關係當時之灌溉給水。

由於各標的用水需求逐年遞增，原定之 M-5 規線已不符現況，為維持水庫之供水效益，北區水資源局於民國 91 年重新檢討，將 M-5 規線 6 月上限由 220 公尺提高為 235 公尺，修正前後之石門水庫 M-5 規線如圖 5 所示。

4.2 建立優選模式

由於石門水庫歷史操作資料(1966-2001 年)中，並無最佳的放流量操作資料，為了後續智慧型水庫操作系統之建立，必須先求取一組理想的

(或最佳的)放流歷程資料作為未來模式之訓練資料。建立優選模式時，首先需設定目標函數與限制式，再利用遺傳演算法求得滿足限制條件且達缺水指數最小之要求下，過去三十餘年之水庫最佳放流歷程與相關之水庫容量變化資料。其中目標函數與限制式為：

(1)目標函數：在優選過程中，用來判斷決策方案之指標；對水庫系統而言，目標函數型式決定了水資源的利用方式。一般訂定水庫操作目標函數，皆期望能達到總缺水量最少、缺水指標最小，而且為了避免在少數幾旬內產生大量缺水而造成嚴重的乾旱問題，亦希望缺水量能分散且不連續地分佈於多旬間，以減少缺水對各標的用水之衝擊。本研究建立最佳化目標函數時，考慮石門水庫有淨水廠所需之公共供水與灌區所需之農業用水兩項主要用水需求，希望儘量平均供水，使嚴重缺水情況改善，故採用缺水指數的概念建立目標函數型式，期能在此目標主導下搜尋到最佳操作方式，以有效減低旱災損失。

目標函數：

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

其中， D_i 、 O_i 分別為第*i*旬之需水量、放流量， n_i 為第*i*旬的累積缺水旬數，式中以平方來迅速增大函數值，可擴大缺水效應，藉此避免缺水過於集中；此外， n_i 可擴大連續缺水效應，避免連續缺水情形發生。此外，由於蒸發水量很小，故本研究中蒸發量忽略不計。

(2)系統之限制式包括：

- 連續方程式：系統中各水工結構物均須符合水流的平衡條件，即入流量等於出流量。而水庫尚須考慮蓄水效應，即出流量等於入流量減去蓄水量之變化。
- 蓄水限制式：於操作期間水庫容量須介於有效容量內，即 $0 \leq S_i \leq S_{36}$ 。石門水庫最大庫容乃是根據水利署網站資料(截至民國 91 年 4 月止)，由原先計畫有效容量 251.88 百萬立方公尺降至目前有效容量 235.745 百

萬立方公尺。

- 水庫的主要功能在於維持水庫長期給水與防洪之穩定性，因此在操作策略上，不宜出現枯水年超用水量或豐水年異常儲水等情形，故限制每 36 旬水庫操作後，水庫容量不能與操作初期之庫容相差太大。本研究將庫容變化限制訂為 10%。

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

$$S_0 = 50.0$$

限制條件：

$$0 \leq S_i \leq 235.745$$

$$0.9S_0 \leq S_{36} \leq 1.1S_0$$

其中， S_i 、 I_i 分別為第*i*旬的水庫容量、入流量， S_0 則為初始蓄水量。由於水庫規線於非汛期期間，上限、下限及嚴重下限水位值相差較大，若以第 1 旬作為起始操作旬，恐因其變動範圍較大而使操作結果深受初始水庫容量影響；故改以第 19 旬(7 月第 1 旬)作為起始操作旬，該時期為防洪期，水庫水位較低，如此初始蓄水量較不影響後續操作結果。本研究參考石門水庫過去水位與 M-5 規線下限值，將起始操作旬之蓄水量訂為 50 百萬立方公尺。

4.3 水庫操作規線與模糊規則庫之轉換

台灣地區現有水庫在操作上多採運轉規線方式。傳統之規線操作方式乃是將未來入流量視為現有水庫蓄水量之函數，加上過去流量記錄之趨勢，再依照需水量多寡，擬訂出一種可避免未來時期大量缺水，又可將目前因減少供水所引起之不利影響減至最小的操作方式。由於規線操作是採“平均”較好的方式進行水庫操作，除卻某些水文變異較大的情況(例如持續乾旱)外，規線皆可維持水庫的穩定操作，且規線訂定之初，參考了許多專家學者的知識與經驗，若能將傳統規線操作之專家知識與過去研究所建立之智慧型水庫操作系統結合，將可納入部分規線放水之優點，使得模式不僅包含過去歷史資料所隱含的資訊，同時也具備了專家知識，將可更具智慧地進行操作，並提供水庫管理者正確、

可靠的遵循依據。

因此，本研究之重點即是研議水庫操作規線與模糊規則知識庫之間的轉換方式與機制，將規線所代表之蓄放標準轉換為規則，建立一模糊規則知識庫。依據石門水庫 M-5 操作規線之規定，水庫主要是依據當時的水庫水位與下游需水量進行操作：

- 水庫水位標高超出上限時，表示水庫為豐水狀態，應視實際需要盡量發電。
- 水庫水位標高在上、下限之間時，表示水庫存水正常，各標的用水依計畫配水量供水。
- 水庫水位標高在下限與嚴重下限之間時，表示水庫有輕微枯旱現象，除各標的用水依計畫配水量供水不予增加，為因應可能之持續枯旱，水庫管理單位應預先協商配水量減供措施。
- 水庫水位標高低於嚴重下限時，表示水庫有嚴重缺水情形，灌溉用水按計劃配水量七成配放。

舉例來說，當水庫水位標高低於嚴重下限時，規則可訂為：當時間為第 A_1 個時期、水庫水位值(L)若低於該時期操作規線之嚴重下限值(B_1)，則放流量(R)為需水量(D)的百分之七十。同理，每個時期皆可根據此放水規定建立該時期所對應之規則如下：

Rule 1: If ($T = A_1$ and $L \leq B_1$), Then ($R = 0.7D_1$)

Rule 2: If ($T = A_2$ and $L \leq B_2$), Then ($R = 0.7D_2$)

⋮

Rule k: If ($T = A_k$ and $L \leq B_k$), Then ($R = 0.7D_k$)

規線操作在實際應用上雖有其使用方便、觀念簡單等優點；但在營運操作過程中，水庫入流量及各標的需求量受人為及自然因素等影響皆為變動量，且規線範圍較大，在使用上較缺乏彈性，無法進行較精確之操作，因此實際操作時除依據相關記錄外，必需再藉由操作人員長期的經驗累積與智慧判斷，方可維持水庫運轉與確保各需求之協調。特別是異常水文狀況下，唯有配合

人為知識判斷進行調節放水，才可兼顧水庫水資源彈性調度功能與水庫安全性。然而專家知識與其豐富經驗不易獲得，也不易轉換為規則型式，因此採用模糊理論來處理人類的知識與邏輯推論過程中所包含的模糊性，其優點即為接近人類的思考行為，較容易結合專家知識。

模糊理論是由 Zadeh(1965)所提出，其對於多元複雜之模糊現象，給予較為穩健之描述。在處理實際問題時，主要是將普通集合「非此即彼」之絕對隸屬關係加以擴充，利用隸屬函數(Membership Function)的觀念，定量刻畫不確定性問題之模糊性質，因此對於敘述不清或狀況模糊之問題，提供了一個較合理可行的解決方式；在科學與學術的研究上，使用模糊理論則可處理語意或分析的描述性語言，解決傳統集合或理論所無法描述的現象與問題。近年來，已被成功應用於不同的水資源問題(Russell and Campbell, 1996; Shrestha et al., 1996; Dou et al., 1999; Dubrovin et al., 2002)。

一般而言，模糊規則可由專家提供、知識擷取或經由資料特性分類產生。在本研究中是將石門水庫 M-5 操作規線之放水規定化為規則，首先訂定模糊規則的輸入變數為時間及水庫水位，輸出變數則是不同需求下的放水量，訂定規則型式如下：

If (a_1 is $A_{i,1}$ • a_2 is $A_{i,2}$ • … • a_k is $A_{i,k}$), Then (R_i)

其中 a_k 為第 k 個輸入變數， $A_{i,k}$ 則是第 k 個變數的前提項，並以隸屬函數 $M_{i,k}$ 的模糊型式表現，而 R_i 則是第 i 個規則的推論項，亦是以模糊型式表現。在選擇模糊規則使用的隸屬函數時，需考慮適當的型式，常用的有三角形函數、梯形函數、鐘型或高斯函數等(如圖 6 所示)。本研究為配合操作規線中，水庫水位低於嚴重下限時依計畫配水量七成配放的放水規定，選用 S 型隸屬函數的模糊型式，再透過參數之調整，使其符合實際放水情形，如圖 7 所示為輸入變數—水位之隸屬函數型式，假設第 i 句 M-5 操作規線之嚴重下限值為 60，當水庫水位低於 60，則該時期的放水依計畫配水量七成(0.7)配放。因此各句皆可

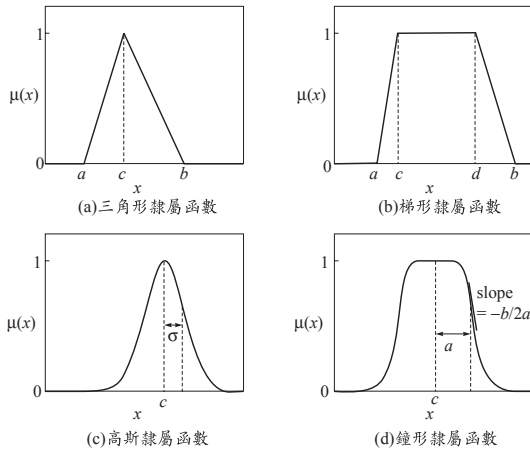


圖 6 各種形式的隸屬函數

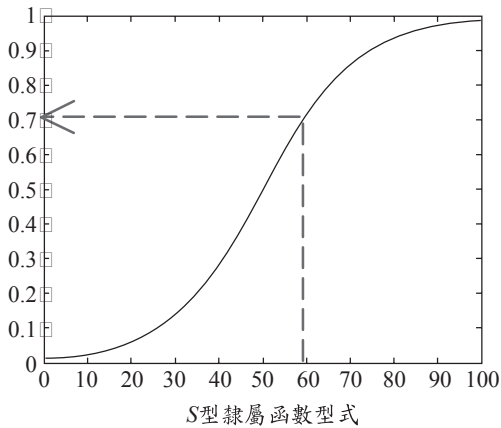


圖 7 S 型隸屬函數型式

訂定出各自的規則，規定該旬水庫水位若低於該旬 M-5 操作規線的嚴重下限值，則該旬放水量依計劃配水量七成(0.7)配放。

4.4 建立 ANFIS 模式

為使模式建構時參數可達到最佳化狀態，在歷史資料數量充分的條件下，通常將所有可得數據區分為訓練、驗證與測試三個相互獨立的資料組。首先將遺傳演算法所推求之最佳放流歷程(共 36 年 1,296 筆資料)分成三部分，其中 828 筆資料為訓練範例，作為 ANFIS 模式調整參數之訓練資料，另外 216 筆資料用以驗證模式是否適用於實際水庫操作策略之決定，最後 252 筆資料則拿來進行推估測試。ANFIS 模式可根據時間

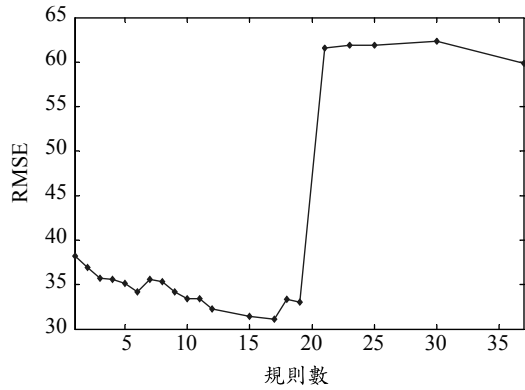


圖 8 RMSE 值與規則數之關係

T_k (單位為旬)、需水量 D_k (單位為百萬立方公尺)、前期入流量 I_{k-1} 、前二期蓄水量 S_{k-1}, S_{k-2} 、前期放流量 O_{k-1} 等輸入變數，推估放流量 O_k 。

ANFIS 模式中採用三種模糊規則庫進行比較，分別為：(1)以 GA 所優選之最佳放流歷程作為訓練樣本與標的，採用模糊減法聚類對歷史資料建立輸入變數與輸出變數間的模糊規則庫 (GA)；(2)將石門水庫 M-5 操作規線轉換為模糊規則知識庫 (FRB)；(3)以上二種規則庫之結合 (GA & FRB)。以下分別就三種模糊規則庫之結果進行比較。

(1)模糊規則庫(GA):本規則庫利用聚類方法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，而得以適當地建立模糊推論系統中的規則庫。在決定規則數目時，依據模式推估值與真實值之誤差值來決定，如圖 8 所示，規則數為 17 時，RMSE 值最小，故本規則庫選用 17 個模糊規則。

(2)模糊規則知識庫(FRB):將石門水庫 M-5 操作規線轉換為規則型式，架構出 ANFIS 模式之模糊規則知識庫，再利用網路之自我調適，逐漸調整適當之參數，以合乎模糊推論系統中輸入一輸出間關係。每一旬的放水規定皆訂定一條模糊規則(如 4.3 節所示)，故 FRB 中包含 36 條模糊規則。

(3)結合二種規則庫(GA & FRB):即結合了 GA 模糊規則庫與 FRB 模糊規則知識庫，共計有 53(17+36)條模糊規則。

五、結果與討論

5.1 結果比較參數

□ GSI 缺水指數

有效的缺水指數必須能確切地反應出缺水頻率、強度以及每次缺水的延時。本研究採用 GSI(Generalized Shortage Index)(Hsu, 1995)作為後續之操作結果比較依據，因為 GSI 對乾旱事件之缺水量與連續效應較為敏感，因此對於乾旱事件之評估較為客觀，且更可強調缺水之社會成本。GSI 之定義如下：

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

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

其中， DPD_i (Deficit Percent Day Index)代表第 i 年之 DPD 值，包括缺水強度與連續性；DDR 為旬缺水率，即(該旬的目標需水量－該旬放流量)/目標需水量；NDC 為該缺水事件目前已累積之連續缺水旬數； DY_i 是第 i 年之旬數(36)；N 為比較之年數；K 為參數，通常設為 2。

□ RMSE 值

除了比較水庫操作對缺水情形之改進，為比較 ANFIS 模式之準確性，另選用均方根誤差值(Root Mean Square Error, RMSE)作為 ANFIS 預測結果與其訓練標型(GA 優選結果)之比較指標。RMSE 值愈小或愈趨近於 0 表示模式愈準確。其定義如下：

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{N} \right]^{0.5}$$

其中 \hat{Q}_i 、 Q_i 分別為第 i 期推估放流量、真實放流量(在此為 GA 優選出之放流資料)，N 為資料點數。

5.2 結果

5.2.1 遺傳演算法優選結果

本研究採用之輸入資料包括：2001 年計畫需水量的 1.2 倍資料(總需水量為 1329.385 百萬立方公尺)，及石門水庫自 1966 至 2001 年共 36 年之

歷史旬流量資料。

首先利用歷史資料模擬石門水庫以 M-5 規線進行水庫操作，再以遺傳演算法搜尋最佳放流歷程，比較二種方法之操作結果(圖 9)。由 GSI 比較圖可明顯看出：入流量較大的豐水年時，二方法的缺水情形相距不遠，其餘的結果顯示 GA 演算結果的缺水指數皆小於 M-5 規線操作結果，即就 GSI 缺水指數而言，GA 優選結果明顯優於 M-5 規線操作，即在本研究所設定之目標函數主導下，GA 可搜尋到將缺水量、缺水旬數分散，以避免極端缺水之最佳操作策略。故 GA 所獲得之理想放流量歷程將可應用於後續智慧型水庫操作系統之訓練資料。

5.2.2 ANFIS 模式預測結果

表 1 列出訓練、驗證、測試三階段下，不同操作方式的結果，分別為 M5(以 M-5 規線進行水庫操作)；GA(以遺傳演算法搜尋最佳放流歷程)；ANFIS(以 GA 優選之放流歷程作為訓練資料，再利用三個模糊規則庫進行水庫操作)。結果可看出：就 GSI 指數而言，GA 搜尋結果明顯優於 M-5 規線，因此將 GA 優選出之最佳放流歷程作為 ANFIS 模式的訓練標型，則 ANFIS 模式無論是哪種規則庫在訓練、驗證、測試三階段之表現皆較傳統 M-5 規線操作的結果較佳，即 ANFIS 模式的確可在滿足下游需水的前提下，推求水庫最佳放流量，並能有效避免缺水集中的嚴重乾旱情形。

此外結果亦顯示 ANFIS 模式的三種規則庫中，結合歷史事件的經驗與專家操作知識之規則庫(GA & FRB)，較其他二種規則庫而言，的確有效地改善操作結果，即此規則庫所建立之 ANFIS 模式最具智慧地進行水庫操作。

針對模式測試階段(1995-2001 年)進行評比(如表 2 所示)，其中 1996 年有乾旱現象，該年操作結果中 ANFIS 模式的三個規則庫，其 GSI 值相較於 M-5 規線操作皆有明顯進步，雖然總缺水量較 M-5 規線操作為大，原因為本研究所提出之操作方式目的是改善缺水情形集中之嚴重乾旱現象，故希望將乾旱時的缺水量分散至較多旬，因此總缺水量相對較多。此外，為進行水庫

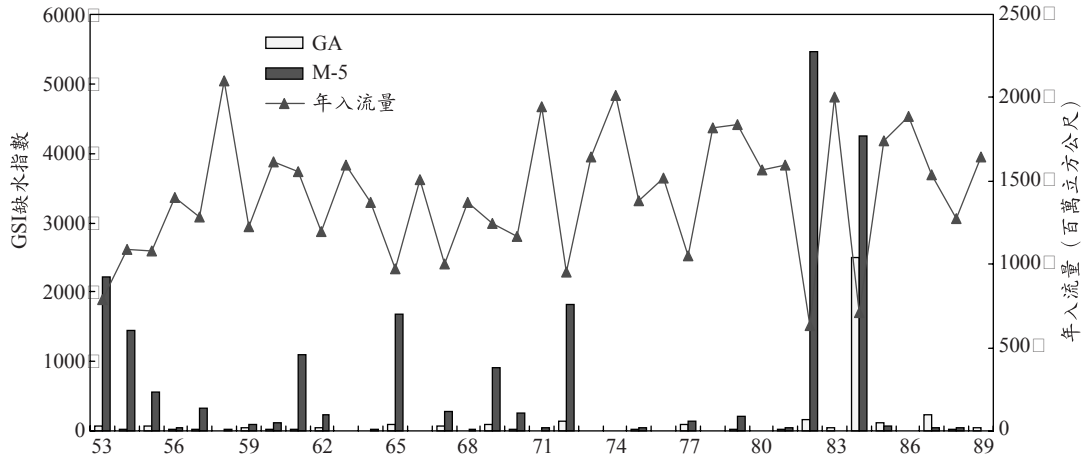


圖 9 GA 操作與 M-5 規線操作之 GSI 比較

表 1 三階段下 M-5、GA、與三種 ANFIS 模式結果比較

年	GSI	M-5	GA	ANFIS				
				模糊規則庫 (GA)		模糊規則知識庫 (FRB)		結合二種規則庫 (GA & FRB)
				RMSE	GSI	RMSE	GSI	RMSE
訓練階段 1966-1988	394	33	32	157	40	79	39	135
驗證階段 1989-1994	982	54	27	238	35	298	36	185
測試階段 1995-2001	633	67	31	171	33	131	29	47
平均值	670	51	30	189	36	169	35	122

表 2 測試階段 M-5 規線操作與三種規則庫之 ANFIS 模式結果比較

年	ANFIS									M-5 規線操作		
	模糊規則庫 (GA)			模糊規則知識庫 (FRB)			結合二種規則庫 (GA & FRB)			(1)	(2)	(3)
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)			
1995	249	21	32	310	19	40	263	21	27	42	3	1
1996	611	31	417	648	32	733	460	26	143	602	32	4256
1997	359	21	249	248	18	16	272	22	37	218	12	66
1998	258	17	32	187	16	6	229	19	22	35	8	3
1999	457	21	379	372	21	44	415	24	82	290	14	49
2000	330	24	45	294	23	38	244	18	9	119	13	56
2001	292	23	46	259	19	39	164	16	6	11	1	0
總和	平均值	平均值	總和	平均值	平均值	總和	平均值	平均值	總和	平均值	平均值	
2556	23	171	2318	21	130	2050	20	47	1318	12	633	

(1)總缺水量(百萬立方公尺);(2)缺水旬數;(3)GSI

放流量測試值與實際值(GA 優選出之最佳放流歷程)之比較,自驗證、測試階段各選出五年資料繪成趨勢圖,圖 10、圖 11 即為結合二種規則庫(GA

& FRB)之 ANFIS 模式進行水庫放流量推估之驗證與測試階段趨勢圖,可以看出 ANFIS 模式對於放流量的預測有不錯之成果,不論在趨

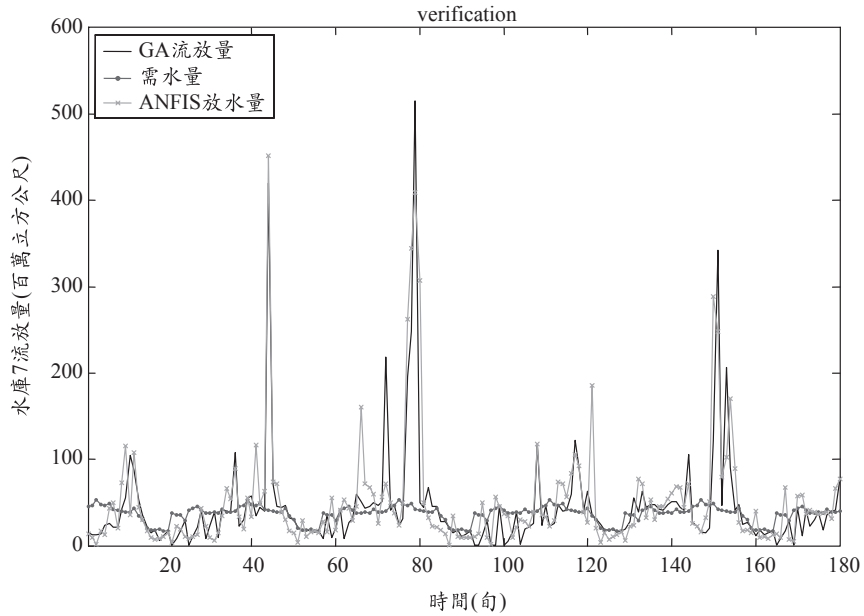


圖 10 結合二種規則庫之 ANFIS 模式推估水庫放流量之驗證階段趨勢圖

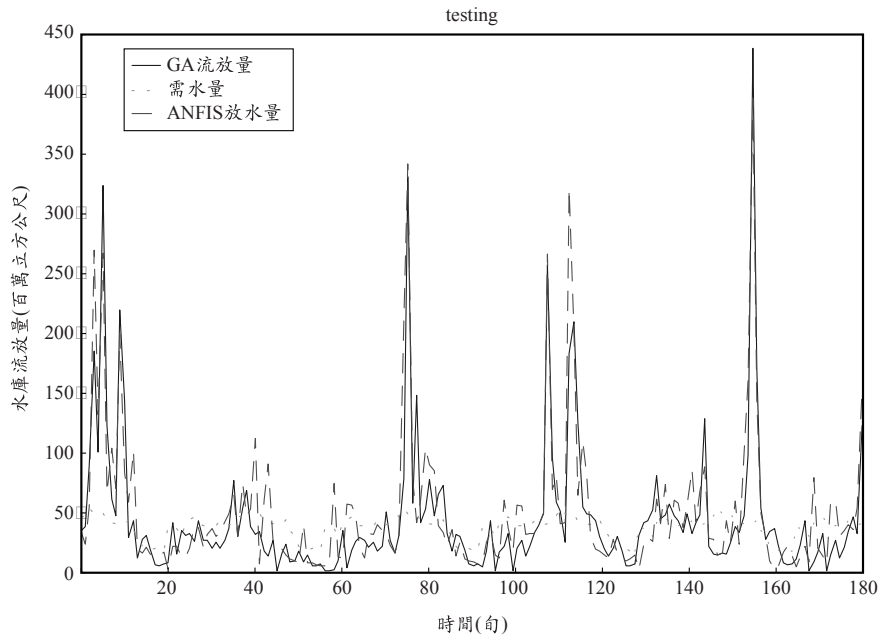


圖 11 結合二種規則庫之 ANFIS 模式推估水庫放流量之測試階段趨勢圖

勢或是準確率方面均表現不錯。

整體而言，結合了過去歷史資料所隱含的水文資訊以及由專家經驗與操作知識所訂定的規線之規則庫，充分地發揮了水庫操作系統之智

慧，ANFIS 模式明顯改善 M-5 規線操作缺水集中之情形，證明 ANFIS 模式藉由智慧型控制之機制控制水庫水位與放流量，將可提供水庫管理局決定未來操作之參考策略。

謝 誌

本研究蒙行政院國科會補助部份經費，計畫編號 NSC90-2313-B-002-323；研究期間承蒙經濟部水利署北區水資源局李鐵民局長、石門水庫管理中心簡昭群主任提供寶貴建議及多方協助，謹此併致謝忱。

參考文獻

1. 朱壽銓、黃文政、黃佩貞，“模擬法在水庫操作規線上之應用”，台灣水利，48(4):53-63，2000。
2. 周乃昉，應用序率動態規劃制訂強制性水庫操作規線之研究，中興工程科技研究發展基金會，1997。
3. 邱昱禎，模糊規劃理論與優選法於水庫操作之研究，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文，2003。
4. 徐年盛、黃敏智，“模擬退火法決定日月潭水庫最佳規線之應用”，九十年度農業工程研討會論文集，pp.907-916，2001。
5. 張斐章、黃源義、梁晉銘，“模糊推論模式之建立及其用於水文系統之研究”，中國農業工程學報，39(1):71-83，1993。
6. 張麗秋、張斐章，“智慧型水庫即時操作控制系統”，中國農業工程學報，45(4):18-30，1999。
7. 梁晉銘、張斐章、陳彥璋，“複合演算類神經-模糊推論模式應用於洪水預測”，中華水土保持學報，31(3)，2000。
8. 許少瑜，水庫操作規線問題的模式與解法，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，2001。
9. 郭振泰、張武訓，“應用序率動態規劃於石門水庫運轉之研究”，第二屆水利工程研討會論文集，pp.125-141，1984。
10. 陳韻如，大甲溪下游調蓄水池容量設計與風險分析之研究，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，2001。
11. 章盛傑，遺傳演算法之研究及其於水文化學

模式之應用，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，1994。

12. 黃振聖，曾文水庫系統最佳營運與風險分析，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，1995。
13. 蕭金財、張良正，“多目標水庫最佳操作模式之建立與應用”，臺灣水利，46(1)，1998。
14. Becerikli, Y., A. F. Konar, T. Samad, “Intelligent optimal control with dynamic neural networks”, Neural Networks, 16(2): 251-259, 2003.
15. Cai, X. M., D. C. Mckinney, and L. S. Lasdon, “Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach “Advances in Water Resources”, 24(6): 667-676, 2001.
16. Chandramouli, V., K. A. Kuppusamy, and K. Manikandan, “Study on water sharing in a multi-reservoir system using a dynamic programming-neural network model”, International Journal of Water Resources Development, 18(3): 425-438, 2002.
17. Chang, F. J., S. C. Hui, and Y. C. Chen, “Reservoir operation using gray fuzzy stochastic dynamic programming”, Hydrological Processes, 16(12): 2395-2408, 2002.
18. Chang, L. C. and F. J. Chang, “Intelligent control of modeling of real time reservoir operation”, Hydrological Processes, 15(9): 1621-1634, 2001.
19. Chang, F. J., L. Chen, and L. C. Chang, “Optimizing the reservoir operation rule curves by genetic algorithms”, Hydrological Processes (accepted).
20. Chang, Y. T., L. C. Chang, and F. J. Chang, “Intelligent control for modeling of real time reservoir operation: Part II ANN with operating curves”, Hydrological Processes (in press).
21. Chiu, S. L., “Fuzzy model identification based on cluster estimation”, Journal of Intelligent and

- Fuzzy Systems, 2(3): 267-278, 1994.
22. Davies, R. M., and J. Watton, "Intelligent control of an electrohydraulic motor drive system", *Mechatronics* 5(5): 527-540, 1995.
 23. Dou C, W. Woldt, and I. Bogardi, "Fuzzy rule-based approach to describe solute transport in the unsaturated zone", *Journal of Hydrology*, 220(1-2): 74-85, 1999.
 24. Dubrovin, T., A. Jolma, and E. Turunen, "Fuzzy model for real-time reservoir operation", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(1): 66-73, 2002.
 25. Holland, J. H., "Adaptation in natural and artificial systems", 2nd ed., Mass. Inst. of Technol., Cambridge, 1975.
 26. Hsu, S. K., "Shortage indices for water-resources planning in Taiwan", *J. of Water Resources Planning and Management*, 121(2): 119-131, 1995.
 27. Jang, J-S R., "ANFIS: Adaptive network based fuzzy inference system", *IEEE Trans. On Syst. Man and Cyber.*, 23(3): 665-685, 1993.
 28. Kelman, J., J. R. Stedinger, L.A. Cooper, E. Hsu, and S.Yuan, "Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation", *Water Resources Research*, 26(3): 447-454, 1990.
 29. Lin, C. L., and H. W. Su, "Intelligent control theory in guidance and control system design: an overview", *Proceedings of the National Science Council*, ROC 24(1): 15-30, 2000.
 30. Mantawy, A. H., Y. L. Abdel-Magid, S. Z. Selim, "A new genetic-based tabu search algorithm for unit commitment problem", *Electric Power Systems Research*, 49(2): 71-78, 1999.
 31. Perera B. J. C., and G. P. Codner, "Computational improvement for stochastic dynamic programming models of urban water supply reservoirs", *J. American Water Resour. Assoc.*, 34(2): 267-278, 1998.
 32. Russell, S. O., and P. F. Campbell, "Reservoir operating rules with fuzzy programming", *J. of Water Resources Planning and Management*, 122(3): 165-170, 1996.
 33. Shrestha, B. P., L. Duckstein, and E. Z. Stakhiv, "Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation", *J. of Water Resources Planning and Management*, 122(4): 262-269, 1996.
 34. Thomas, L.C., T.W. Archibald, and K.I.M. McKinnon, "An aggregate stochastic dynamic programming model of multiple reservoir systems", *Water Resources Research*, 33: 333-340, 1997.
 35. Wang, Q. J., "The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models", *Water Resources Research*, 27(9): 2467-2471, 1991.
 36. Zadeh, L. A., "Information and control", *Fuzzy Sets*, 8, 1965.

收稿日期：民國 93 年 9 月 20 日
 修正日期：民國 93 年 12 月 21 日
 接受日期：民國 93 年 12 月 30 日