

國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文



研究生：陳柏成

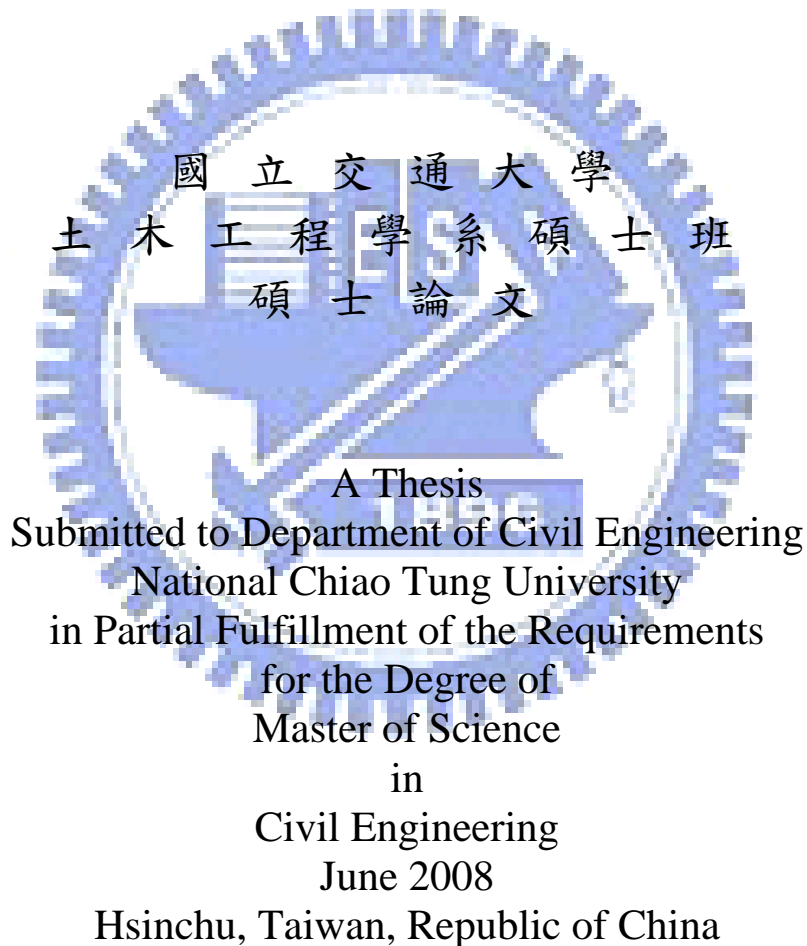
指導教授：張良正教授

中華民國九十七年六月

模糊控制於地表地下聯合營運之應用

**Applying Fuzzy Control on the
Conjunctive Use of Surface and Sub-surface Water**

研 究 生：陳柏成 Student : Bo C. Chen
指 導 教 授：張良正 博士 Advisor : Dr. Liang C. Chang



中華民國九十七年六月

模糊控制於地表地下聯合營運之應用

學生：陳柏成

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程研究所

摘要

地表地下聯合營運可有效的整合水資源，使水資源得到更大的使用效益，然地表水與地下水性質不同，地表水反應快速，地下水反應遲緩，且地下水系統常為非線性，使聯合營運在應用水資源時不易有效的調配。有鑑於此，本研究嘗試以模糊推論系統結合地表地下聯合營運模式，聯合調配地表水與地下水營運系統的供水量。

本研究的地表地下聯合營運模式整體架構共分為上、下層兩部分，上層部分應用模糊推論系統，將需求水量分配給地表水與地下水兩系統，決定各自系統的供應水量；下層部分則以地表水調配模式與地下水模式構成，地表水模式以線性規劃分配各水庫的放水量，地下水模式則採用類神經網路模擬抽取地下水後之地下水位變化。

本研究進一步探討本研究所發展的地表地下聯合營運供水效能，並將本模式與較簡單的「地表水先供，地下水後供之營運方式」作比較。研究結果顯示本模式相較於「地表水先供，地下水後供之營運方式」，年缺水指數(SI)可減少 26.23%。除了降低缺水指數(SI)，本模式可根據地表水系統與地下水系統的狀態，提供多樣的水量調配方式，使水資源得到合適的運用。在計算量方面，其計算時間約為以遺傳演算法(Genetic Algorithm, GA)為基礎的地表地下聯合營運模式 1/760 倍。

Applying Fuzzy Control on the Conjunctive Use of Surface and Subsurface Water

Student : Bo-Cheng Chen Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University
Abstract

The conjunctive use of surface and subsurface water can integrate water resources efficiently, it would gain more efficiency when using water resources. However, the characters of surface water and subsurface water are different, and subsurface system often is nonlinear, it causes more difficult while conjunctive use of water was implemented. Therefore, this study had attempted to integrate a surface water allocation model and a groundwater model by using fuzzy inference system and to regulate the water supply for both the surface and subsurface water.

The framework of this study can separate into two parts. The first part applied fuzzy inference system to allocate the demand of surface and subsurface water system. The second one is composed of a surface water allocation model and a groundwater model. The surface water allocation model is a linear programming model, and the subsurface model simulates the hydraulic heads after pumping by using artificial neural network (ANN).

Moreover, this study discussed the efficiency of the conjunctive use of surface and subsurface water above. Also, it compared this model with the simpler one which is operated with 「 surface supply first, then subsurface supply 」 . Compare with the 「 surface supply first, then subsurface supply 」 operation strategy, the result shown that this model can decrease the shortage index (SI) 26.23%. This study also affords the

more flexible and effective strategy for the conjunctive use of surface and subsurface water. On the other hand, the computing time of this system is 1/760 times of the traditional optimization method.



謝 誌

記得剛來到交大時，還是個傻傻的大男孩，很多事情都不懂，再加上我是科大生，當時我的心中真的有些惶恐，找指導教授時，還真怕吃了一個閉門羹，幸而吾師張良正教授有教無類，願意重頭訓練笨拙的我，令我在研究所求學這段期間，不論是人格、做事態度的嚴謹以及學問研究上都成長數倍，對此，我真的十分感謝。

這本論文能夠完成，都得感謝我週遭的所有人，首先感謝吾師張良正教授對於本論文之指導，此外，我還記得有一次與老師一起出門，因為天氣冷，老師為我批上一件外套，倍感溫暖。另外承蒙口試委員台灣大學徐年盛教授、童慶斌教授、逢甲大學陳昶憲教授及中州技術學院蕭金財教授於百忙中撥冗細心指正審閱拙文，並於口試時給予寶貴之意見，使本文更加完備，在此謹致衷心謝意。

而在研究室方面必須先感謝朱宏杰學長，雖然我常常跟不上學長的腳步，但他還是不厭其煩的指導我以及帶領我突破不同的難關，其外尚有陳鴻輝學長實務經驗傳授、楊朝仲學長的邏輯思考、葉明生學長在學術與人生觀念上的探討、陳宇文學長在程式上強大的火力後援、何智超學長的地表水專長與計畫上的相助、蔡瑞彬學長對於研究所學習過程的傾囊相授，都令我獲益良多。接著我要感謝最親近的碩士班的夥伴們，明穎、維珉、昀柏、浚瑋、全佑、嘉晉、君儀、任馥、正偉、婉茹、怡釗、智為、汶豪等學長姐們經驗的傳承、學術與計畫上的指導，還有嘉慈、程翔、敏威、毓瑄、韋圻、怡伶、瀚聖、思瑋、冠宇以及剛認識不久又同是高雄人的學妹亭勻，在我研究所不同學習階段的相伴，以及同窗好友為善與昱維並肩作戰和相互勉勵，因為有了這群好夥伴的相伴，令我在這段旅途不曾感到絲毫孤單，謝謝你們。

最後要感謝我的家人以及各位親朋好友，有了你們支持以及包

容，我才得以完成這個學位。我要特別感謝我的母親，每當我沮喪時，只要想起母親在寒冬時因洗車而凍傷的雙手、在炎炎夏日不顧烈日的曝曬下不停的工作、在家境最困頓的時候仍然給予我家中最大的經濟援助，我泛紅的眼框總是可以再度賜給我無窮的力量。在此，我要將本篇拙作獻給我最偉大的母親，願未來能給予我母親快樂與健康。

在這一連串的學習過程中，我相信已經將我的意志淬鍊的更堅強、更堅定、更不可動搖，對於未來的任何挑戰更能勇於承受以及果敢面對，若在十數載後我能夠有些許的成就，我都得感謝我的恩師張良正教授與 GWATER 研究室所有成員，再次感謝各位長輩，好兄弟與好姐妹，讓我從你們身上得到這些珍貴的寶藏，由衷感謝。

現在是凌晨三點零三十六分夜，夜已深了，所以這一段話我想令它是最隨性的，因為寫完這篇論文感覺太拘束了，而且字也寫的這麼多了.....你不累我都累啦!開開小玩笑，各位大大別見怪阿。想想前文對上這一段真是不合適，不過這才是我阿!人生不就是要這樣才有趣嗎?一定有很多人跟我有著相同的感受，韋圻，你說是吧!我想此時各位應該會想起我平時帶給各位點點滴滴的歡笑與樂趣，我會想念你們，也期望我不會在你們心中消失!差不多了，最後奉上我當時送給明穎學長的踐別禮，經由改編後變成五言律詩，以此代表我這段求學歷程，小弟不才，用字、用詞及造詣不是很高明，還請各位多多包含，別笑我阿。

吾初入門來，一身本無才，朝夕兩三秋，渾身具是膽，

吾終出門外，別時相送歡，來時各自踞，豪情依見在。

希望沒傷到各位的眼睛，真的要說再見了，希望我們未來就像這首詩一樣，不論到了哪裡，我們的這份情感永遠存在，珍重、再見。

也許以後我們在不同的角落，卻一定會吹著同樣夏天的風-元衛覺醒

章 節 目 錄

| | |
|-------------------------|------|
| 中文摘要..... | I |
| 英文摘要..... | II |
| 謝誌..... | IV |
| 章節目錄..... | VI |
| 表目錄..... | VIII |
| 圖目錄..... | IX |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 1.1 前言..... | 1 |
| 1.2 文獻回顧..... | 2 |
| 1.2.1 地表地下聯合營運管理模式..... | 2 |
| 1.2.2 類神經網路之應用..... | 3 |
| 1.2.3 模糊理論..... | 4 |
| 1.3 模式建立步驟..... | 5 |
| 第二章 相關理論..... | 7 |
| 2.1 類神經網路..... | 7 |
| 2.1.1 生物神經元模型..... | 7 |
| 2.1.2 人工神經元模型..... | 8 |
| 2.1.3 類神經網路基本理論..... | 9 |
| 2.1.4 倒傳遞類神經網路..... | 10 |
| 2.2 模糊理論..... | 15 |
| 2.2.1 基本理論..... | 15 |
| 2.2.2 模糊關係..... | 20 |
| 2.2.3 模糊邏輯..... | 22 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 2.2.4 模糊推論系統..... | 22 |
| 第三章 地表地下聯合營運模式發展 | 35 |
| 3.1 模式整體架構與演算流程 | 35 |
| 3.2 地表地下需求水量分配 | 36 |
| 3.2.1 模糊推論系統分配需求水量..... | 36 |
| 3.2.2 模糊推論系統之建立..... | 38 |
| 3.3 地表水調配 | 40 |
| 3.3.1 指標平衡 | 40 |
| 3.3.2 地表水線性規劃模式建立 | 42 |
| 3.4 地下水模擬 | 47 |
| 3.4.1 地下水系統相關方程式 | 47 |
| 3.4.2 地下水類神經網路模式建立 | 48 |
| 第四章 聯合營運案例展示 | 60 |
| 4.1 模擬案例介紹 | 60 |
| 4.1.1 案例分類 | 60 |
| 4.1.2 案例說明 | 61 |
| 4.2 模擬案例成果展示 | 63 |
| 4.3 模擬案例成果分析 | 66 |
| 第五章 結論與建議 | 93 |
| 5.1 結論..... | 93 |
| 5.2 建議..... | 94 |
| 參考文獻..... | 95 |
| 附錄 A MODFLOW 簡介..... | 99 |
| 附錄 B 地下水連續預測模式驗證..... | 104 |

表 目 錄

| | |
|------------------------------------|----|
| 表 3.1 模糊規則基本架構 | 51 |
| 表 3.2 水文地質參數表 | 51 |
| 表 4.1 案例介紹表 | 69 |
| 表 4.2 案例III模糊規則 | 69 |
| 表 4.3 案例IV模糊規則 | 70 |
| 表 4.4 案例VI模糊規則 | 70 |
| 表 4.5 案例VIII模糊規則 | 70 |
| 表 4.6 案例 I 之模擬結果 | 71 |
| 表 4.7 案例 II 之模擬結果 | 71 |
| 表 4.8 案例 III 之模擬結果 | 72 |
| 表 4.9 案例 IV 之模擬結果 | 72 |
| 表 4.10 案例 V 之模擬結果 | 73 |
| 表 4.11 案例 VI 之模擬結果 | 73 |
| 表 4.12 案例 VII 之模擬結果 | 74 |
| 表 4.13 案例 VIII 之模擬結果 | 74 |
| 表 4.14 案例 I 與案例 II 結果比較表 | 75 |
| 表 4.15 案例 II 與案例 III 結果比較表 | 76 |
| 表 4.16 案例 VII 與案例 VIII 結果比較表 | 77 |

圖目錄

| | |
|-----------------------------------|----|
| 圖 2.1 生物神經元模型圖 | 29 |
| 圖 2.2 人工神經元模型圖 | 29 |
| 圖 2.3 位階臨界轉換函數圖 | 30 |
| 圖 2.4 線性轉換函數圖 | 30 |
| 圖 2.5 非線性轉換函數圖 | 30 |
| 圖 2.6(a) 雙彎曲轉換函數圖研究流程圖 | 31 |
| 圖 2.6(b) 雙曲線正切轉換函數圖 | 31 |
| 圖 2.7 倒傳遞網路模型示意圖 | 31 |
| 圖 2.8 特徵函數圖 | 32 |
| 圖 2.9 三角形隸屬函數圖 | 32 |
| 圖 2.10 梯形隸屬函數圖 | 32 |
| 圖 2.11 鐘形隸屬函數圖 | 33 |
| 圖 2.12 S 形隸屬函數圖 | 33 |
| 圖 2.13 Z 形隸屬函數圖 | 33 |
| 圖 2.14 模糊推論系統基本架構圖 | 34 |
| 圖 3.1 地表地下聯合營運模式架構圖 | 52 |
| 圖 3.2 模式演算流程圖 | 52 |
| 圖 3.3 輸入變數-地表水可利用水量隸屬函數圖 | 53 |
| 圖 3.4 輸入變數-地下水位隸屬度函數圖 | 53 |
| 圖 3.5 輸出變數-地下水系統需求分配量隸屬度函數圖 | 54 |
| 圖 3.6 類神經訓練流程圖 | 55 |
| 圖 3.7 地下水系統建置圖 | 56 |
| 圖 3.8 初始水位剖面圖 | 56 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 圖 3.9 訓練案例 1 號井水位圖 | 57 |
| 圖 3.10 訓練案例 2 號井水位圖 | 57 |
| 圖 3.11 訓練案例 3 號井水位圖 | 58 |
| 圖 3.12 訓練案例 4 號井水位圖 | 58 |
| 圖 3.13 訓練案例 5 號井水位圖 | 59 |
| 圖 3.14 類神經網路架構圖 | 59 |
| 圖 4.1 地表水營運系統圖 | 78 |
| 圖 4.2 地表地下聯合營運系統圖(1)(地表水先供)..... | 78 |
| 圖 4.3 地表地下聯合營運系統圖(2)(模糊控制)..... | 79 |
| 圖 4.4 水庫入流量歷線圖 | 79 |
| 圖 4.5 水庫 A 操作規線圖..... | 80 |
| 圖 4.6 水庫 B 操作規線圖..... | 80 |
| 圖 4.7 案例 I 需求缺水量 | 81 |
| 圖 4.8 案例 II 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 81 |
| 圖 4.9 案例 III 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 82 |
| 圖 4.10 案例 IV 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 82 |
| 圖 4.11 案例 V 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 83 |
| 圖 4.12 案例 VI 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 83 |
| 圖 4.13 案例 VII 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 84 |
| 圖 4.14 案例 VIII 需求缺水量與地下水抽水情形圖 | 84 |
| 圖 4.15 案例 I 與案例 II 缺水情形比較圖 | 85 |
| 圖 4.16 案例 II 平均地下水位 | 85 |
| 圖 4.17 案例 III 平均地下水位 | 86 |
| 圖 4.18 案例 II 與案例 IV 平均地下水位比較圖 | 86 |
| 圖 4.19 案例 V 平均地下水位 | 87 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 圖 4.20 案例VI平均地下水位 | 87 |
| 圖 4.21 案例VII平均地下水位 | 88 |
| 圖 4.22 案例VIII平均地下水位 | 88 |
| 圖 4.23 案例 I 地表水系統供水情形圖 | 89 |
| 圖 4.24 案例 II 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 89 |
| 圖 4.25 案例 III 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 90 |
| 圖 4.26 案例 IV 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 90 |
| 圖 4.27 案例 V 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 91 |
| 圖 4.28 案例 VI 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 91 |
| 圖 4.29 案例 VII 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 92 |
| 圖 4.30 案例 VIII 地表水系統與地下水系統供水情形圖 | 92 |



第一章 緒論

1.1 前言

台灣地區目前水資源的運用上仍以地表水資源為主，但近幾年由於環境保護意識的高漲，使得地表新水源的開發變得不易，因此在符合永續利用原則下之新水源的開發乃是一個迫切的課題，而其中地表與地下水聯合營運乃是可能的方案之一。對於一個含有豐富地下水資源的地區，若能整合地表水與地下水資源並進行聯合營運，則往往能增加整體水源運用上的效益。雖然台灣地區整體而言地下水乃是超抽狀態，惟此並不表示沒有地表地下聯合營運實施的空間，蓋地表地下聯合營運的精神，乃在整合地表地下水源以及地下含水層與地表設施之儲水空間，針對地表地下水文時間變化上的差異，進行合理的水源運用調配，其本意並不在使用更多的地下水量，若營運得當，甚至可減少地下水超抽的情況。然而相對的，地表地下聯合營運不論是系統本身或操作方式，都具有較高的複雜性，而不像傳統的地表水源調配般，有較成熟而一般化的操作原則，因此如何更有效率的進行地表地下聯合營運，以達到最大供水效益，仍是一個重要的課題。由以往多水庫系統聯合營運的研究可知，「指標平衡」原則可動態平衡水庫與水庫間的水文豐枯差異，而提高整體供水效益，因此本研究嘗試推廣「指標平衡」的精神，應用至地表與地下水兩大系統間之供水量分配。

為回應以上問題，本研究目的在建立一具處理複雜性系統，與兼顧計算量之地表地下聯合營運系統。模糊推理系統(Fuzzy Inference System, FIS)可處理具高度複雜性系統的能力，故利用模糊推理系統決定地表水以及地下水系統之操作方式，可簡化調配兩系統之複雜度。在此利用模

糊推理系統作水量的調配，將需求水量作比例分配，決定地表水以及地下水系統應供應之水量，其中引用指標平衡的概念於模糊推論系統中，作為兩系統水量調配原則，以提高用水效益。在計算量方面，故相較於優選法可大幅降低計算時間。由上述可知，本模式為一兼具高效率計算速度與具處理複雜性系統能力之地表地下聯合營運模式。

1.2 文獻回顧

本研究將地表水庫與地下水源結合，建立一地表地下聯合營運模式，其中模式的架構包括類神經網路與模糊理論，以下將針對這三面的相關研究作文獻回顧。

1.2.1 地表地下聯合營運管理模式之相關研究

在國外學者方面，Randall (1997)利用一具有多標的目標函數之線性規劃系統來建立地表地下聯合營運的模式，標的之權重大小反應彼此間之重要程度，而地下水系統的相關操作則以在目標函數中設計抽水量最小之標的及於限制式中加入最大補注量之限制來設計。整個問題除了所有相關的方程式均以線性定義，使其地下水系統的處理方式將無法呈現地下水位受到地下水抽水量與補注量的隨時變之水位變化。Hakan and Migue (1999)與國內的陳(1997)則均以線性規劃來處理地表地下聯合營運的問題，藉由地下水數值模擬模式來分別建立反應河川與含水層間交換量、抽水量與地下水位的響應矩陣，並以此連結地表與地下系統。雖然地表與地下的系統均已涵概，但整個問題所有相關的方程式均為線性的定義，當遭遇非線性系統(如非拘限含水層)時將無法確切地反應其特性;在國內學者方面，楊(2002)使用遺傳演算法與可微分動態規劃法於多

目標地表地下聯合營運規劃上，其在地下水系統的處理方面，藉由嵌入改良後之地下水水流模擬模式 ISOQUAD 來計算抽水量及補注量與地下水位之變動關係，這樣的處理雖然能確切反應非線性之非拘限含水層之水位變化，然而當地下水系統的變數過多時，與遺傳演算法結合時，求解上則會有變數過多而計算量大增難以求解之困難。

1.2.2 類神經網路之應用

類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 為一資訊處理系統，其使用了大量簡單的相連人工神經元來模仿生物神經網路的能力。人工神經元是生物神經元的簡單模擬，藉由外界環境或者其它人工神經元的輸入取得資訊，並加以簡單的運算，最後將其結果輸出到外界環境或者其它人工神經元。其應用範圍有：水資源工程之流量預測(楊等,1995)、股票市場預測(Kimoto and Asakawa,1990)、電子電路診斷(Kagle 等,1990)等。但在類神經廣泛的運用範圍裡，網路中之輸入神經元及輸出神經元大都為不同變數，鮮少有將該時刻之輸出值作為下個時刻輸入值之連續預測網路模擬法。

在連續預測網路模擬法之文獻方面，Coppola (2003)曾採用坦帕灣當地地下水含水層實際水文資料來訓練類神經網路，並以訓練好之類神經網路來進行水位連續預測，發現可以運用於短期之地下水位預測，但就長期規劃而言地下水位的預測仍需要其他數值模式加以協助。Nayak (2006)採用孟加拉灣當地地下水含水層實際水文資料來訓練類神經網路，並以訓練好之類神經網路來進行水位連續預測，其類神經網路除了考慮各參數(地下水位、降雨量、渠道放水量)前幾個時刻的資料，也考慮邊界地下水位資料作為網路輸入層參數。

另外謝(1999) 地震所產生的結構反應資料作為網路之訓練案例，學習單自由度結構物受地震力後所產生的非線性遲滯動力行為之模擬模式上也有良好的成果。黃(2006)發展逐時刻之地表地下聯合營運模式，其中利用類神經網路作為地下水模式，使模式可在非線性系統下反應地下水位，並減少過去在模擬地下水時所帶來的計算量。

1.2.3 模糊理論

在1965與1973年，由Zadeh教授分別提出模糊集合和模糊邏輯理論後，模糊理論就一直受到重視，且廣範運用到各領域，例如：控制系統、圖形辨識、故障診斷、智慧型機器人(Wu, 1966)、語音辨識、軟體工程、決策系統(Chaneau等人, 1987)等，並獲得相當不錯的成果。1974年由英國倫敦大學的E. H. Mamdani教授將模糊控制理論運用在蒸汽機上，為第一位成功的運用模糊控制於實務上的人士；大陸於 1980's 年代中期，即致力於模糊理論拓展方面，其中陳守煜教授建立了模糊水文學這一門新科學；日本將模糊理論結合自動控制應用於許多家電產品上，如Fuzzy洗衣機、Fuzzy冷氣機等，在1987年日本仙台市地下鐵利用Fuzzy控制成功完成自動駕駛；台灣目前的研究，則是以電機、機械、資訊、控制等領域為主。

模糊理論應用於水資源研究也相當多，其中關於水庫操作相關的研究有Russell and Campbell(1996)以模糊規劃試圖找出水庫的操作規則，結果顯示，模糊操作系統可提供具彈性與靈活的操作方式，而整體操作概念也易於了解；劉、李(1996)引用模糊控制的手法運用於水庫操作上，並與操作規線模式作比較，其結果在供水量、溢流量及缺水量均有改善，在供需滿足度方面也較佳；Chang and Chang(2001)應用模糊模式建

立水庫即時操作系統，根據水庫的水位與需求，決定水庫最佳放水量，並與石門水庫M5操作規線做比較；Dubrovin、Jolma and Turuen(2002)建立一水庫即時操作模式，模糊控制模式分別根據水庫的水位與入流量決定水庫的放水量，藉由控制水庫放水量比較洪災與水利發電之損益；羅(2002)以寶山水庫及攔河堰為例，經由模糊控制過程決定之水庫放水量，探討區域性水資源最佳營運；張(2006)以石門水庫為研究對象，以模糊理論、遺傳演算法、類神經網路等，建立兩種不同期距之平時與颱風時期之水庫即時操作系統。結果顯示，水庫平時操作系統較於傳統規線操作，可有效改善缺水情形集中之嚴重乾旱現象；在水庫入流量預測，顯示調適性網路模糊推論系統(Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)可精確的預測水庫入流量，進而在安全與減災的前提下，建立一水庫颱風操作模式，在洪水期間可進行有效的水庫颱風操作。

由上述的研究可知，模糊理論已廣泛運用於水庫操作方面，其系統均為地表水庫或是結合其他結構物進行系統整體營運，並無將地下水庫納入考量，而對於含有豐富地下水資源的地區，可適當的運用地下水並與地表水進行水量調配，因此本研究考慮加入一地下系統，並以模糊控制的方式操作地表水與地下水進行聯合營運。

1.3 模式建立步驟

本研究發展之聯合營運模式建立步驟如下：

(一) 建立模糊推論系統之基本架構：

模糊推論系統的基本架構包括輸入及輸出的變數、資料庫、推論引擎、解模糊化方式與模糊規則，為使模糊推論系統作出適當的決策，必

須先訂定合適的架構，其中模糊規則必須不斷的經由試誤的方式找出適當的操作規則。

(二) 建立模糊推論之模糊規則：

本研究模糊規則的建立分為兩個步驟，第一個步驟為建立合適操作概念的初步模糊規則，其中初步的模糊規則是參考「指標平衡」的水庫概念。第二個步驟則是以第一個步驟的模糊規則為基礎，進行微調，以獲得更好的操作表現。

(三) 建立地表地下聯合營運模式：

以完成的模糊推論系統，決定地表水與地下水兩系統間水量之調配，其整體地表地下聯合營運模式分為上下層，上層為模糊推論系統，下層為地表水調配子系統與地下水模擬子系統，地表水調配子系統以線性規劃調配地表水量，地下水模擬子系統則採用類神經網路模擬抽水後之地下水位。整體水量分配乃是上層先根據模糊規則將總需求水量分配給下層兩系統，下層系統再各自根據上層所分配的需求分配量進行模擬調配。

第二章 相關理論

本研究主要應用到的相關理論有類神經網路以及模糊理論，另外本章節再針對模糊推論系統做進一步介紹，以下分別介紹之。

2.1 類神經網路

類神經網路是一個可計算之多層網路，它使用大量簡單而具有平行處理能力之人工神經元來模擬人類學習行為，因此本章節將針對生物及人工神經元的構造、類神經網路的組成架構和基本理論，以及類神經網路中之倒傳遞網路(Back-propagation Network, BPN)詳加介紹。

2.1.1 生物神經元模型

生物神經網路是由巨量的神經細胞(neuron，又稱神經元)所組成，形成一個高度連結網狀的神經網路，資訊的處理工作即透過上述之連結來進行。以人腦而言，人腦大約由 10^{11} 個神經元所組成，而每一個神經元約有 10^3 根連結與其他神經元相連，所以人腦中約有 10^{14} 根連結，因此人腦可以儲存大量而複雜的知識。神經元構造如圖 2.1 所示，其主要構造如下：

- 1.神經核(soma):神經細胞的核心，為一呈核狀的處理機構。
- 2.神經軸(axon):神經細胞呈軸索狀的輸送機構。
- 3.神經樹(dendrites):神經細胞呈樹枝狀的輸出入機構。
- 4.神經節(synapse):神經細胞神經樹上呈點狀的連結機構。

當神經細胞透過神經節與神經樹從其它神經元輸入脈波訊號後，經神經核處理，產生一個新的脈波訊號，這個訊號再經過神經軸傳送到神經樹，再透過神經節與神經樹成為其它神經元的輸入脈波訊號，如果脈

波訊號是經過興奮神經節(excitatory synapse)，則會增加脈波訊號的速率(pulse rate)，如果脈波訊號是經過抑制神經節(inhibitory synapse)，則會減少脈波訊號的速率。因此，脈波訊號的速率是同時取決於輸入脈波訊號的速率，以及神經節的強度。而神經節的強度可視為神經網路儲存資訊之所在，神經網路的學習即在調整神經節的強度(葉怡成，1994)。

2.1.2 人工神經元模型

根據神經細胞的結構與功能，從 40 年代開始，先後提出的神經元模型有數百種之多，其中對於腦模型、自動機、人工智慧有重大影響的是 1943 年由美國心理學家 McCulloch 和數學家 Pitts 共同提出的形式神經元模型，同常稱之為 MP 模型(謝明富，1999)。此一模型(見圖 2.2 所示)具有將輸入變數與輸出變數間，複雜的內在對映關係充份呈現的功能，其為解決非線性動態問題的最佳工具之一。此模型由許多人工神經元所組成，神經元又稱為節點(node)或臨界值元件(threshold element)，其輸入端輸入各自之訊息，藉由各自權重加權總和後傳入節點，透過閾值的過濾，繼而經由轉換函數轉換後輸出，其數學表示式如下：

$$Y_j = f(\text{net}_j) , \text{net}_j = \sum_i W_{ij} X_i - b_j \dots\dots\dots(2.1)$$

其中：

Y_j : 為模仿生物神經元模型的輸出訊號。

f : 為模仿生物神經元模型的轉換函數(transfer function)，將輸入值之加權乘積和轉換成處理單元輸出值。

W_{ij} : 為模仿生物神經元模型的神經節強度，又稱連結加權值。

X_i : 為模仿生物神經元模型的輸入訊號。

b_j : 為模仿生物神經元模型的閾值(bias)。

net_j : 為輸入值之加權乘積和。

n : 為輸入訊號個數

類神經網路常用之轉換函數有下列四種 (見圖 2.3 至 2.6(b)):

1. 位階臨界轉換函數(Step Threshold Transfer Function): 臨界函數的輸出只隨輸入值的正副號所改變。
2. 線性轉換函數(Linear Transfer Function): 函數輸入值與輸出值呈線性關係。
3. 非線性轉換函數(Nonlinear Transfer Function): 函數輸出的最大值與最小值限制在一個特定的範圍內。
4. 臨界 S 型轉換函數(Sigmoid Threshold Transfer Function): 是最常被應用之函數, 因為此種函數型態具有可微分且連續等性質, 此特質使網路可以應用到非線性的學習領域中。常用函數有雙彎曲函數(式 2.2)與雙曲線正切函數(式 2.3)兩種。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.1.3 類神經網路基本理論

類神經網路的架構乃仿照人類腦部神經網路的模型而發展出來的, 一個類神經網路是由許多個人工神經元連結組成, 並可以組成各種網路模式(葉怡成, 1994)。

類神經網路的總體運作模式有兩種：

(1)學習過程(Learning)－網路依學習演算法，從範例中學習，以調整網路權重值的過程。

(2)回想過程(Recalling)－網路依學習演算法，以輸入資料決定網路輸出資料的過程。

此外，學習過程的學習演算法又可分為三類：

(a)監督式學習

從問題領域中取得訓練範例(有輸入變數值，也有輸出變數)，並從中學習輸入變數與輸出變數的內在對映規則，以應用於新的案例(只有輸入變數值，而需推論輸出變數值的應用)。感知機網路、倒傳遞網路、機率神經網路、學習向量量化網路與反傳遞網路等五種類神經網路皆屬監督式學習。

(b)無監督式學習

從問題領域中取得訓練範例(只有輸入變數值)，並從中學習範例的內在集群規則，以應用於新的案例(有輸入變數值，而需推論它與那些訓練範例屬同一集群的應用)。自組織映射圖網路、自適應共振理論網路等兩種類神經網路皆屬無監督式學習。

(c)聯想式學習

從問題領域中取得訓練範例(狀態變數值)，並從中學習範例的內在記憶規則，以應用於新的案例(只有不完整的狀態變數值，而需推論其完整的狀態變數值的應用)。霍普菲爾網路、雙向聯想記憶網路等兩種類神經網路皆屬聯想式學習。

2.1.4 倒傳遞神經網路 (BPN)

在監督式學習模式中，由 Rumelhart 等學者於 1986 年所發展的誤差向後推導或稱倒傳遞學習演算法（簡稱 BP）是被廣泛使用的一種學習演算法，因為其具有學習及回想的功能，故可進行定率預測。一般倒傳遞網路可分為三部份(如圖 2.7 所示)，輸入層用以接受外在環境的訊息，其神經元數目則依問題而定；輸出層用以輸出訊息給外在環境，其神經元數目同樣依問題而定；隱藏層將輸入與輸出層各處理單元間的相互關係充份地表現出來，其神經元數目並無標準可決定。倒傳遞網路模式學習訓練方式由所探討問題中取得相當數量之訓練樣本，並從樣本中應用向前餽入與誤差向後推導兩步驟推求輸入變數與輸出變數的內在對映規則，再應用回想功能，進行新案例之輸出變數值推估。下列為倒傳遞類神經網路 (BP) 之學習與回想過程建立步驟，並對本研究訓練倒傳遞類神經網路所採用之演算法作說明：

倒傳遞網路學習過程的建立

(1)令輸入層、隱藏層與輸出層節點分別以 i 、 j 、 k 為下標符號，建立一輸入層、隱藏層與輸出層節點數分別為 m 、 n 、 o 個，以均勻分佈隨機亂數設定加權值矩陣 W_{ij} 、 W_{jk} 與閾值 b_j 、 b_k 的初始值。

(2)輸入一個訓練案例之輸入向量與目標輸出向量。

$$\text{輸入向量: } \vec{X} = [x_i], \quad i = 1, 2, 3 \dots m$$

$$\text{目標輸出向量: } \vec{T} = [T_k], \quad k = 1, 2, 3 \dots o$$

(3)計算推估輸出向量 \vec{O} 。

(a)輸入層向量

$$\vec{X} = [x_i] \quad i = 1, 2, \dots, m$$

(b)計算隱藏層輸出向量 \vec{H}

$$H_j = f_h(net_j), \quad net_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j \quad j=1,2,3,\dots,n \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

其中 $f_h(x)$ 為隱藏層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

(c)計算輸出層輸出向量 \vec{O}

$$O_k = f_o(net_k), \quad net_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k \quad k=1,2,3,\dots,o \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

其中 $f_o(x)$ 為輸出層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

(4)計算加權值矩陣修正量 Δw ，及閾值修正量 Δb 。

因為監督式學習的目的在降低網路輸出單元目標輸出值與推論輸出值之差距，所以一般以能量函數（又稱誤差函數）表示學習的品質：

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^o (O_k - T_k)^2 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

因此網路的學習過程即為使能量函數最小化的過程，通常以最陡坡降法來使能量函數最小化，即每次所有輸入值和目標都提供給網路後，網路便更新權重值和偏權值，調整的幅度和誤差函數對該加權值的敏感程度成正比，即與誤差函數對加權值的偏微分值大小成正比：

$$\Delta w = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

式中：

Δw :加權值調整的幅度。

η :學習速率(learning rate)，控制每次以最陡坡降法最小化誤差函數的步幅，其範圍為 $0 \leq \eta \leq 1$ ，可視所需狀況自行設定範圍容許內之值。

經由一連串的代入及演算可推得以下各值：

(a)輸出層

$$\Delta w_{jk} = \eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot H_j \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\Delta b_k = -\eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \dots\dots\dots(2.9)$$

其中 $df_o(x)$ 為輸出層轉換函數之一階導函數，舉例說明：若以雙曲

線正切函數 $f_o(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ 為輸出層之轉換函數，其一階導函數則

$$\text{為 } df_o(x) = \frac{4}{(e^x + e^{-x})^2} \text{。}$$

(b)隱藏層

$$\Delta w_{ij} = \eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot w_{jk} \cdot df_h(net_j) \cdot x_i \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\Delta b_j = -\eta(T_k - O_k) \cdot df_o(net_k) \cdot w_{jk} \cdot df_h(net_j) \dots\dots\dots(2.11)$$

其中 $df_h(x)$ 為隱藏層轉換函數之一階導函數。

(5)更新加權值矩陣與閾值

$$w_{new} = w_{old} + \Delta w \dots\dots\dots(2.12)$$

$$b_{new} = b_{old} + \Delta b \dots\dots\dots(2.13)$$

(6)重覆步驟2至步驟6，直至收斂，即誤差不再有明顯變化且符合所要求的精度。

倒傳遞網路回想過程的建立

(1)讀入加權值矩陣與閾值矩陣。

(2)輸入一個欲作檢定或驗證的案例之輸入向量

$$\bar{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m。$$

(3)計算推估輸出向量 \bar{O} 。

(a)輸入層向量

$$\bar{X} = [x_i] \quad i=1,2,\dots,m$$

(b)計算隱藏層輸出向量 \bar{H}

$$H_j = f_h(\text{net}_j), \quad \text{net}_j = \sum_{i=1}^m x_i w_{ij} - b_j \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

其中 $f_h(x)$ 為隱藏層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

(c)計算輸出層輸出向量 \bar{O}

$$O_k = f_o(\text{net}_k), \quad \text{net}_k = \sum_{j=1}^n H_j w_{jk} - b_k \quad k=1,2,3,\dots,o \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

其中 $f_o(x)$ 為輸出層轉換函數，可依問題型態挑選適當轉換函數。

訓練倒傳遞類神經網路之演算法

在訓練最佳化技巧上可分兩大類，第一大類為一階梯度法，其中包含(1)梯度下降(2)最陡步階下降(3)共軛梯度下降;第二大類為二階梯度法，其中包含(1)牛頓法(2)高斯牛頓法(3)擬牛頓法(4)Levenberg-Marquardt (LM)法。二階梯度的訓練法比一階梯度訓練法快 10~100 倍，在函數逼近問題中，Levenberg-Marquardt 法會有最快的收斂，同時具有最低的均方誤差，因此，本研究採用 Levenberg-Marquardt 演算法。

Levenberg-Marquardt 演算法不必計算牛頓法中的 Hessian 矩陣，

當性能函數具有平方和的形式時，Hessian 矩陣 H 可以逼近成下式：

$$H = J^T J \dots\dots\dots(2.16)$$

並用下式計算梯度

$$f = J^T e \dots\dots\dots(2.17)$$

其中 J 為 Jacobian 矩陣，它包含網路誤差對於權重值和偏權值的一階微分，e 是網路誤差向量，定義如下：

$$\|e\|^2 = \sum_i \left[\left(X_i - \hat{X}_i \right)^2 + \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2.18)$$

Jacobian 矩陣若用到傳遞技巧計算會比 Hessian 矩陣複雜，Levenberg-Marquardt 演算法是將 Hessian 矩陣逼近使用，即將牛頓法的步驟改成如(式 3.19)

$$W_{k+1} = W_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \dots\dots\dots(2.19)$$

其中 W_k 代表在第 k 次疊代的參數向量(包含所有權重與偏權值)，I 為單位矩陣， μ 為常數。當 μ 越大，表示(式 3.19)具有較小的步階大小之梯度下降； $\mu=0$ 時，則剛好是使用近似化 Hessian 矩陣的牛頓法。

2.2 模糊理論

2.2.1 基本理論

在 1965 年 Zadeh 教授發表 “Fuzzy Sets” 論文後，至此開啟了模糊理論這方面的研究風氣，模糊理論是由模糊集合(Fuzzy Sets)、模糊關係(Fuzzy relation)、模糊邏輯(Fuzzy logic)、模糊控制(Fuzzy control)等理論之泛稱，相較於傳統的數學理論，主要在於集合描述上與傳統集合有所不同。傳統集合為二元邏輯，只能描述 “屬於” 與 “不屬於”，就傳統

數學理論的特徵函數就是“0”與“1”二值選擇的概念；模糊集合則是採用多元邏輯，以隸屬函數的方式描述集合，使集合具有程度上“多”與“少”的概念，不在只有“0”與“1”的概念，簡單的來說，模糊理論與傳統精確的數學理論最大不同處，就是模糊理論可將模糊的資訊量化，可利用這樣的方式解決傳統集合或理論無法描述的問題。

在日常生活中，我們所接觸到的訊息部分為“模糊資訊”，例如「天起有一點很冷」、「天氣很冷」，人腦對於這些訊息都能做出正確的處理方式，雖然電腦的計算能力遠遠超過人腦，但卻欠缺對於這些“模糊資訊”的處理能力，故利用上述模糊集合的觀念便可描述生活中語意式的“模糊資訊”，即可利用模糊理論將人類的知識與經驗作適當的轉換，儲存於電腦之中，以補足電腦所欠缺的推理、決策、判斷等能力，使電腦具思考以及高計算能力，建立起人腦與電腦間的溝通管道，在以下各節中將對模糊理論作相關介紹。

1. 模糊集合

集合，顧名思義就是具有某種相同或類似性質的群體，在日常生活中我們也常常利用集合來描述生活中的事物，主要是用來歸納一群具有相同特徵事物的工具，一般我們在表達集合時，都是用來敘述一些明確的事物，但當某些集合具有程度大小的關係以及含糊概念時，便無法處理的很好，必須以新的方法來描述集合，為了與過去描述集合的習慣作區別，則將集合分為「傳統集合」與「模糊集合」兩類，以下則將針對這兩種不同表達集合的方式作以下敘述：

(1) 傳統集合(crisp set)

傳統集合的界線必須是非常明確的，舉例來說：集合 A 是介於 4

和 8 之間所有的實數，那麼集合 A 就是一個有明確界線的集合，可用以下的數學式子來表示：

$$A = \{x | 4 \leq x \leq 8, x \in R\}, R : \text{實數}$$

其中 x 表示 A 集合中的元素，若以特徵函數(characteristic function)來說明，如圖 2.8 所示，將討論的全體集合論域(domain)中的每個元素，依其相對於某部份集合之關係區分為「從屬」元素及「非從屬」元素，其特徵函數之定義如下：

$$m(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$$

也就是利用 0 和 1 兩個數字來描述任何一個數字和集合 A 之間的關係，很明顯的，數字和集合 A 只被允許具有兩種關係。

(2) 模糊集合(fuzzy set)

相對於傳統的集合來看，模糊集合是非常不明確的，而且是非常主觀，舉例來說「大約 5」，以傳統描述集合就沒辦法用數學式表示，若引入模糊集合概念，將發現利用模糊集合比使用傳統集合容易描述這種不明確的集合。為了表達「大約 5」其表達方式係以隸屬函數(membership function)來表示元素屬於某個集合的程度大小，並透過 0 到 1 的數字來描述所屬的對象到底屬於這個集合的程度是多少。

2. 隸屬函數

隸屬函數是模糊理論的基本概念，主要是用來描述某一元素屬於某種集合程度大小的函數，而表達隸屬函數的數值稱為隸屬度，其表示的方式以 $\mu(x)$ 作為 x 元素的隸屬度，代表元素 x 屬於某集合程度的強弱，其值介於 0 到 1 之間，若某元素屬於某種集合的程度越大，其隸屬度越

接近 1，反之越接近 0，因此可透過隸屬函數對於模糊集合進行量化，以便分析和處理模糊性的資訊。

隸屬函數的訂定，並無一定的基準或是定理，通常是藉由專家知識或是個人經驗制定而成，就一定程度上很難具有客觀性，故很多學者在隸屬函數的建立下很多工夫，希望能找到系統化的方法，以便建立客觀的隸屬函數，常見的作法是：先建立粗略的歸屬函數，然後藉由學習與不斷的實行經驗，逐步進行修正和調整，使隸屬函數更趨於完整與客觀。而常見的隸屬函數有三角形隸屬函數、梯形隸屬函數、鐘型隸屬函數、S 型隸屬函數以及 Z 型隸屬函數等，其中以圖 2.9~2.13 表示。

(1) 三角形隸屬函數(如圖 2.9)：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{c-a} & \text{for } a \leq x < c \\ 1 & \text{for } x = c \\ \frac{b-x}{b-c} & \text{for } c < x \leq b \\ 0 & \text{for } x > b \end{cases} \quad (2.20)$$

(2) 梯形隸屬函數(如圖 2.10)：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{c_1-a} & \text{for } a \leq x < c_1 \\ 1 & \text{for } c_1 \leq x \leq c_2 \\ \frac{b-x}{b-c_2} & \text{for } c_2 \leq x < b \\ 0 & \text{for } x > b \end{cases} \quad (2.21)$$

(3)鐘型隸屬函數(如圖 2.11)：

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \dots\dots\dots(2.22)$$

(4)S 型隸屬函數(如圖 2.12)：

$$S(x; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ 2 \left(\frac{x-\alpha}{\gamma-\alpha} \right)^2, & \alpha < x \leq \beta \\ 1 - 2 \left(\frac{x-\gamma}{\gamma-\alpha} \right)^2, & \beta \leq x \leq \gamma \\ 1, & x \geq \gamma \end{cases} \dots\dots\dots(2.23)$$

(5)Z 型隸屬函數(如圖 2.13)：

Z 型隸屬函數為 S 型隸屬函數的補集，以 S=0.5 為基準，將 S 型隸屬函數顛倒，即可得到 Z 型隸屬函數，簡單的說就是用 1 減去 S 型隸屬函，稱為 Z 型隸屬函數，如下所示：

$$Z(x; \alpha, \beta, \gamma) = 1 - S(x; \alpha, \beta, \gamma) \dots\dots\dots(2.24)$$

3.模糊運算

模糊集合的基本運算為聯集(Union)、交集(Intersection)、補集(Complement)等三種，若將 A 和 B 定義為模糊集合，其中基本運算如下：

$$\text{聯集： } A \cup B \quad \mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in U \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\text{交集： } A \cap B \quad \mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in U \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\text{補集： } \tilde{A} \quad \mu_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

模糊集合運算的基本定義與傳統集合運算的基本性質幾乎完全相同，關於模糊集合的運算，根據不同的需要，還有其他的廣義的聯、交運算。

4. α -切割法(α -Cut Method)

為利於進行模糊集運算，將模糊函數切割成區間形式後，再進行運算的方法，稱為 α -切割法(亦稱 α -截集)，其定義如下式：

$$\tilde{A} = \tilde{A}_\alpha / \alpha \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

上式中 \tilde{A}_α 表示模糊集受 α 切割後，其隸屬函數 $\mu_A(x)$ 大於 α 所在的元素區間，稱為模糊集A的截集，如下所示：

$$\tilde{A}_\alpha = \{x \in U | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \alpha \in (0,1] \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

2.2.2 模糊關係

模糊關係就是傳統明確關係的擴充，明確的關係對於事物間的描述只能以二元邏輯的方式描述，對於一些曖昧不明的關係卻無法描述，例如「標準體重」，但每個人的胖瘦標準不一，難以界定什麼是標準體重，若以模糊關係的方式描述接近標準的程度，相信這種表現方式是比較合理且容易被接受。模糊關係是笛卡兒乘積的一個模糊子集合，定義如下：

笛卡兒乘積 $U \times V$ 的一個模糊子集合 R 稱為由 U 到 V 的一個模糊二元關係。可以使用在 $[0,1]$ 區間取值的隸屬函數 μ_R 描述其特性。隸屬函數表示為式 2.30 封閉區間的對應。另外， R 可用式 2.31 有序數對表示，其中 $(U \times V)$ 為直積 $U \times V$ 的元素，而 $\mu_R(U \times V)$ 為 R 的歸屬函數，即

$(U \times V)$ 屬於 R 的程度。

$$\mu_{\tilde{R}} : U \times V \rightarrow [0,1] \dots\dots\dots(2.30)$$

$$\tilde{R} = \{(u, v), \mu_{\tilde{R}}(u, v) | (u, v) \in U \times V\} \dots\dots\dots(2.31)$$

假設 X, Y 為實數論域，且模糊集合 A 與 B 分別為

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad \text{及} \quad B = \{(y, \mu_B(y)) | y \in Y\} \dots\dots\dots(2.32)$$

且定義出由 X 至 Y 的模糊關係 R ，其乘積可表示為：

$$R = A \times B = \{(x, y), \mu_R(x, y) | (x, y) \in X \times Y\} \dots\dots\dots(2.33)$$

模糊關係之運算有很多種方式，如取小法、乘法、算術法、布林法、先小後大法等。經由許多實驗結果，取小法及乘法兩者可以得到較近似人類思考方式的結果，所以模糊關係的運算方式仍以這兩者為主。表示如下：

$$\text{取小法：} \mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \min [\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)] \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\text{乘法：} \mu_{\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}}(x, y) = \mu_{\tilde{A}}(x) \mu_{\tilde{B}}(y) \dots\dots\dots(2.35)$$

處理不同直積空間(product spaces)關係之間的問題是時常會碰到的，例如：若已知道“溫度-壓力”的關係以及“壓力-溼度”的關係特性，希望可以得到“溫度-溼度”的關係特性。對於這類不同直積空間的模糊關係，可透過合成運算(Composition)將彼此結合在一起，產生新的模糊關係，及模糊關係的合成。其中以Zadeh之最大最小合成(Max-Min composition)法則最常使用，定義如下：

設 $\tilde{R}(x, y)$ 和 $\tilde{S}(y, z)$ 為處於兩個不同直積空間之下的模糊關係，其中 $(x, y) \in X \times Y$ 且 $(y, z) \in Y \times Z$ 。則 \tilde{R} 和 \tilde{S} 的Max-Min合成運算結果仍為模

糊集合，其定義如下式：

$$\tilde{R} \bullet \tilde{S}(x, z) = \left\{ \left[(x, z), \max \left\{ \min \left\{ \mu_{\tilde{R}}(x, y), \mu_{\tilde{S}}(y, z) \right\} \right\} \right] \mid x \in X, y \in Y, z \in Z \right\}$$

.....(2.36)

2.2.3 模糊邏輯

在二值邏輯中，我們僅用 0 和 1 兩種數值描述事件的真假，對於某些模糊的事件便無法輕易描述，例如：最多的(most)、很多的(many)等等；而模糊邏輯卻可以輕易得處理這類無法精確描述的量，不僅只限於 0 和 1 兩個數值，並同時利用 0 和 1 間的任意數值來描述事件的真假程度。模糊邏輯和二值邏輯一樣，也有聯集、交集、補集的演算：

$$(AND) : a \wedge b = \min(a, b) \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

$$(OR) : a \vee b = \max(a, b) \quad \dots\dots\dots(2.38)$$

$$(NOT) : \bar{a} = 1 - a \quad \dots\dots\dots(2.39)$$

其中變數a,b是介於[a,b]中的任意數字。

“AND”表示模糊集合運算中之“交集”，其在隸屬函數之運算為“取小(min)”，記為“ \wedge ”；

“OR”表示模糊集合運算中之“聯集”，其在隸屬函數之運算為“取大(max)”，記為“ \vee ”。

2.2.4 模糊推論系統介紹

模糊控制理論在方法上應用了模糊集合理論，模擬人類的邏輯思維，對於無法建立數學模型的被控制系統進行控制，圖 2.14 為模糊推論

系統架構圖，主要架構包括模糊化(fuzzification)介面、模糊規則(fuzzy rule)庫、資料庫(knowledge base)、推論引擎(inference engine)及解模糊化(defuzzifier)介面，其主要核心為模糊規則庫與推論引擎，經由建立規則庫後，即可使明確的輸入值做模糊化的處理，以對應模糊推論系統(Fuzzy Inference System, FIS)中的模糊規則，再經由推論引擎即進行近似推理，映射至輸出語言變數的論域中，最後由解模糊化的動作，產生實際的操作量，使模糊推論系統可建構輸入值與輸出值間的映射關係(mapping)，其中模糊規則庫是由以 IF-THEN 語言形式表現的規則組成，以下分別介紹模糊推論系統各項主要架構：

1. 模糊規則庫

模糊規則其以口語形式寫成，其規則庫由一組 IF-THEN 的條件敘述語句的模糊法則所組合而成，以描述系統的輸入與輸出的關係。IF 稱為前提部分，提供判斷這個語句成立與否的條件部分，THEN 稱為結論部分，用來表現符合條件的結果。其中模糊規則根據系統的概念模式決定好使用的輸入和輸出變數後，便依據變數間的關係，設計控制規則，而模糊規則庫可藉由擷取專家和操作員的知識及經驗、資料特性的分類等方法建立。通常模糊規則表達的形式有三種：

(1) 多輸入單輸出控制系統(multi-input single-output, MISO)

是最常用的規則表達方式，也可以使用在多輸入多輸出(multi-input multi-output, MIMO)的系統上。

R_1 : IF X is A_{11} and Y is B_{11} THEN Z is C_1

R_2 : IF X is A_{21} and Y is B_{21} THEN Z is C_2

...

...

$R_k : \text{IF } X \text{ is } A_{k1} \text{ and } Y \text{ is } B_{k1} \text{ THEN } Z \text{ is } C_k$

其中 X 、 Y 為輸入變數， Z 是輸出變數 A_{k1} 、 B_{k1} 為第 k 條規則前提部輸入變數的語言變數項， C_k 為第 k 條規則前提部輸出變數的語言變數項。

(2) 目標評價式系統

此種形式是由 Yasunobu 等人提出，預測目前及未來的動作並對控制目標加以評價，控制規則的意義可以看成「假如指令 Z 做了 C_k 動作的情況下，會使得評價指標 x 為 A_k 且評價指標 y 為 B_k ，則控制指令 Z 就執行 C_k 這個動作」，其表達形式為下：

$R_k : \text{IF}(Z \text{ is } C_k \rightarrow (\text{and } X \text{ is } A_k \text{ and } Y \text{ is } B_k)) \text{ THEN } Z \text{ is } C_k$

(3) 函數輸出型

是由 Sugeno 教授提出，其輸出是輸入的線性或非線性函數。

$R_k : \text{IF } X \text{ is } A_{k1} \text{ and } Y \text{ is } B_{k1} \text{ THEN } Z \text{ is } F(X, Y)$

2. 資料庫

在模糊推論系統架構中的資料庫，是指提供模糊集合與模糊規則使用的隸屬函數與其相關參數，藉由此二者將狀態變數的明確輸入值映射為隸屬於各語意值程度大小，即轉換為隸屬度的大小，其相關參數包括輸入變數的論域、輸入空間分割的大小以及隸屬函數的訂定，隸屬函數的訂定可根據個人主觀認定，或請教專家權威，不過要將專家所使用的規則訂定適當的隸屬函數，使正確反應輸入-輸出變數間的模糊關係並不容易。因此通常會先建立粗略的隸屬函數，之後透過學習逐步修正和調整。常用的隸屬函數有三角形隸屬函數(triangular MF)、梯形隸屬函數(trapezoidal MF)、鐘型隸屬函數(bell MF)、高斯隸屬函數(Gaussian MF)等。

3.模糊化介面

模糊化介面作用是將明確的觀測值轉化為語意式的模糊資訊，例如：「大約 30 分鐘」這樣的訊息，就要轉化成以 30 為中心的模糊數，其目的是為了使觀測值適用於模糊規則庫，因為規則庫是由一組 IF-THEN 的模糊法則以模糊集合型式描述所組合而成，故輸入的觀測值必需經過模糊化的處理，即借助於隸屬函數的對映，以得到向對應的隸屬度，所對應的隸屬度值介於 0 到 1 之間。

4.推論引擎

當人類當接收到外在複雜的資訊後，經由大腦思考，都可以做出適當的決策行為，而推論引擎學習人類的思考決策模式，當其接受到許多的模糊資訊後，透過推論引擎處理，即形成最後決策，再藉由解模糊化得到實際的輸出值，簡單的說推論引擎是經由模糊規則庫結合所有被觸動的 IF-THEN 規則作統合的運算，再映射到集合輸出的過程，目前有幾種推理運算方法簡單易行，是目前大家比較常用的推論法，以下分別說明之：

(1) Mamdani 的 Min-Min-Max 模糊推論法

此種推論法對於被觸動規則前提部分的隸屬度(W_i)是採用邏輯積演算(min 運算)，再將此隸屬度與結論部份作邏輯積演算，取得結論後再將所有觸動結論作統合作，其中每個規則是藉由“ELSE”連接，所以最後將統合的部份以邏輯合演算(max 運算)作為輸出值，其演算過程如下：

$$(a) W_i = \min \left\{ \max_{x_1} [\min(A_{1i}, A_1)], \max_{x_2} [\min(A_{2i}, A_2)] \right\} \dots\dots\dots(2.40)$$

其中 i 為規則編號、A₁、A₂ 為輸入值

(b) 求結論部份隸屬度值

$$B_i = \min(W_i, \mu_{B_i}(Y)) \dots\dots\dots(2.41)$$

(c) 所有規則的統合

$$B = \max_{i=1}^r B_i \dots\dots\dots(2.42)$$

r 為觸動規則數目

(2) Larsen 的 Min-Product-Max 模糊推論法

演算過程與第一種推論法類似，唯一不同的是在在 W_i 值與結論部份採用代數積(即一般的乘法)演算，演算過程如下：

$$(a) W_i = \min \left\{ \max_{x_1} [\min(A_{1i}, A_1)], \max_{x_2} [\min(A_{2i}, A_2)] \right\} \dots\dots\dots(2.43)$$

其中 i 為規則編號、A₁、A₂ 為輸入值

(b) 求結論部份隸屬度值

$$B_i = W_i * \mu_{B_i}(Y) \dots\dots\dots(2.44)$$

(c) 所有規則的統合

$$B = \max_{i=1}^r B_i \dots\dots\dots(2.45)$$

r 為觸動規則數目

(3) Tsukamoto 模糊推論法

此法在定義隸屬函數上以一種單調非遞減的函數(例如 S 函數)涵蓋整個論域上。在推論時，對於規則的前提部份採用 min 運算得出隸屬度，並將此隸屬度直接映射至結論部份的隸屬函數上作為模糊輸出值，其解

模糊化方法如下：

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^r W_i * Y_i}{\sum_{i=1}^r W_i} \dots\dots\dots(2.46)$$

r 為觸動規則數目

5.解模糊化介面

明確輸入值經由模糊化後轉為模糊值，所以當輸出一個操作量時，也應該再轉化回明確的輸出值，而解模糊化的工作就是將推論運算所統合的模糊值換算為實際的操作量作為輸出值，解模糊化的方法眾多，以下列舉三種常用的方法：

(1)重心法(Center of area method 或 Center of gravity method)

這是解模糊化最常用的方法，是一種加權平均計算的方法，計算方式分別如下：

(a)連續積分式重心法：結論輸出論域為一種連續式的函數。假設輸出隸屬函數 C 的論域落於區間 a 到 b，則重心法可表示為：

$$y_{coa} = \frac{\int_a^b C(y)ydy}{\int_a^b C(y)dy} \dots\dots\dots(2.47)$$

(b)離散式重心法：結論輸出表示為離散式的輸出，且論域 Y 落於 a 到 b 之間，每一步距為 Δ 寬，共分為 n 段，所以

$$n = \frac{a-b}{\Delta} + 1, \text{ 則重心法可表示為：}$$

$$y_{coa} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu(y_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(y_i)} \dots\dots\dots(2.48)$$

y_i ：論域上經由分段後各段點的值， $\mu(y_i)$ ：各段點上之隸屬度

(2)最大均值法(Mean of maximum)

此亦為一種離散式的計算法，其使用模模糊結論中，具最高隸屬度值為解模糊化之值，若同時具多點最大隸屬度值，則取其平均。

$$y_{mon} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{k} \dots\dots\dots(2.49)$$

k ：模糊結論中，具最大隸屬度的點 m_i 的個數

(3)面積法(Area method)

這是計算較複雜且費時的方法，必須分別計算面積與重心，在一下式計算出操作量。

$$y_{am} = \frac{\sum A_i * Y_i}{\sum A_i} \dots\dots\dots(2.50)$$

A_i ：第 i 條規則推論結果所求得的面積

Y_i ：該部分之重心

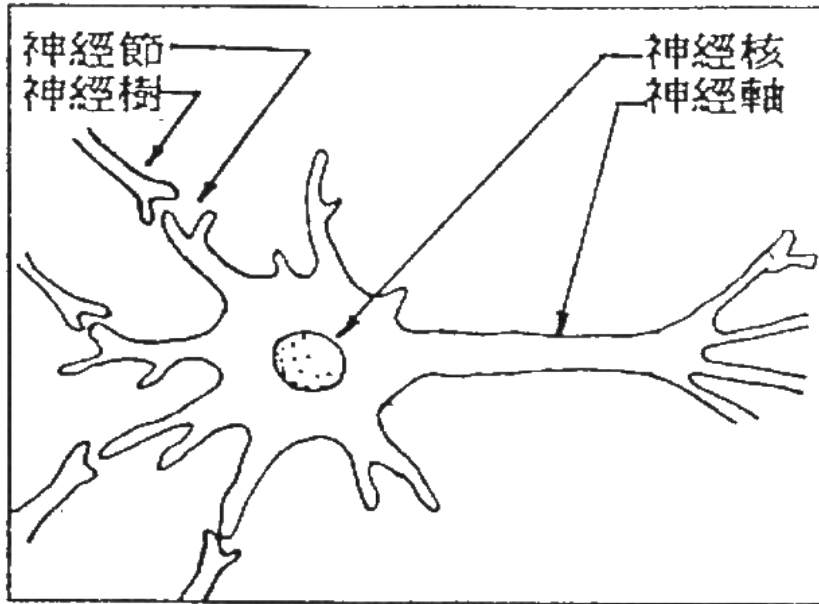


圖 2.1 生物神經元模型圖 (葉怡成, 1993)

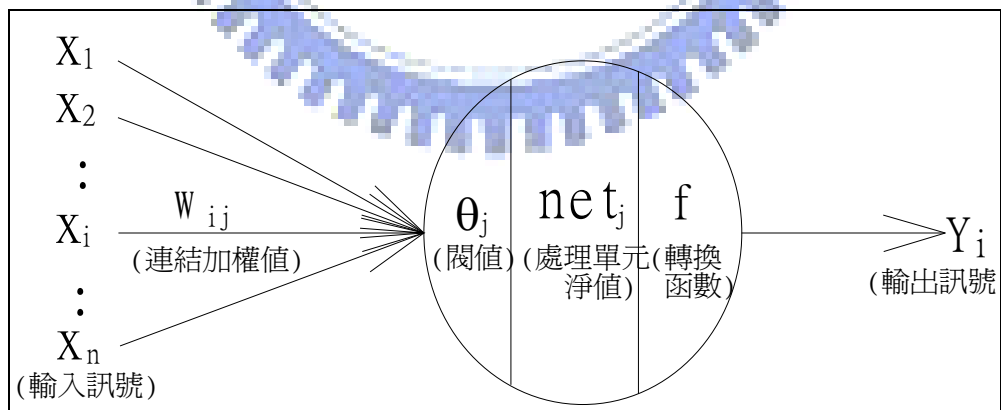


圖 2.2 人工神經元模型圖

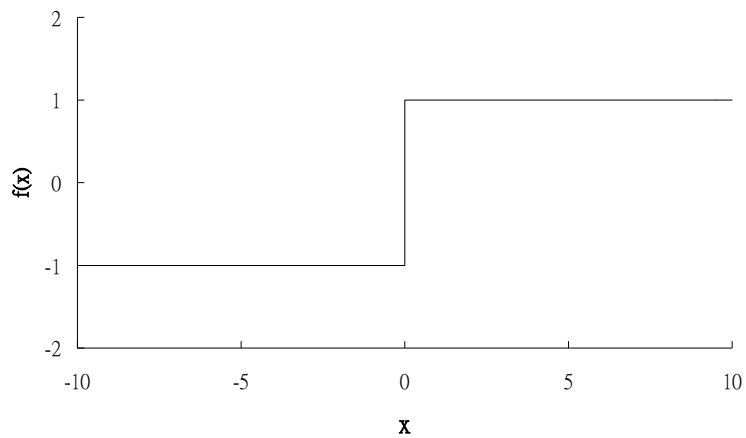


圖 2.3 位階臨界轉換函數圖

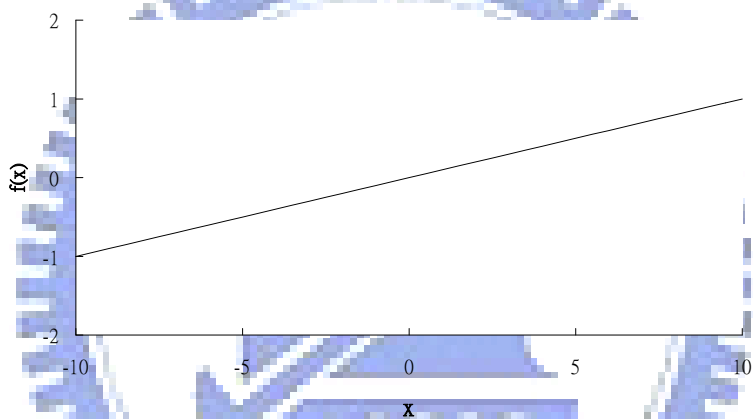


圖 2.4 線性轉換函數圖

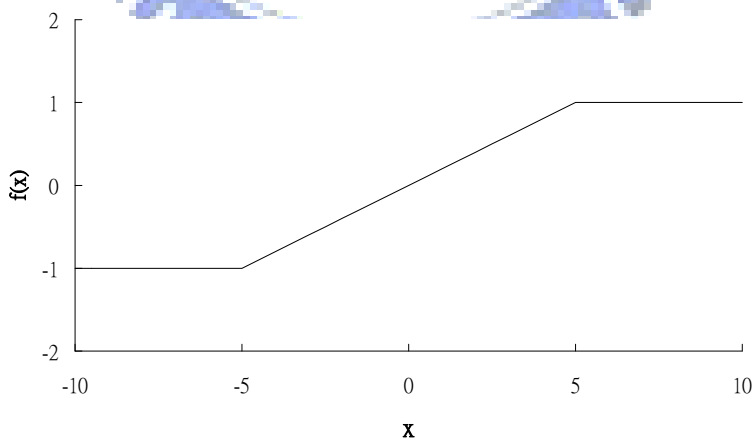


圖 2.5 非線性轉換函數圖

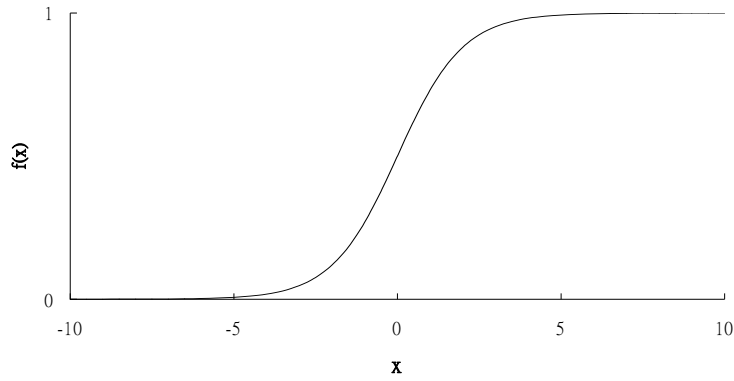


圖 2.6(a) 雙彎曲轉換函數圖

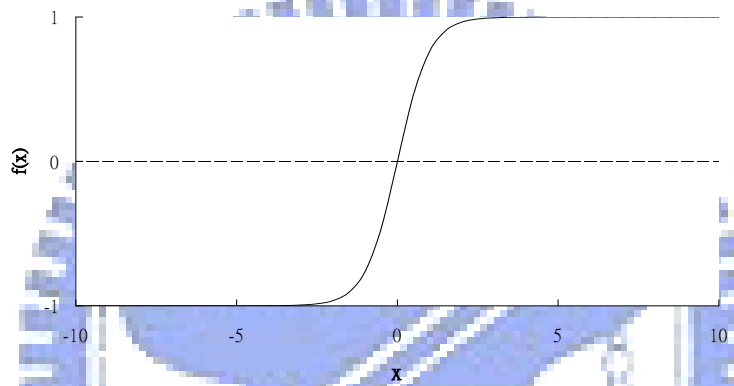


圖 2.6(b) 雙曲線正切轉換函數圖

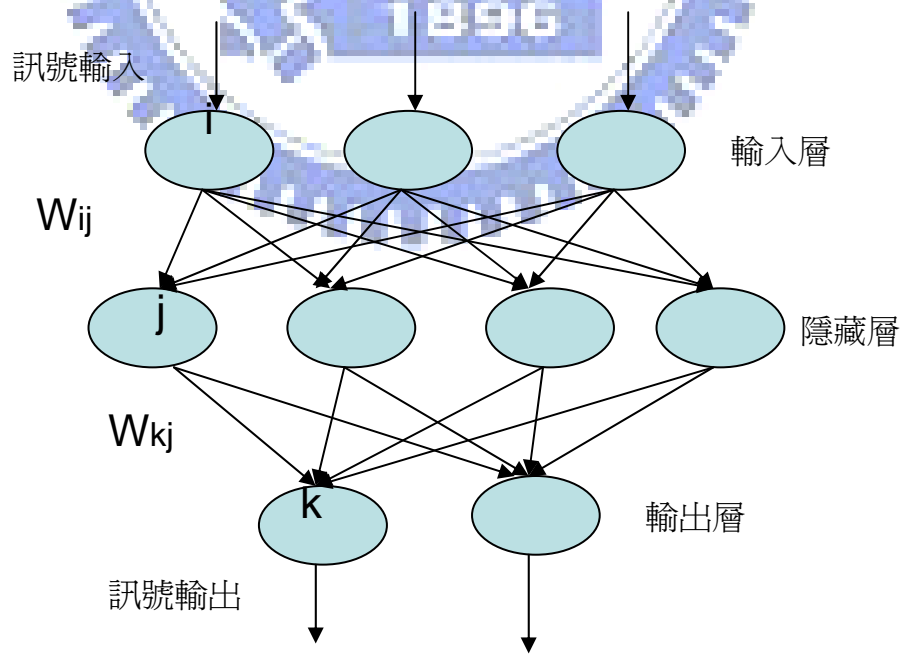


圖 2.7 倒傳遞網路模型示意圖

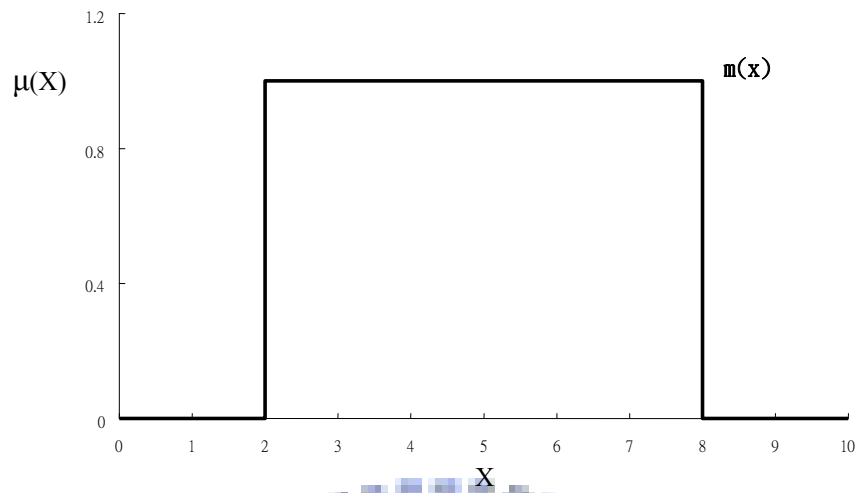


圖 2.8 特徵函數圖

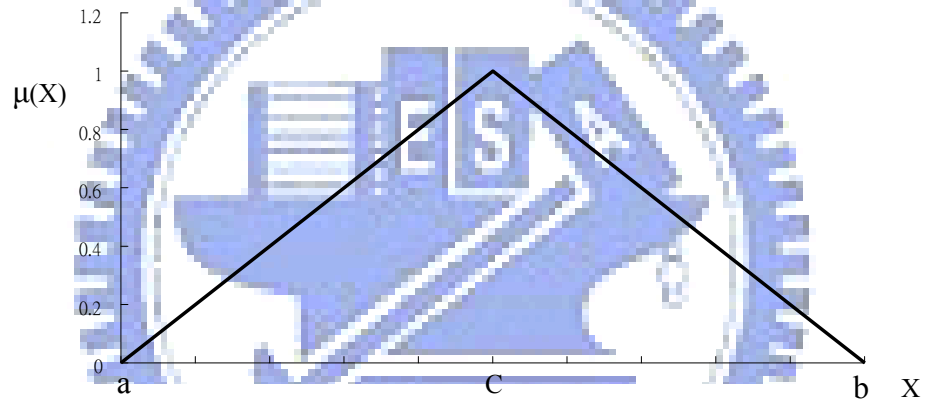


圖 2.9 三角形隸屬函數圖

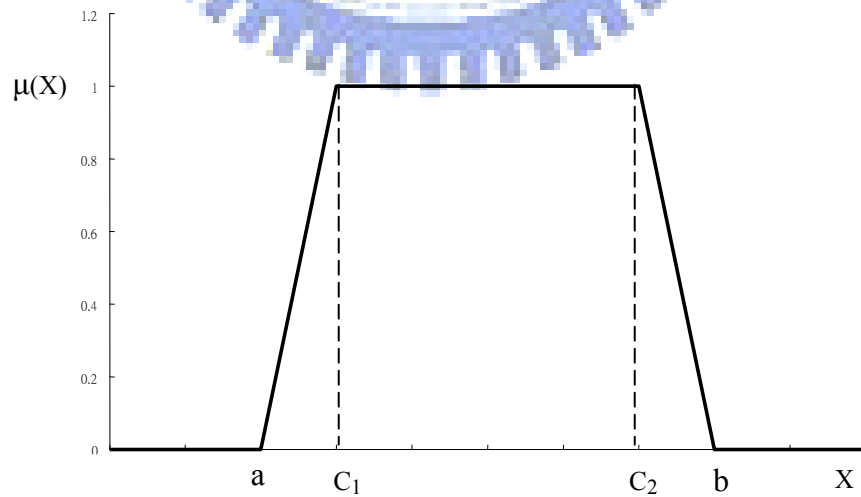


圖 2.10 梯形隸屬函數圖

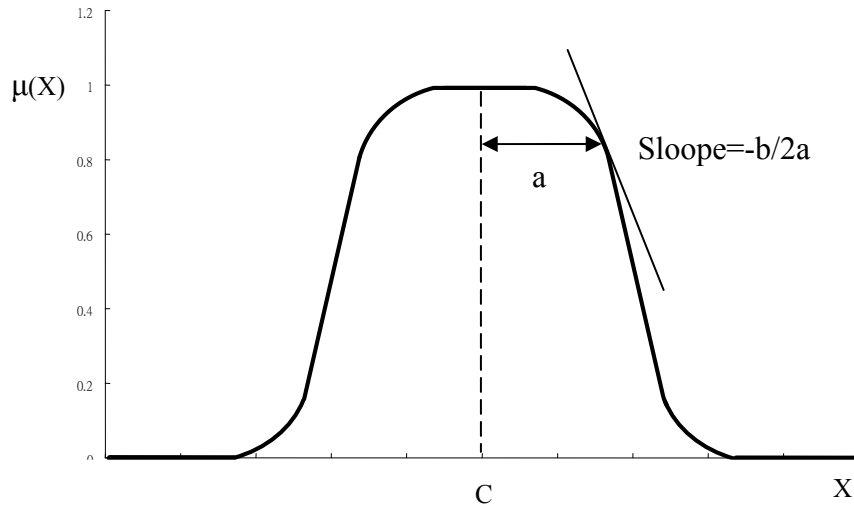


圖 2.11 鐘形隸屬函數圖

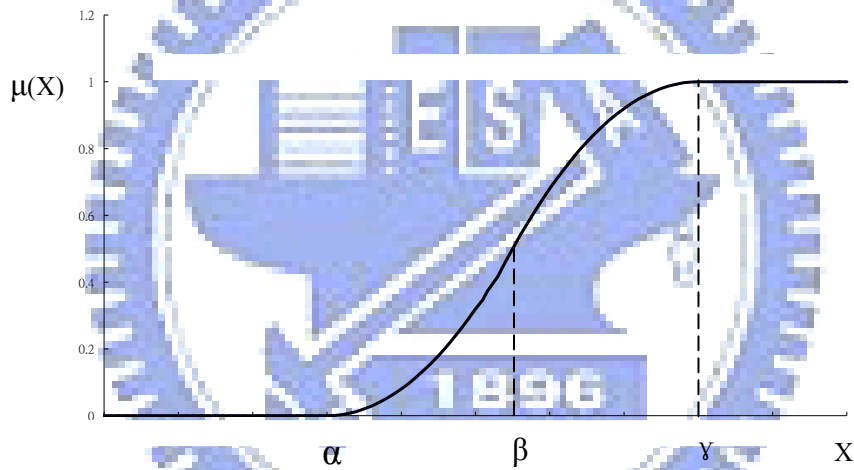


圖 2.12 S 形隸屬函數圖

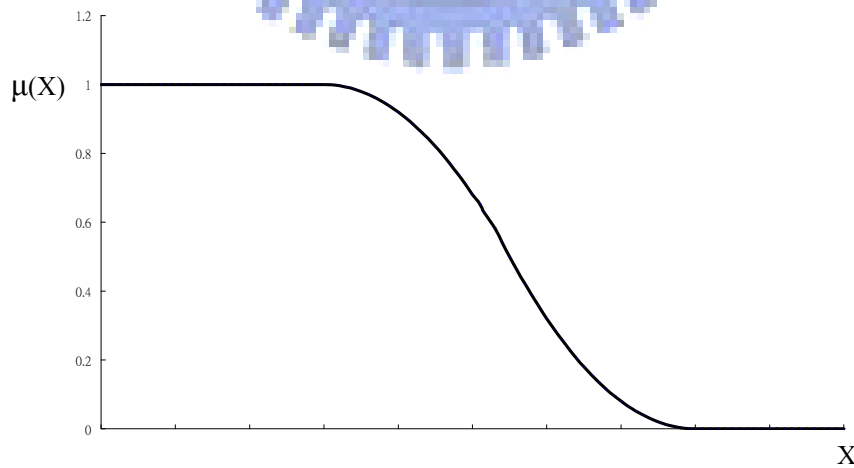


圖 2.13 Z 形隸屬函數圖

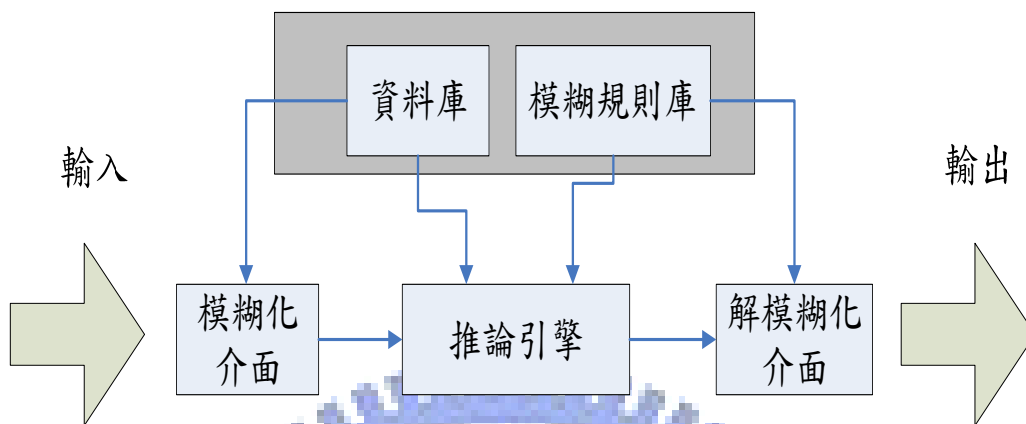


圖 2.14 模糊推論系統基本架構圖



第三章 地表地下聯合營運模式發展

如前所述，本研究是利用模糊理論、線性規劃以及類神經網路等理論建立一「地表地下聯合營運模式」。聯合營運系統包括地表水系統的線性規劃模式與地下水系統的類神經網路模式，其中藉由模糊推論系統結合，並以人工檢定的方式調整模糊推論系統內的參數，得到合適控制規則，以求得水量調配原則。

3.1 模式整體架構與演算流程

模式整體架構如圖 3.1 所示，本節將針對模式整體架構與模式整體演算流程詳細敘述：

1. 模式整體架構：

模式架構主要分為上下兩層，上層為模糊推論系統，下層為地表水系統與地下水系統。上層的模糊推論系統為進行地表地下聯合營運系統水量之調配，分配地表水與地下水各自所需滿足之需求水量，再將此需求分配水量交由下層子系統各自進行調配或模擬。

2. 模式演算流程：

由前所述，本研究的模式架構分為上層的模糊推論系統與下層的地表水和地下水系統，整合後其演算流程如圖 3.2 所示，說明如下：

- (1) 一開始由模糊推論系統求得該時刻的地表水與地下水需求分配量。
- (2) 將該時刻的地表水分配到的需求分配量，帶入地表水系統，計算出該時刻實際的地表各水庫放水量。
- (3) 再將該時刻地下水分配到的需求分配量，帶入地下水系統，模擬該時刻的地下水的地下水位與計算出抽水量。

(4) 檢驗是否完成所有時刻的模擬，如果否，則回到步驟(1)，繼續進行下一個時刻模擬，直到總期距模擬結束。

3.2 地表地下需求水量分配

本節將對整體模式上層部分作介紹，上層部分是利用模糊推論系統分配需求水量，以求得需求分配量，供地表水與地下水兩系統作模擬，以下則針對需求水量分配方式與系統的建置作說明，詳敘如下：

3.2.1 模糊推論系統分配需求水量

模糊推論系統是根據模糊規則庫作水量調配，模糊規則庫是由一組 IF-THEN 的條件敘述語句的模糊法則所組合而成，其形式由以下表示：

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{IF } \sum_i (V_i^t + IF_i^t) \text{ is } A_1 \text{ and } \bar{h}^t \text{ is } B_1, \text{ THEN } D^t \text{ is } C_1 \\
 R_2 : & \text{IF } \sum_i (V_i^t + IF_i^t) \text{ is } A_2 \text{ and } \bar{h}^t \text{ is } B_2, \text{ THEN } D^t \text{ is } C_2 \\
 & \dots \\
 R_k : & \text{IF } \sum_i (V_i^t + IF_i^t) \text{ is } A_k \text{ and } \bar{h}^t \text{ is } B_k, \text{ THEN } D^t \text{ is } C_k \\
 & \dots\dots\dots(3.1)
 \end{aligned}$$

其中，

- V_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫節點之蓄水量；
- IF_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫節點之入流量；
- \bar{h}^t : 第 t 時刻平均地下水位；
- D^t : 第 t 時刻地下水系統需求分配量；
- A_k : 第 k 條規則中，集合 A 被 $V_i^t + IF_i^t$ 所觸發的隸屬函數；

B_k : 第 k 條規則中，集合 B 被 $\overline{h^t}$ 所觸發的隸屬函數；

C_k : 第 k 條規則中，集合 C 被 D'' 所觸發的隸屬函數；

模糊推論系統藉由水庫可利用水量($V_i^t + IF_i^t$)與平均地下水位($\overline{h^t}$)兩種資訊進行系統的演算，($V_i^t + IF_i^t$)與 $\overline{h^t}$ 分別由地表水系統與地下水系統的狀態得知，僅在第一個時刻將初使狀態輸入模糊推論系統，後續各時刻則根據前一個時刻之狀態代入，經由系統演算後可得知地下水系統需求分配量(D'')，而地表水系統需求分配量是由各時刻之系統總需求水量扣除地下水系統之需求分配量得出，其如下所示，

$$D''' = D^t - D'' \dots\dots\dots(3.2)$$

其中，

D^t : 第 t 時刻需求節點之總需求水量；

D'' : 第 t 時刻地表水系統需求分配量；

由 3.1 式與 3.2 式可分別得到地表水系統與地下水系統各自之需求分配量，再將兩者各別帶入下層子系統中，進行地表水調配與地下水模擬操作。

其中 $\overline{h^t}$ (平均地下水位)的範圍與 D'' (地下水系統需求分配量)以模糊推論系統作限制，在本研究中的地下水含水層厚度之上下限設為 70 至 94 公尺，故將 $\overline{h^t}$ 控制在水位下限 70 至水位上限 94 公尺之間， D'' 則依最大抽水量 0.3 cms，將 D'' 控制在 0 至 0.3cms，而模糊推論系統的建置於下個小節詳細說明之。

3.2.2 模糊推論系統之建立

由上節所述可知，整體模式主要的核心為模糊推論系統，而系統的建立則參照模糊控制程序，以下則針對各項分別說明之：

1. 輸入、輸出變數的訂定

在聯合營運系統中，水量的來源分為地表水與地下水，在地表水系統中，可利用水量為影響水庫放水最重要的因素，其操作方式應觀察水量的多寡決定放水，當可利用水量充餘時，水庫之放水需加大，若可利用水量不足，水庫必須作折扣放水，儘量保持水庫滿庫；在地下水系統中，其水量的多寡必須由地下水位得知，相對於地表水操作方式上，當地下水水位越高時，可抽用的水量越大，若地下水水位越低時，可抽用的水量越小，故輸入變數與水庫可利用水量和地下水位兩項變數有關，因此本文模糊推論系統的輸入變數有兩個，分別為「水庫可利用水量」($V_i^t + IF_i^t$)、「平均地下水位」(h^t)，而輸出變數為「地下水系統需求分配量」 D^t ，其中地表水的供應水量，直接由每個時刻的需求水量扣除「地下水抽水量」計算而得。

2. 定義各變數的資料庫

(1) 變數的論域範圍與隸屬函數的決定

為了使模糊推論系統有效的接受到外界的資訊，所以輸入變數和輸出變數以可測量的實際狀況值作為論域範圍。由前述可知輸入變數為「水庫可利用水量」、「平均地下水位」，前者論域範圍為地表兩座水庫庫容相加，如此可合成為「對等水庫」，則可視為一地表水系統並與地下水系統聯合調配水量，兩座水庫分別為 7000 和 5000 萬噸，故論域範

圍為 0 至 12000 萬噸，後者論域範圍地下水位限制範圍，其範圍為 70 至 94 公尺，地下水庫的系統於 3.3.2 說明；輸出變數為「地下水系統需求分配量」，按實際抽水量值設定其論域範圍，其範圍為 0 至 0.3cms，而所有變數的模糊化方式則選定三角形的隸屬函數作模糊化的工作。

(2)論域範圍的分割數目

論域範圍的分割數目則是以人工檢定的方式來決定，其中將地表水和地下水之論域作對等切割，以利於辨別地表水庫與地下水庫的水位高低，輸出變數為則依實際情況 0~0.3CMS 的抽水量分為四個隸屬函數，其中輸入及輸出變數的隸屬函數形式如圖 3.3、3.4、3.5 所示，通常表示模糊集合以 P 代表正、B 是大、M 是中、S 是小、ZR 是零，可以下列文字描述其意義：

PB=Positive Big(正值，大)

PM=Positive Medium(正值，中)

PS=Positive Small(正值，小)

ZR=ZERO (零)

NS=Negative Small(負值，小)

NM=Negative Medium((負值，中)

NB=Negative Big((負值，大)

3.模糊規則庫的建立

模糊規則庫的建立主要是靠專家的知識與操作人員的經驗，再經由不斷的試誤經驗建立而成，在此規則庫的基本架構是由專家知識構成，主要是參考指標平衡的概念，由規則基本架構表 3.1 所示，先行將兩個變數做同等分切割，以比較「水庫可利用水量」、「平均地下水位」此兩

個變數的可用水量，而水量多的變數必須提供較多的水，以提高供水效益。又因地表水與地下水對於水量的存取性質不同，地表水豐枯易見，反之地下水存取不易，且地下水必須保有一定的水量，所以地下水在使用上必須更為嚴謹，當單純地表水操作時可遵照指標平衡的方式操作，但觸及地下水時，由於兩者性質問題，必須折衷其操作手法，故模糊規則中以優先使用地表水為考量，而當地表水低於某一程度時，才可啟動地下水，而地下水接近水位下限則減少抽水量，規則基本架構表 3.1 所示。

4.推論引擎與解模糊化策略

其模糊推論機制，是採用Zadeh之Max-Min合成法則，由於在問題的決策過程中需盡量滿足所有的條件，也就是IF-THEN條件敘述語句的模糊法則的條件部分，故採用Min推論，即對所有隸屬度取交集；對於問題通常我們都希望得到最大的滿意度，所以最後所推論出模糊化的值為IF-THEN的結論部份則，採用MAX推論，也就是對所有隸屬度取聯集，而解模糊化策略則採最為常用的重心法。

3.3 地表水調配

如圖 3.1 所示，地表水調配為屬於整體模式的下層，其中利用線性規劃調配地表各水庫的水量，模式詳敘如下。

3.3.1 指標平衡

當地表水系統中水庫不只一座時，我們如何決定各水庫之供水順序呢？目前水庫與水庫間放水策略常用之一的方法乃以「指標平衡」作為供水順序之原則，此方法最早為美國陸軍兵工團工程師所提出，其基本

精神為保持各蓄水單元蓄水量之平衡。運用指標平衡方法可平衡水庫與水庫間入流量相對於庫容之豐枯狀態，以獲得水資源調配時之最大效益。

指標平衡方法對水庫操作規線之分層賦予整數之基本指標 I_i ，系統中之任一水庫在 t 時刻，若其放水後之蓄水量位在水庫之第 i 分層，則其指標可表示如下：

$$I' = I_i + \frac{V' - V_i}{V_{i+1} - V_i}, \quad (V_{i+1} \geq V' > V_i) \dots\dots\dots(3.3)$$

其中，

I' ：第 t 時刻時指標值；

I_i ：第 i 層基本指標；

V' ：第 t 時刻放水後之蓄水量；

V_i ：第 i 層底對應之蓄水量；

V_{i+1} ：第 $i+1$ 層層底(即第 i 層頂)所對應之蓄水量；

由上述可知，「指標」為水庫在 t 時刻存放於對應分層(規線)之蓄水體積相對該分層之整體體積的比值，當不同水庫規模有所差異時，應用水庫庫容與其蓄水量之比值，可以更客觀地評估蓄水狀態。指標平衡基本運算式則如下式[3.4]所示。

$$G_{mn}^t = \left| I_{s,m}^t - I_{s,n}^t \right| \dots\dots\dots(3.4)$$

$m, n \in N_F$

其中，

G_{mn}^t ：第 t 時刻第 m 與第 n 水庫之指標差值；

$I_{s,m}^t$ ：第 t 時刻第 m 水庫放水後之指標，其計算如式(3.3)所示；

$I'_{s,n}$ ：第 t 時刻第 n 水庫放水後之指標，其計算如式(3.3)所示；

N_F ：參與指標平衡操作之水庫群集；

如地表水水庫不只一座時，地表水系統可將所有地表水庫相同分層以線性疊加方式合成「對等水庫」，以下皆以地表水系統稱之。

3.3.2 地表水線性規劃模式之建立

本研究以指標平衡操作來維持各時刻地表水系統之蓄水平衡。因此各時刻地表水營運問題可表示如下：

一、目標函數

本模式求解地表水營運問題時，考量以下三項原則：

- (1) 該時刻的系統缺水率為最小
- (2) 該時刻的地表水水庫之間指標差值為最小
- (3) 該時刻的地表水系統蓄水減少量為最小

各原則考量的優先順序為(1)>(2)>(3)，因此各時刻目標函數 Z' 如下式所示：

$$Z' = \min_{\bar{X}^t, \bar{P}^t} \left\{ \sum_{i \in N_D} W_{SH,i} SHR_i^t + W_G \left(\sum_{m \in N_F} \sum_{n \in N_F} G_{mn}^t \right) + W_{SL} (Z'_{SL}) \right\} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$t = 1 \sim n, \quad W_{SH,i} > W_G > W_{SL}$$

其中，

SHR_i^t ：第 t 時刻第 i 需求節點之缺水率(缺水量與需求量之比)；

G_{mn}^t ：第 t 時刻欲進行指標平衡之第 m 與 n 地表水庫之指標差值；

Z'_{SL} ：第 t 時刻地表水系統之空庫容積與庫容比；

$W_{SH,i}$:第 i 需求節點缺水率之權重；

W_G :指標差值項之權重；

W_{SL} :地表水系統空庫容積與庫容比之權重；

\bar{X}^t :第 t 時刻地表水之決策變數向量(各水庫節點放水量)；

N_D :需求節點之集合；

N_F :欲進行指標平衡放水之水庫群集；

本研究之目標函數為求解最小化(Minimize)的決策問題，目標函數中的 SHR_i^t 項次是為使該時刻系統缺水量最小； G_{sys}^t 項次則是為了地表水系統指標差值最小，以維持地表水系統蓄水之平衡； G_{mm}^t 項次為地表水系統中各水庫之指標差值最小，以維持地表水各水庫間供水之平衡； Z_{SL}^t 項次為地表水系統之空庫容積與庫容比最小，以達成地表水蓄水減少量最小之目的。

目標函數中之 $W_{SH,i} > W_G > W_{SL}$ ，為各目標欲滿足之先後順序，以缺水量最小為最優先考量；指標平衡為次以維持供水平衡之供水原則；最後為空庫容積與庫容比，以使水盡量留在蓄水節點內，避免因進行指標平衡時平衡於較低之指標，造成水資源不必要之浪費。

二、限制式

1. 質量平衡式

(1) 蓄水節點（水庫）

$$V_i^{t+1} = V_i^t + \sum IF_i^t - \sum X_i^t - OF_i^t \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

$\forall i \in N_S, t=1 \sim n$

其中，

V_i^{t+1} : 第 $t+1$ 時刻初第 i 水庫節點之蓄水量；

V_i^t : 第 t 時刻初第 i 水庫節點之蓄水量；

IF_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫節點之入流量；

X_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫節點之放水量；

OF_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫節點之溢流量；

N_S : 水庫節點之集合；

t : 模擬時間；

n : 總模擬期距。

(2) 非蓄水節點

$$\sum_{i \in \Lambda} X_{i,j}^t - \sum_{k \in \Phi} X_{j,k}^t = 0$$

$\forall j \in N_q, t = 1 \sim n$ (3.7)

其中，

$X_{i,j}^t$: 第 t 時刻第 i 節點流入第 j 節點之水量；

$X_{j,k}^t$: 第 t 時刻第 j 節點流出至第 k 節點之水量；

Λ : 流入第 i 節點之節點集合；

Φ : 第 j 節點可流至之節點集合；

N_q : 非蓄水節點之集合；

t : 模擬時間；

n : 總模擬期距。

(3) 需求節點

$$D_j^t = \sum_{i \in \Lambda} X_{i,j}^t + SH_j^t \quad t=1 \sim n \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

其中，

D_j^t ：第 t 時刻第 j 需求節點地表水系統需求分配量；

$X_{i,j}^t$ ：第 t 時刻第 i 水庫流入第 j 需求節點之供水量；

SH_j^t ：第 t 時刻第 j 需求節點之缺水量；

t ：模擬時間；

n ：總模擬期距。

2. 地表水各水庫指標平衡式

$$G_{mn}^t = |I_{s,m}^t - I_{s,n}^t| \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

$m, n \in N_F, t=1 \sim n$

其中，

G_{mn}^t ：第 t 時刻第 m 與第 n 水庫之指標差值；

$I_{s,m}^t$ ：第 t 時刻第 m 水庫放水後之指標，其計算如式(3.3)所示；

$I_{s,n}^t$ ：第 t 時刻第 n 水庫放水後之指標，其計算如式(3.3)所示；

N_F ：參與指標平衡操作之水庫群集；

t ：模擬時間；

n ：總模擬期距。

3. 其他等式及不等式

(1) 蓄水節點（水庫）

$$V_{d,i} \leq V_i^t \leq V_{u,i} ; \forall i \in N_S, t=1 \sim n \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

其中，

V_i^t ：第 t 時刻第 i 水庫之蓄水量；

$V_{d,i}$ ：第 i 水庫之呆水位對應之蓄水量；

$V_{d,i}$ ：第 i 水庫之滿水位對應之蓄水量；

N_S ：水庫節點之集合；

t ：模擬時間；

n ：總模擬期距。

(2) 生態基流量

$$X_{i,j}^t \geq \text{Min} \left(\sum_{m \in \Pi} IF_{i,m}^t, B_{i,j}^t \right), \quad t = 1 \sim n \dots\dots\dots(3.11)$$

其中，

$X_{i,j}^t$ ：第 t 時刻第 i 節點流至第 j 節點之河川川流量；

$IF_{i,m}^t$ ：第 t 時刻第 i 節點之上游第 m 天然入流量；

$B_{i,j}^t$ ：第 t 時刻第 i 節點流至第 j 節點之生態基流量；

Π ：第 i 節點上游天然入流量之集合；

t ：模擬時間；

n ：總模擬期距。

(3) 地表水系統空庫與庫容比

$$Z_{SL}^t = \frac{V_{d,i} - V_i^t}{V_{d,i} - V_{u,i}} ; \quad \forall i \in N_S, \quad t = 1 \sim n \dots\dots\dots(3.12)$$

其中，

Z_{SL}^t ：第 t 時刻對等水庫之空庫容積與庫容比；

V_i^t : 第 t 時刻第 i 水庫之蓄水量；

$V_{d,i}$: 第 i 水庫之呆水位對應之蓄水量；

$V_{d,i}$: 第 i 水庫之滿水位對應之蓄水量；

N_S : 水庫節點之集合；

t : 模擬時間；

n : 總模擬期距。

3.4 地下水模擬

如圖 3.1 所示，地下水模擬屬於整體模式的下層，其中利用類神經網路模擬地下水位，以下將針對地下水系統相關方程式與地下水類神經網路之模式建立做介紹，詳敘如下。

3.4.1 地下水系統相關方程式

1. 需求節點

$$D^t = \sum_{i \in N_p} P_i^t \dots \dots \dots (3.13)$$

其中，

D^t : 第 t 時刻地下水系統需求分配量；

N_p : 抽水井群之集合。

P_i^t : 第 t 時刻第 i 抽水井之抽水量；

2. 地下水反應方程式

$$\begin{aligned} \vec{h}^{t+1} &= f(\vec{h}^t, \vec{P}^t) \\ \vec{h}^t \in R^l, \quad \vec{P}^t \in R^k, \quad t &= 1 \sim n \end{aligned} \dots \dots \dots (3.14)$$

其中，

\vec{h}^t ：第 t 時刻地下水系統狀態變數(水位)向量；

\vec{P}^t ：第 t 時刻地下水系統決策變數(抽水量)向量；

l ：觀測井個數(R 代表實數)；

k ：抽水井個數(R 代表實數)；

t ：模擬時間；

n ：總模擬期距。

式(3.13)為地下水系統質量平衡式；式(3.14)為地下水反應方程式，其根據該時刻之地下水位與抽水量求得下一個時刻之地下水位，而地下水系統的建置於 3.4.2 節詳細說明之。

3.4.2 地下水類神經網路模式建立

本研究地下水模擬部分以類神經網路作為模擬非拘限含水層地下水位變化模擬模式，而此類神經網路模式之訓練與驗證資料皆是由數值模式 MODFLOW 產生。在進行類神經網路模式訓練前，先以數值模式 MODFLOW 進行地下水數值模擬，產生兩組數據，分別作為為訓練案例與驗證案例的資料，其類神經網路訓練流程如圖 3.6 所示，分為「訓練資料之產生與處理」及「類神經網路訓練」兩大部分，以下針對此兩部分詳細說明，至於地下水連續預測模式驗證請見附錄 B。

1. 訓練資料之產生與處理

本研究探討之地下水系統如圖 3.7 所示，模擬範圍係 17000(m)×17000(m)大小的矩形。本研究以 U.S.G.S.所開發的地下水數值

模式 MODFLOW 模擬一均質、等向的二維非拘限含水層，模擬固定抽水井位下之水位變化。水文地質參數設定如表 3.2 所示，其中水力傳導係數為 0.001(m/sec)，有效孔隙率為 0.2，儲水係數為 0.2，含水層的厚度為 110(m)。其模擬範圍切割分成 170×170 個網格，每個網格大小為 100(m)×100(m)，邊界設定為上下兩邊為無流量邊界條件，左右兩邊的邊界條件為定水頭邊界條件，分別為 100(m)及 80(m)，所以邊界條件供應的水流方向為由左向右流。初始條件則以尚未設置抽水井時，相同邊界條件之穩態水位作為系統之初始水位，水位剖面如圖 3.8 所示。

井群佈置如圖 3.7 所示，編號 1 到 5 為觀測井，編號 6 到 10 為抽水井群，每一井群包含 100 個網格；每一井群之抽水量上下限則設定為 0 到 0.5cms 之間，以隨機函數決定抽水量後，再平均分配給 100 個網格。本案例以旬操作，建立 3650 筆資料，合計共 100 年，各觀測井水位如圖 3.9 至 3.13 所示。

資料處理方面，其中狀態變數上下限為含水層之範圍 0(m)到 110(m)，決策變數上下限為零抽水量與最大抽水量，將資料正規劃轉換至-1 到 1 之間。

2.類神經網路訓練

本研究運用 MATLAB 之 Neural Network 函式庫建立一個單一隱藏層之類神經網路，網路架構如圖 3.14 所示，其中輸入層共有 10 個節點，分別為 5 個決策變數(5 個抽水井群於 t 時刻的抽水量)及 5 個狀態變數(5 個觀測井於 t 時刻的水位)，輸出層有 5 個節點，為 5 個狀態變數(5 個觀測井於 t+1 時刻的水位)以作為下一個時刻的輸入，隱藏層為 20 個節點。

其中輸入層至隱藏層的轉換函數為雙彎曲線函數 $f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ ，隱藏層至輸出層則採用線性轉換函數。類神經網路之演算法採用 BFGS 演算法，訓練之收斂條件設定為整體誤差收斂值小於 10^{-7} 。



表 3.1 模糊規則基本架構

| | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|
| 地表水可利用水量 | NB | NM | M | PM | PB |
| 地下水位 | | | | | |
| NB | NM | NM | NM | NM | NM |
| NM | PM | PM | NM | NM | NM |
| M | PM | PM | NM | NM | NM |
| PM | PM | PM | NM | NM | NM |
| PB | PM | PM | NM | NM | NM |

表 3.2 水文地質參數表

| 含水層參數別 | 參數值 |
|--------|---------------|
| 水力傳導係數 | 0.0001(m/sec) |
| 儲水係數 | 0.2 |
| 有效孔隙率 | 0.2 |
| 時間間距 | 10 天(旬) |
| 含水層厚度 | 110 m |

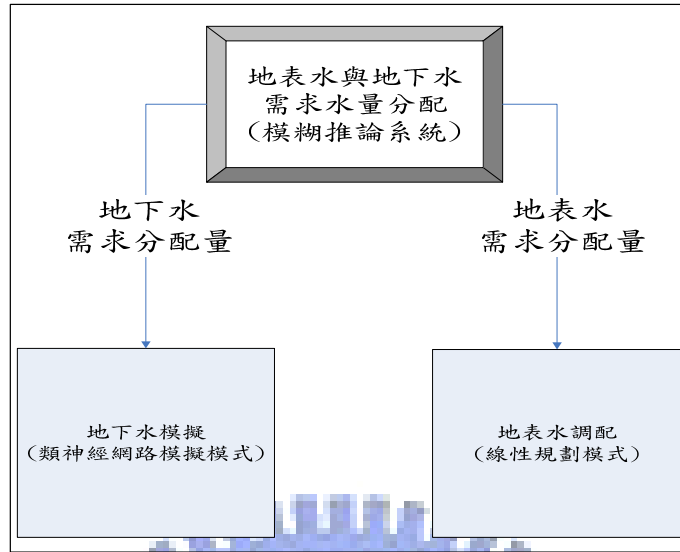


圖 3.1 地表地下聯合營運模式架構圖

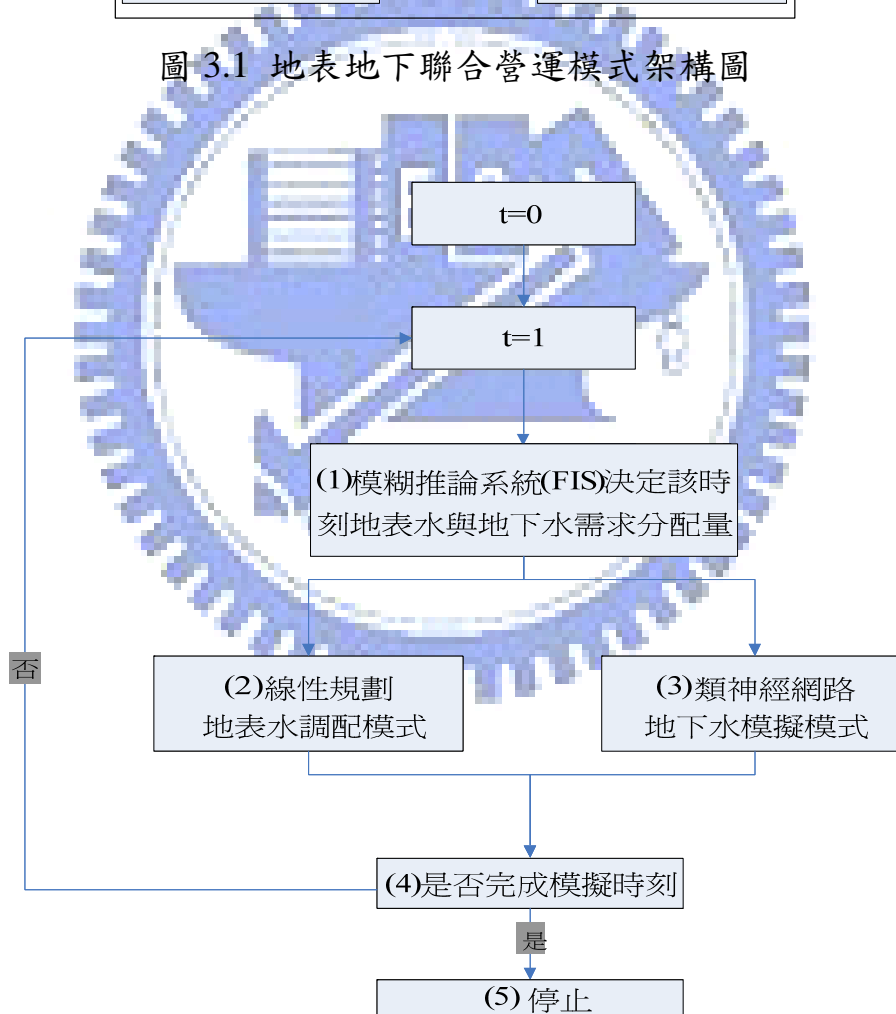


圖 3.2 模式演算流程圖

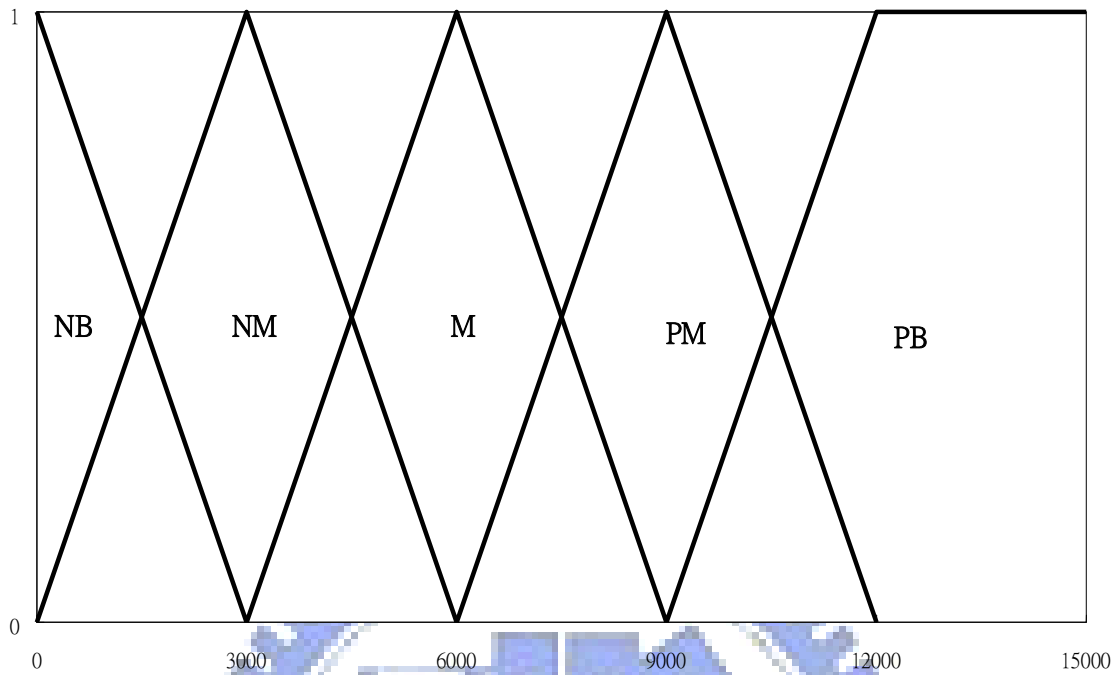


圖 3.3 輸入變數-地表水可利用水量隸屬函數圖

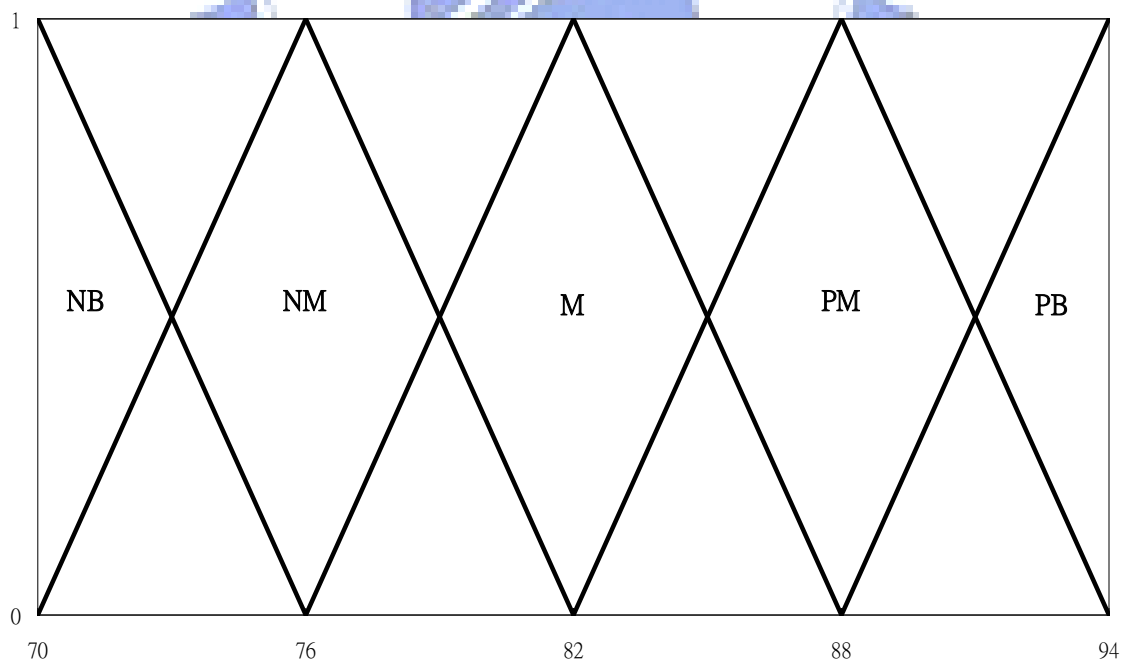


圖 3.4 輸入變數-平均地下水位隸屬度函數圖

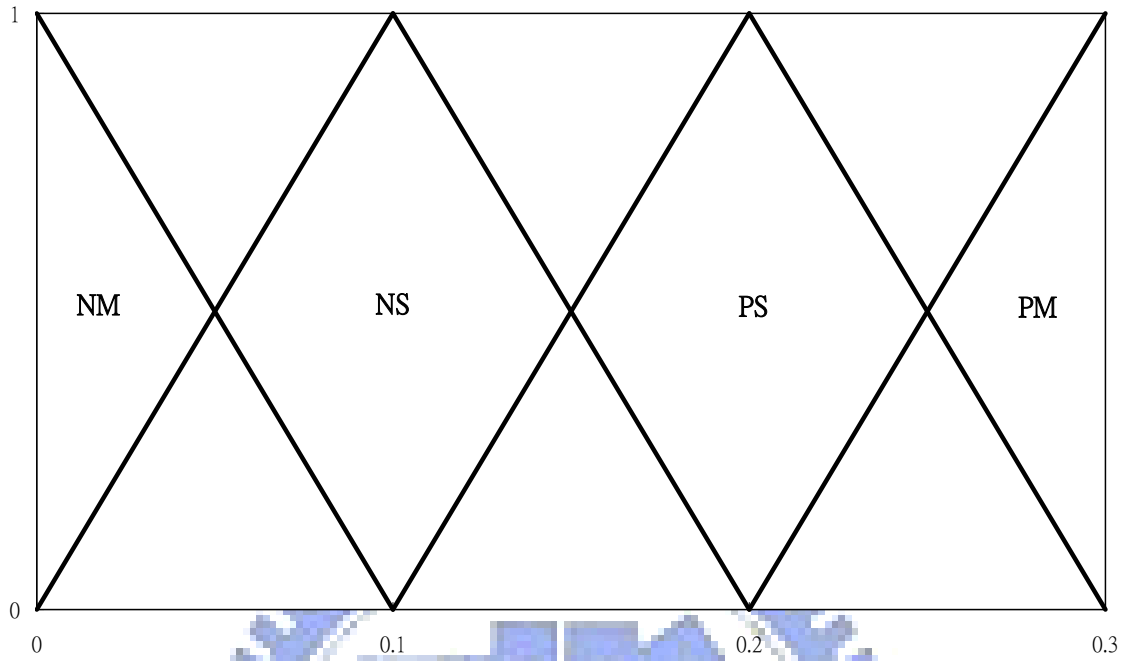


圖 3.5 輸出變數-地下水系統需求分配量隸屬度函數圖



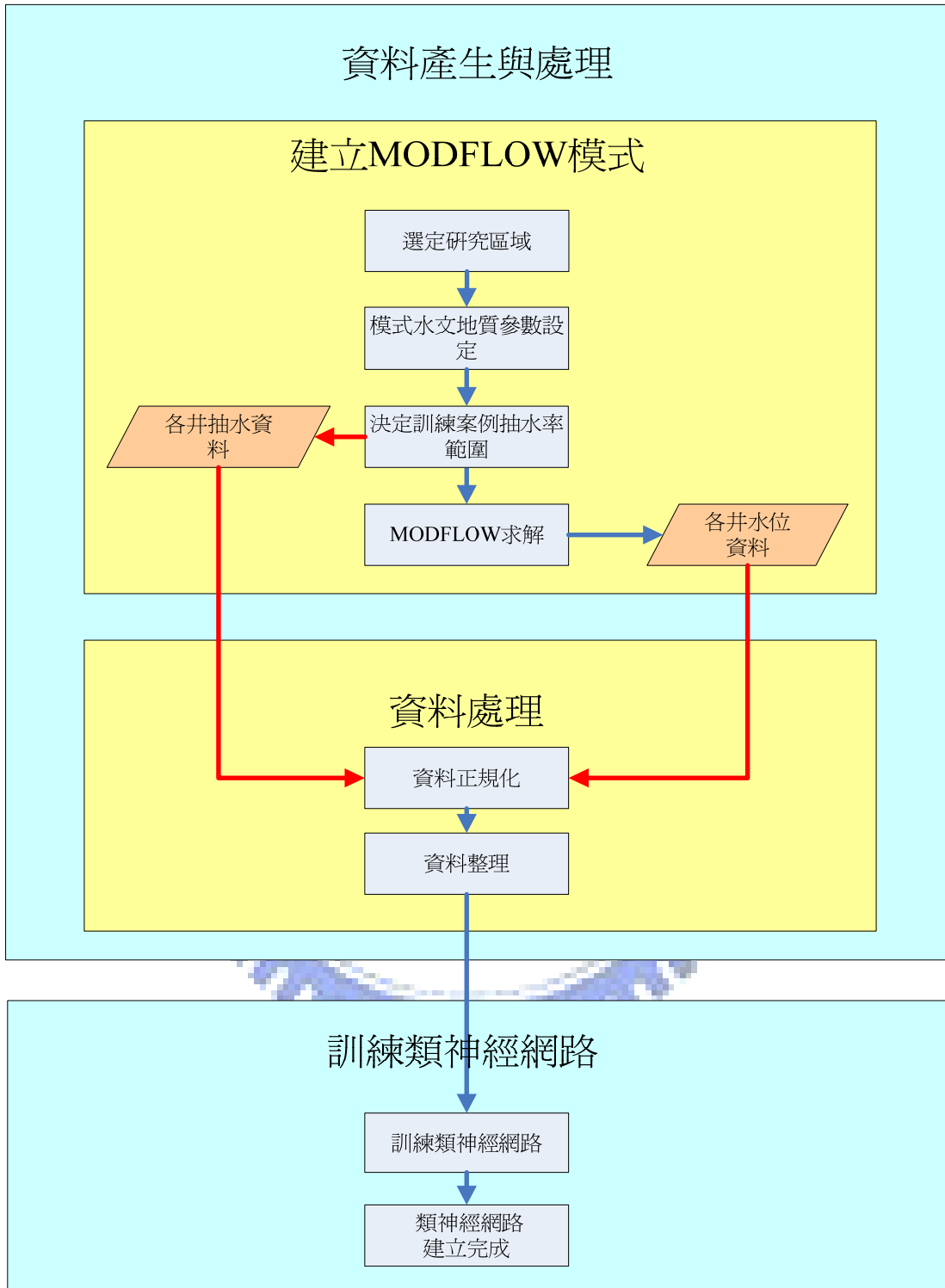


圖 3.6 類神經訓練流程圖

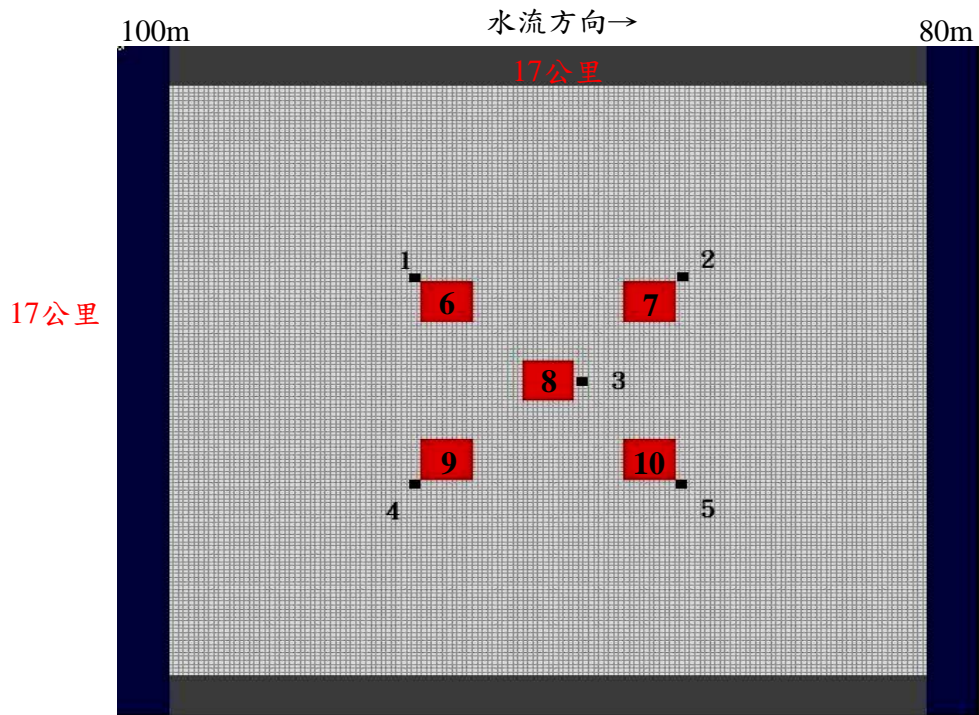


圖 3.7 下水系統建置圖

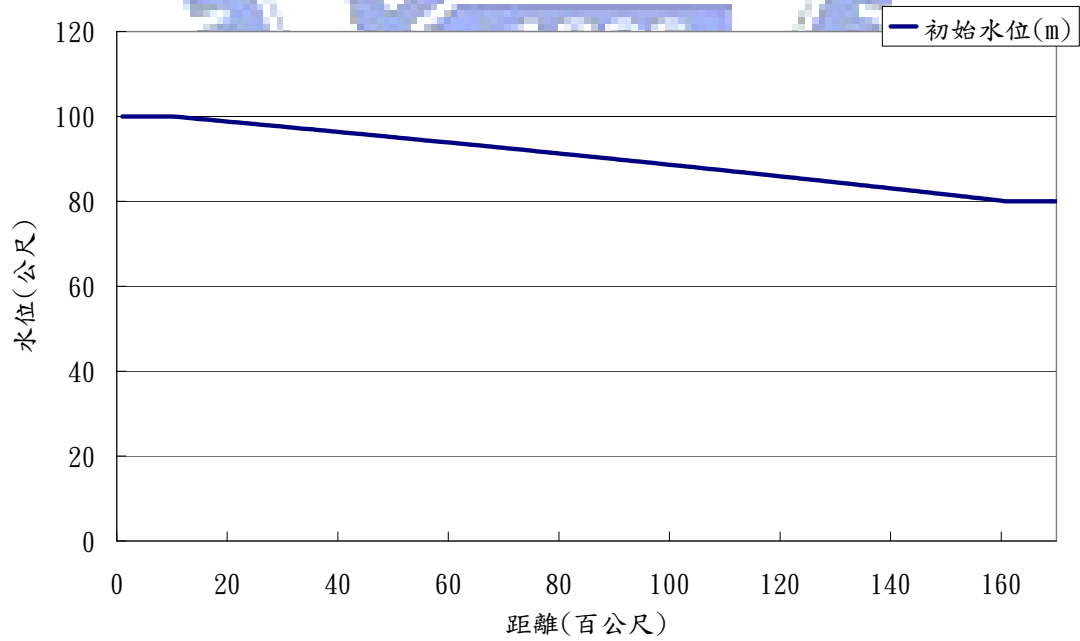


圖 3.8 初始水位剖面圖

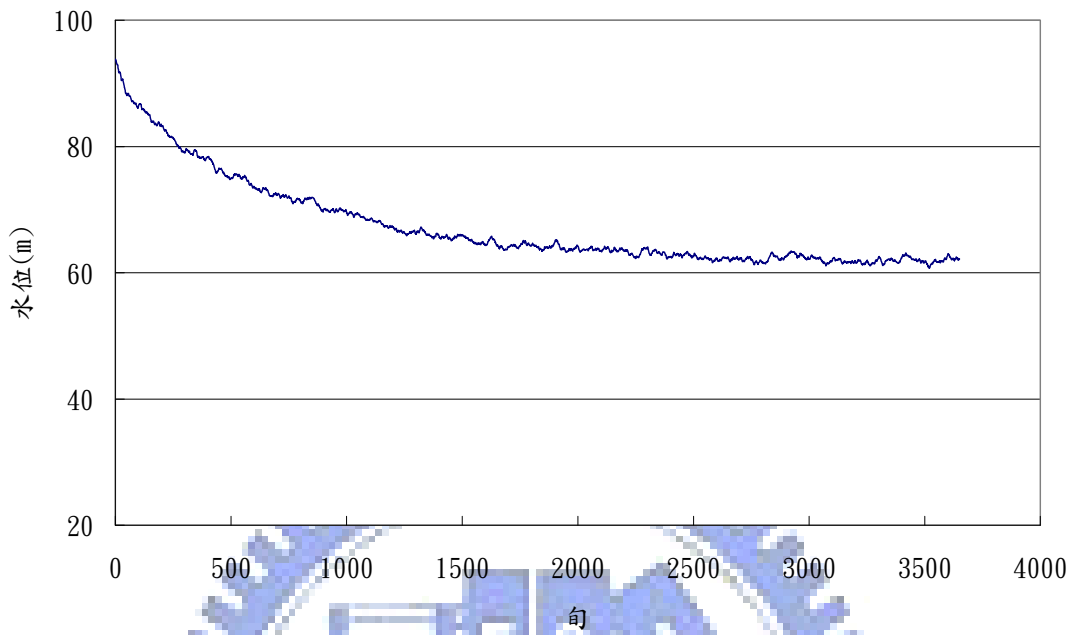


圖 3.9 訓練案例 1 號井水位圖

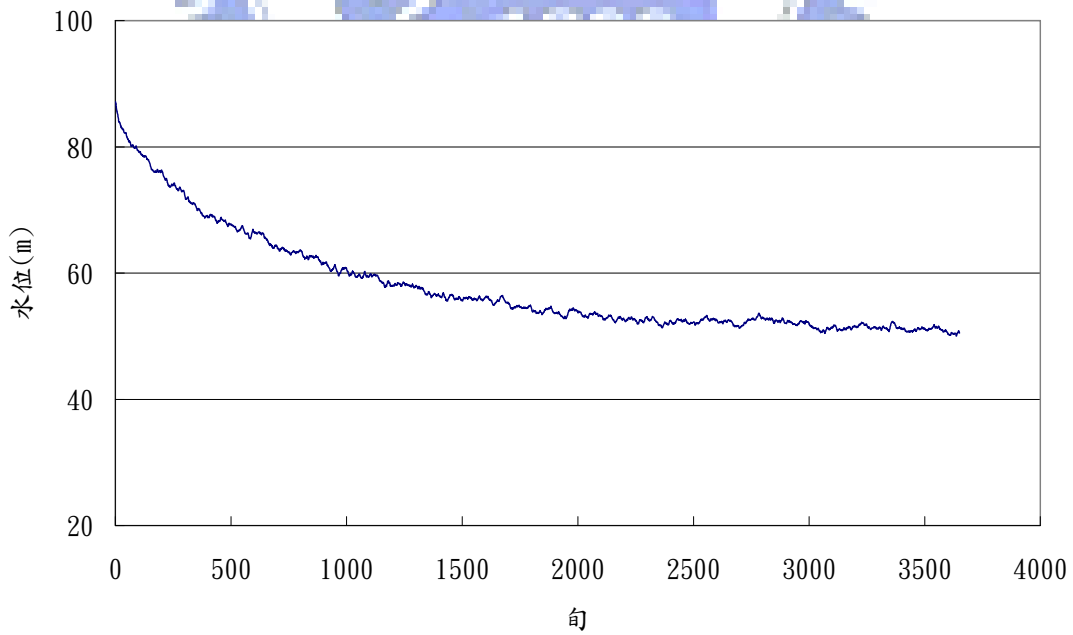


圖 3.10 訓練案例 2 號井水位圖

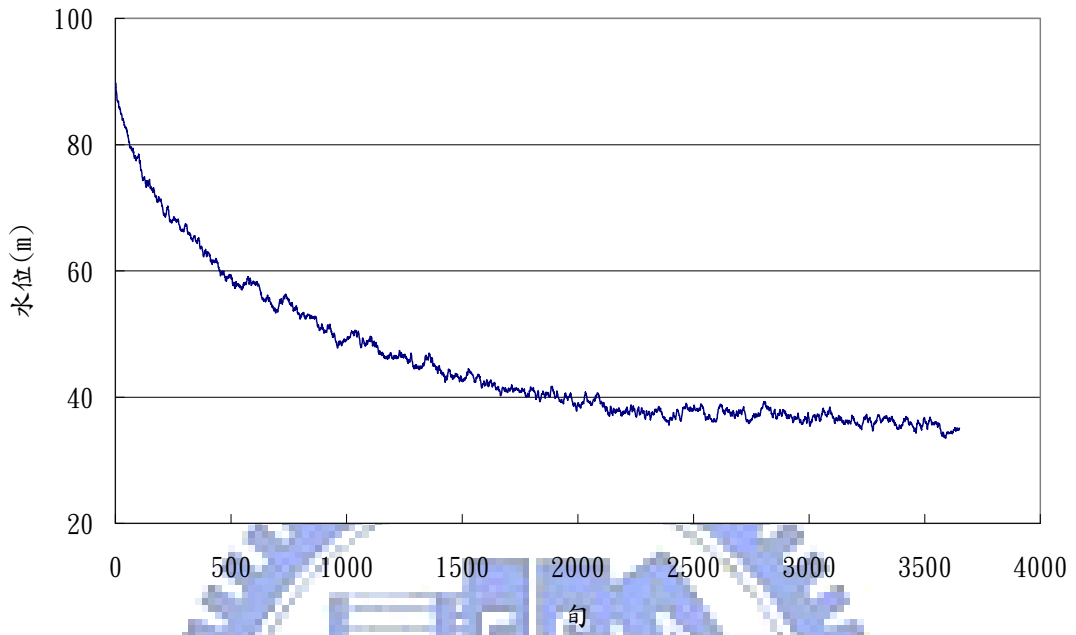


圖 3.11 訓練案例 3 號井水位圖

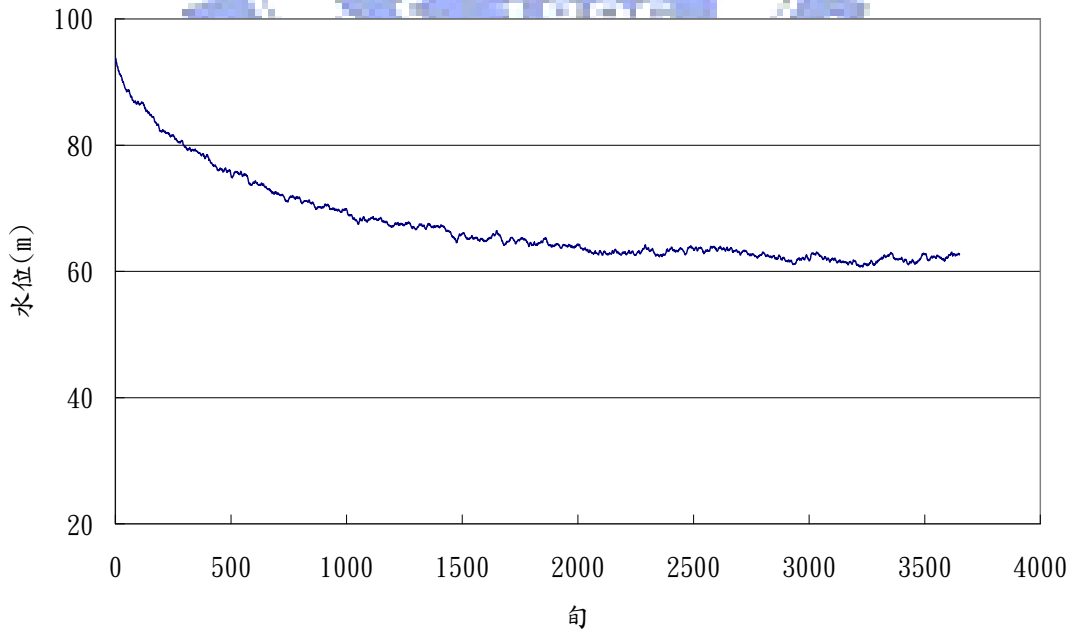


圖 3.12 訓練案例 4 號井水位圖

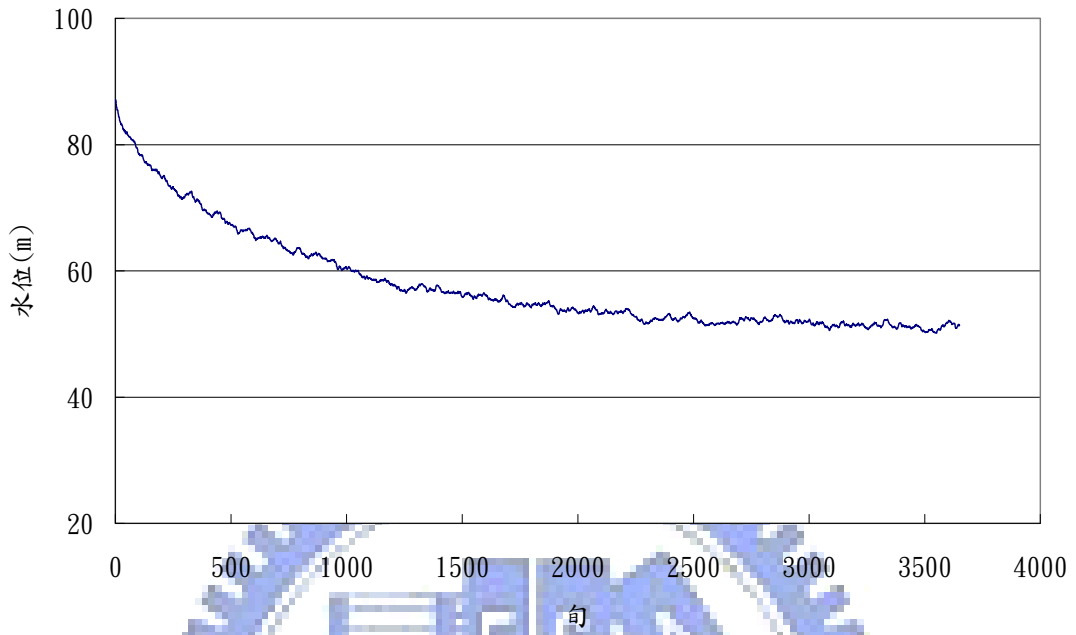


圖 3.13 訓練案例 5 號井水位圖

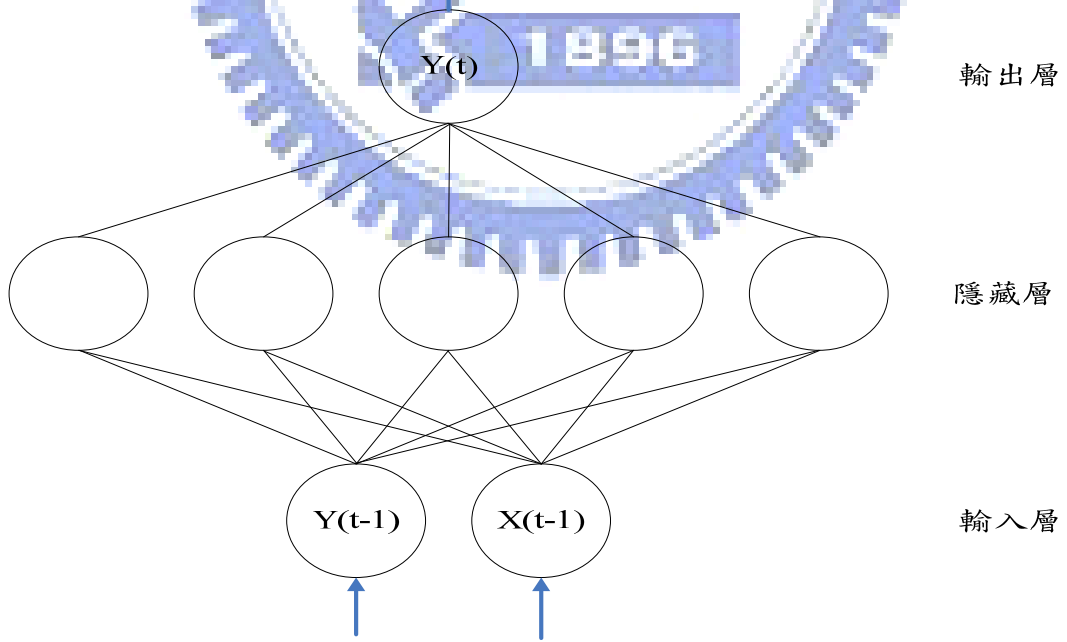


圖 3.14 類神經網路架構圖

第四章 數值案例探討

模糊推論系統可提供多樣的水量的操作方式，使水資源在運用上更顯得靈活，因此本章設計不同的案例，探討地表地下聯合營運在不同操作原則下的效能。

4.1 模擬案例介紹

不同的水量調配方式，會對於缺水情形的舒緩有所不同，故在此以不同的營運方式上做比較，共分為「地表水獨立營運」、「地表地下非偶合聯合營運」與「地表地下偶合聯合營運」三種：

4.1.1 案例分類

A. 地表水獨立營運

地表水獨立營運係以地表水庫儲存豐水期之河川水量，並在枯水期時使用這些水量，因此缺水與否與降雨不確定性有極大之關係。本形式之營運系統如圖 4.1 所示，在此為兩個不同容量之並聯水庫，不另行搭配地下水系統，亦即地下水系統供水能力為 0(cms)，案例 I 屬於此種營運方式，兩水庫操作規線如圖 4.5 與圖 4.6 所示。

B. 地表地下非偶合聯合營運

地表地下非偶和聯合營運即傳統之地表水先供應需求，當地表水系統已無法滿足需求時，再由地下水系統供給。演算上，由於已經訂出供水順序，因此可以先由地表水獨立營運模式計算後，再將缺水量帶入地下水營運模式，因此稱為非偶和形式之聯合營運。本形式之營運系統如，除了兩個不同容量之並聯水庫，還額外加入一地下水系統，其系統如圖 4.2 所示，案例 II、V、屬於此種營運方式。

在本聯合營運模式中，各時刻之地表水供應量必與前述之獨立營運模式之結果一致，而在缺水情形方面，則因為地下水系統之加入，可以降低缺水情形。

C. 地表地下偶合聯合營運

即為本研究所發展之聯合營運模式，在演算上本模式為同時考量地表水與地下水兩系統之儲水量，以模糊推論系統同時決定最水量調配方式，即地表水庫供應水量與地下水庫供應水量，因此可稱為偶和形式之聯合營運，除了兩個不同容量之並聯水庫，還額外加入一地下水系統，其系統如圖 4.3 所示，案例 III、IV、VI、VIII 屬於此種營運方式。

4.1.2 案例說明

綜合以上，本章針對上述不同營運方式共建立 8 個模擬案例，總模擬期距均為二十年，各案例介紹由表 4.1 所示，均為旬操作，以下將針對各案例詳細說明：

案例 I

如表 4.1 所示，案例 I 為地表水獨立營運模式，其系統如圖 4.1 所示，案例中 A 水庫有效容量為 7000 萬立方公尺，B 則為 5000 萬立方公尺，地表水系統為 A、B 兩水庫並聯使用，共同對一需求為 1500(萬噸/旬)的需求結點進行調配，地表水庫庫容量及入流量設計原則乃參考「新型態多水庫聯合營運最佳規線之探討-92 李志鵬」論文，地表水庫總入流量歷線圖 4.4 所示，以下各案例地表水條件與參數與案例 I 相同。

案例 II

如表 4.1 所示，案例 II 為地表地下非偶合聯合營運，其系統如圖

4.2 所示。此案例與案例 I 之差別為額外加入一地下水系統，地下水系統為前述所建立的地下水類神經網路模式，供水順序為地表水先供水，若單靠地表水系統無法滿足需求時，再由地下水系統供給，將缺額平均分配至各抽水井群，其中各井群最大抽水量為 0.3cms，亦即地下水系統最大旬供應量為 129.6 萬噸，以下各案例地下水系統皆與案例 II 相同。

案例 III

如表 4.1 所示，案例 III 為地表地下耦合營運，其系統如圖 4.3 所示。此案例與案例 II 之差別為供水方式不同，供水方式如營運方式 C(本研究之聯合營運模式)所述，為地表水系統與地下水系統同時供給，由模糊推論系統決定各系統之供給水量。本案例的地下水使用強度相較於案例 IV 為高強度地下水使用的操作方式，其模糊規則如表 4.2 所示。

案例 IV

如表 4.1 所示，案例 IV 為地表地下耦合聯合營運，其系統如圖 4.3 所示。為展現模糊控制系統具有良好的操作彈性，此案例以案例 II 地下水位最低點作為水位下限，在不低於案例 II 最低水位的情況下使用地下水，以測試使否可作出合適的操作，而案例 IV 相對於案例 III 的地下水操作策略是趨於保守的，故案例 IV 與案例 III 之差別在操作地下水的策略不同，本案例的地下水使用強度相較於案例 IV 為低強度地下水使用的操作方式，其模糊規則如表 4.3 所示。

案例 V

如表 4.1 所示，案例 V 為地表地下非耦合聯合營運，其系統如圖 4.2 所示，本案例為了測試非耦合聯合營運對於地下水使否具有良好操作方式，故此案例將各時刻需求量增加為 1600 萬噸/旬，使其增加地

下水的使用量，而地下水位下限提高為 80M，其餘地表水條件與案例 I 相同。

案例VI

如表 4.1 所示，案例VI為地表地下耦合聯合營運，其系統如圖 4.3 所示，同案例V為了測試耦合聯合營運對於地下水使否具有良好操作方式，因此案例VI之各時刻需求量與地下水位下限與案例V相同，其餘地表水條件與案例 I 相同，其模糊規則如表 4.4 所示。

案例VII

如表 4.1 所示，案例VII為地表地下耦合聯合營運，其系統如圖 4.3 所示，其地表水條件與案例 I 相同，案例VII與本研究的差異在於本研究是利用模糊推論系統串連地表地下兩系統，而案例VII則是應用遺傳演算法串連地表水與地下水兩系統，分別作為兩系統水量調配決策，其整體模式可參考「應用遺傳演算法與類神經網路於地表地下聯合營運-95 黃浚璋」。

案例VIII

如表 4.1 所示，案例VIII為地表地下耦合聯合營運，其系統如圖 4.3 所示，其地表水條件與案例 I 相同，此案例與案例VII之差異為操作方式不同，其系統之供給水量是由模糊推論系統決定，即本研究聯合營運模式，模糊規則如表 4.5 所示。

4.2 模擬案例成果展示

案例 I

案例 I 模擬結果如表 4.6 所示，旬缺水指數為 3.33，年缺水指數為 1.28，缺水旬數為 281 旬，A、B 兩水庫合計旬平均供水量為 1345.25

萬立方公尺，為嚴重缺水情形，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.7，而整體系統供水情形如圖 4.23 所示。

案例 II

案例 II 模擬結果如表 4.7 所示，旬缺水指數為 1.84，年缺水指數為 0.61，缺水旬數為 262 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.8，而整體系統供水情形如圖 4.24 所示。地表水旬平均供水量為 1345.25 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 49.77 萬立方公尺，相較於案例 I 雖然缺水情形有所改善，但受限於模式的操作方式，地下水系統在發生缺旱時才啟動，一旦缺旱發生時往往需求量遠高於其供應能力，因此對於缺水情形改善有限，其地下水平均水位如圖 4.16 所示。

案例 III

案例 III 擬結果如表 4.8 所示，旬缺水指數為 1.44，年缺水指數為 0.45，缺水旬數為 234 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.9，而整體系統供水情形如圖 4.25 所示。地表水旬平均供水量為 1343.38 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 68.51 萬立方公尺，在模糊推論系統的操作方式下，相較於案例 II，雖然地下水系統有相同之最大供水限制，但地下水系統之平均供水量較案例 II 多，使得缺水指數(SI)有更佳的表現，其地下水平均水位如圖 4.17 所示。

案例 IV

案例 IV 模擬結果如表 4.9 所示，旬缺水指數為 2.09，年缺水指數為 0.59，缺水旬數為 250 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.10，而整體系統供水情形如圖 4.26 所示。地表水旬平均供水量為 1343.71 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 54.73 萬立方公尺，相較於案例 II，年缺水指數(SI)的表現近乎相同，其平均地下水位可控制高於案

例 II 的最低平均地下水位，而地下水系統之平均供水量較案例 III 多，造成缺水旬數較案例 III 少，其地下水平均水位如圖 4.18 所示。

案例 V

案例 V 模擬結果如表 4.10 所示，旬缺水指數為 5.27 年缺水指數為 1.83，缺水旬數為 313 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.11 所示，而整體系統供水情形如圖 4.27 所示。地表水旬平均供水量為 1347.77 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 56.80 萬立方公尺。由於需水量提高至 1600 萬立方公尺，使得地下水使用量增加，造成平均地下水位低於地下水位下限，其地下水平均水位如圖 4.19 所示。

案例 VI

案例 VI 模擬結果如表 4.11 所示，旬缺水指數為 5.01，年缺水指數為 1.84，缺水旬數為 304 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.12，而整體系統供水情形如圖 4.28 所示。地表水旬平均供水量為 1347.47 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 58.33 萬立方公尺。相較於案例 V，各時刻平均地下水位下均可控制在水位下限之上，其地下水平均水位如圖 4.20 所示，可顯示出地表地下偶合聯合營運的操作方式可因應地下水的多寡進行合適的操作，也可顯示出有較佳之操作彈性。

案例 VII

案例 VII 模擬結果如表 4.12 所示，旬缺水指數為 1.50，年缺水指數為 0.48，缺水旬數為 241 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.13，而整體系統供水情形如圖 4.29 所示。地表水旬平均供水量為 1345.07 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 73.44 萬立方公尺，地下水平均水位如圖 4.21 所示，其計算時間花費 43222.40 秒。

案例VIII

案例VIII模擬結果如表 4.13 所示，旬缺水指數為 1.49，年缺水指數為 0.48，缺水旬數為 239 旬，系統缺水與地下水抽水情形如圖 4.14，而整體系統供水情形如圖 4.30 所示。地表水旬平均供水量為 1343.68 萬立方公尺，地下水旬平均供水量為 65.60 萬立方公尺，地下水平均水位如圖 4.22 所示，其完成整個時刻的模擬計算時間花費 56.33 秒。

4.3 模擬案例成果分析

由 4.2 節所展示的案例，其成果可歸納為以下四點：

(1) 地表地下聯合營運可有效的降低缺水量

(a)比較案例 I 與 II 之模擬結果，如表 4.14 所示，案例 II 年缺水指數降低 52.34%、缺水旬數減少 19 旬，且由圖 4.15 兩案例缺水分布比較示意圖所示，案例 II 可明顯看出減少案例 I 之缺水狀況。

(b)由表 4.14 可知，增加地下水系統後，系統供應水量增加 3.70%，由圖 4.23 也可得知地下水所供給的水量所佔比例不大，但案例 II 相較案例 I，其缺水指數大幅降低 52.34%，雖然地下水量增加少量的系統供應水量，卻可使缺水情形大幅改善。

(2) 模糊推論系統可有效的降尖峰缺水量

在營運方式同樣是地表地下聯合營運下，比較兩種不同操作方式，即傳統的地表水先供地下水補不足與地表地下模糊控制模式，分別為案例 II 與案例 III 之模擬結果，如表 4.15 所示，案例 III 年缺水指數降低 26.23%、缺水旬數減少 28 旬，其原因為傳統非偶合聯合營運受限於固定的操作方式，地下水系統只能在地表水發生缺旱時啟動，往往無法有

效降低缺水情形；而偶合聯合營運可在地表水發生缺旱的前幾個時刻啟動地下水系統，如圖 4.8 所示，提早啟動地下水系統可將地下水預先儲存於地表水庫，因此當發生缺水時，可有效將低缺水情形。再由圖 4.8 相較於圖 4.7，可看出圖 4.8 之尖峰缺水量的低於圖 4.7，由此可知將地下水預先儲存於地表水庫可有效降低尖峰缺水量。

(3) 模糊推論系統可依地下水的多寡進行合適的水量調配

(a)在案例 II 與案例 III 中，年缺水指數為表現各為 0.61 與 0.45，而案例 III 缺水旬數相較於案例 II 減少 28 旬，案例 III 相較於案例 II 固定的地下水運用模式，顯示出模糊控制對於地下水的運用可作積極的水量運用，以有效的減緩缺水情形；而在案例 II 與案例 IV 中，年缺水指數為表現各為 0.61 與 0.59，而案例 IV 缺水旬數相較於案例 II 減少 12 旬，由圖 4.18 可知，案例 IV 以模糊控制可將地下水位控制於案例 II 地下水位最低點之上，顯示出模糊控制對於地下水的運用可進行合適的水量調配。

綜和案例 II、III、IV 顯示，藉由模糊控制可視地下水位狀態適度調整系統供應水量，案例 III 相較於案例 II，顯示出當地下水資源足夠時，可抽取較大量的地下水；而案例 IV 較於案例 II 則顯示，當地下水資源不足時則抽取較少量的下水量，將其控制在一定水位之上。

(b)在需求水量增加的情況下，案例 V 與案例 VI 為比較非偶合與偶合聯合營運模式何者為合適的操作，由圖 4.19 可知，案例 V 的傳統非偶合聯合營運的地下水位已顯示有低於地下水位下限的現象，反觀案例 VI 偶合聯合營運的地下水位(圖 4.20)，對於地下水位有著良好的控制，均能高於地下水位下限，更能顯示模糊控制可因應不同的需求水量，為供水策略作出適當的改變。

結合以上兩種類型案例，顯示出模糊控制可視地下水量的多寡，進行積極的水量運用或是保守的水量調配，提供更有彈性之地下水供水策略之決策，使水源可在有效管理下適量的運用。

(4) 模糊推論系統與優選法計算量的比較

案例VII以遺傳演算法串連地表水與地下水兩系統，地表水源與地下水源間之調配原則採用「指標平衡」概念；案例VIII則是以模糊推論系統串連地表水與地下水兩系統，並以模糊推論系統作為地表水源與地下水源間之調配原則。在模擬 20 年 720 旬情況下，由表 4.16 可知，兩者年 SI、缺水旬數的表現上相距不大，但在計算時間上相差數百倍。若考量與最佳化模式結合時之計算量，由於遺傳演算法是以大量族群進行繁衍，如以前一小節案例VII地表地下聯合營運案例為例，收斂條件設定為連續 20 代後找不到更好的解則視為收斂，也就是每一時刻至少模擬 20 代以上，而每一代以 50 條染色體去搜尋最佳解，因此地下水模擬模式每一個時刻至少要模擬 1000 次以上，在本研究中以 AMD Athlon 1.47 GHz，512MB 的 RAM 之電腦進行計算，整體計算時間為 43222.40 秒，即 12.01 小時，平均個時刻花費 60.03 秒求解，而模糊推論系統模式整體計算時間為 56.33 秒，平均個時刻花費 0.08 秒求解。運用模糊推論系統相較於最佳化模式將可大幅降低計算量與節省計算時間。

另外，規線操作為水庫常用的操作方式，其訂定必須仰賴豐富的經驗，若地下水的操作若欲延用規線操作的方式，則將受其非線性特性，造成操作規線不易訂定，若以模糊規則的方式決定地下水的操作方式，則可解決上述之問題，只要訂定合適的模糊規則，即可對地下水作有效的運用，故以模糊規則操作即可解決地下水操作規線不易訂定之問題。

表 4.1 案例介紹表

| 案例編號 | 營運方式 | 需求水量 (萬立方公尺) |
|------|---------------------------|-----------------|
| I | 地表水獨立營運 | 1500/旬 |
| II | 地表地下 非耦合聯合營運 | |
| III | 地表地下耦合聯合營運 (高強度地下水使用) | |
| IV | 地表地下耦合聯合營運 (低強度地下水使用) | |
| V | 地表地下 非耦合聯合營運 | 1600/旬 |
| VI | 地表地下 耦合聯合營運 | |
| VII | 地表地下耦合聯合營運 (以遺傳演算法串連) | 1500/旬 |
| VIII | 地表地下耦合聯合營運 (以模糊推論系統串連) | |

表 4.2 案例III模糊規則

| 地表水可利用水量 地下水位 | NB | NM | M | PM | PB |
|------------------|----|----|----|----|----|
| NB | NM | NM | NM | NM | NM |
| NM | PM | PM | NM | NM | NM |
| M | PM | PM | NM | NM | NM |
| PM | PM | PM | NM | NM | NM |
| PB | PM | PM | NM | NM | NM |

表 4.3 案例IV模糊規則

| | | | | | |
|------------------|----|----|----|----|----|
| 地表水可利用水量 地下水位 | NB | NM | M | PM | PB |
| NB | NS | NS | NM | NM | NM |
| NM | PS | PS | NM | NM | NM |
| M | PS | PS | NM | NM | NM |
| PM | PS | PS | NM | NM | NM |
| PB | PS | PS | NM | NM | NM |

表 4.4 案例VI模糊規則

| | | | | | |
|------------------|----|----|----|----|----|
| 地表水可利用水量 地下水位 | NB | NM | M | PM | PB |
| NB | PS | NM | NM | NM | NM |
| NM | PM | PM | NM | NM | NM |
| M | PM | PM | NM | NM | NM |
| PM | PM | PM | NM | NM | NM |
| PB | PM | PM | NM | NM | NM |

表 4.5 案例VIII模糊規則

| | | | | | |
|------------------|----|----|----|----|----|
| 地表水可利用水量 地下水位 | NB | NM | M | PM | PB |
| NB | PS | NM | NM | NM | NM |
| NM | PM | PS | NM | NM | NM |
| M | PM | PM | NM | NM | NM |
| PM | PM | PM | NM | NM | NM |
| PB | PM | PM | NM | NM | NM |

表 4.6 案例 I 之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 3.33 | |
| 年計劃缺水指數 | | 1.28 | |
| 缺水旬數 | | 281 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48429.10 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.25 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 0.00 |
| | | 旬平均供水量 | 0.00 |

表 4.7 案例 II 之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.84 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.61 | |
| 缺水旬數 | | 262 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表系統 | 年平均供水量 | 48429.10 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.25 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 1791.56 |
| | | 旬平均供水量 | 49.77 |

表 4.8 案例III之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.44 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.45 | |
| 缺水旬數 | | 234 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48361.95 |
| | | 旬平均供水量 | 1343.38 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2453.51 |
| | | 旬平均供水量 | 68.15 |

表 4.9 案例IV之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 2.09 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.59 | |
| 缺水旬數 | | 250 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48373.45 |
| | | 旬平均供水量 | 1343.71 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 1970.43 |
| | | 旬平均供水量 | 54.73 |

表 4.10 案例V之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|---------|
| 旬計劃缺水指數 | | 5.27 | |
| 年計劃缺水指數 | | 1.83 | |
| 缺水旬數 | | 313 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 57600【1600/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48519.6 |
| | | 旬平均供水量 | 1347.77 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2044.84 |
| | | 旬平均供水量 | 56.80 |

表 4.11 案例VI之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 5.01 | |
| 年計劃缺水指數 | | 1.84 | |
| 缺水旬數 | | 304 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 57600【1600/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48508.83 |
| | | 旬平均供水量 | 1347.47 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2099.81 |
| | | 旬平均供水量 | 58.33 |

表 4.12 案例VII之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.50 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.48 | |
| 缺水旬數 | | 241 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48422.62 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.07 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2643.77 |
| | | 旬平均供水量 | 73.44 |

表 4.13 案例VIII之模擬結果

| | | | |
|-------------------|-------|---------------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.49 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.48 | |
| 缺水旬數 | | 239 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000【1500/旬】 | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48372.49 |
| | | 旬平均供水量 | 1343.68 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2361.48 |
| | | 旬平均供水量 | 65.60 |

表 4.14 案例 I 與案例 II 結果比較表

| 案例編號 | | 案例 I | 案例 II | |
|-------------------|-------|---------------|---------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 3.33 | 1.84 | |
| 年計劃缺水指數 | | 1.28 | 0.61 | |
| 缺水旬數 | | 281 | 262 | |
| 年計劃缺水指數改善比例 | | 0 | -52.34 | |
| 地下水系統所增加整體系統的供水比例 | | 0 | 3.70 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 5400 【1500/旬】 | | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48429.1 | 48429.10 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.25 | 1345.25 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 0 | 1791.56 |
| | | 旬平均供水量 | 0 | 49.77 |

表 4.15 案例Ⅱ與案例Ⅲ結果比較表

| 案例編號 | | 案例Ⅱ | 案例Ⅲ | |
|-------------------|-------|--------------|----------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.84 | 1.44 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.61 | 0.45 | |
| 缺水旬數 | | 262 | 234 | |
| 年計劃缺水指數改善比例 | | 0 | -26.23 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 5400【1500/旬】 | | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48429.10 | 48361.95 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.25 | 1343.38 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 1791.56 | 2453.51 |
| | | 旬平均供水量 | 49.77 | 68.15 |

表 4.16 案例VII與案例VIII結果比較表

| 案例編號 | | VII | VIII | |
|-------------------|-------|----------------|----------|----------|
| 旬計劃缺水指數 | | 1.50 | 1.49 | |
| 年計劃缺水指數 | | 0.48 | 0.48 | |
| 缺水旬數 | | 241 | 239 | |
| 需求節點年計畫需求量(萬立方公尺) | | 54000 【1500/旬】 | | |
| 供水量(萬立方公尺) | 地表水系統 | 年平均供水量 | 48422.62 | 48372.49 |
| | | 旬平均供水量 | 1345.07 | 1343.68 |
| | 地下水系統 | 年平均供水量 | 2643.77 | 2361.48 |
| | | 旬平均供水量 | 73.44 | 65.60 |
| 計算花費時間(秒) | | 43222.40 | 56.33 | |

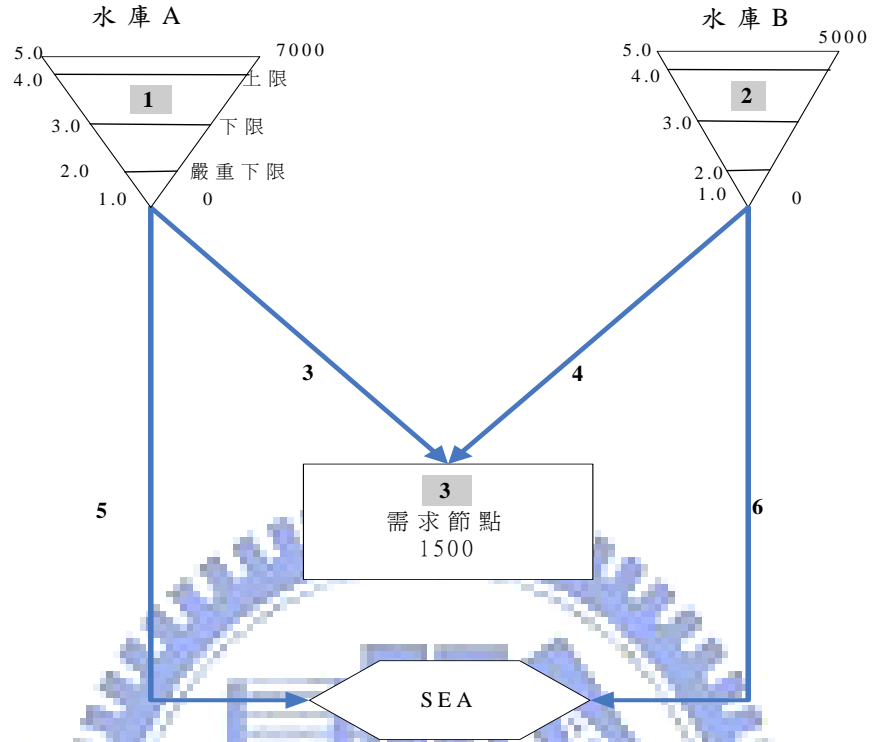


圖 4.1 地表水營運系統圖

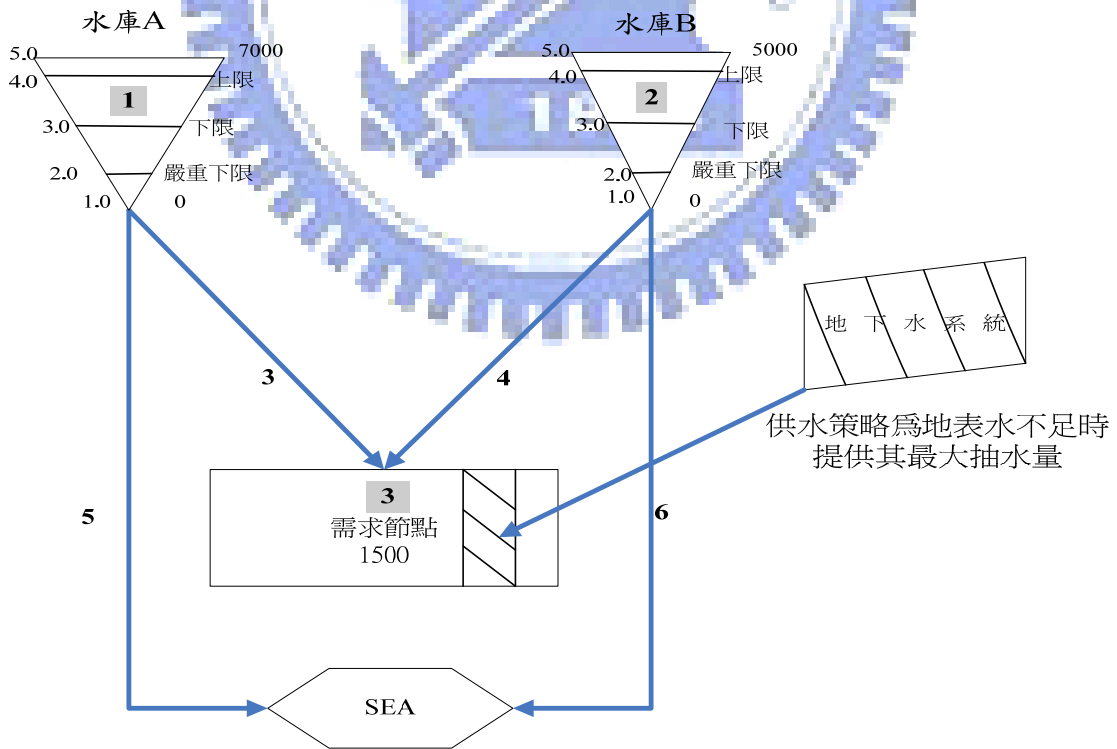


圖 4.2 地表地下聯合營運系統圖(1)(地表水先供)

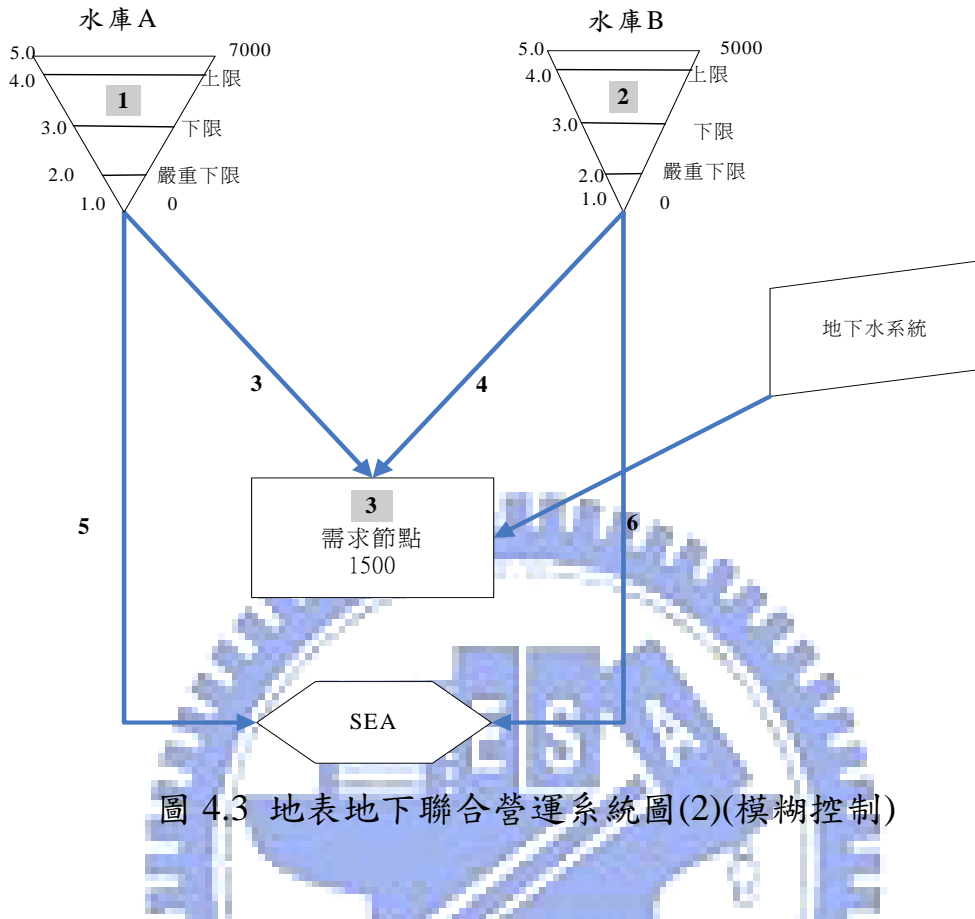


圖 4.3 地表地下聯合營運系統圖(2)(模糊控制)

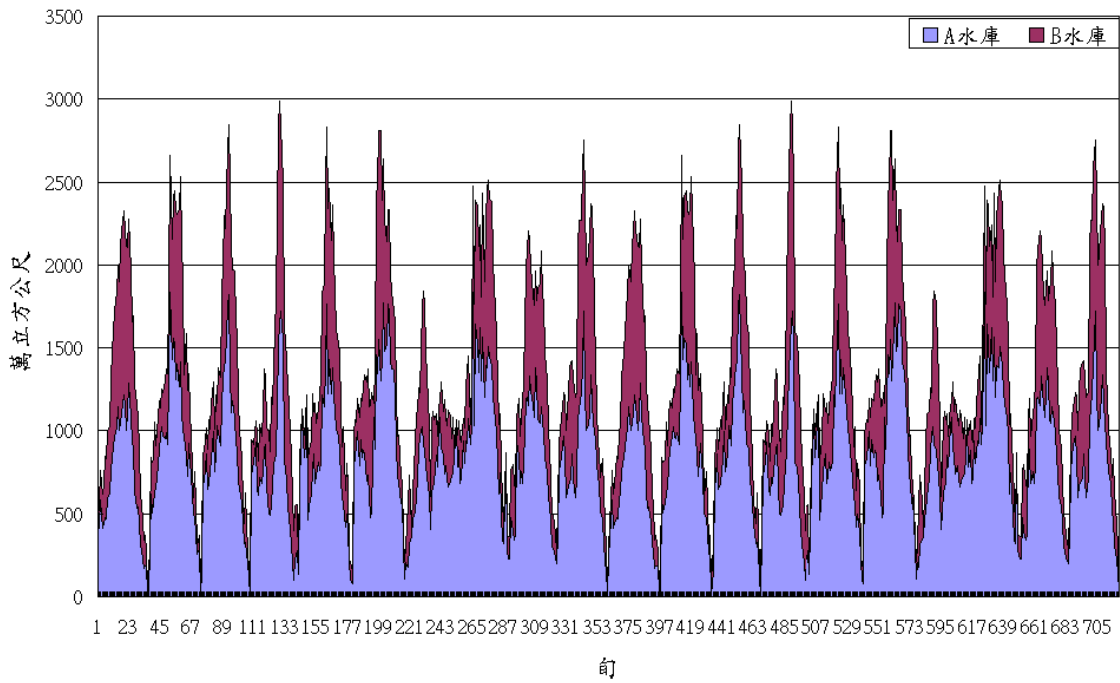


圖 4.4 水庫總入流量歷線圖

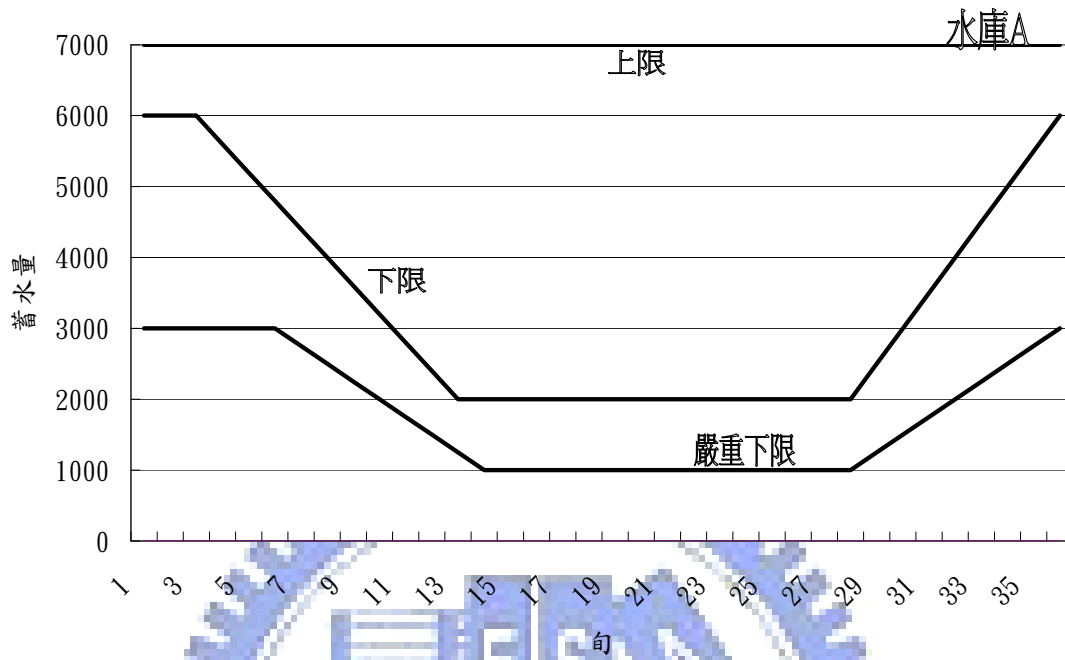


圖 4.5 水庫 A 操作規線圖

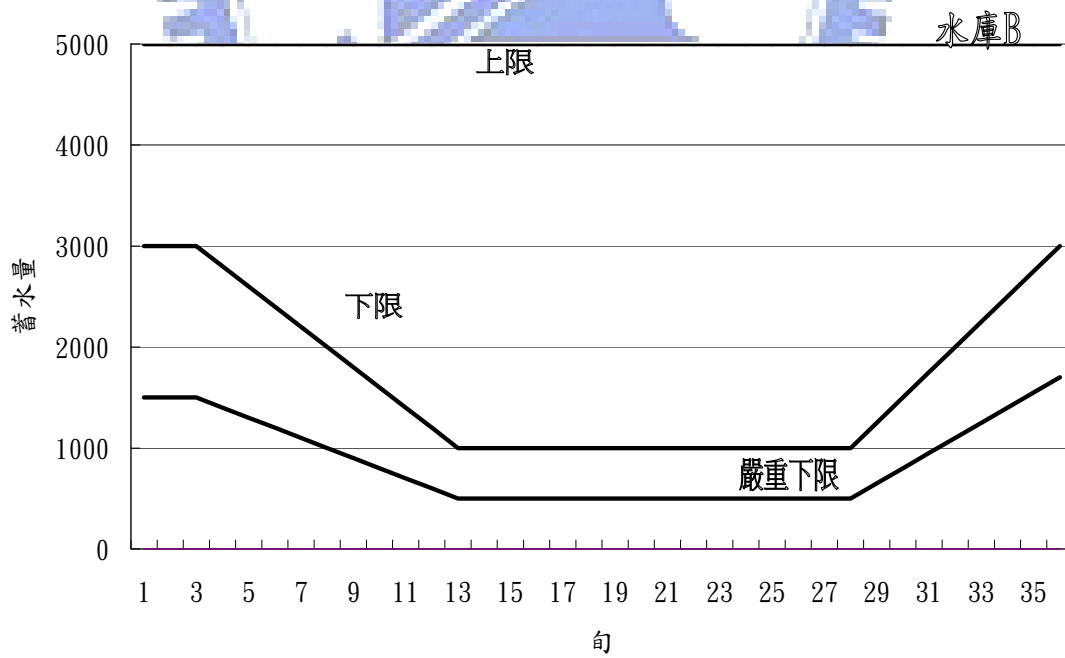


圖 4.6 水庫 B 操作規線圖

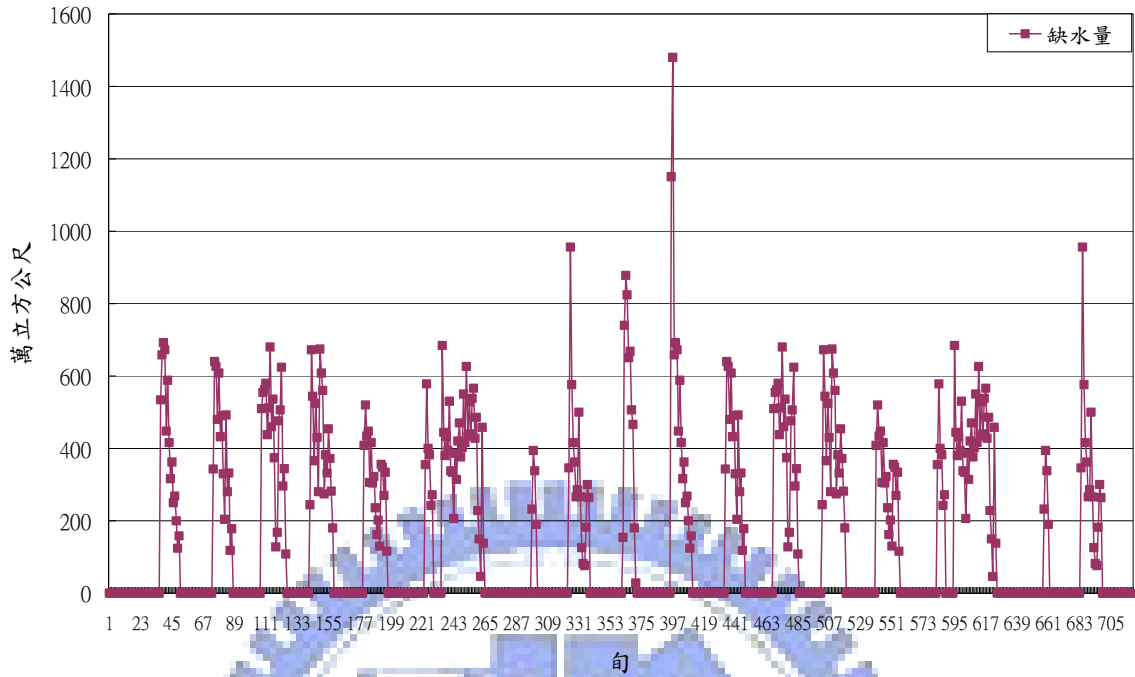


圖 4.7 案例 I 需求缺水量

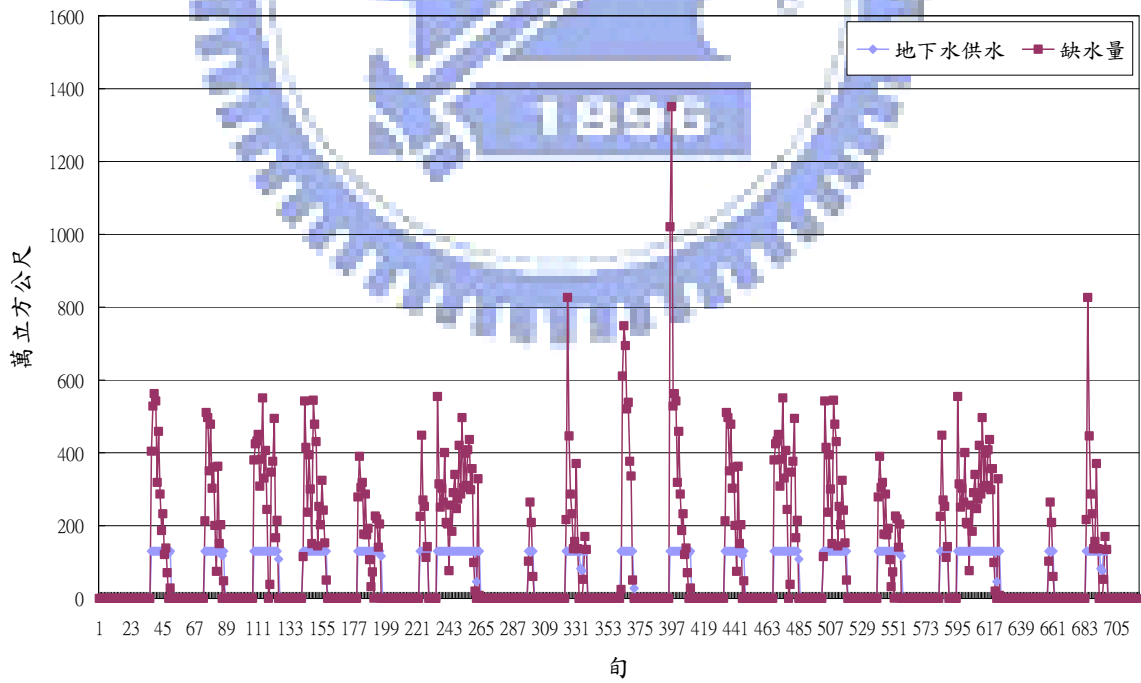


圖 4.8 案例 II 需求缺水量與地下水抽水情形圖

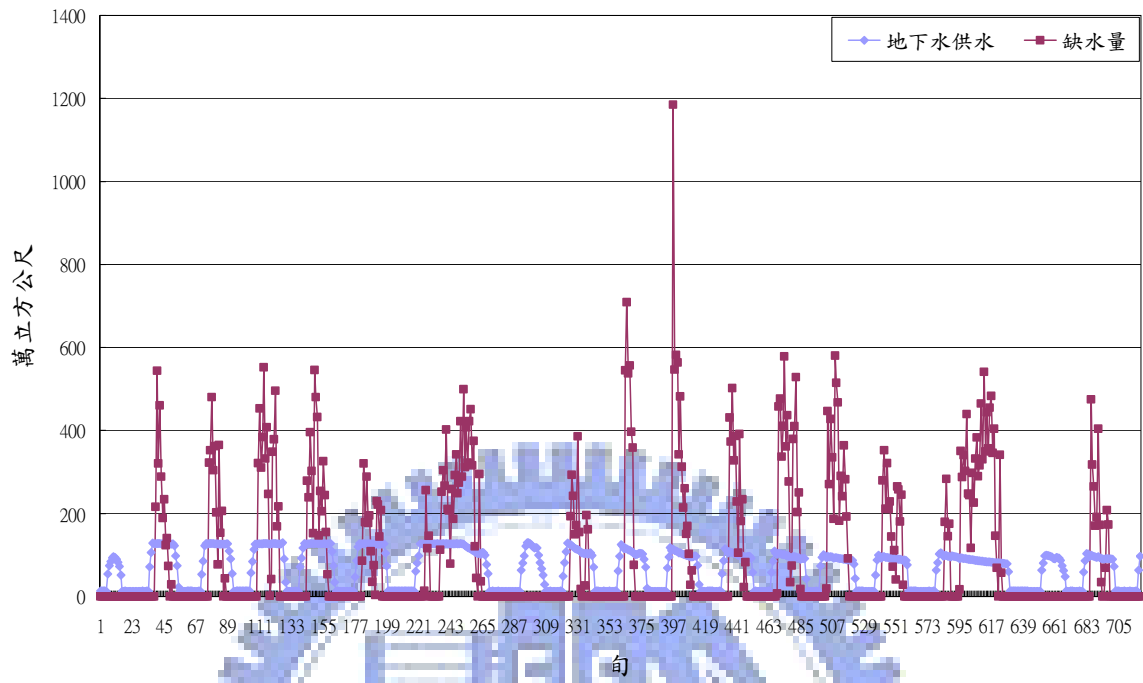


圖 4.9 案例III需求缺水量與地下水抽水情形圖

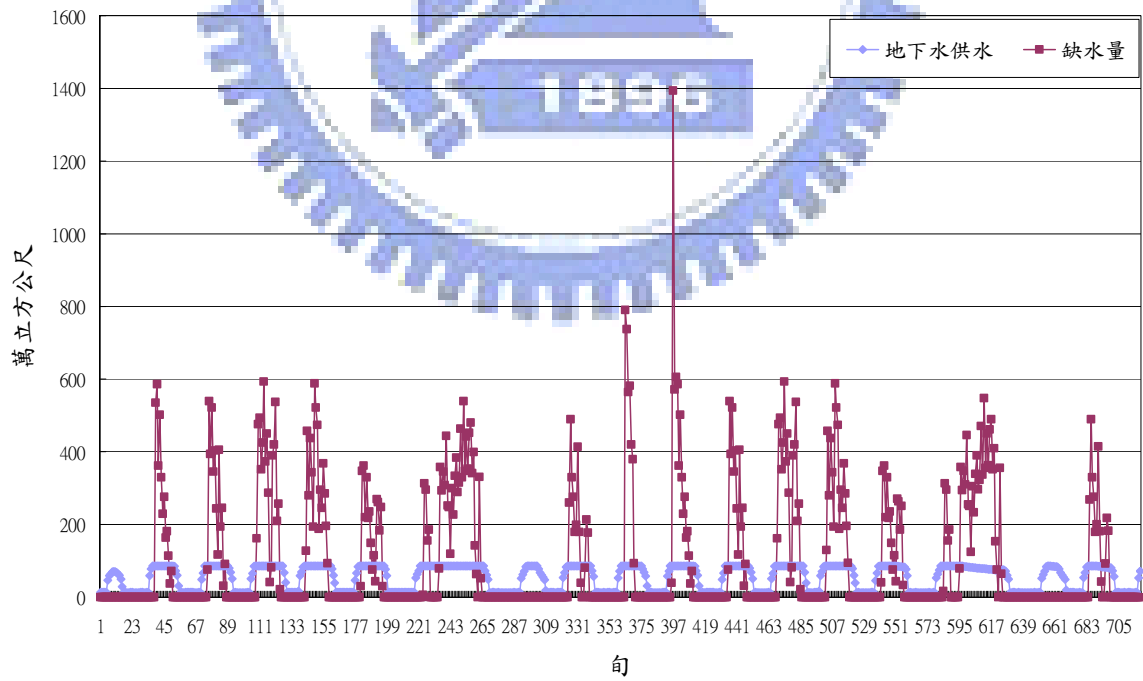


圖 4.10 案例IV需求缺水量與地下水抽水情形圖

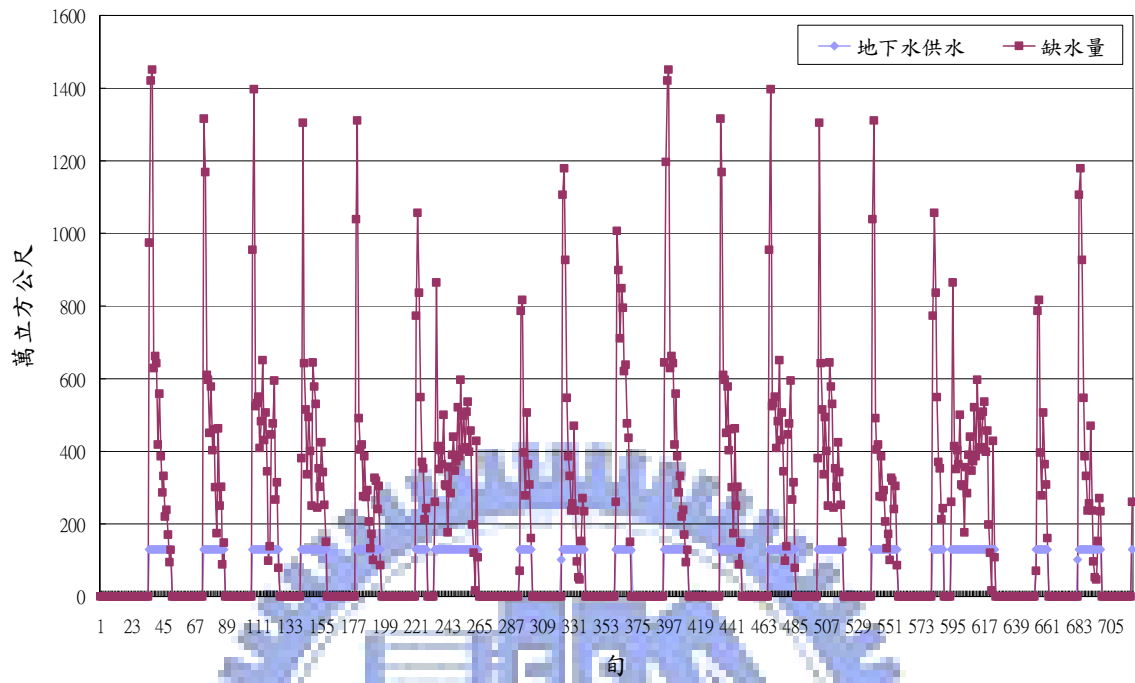


圖 4.11 案例V需求缺水量與地下水抽水情形圖

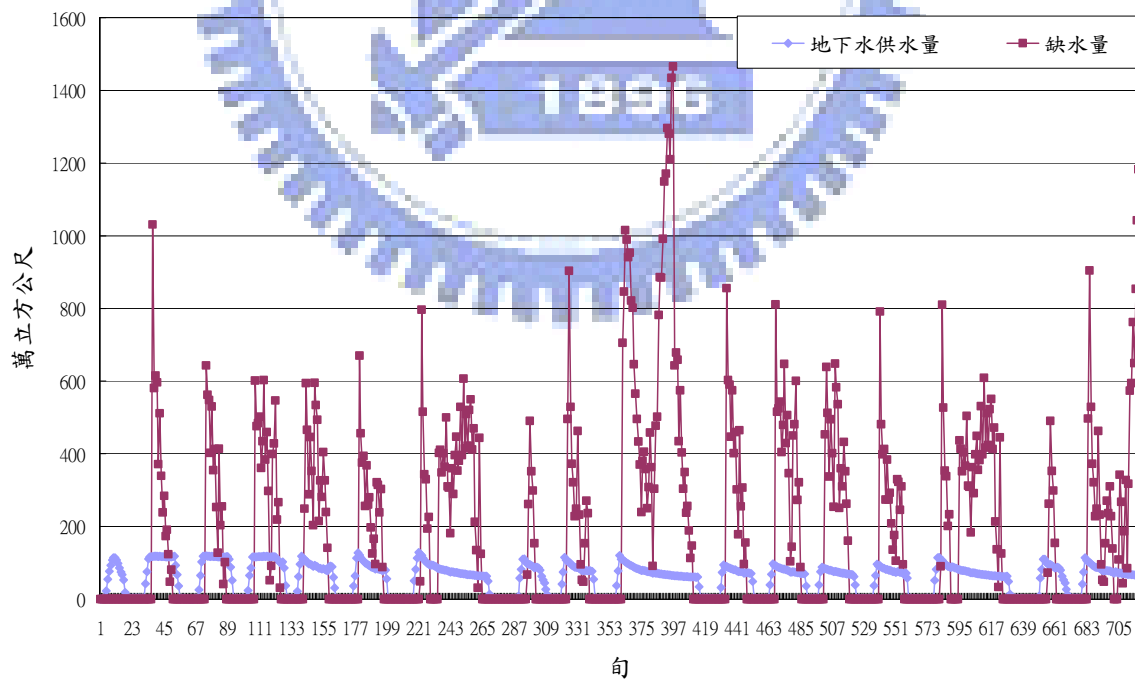


圖 4.12 案例VI需求缺水量與地下水抽水情形圖

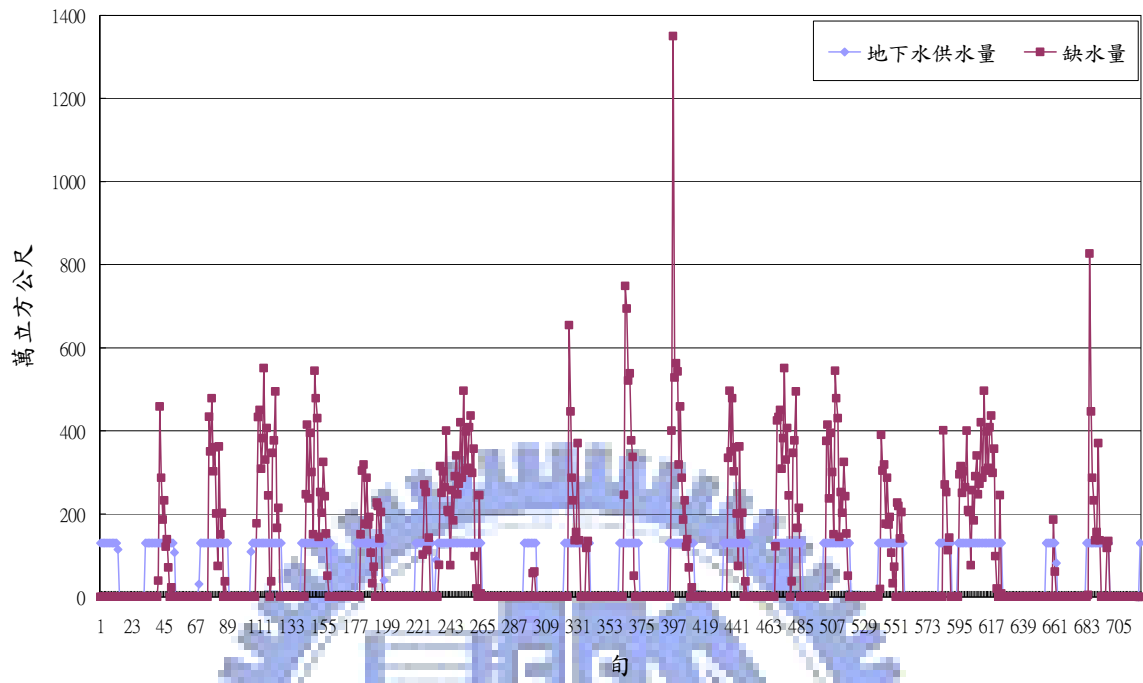


圖 4.13 案例VII需求缺水量與地下水抽水情形圖

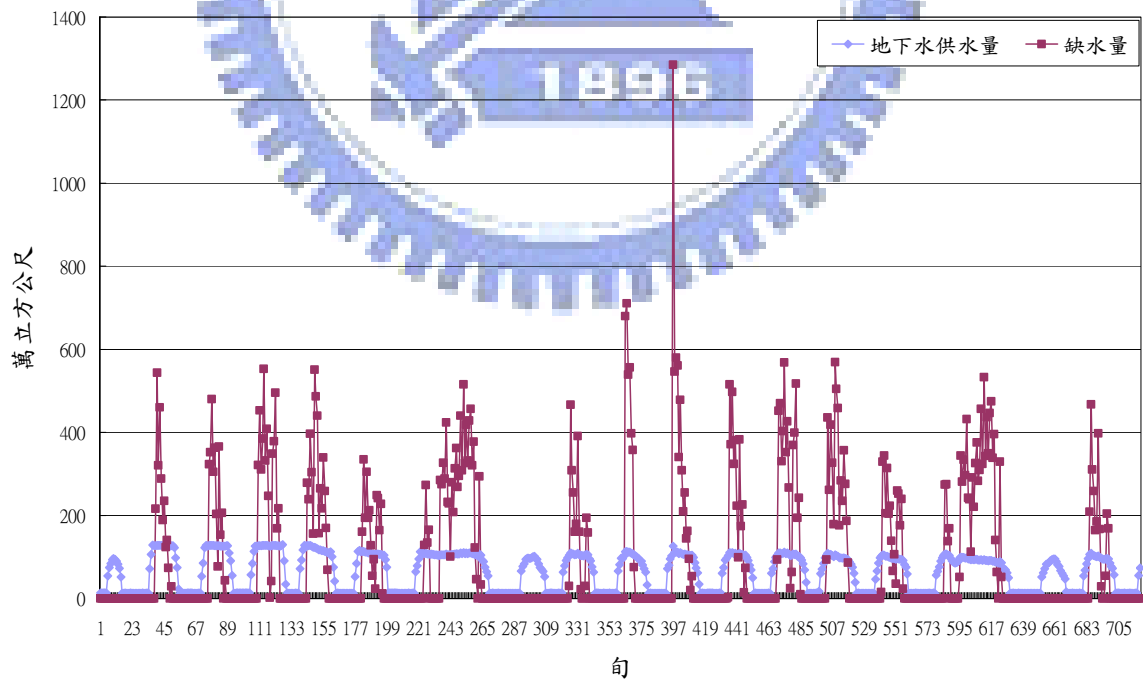


圖 4.14 案例VIII需求缺水量與地下水抽水情形圖

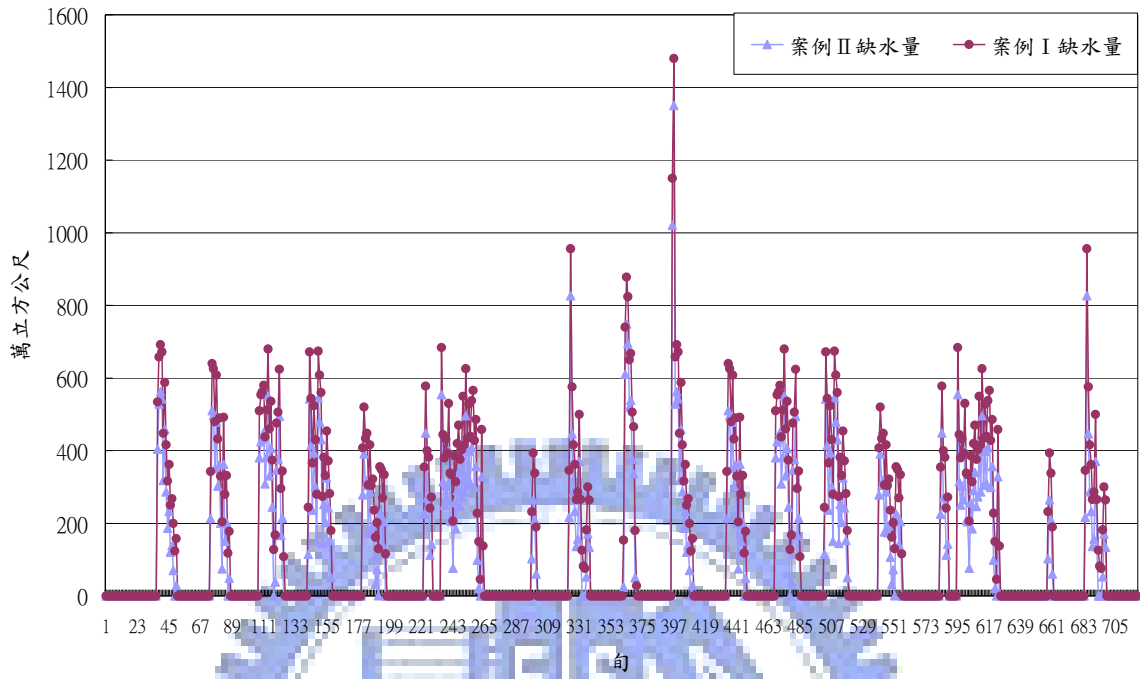


圖 4.15 案例 I 與案例 II 缺水情形比較圖

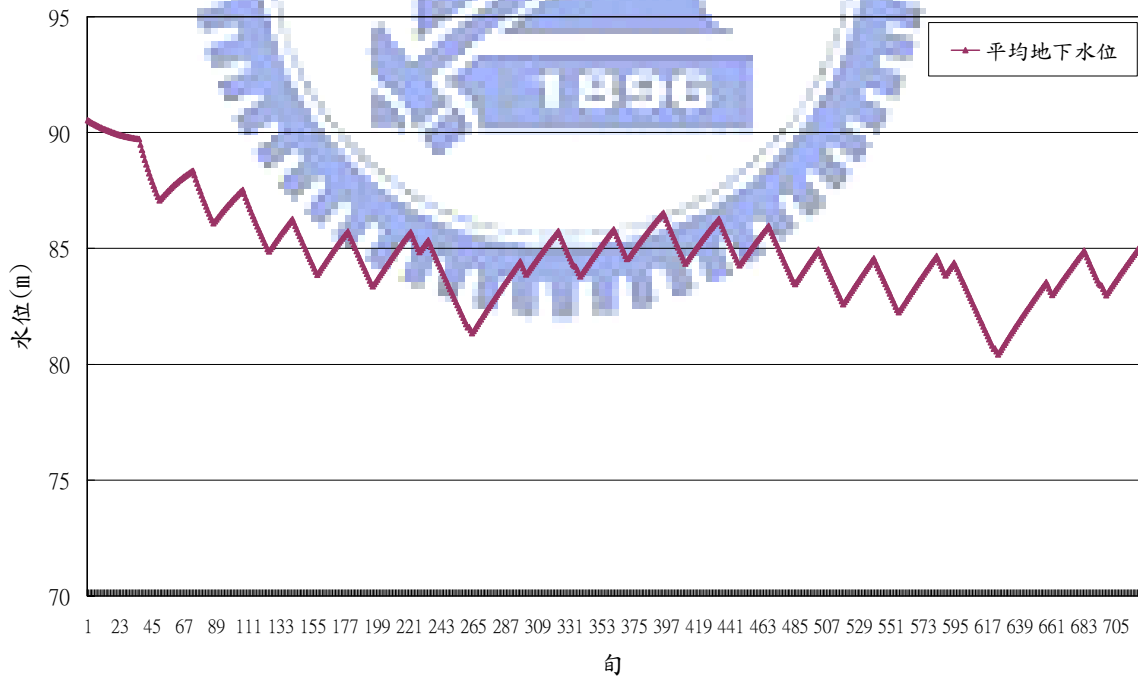


圖 4.16 案例 II 平均地下水位

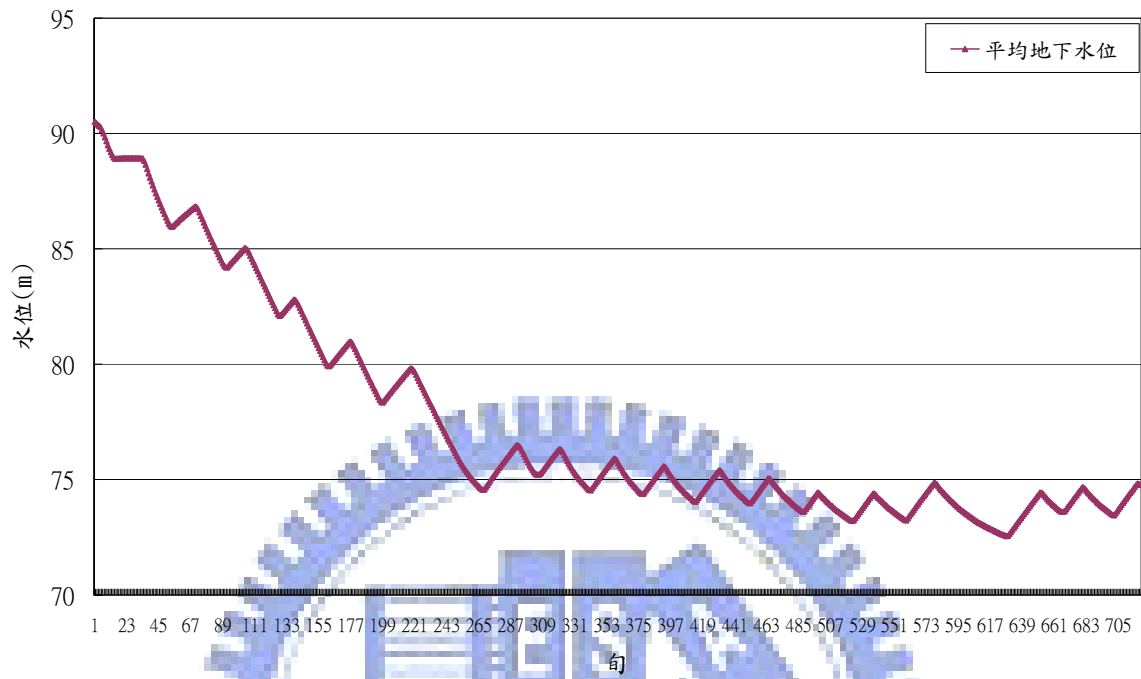


圖 4.17 案例 III 平均地下水位

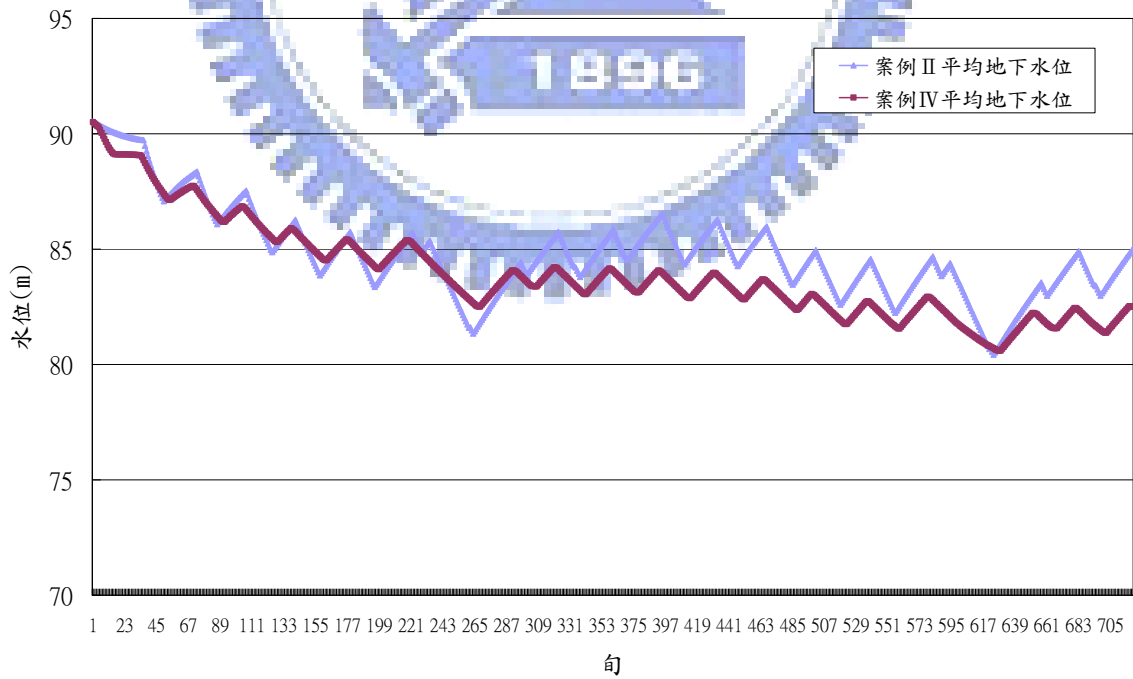


圖 4.18 案例 II 與案例 IV 平均地下水位比較圖

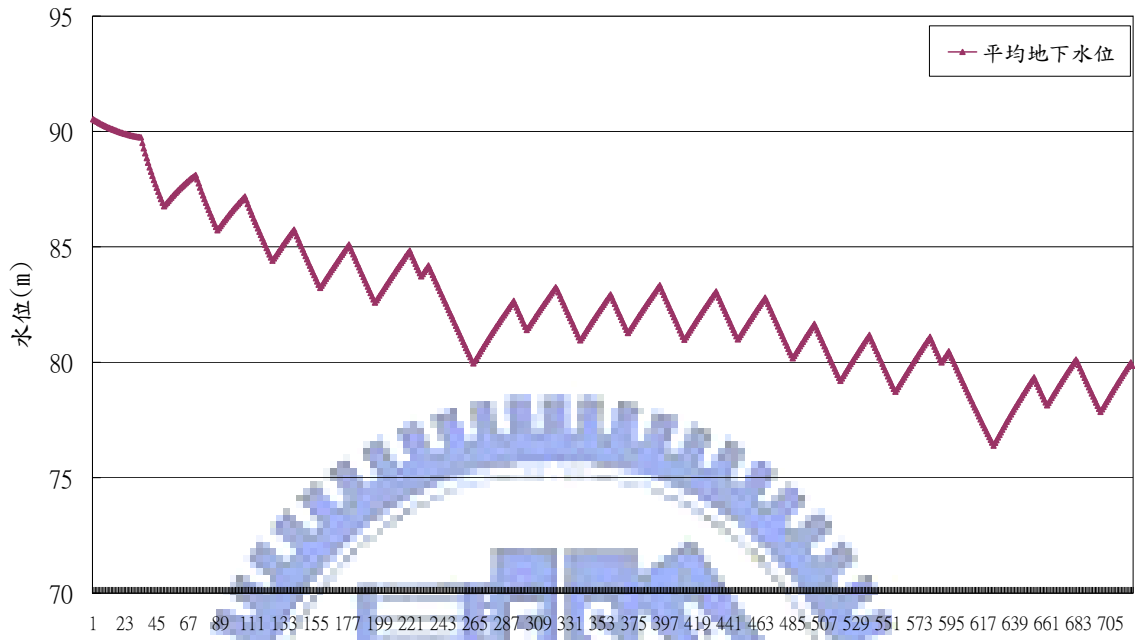


圖 4.19 案例V 平均地下水位圖

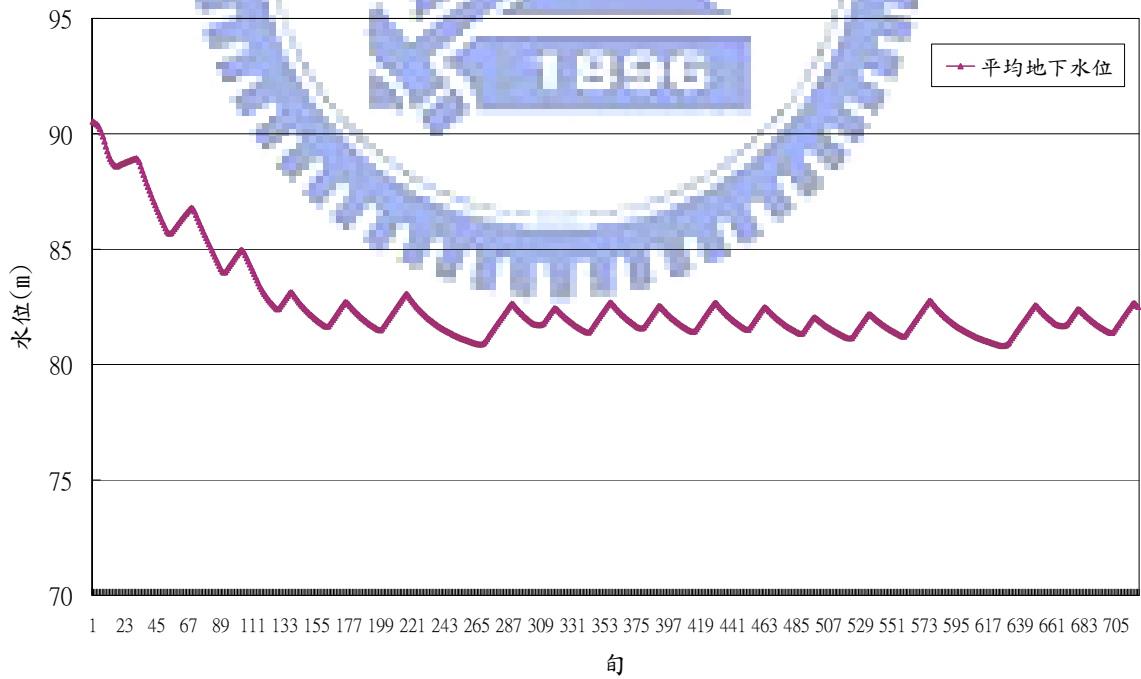


圖 4.20 案例VI 平均地下水位圖

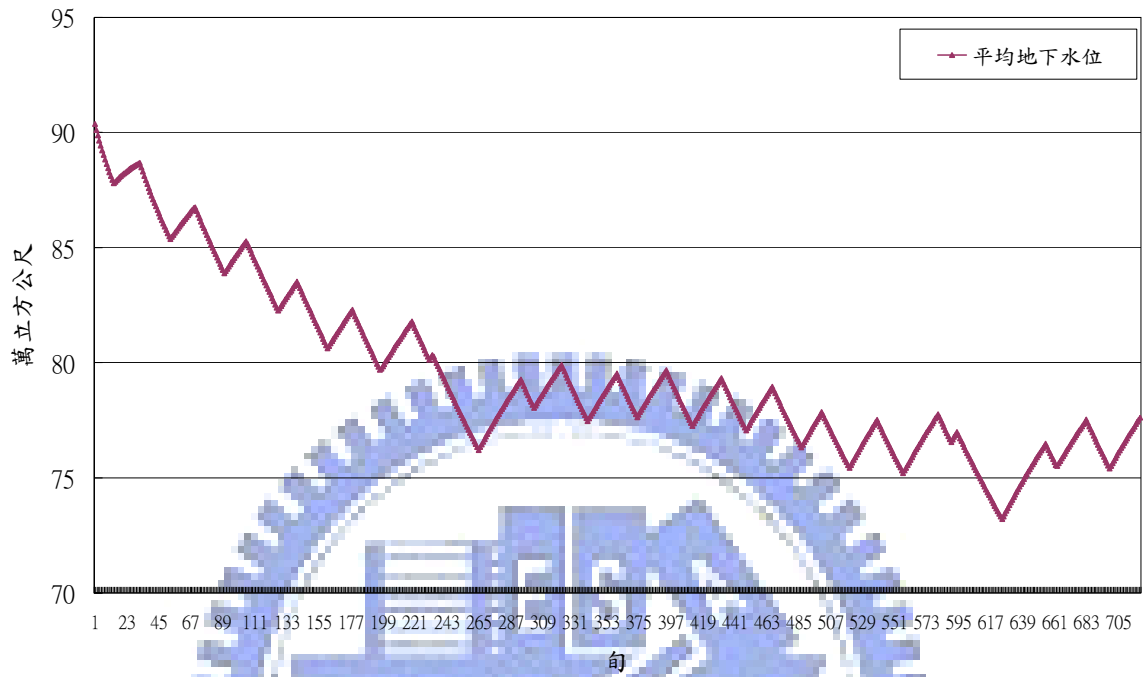


圖 4.21 案例VII平均地下水位圖

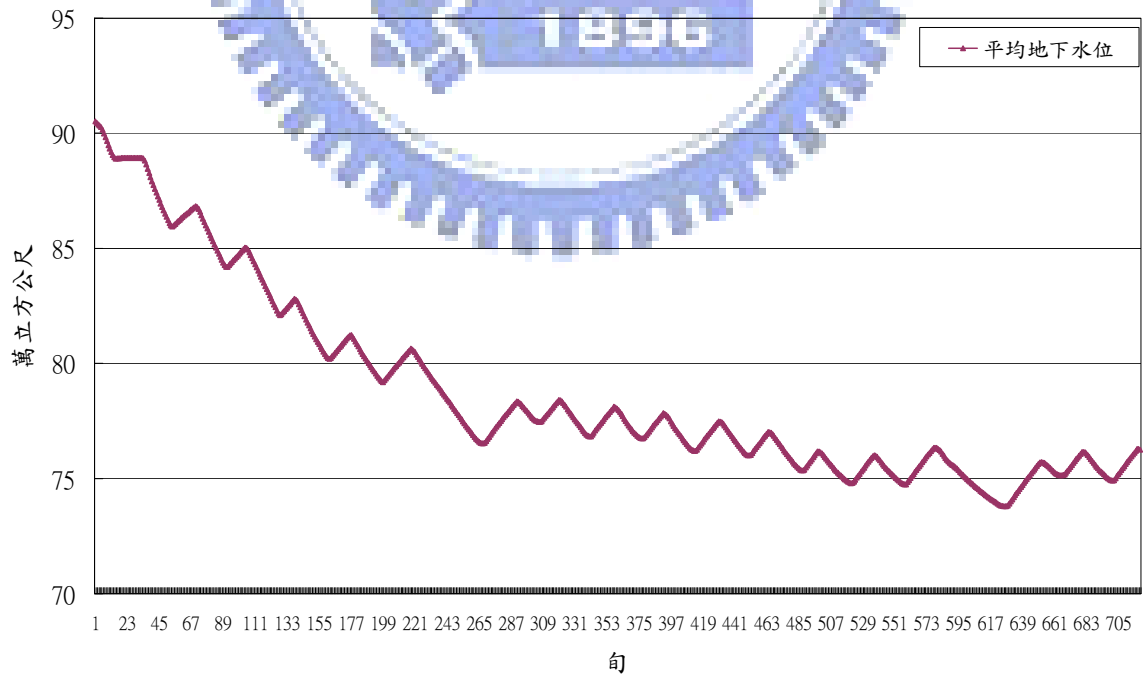


圖 4.22 案例VIII平均地下水位圖

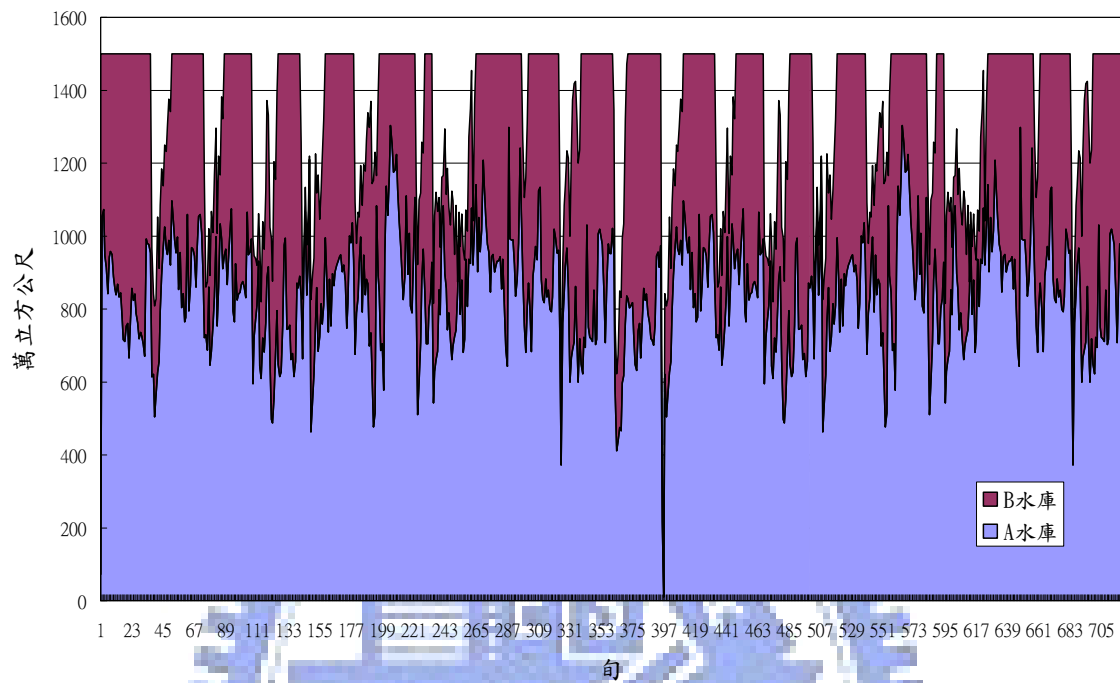


圖 4.23 案例 I 地表水系統供水情形圖

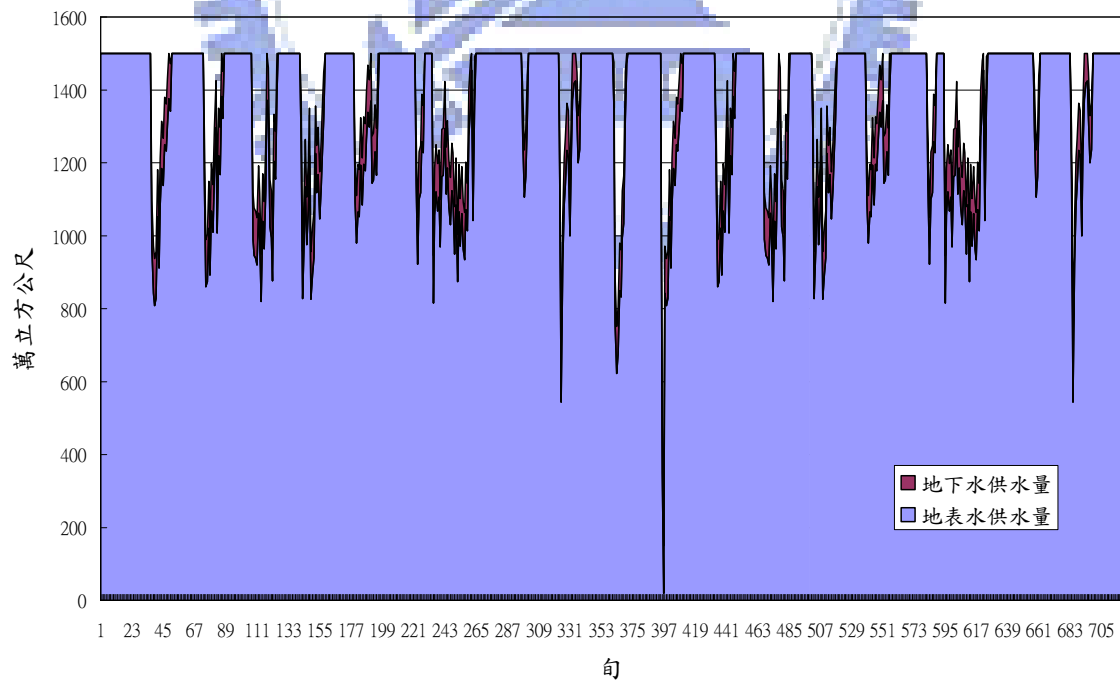


圖 4.24 案例 II 地表水系統與地下水系統供水情形圖

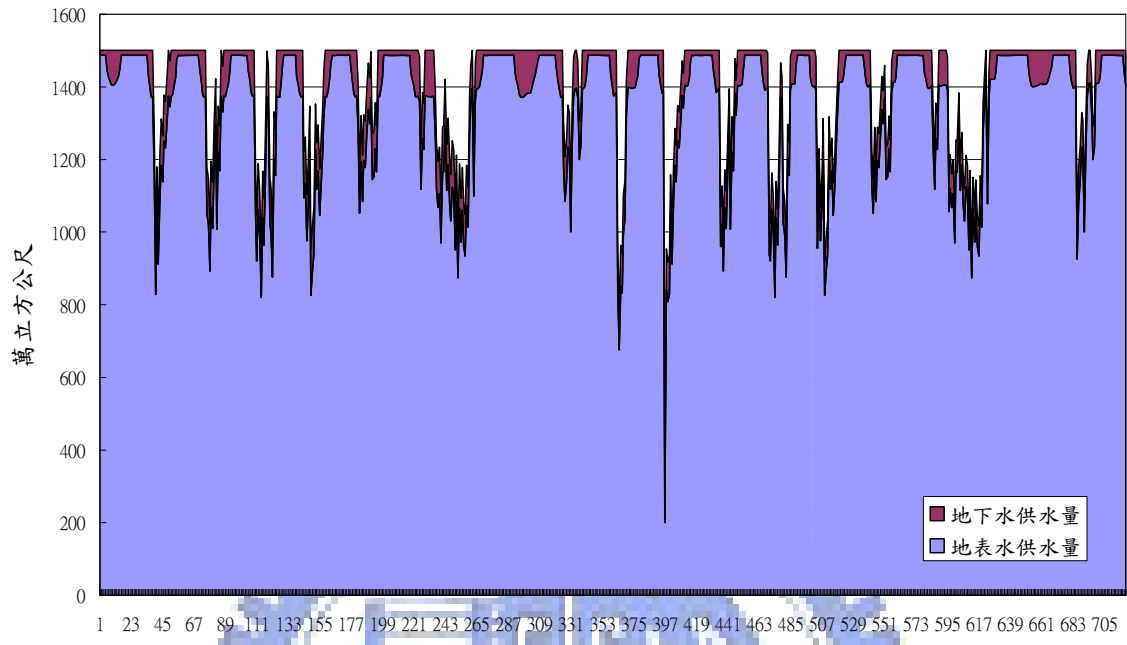


圖 4.25 案例III地表水系統與地下水系統供水情形圖

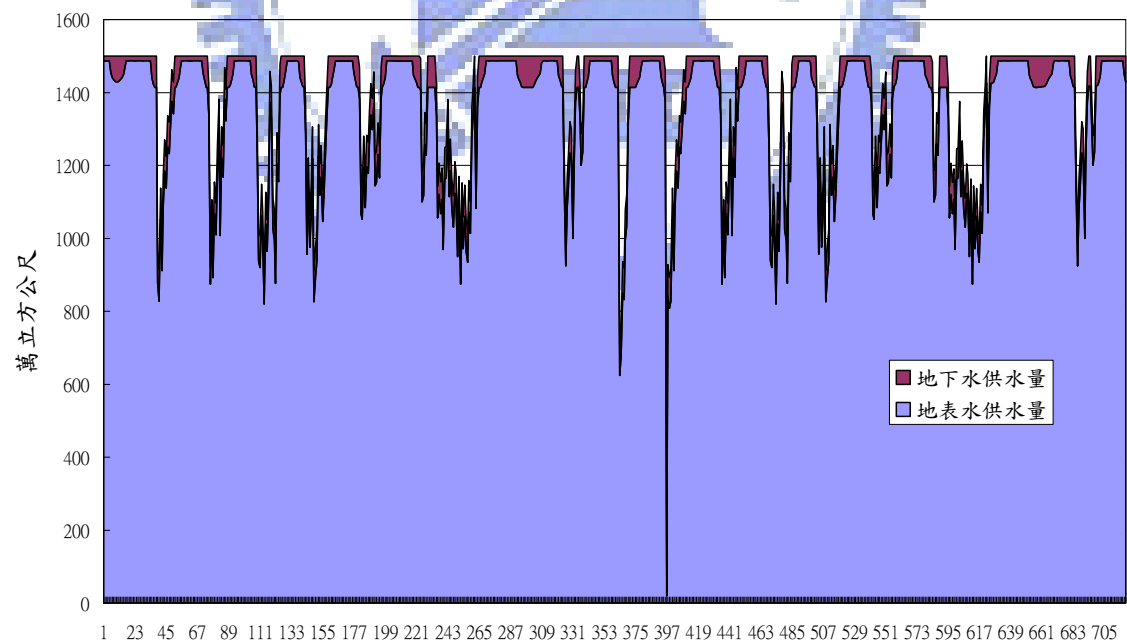


圖 4.26 案例IV地表水系統與地下水系統供水情形圖

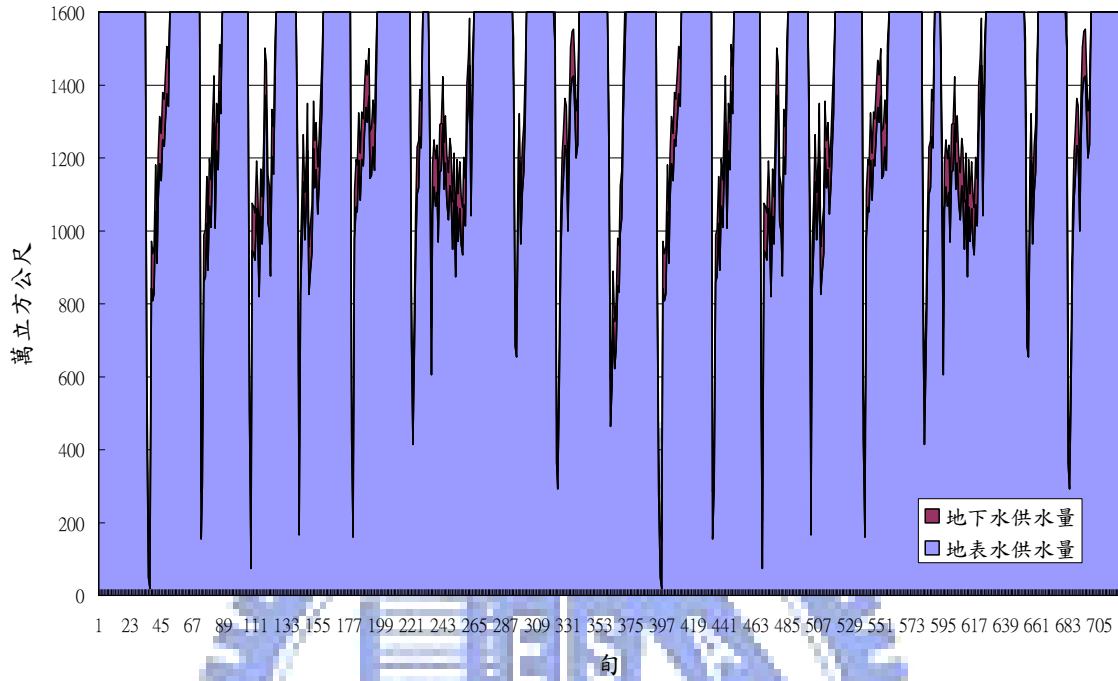


圖 4.27 案例V地表水系統與地下水系統供水情形圖

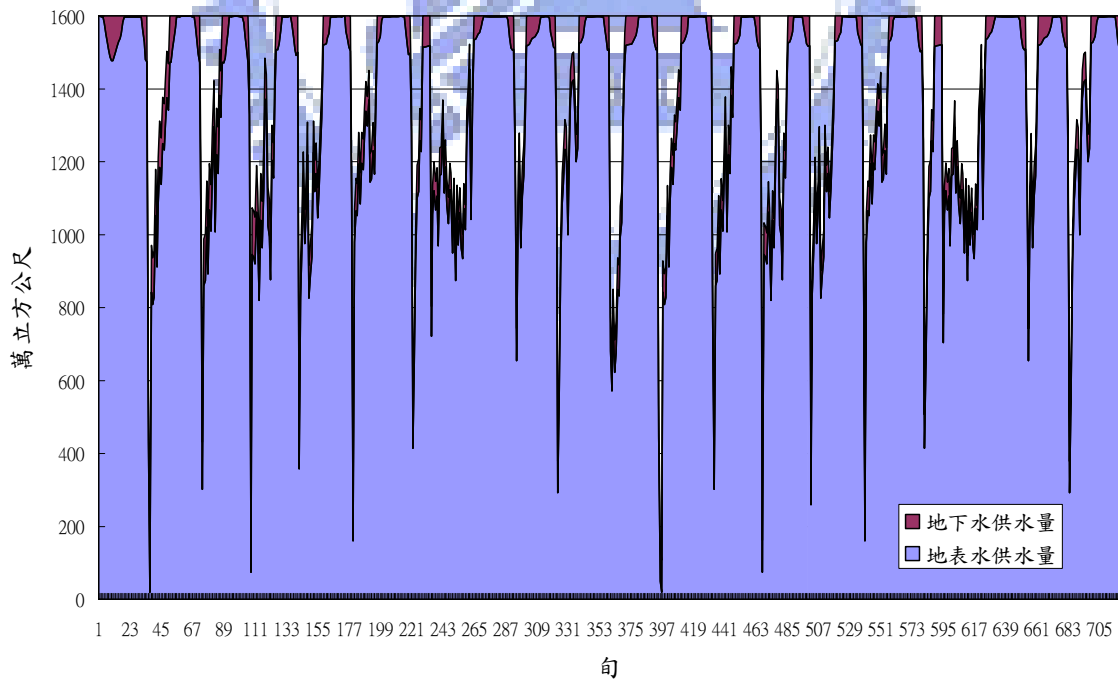


圖 4.28 案例VI地表水系統與地下水系統供水情形圖

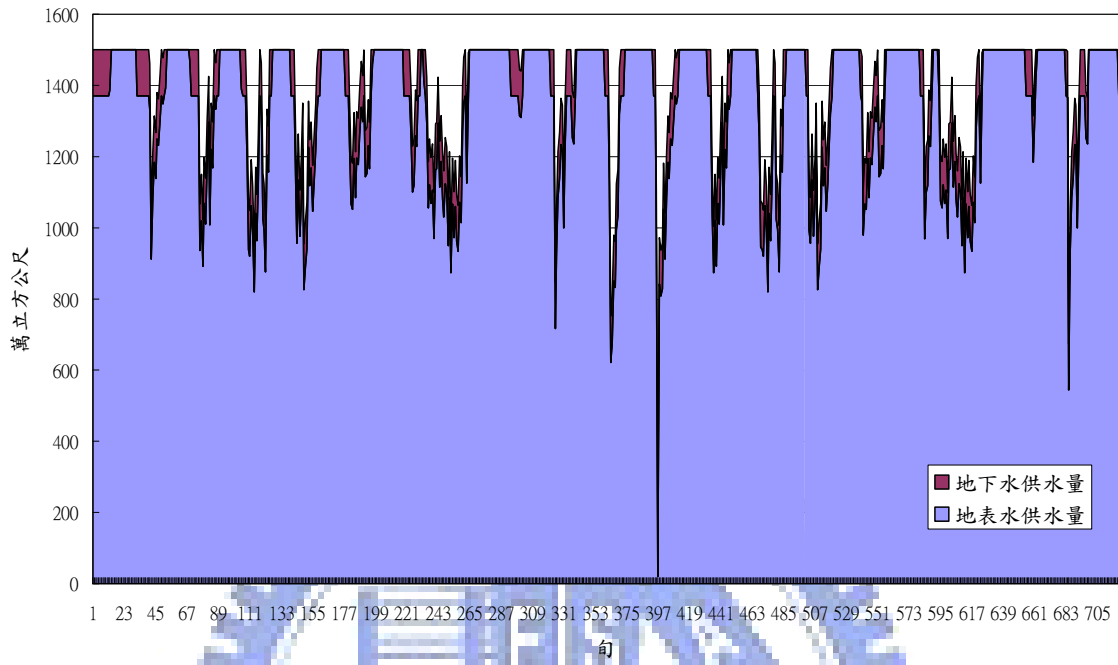


圖 4.29 案例VII地表水系統與地下水系統供水情形圖

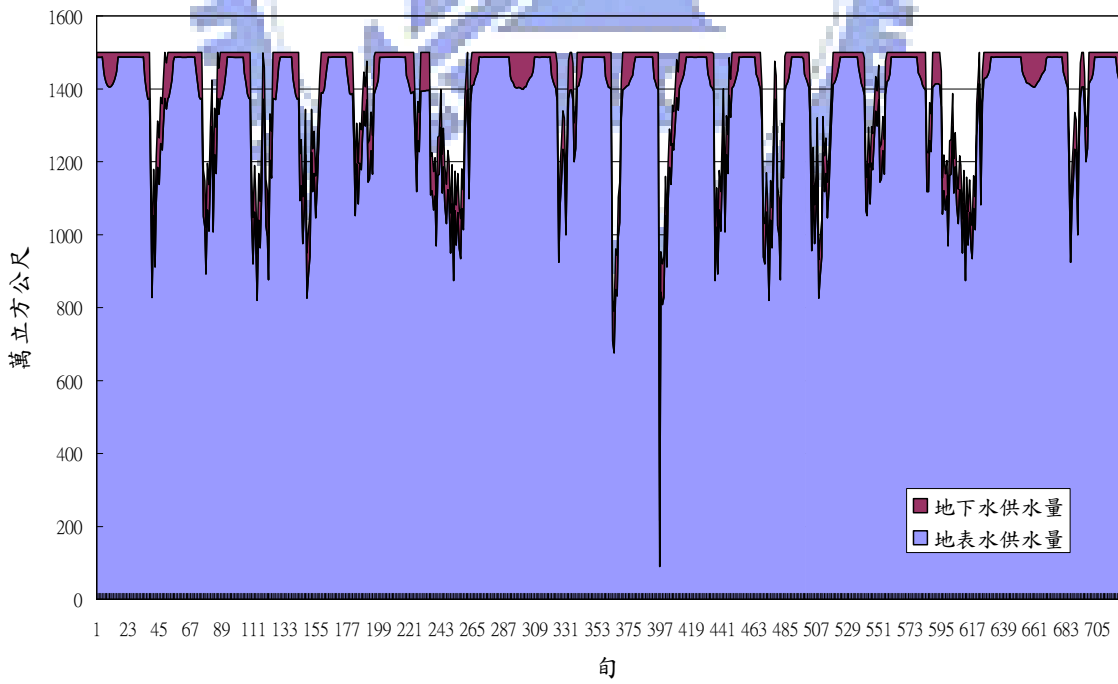


圖 4.30 案例VIII地表水系統與地下水系統供水情形圖

第五章 結論與建議

5.1 結論

1. 本研究所發展的地表地下聯合營運模式乃以模糊推論系統串連地表水與地下水兩系統，其中利用模糊推論系統分配地表水系統與地下水系統之應供水量，依此應供水量，地表水系統再採用線性規劃進行供水調配，地下水部份則以類神經網路模擬抽水供應後之地下水位，如此可提高整體水源運用的效率。
2. 地表水先供地下水後供之營運方式，可明顯的降低地表水單獨營運情況下的年缺水指數(SI)，其年缺水指數(SI)降低 52.34%；惟相較於此，本模式可進一步降低年缺水指數(SI) 26.23%，有效改善乾旱現象，降低尖峰缺水量。
3. 相較於地表水先供地下水後供模式，當需求水量增加時，由於本模式使用模糊推論系統，在同樣增加需求水量的情況下，也能適當的控制地下水位與減少缺水情形，因此透過本模式可有效管理、調度水資源。
4. 本模式可根據系統狀態制定不同的操作策略，當可利用資源足夠時，則可進行積極的運用；當可利用資源缺乏時，則可進行保守的操作，相較於其他模式，本模式具有很好的操作彈性，可提供多樣的操作策略，適切的使用資源。
5. 過去在水表地下聯合營運方面常結合最佳化模式，而本研究以模糊推論系統結合地表地下進行聯合營運，比較兩者，本模式可大幅降低以往最佳化地表地下聯合營運模式所帶來之複雜度與計算量，並進行合適的水量調配。

5.2 建議

1. 本研究中模糊推論系統之參數是經由人工檢定的方式產生，未來可結合優選方法選定參數，發展一全時刻優選模式，找出最佳的地下水運用策略，若以此地下水用水策略為基礎，可訂定出地下水實際操作規線。
2. 模糊推論系統目前僅以人工檢定的方式產生，未來可發展系統化的方式決定模糊推論系統之重要參數及規則，例如論域的精度大小以及模糊規則之制定等，以減少人工檢定的次數。
3. 若在颱風時期，水庫操作必須在短暫的時間內迅速找出適當的決策，使災害減到最低，由於具有本模式高計算效率，未來可與防災等議題結合，作為颱風時期的操作模式。
4. 在雨季期間地表水庫仍有可能發生溢流的情況，本模式未考量將多餘的水資源以人工補注之方式注入地下水含水層中，未來可結合人工補注，以增加水量運用來源。
5. 本研究為一模擬案例，未來可實際運用於實際案例之水資源規劃中。

參考文獻

1. Samuel O. Russell, Paul F. Campbell, "Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming", J. of Water Resources Planning and Management, 122(3), pp.165-170, 1996.
2. Randall, D, Cleland, L., Kuehne, C. S., Link, G. W., and Sheer, D. P., "Water Supply Planning Simulation Model Using Mixed-Integer Linear Programming", J. of Water Resources Planning and Management, 123(2), pp.116-124, 1997.
3. Maier, H. R. and Dandy, G. C., "Determining Neural Network for the Prediction and Forecasting of Water Resources Variables: A Review of Modeling Issues and Application", Environmental Modeling and Software, 15, pp.101-124, 2000.
4. Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., and Bobee, B., "Artificial Neural Network Modeling of Water Table Depth Fluctuations", Water Resources Research, 37(4), pp.885-896, 2001.
5. Chang L. C. and Chang F. J., "Intelligent Control for Modeling of Real Time Reservoir Operation", Hydrological Processes, 15, pp. 1621-1634, 2001 .
6. Tanja Dubrovin, Ari Jolma, Esko Turunen, "Fuzzy Model for real-Time Reservoir Operation", J. of Water Resources Planning and Management, 128(1), pp.66-73, 2002.
7. Coppola, E., Szidarosky F., Poulton, M., and Charles, E., "Artificial Neural Network Approach for Predicting Transient Water Levels in a Multilayered Groundwater System under Variable State , Pumping and Climate Conditions", J. of Hydrologic Engineering, 8(6), pp.

- 348-360, 2003.
8. Karamouz, M., Kerchian, R., and Zahrie, B., "Monthly Water Resources and Irrigation Planning : Case Study of Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources", J. of Irrigation and Drainage Engineering,130(5), pp.391-402, 2004.
 9. Chang L. C. and Chang F. J., "Intelligent Control for Modeling of Real Time Reservoir Operation, part II: artificial neural network with operating rule curves", Hydrological Processes, 19, pp.1431-1444, 2005 .
 10. Nayak, P. C., SatyajiRao Y. R., and Sudheer, K. P., "Groundwater Level Forecasting in a Shallow Aquifer Using Artificial Neural Network Approach", Water Resources Management, 20, pp.77-90, 2006.
 11. 林信成、彭啟峰，OH!Fuzzy模糊理論剖析，第三波文化事業股份有限公司，1994。
 12. 張詩言，Fuzzy入門:人類科學思維的新視界-模糊理論，全欣資訊圖書股份有限公司，1995。
 13. 李允中、王小璠、蘇木春，模糊理論及其應用，全華科技圖書股份有限公司，2002。
 14. 孫宗瀛、楊英魁，Fuzzy控制:理論、實作與應用，全華科技圖書股份有限公司，2005。
 15. 張斐章、張麗秋，類神經網路，東華書局，2005。
 16. 劉長齡、李孟武，「類神經網路水庫模糊操作模式之建立與應用」，第十屆水利工程研討會論文集，1999。
 17. 李孟武，「寶山第一及寶山第二水庫模糊模式之研究」，國立

- 成功大學水利工程系暨海洋工程研究所碩士論文，1996。
18. 陳俊焜，「濁水溪沖積扇地下水資源調配與管理之研究」，國立成功大學資源工程研究所碩士論文，1997。
 19. 謝明富，「應用倒傳遞神經網路模擬非線性遲滯動力行為」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，1999。
 20. 留英龍，「模糊理論應用於地層下陷之預測」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文，1999。
 21. 陳宇文，「類神經網路於入滲池最佳設計之應用」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2000。
 22. 郭蒼霖，「遺傳演算法於多水庫最佳操作規線優選之應用」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2000。
 23. 羅建洲，「模糊理論在區域水資源運用之研究-以寶山水庫及攔河堰為例」，國立成功大學水利工程系暨海洋工程研究所碩士論文，2002。
 24. 楊朝仲，「應用遺傳演算法與可微分動態規劃於地表地下水聯合營運之多目標規劃」，國立交通大學土木工程研究所博士論文，2002。
 25. 李志鵬，「新型態多水庫聯合營運最佳規線之探討」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2004。
 26. 張雅婷，「調適性網路模糊推論系統於水庫操作之研究」，國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2006。
 27. 黃浚瑋，「應用遺傳演算法與類神經網路於地表地下水聯合營運」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2006。
 28. 傅怡釗，「多湖區系統最佳地表地下水聯合操作之研究」，國立交通

大學土木工程研究所碩士論文，2007。



附錄A MODFLOW簡介

MODFLOW為美國地質調查局(U.S.G.S.)發展之程式。該程式可解二維及三維之地下水流問題，含水層之種類可為自由、受壓、半受壓含水層，依地質特性分類可為均質、非均質及等向性、非等向性含水層。MODFLOW 程式乃利用有限差分法(Block Centered Finite Difference Approach)解水流控制方程式，計算機數值求解方法乃採用兩種疊代技巧強制隱式法(SIP)及鬆弛疊代法(SSOR)。程式包括之重要單元有水井、區域性補注量、蒸發散、河川之滲流及定水頭邊界。以下就對MODFLOW程式發展作一介紹：

三維地下水流在孔隙介質中的運動行為可以下列之偏微分方程式來表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [\text{附A.1}]$$

其中

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ：沿主軸 X, Y, Z 方向的透水係數 (Hydraulic Conductivity) (LT^{-1})

h ：管壓水頭(Potentiometric Head) (L)

W ：單位體積的體積流率 (Volumetric Flux)，代表源匯項 (Sources/Sinks) (T^{-1})

S_s ：孔隙介質的比儲水量(Specific Storage) (L^{-1})

t ：表時間(T)

上述式 (附A.1) 若結合了含水層系統邊界情況、起始條件等資訊，可組成一地下水流系統的數學表示式。但由於其解析解難以求得，故必須用數值方法來作推導，MODFLOW以有限差分法求得其數值解。

若以有限差分方式來表達地下水流方程式，則必須利用連續性方程式 (所有進入及流出 cell 的流量必定等於在cell中儲蓄量的改變率)，且假設地下水流之密度(ρ)為一定值。所以對於一個cell(i,j,k)來說，若考慮本身及其鄰近的六個含水層的cells((i-1,j,k),(i+1,j,k),(i,j-1,k),(i,j+1,k),(i,j,k-1),(i,j,k+1))。如圖附A.1所示：

假設在列 (row) 方向的 cell(j,j-1,k) 流進 cell(i,j,k) 的流量為：

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [\text{附A.2}]$$

上式中：

$h_{i,j,k}$ 及 $h_{i,j-1,k}$ 分別代表在節點 (i,j,k);(i,j-1,k)水頭。

$q_{i,j-1/2,k}$ 為通過介於cell(i,j,k)和(i,j-1,k) 間界面體積的流量 (L^3t^{-1})。

$KR_{i,j-1/2,k}$ 為在列 (row)方向介於節點 (i,j,k) 和 (i,j-1,k) 間的透水係數。

$\Delta c_i \Delta v_k$ 為垂直於列 (row)方向的 cell 面的截面積。

$\Delta r_{j-1/2}$ 為節點 (i,j,k) 和 (i,j-1,k) 間的距離。

所以同理可求得其餘的五個面流進 cell(i,j,k)的流量：

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{j+1/2}}$$

$$q_{i+1/2,j,k} = KR_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}}$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KR_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

$$q_{i,j,k-1/2} = KR_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}}$$

若 $CR = KR \times \frac{\Delta A}{L}$ ，則連續性方程式可表示為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.3}]$$

上式中：

$S_{s_{i,j,k}}$: cell(i,j,k) 的比儲水量

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$: cell(i,j,k) 的體積

現在若在多加以考慮源、匯 (Sources、Sinks)，則連續性方程式變為：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ & + QS_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned} \quad [\text{附 A.4}]$$

一般而言， $QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + \sum_1^N q_{i,j,k,n}$

此處： $a_{i,j,k,n}$ ：第 n 個外在的源流進 cell(i,j,k) 的流量。

$$P_{i,j,k,n}(L^2T^{-1}), q_{i,j,k,n}(L^3T^{-1}) \text{ 均等於常數。}$$

MODFLOW中所採用的為後向差分(Backward Difference)，所以對於 cell(i,j,k)來說，若以 t_m 和 t_{m-1} 之間來代表 Δt ，則：

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right) = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad [\text{附A.5}]$$

將方程式 (附C.5) 代入 (附C.4) 中，則可得：

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) \\ & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \end{aligned}$$

[附A.6]

所以將有含 $h_{i,j,k}^m$ 的項全移至左邊，而含 $h_{i,j,k}^{m-1}$ 的項移至右邊，則可得：

$$\begin{aligned} & CV_{i,j,k-1/2} h_{i,j,k-1}^m + CR_{i,j-1/2,k} h_{i,j-1,k}^m + CC_{i-1/2,j,k} h_{i-1,j,k}^m + (-CR_{i,j-1/2,k} - CC_{i-1/2,j,k} \\ & - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} - CV_{i,j,k-1/2} - CV_{i,j,k+1/2} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CV_{i,j,k+1/2} h_{i,j,k+1}^m \\ & + CR_{i,j+1/2,k} h_{i,j+1,k}^m + CC_{i+1/2,j,k} h_{i+1,j,k}^m = RHS_{i,j,k} \end{aligned}$$

[附A.7]

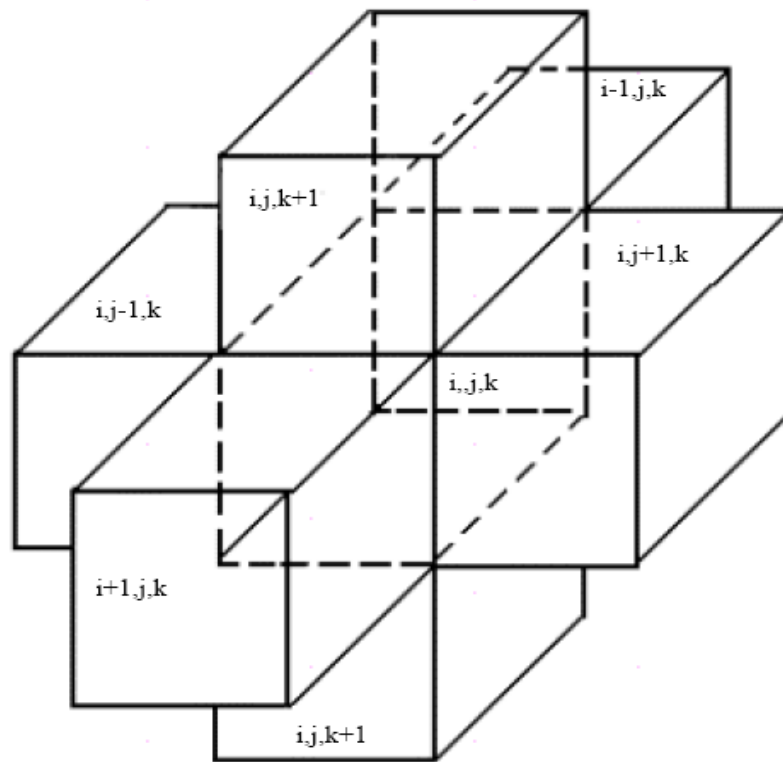
其中：

$$HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - SCL_{i,j,k} / (t_m - t_{m-1})$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SCL_{i,j,k} h_{i,j,k}^{m-1} / (t_m - t_{m-1})$$

$$SCL_{i,j,k} = S_{s_{i,j,k}} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$$

而附A.7式即是MODFLOW程式所解之差分式。



圖附 A.1 cell(i,j-1,k)進入 cell 之地下水流



附錄B 地下水連續預測模式驗證

當類神經網路建立完成後，接下來需要驗證類神經網路是否具備強健性與適用性，必須以另一組案例透過連續預測的方式進行檢驗(其流程如圖附 B.2 所示)，本研究在此分別以隨機函數及階梯函數建立兩種不同型態決策變數之驗證案例，來進行連續預測之驗證，在此為第一階段之驗證，後續在地表地下聯合營運時，仍需將地下水操作方式輸入 MODFLOW 模式，比對類神經網路與 MODFLOW 模式兩者模擬之水位變化。

案例 A(隨機函數)：

本驗證案例是以隨機函數產生各抽水井之抽水量，圖附 B.3 至圖附 B.7 為各觀測井全時刻之水位變化圖，圖附 B.8 至圖附 B.12 則是僅繪出第 0 旬至 500 旬之水位變化，由圖面顯示類神經網路可成功地進行連續預測，與 MODFLOW 模擬數據相比，可以正確掌握水位變化。表附 B.1 為各觀測井之誤差列表，其中可發現 3 號井的表現為五口井中最差，3 號井位於地下水系統中心點(如圖附 B.1 所示)，其水位變化受到所有抽水井抽水行為之影響，水位變化因素最為複雜，其洩降幅度亦為最大，由表附 B.1 所示，經過 3650 時刻(旬)模擬後，其最大誤差為 2.44 公尺，以該時刻水位計算相對誤差為 4.06%，其模擬誤差在可接受範圍。

案例 B(階梯函數)：

此案例之設計理念為假定抽水量之供給配合水文周期之循環連續 18 旬枯水期、連續 18 旬豐水期之情形，圖附 B.13 至圖附 B.17 為

各觀測井全時刻之水位變化圖，圖附 B.18 至圖附 B.22 則是僅繪出第 0 旬至 500 旬之水位變化，由圖面顯示類神經網路可成功地進行連續預測，與 MODFLOW 模擬數據相比，可正確掌握水位變化。表附 B.2 為各觀測井之誤差列表，由表附 B.2 所示，經過 3650 時刻(旬)模擬後，最大誤差為 3.54 公尺，以該時刻水位計算相對誤差為 5.90%，其模擬誤差在可接受範圍，但是誤差較案例 A 來的大。

綜合案例 A 與案例 B 之驗證，可以證實本類神經網路可以模擬不同抽水型態下之水位變化，因此可以用以作為地表地下聯合營運之地下水反應方程式。



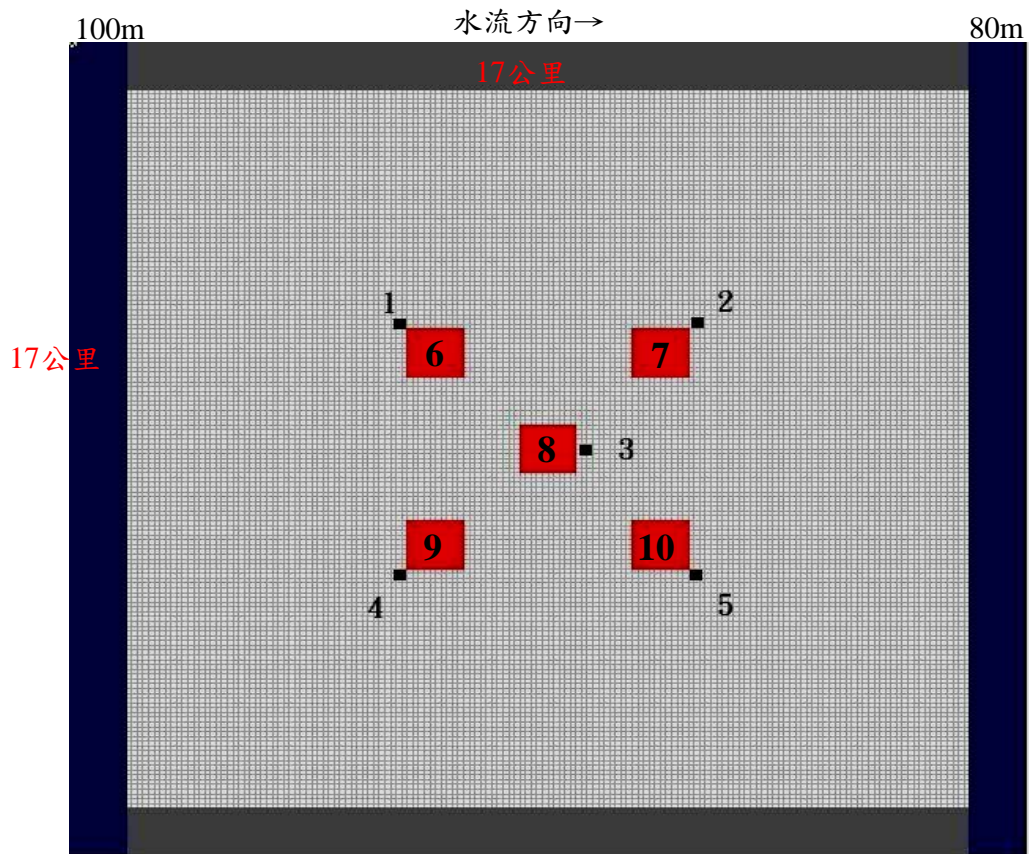
表附 B.1 驗證案例 A 之誤差統計列表

| | 均方誤差(m ²) (MSE) | 均方根誤差(m) (RMSE) | 絕對平均誤差(m) (AME) | 最大誤差值(m) (Max error) |
|-------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 觀測井 1 | 0.30 | 0.54 | 0.40 | 1.63 |
| 觀測井 2 | 0.40 | 0.63 | 0.49 | 1.83 |
| 觀測井 3 | 0.83 | 0.91 | 0.72 | 2.44 |
| 觀測井 4 | 0.30 | 0.55 | 0.39 | 1.73 |
| 觀測井 5 | 0.41 | 0.64 | 0.50 | 1.72 |

表附 B.2 驗證案例 B 之誤差統計列表

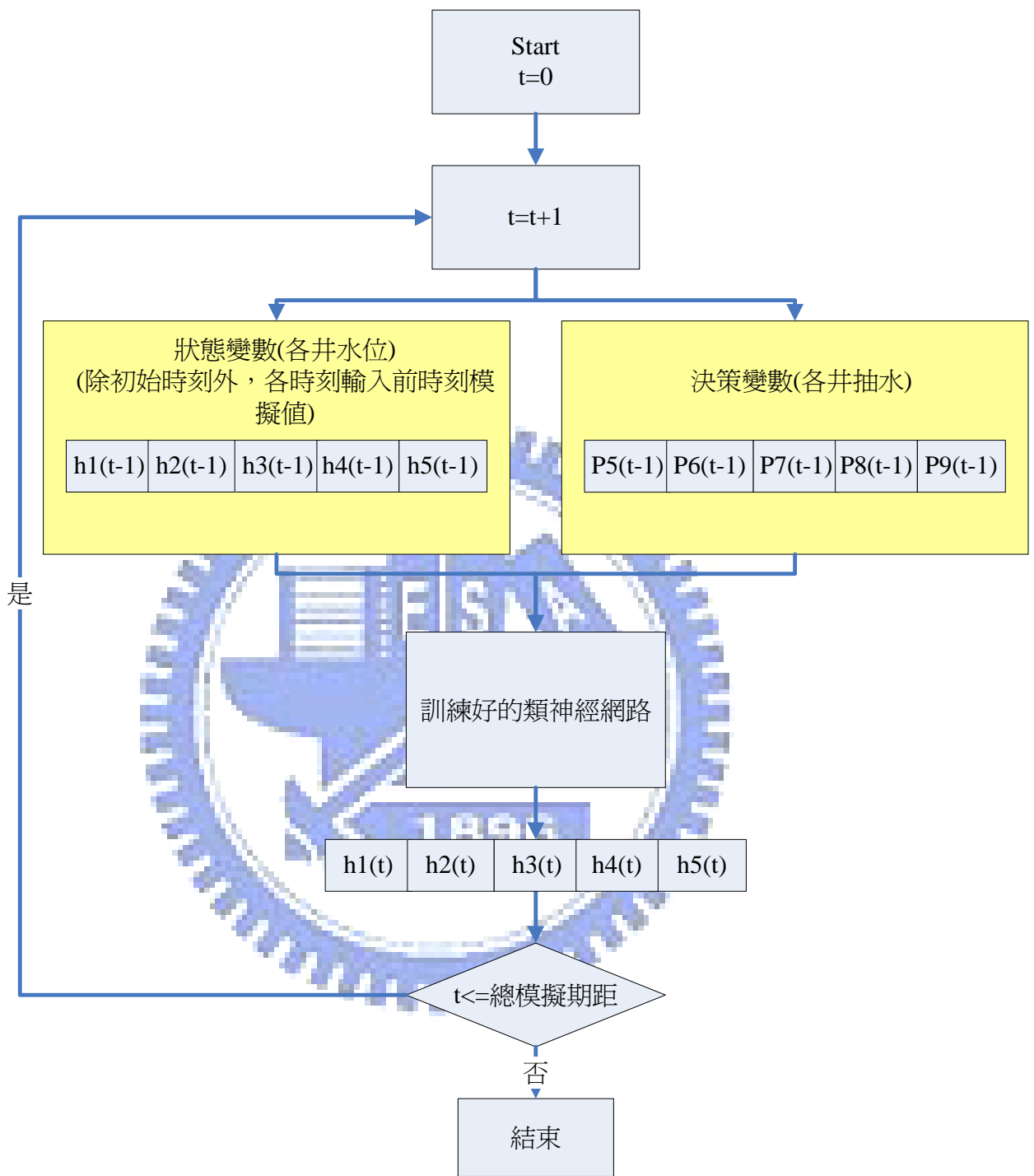
| | 均方誤差(m ²) (MSE) | 均方根誤差(m) (RMSE) | 絕對平均誤差(m) (AME) | 最大誤差值(m) (Max error) |
|-------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 觀測井 1 | 1.58 | 1.26 | 1.10 | 2.31 |
| 觀測井 2 | 0.72 | 0.85 | 0.70 | 1.87 |
| 觀測井 3 | 3.84 | 1.96 | 1.70 | 3.53 |
| 觀測井 4 | 1.32 | 1.15 | 1.00 | 2.06 |
| 觀測井 5 | 3.00 | 1.73 | 1.55 | 3.02 |



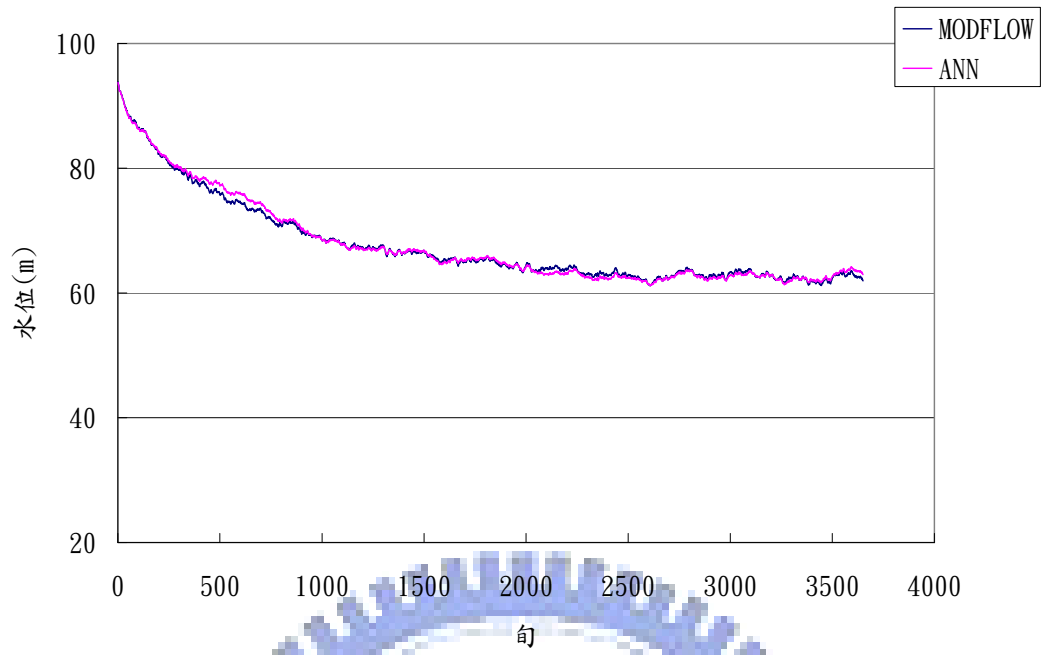


圖附 B.1 地下水系統建置圖

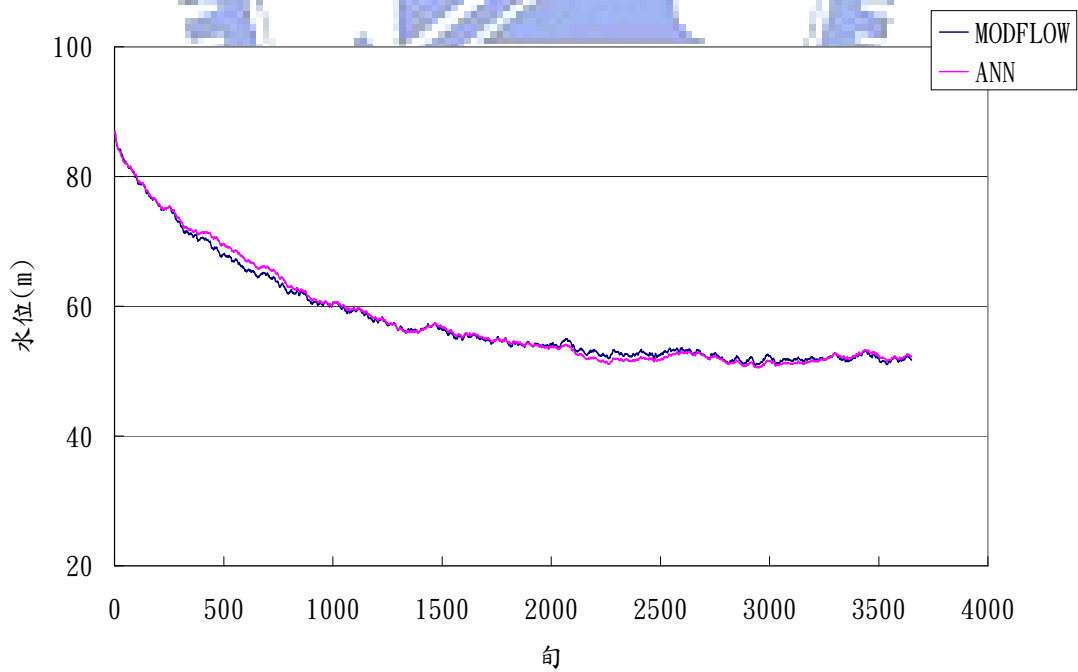




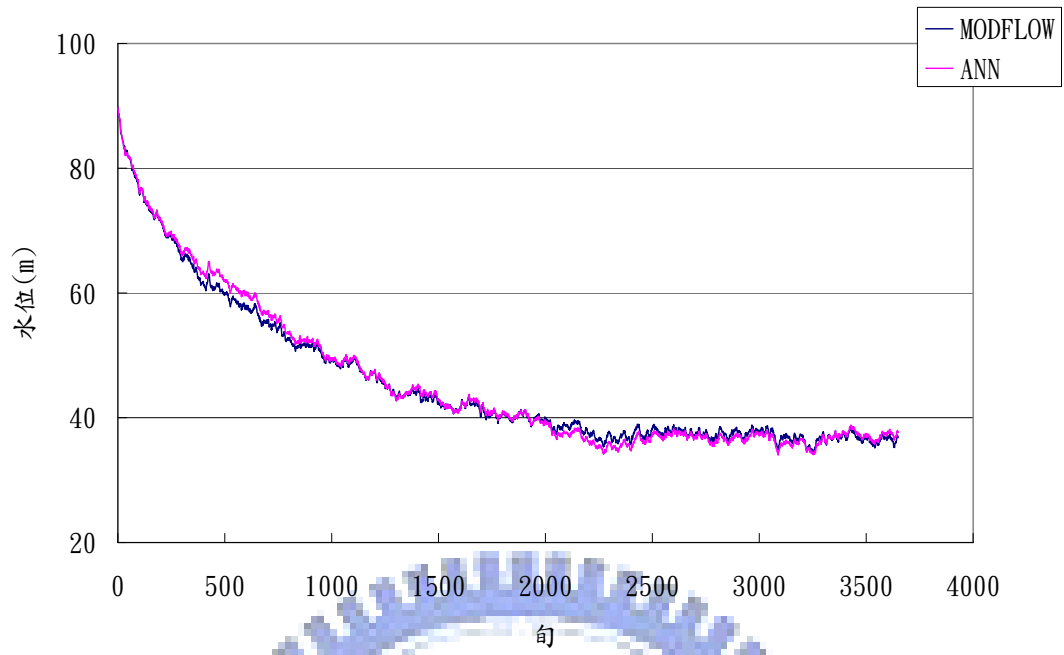
圖附 B.2 地下水連續預測模擬流程圖



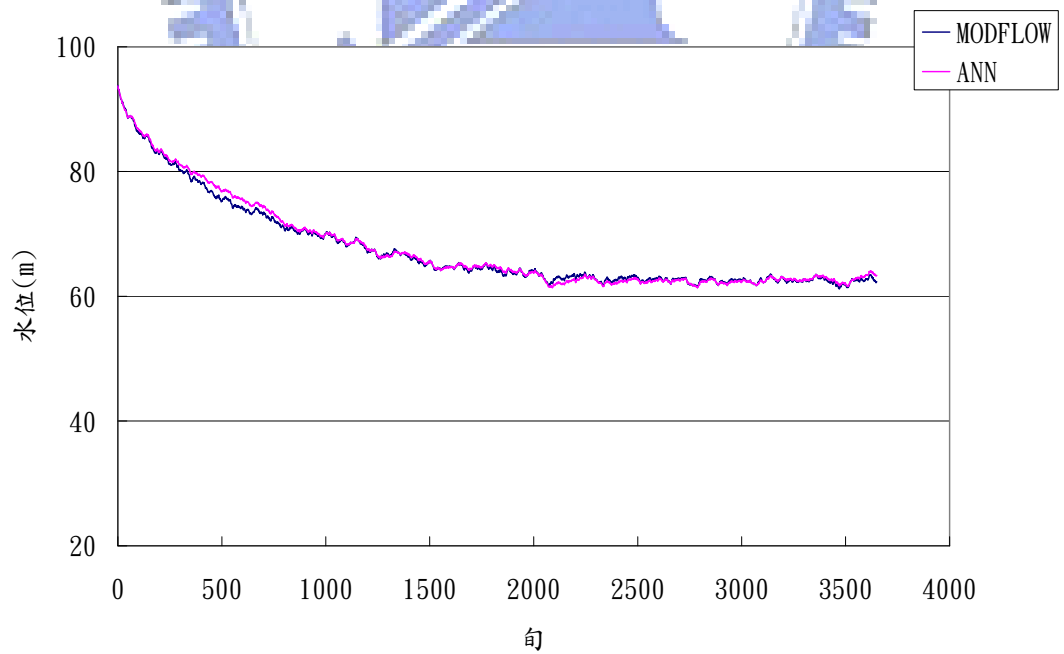
圖附 B.3 預測案例 A.1 號井水位比較圖



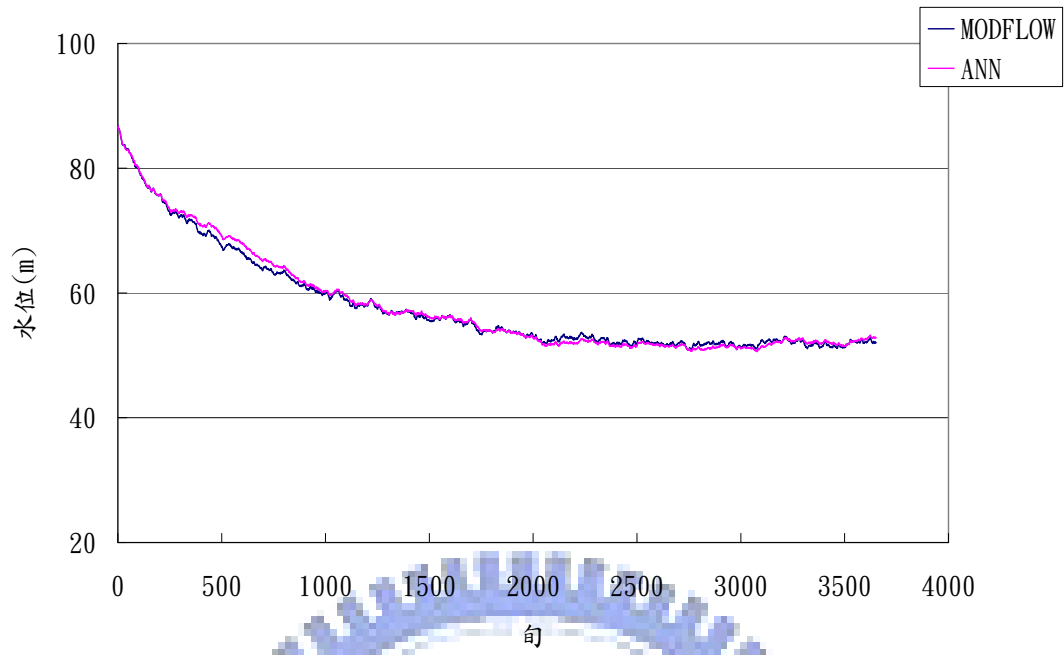
圖附 B.4 預測案例 A.2 號井水位比較圖



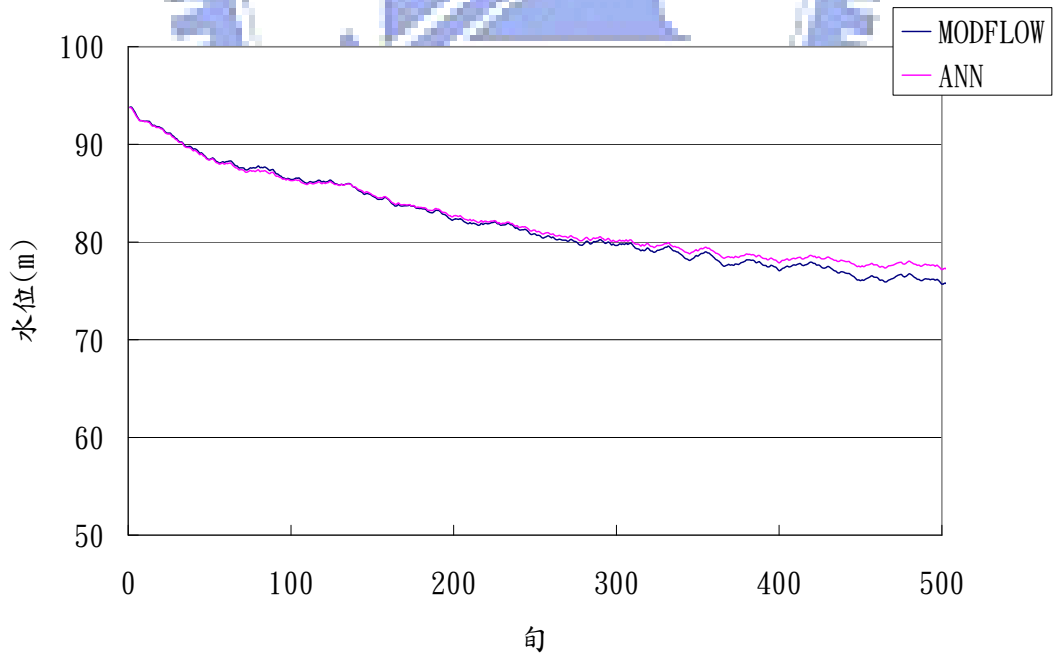
圖附 B.5 預測案例 A.3 號井水位比較圖



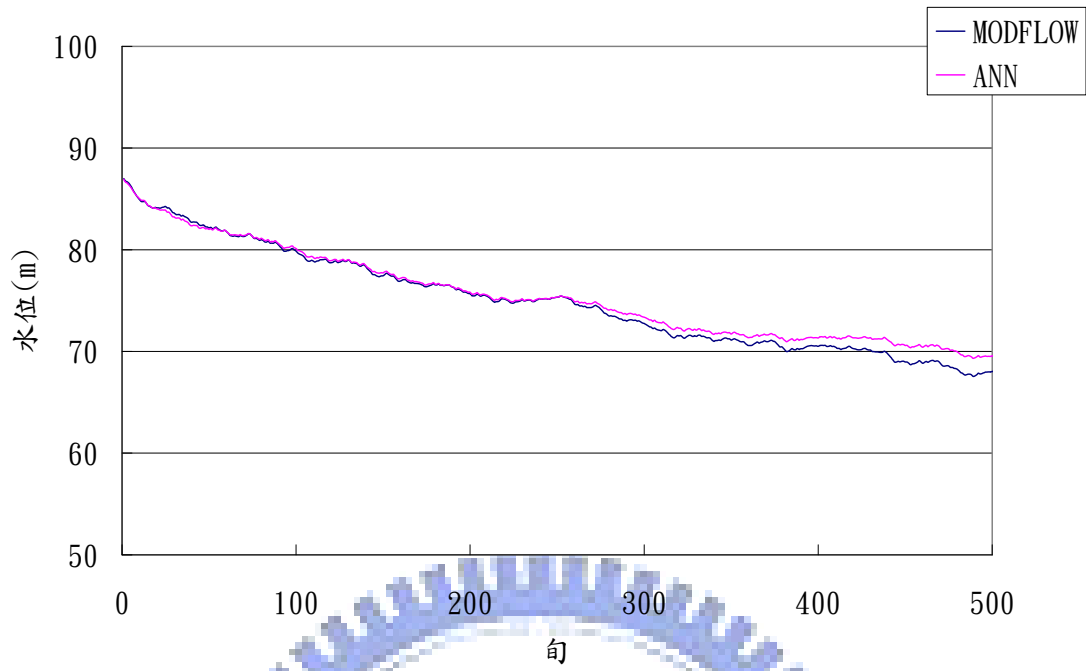
圖附 B.6 預測案例 A.4 號井水位比較圖



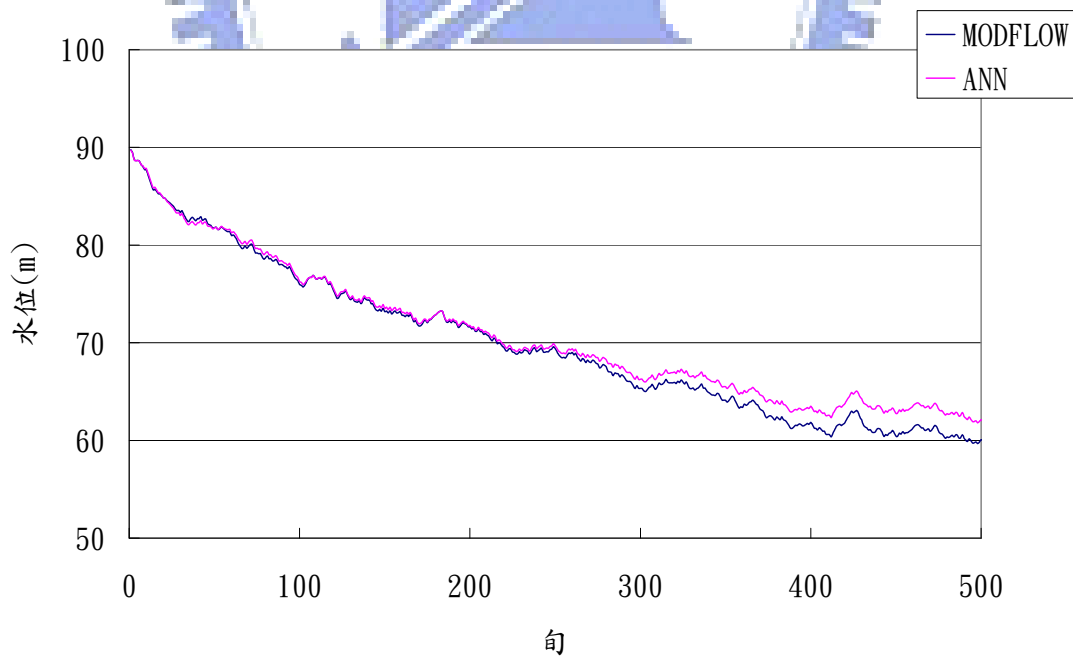
圖附 B.7 預測案例 A.5 號井水位比較圖



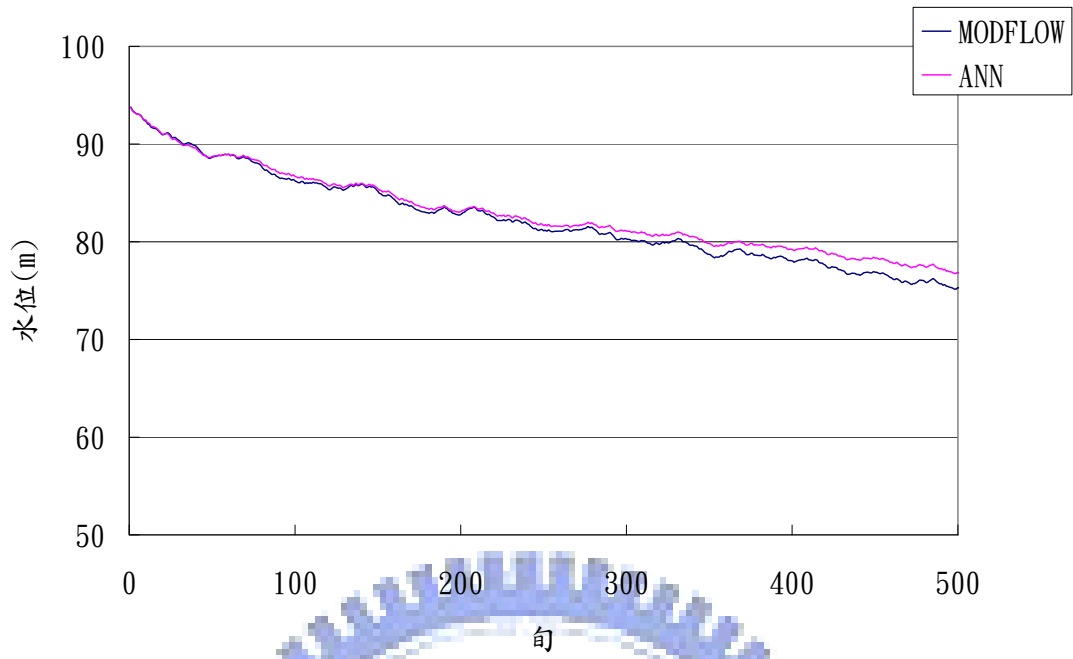
圖附 B.8 預測案例 A.1 號井 0~500 旬水位比較圖



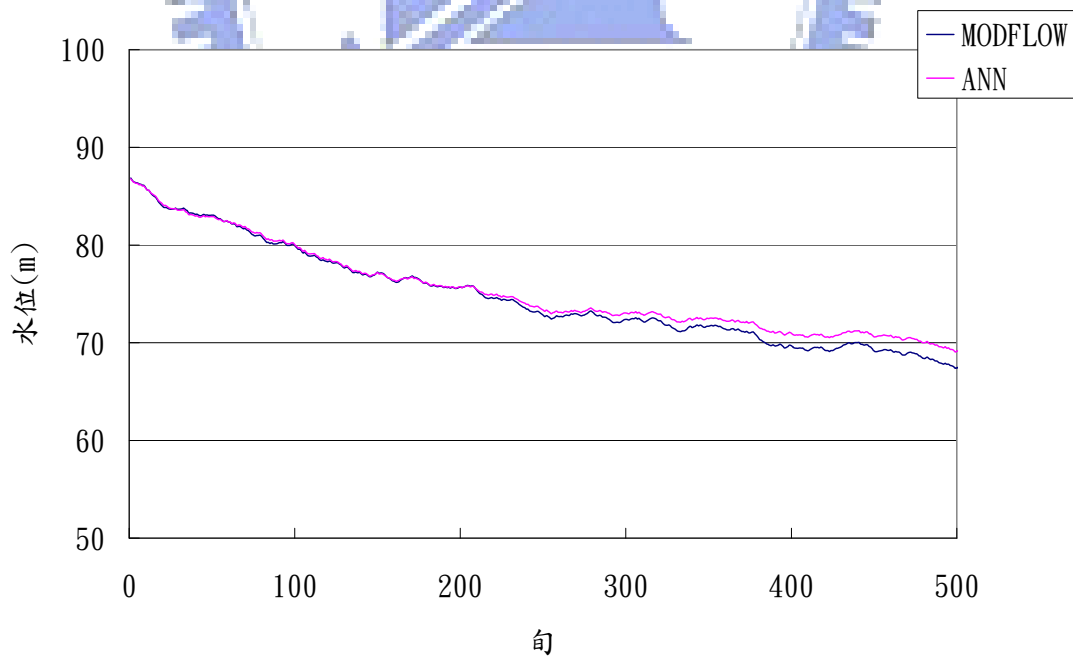
圖附 B.9 預測案例 A.2 號井 0~500 旬水位比較圖



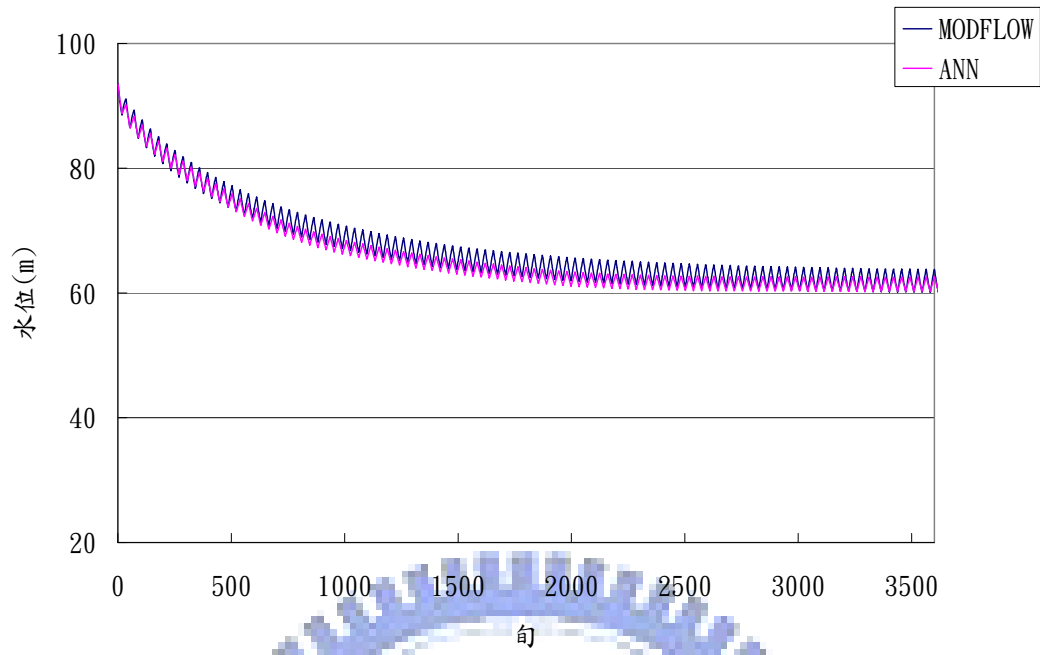
圖附 B.10 預測案例 A.3 號井 0~500 旬水位比較圖



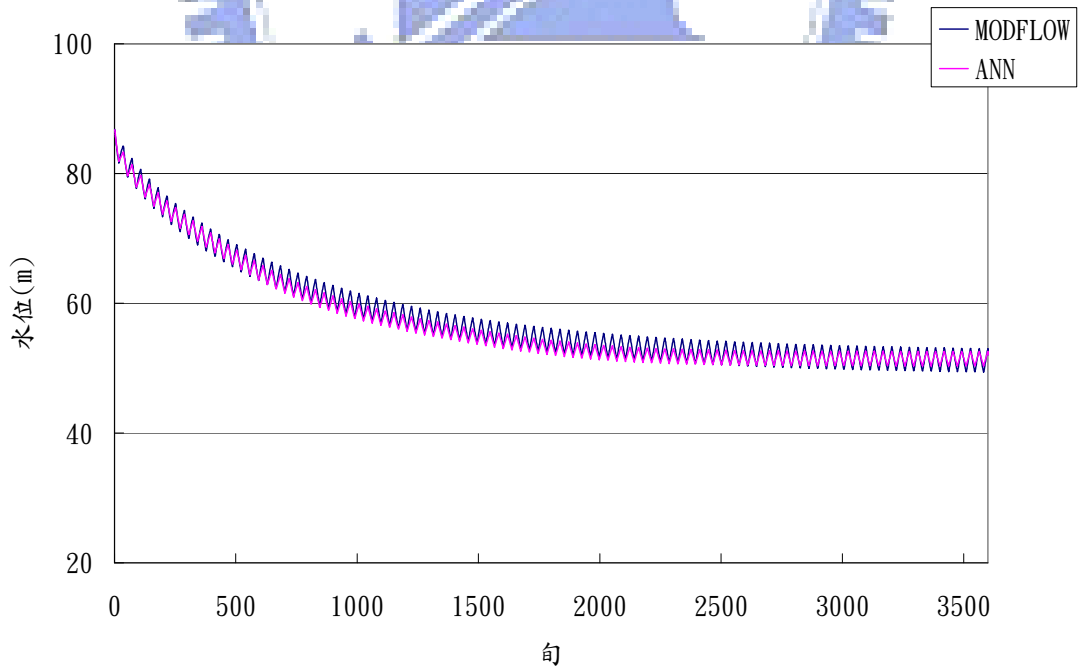
圖附 B.11 預測案例 A.4 號井 0~500 旬水位比較圖



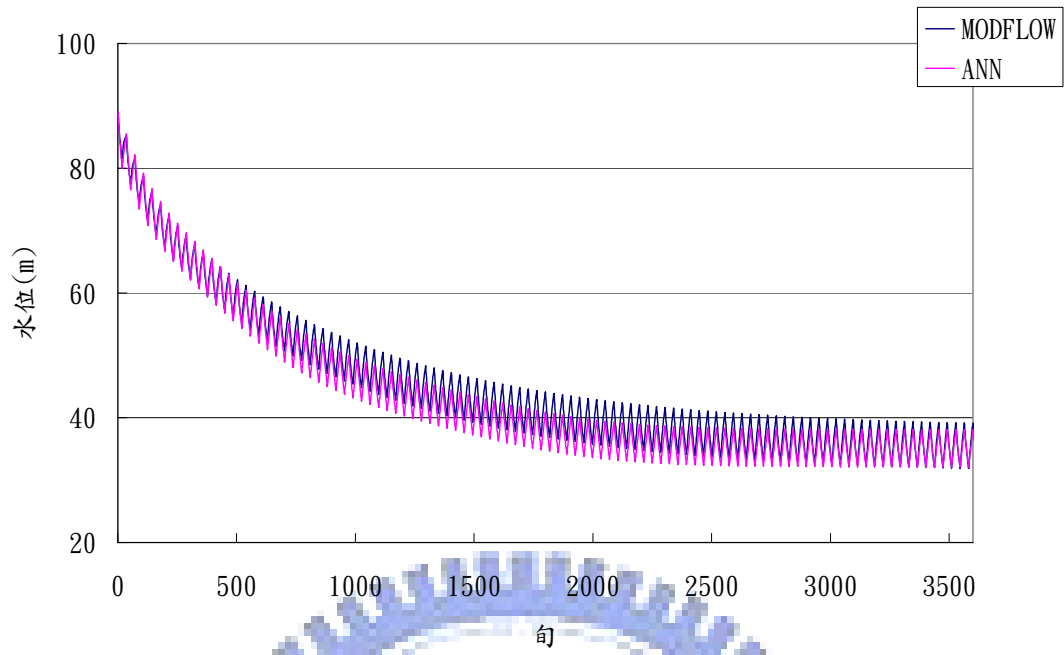
圖附 B.12 預測案例 A.5 號井 0~500 旬水位比較圖



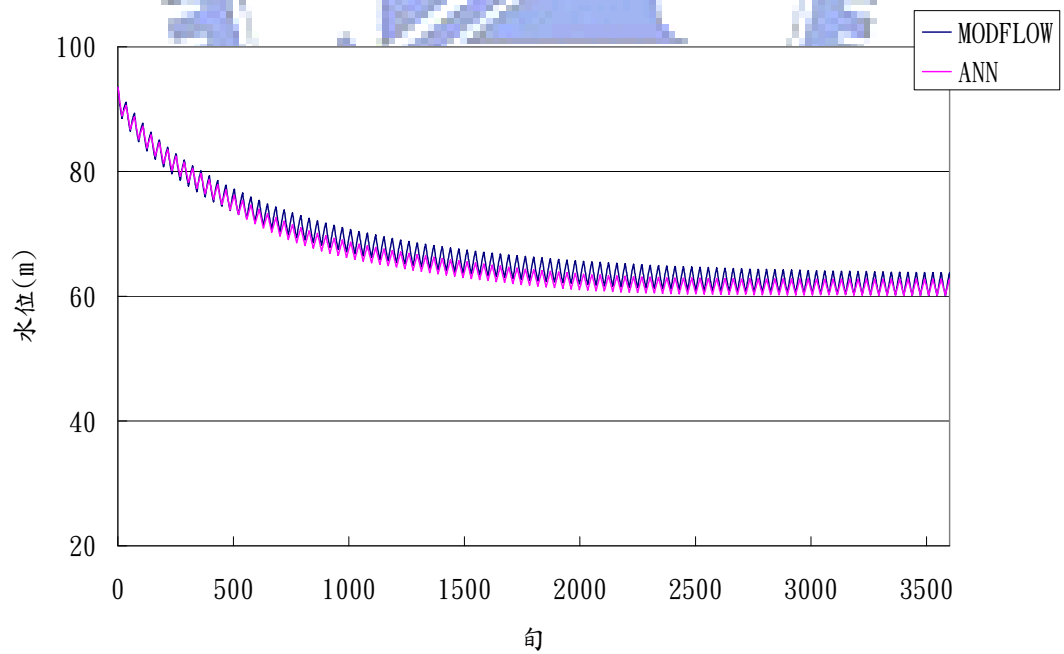
圖附 B.13 預測案例 B.1 號井水位比較圖



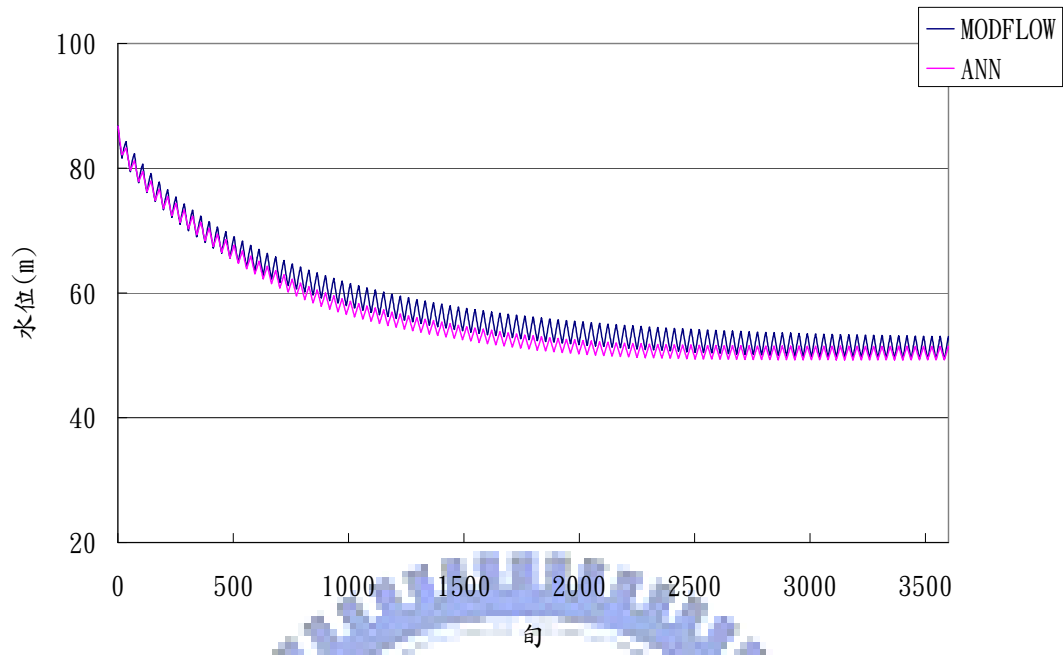
圖附 B.14 預測案例 B.2 號井水位比較圖



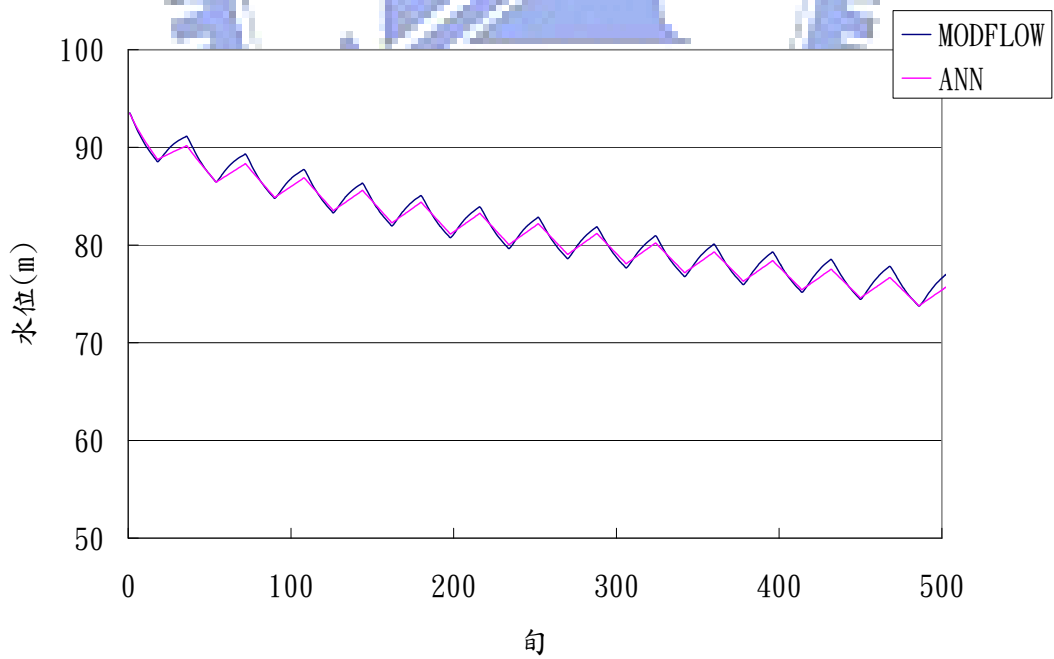
圖附 B.15 預測案例 B.3 號井水位比較圖



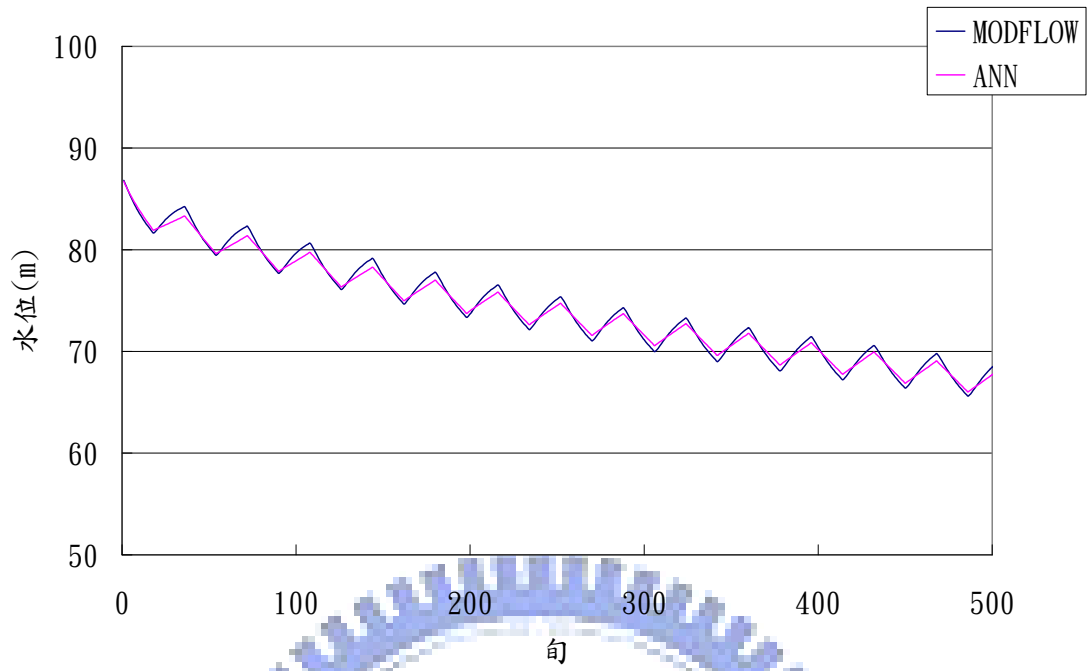
圖附 B.16 預測案例 B.4 號井水位比較圖



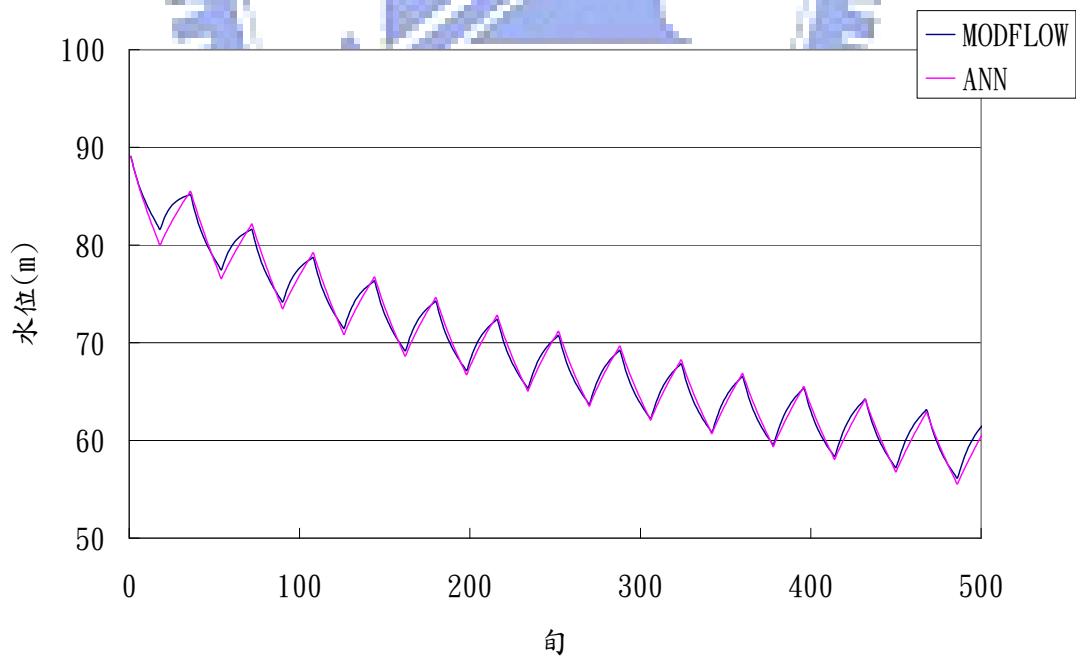
圖附 B.17 預測案例 B.5 號井水位比較圖



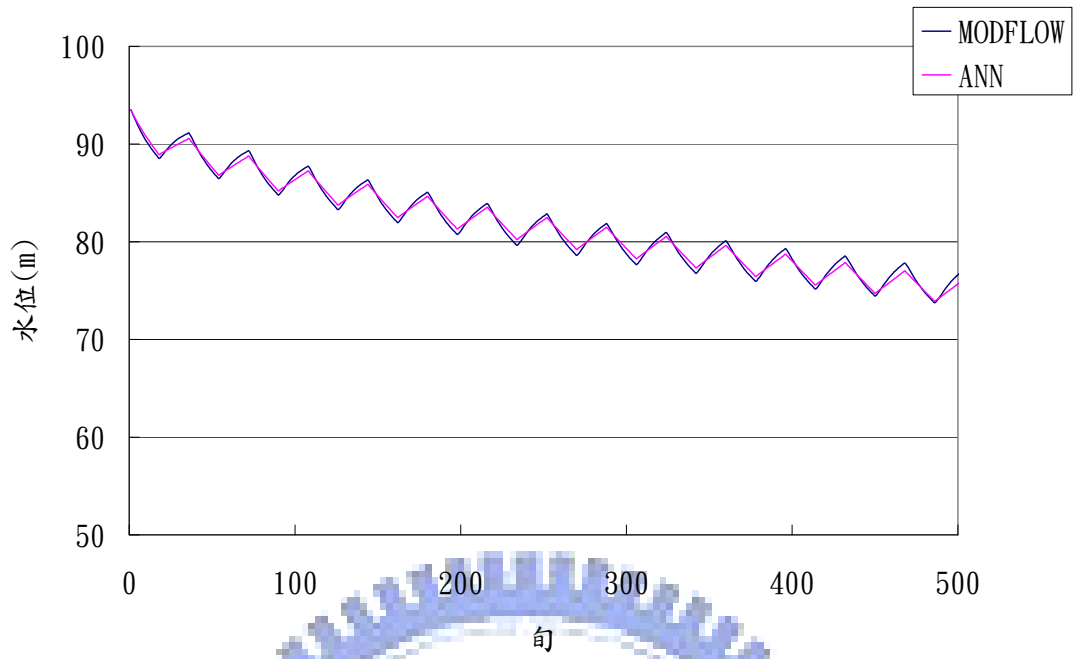
圖附 B.18 預測案例 B.1 號井 0~500 旬水位比較圖



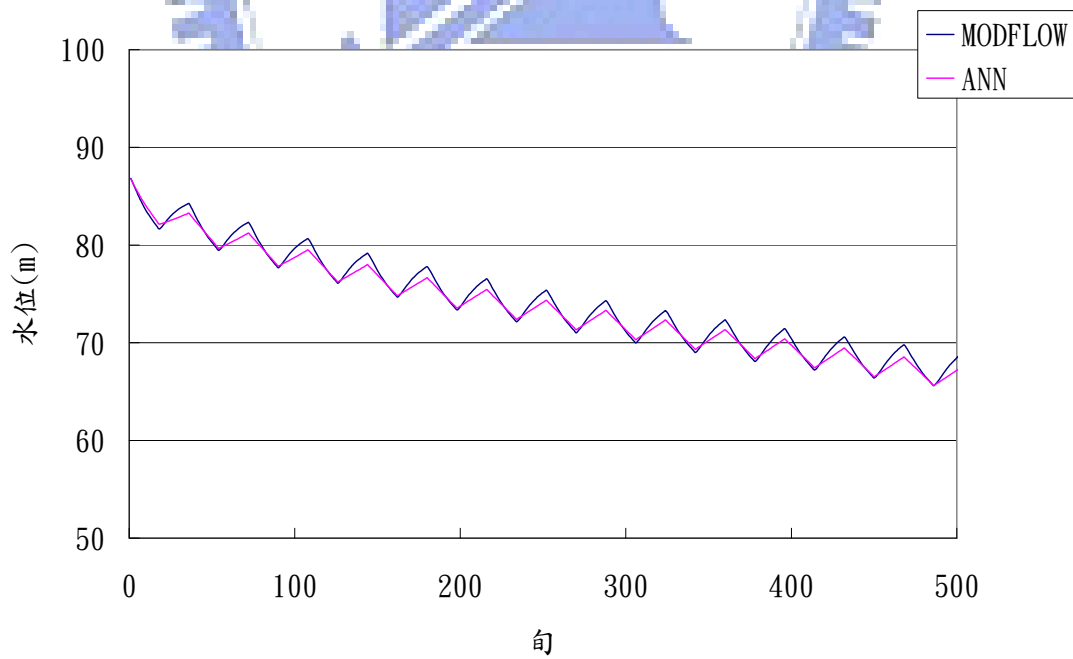
圖附 B.19 預測案例 B.2 號井 0~500 旬水位比較圖



圖附 B.20 預測案例 B.3 號井 0~500 旬水位比較圖



圖附 B.21 預測案例 B.4 號井 0~500 旬水位比較圖



圖附 B.22 預測案例 B.5 號井 0~500 旬水位比較圖