

智慧型都市排水抽水站即時操作系統之研發

Real-Time Pumping Station Operation for an Urban Drainage System Using Artificial Intelligence

國立台灣大學
土木工程學系
博士生

黃建霖
Chien-Lin Huang

國立台灣大學
土木工程學系
教授

涂丰盛*
Nien-Sheng Hsu

稻江科技暨管理學院
資訊管理系
助理教授

魏志強
Chih-Chiang Wei

摘要

本研究目的為利用人工智慧技術研發都市排水抽水站即時操作之決策模式，以決定颱風與暴雨事件中排水閘門關閉時期抽水站抽水機組之即時操作方式。本研究研發 ANFIS-HR 及 ANFIS-OPT 兩種操作模式，ANFIS-HR 操作模式為利用歷史操作紀錄結合調適性網路模糊推論系統(ANFIS)來建構模式；ANFIS-OPT 操作模式則為利用禁忌演算法所優選出歷史事件之最佳操作情況結合 ANFIS 來建構模式。本研究以新北市中港大排為研究區域，並以操作中前池最高水位以及最終水位與標的水位相差之絕對值來比較兩種操作模式與歷史操作之優劣，結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式較 ANFIS-HR 操作模式及歷史操作紀錄為佳。

關鍵詞：抽水站操作，優選，調適性網路模糊推論系統，禁忌演算法。

ABSTRACT

The purpose of this study is to apply artificial intelligence techniques to propose the operation decision models, which can decide the real-time operational way of pumping machines in flood events during drainage gate closed period of a pumping station for an urban drainage system. This study develops two operation models, namely ANFIS-HR and ANFIS-OPT. ANFIS-HR is constructed by ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) with historical operation records. ANFIS-OPT are constructed by ANFIS with the operation circumstances which are optimized by tabu search in historical events. This study uses Chung-Kong-Da-Pai basin as study area. The comparison variables which are simulated from real case by two operation models are maximum water level (WL) and

*通訊作者，國立台灣大學土木工程學系教授，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，nsshue@ntu.edu.tw

absolute difference between final WL and target WL of pumping front-pool. Results show that ANFIS-OPT are better than ANFIS-HR and historical operation records.

Keywords: Pumping station operation, Optimization, Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, Tabu search.

一、前言

抽水站為都市防洪系統中最重要之角色，它負責將都市中低漥地區之內水排放至外水。當河川暴漲或感潮而使得外水高於內水時，為了避免由於迴水而造成都市內陸淹水，都市排水系統末端之排水閘門就會因此而關閉，此時都市內陸之積水僅能靠抽水站之抽水機組來抽排出去，因此排水閘門關閉時期抽水站抽水機組操作之成效為防範淹水之關鍵。近年來由於人口增加、氣候變遷、都市化等等原因，使得地表入滲面積減少、降雨集水時間縮短，再加上台灣由於都市雨水及衛生下水道系統建設不足，因此每當颱風或暴雨來襲時，排水渠道水位上漲之速度相當快，此情形就會讓低漥地區之積水無法順利排出，所以發展抽水站準確而有效率之即時防洪排水操作機制有其必要性及急迫性。

系統分析為水資源規劃與管理中最有效能與效率之決策方法，傳統上系統分析工具可分為優選法與模擬法，其中優選法被認為可得到系統最佳解，因此近年來優選法在水資源系統分析領域中是相當受到歡迎的；但是前人於抽水站操作之研究目前僅以模擬法來探討各操作模式之優劣，而且對於抽水站最佳即時操作之研究上還未多加著墨。前人於抽水站操作之研究方面，Hsu *et al.* (2000)結合下水道管理模式(SWMM)、二維散佈地表流動模式和抽水站操作之都市洪水模式，發展一套模擬都市區域由於雨水下水道超載和抽水站排水不及所造成之淹水情形。簡鎮彪(2003)利用下水道管理模式(SWMM)於抽水站聯合運轉演算，並依計算出來之逕流量、集水區特性、抽水機數量、起抽水位進行敏感度分析，以求得抽水站聯合運轉之最佳化方案。李翁碩

(2007)應用倒傳遞類神經網路(BPNN)於雨水下水道系統之水位預報，並模擬抽水機組操作規線之操作成效，結果顯示 BPNN 可有效預報未來前池水位，而且台北市文山區中港抽水站之抽水機組操作規線有改善之空間。Chang *et al.* (2008)應用反傳遞模糊類神經網路(CFNN)於抽水機組即時操作推估，操作結果與歷史紀錄比較顯示 CFNN 應用於抽水站抽水機組即時操作有相當優越之能力。Chiang *et al.* (2011)應用調適性網路模糊推論系統(ANFIS)與 CFNN 於預報抽水機組未來 20 分鐘內之開啓數，結果顯示 ANFIS 操作模式之預報效率及準確度皆優於 CFNN。

近年來結合模糊理論與類神經網路(ANN)於防洪操作之研究漸趨流行，其中由於調適性網路模糊推論系統(ANFIS)具有模擬人類智慧思考、分析與推論之結構、機制與能力，因此 ANFIS 近幾年來被應用在許多水庫防洪操作之研究上，而且前人研究大多證實其模式可有效達成水庫即時操作之目的，其相關研究分述於下：陳莉等(2002)以模糊理論結合遺傳演算法發展一套水庫防洪操作系統，其系統採用遺傳演算法優選水庫操作之模糊規則參數以及隸屬函數參數，而使模糊系統之性能達到最佳化，研究中並指出模糊理論不同於傳統精確數學之二值邏輯，可適合應用於水庫防洪操作。Yu *et al.* (2004)提出以模糊理論處理松花江流域 Fengman 水庫系統之洪水控制問題，研究中考量多目標營運和專家知識於模式建構，結果顯示此模式在實際運用上具簡易性與適用性。張雅婷(2006)首先應用 CFNN 與 ANFIS 於水庫入流量預報，結果顯示 ANFIS 具備高度學習能力，利用少數規則即可精確預報水庫入流量；接著利用遺傳演算法搜尋颱風時期水庫最佳放水量歷程，以茲作為 ANFIS 之訓練樣本與標

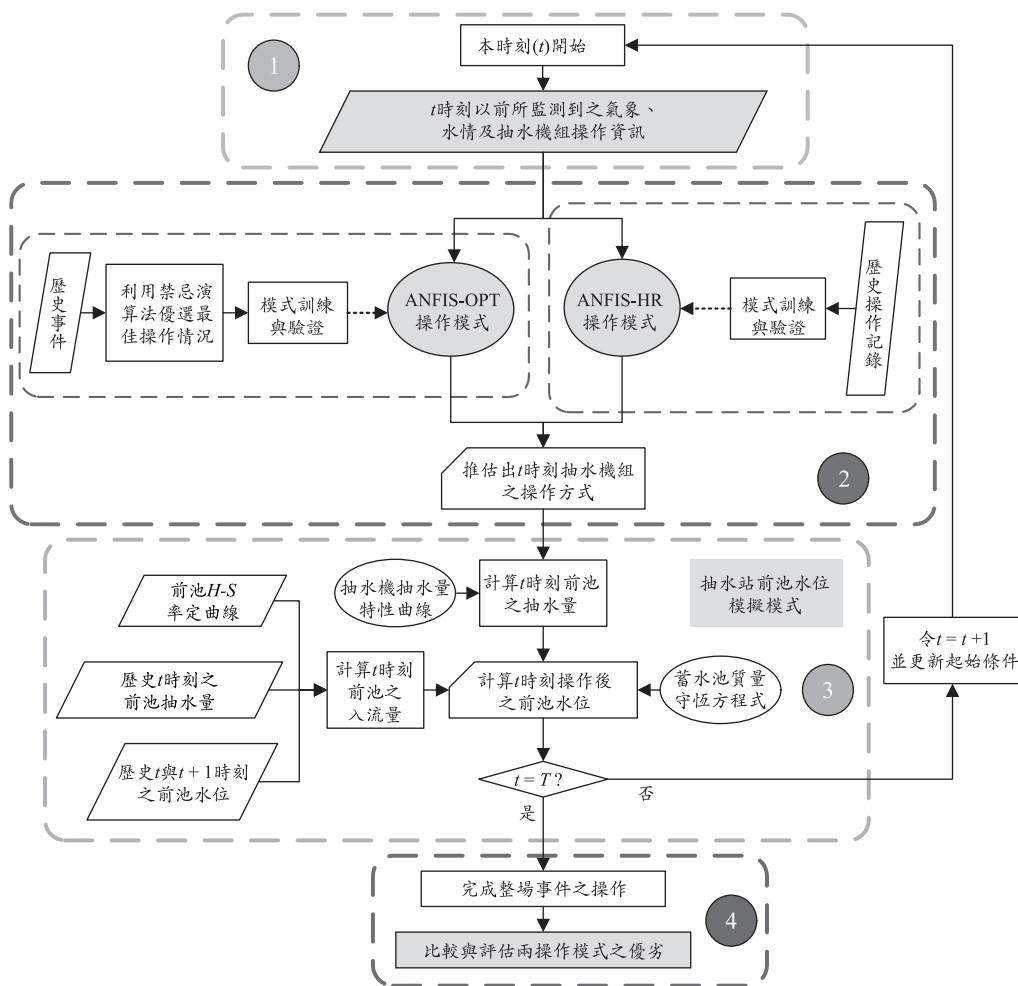


圖 1 研究方法流程圖

的，並將水庫入流量預報模式與水庫操作推估模式結合以應用於實際案例操作，結果顯示 ANFIS 應用於水庫颱風操作有不錯之成效。許弘政(2007)及許弘政與張麗秋(2009)研發防洪運轉規則模糊控制模式(FORFCM)以及智慧型水庫防洪模糊控制模式(IFOFCM)兩種石門水庫防洪操作模式，結果顯示兩種模式皆能有效消滅洪峰入流所造成之衝擊並達成蓄水目的。綜觀上述研究，可知應用 ANFIS 於防洪操作可省去即時優選所需花費之時間，因此其為一值得研究與發展之方法。

本研究目的為利用人工智慧技術(ANFIS 與禁忌演算法)研發兩種智慧型都市排水抽水站即

時操作之決策模式，以決定排水閘門關閉時期抽水站之即時操作方式，並藉由實際案例模擬操作結果以比較各操作模式之優劣。

二、方法建立

2.1 研究流程

本研究流程分為四大部分，如圖 1 所示。在第一部分中，研究工作為統整抽水站操作決策模式所需之輸入資訊，包括有：本時刻(t)以前所監測到之氣象、水情及抽水機組操作資訊。在第二部分中，研究工作為將監測資訊輸入兩種抽水站操作決策模式以決定即時操作方式；第一種操作模式簡稱為 ANFIS-HR，模式為利用 ANFIS 結

合歷史操作紀錄來建構而成；第二種操作模式簡稱為 ANFIS-OPT，其為利用 ANFIS 結合由禁忌演算法所優選出歷史颱風暴雨事件中抽水機組之最佳操作序列來建構而成。在第三部分中，研究工作為利用兩種操作模式進行歷史事件操作時前池水位之決定，以供進行下一時刻之操作模擬。在第四部分中，研究工作為比較兩種操作模式於各洪水事件之操作成效，以評估各操作模式之優劣。

2.2 ANFIS-HR 操作模式與 ANFIS-OPT 操作模式

本研究 ANFIS-HR 操作模式為應用 ANFIS 結合歷史操作紀錄(History Record)來建構，其方法為將歷史洪水事件中抽水機組之操作方式當作操作標的，再利用 ANFIS 建構抽水機組之即時操作推估模式。

本研究 ANFIS-OPT 操作模式為應用 ANFIS 結合歷史洪水事件所優選(Optimization)出之最佳操作情況來建構，其方法為運用禁忌演算法針對歷史洪水事件之抽水機組操作方式進行全時段優選，以當作模式操作標的，接著再利用 ANFIS 建構抽水機組即時操作推估模式。模式候選輸入項及輸出項與 ANFIS-HR 操作模式相同。

ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 操作模式之候選輸入項有本時刻以前之降雨量、前池水位及抽水機組開啓數，模式輸出項為本時刻抽水機組之即時開啓數。由於防洪排水抽水機組啓閉次數過於頻繁易造成機組損壞，故操作規範規定每台抽水機於每小時最多有 12 次之啓閉限制，在上述要求下，本研究設定模式輸入及輸出均以 5 分鐘為單位時距來進行操作模擬。

2.2.1 建構 ANFIS-OPT 操作模式所需之操作標的

(一)優選模式之建立

由於當揚程越高，抽水機開啓時抽水量就減少(抽水效能就越差)，反之亦然；而且當入流量越大，抽水機開啓時前池水位降低之效能就越差，反之亦然；因此若想要有效降低前池水位，掌握最佳抽水時機與抽水量即相當重要。最佳抽水操作策略應在尖峰入流量來臨時先行抽水，以分攤尖峰流量來臨時之水位，如此才能有效降低

前池最高水位；降低前池最高水位可以讓都市集水區內低窪地區之積水較易排除，並增進排水容量與效率；再者，颱風暴雨事件結束後前池水位期望能回復到標的水位，以結束抽水站之排水操作；另外，抽水站操作不希望抽水機組開關次數過於頻繁而造成故障、耗費防洪成本之情形。因此本研究建立抽水站抽水機組即時操作優選模式包含三個權重目標函數，分別為：(1)最小化整場事件抽水站前池之最高水位；(2)最小化前池最終水位與標的水位相差之絕對值；(3)最小化整場事件抽水機組之總開關次數。限制式為物理限制式。茲將優選模式之公式化說明敘述如下：

1. 目標函數

(1)降低抽水站前池之最高水位

颱風暴雨來襲時期若都市排水系統之水位過高，則會降低排水系統之蓄水容量及排水能力，並且造成積水無法順利排出低窪地區之情形。因此本研究將降低抽水站前池之最高水位視為一目標函數，表示如下

$$\min \left\{ \frac{x_H^{\max} - H^{\text{bottom}}}{H^{\text{top}} - H^{\text{bottom}}} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

其中， $x_H^{\max}$ 為整場事件之最高前池水位變數； H^{top} 為前池頂端高程；以及 H^{bottom} 為前池底床高程。

(2)最小化前池最終水位與標的水位相差之絕對值

事件結束後前池水位需要回復至標的水位，方可安全地結束抽水機組之排水操作，因此本研究將最小化前池最終水位與標的水位相差之絕對值視為另一目標函數，表示如下

$$\min \left\{ \frac{|x_H^{\text{final}} - H_{\text{target}}^{\text{final}}|}{H^{\text{top}} - H^{\text{bottom}}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

其中， x_H^{final} 為前池最終水位變數；以及 $H_{\text{target}}^{\text{final}}$ 為前池標的水位。

(3)最小化整場事件抽水機組總開關次數

排水操作中若抽水機組開關次數過多則易

造成機組損壞，爲了降低損壞風險，本研究將最小化整場事件抽水機組之總開關次數視爲第三個目標函數，表示如下

$$\min \left\{ \frac{P_{oc}}{T} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$Z = \min \left\{ C_1 \cdot \left(\frac{x_H^{max} - H^{bottom}}{H^{top} - H^{bottom}} \right) + C_2 \cdot \left(\frac{x_H^{final} - H_{target}^{final}}{H^{top} - H^{bottom}} \right) + C_3 \cdot \left(\frac{P_{oc}}{T} \right) \right\} \dots\dots\dots (4)$$

其中， C_1 爲抽水站前池最高水位之權重係數； C_2 爲抽水站前池最終水位之權重係數；以及 C_3 爲抽水機組開關次數之權重係數。

2. 限制式

- (1) 本研究各時刻抽水站前池水位受到排水設施之物理限制，可表示如下

$$H^{bottom} \leq x^H(t) \leq H^{top} \quad 1 \leq t \leq T \dots\dots\dots (5)$$

其中， $x^H(t)$ 爲 t 時刻之前池水位。

- (2) 抽水機開啓數爲正值且小於抽水機總數（抽水站之抽水機組一般由沉水式與豎軸式所組成），分別表示如下

$$0 \leq x_s^{NP}(t) \leq P_s^{max} \quad 1 \leq t \leq T \dots\dots\dots (6)$$

$$0 \leq x_d^{NP}(t) \leq P_d^{max} \quad 1 \leq t \leq T \dots\dots\dots (7)$$

其中， $x_s^{NP}(t)$ 爲 t 時刻沉水式抽水機開啓數； $x_d^{NP}(t)$ 爲 t 時刻豎軸式抽水機開啓數； P_s^{max} 爲沉水式抽水機總數；以及 P_d^{max} 爲豎軸式抽水機總數。

- (3) 前池水位模擬利用前池蓄水連續方程式配合前池水位-蓄水量關係式(*H-S Curve*)及抽水機抽水量特性曲線來推求，此限制式屬非線性式(詳見 2.3 節)。
- (4) 限制式內嵌入一抽水站前池水位模擬子模式，以計算不同抽水機組操作序列下之前池水位歷線。

(二) 優選模式之求解

在進行建構 ANFIS-OPT 操作模式前，需針

其中， P_{oc} 爲整場事件抽水機組之總開關次數；以及 T 爲洪水延時(time step)。

(4) 權重目標函數

最後，將式(1)、式(2)和式(3)三個目標函數以權重係數組合成權重目標函數，表示如下

對整場歷史事件進行全時段優選。本研究應用禁忌演算法優選抽水站抽水機組之最佳操作序列，禁忌演算法近年來流行地應用於管理或規劃問題上，其可有效率地搜尋到非線性或線性問題之最佳解，且容易與優選模式結合而能快速、自動化地優選到決策變數之最佳解。茲將禁忌演算法之原理及優選方法敘述如下：

1. 禁忌演算法

禁忌演算法由 Fred Glover 所提出(1986、1997)，其運用記憶之觀念來導引搜尋，並擁有跳脫可行解區或是區域最佳解區之機制，以避免在求解過程中出現無效的搜尋，進而試圖尋找到全域最佳解。禁忌演算法已經被廣泛應用在各領域之最佳化問題上。

禁忌演算法可透過不同形式之記憶體，來引導搜尋時之移步，在移步過程中，有些移步方向根據記憶與規則加以鼓勵或予以禁止。在操作上，禁忌演算法透過禁忌名單(Tabu list)的定義，包括名單的形式與長度，使其可以促使搜尋跳脫出區域最佳解區，也可以避免重複搜尋相同的解；另外，在搜尋過程中，每一次迭代都只往最佳候選解移步，大幅地提高了搜尋之效率與正確性。

2. 應用禁忌演算法優選抽水機組之最佳操作序列

本研究應用禁忌演算法優選整場洪水事件中抽水站抽水機組之最佳操作序列，優選方法爲將優選模式中之決策變數「整場事件抽水機組之操作序列」作爲禁忌演算法之搜尋解。其搜尋流程如圖 2 所示，首先設定禁忌演算法之初始搜尋解(整場事件中初始設定之抽水機組操作序列)，

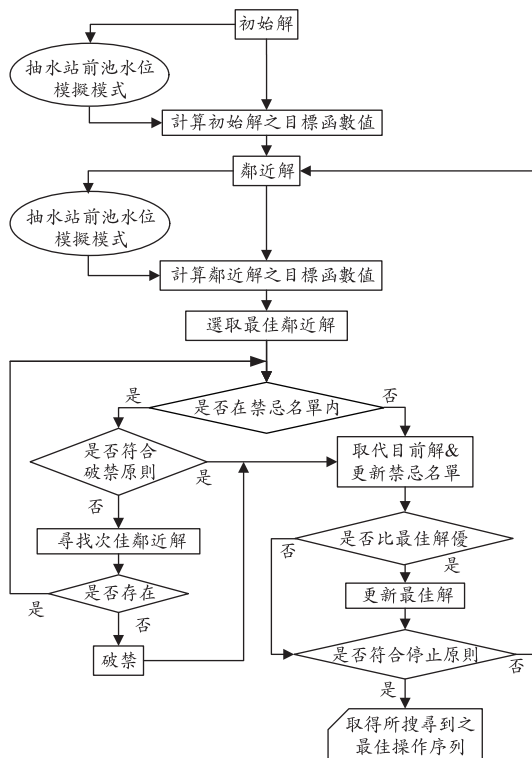


圖 2 應用禁忌演算法優選抽水機組最佳操作序列之流程圖

輸入前池水位模擬模式後可計算出優選模式之目標函數值；接著計算鄰近解之目標函數值，以選取出最佳之鄰近解；再來比對最佳鄰近解是否在禁忌名單內(是否搜尋過)，若已搜尋過則選取次佳鄰近解，若無搜尋過則可進行移步之動作並更新禁忌名單；最後應用菁英策略將移步後之解與之前所搜尋到之最佳解進行比較，以紀錄目前為止所搜尋到之最佳解；搜尋符合停止原則後，即可得到整場事件之最佳操作序列。

2.2.2 模式輸入項之選取

本研究操作模式之最佳輸入項採用相關性分析來決定，相關性分析指標採用無母數統計方法之 Spearman's Rank Correlation Coefficient (Spearman, 1904)，分析時不預設任何候選輸入與輸出項間之對應關係，其相關性乃取決於各變數時間序列之階層關係，故不論輸入-輸出項間為何種關係皆可判斷其相關性，可表示如下

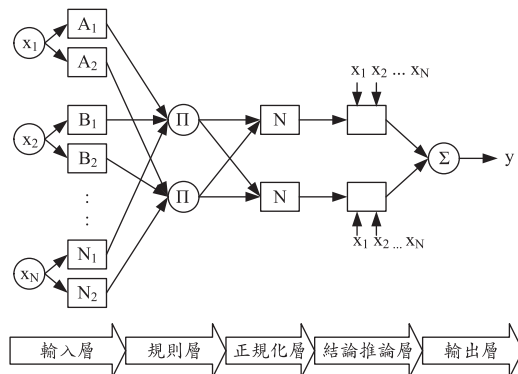


圖 3 調適性網路模糊推論系統架構

$$r_{rank} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$D_i^2 = (Rank_{x_i} - Rank_{y_i})^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

其中， r_{rank} 為 Spearman's 階層相關係數； n 為資料筆數； x 為模式候選輸入項，其為可能之推估因子； y 為推估模式輸出項； $Rank_{x_i}$ 為數值 x_i 在該數列之排序值；以及 $Rank_{y_i}$ 為數值 y_i 在該數列之排序值。

2.2.3 調適性網路模糊推論系統(ANFIS)

調適性網路模糊推論系統 (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)由 Jang (1993)所提出，係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之特性架構而成。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進行定性描述與分析，但卻缺乏準確之定量分析與數值校正；而類神經網路雖無法處理定性之知識與邏輯推論過程，卻具有極佳之自我學習與組織能力，其強大之調整能力正可用來調整模糊系統之結構與參數。因此 ANFIS 結合兩種演算法以充分發揮模式對於系統不確定性與不精確性之處理能力，透過 ANFIS 學習與自我調適之功能進而求得參數最佳解。

ANFIS 由輸入層、規則層、正規化層、結論推論層與輸出層所構成，其架構如圖 3 所示，各層計算與運作方式如下所述：

1. 輸入層

將輸入變數映射至模糊集合，並以設定之隸

屬函數估算其隸屬度，本研究採用高斯函數為隸屬函數，可表示如下

$$O_{1,ji} = u_{ji}(x_i) = \exp\left(\frac{\|x_i - c_{ji}\|^2}{2\sigma_{ji}^2}\right) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, M_i \quad (10)$$

其中， $u_{ji}(x_i)$ 為隸屬函數； c_{ji} 、 σ_{ji} 為前提部分參數； N 為輸入層輸入項總數；以及 M_i 為第 i 個輸入項之模糊化隸屬函數個數。

2. 規則層

進行變數間模糊邏輯規則之先決條件配對，再利用 T-norm 乘積運算以得到各規則之權重值(輸出值)，可表示如下

$$O_{2,p} = w_p = \prod_{i=1}^N u_{pi}(x_i) \quad p = 1, \dots, P \quad (11)$$

其中， w_p 為權重值；以及 P 為規則總數。

3. 正規化層

此層各節點之運算原理為計算該規則輸出值相對於所有規則輸出值之比例，可表示如下

$$O_{3,p} = \bar{w}_p = \frac{w_p}{\sum_{p=1}^P w_p} \quad (12)$$

4. 結論推論層

將正規化層之結果與 Sugeno 模糊模式 (Takagi and Sugeno, 1983) 相乘，即可得到此層神經元之輸出值，可表示如下

$$O_{4,p} = \bar{w}_p f_p = \bar{w}_p \left(\sum_{i=0}^N r_{pi} x_i \right) \quad (13)$$

其中， r_{pi} 為結論部分參數； $x_0 = 1$ 。

5. 輸出層

將前層訊息加總以計算網路輸出值，一如解模糊化之功能，可表示如下

$$O_{5,1} = \sum_{p=1}^P \bar{w}_p f_p = \frac{\sum_{p=1}^P w_p f_p}{\sum_{p=1}^P w_p} \quad (14)$$

ANFIS 結合前饋式類神經網路之監督式學習方法，將網路參數分為前提部分參數(非線性參數： c_{ji} 、 σ_{ji})與結論部分參數(線性參數： r_{pi}) (Jang, 1993)，為了減少模式建構時間以有效得到最佳網路架構與參數，本研究應用複合型機制來建構網路架構與參數，此機制包括減法聚類法(Subtractive Clustering)與最小平方估計法(Least Square Estimator)，此複合型建構機制僅需設定減法聚類法之鄰近半徑即可自動完成網路架構與參數訓練，大幅降低尋找最佳模糊化隸屬函數個數、規則數與網路參數之時間(Jang et al., 1997)。

2.2.4 模式評比指標

本研究採用平均絕對誤差與相關係數作為模式建構優劣之評比指標，茲分述如下：

(1) 平均絕對誤差(Mean absolute error)， MAE

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{eva}(t) - Y_{obj}(t)|}{n} \quad (15)$$

其中， $Y_{eva}(t)$ 為 t 時刻之推估值， $Y_{obj}(t)$ 為 t 時刻之目標輸出值。 MAE 值越小表示推估值之準確性越高。

(2) 相關係數(Coefficient of correlation)， CC

$$CC = \frac{n \sum Y_{eva}(t) Y_{obj}(t) - \sum Y_{eva}(t) \sum Y_{obj}(t)}{\sqrt{\sum Y_{eva}^2(t) - \frac{(\sum Y_{eva}(t))^2}{n}} \sqrt{\sum Y_{obj}^2(t) - \frac{(\sum Y_{obj}(t))^2}{n}}} \quad (16)$$

其中， CC 值越大代表推估值與目標輸出值之變化趨勢越接近。

2.3 利用兩種操作模式進行歷史事件操作時前池水位之決定

本研究目的為研發兩種抽水站操作決策模式於排水閘門關閉時期之即時操作，各操作模式所決定出之即時操作方式存在與歷史操作紀錄不相同之情況，因此需要一計算方法來決定操作方式改變下之前池水位；由於排水閘門關閉下排水系統內之洪水僅可靠抽水站抽水機組來抽排出去，因此各時刻操作完成後之前池水位可利用前池蓄水連續方程式配合前池水位-蓄水量關係式($H-S$ Curve)來推求， $H-S$ Curve 之功能為將前池蓄水連續方程式所推求出此時刻操作完成後之前池蓄水量轉換為前池水位。以矩形斷面之抽水站前池為例， $H-S$ Curve 與前池蓄水連續方程式可分別表示如下

$$x^H(t+1) = a_I \cdot x^S(t+1) + b_I \quad 1 \leq t \leq T \quad \text{.....(17)}$$

$$x^P(t) = x_s^{NP}(t) \left[m_1(x_s^h(t))^2 + m_2x_s^h(t) + m_3 \right] + x_d^{NP}(t) \left[m_4(x_d^h(t))^2 + m_5x_d^h(t) + m_6 \right] \quad 1 \leq t \leq T \quad \text{.....(19)}$$

其中， $x_s^h(t)$ 為 t 時刻沉水式抽水機揚程； $x_d^h(t)$ 為 t 時刻豎軸式抽水機揚程；以及 m_1 、 m_2 、 m_3 為沉水式抽水機抽水特性曲線方程式係數， m_4 、 m_5 、 m_6 為豎軸式抽水機抽水特性曲線方程式係數， m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_6 為常數。

$$x^S(t) = a_2 \cdot x^H(t) + b_2 \quad 1 \leq t \leq T \quad \text{.....(20)}$$

其中， a_2 、 b_2 為常數。

2.4 各模式實例操作結果比較

由於抽水站操作為期望在洪水事件中，掌握最佳抽水時機與抽水機組開啓數以有效降低前池最高水位來達到避免淹水之目的，並在事件結束時能將前池最終水位回復至標的水位，因此本研究應用兩種操作模式於實例操作並與歷史紀

$$x^S(t+1) = I(t) - x^P(t) + x^S(t) \quad 1 \leq t \leq T \quad \text{.....(18)}$$

其中， a_I 、 b_I 為常數； $x^S(t+1)$ 為 t 時刻抽水站前池之蓄水量變數，可由式(18)來求得； $x^P(t)$ 為 t 時刻抽水站前池之總抽水量變數，其值可由抽水機抽水量特性曲線方程式來求得，可表示如式(19)所示； $x^S(t)$ 為 t 時刻抽水站前池之蓄水量，可由前池蓄水量-水位關係式($S-H$ Curve)配合前一時刻操作完成後之前池水位來轉換得知，可表示如式(20)所示； $I(t)$ 為 t 時刻之前池入流量，由於不管抽水站抽水機組操作方式如何改變，集水區在相同降雨歷線影響下前池入流量歷線皆相同，因此 $I(t)$ 可由歷史抽水操作與前池水位紀錄配合前池蓄水連續方程式來反推得知。

各抽水機之抽水量與揚程有關，豎軸式抽水機與沉水式抽水機之抽水特性不同，因此各時刻抽水量有賴於兩種抽水機之抽水量特性曲線(一般為 2 次方程式)來推估得知，可表示如式(19)所示：

錄比較之變數為整場事件之前池最高水位(x_H^{max})以及前池最終水位與標的水位相差之絕對值($|\Delta H_{F-target}|$)。前池水位歷線之計算方式則詳述於 2.3 節。

三、方法應用

3.1 區域概述

本研究將所建立之方法應用於新北市中港大排集水區，其集水區域包括新莊、泰山、五股工業區等地區，其研究區域如圖 4 所示；中港大排係匯集新莊市北區及五股工業區之雨水，而收集泰山鄉排水之貴子坑溪則匯入中港大排下游，再往北流入大窠坑溪，兩區之集水面積達 1660 公頃；近年來由於大窠坑溪底床泥沙淤積嚴重，大窠坑溪之水位高程皆比中港大排之水位高

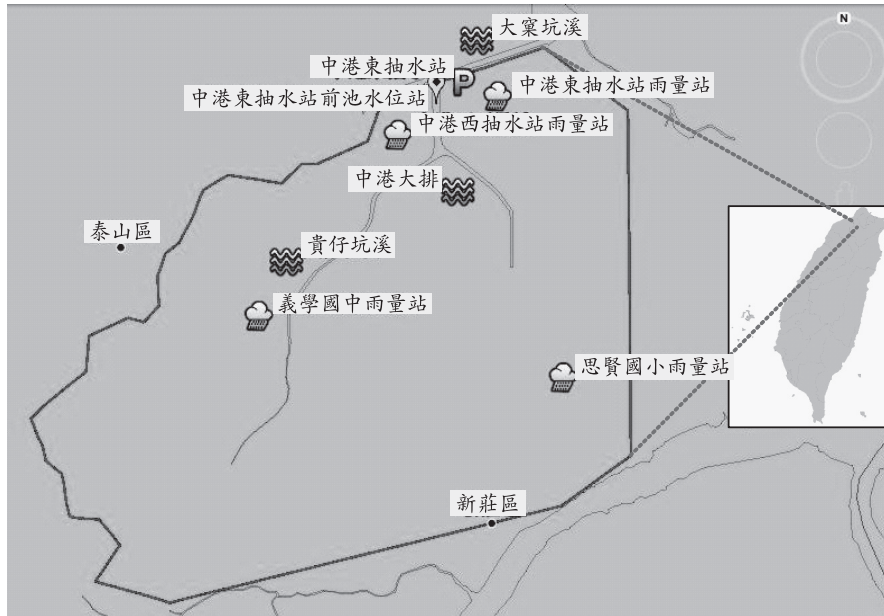


圖 4 研究區域圖

表 1 ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 操作模式建構資料

	起始時間	結束時間	資料筆數	事件名稱	各階段總資料筆數
訓練	2008/7/18 05:55	2008/7/18 19:35	165	卡玫基颱風	1268
	2008/9/3 02:20	2008/9/3 07:45	66	0903 暴雨事件	
	2008/9/5 13:10	2008/9/5 18:00	59	0905 暴雨事件	
	2008/9/12 02:10	2008/9/14 10:15	579	辛樂克颱風(1)	
	2008/9/29 01:25	2008/9/30 10:35	399	薔蜜颱風(3)	
驗證	2008/7/27 16:20	2008/7/28 14:45	270	鳳凰颱風	552
	2008/8/23 13:35	2008/8/23 19:45	75	0823 暴雨事件	
	2008/9/15 04:55	2008/9/15 22:05	207	辛樂克颱風(2)	

程還高，爲了避免回水之情形，重力流出口閘門(排水閘門)皆呈現關閉狀態，而位於中港大排出口之中港東抽水站則負責將都市排水系統內之洪水抽排至大窠坑溪；中港東抽水站內設置有 13 cms 豎軸式抽水機 4 組及 4 cms 沉水式抽水機 2 組，最大抽水量爲 60 cms。若前池水位達到一特定高度，集水區內部分地勢低溼、通水面積較小或堤防較低之區域則容易產生淹水之情形，因此中港東抽水站對於集水區特性與過去操作經驗設定建議起抽水位爲 EL.-0.4 m，前池水位若高

於此一高度則集水區內容易產生淹水之情形。

3.2 模式建構與實例模擬事件

本研究 ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 操作模式皆是選取特定事件之操作標的來建構，模式建構也分爲訓練及驗證階段，訓練資料共有 1268 筆，驗證資料共有 552 筆，各階段所採用之事件如表 1 所示。沉水式抽水機與豎軸式抽水機各應用 ANFIS 建構一即時操作推估模式，以增進推估精確度。

表 2 各操作模式實例操作之模擬比較事件

起始時間	結束時間	資料筆數	事件名稱
2008/9/2 04:00	2008/9/2 12:15	100	0902 暴雨事件
2008/9/27 00:35	2008/9/27 10:20	118	薔蜜颱風(1)
2008/9/28 06:55	2008/9/29 01:20	222	薔蜜颱風(2)
2008/10/7 03:00	2008/10/7 17:20	173	1007 暴雨事件

本研究所研發之兩種抽水站抽水機組操作決策模式，分別採用 4 場洪水事件於實際案例操作模擬以比較各模式之優劣，各事件之詳細資訊如表 2 所示。

3.3 結果與討論

3.3.1 ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 操作模式輸入項之選取

經過無母數相關性分析後，可以發現 ANFIS-HR 操作模式中，沉水式抽水機即時開啓數與實測及預報雨量、前池入流量和水位資訊之相關性皆差不多；豎軸式抽水機即時開啓數方面，其與過去實測雨量和水位資訊之相關性較未來預報佳，而其與實測及預報前池入流量資訊之相關性皆差不多。而在 ANFIS-OPT 操作模式中，沉水式抽水機即時開啓數與實測及預報雨量、前池入流量和水位資訊之相關性皆差不多；豎軸式抽水機即時開啓數方面，其與實測及預報雨量資訊之相關性皆差不多，而其與未來預報前池入流量和水位資訊之相關性稍較過去實測佳，但是優勢度不大。在未來預報資訊並不特別較過去實測資訊佳之情況下，若在逐時段操作時以具有不確定性及誤差之預報資訊輸入模式，則可預期其成效有限，因此本研究 ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 操作模式之水情輸入項皆採用本時刻以前之實測資訊，而抽水機組操作資訊則採用即時刻以前剛操作完之開啓數做為輸入。

3.3.2 ANFIS-HR 操作模式建構結果

本研究 ANFIS-HR 操作模式最佳鄰近半徑以隨機-試誤法來決定，由 0 至 1 間設定 100 組鄰

表 3 ANFIS-HR 操作模式建構結果與歷史操作比較

	沉水式抽水機	豎軸式抽水機
鄰近半徑	0.720	0.985
規則數	2	2
訓練 MAE (開啓數)	0.025	0.068
驗證 MAE (開啓數)	0.011	0.091
訓練 CC	0.980	0.977
驗證 CC	0.981	0.977

近半徑所建構出之模式中選出最佳模式，其最佳建構結果與歷史操作比較如表 3 所示，結果顯示 ANFIS-HR 操作模式中最佳沉水式抽水機推估模之鄰近半徑為 0.720，規則數為 2；最佳豎軸式抽水機推估模式之鄰近半徑為 0.985，規則數為 2；ANFIS-HR 操作模式訓練與驗證階段之推估誤差皆相當小、評比指標皆相當佳(沉水式抽水機推估模式之訓練 MAE 為 0.025、驗證 MAE 為 0.011、訓練 CC 為 0.980、驗證 CC 為 0.981，豎軸式抽水機推估模式之訓練 MAE 為 0.068、驗證 MAE 為 0.091、訓練 CC 為 0.977、驗證 CC 為 0.977)，而且驗證階段之 MAE 和 CC 值並不會比訓練階段差上許多，因此也無 over-fitting 之情形，其主要原因為過去抽水站現場操作人員主要依據個人經驗或操作規線來進行操作，而且即時操作主要僅以目前之降雨情況和水情資訊來判斷，然而本研究 ANFIS-HR 操作模式所可採用之輸入項皆與過去現場操作人員之決策資訊相同，因此 ANFIS-HR 操作模式之推估結果與歷史操作紀錄相近。

3.3.3 ANFIS-OPT 操作模式建構結果

1. 優選模式之參數設定

本研究為了平衡三目標函數項之同等重要性，考量抽水機組操作對於各目標函數之值域影響量，並利用試誤法來設定適宜之 C_1 為 9、 C_2 為 10、 C_3 為 27。而中港東抽水站之 P_s^{max} 為 2， P_d^{max} 為 4， H^{bottom} 為 -2.4 m， H^{top} 為 0.55 m， H_{target}^{final} 則設定為 -0.5 m。本研究禁忌演算法之禁忌名單採用「新進式記憶」為記憶屬性，禁忌名單形式為 $[Z, x_s^{NP}(1), x_s^{NP}(2), \dots, x_s^{NP}(T), x_d^{NP}(1),$

表 4 ANFIS-OPT 操作模式建構結果與優選模式操作比較

	沉水式抽水機	豎軸式抽水機
鄰近半徑	0.999	0.935
規則數	2	2
訓練 MAE (開啓數)	0.076	0.060
驗證 MAE (開啓數)	0.066	0.065
訓練 CC	0.942	0.976
驗證 CC	0.923	0.977

$x_d^{NP}(2), \dots, x_d^{NP}(T)]$ ，禁忌名單長度設為 500，搜尋疊代次數為 2000 次，初始解採用隨機法來設定。

2. 抽水機即時操作推估模式建構結果

在應用禁忌演算法優選以得到各場事件之最佳操作序列及前池水位歷線後，即可進行 ANFIS 模式建構，本研究 ANFIS-OPT 操作模式最佳鄰近半徑同樣以隨機-試誤法來決定，方法為在 0 至 1 間隨機設定 100 組鄰近半徑，並由 100 組建構出之模式中選出最佳模式，其最佳建構結果與優選模式操作比較如表 4 所示，結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式中最佳沉水式抽水機推估模式之鄰近半徑為 0.999，規則數為 2；最佳豎軸式抽水機推估模式之鄰近半徑為 0.935，規則數為 2；沉水式與豎軸式抽水機推估模式於訓練與驗證階段之評比指標也相當佳(沉水式抽水機推估模式之訓練 MAE 為 0.076、驗證 MAE 為 0.066、訓練 CC 為 0.942、驗證 CC 為 0.923，豎軸式抽水機推估模式之訓練 MAE 為 0.060、驗證 MAE 為 0.065、訓練 CC 為 0.976、驗證 CC 為 0.977)，而且也沒有 over-fitting 的情形。與 ANFIS-HR 操作模式相比，ANFIS-OPT 操作模式之抽水機開啓數略多，因此前池水位歷線普遍較低，同時前池最終水位也能相當接近標的水位。

3.3.4 實例操作結果比較

本研究研發兩種抽水站即時操作決策模式，為了比較兩種操作模式之優劣，本研究將兩種操作模式實際應用於歷史兩場颱風及兩場暴雨事件上，以模擬各模式之操作成效。由於中港

大排之流量計不足且皆呈現損壞之情況，無法以水理模式(例如：HEC-RAS、SWMM 等等)來模擬各決策模式操作下之前池水位歷線，因此本研究前池水位歷線由抽水站前池蓄水連續方程式配合入流量與抽水量來模擬，而抽水站前池水位-蓄水量關係曲線圖(H - S curve)則由 HEC-RAS 來求得，中港大排東抽水站前池 H - S curve 可表示如下

$$x^H(t) = 3.20372E-5 \cdot x^S(t) - 1.26150 \dots \dots \dots (21)$$

中港東抽水站沉水式與豎軸式抽水機抽水量特性曲線經由實驗可分別表示如下

$$x_s^P(t) = -0.033 \cdot (x_s^H(t))^2 + 0.155 \cdot x_s^H(t) + 4.532 \dots \dots \dots (22)$$

$$x_d^P(t) = -0.15 \cdot (x_d^H(t))^2 + 0.9 \cdot x_d^H(t) + 14.05 \dots \dots \dots (23)$$

其中， $x_s^P(t)$ 為沉水式抽水機 t 時刻之抽水量； $x_d^P(t)$ 為豎軸式抽水機 t 時刻之抽水量； $x_s^H(t)$ 為沉水式抽水機於 t 時刻之揚程； $x_d^H(t)$ 為豎軸式抽水機於 t 時刻之揚程。

1. 0902 暴雨事件

各操作模式於 0902 暴雨事件之操作結果比較如圖 5 所示，而比較變數值則如表 5 所示。結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式可掌握最佳抽水時機與抽水量來降低前池最高水位；歷史操作與 ANFIS-HR 操作模式抽水機開啓時機過慢，在入流量大時才抽水，因此造成抽水時降低前池最高水位之效能較差；ANFIS-HR 操作模式於尖峰入流量來臨時抽水量不夠大，造成前池最高水位較 ANFIS-OPT 及歷史操作還要高；ANFIS-OPT 操作模式與歷史操作中前池最終水位與標的水位相差之絕對值($|\Delta H_{F-target}|$)相同(2 cm)，ANFIS-HR 操作模式之 $|\Delta H_{F-target}|$ 稍較前者為差(5 cm)。同時以整場事件之前池最高與最終水位來看，ANFIS-OPT 操作模式相較於 ANFIS-HR 操作模式與歷史操作為佳。

表 5 各操作模式於 0902 暴雨事件之比較變數值

操作模式	歷史操作	ANFIS-HR	ANFIS-OPT
最高水位(m)	-0.18	-0.05	-0.39
最終水位與標的水位相差之絕對值(m)	0.02	0.05	0.02
總開關次數	7	7	7

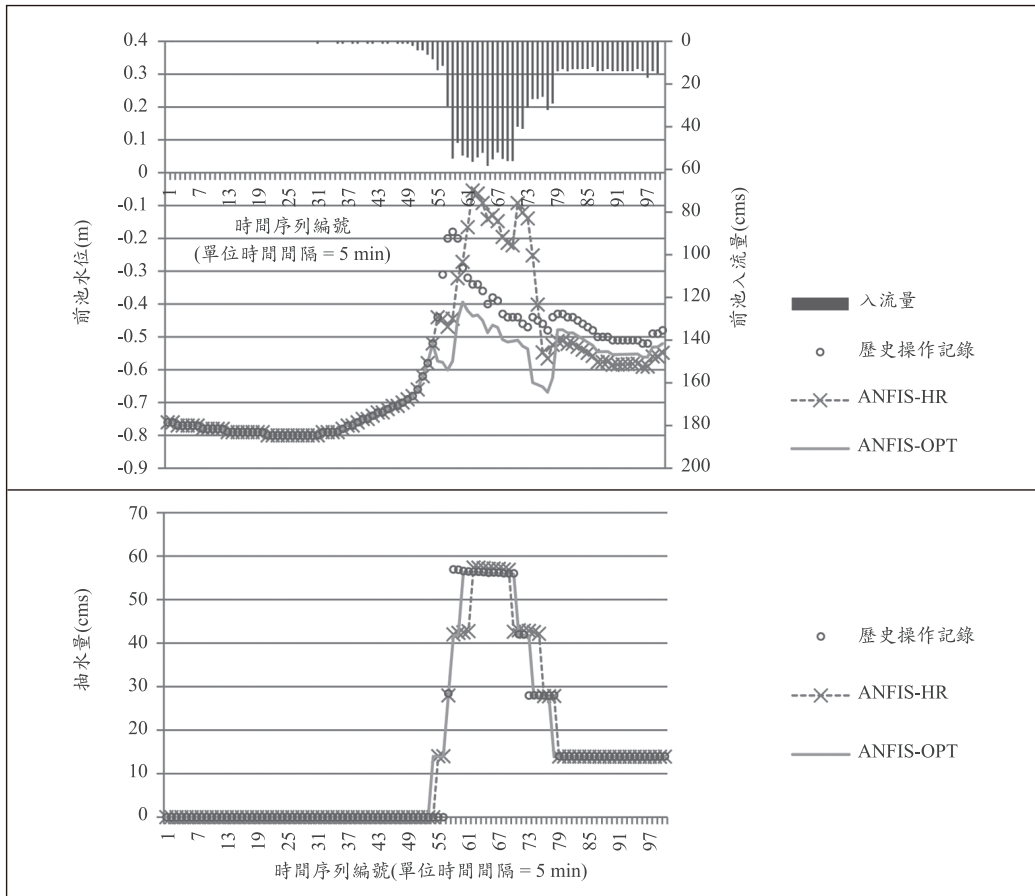


圖 5 各操作模式於 0902 暴雨事件之操作結果比較

2. 薔蜜颱風(1)

各操作模式於薔蜜颱風(1)之操作結果比較如圖 6 所示，而比較變數值則如表 6 所示。結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式可於高入流量來臨前先行抽水以增加蓄洪容量、降低淹水風險；歷史操作於低入流量時抽水量較小，高入流量時才較大量抽水，因此造成前池最高水位較 ANFIS-OPT

操作模式高；ANFIS-HR 操作模式之操作結果與歷史操作有些許相似，僅於入流量增多時期抽水量稍較歷史操作大；另外，ANFIS-OPT 操作模式之 $|\Delta H_{F-target}|$ 稍較 ANFIS-HR 操作模式和歷史操作低。同時以整場事件之前池最高與最終水位來看，ANFIS-OPT 操作模式皆較 ANFIS-HR 操作模式與歷史操作為佳。

表 6 各操作模式於薈蜜颱風(1)之比較變數值

操作模式	歷史操作	ANFIS-HR	ANFIS-OPT
最高水位(m)	-0.16	-0.19	-0.32
最終水位與標的水位相差之絕對值(m)	0.03	0.04	0.01
總開關次數	10	10	10

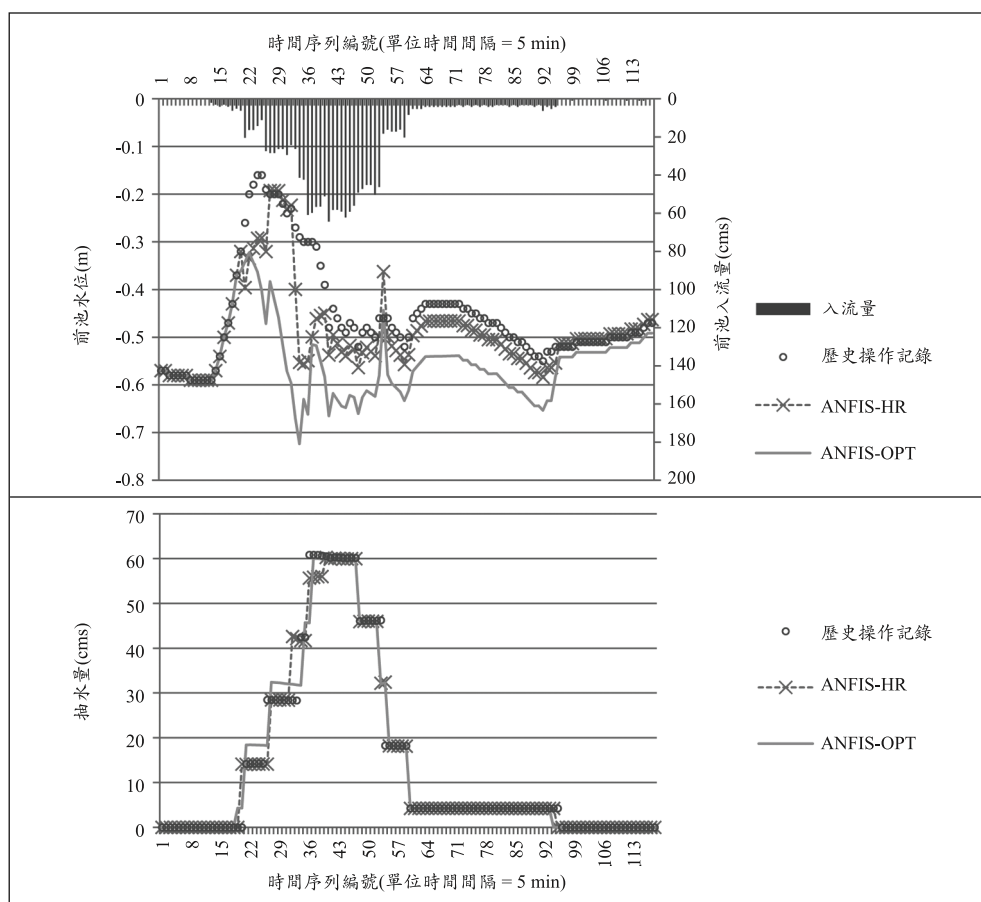


圖 6 各操作模式於薈蜜颱風(1)之操作結果比較

3. 薈蜜颱風(2)

各操作模式於薈蜜颱風(2)之操作結果比較如圖 7 所示，而比較變數值則如表 7 所示。結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式可在高入流量來臨前掌握抽水時機與抽水量，以有效降低前池最高水位與淹水風險；歷史操作之前池水位歷線變化趨勢與 ANFIS-OPT 操作模式相近，但是未能應用較佳之抽水量以降低前池最高水位；ANFIS-HR

操作模式於某些高入流量之關鍵抽水時機其抽水量過低，因此造成前池水位歷線較高且震盪跳動較大；同樣地，ANFIS-OPT 操作模式之 $|\Delta H_{F-target}|$ 稍較 ANFIS-HR 操作模式和歷史操作低。同時以整場事件之前池最高與最終水位來看，ANFIS-OPT 操作模式皆較 ANFIS-HR 操作模式與歷史操作為佳。

表 7 各操作模式於薔蜜颱風(2)之比較變數值

操作模式	歷史操作	ANFIS-HR	ANFIS-OPT
最高水位(m)	-0.30	-0.20	-0.36
最終水位與標的水位相差之絕對值(m)	0.05	0.04	0.01
總開關次數	15	15	15

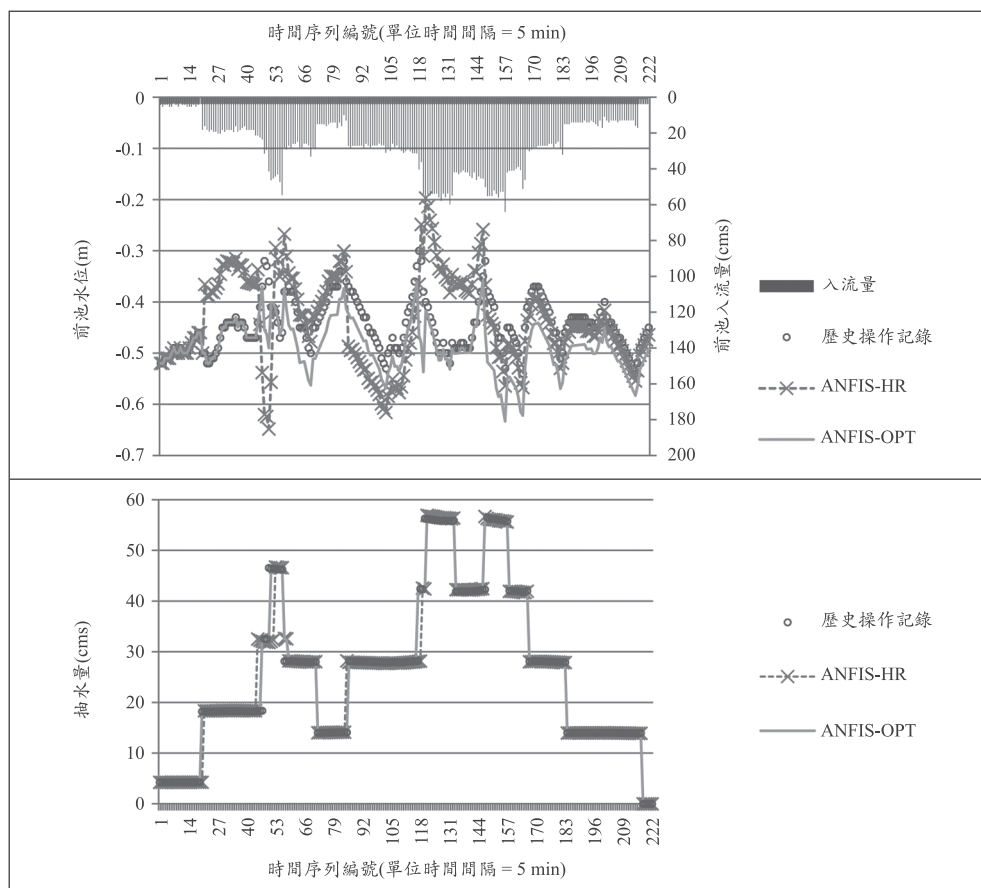


圖 7 各操作模式於薔蜜颱風(2)之操作結果比較

4. 1007 暴雨事件

各操作模式於 1007 暴雨事件之操作結果比較如圖 8 所示，而比較變數值則如表 8 所示。結果顯示 ANFIS-OPT 操作模式可有效降低前池最高水位；歷史操作與 ANFIS-OPT 操作模式之前池水位歷線變化趨勢相近，但是歷史操作較未能應用較佳之抽水量以降低前池最高水位；ANFIS-HR 操作模式與歷史操作未能足夠意識到

事件中第二場小暴雨所造成前池水位之抬升，事件後期抽水量不足造成前池最終水位過高；歷史操作機制為當前池水位高於-0.4 m 時皆會抽水以防止低窪地區淹水，然而此事件於歷史操作中許多前池水位高於-0.4 m 之情況下並無抽水，歷史操作明顯有所失誤，其中於時間序列編號：76 時刻時，前池水位已漲至-0.34 m，ANFIS-HR 操作模式依循歷史操作機制啟動抽水，以致前池水位

表 8 各操作模式於 1007 暴雨事件之比較變數值

	歷史操作	ANFIS-HR	ANFIS-OPT
最高水位(m)	-0.15	-0.23	-0.29
最終水位與標的水位相差之絕對值(m)	0.27	0.13	0.04
總開關次數	8	10	10

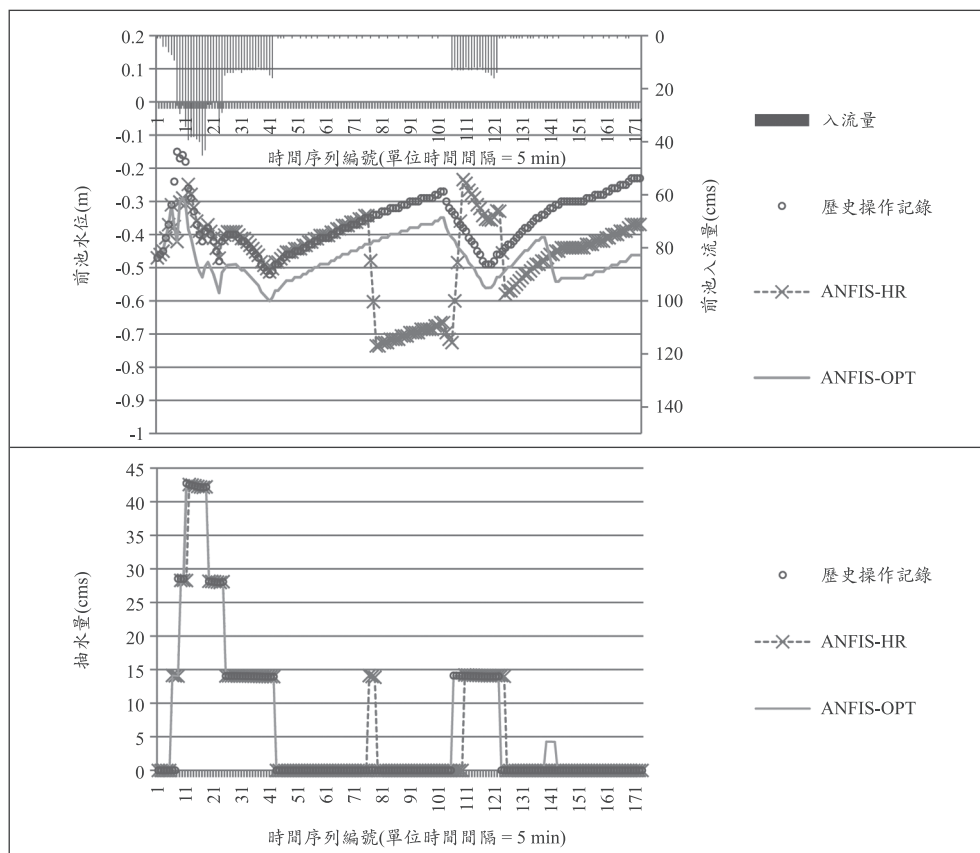


圖 8 各操作模式於 1007 暴雨事件之操作結果比較

突降。由整場事件之前池最高與最終水位來看，ANFIS-OPT 操作模式皆較 ANFIS-HR 操作模式與歷史操作為佳。

四、結論與建議

本研究應用人工智慧技術研發 ANFIS-HR 與 ANFIS-OPT 兩種抽水站抽水機組即時操作決策模式，各操作模式之決策機制與所需之決策資訊不同；ANFIS-HR 操作模式以歷史操作做為操

作標的，由於抽水站現場操作人員之決策資訊僅有本時刻以前之水文與雨量資訊，而經過無母數相關性分析後 ANFIS-HR 操作模式所採用之輸入項與操作人員之決策資訊相同，因此 ANFIS-HR 操作模式之推估精確度佳，然而建構模式之歷史操作序列難免存在有較為不當之情形，而且應用於實際案例操作時，難免會有某一時刻推估誤差較大，此情形會讓後續操作結果與歷史操作差距較大、操作穩定性較差，因此 ANFIS-HR 操作模

式較不適合應用於實務操作；建構 ANFIS-OPT 操作模式所需之操作標的為利用禁忌演算法來優選，優選目標為最小化整場事件之最高前池水位、期望前池最終水位能達到標的水位並且最小化抽水機組啓閉次數，而且輸入項有採用可模擬未來前池水位與入流量之即時監測降雨量，因此實際操作模擬時，其前池最高與最終水位相較於 ANFIS-HR 操作模式與歷史操作為佳，由此可知 ANFIS-OPT 操作模式適合提供予實務採用。

本研究建議未來能進行事件結束前之入流量預報並結合逐時段即時優選法來執行操作決策，則都市防洪抽水站與排水系統將可針對各種延時與入流量之洪水事件，充分發揮其調適、緩衝與滯洪之功能以提升操作成效與實用性。

參考文獻

1. 簡錕彪，「台北市防洪抽水站現況評比與聯合運轉可行性之探討」，國立海洋大學河海工程學系碩士論文(2003)。
2. 李翁碩，「抽水站水位預測及系統操作之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程研究所碩士論文(2007)。
3. 陳莉、蔡宗志、江柏寬，「以模糊理論結合遺傳演算法應用於水庫防洪操作之最佳化研究」，農業工程學報，第四十八卷，第一期，第 82-94 頁(2002)。
4. 張雅婷，「調適性網路模糊推論系統於水庫操作之研究」，博士論文，臺灣大學生物環境系統工程學研究所，台北(2006)。
5. 許弘政，「模糊控制模式於颱風時期水庫即時操作之研究」，碩士論文，淡江大學水資源及環境工程學研究所，台北(2007)。
6. 許弘政、張麗秋，「模糊控制模式於颱風期水庫即時操作之研究」，台灣水利，第五十七卷，第四期，第 87-101 頁(2009)。
7. Hsu, M. H., Chen, S. H., and Chang, T. J., "Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system," *Journal of Hydrology*, Vol. 234, pp. 21-37 (2000).
8. Chang, F. J., Chang, K. Y., and Chang, L. C., "Counterpropagation fuzzy-neural network for city flood control system," *Journal of Hydrology*, Vol. 358, pp. 24-34 (2008).
9. Chiang, Y. M., Chang, L. C., Tsai, M. J., Wang, Y.-F., and Chang, F. J., "Auto-control of pumping operations in sewerage systems by rule-based fuzzy neural networks," *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 15, pp. 185-196 (2011).
10. Yu, Y. B., Wang, B. D., Wang, G. L., and Li, W., "Multi-person multi-objective fuzzy decision-making model for reservoir flood control operation," *Water Resources Management*, Vol. 18, pp. 111-124 (2004).
11. Spearman, C., "The proof and measurement of association between two things," *Amer. J. Psychol.*, Vol. 15, pp. 72-101 (1904).
12. Glover, F., "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence," *Computers and Operations Research*, Vol. 13, No. 5, pp. 533-549 (1986).
13. Glover, F. and Laguna, M., "*Tabu search kluwer academic*," Boston, Texas (1997).
14. Jang, J. S. R., "ANFIS: Adaptive Network-based Fuzzy Inference System," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, Issue 3, pp. 665-685 (1993).
15. Takagi, T., and Sugeno, M., "Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions," in Proc. IFAC Symp. Fuzzy Inform., *Knowledge Representation and Decision Analysis*, pp. 55-60 (1983).
16. Jang, J. S. R., Sun, C. T., and Mizutani, E., "*Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*," Matlab Curriculum Series, Prentice-Hall International Inc.: Upper Saddle River, N.J. (1997).

收稿日期：民國 101 年 1 月 12 日

修正日期：民國 101 年 2 月 24 日

接受日期：民國 101 年 2 月 29 日