


國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

系統流程轉換成動力流圖之研究  
— 以水資源分析為例



**Transferring the System Process into a  
System Dynamic Flow Diagram – Cases  
Study of Water Resources Analysis**

研究生：蘇昀柏

指導教授：張良正 博士

中華民國九十六年八月

系統流程轉換成動力流圖之研究－以水資源分析為例

Transferring the System Process into a System Dynamic Flow  
Diagram – Cases Study of Water Resources Analysis

研 究 生：蘇昀柏

Student: Yun B. Su

指 導 教 授：張良正 博士

Advisor: Dr.Liang C. Chang

國 立 交 通 大 學  
土 木 工 程 學 系 碩 士 班

碩 士 論 文



A Thesis

Submitted to Institute of Civil Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master of Science  
in  
Civil Engineering  
August 2007  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 六 年 八 月

# 系統流程轉換成動力流圖之研究－以水資源分析為例

學生：蘇昀柏

指導教授：張良正 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

傳統上對水資源問題，常會應用系統圖與流程圖做為分析輔助，而目前系統動力學亦逐漸被應用於分析水資源問題，其中之系統動力流圖可更完整的表達問題的內部流程與結構，輔助傳統流程分析方法之不足。本研究目的即在提出一整合系統圖與流程圖成為系統動力流圖的新方法，並以五個水資源案例來驗證此方法之有效性，及透過各種情境模擬來進一步分析系統的反應。

研究結果顯示，系統圖與流程圖各自只表達解題所需的部份訊息，因此解題時仍需整合兩者的資訊，但是這種整合資訊經常隱藏於分析者之中，造成後續對於問題瞭解分析的困難。而系統動力學中之系統動力流圖，不但可表達系統架構及演算流程，而且可進一步將系統圖與流程圖所無法表達的各變數間的影響關係展現出來。本研究所提出的整合流程主要包含四大步驟：(1)資訊傳遞之連結；(2)實體流與資訊流之釐清；(3)系統圖與流程圖之整併；(4)動力流圖之修正。而以水庫水量調配為主題的各種情境模擬結果，亦驗證了因果回饋圖之正負回饋迴路對系統反應的解釋與預測，本研究更進一步證明若有邏輯判斷變數存在，將使回饋環的結構隨著時間推演變化。本研究提出之整合流程可連貫傳統分析方式與系統動力學的分析邏輯，幫助一般人掌握系統動力學的基本理念，而動態回饋結構的發現將有助於分析者更深入的觀察及解釋系統的反應。

# **Transferring the System Process into a System Dynamic Flow Diagram – Cases Study of Water Resources Analysis**

Student : Yun-Bo Su    Advisor : Dr. Liang-Cheng Chang

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

The system diagram and flowchart are conventional ways to assist in analyzing water resources problems. On the other hand, system dynamics has got more attention in water resources analysis. The stock-flow diagram is the most important concept in system dynamics. To facilitate understanding the merits of system dynamics, this research proposes a novel procedure to integrate the system diagram and flowchart into a stock-flow diagram of system dynamics. Five hypothetical case studies on reservoir operations were performed to demonstrate the effectiveness of integrating procedures and scenario studies to analyze system response.

This research shows that only the system diagram and flowchart cannot present all the information. To solving a problem, the hidden relations in the two diagrams must be linked. However, the hidden information only exists in the mind, and this causes a difficulty of understanding how the problem is solved. On the other hand, the stock-flow diagram of system dynamics can clearly describe all the information required for solving a problem including the inter-relationship between system variables. The proposed novel integration procedure involved four steps: connecting the variables,

identifying the material and information flow, disassembling the system diagram and flowchart and reassembling that into a stock-flow diagram, and then modifying the stock-flow diagram. Scenarios studies focusing on reservoir operation have demonstrated the integration procedure and verified the effectiveness of predicting system response by the causal feedback diagram. This study also reveals that the structure of the causal feedback diagram may vary depending on the evaluation of logical conditions. The proposed novel integrating procedure bridges the gap between conventional system analysis and system dynamics and facilitated understanding the merits of system dynamics. The concept of dynamic structure of the causal feedback diagram also helps researchers to understand system responses in the deep.



## 謝 誌

感謝吾師張良正教授對於本論文之指導及研究生涯中對學生工作態度及學問研究之啟發，使學生受益匪淺。承蒙口試委員國立高雄師範大學環境教育研究所葉欣誠所長、逢甲大學陳祖憲教授、葉昭憲教授及楊朝仲博士細心指正審閱拙文，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。

在交通大學求學的這段時間，特別感謝學長們對於我的提攜與照顧，尤其是楊朝仲學長及何智超學長，很榮幸自己能參與這項研究，此外感謝陳鴻輝學長在工程實務上的指導與幫助，葉明生學長於地下水方面給予專業之建議及協助，陳宇文學長在水資源資訊問題上給予專業之建議及協助，朱宏杰學長在計畫上的鼓勵與指導，蔡瑞彬學長給予我多方面的協助與照顧，還有吳明穎、許文鴻學長對我的照顧。

感謝在這漫長的求學路程中有同窗好友浚瑋、全佑、嘉晉、任馥及君儀之鼓勵及扶持，使我才能一路撐到了最後，還有正偉學弟你的優秀激起我的鬥志，還有智維、致豪、柏成、為善、昱維、敏威、韋圻及瀚聖，研究室有你們才不至於苦悶。此外特別感謝 Gwater 魔獸團隊的各位團員，感謝你們陪我度過難耐的日子，還有 118A 中的兩位小當家，你們的美食真的是很棒，望你們都可以如期畢業喔。

最後，感謝父親對我的支持與母親對我的信心，僅將此研究獻給我最親愛的家人及週遭支持、關心我的人們。

# 章 節 目 錄

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 中文摘要.....                   | I   |
| 英文摘要.....                   | II  |
| 謝誌.....                     | IV  |
| 章節目錄.....                   | V   |
| 表目錄.....                    | VII |
| 圖目錄.....                    | IX  |
| 第一章 緒論.....                 | 1   |
| 1.1 前言 .....                | 1   |
| 1.2 文獻回顧 .....              | 3   |
| 1.2.1 傳統水資源調配分析之發展.....     | 3   |
| 1.2.2 流程圖轉換成系統動力流圖之文獻 ..... | 6   |
| 1.2.3 國內外運用系統動力學之文獻.....    | 9   |
| 1.3 研究目的 .....              | 11  |
| 第二章 研究流程 .....              | 12  |
| 第三章 理論介紹 .....              | 15  |
| 3.1 系統動力學 .....             | 15  |
| 3.1.1 系統動力學之發展歷程.....       | 15  |
| 3.1.2 系統動力學原理說明.....        | 15  |
| 3.2 流程 .....                | 19  |
| 3.2.1 流程之定義與概念.....         | 19  |
| 3.2.2 流程表徵工具.....           | 20  |
| 第四章 整併與轉換原則 .....           | 23  |
| 4.1 案例一：單水庫供水之案例 .....      | 26  |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 案例二：單水庫供水加入需求量考量之案例 .....                        | 49  |
| 4.3 案例三：單水庫供水加入需求量以及河川放流量考量之案例 .....                 | 59  |
| 4.4 案例四：單水庫供水加入需求量、河川放流量以及水庫操作<br>上加入規線操作考量之案例 ..... | 69  |
| 4.5 案例五：兩水庫聯合營運供水之案例 .....                           | 77  |
| 第五章 因果回饋分析 .....                                     | 87  |
| 5.1 案例一：單水庫供水之案例 .....                               | 90  |
| 5.2 案例二：單水庫供水加入需求量考量之案例 .....                        | 93  |
| 5.3 案例三：單水庫供水加入需求量以及河川放流量考量之案例 .....                 | 102 |
| 5.4 案例四：單水庫供水加入需求量、河川放流量以及水庫操作<br>上加入規線操作考量之案例 ..... | 109 |
| 5.5 案例五：兩水庫聯合營運供水之案例 .....                           | 113 |
| 第六章 結論與建議 .....                                      | 117 |
| 6.1 結論.....                                          | 117 |
| 6.2 建議.....                                          | 119 |
| 參考文獻.....                                            | 120 |



## 表 目 錄

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 表 4.1.1 案例一流程圖內各變數與計算方式說明表 ..... | 26  |
| 表 4.2.1 案例二流程圖內各變數與計算方式說明表 ..... | 49  |
| 表 4.3.1 案例三流程圖內各變數與計算方式說明表 ..... | 59  |
| 表 4.4.1 案例四流程圖內各變數與計算方式說明表 ..... | 69  |
| 表 4.5.1 案例五流程圖內各變數與計算方式說明表 ..... | 77  |
| 表 5.1.1 案例一模擬條件與變數之方程式之列表 .....  | 91  |
| 表 5.2.1 案例二模擬條件與變數之方程式之列表 .....  | 95  |
| 表 5.3.1 案例三模擬條件與變數之方程式之列表 .....  | 104 |
| 表 5.3.2 案例三經判斷後的所有因果回饋圖列表 .....  | 105 |
| 表 5.4.1 案例四模擬條件與變數之方程式之列表 .....  | 110 |
| 表 5.5.1 案例五模擬條件與變數之方程式之列表 .....  | 114 |



## 圖目錄

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 圖 2.1 研究流程圖 .....                                    | 14 |
| 圖 3.1.1 水庫供水操作之因果回饋環路 .....                          | 17 |
| 圖 3.1.2 水庫供水操作之系統動力流圖 .....                          | 17 |
| 圖 3.2.1 流程的三個層次圖 .....                               | 20 |
| 圖 4.1 系統圖與流程圖整合步驟示意圖 .....                           | 25 |
| 圖 4.1.1 案例一之系統圖及流程圖示意圖 .....                         | 28 |
| 圖 4.1.2 案例一系統與流程圖初步結合示意圖 .....                       | 29 |
| 圖 4.1.3 案例一釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖 .....   | 31 |
| 圖 4.1.4 案例一拆解"輸入檔給定"的框架之修改圖 .....                    | 32 |
| 圖 4.1.5 案例一變數傳入與保留之判定("輸入檔給定"框架)之修改圖 .....           | 33 |
| 圖 4.1.6 案例一拆解"計算 t 時刻可利用水量"的框架之修改圖 .....             | 34 |
| 圖 4.1.7 案例一變數傳入與保留之判定("計算 t 時刻可利用水量"框架)之修改圖 .....    | 35 |
| 圖 4.1.8 案例一拆解"決定 t 時刻水庫之供水量"的框架之修改圖 .....            | 36 |
| 圖 4.1.9 案例一變數傳入與保留之判定("決定 t 時刻水庫之供水量"框架)之修改圖 .....   | 37 |
| 圖 4.1.10 案例一箭線移動("決定 t 時刻水庫之供水量"框架)之修改圖 .....        | 38 |
| 圖 4.1.11 案例一拆解"計算 t+1 時刻水庫蓄水量"的框架後之修改圖 .....         | 39 |
| 圖 4.1.12 案例一變數傳入與保留之判定("計算 t+1 時刻水庫蓄水量"框架)之修改圖 ..... | 40 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 圖 4.1.13 案例一箭線移動("計算 t+1 時刻水庫蓄水量"框架)之修改圖<br>.....     | 41 |
| 圖 4.1.14 案例一拆解"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之<br>修改圖 .....     | 42 |
| 圖 4.1.15 案例一須確認的三個計算方程式示意圖 .....                      | 43 |
| 圖 4.1.16 案例一檢視變數傳遞之關係後之示意圖 .....                      | 44 |
| 圖 4.1.17 案例一檢視變數傳遞之關係後之示意圖 .....                      | 45 |
| 圖 4.1.18 案例一變數位置的調整使交叉線段盡量消失之示意圖 .....                | 46 |
| 圖 4.1.19 案例一單水庫水量調配系統動力流圖 .....                       | 47 |
| 圖 4.1.20 案例一因果回饋圖 .....                               | 48 |
| 圖 4.2.1 案例二之系統圖及流程圖示意圖 .....                          | 51 |
| 圖 4.2.2 案例二系統與流程圖初步結合示意圖 .....                        | 52 |
| 圖 4.2.3 案例二釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改<br>圖..... | 54 |
| 圖 4.2.4 案例二拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之<br>修改圖 .....     | 55 |
| 圖 4.2.5 案例二須確認的三個計算方程式示意圖 .....                       | 56 |
| 圖 4.2.6 案例二檢視變數傳遞之關係後之示意圖 .....                       | 57 |
| 圖 4.2.7 案例二因果回饋圖 .....                                | 58 |
| 圖 4.3.1 案例三之系統圖及流程圖示意圖 .....                          | 61 |
| 圖 4.3.2 案例三系統與流程圖初步結合示意圖 .....                        | 63 |
| 圖 4.3.3 案例三釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改<br>圖..... | 64 |
| 圖 4.3.4 案例三拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之<br>修改圖 .....     | 65 |
| 圖 4.3.5 案例三須確認的五個計算方程式示意圖 .....                       | 66 |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 圖 4.3.6 案例三檢視變數傳遞之關係後之示意圖 .....                         | 67 |
| 圖 4.3.7 案例三因果回饋圖 .....                                  | 68 |
| 圖 4.4.1 案例四之系統圖及流程圖示意圖 .....                            | 71 |
| 圖 4.4.2 案例四系統與流程圖初步結合示意圖 .....                          | 72 |
| 圖 4.4.3 案例四釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖.....       | 73 |
| 圖 4.4.4 案例四拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖 .....           | 74 |
| 圖 4.4.5 案例四須確認的七個計算方程式示意圖 .....                         | 75 |
| 圖 4.4.6 案例四檢視變數傳遞之關係後之示意圖 .....                         | 75 |
| 圖 4.4.7 案例四因果回饋圖 .....                                  | 76 |
| 圖 4.5.1 案例五之系統圖及流程圖示意圖 .....                            | 79 |
| 圖 4.5.2 案例五之水庫 1 與水庫 2 演算流程圖 .....                      | 79 |
| 圖 4.5.3 案例五系統與流程圖初步結合示意圖 .....                          | 80 |
| 圖 4.5.4 案例五水庫 1 系統與流程圖初步結合示意圖 .....                     | 81 |
| 圖 4.5.5 案例五水庫 2 系統與流程圖初步結合示意圖 .....                     | 81 |
| 圖 4.5.6 案例五水庫 1 釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖 ..... | 82 |
| 圖 4.5.7 案例五水庫 2 釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖 ..... | 83 |
| 圖 4.5.8 案例五水庫 1 拆解完框架之修改圖 .....                         | 84 |
| 圖 4.5.9 案例五水庫 2 拆解完框架之修改圖 .....                         | 84 |
| 圖 4.5.10 案例五整體拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖 .....        | 85 |
| 圖 4.5.11 案例五因果回饋圖.....                                  | 86 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 圖 5.1 因果關係示意圖 .....                                      | 88  |
| 圖 5.2 回饋環路(正回饋環).....                                    | 88  |
| 圖 5.3 回饋環路(負回饋環).....                                    | 88  |
| 圖 5.1.1 案例一因果回饋圖 .....                                   | 91  |
| 圖 5.1.2 案例一(調動入流量)模擬結果圖.....                             | 92  |
| 圖 5.1.3 案例一(調動供水係數)模擬結果圖.....                            | 92  |
| 圖 5.2.1 案例二因果回饋圖 .....                                   | 94  |
| 圖 5.2.2 案例二因果回饋圖(可利用水量小於需求量) .....                       | 94  |
| 圖 5.2.3 案例二因果回饋圖(可利用水量大於需求量) .....                       | 95  |
| 圖 5.2.4 案例二情境一(入流量=constant)模擬結果圖 .....                  | 96  |
| 圖 5.2.5 案例二情境二(入流量=sin 函數)模擬結果圖.....                     | 96  |
| 圖 5.2.6 案例二情境三(入流量=random 函數，random 一組變化)模擬<br>結果圖 ..... | 97  |
| 圖 5.2.7 案例二情境四(random 多組變化，I=50)模擬結果圖.....               | 98  |
| 圖 5.2.8 案例二情境四(random 多組變化，I=100)模擬結果圖.....              | 99  |
| 圖 5.2.9 案例二情境四(random 多組變化，I=150)模擬結果圖.....              | 100 |
| 圖 5.2.10 案例二情境四(random 多組變化，I=200)模擬結果圖.....             | 101 |
| 圖 5.2.11 案例二修改後之回饋圖 .....                                | 101 |
| 圖 5.3.1 案例三因果回饋圖 .....                                   | 103 |
| 圖 5.3.2 案例三模擬結果圖 .....                                   | 108 |
| 圖 5.3.3 案例三修改後之因果回饋圖 .....                               | 108 |
| 圖 5.4.1 案例四水庫操作分層示意圖 .....                               | 109 |
| 圖 5.4.2 案例四因果回饋圖 .....                                   | 110 |
| 圖 5.4.3 案例四模擬之結果圖 .....                                  | 111 |
| 圖 5.4.4 案例四修改後之因果回饋圖 .....                               | 112 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 圖 5.5.1 案例五經整理後之因果回饋圖 .....  | 115 |
| 圖 5.5.2 案例五水庫 1 蓄水量模擬圖 ..... | 115 |
| 圖 5.5.3 案例五水庫 2 蓄水量模擬圖 ..... | 116 |
| 圖 5.5.4 案例五修改後之因果回饋圖 .....   | 116 |



# 第一章 緒論

## 1.1 前言

傳統上進行嚴謹的水資源系統分析時，一般皆會針對問題繪製系統圖與流程圖，以釐清問題的解決方式與處理邏輯。系統圖乃是將系統本身以圖形表達，其中系統指的是「由相互作用與相互依賴的若干組成部分，結合成的具有特定功能的有機整體，而且這個系統本身又是它所從屬的一個更大系統的組成部分」，系統圖通常定義了問題的結構與範圍；流程圖則是將為達成特定目的而實行的一連串邏輯相關的工作以圖形表現，通常表達了問題之處理步驟。系統圖與流程圖各自表達了解題所需的部份資訊，例如：水資源調配的系統圖可以展現各供水與需水節點的空間相對位置及節點間水源流動的順序，但是各節點放水的原則及計算方式就得從流程圖才能得知。同樣地，只單看流程圖雖然可以瞭解水源運用操作及演算的順序，但是無法得知流程圖各變數於實體系統的相對位置與連接型態。因此，實際在解題時仍需將上述兩種圖的資訊允以整合利用，但是這種整合的資訊經常隱藏於分析者的思維中，如此將產生(1)解題之完整思維不易被他人了解，(2)錯誤產生時，不易被發現，因而影響問題之討論及經驗的傳承。所以，若能將解題之完整思維正確且明白地表示出來，則不但可避免上述問題，更有助於問題的解決及知識的累積。

系統動力學特色為處理高階次、非線性、多重複雜時變系統之問題，且明確表現系統內部及系統外部因素之間的相互關係，且建立動力模型時，會將系統中的物質與信息的運動想像成為流體的運動，設計出一套特有的符號來描述系統，這種用符號描述系統的圖便稱為系統動力流圖。系統動力流圖用來描述系統各部份之間的相互關係，例如各子系統中的相互關係、反饋環的結構及其它系統的連接等。系統

動力流圖的特點是直觀、易瞭解、便於檢查，它是建模的有力工具。系統動力學苦明確表現系統內部及系統外部因素之間的相互關係，因此非常適合於應用水資源調配問題之研究。。

由於利用系統動力學所建立之系統動力流圖正可用以輔助說明傳統流程分析之不足處。因此，本研究將傳統分析分析方式中的系統圖與流程圖轉換成系統動力流圖，以連結傳統分析方式與系統動力學的思維關係。





## 1.2 文獻回顧

本研究內容涵蓋了水資源調配、流程轉換與系統動力學，以下將對過去關於「水資源調配分析」、「流程轉換」與「系統動力學」的研究作一整理與回顧。

### 1.2.1 水資源調配分析

傳統上對於水資源問題的分析方式可分為模擬法與優選法。Yeh(1985), Wurbs (1993)曾對水庫管理及操作模式，做過理論發展演進之整理及介紹，包含線性規劃(LP)、動態規劃(DP)、非線性規劃(NLP)及模擬法。Labadie(2004)更對多水庫最佳操作，做過詳細的理論發展演進之整理及介紹。

#### (1) 模擬法

模擬模式為一種模仿實際系統行為的演算程序，可詳細並準確描述水資源系統複雜之特性，符合實際現場操作之情況。其方法為一種分析物理系統運轉的技巧，以程式語言將實體系統操作的特性與行為複製，為一種模仿實體系統行為的演算程序。其代表性者為美國陸軍工程師團的 HEC-5 模式，此模式可用以模擬流域性的水庫蓄水利用及防洪作業；1985 年經濟部水資會(水利署前身)曾與荷蘭戴伏特水工所(Delft Hydraulics)合作發展一針對台灣地區設計的水量分配電腦模式(RIBASIM, RIVER BASIN SIMULATION)，荷蘭提出之 RIBASIM 模式係修正自美國麻省理工學院發展之 MITSIM 模式，此模式可模擬一複雜供水系統之水量調配，並具有水質分析、經濟評估等多項功能，且模式已建立一 GIS 導向的使用者介面，使用者即可以此建構水資源系統及輸入相關資料，惟其程式碼目前並未對外開放，造成使用者不能詳細地了解模式之運作過程，亦無法對其作任何修改，皆亦屬於逐一分配模擬模式之範疇。林松青等(1990)提出簡化型串聯水庫運用模

式，將串聯水庫疊加成一等量水庫，然後進行該等量水庫之模擬演算，以求得整個串聯水庫系統之出水能力，並因忽略串聯水庫間之側向流量，故特別分析側向流量相關因子之變動對於運用模擬結果之影響，以推求簡化型模式適用之條件與範圍。徐年盛等（1992）進行淡水河流域地表水與地下水最佳聯合運用之模擬模式的研究。吳瑞賢等人(1996)以模擬分析配合局部搜尋之方法，應用於曾文水庫與烏山頭水庫運轉規線之制定並研究其操作。林松青等人(1998)採用保持各水庫水位指標相等原則之放水策略，藉由數學解析方式，推導並聯水庫系統中任一水庫放水量之通式，並據以發展系統聯合運轉之模式。楊淑敏(1998)利用 RIBASIM 模式進行分析攔河堰、淨水場及水庫增建計劃在各目標年時不同方案組合之最大供水量，並試以找出一組最佳聯合調配方案，使得淡水河流域地區在未來一、二十年內免於面臨缺水之苦。黃文政等人(2000)藉由歷史流量及序率水文模式所產生的合成流量，配合水庫旬計進水量及各標的常水年旬計配水量等資料，針對水庫實際營運上所遭遇的問題，進行水庫系統的模擬分析與探討，以尋求理想之操作規線。

模擬法雖然能掌握系統細節，符合實地操作現況，缺點為不能提供數學意義上的最佳解。

## (2) 優選法

優選法係將問題以嚴謹的數學形式表達，再應用優選方法求解，常用的數學規劃方法為線性規劃法(linear programming, 簡稱 LP)、動態規劃法 (dynamic programming, 簡稱 DP) 及網流法(network flow programming, 簡稱 NFP)、混合整數規劃法(mixed-integer programming) 以及以人工智慧為基礎之類神經網路法(neural network)等，且多為探討多水庫之規劃與經營操作問題。鄭韻如(2002)以線性規劃為核心建

立多水庫聯合營運模擬模式，並應用於南部區域水資源調配之探討，其模擬模式中應用線性規劃法求解各個模擬時刻系統之最佳水量調配；林松青(2002)將遺傳演算法結合解析模擬的觀念及可視化模擬技巧，應用於整合型區域水庫與攔河堰聯合運轉系統之研究；張育雅(2003)以線性規劃法為核心發展大甲溪與大安溪聯合營運單一時刻內最佳的配水量模擬模式，並採用遺傳演算法針對鯉魚潭水庫優選出可同時考慮長、短期水文狀況之複合式規線；李志鵬(2004)利用線性規劃發展一有效率且可彈性地應用於各種複雜水資源系統之多水庫聯合營運跨時刻優選模式，並以遺傳演算法為南部區域之曾文、烏山頭及南化三座水庫制定一組可同時考慮長、短期水文狀況之多水庫聯合營運複合式操作規線，以期使三水庫之營運能發揮最大效益，使南部區域的水資源能有最佳之運用。

網流規劃為線性規劃的特殊解法之一，其將原線性規劃問題的對偶模式(dual model)加以轉換，成為一跨時段的網路系統，再對此特殊網路形式問題加以求解。網流法代表性模擬模型有美國德州水資源開發理事會(Texas Water Development Board, TWBD)的 SIM、SIMYLD 模型(1972)，用以模擬德州水資源系統計畫的開發時程問題，包含何項計畫、在何時、應興建至何規模，及應如何操作等，此一網流模擬分析系統營運概念，其後被廣泛引用在世界其他國家水資源分析(Graham,1986)。周乃昉(1998)利用動態網流模式由歷史紀錄分析水資源在區域內跨時刻最佳配水量後，再進一步以類神經網路模式學習系統內即時配水特性，並歸納系統最佳經營調配策略，分析民國 100 年南部高屏嘉南地區水資源供需系統，結果顯示預估的系統最佳即時供水策略相當良好。蔡嘉訓(2002)分別利用水庫水位指標相等(BWLI)與已知水庫供水比例作為決定各個水庫供水量之規則建立一多水庫

系統之模擬模式，在考慮水庫水位指標下，在每一旬中利用兩向變數將具水庫操作規線與打折供水規則之多水庫供水系統進行公式化成一通用之模式，將每一旬中之通用模式以及各個水庫之水位指標計算式做為限制條件，而令系統之缺水指標以及各個水庫間之水位指標差為最小做為目標函數以進行該旬中多水庫供水系統之最佳聯合操作；考慮水庫供水比例下，以水庫供水比例取代水庫水位指標，利用長期優選模式且在系統中之水量能夠跨時段使用之條件下，事先求得最佳水庫供水比例，並將所求得之最佳水庫供水比例，進行逐時段優選模式以便與考慮水庫水位指標進行比較。

動態規劃相當適合用以求解多時段之水庫操作問題，但應用在多水庫之操作問題時，最大的困難點在於多考慮一座水庫即增加一個系統變數，及一個至數個決策變數，以致受到維度障礙(Curse of Dimensionality)之限制。

上述水資源調配分析方法之文獻，皆先會對問題了解後繪製系統圖與流程圖，再透過系統圖與流程圖來建置模擬模式，然而實際建置模式時，卻已經將系統圖與流程圖整合，但是其整合的資訊經常隱藏於分析者的思維中，而有礙於知識的傳承。

## 1.2.2 流程轉換

欲探討流程轉換之文獻，首先必須先對流程及流程表達工具進行定義，再進行流程轉換之文獻回顧。

### (1) 流程之定義與概念

Davenport(1990)指出流程(Process)是企業為達成特定的成果所實行一連串邏輯相關的工作表現，它也是企業的核心，一組流程構成一個企業系統。Davenport 和 Short 提出出企業流程是由三種元件組合而成：①個體(Entities)：指的是流程所流經過的組織或部門，它們可

以是組織內或是組織外的個體。②物件(Object)：指的是某一流程產出的結果，產出的結果可以是實體型態也可以是資訊等形態的輸出。③活動(Activity)：流程中的活動可以分成管理的活動或是一般性的作業。Melan(1992)提出流程有三個關鍵要件：轉換活動、回饋控制與可重複性。Davenport (1993)對流程有新的定義，將流程分成三個依序層次。首先，在流程層次(Process Level)必須建立所有流程的流動與互相連貫的流程願景(Process Vision)；其次，在次流程層式(Subprocess Level)以描述一般流程的手法闡述每一個次流程；最後，活動層次(Activity Level)中清楚的描述從事每一個主要活動所需的人、資訊、時間等。本研究中是利用流程圖進行流程表達工具，而且 Davenport 於 1990 年提出組成流程的三種元件正是流程圖所要表達出來的資訊，因此本研究便採用此定義作為流程的概念。

## (2)流程表徵工具：

流程表徵的定義反映了不同的流程定義與概念，欲表達出不同流程的定義與概念，勢必採用不同的流程表徵工具。然常見的流程表徵工具有流程圖(Flow Chart)、IDEF(Integrated Computer Aided Manufacturing DEFinition)、斐氏網(Petri Nets)等流程表徵工具，本研究是利用流程圖進行流程表達工具，故只針對流程圖進行說明，其說明如下。

流程圖(Flow Chart)是一個使用簡單符號來描述工作與決策並且使用線條將工作與決策之間的關係進行描述，所要表示的是針對特定的流程進行由輸入到輸出的整個轉換工作。傳統的流程圖雖然簡單，但是應用在企業界卻難以發揮效果，因為企業的許多核心流程往往都是橫跨多個部門才能算是一個完整的流程，因此許多企業所採用的是 W. Edwards Deming 所創造，而由 Myron Tribus 在美國大力宣傳的交

互功能流程圖(Deployment Flow Chart)。交互功能流程圖是傳統流程圖的一種變形，它將一個完整的流程圖切割成許多功能別的角色，再依流程中各項元件的歸屬功能別分別繪製到該功能下，但是圖中各元素之間的關係並沒有改變，改變的只是流程圖中的擺放位置。因此它能夠繪製出一個完整跨單位的流程，而且能夠顯示出此流程中誰必須負責來完成每項工作。也能利用此流程圖顯示在專案小組中的成員如何展開其專案。因為它能夠顯示出某一特定的流程所流經的功能別，及各功能別在此流程中所必須處理的工作及扮演的角色。故本研究採用傳統的流程圖(Flow Chart)來描述工作與決策之間的關係。

### (3)流程轉換之文獻：

傳統上流程圖所能表現的只有各流程組成要素間的先後順序與方向，無法描述流程中的活動與資源的關係，而且流程圖也無法表現出許多發生在企業內外的回饋情形，以上種種都是現行流程圖的限制，然系統動力學為描述、探索和分析複雜系統內流程、訊息、組織疆界與策略的一種嚴謹的研究方法，其主要的表達工具可以分為兩種：①因果回饋圖（Causal Loop Diagram）；②流圖（Stock-Flow Diagram）。本研究係將系統圖與流程圖整合成系統動力流圖。在流程分析的相關議題上，已經有系統動力學模式與流程相關的議題進行結合，而且已經取得初步的成果，以下則指出以往學者之相關研究。張光漢提出了一些循序型相依關係流程圖轉換為流圖的方法，但是無明確指出其中資源與活動的地位，導致在判斷符號的轉換部分稍嫌薄弱、而且在其他流程圖內無法表達的限制因素這部分的探討也稍嫌不足。莊博全先整理文獻中流程相依的類型並歸納出流程圖轉換成流圖的原則，並利用企業界實際個案來進行實證。

流程轉換之文獻雖有初步的成果，但文獻中通常只針對單一流程

相依關係或單一個別案例進行轉換，若在這類研究中加入不同之相依關係或應用在不同案例時，便必須重新定義其轉換原則，如此將不易運用。

### 1.2.3 國內外運用系統動力學之文獻：

本研究是利用系統動力學作為研究方法，系統動力學為模擬法的一種，原本強調能幫助決策者瞭解一個複雜系統的架構和特性的方法論，也是一種概念的表達，而在實際操作上主要是在顯示整個系統動態行為隨時間變化的特性。其最初是 Jay W. Forrester (福裡斯特 1956) 在福特基金會(Ford Foundation)與史隆基金會(Alfred P. Sloan Foundation)贊助下發展，並曾利用一個訊息傳遞的因果回饋關係，分析企業政策的制定，後來此方法進而被擴展到複雜的物理，生物學，社會學、經濟等領域。

國內外已有許多應用系統動力學的文獻，像 Simonovic et al. (1997) and Simonovic and Fahmy (1999) 利用系統動力學概念建立水資源供需模型並應用在埃及地區，藉以評估氣候變遷對於水資源供需的影響情形，結果顯示水庫的蒸發對於水資源規劃是非常重要的。Ahmad et al. (2000) 利用系統動力學建立水庫操作模型，並應用在加拿大 Shellmouth 流域上的 Assiniboine 水庫，除了針對現有溢洪道進行洪水影響的研究外，另優選出另一個溢洪道，且曾針對水庫初始水位進行洪水季節溢流和水庫溢流進行敏感度分析。XU et al. (2002) 應用水資源系統動力學(WRSD)分析中國大陸黃河流域的永續性。結果顯示長期使用地下水將面臨環境與生態的挑戰，另外廢污水回收策略在考量黃河永續利用應為優先策略之一。Stave et al. (2003) 利用系統動力學方法與水管理的概念建立拉斯維加斯水資源模型，藉由模型闡述保存水的重要性與價值。Güneralp (2003) 曾以系統動力學的思維方式建

立湖泊動力模式，來聯結生態系統、經濟活動、社會結構三者之間關係，藉由建立的動力模式及模擬結果中呈現，湖泊水量與水質的變化將會直接影響生態系統的平衡。Sehlike and Jacobson(2005)採用系統動力學觀念模擬 Bear River basin 地表水與地下水相互影響關係。黃鈺珊(2001)建構高屏溪流域水資源使用與都市系統動力模型，並以情境分析，針對當前高屏溪流域之水資源與都市發展政策進行政策試驗，檢視其是否達到永續發展之理念。詹麗梅(2001)利用系統動力學理論建立區域供水系統之模擬模式，其中包含需水量預測與用水調配模擬模式，並建立永續性評價指標體系與評價方法，以探討不同供水策略對供水系統永續性之影響。陳明業(2002)建立淡水河水資源系統動力模式，研究範圍包括台北、板新、石門及基隆供水區域，針對 2002-2020 年之供需水情況，進行各項規劃方案之永續性評估。李孟璵(2002)高雄地區愛河水環境生態復育及水污染防治策略分析，以高雄愛河為研究對象，利用河川水質模式，配合上游集水區的人口變化、土地使用以及降雨型態的差異，並使用系統動力學的軟體(STELLA)來建構閘門操控模式以及污水處理策略模式並以實際資料針對模式加以驗證修改，評估不同的閘門操控策略以及污水處理策略方案對愛河水環境與生態環境的衝擊。

運用系統動力學的文獻相當多，文獻中皆有繪製回饋圖與系統動力流圖，並加入策略進行模擬分析，但是文章幾乎完全沒提及如何產生系統動力流圖，且文章中很少針對模擬結果與回饋圖之相對應之關係做分析，倘若當某一變數有判斷式產生時，則會改變回饋圖之結構，進而影響其模擬結果。



### 1.3 研究目的

本研究目的主要是在發展一新的方法將系統圖與流程圖轉換成系統動力流圖，並進一步釐清系統動力流圖與因果回饋圖的關係，及因果回饋圖本身可能的結構變化。將系統圖與流程圖轉換成系統動力流圖，有助於連結傳統分析方式與系統動力學的思維關係，及反映出動力流圖的優點，即可同時清楚表達出系統與其流程之關係。探討因果回饋圖本身可能的結構變化，則有助於分析者瞭解及解釋系統的行為。



## 第二章 研究流程

本研究的流程如圖 2.1 所示，研究流程有兩大步驟，文獻的收集與整理以及傳統分析與系統動力學思維的整合。

### 文獻的收集與整合：

文獻收集與整理的範圍包含了水資源調配分析、流程轉換及相關系統動力學之文獻。

### 傳統分析與系統動力學思維的整合步驟詳述如下：

- (1) 先針對水資源問題作系統分析，繪製系統圖與流程圖，來敘述問題的結構及處理的步驟。
- (2) 本研究進一步依據以下幾個步驟將系統圖與流程圖轉換成系統動力流圖：①將系統圖與流程圖之間的資訊傳遞行為(傳遞關係)以連接線表示出來；②利用系統動力學的兩種建模物件【(i)存量(Stock)：系統變數在某一特定時刻的狀態與(ii)流量(Flow)：某種儲存變數變化之快慢】，來釐清實體流與資訊流；③以系統圖為主體，將流程圖的每一個處理步驟慢慢整合併進系統圖中；④檢視系統內各種變數間的傳遞行為(連接線)是否為因果關係並加以修改。由以上步驟可將系統圖與流程圖結合成系統動力學中的系統動力流圖，可釐清所有變數之間的傳遞關係。
- (3) 系統動力流圖雖將變數間的傳遞關係表現出來，但未明顯地將變數間的邏輯關係與因果關係表示出來，故將系統動力流圖中的存量(Stock)與流量(Flow)兩種物件隱藏，並在變數與變數之間的連接線加上正向與負向的關係，產生因果回饋圖，藉以從複雜的動態結構中整理出因果回饋網路及其對應之內生與外生變數。
- (4) 本研究針對變數中有判斷行為發生時作探討，並分析其因果回饋之結構變化。在控制論中回饋迴路是最基本的要素，探討因果網

路中之反回饋迴路(反回饋就是一個因素經過一連串的因果鏈作用後，在反轉回來影響到它本的過程)是非常重要的議題。在因果網路中的反回饋的行為並非一成不變的，在許多的情況下，某些因素在超過其臨界值時經常發生反轉或回饋環為消失的現象，而這些情況常發生於變數中有判斷行為存在時。且以往的研究通常只以正向影響與反向影響來表示其影響行為，甚少對有對判斷行為作說明，故本研究針對此處加以修正，並利用模式模擬出來的結果來說明回饋環之結構。



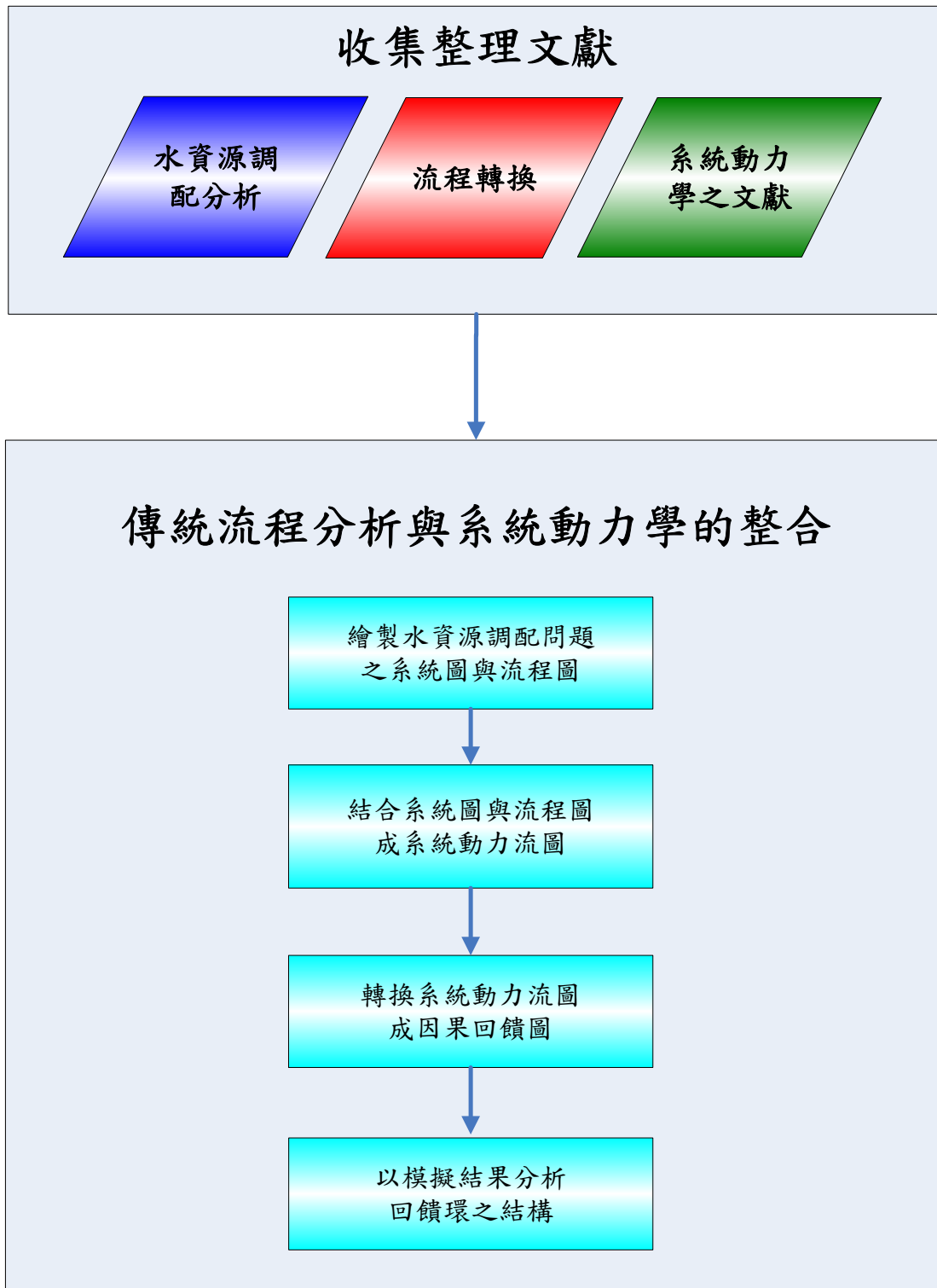


圖 2.1 研究流程圖

## 第三章 理論介紹

### 3.1 系統動力學

#### 3.1.1 系統動力學之發展歷程

系統動力學發源於 1960 年代，美國麻省理工學院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 之史隆管理學院 (Sloan School of Management) 的 Forrester 與他同事在福特基金會 (Ford Foundation) 及史龍基金會 (Alfred P. Sloan Foundation) 的贊助下，以回饋控制理論 (feedback control theory) 分析工業系統，並應用在企業系統之管理工作上。後續應用系統動力學的研究非常多如：1969 年，Forrester 利用系統動力這個新觀念進行都市動態 (Urban Dynamics) 之研究。1970 年代初期，Meadows et al. (1972) 應用系統動力模式分析探討全球未來一世紀人口成長與工業發展之關係。Francisco et al. (1993) 利用系統動力模式來進行環境政策的評估與研究。Guo et al. (2001) 則利用系統動力模式分析中國大陸雲南省洱海湖盆地 (Lake Erhai Basin) 之地區性環境計畫及其環境管理策略。近年來系統動力學應用日益廣泛，應用之課題包括了模擬地表水污染、模擬水庫供水系統、生態系統族群變化、大氣化學與污染傳輸、溫室氣體與全球暖化和現金流量的問題。

#### 3.1.2 系統動力學原理說明

系統動力學理論係結合控制 (Cybernetics)、系統論 (System Theory)、資訊理論 (Information Theory)、決策論 (Decision Theory)、電腦模擬 (Computer Simulation) 等理論成為一體的管理新方法、新工具和新概念。系統動力學為描述、探索和分析複雜系統內流程、訊息、組織疆界與策略的一種嚴謹的研究方法，其可透過量化的系統模擬

與分析來進行系統結構與行為之設計。系統動力學是處理訊息回饋系統之動態行為的一種方法論，它提供一種實驗的、定量分析的方法，因此對於極複雜的動態、回饋且具時間滯延(Time Delay)的問題，能提供整體、長期且較週延的解決方法。

系統動力學除了強調系統與時間之連動性外，另一重要之基礎為因果之關連性，該意義有三：(1)藉由因果關係的確認來說明系統之問題；(2)藉由因果關係的確認將複雜之問題作簡潔而系統化之表示；(3)藉由變數間之因果關係來說明系統之範圍。其中，因果關係之表示旨在說明兩個變數間之關係為正向或負向，而無數量上之意義，意即數量之大小並不會影響到因果鏈之存在與否。進而若將一系列之因果鏈串接成因果回饋關係環路，則可將因果關係發展為正向之因果回饋關係環路或負向之因果回饋關係環路；正向之因果回饋關係環路，係表示任何變數的變動，最後將使該原生變動之變數朝同方向加強其變動幅度，造成自我之強化，而負向之因果回饋關係環路，則表示任何變數的變動，最後將使該原生變動之變數產生抑制變動之效果，造成自我之規律。藉由因果回饋圖的繪製，我們可以清楚了解各變數的因果關係與作用方向，並瞭解結構的基本特性。例如圖 3.1.1 為本研究所繪製水庫供水操作之因果回饋環路，其表示水庫蓄水量越多則可利用水量(入流量加上水庫蓄水量)越多，當可利用水量越多或需求量越大時水庫供水量就可以越多，但供水量越多的結果亦會導致水庫蓄水量的減少，如此即構成了一個封閉的負回饋迴路，這表示水庫蓄水量(累積變數)會隨著時間的前進，而趨近於某一個平衡水位。

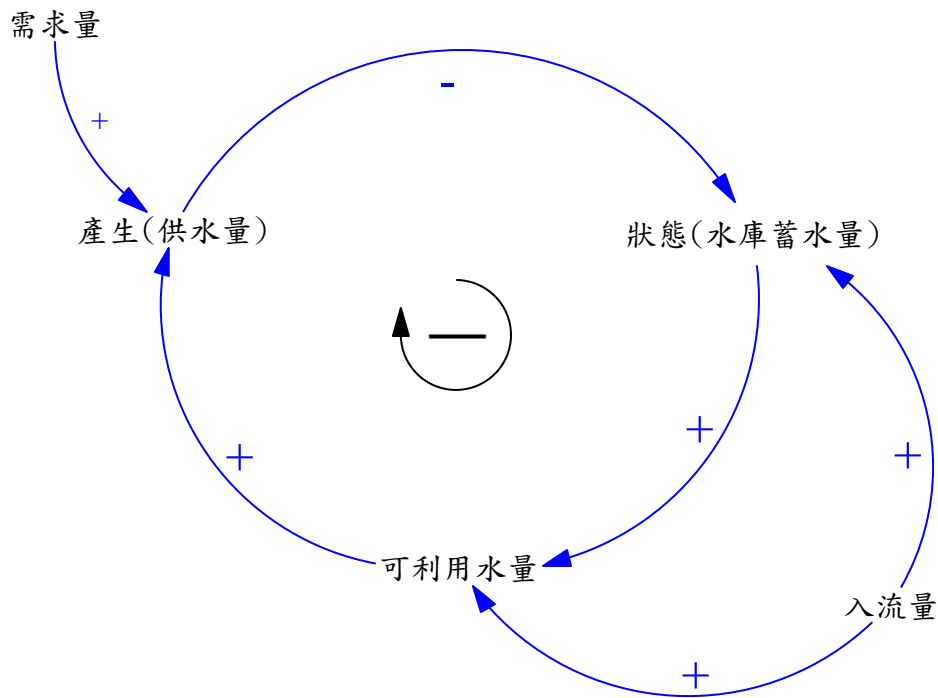


圖 3.1.1 水庫供水操作之因果回饋環路

參考上述因果回饋環路，利用系統動力學的四個基本物件：存量 (Stock)、流量 (Flow)、箭線 (Connector) 以及輔助變數 (Auxiliary) 來建構系統動力流圖，如圖 3.1.2 所示。

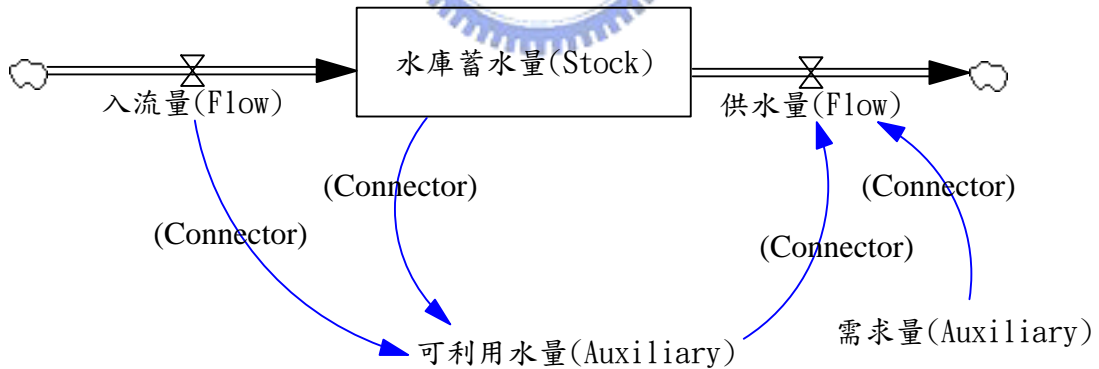


圖 3.1.2 水庫供水操作之系統動力流圖

存量 (Stock) 係表示某一系統變數在某一特定時刻的狀態，其數值大小是累加了流入率 (Inflow rate) 與流出率 (Outflow rate) 的淨差額所產生之結果，可說是系統過去活動結果之累積，如同水庫中蓄水量即屬於一存量之概念；流量 (Rate) 則表示某種儲存變數變化之快慢，代表著一種瞬間的行為，其數值多由存量變數與輔助變數之

交互關係來決定，如同水庫的入流量與供水量即屬於流動之概念；輔助變數 (Auxiliary) 則用來針對前兩種變數進行各變數間交互關係之補充說明，類似一般計算方程式中之參數，如水庫中之可利用水量即屬此概念；箭線(Connector)則用來連接變數間之關係，如可利用水量變數是由入流量變數與水庫蓄水量變數組成。於系統動力流圖各物件內輸入相關資料與數學式後，即為一系統動力模型，此模型將能進行不同策略組合的情境模擬。





## 3.2 流程

### 3.2.1 流程之定義與概念

Davenport 在 1990 指出流程是企業為達成特定的成果所實行一連串邏輯相關的工作表現，它也是企業的核心，一組流程構成一個企業系統。Davenport 和 Short 提出出企業流程是由三種元件組合而成：

- (1)個體(Entities)：指的是流程所流經過的組織或部門，它們可以是組織內或是組織外的個體。
- (2)物件(Object)：指的是某一流程產出的結果，產出的結果可以是實體型態也可以是資訊等形態的輸出。
- (3)活動(Activity)：流程中的活動可以分成管理的活動或是一般性的作業。

而 Melan 在 1992 年提出流程有三個關鍵要件：轉換活動、回饋控制與可重複性 (Melan, 1992)。

- (1)轉換活動：流程再投入與產出兩者之間，經過一系列的轉換活動，然後產生最終的產出。轉換的內容又可區分為：實體上、地點上、交易上與資訊上的轉換過程與內容。交易上的轉換指的是價值的交換，資訊上的轉換指的是資料的減縮或修改動作。一個流程通常都牽涉到一個或多個轉換過程，服務業裡的轉換活動大多涉及交易上、地點上與資訊上的轉換，而較少實體上的轉換過程。
- (2)回饋與控制：其功用在於確保轉換活動產出屬性的穩定性，回饋是轉換過程的內部與產出所附帶產生的資訊，用此資訊藉以控制產出的穩定性。一般可以將回饋的內容區分為五類：顧客需求與期望、顧客目標、顧客的聲音、流程的目標與流程的聲音。顧客的聲音指

的是顧客對於產品或服務滿意程度的衡量結果；流程的目標指的是流程未符合顧客期望與需求所需要達成的目標；流程的聲音指的是針對流程目標達成程度已評估之後的資訊回饋。(Lowenthal, 1994)

(3)可重複性：具備穩定性的轉換活動，具備可重複性，流程的運作具有周而復始的特性。

Davenport 在 1993 年時，又對流程產生了新的定義，他將流程分成三個依序層次。首先，在流程層次 (Process Level) 必須建立所有流程的流動與互相連貫的流程願景 (Process Vision)；其次，在次流程層式 (Subprocess Level) 以描述一般流程的手法闡述每一個次流程；最後，活動層次 (Activity Level) 中清楚的描述從事每一個主要活動所需的人、資訊、時間等；如圖 3.2.1 所示為流程設計的三個層次與各層次間所需注意的組成因素。為了連貫性與一致性的效果，使用不同的圖形符號來描寫每一層次的流程。

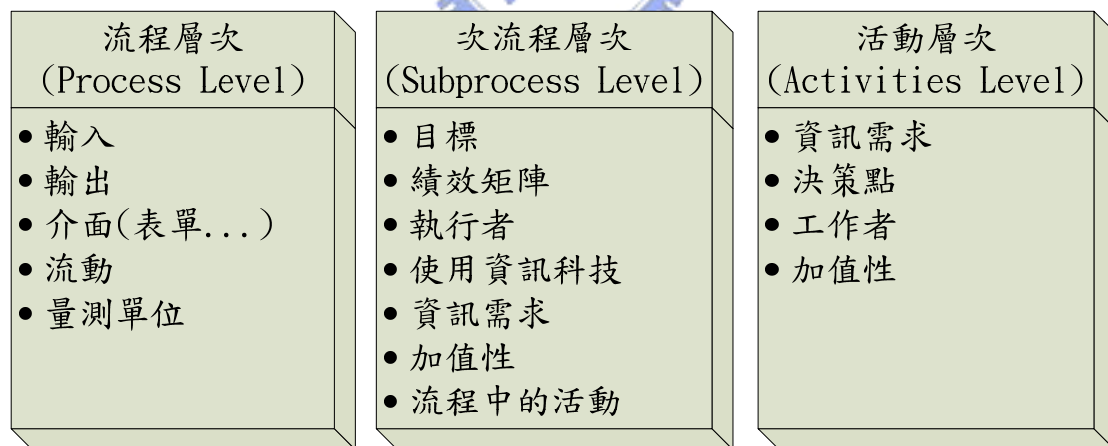


圖 3.2.1 流程的三個層次圖 (資料來源:Davenport, 1993)

### 3.2.2 流程表徵工具

流程表徵的定義反映了不同的流程定義與概念，欲表達出不同流程的定義與概念，勢必採用不同的流程表徵工具。其表徵工具常見的有流程圖(Flow Chart)、IDEF(Integrated Computer Aided Manufacturing

DEFinition)、斐氏網(Petri Nets)等。

(1) 流程圖：

流程圖(Flow Chart)是一個使用簡單符號來描述工作與決策並且使用線條將工作與決策之間的關係進行描述，所要表示的是針對特定的流程進行由輸入到輸出的整個轉換工作。傳統的流程圖雖然簡單，但是應用在企業界卻難以發揮效果，因為企業的許多核心流程往往都是橫跨多個部門才能算是一個完整的流程，因此許多企業所採用的是 W. Edwards Deming 所創造，而由 Myron Tribus 在美國大力宣傳的交互功能流程圖(Deployment Flow Chart)。交互功能流程圖是傳統流程圖的一種變形，它將一個完整的流程圖切割成許多功能別的角色，再依流程中各項元件的歸屬功能別分別繪製到該功能別項下，但是圖中各元素之間的關係並沒有改變，改變的只是流程圖中的擺放位置。因此它能夠繪製出一個完整跨單位的流程，而且能夠顯示出此流程中誰必須負責來完成每項工作。也能利用此流程圖顯示在專案小組中的成員如何展開其專案。因為它能夠顯示出某一特定的流程所流經的功能別，及各功能別在此流程中所必須處理的工作及扮演的角色

(2) IDEF：

IDEF ( Integrated Computer Aided Manufacturing DEFinition ) 源自 1970 年末期美國空軍 ( U.S Air Force ) 提出的 ICAM ( Integrated Computer Aided Manufacturing ) 電腦輔助製造計畫，為了將製造過程透明化使得各級管理人員了解，凝聚工作共識以提昇效率；而發展出 IDEF 方法來陳述製造過程有關的特性。它主要的技術取自 1960-1970 年代，Douglas T. Ross 所發展的模型建立技術 SADT ( Structure Analysis and Design Technique , SADT )；並加入其他的方法論來從不同的角度發展出 IDEF 的系列方法，目前計有 IDEF0

Function Modeling、IDEF1: Information Modeling、IDEF2: Simulation Model Design、IDEF3: Process Description Capture、IDEF4: Object-Oriented Design、IDEF5: Ontology Description Capture、IDEF6: Design Rational Capture、IDEF8: User Interface Modeling、IDEF9: Scenario-Driven IS Design、IDEF10: Implementation Architecture Modeling、IDEF11: Information Artifact Modeling、IDEF12: Organization Modeling、IDEF13: Three Schema Mapping Design、IDEF14: Network Design 等系列。

(3) 斐氏網：

斐氏圖路理論起源於 Carl Adam Petri 於 1962 年所提的博士論文。主要對系統發展出一套狀態導向圖形化的資料流模組，而此模組是藉著將系統分割後，以圖形或網路的方式表現出系統各部份之間的關係，並將此觀念用來表達同步 (Synchronous) 及並行 (Concurrency) 的系統行為。



## 第四章 整併與轉換原則

本研究提出一種方法來轉換系統圖與流程圖，轉換後所得的系統動力流圖不僅能同時涵蓋了系統圖與流程圖的資訊，還可以進一步展現變數間的互動關係與系統的結構特性。如此將有助於傳統習慣以流程圖作為解題思考的人，更容易進行系統動力學的分析工作。本研究用五個水資源案例來驗證本研究所提出來的轉換原則，五個水資源案例分別如下：(1)單水庫供水之案例；(2)單水庫供水加入需求量考量之案例；(3)單水庫供水加入需求量及河川放流量考量之案例；(4)單水庫供水加入需求量、河川放流量及水庫操作上加入規線操作考量之案例；(5)兩水庫聯合營運供水時之案例。

系統圖與流程圖轉換為系統動力流圖的方法主要包含四項步驟(如圖 4.1 所示)，步驟相關說明如下：

### 步驟一：資訊傳遞之連結

傳統解題時，系統圖上之資訊與流程圖上之資訊常是互相傳遞來傳去的，此步驟則是將這些傳來傳去的資訊以連接線表示出來，將這些傳遞行為明白的用實線連接起來。

### 步驟二：元件流與資訊流之釐清

由於步驟一中把所有資訊的傳遞行為皆明白的顯示出來，發現實體系統的流動與資訊的流動為混淆不清，故為更明白分辨實體的流動與資訊的流動，在此步驟中利用兩物件①存量(Stock)與②流量(Flow)來區分出這兩種不同的流動關係，在實體節點上利用存量物件表現，節點上的流動則用流量物件表現，資訊流部份則保留原本的連接線表現方式。

### 步驟三：系統圖與流程圖之整併

上述兩個步驟只有將兩張圖的傳遞行為表示出來及利用不同的

物件區分實體流與資訊流，此步驟則是利用系統圖當主體，然後把流程圖中的步驟整併系統圖中，依照流程圖的步驟順序一步一步將其整併入系統圖中，整併時流程圖中的每一步驟中的傳遞行為皆須保留，即每一個框架(流程中每一步驟設定成一框架)由其上一個框架傳遞此框架與傳遞至下一個框架的傳遞行為皆需保留且方向不可任意變動，而拆解框架之原則為將框架中的計算步驟的變數設定成獨立變數，再判斷此變數是否為系統圖上的變數，若為系統圖上的變數則將此變數移至系統圖上，其原先變數的傳遞行為則修正成將相關連接線連接至系統圖上的對應變數。若非系統圖上之變數則維持獨立變數型態且不作任何位置移動，其原先變數的傳遞行為則直接將連接線連至獨立變數上。

#### 步驟四：動力流圖之修正

由於流程圖框架間的箭線主要是用來顯示步驟間的進行順序，並非兩框架內的變數有因果對應關係，當框架被變數取代時，必需檢視系統內所有變數間的傳遞行為(連接線)是否為因果關係並加以修正。可利用各計算方程式中因變數與自變數組成的資訊來檢定連接線的正確性。

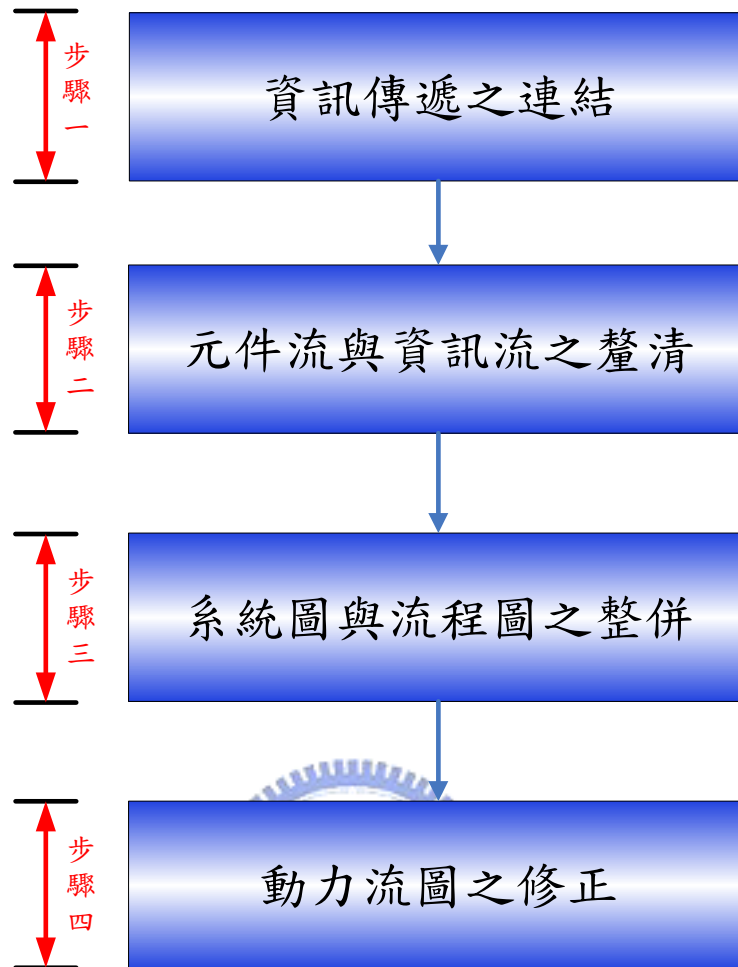


圖 4.1 系統圖與流程圖整合步驟示意圖

## 4.1 案例一：單水庫供水之案例

案例一為一水資源水庫調配問題中單水庫供水的問題，首先我們先對此問題利用傳統分析方法繪製其系統圖與流程圖，如圖 4.1.1。圖 4.1.1 左方為系統圖，系統圖內的節點為水庫，由節點與箭線符號所組成，系統圖內的節點代表水庫蓄水量( $S$ )，而連接此節點的兩條箭線分別為入流量( $I$ )與供水量( $O$ )；圖 4.2 右方為水庫水量各時刻調配的演算流程圖，由框架與箭線符號所組成，流程圖內各變數定義與計算方式整理如表 4.1.1 所示：

表 4.1.1 案例一流程圖內各變數定義與計算方式說明表

| 變數              | 名詞               | 方程式                               |
|-----------------|------------------|-----------------------------------|
| $S_1, I_t, C_t$ | 初始水庫蓄水量，入流量，供水係數 | —                                 |
| $AvI_t$         | t 時刻之可利用水量       | $AvI_t = I_t + S_t$               |
| $O_t$           | t 時刻之供水量         | $O_t = C_t \times AvI_t$          |
| $S_{t+1}$       | t+1 時刻之水庫蓄水量     | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$ |

流程演算邏輯說明如下

### 框架一：輸入檔給定

通常流程圖的第一個步驟為給定輸入檔(已知值傳入)，藉由輸入檔我們可以瞭解那些變數是已知值，進而確認那些變數是待定的決策變數。案例一的已知變數設定為初始水庫蓄水量( $S_1$ )、t 時刻的入流量( $I_t$ )與供水係數( $C_t$ )。

### 框架二：計算 t 時刻可利用水量

流程圖的第二個步驟為計算可利用水量，t 時刻可利用水量( $AvI_t$ )



在案例一中定義為 t 時刻入流量( $I_t$ )與 t 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的總和，即方程式  $AvI_t = I_t + S_t$ 。

### 框架三：決定 t 時刻水庫之供水量

流程圖的第三個步驟為決定水庫的供水量，假設 t 時刻水庫的供水量( $O_t$ )為 t 時刻水庫可利用水量( $AvI_t$ )乘上一個供水係數( $C_t$ )，即方程式  $O_t = C_t \times AvI_t$ 。

### 框架四：計算 t+1 時刻水庫蓄水量

流程圖的第四個步驟為計算下一時刻的水庫蓄水量，t+1 時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )在案例一中定義為 t 時刻入流量( $I_t$ )與 t 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的相加總和再減去 t 時刻水庫的供水量( $O_t$ )，即狀態轉換方程式  $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t$ 。

### 框架五：判斷是否達到模擬總時刻

框架一~四為利用輸入檔的已知資料來依序計算出 t 時刻可供水量、t 時刻水庫供水量以及 t+1 時刻水庫蓄水量，最後第五個步驟為判斷模擬是否達到預設的模擬總時刻，倘若達到的話，則結束模擬；倘若未到達，則繼續模擬下一時刻。

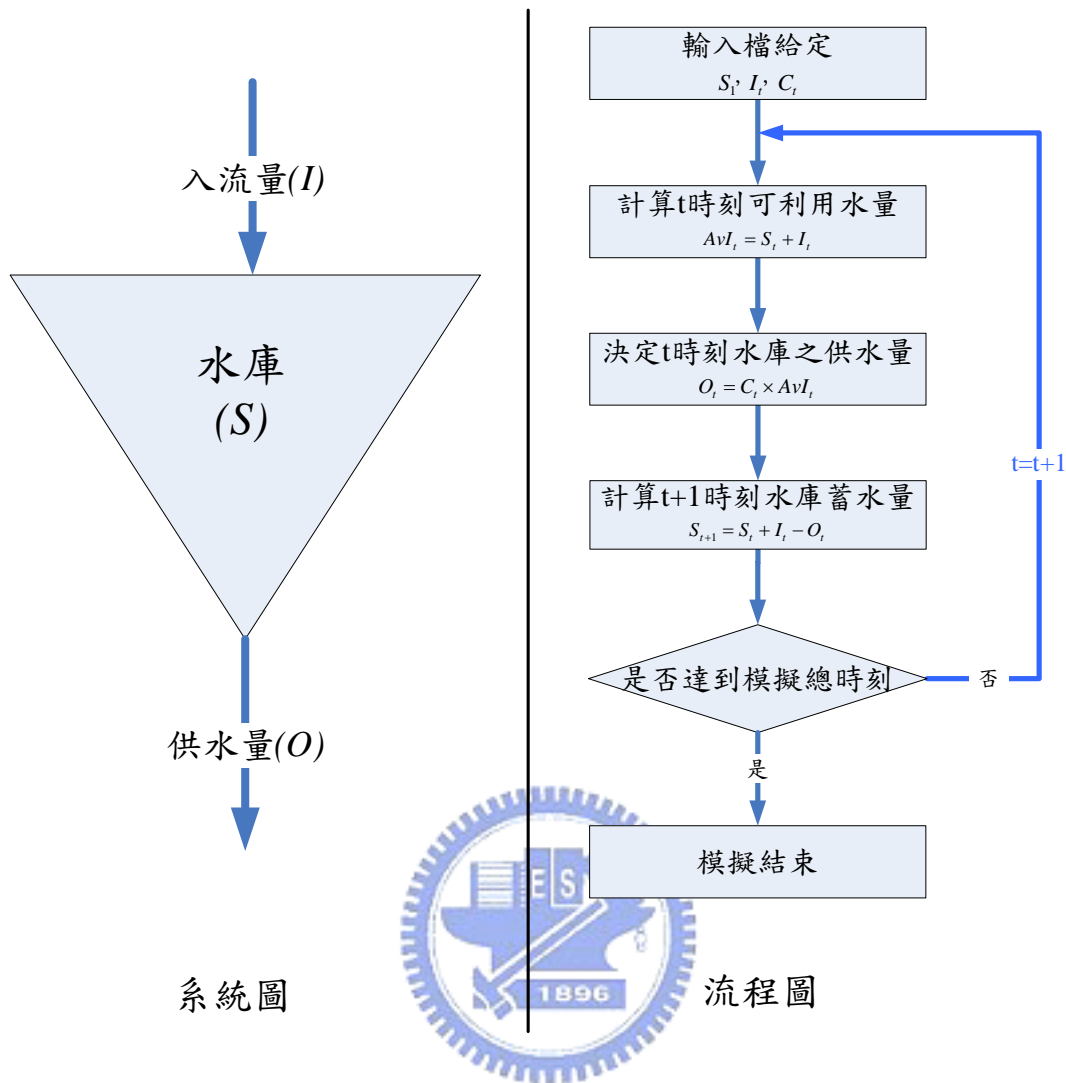


圖 4.1.1 案例一之系統圖及流程圖示意圖

### 步驟一、利用連接線初步將系統圖與流程圖連結：

系統圖只可以展現節點的空間相對位置及節點間流動的順序，所以圖 4.1.1 中系統圖的未知變數：水庫蓄水量(S)、入流量(I)與供水量(O)在各個時刻的實際值必需藉由流程圖上的相關計算流程來求得並傳入。因此，我們首先利用連接線的繪製將系統圖與流程圖之間資訊交換的傳遞關係表達出來，如圖 4.1.2 所示。由於框架一(輸入檔給定)內的水庫初始蓄水量( $S_1$ )、t 時刻的入流量( $I_t$ )為已知值，所以我們可以繪製兩條由框架一傳入水庫蓄水量(S)與入流量(I)的連接線。框架

三(決定 t 時刻水庫之供水量)與框架四(計算 t+1 時刻水庫蓄水量)所求得的 t 時刻水庫之供水量( $O_t$ )與 t+1 時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )皆為系統圖上變數所需的資訊，所以我們可以繪製兩條由框架三傳入水庫之供水量( $O$ )與框架四傳入水庫蓄水量( $S$ )的連接線。由於流程圖框架一的輸入檔僅提供水庫初始蓄水量( $S_1$ )及供水係數( $C_t$ )，故框架二在計算 t=1 時刻以後的可供應量( $AvI_t$ )時所需要的 t 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )，則要由系統圖內已知的 t+1 時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )來提供。所以我們可以繪製一條由系統圖上水庫蓄水量量( $S$ )傳入框架二中 t 時刻可利用水量 ( $AvI_t$ )的連接線。從這五條連接線的繪製即可清楚觀察出系統圖與流程圖的相互關係。

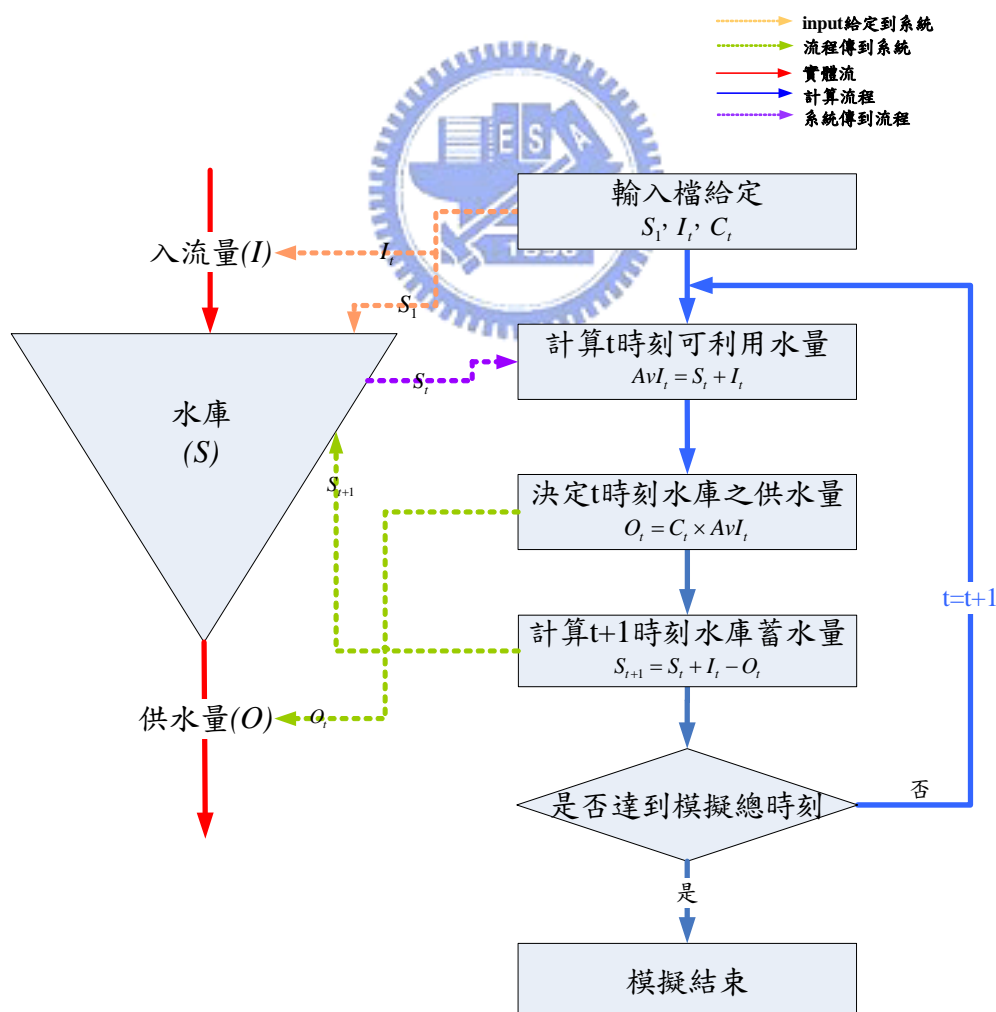

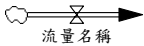

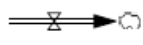




圖 4.1.2 案例一系統與流程圖初步結合示意圖

## 步驟二、釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)：

由於圖 4.1.2 中的系統圖為水流實體元件流動，而流程圖為變數資訊傳遞流動，為更明確分辨實體元件流動與變數資訊流動，因此步驟二利用系統動力流圖的兩個繪圖物件，存量(Stock)與流量(Flow)來釐清這兩類不同的流動行為。系統圖上的節點若有累積的行為則以存量(Stock，符號為  )來表示，如：水庫蓄水量(S)。而系統圖內水流的流動則以流量(Flow，符號為  )表示，其中閘門(⊗)表示水量流動的控制變數，  表示入流量(I)，  表示出流量(O)，入流量時的  代表水量的來源(Source)，出流量時的  表示水量要到達的目的地(Sink)。採用存量與流量表示的結合圖如圖 4.1.3 所示。



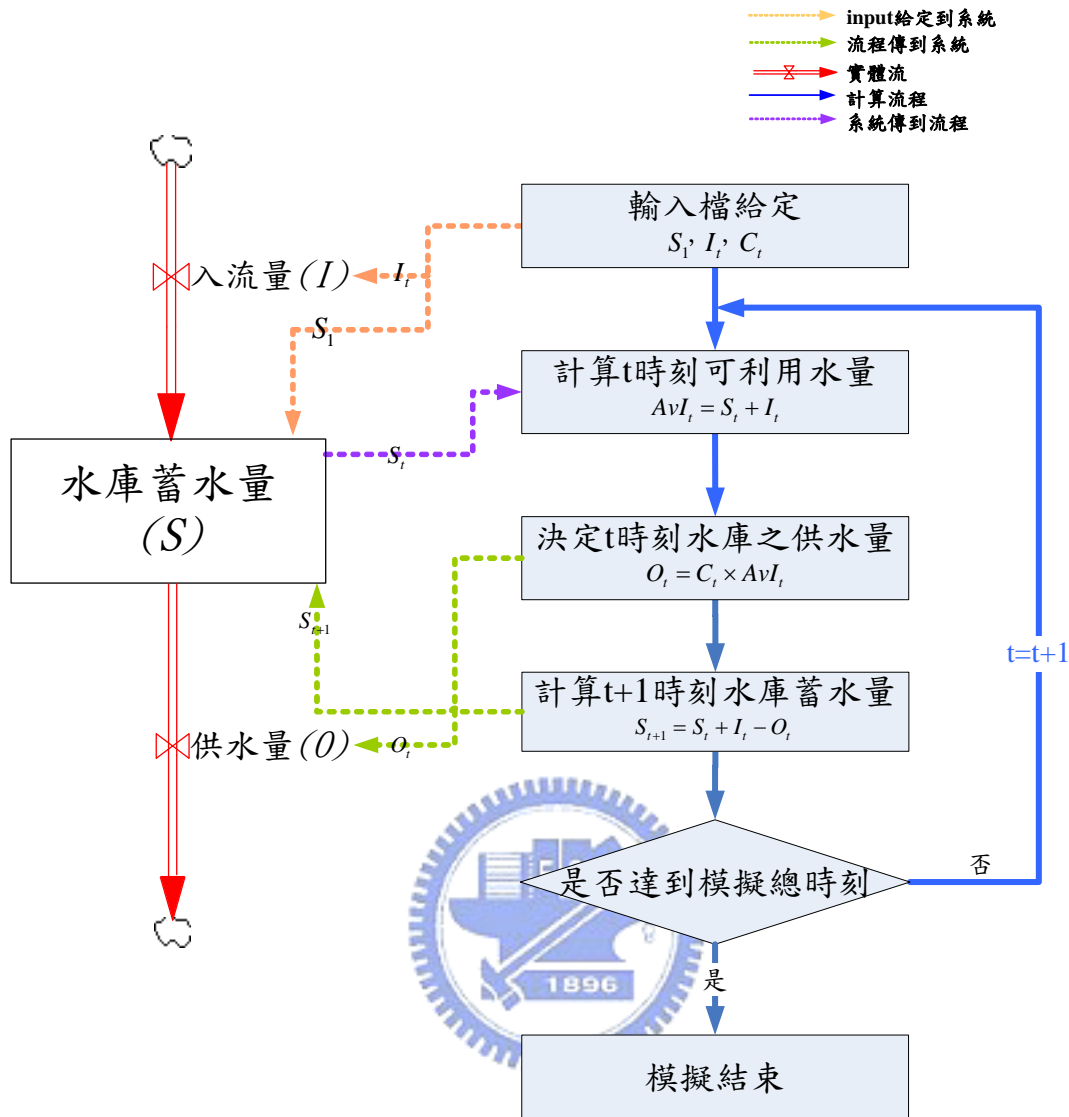


圖 4.1.3 案例一釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖

步驟三、再接著以系統為主體將流程圖整併進去(依照流程圖步驟依序拆解框架，並確認框架內的變數為實體變數或虛擬變數)：

1. 首先拆解"輸入檔給定"的框架，並將框架中的所有變數視為個別獨立之變數( $S_t$ 、 $I_t$ 、 $C_t$ )，如圖 4.1.4 所示。

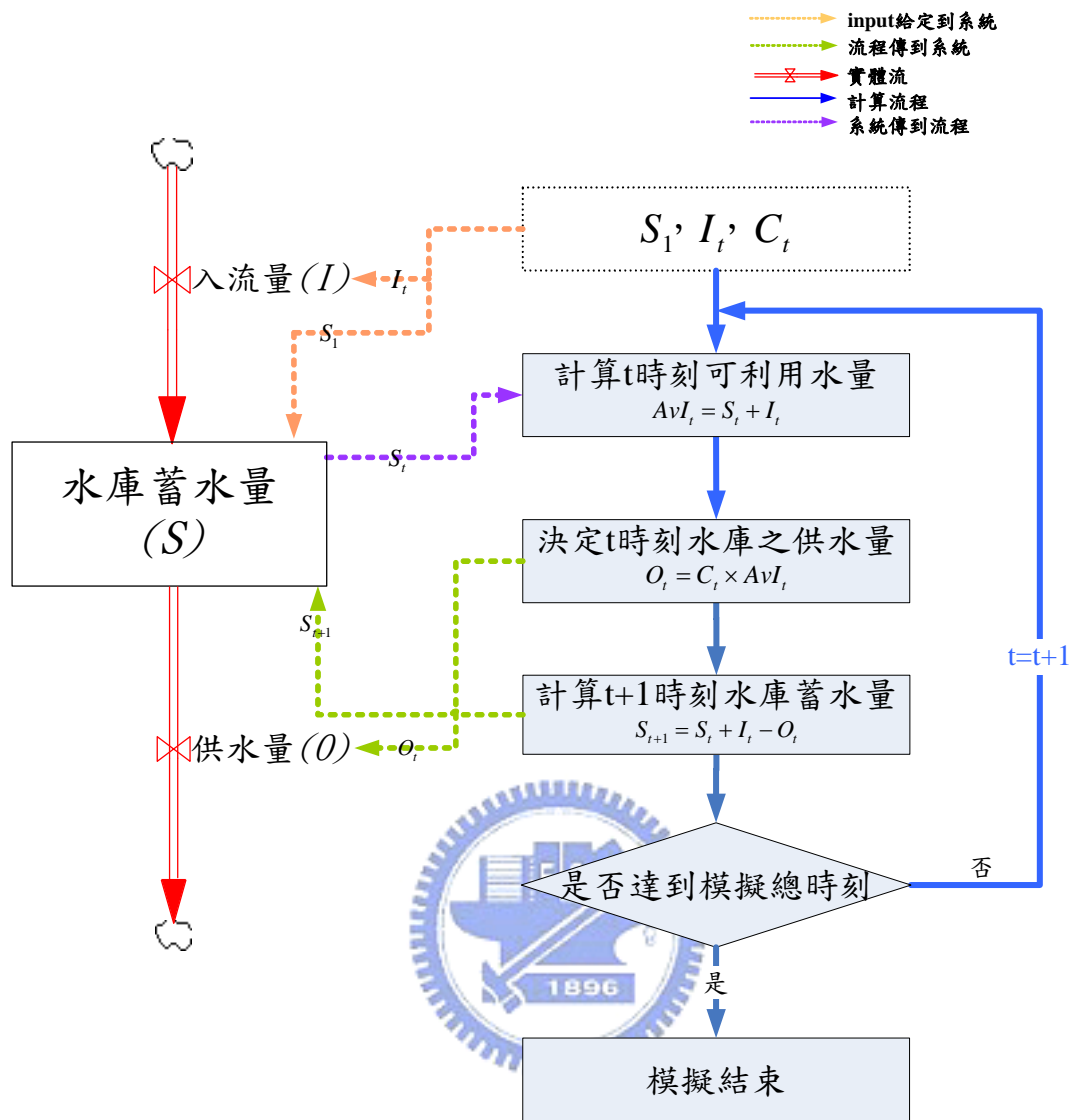


圖 4.1.4 案例一拆解"輸入檔給定"的框架之修改圖

- 由於系統圖上已有入流量( $I$ )與水庫蓄水量( $S$ )這兩個變數，所以框架中的  $I_t$  和  $S_t$  可直接放置入系統圖相對應的位置上，而  $C_t$  (供水係數) 此變數由於在系統圖上沒有相對應的變數，所以該變數需保留於轉換圖中。不論這三個變數是否放置入系統圖或保留成變數，其傳遞至下一個框架的箭線均需保留且方向不可任意更動，上述說明的圖例如圖 4.1.5 所示。

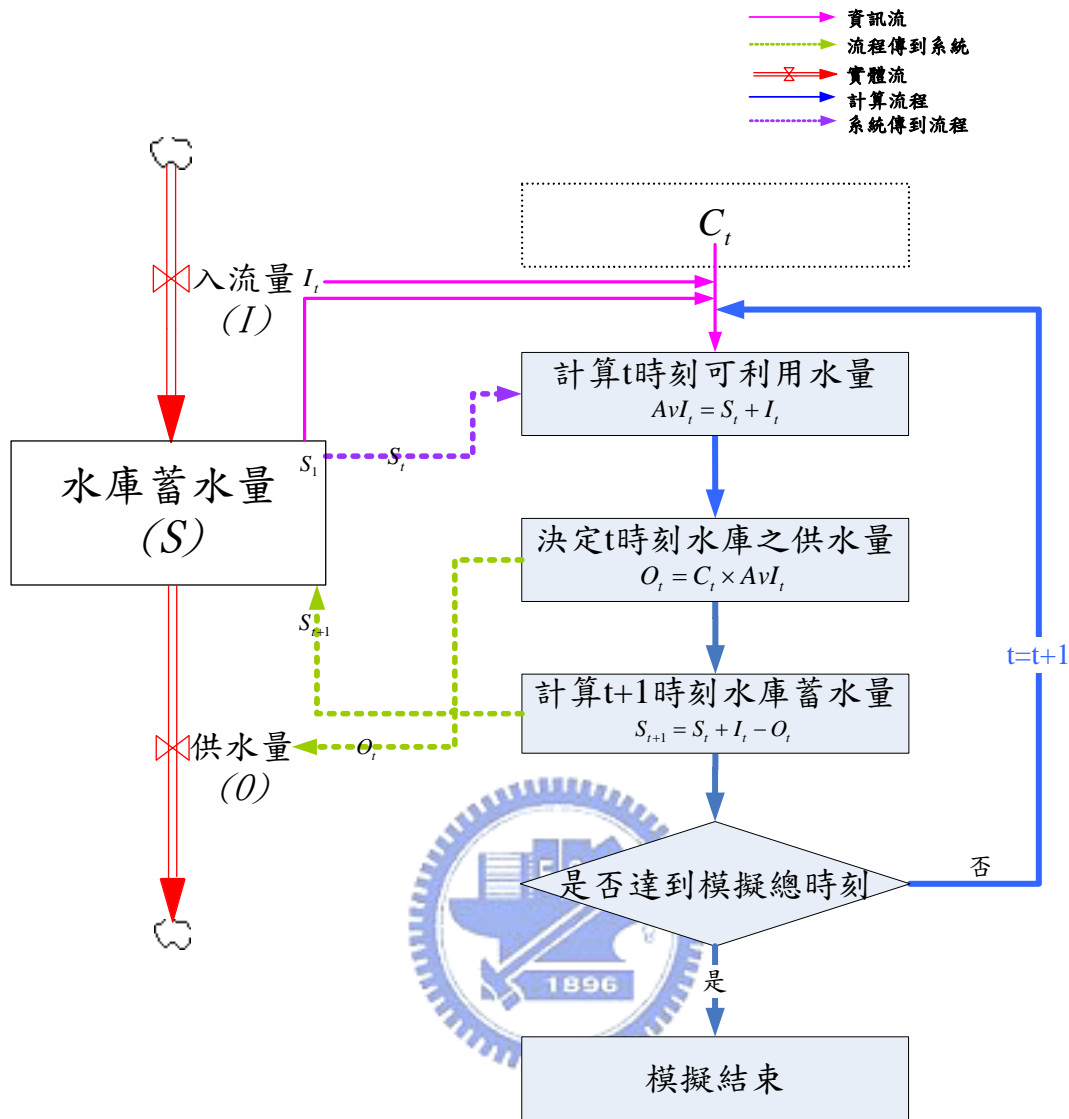


圖 4.1.5 案例一變數傳入與保留之判定("輸入檔給定"框架)之修改圖

- 再拆解"計算 t 時刻可利用水量"的框架，並將框架中的變數設成獨立之變數( $AvI_t$ )，如圖 4.1.6 所示。

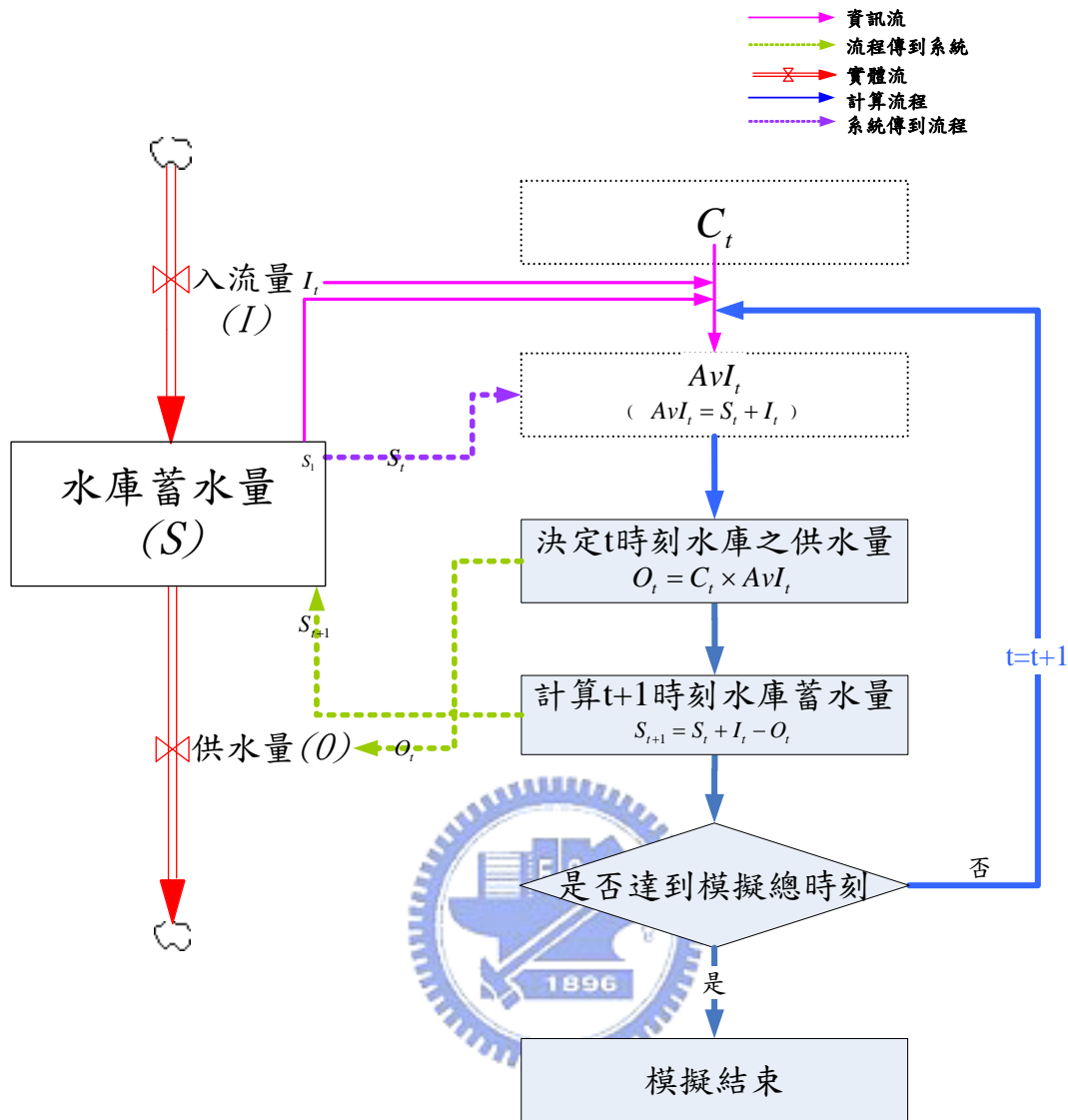


圖 4.1.6 案例一拆解"計算  $t$  時刻可利用水量"的框架之修改圖

4. 由於可利用水量( $AvI_t$ )在系統圖上沒有相對應的變數，所以此變數需保留於轉換圖中，其傳遞至下一個框架的箭線需保留且方向不可任意變動，上述說明的圖例如圖 4.1.7 所示。



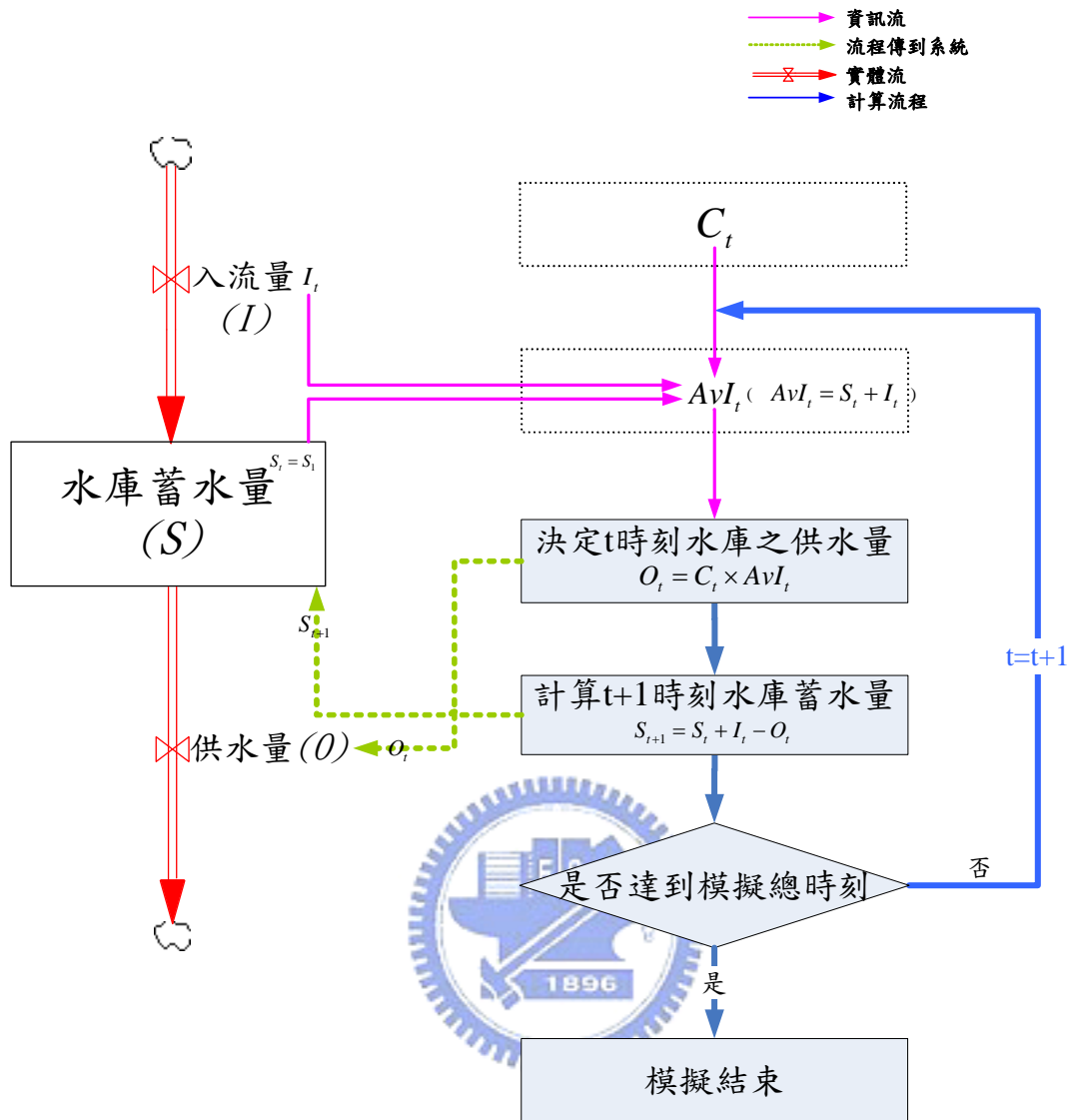


圖 4.1.7 案例一變數傳入與保留之判定("計算 t 時刻可利用水量"框架)之修改圖

5. 再拆解"決定 t 時刻水庫之供水量"的框架，並將框架中的變數設成獨立之變數( $O_t$ )，如圖 4.1.8 所示。

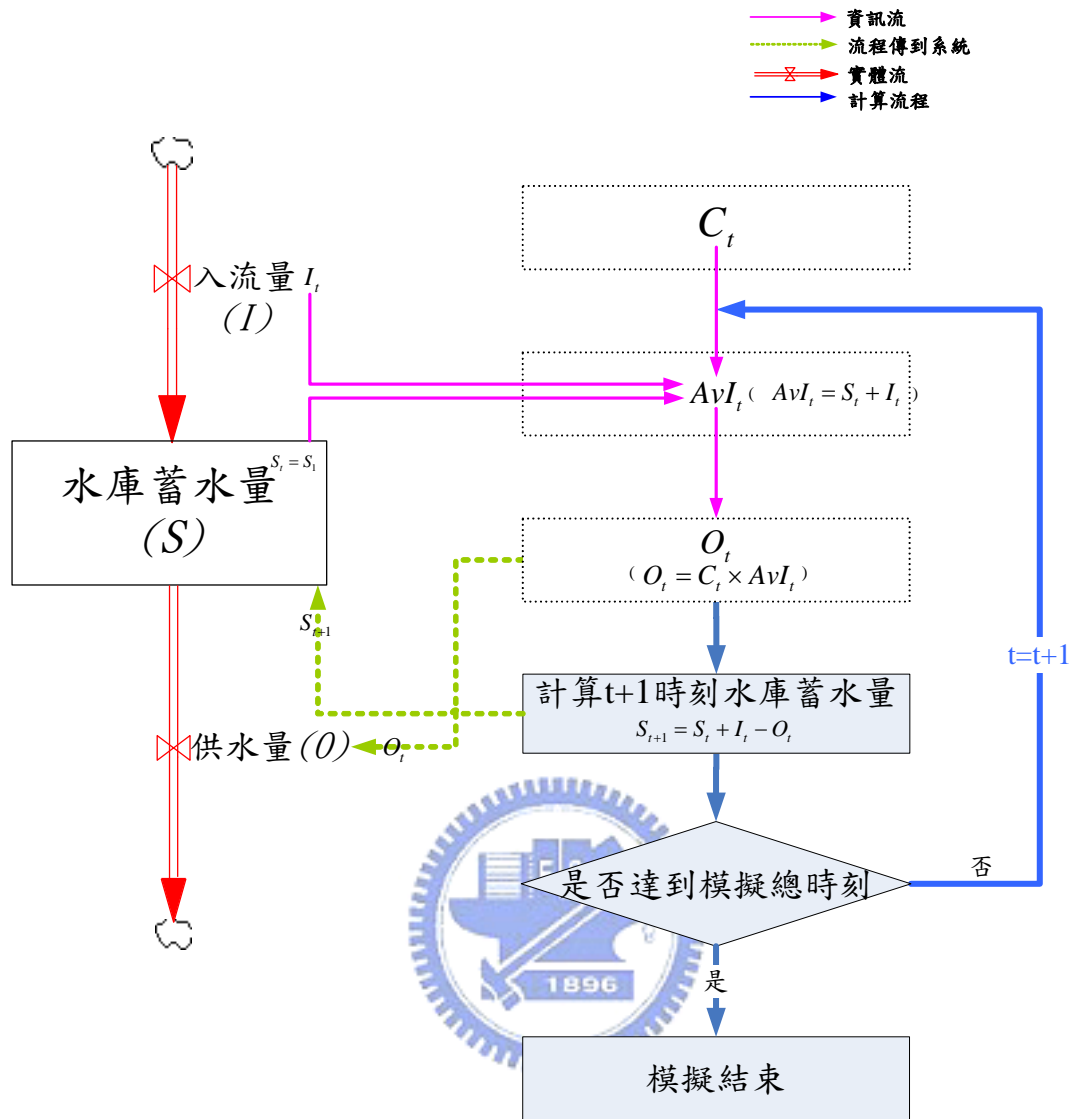


圖 4.1.8 案例一拆解"決定 t 時刻水庫之供水量"的框架之修改圖

- 由於系統圖已有水庫之供水量 (O) 的變數，所以框架中的  $O_t$  可直接放置於系統圖上相對應的位置上如圖 4.1.9 所示，而其傳遞至下一個框架的箭線需保留且方向不可任意變動(箭線由系統圖連至下一個框架)如圖 4.1.10 所示。

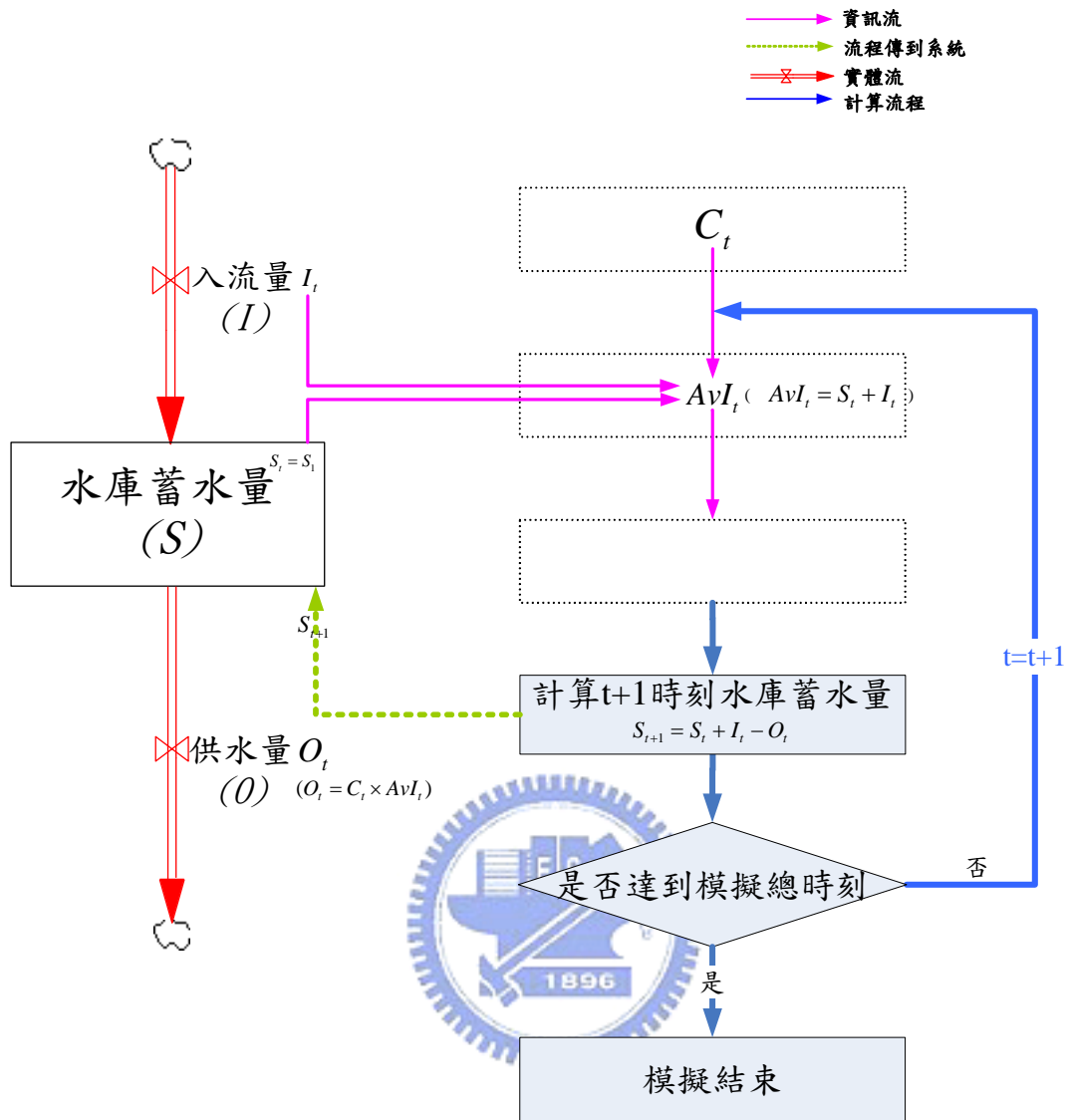


圖 4.1.9 案例一變數傳入與保留之判定("決定  $t$  時刻水庫之供水"框架)之修改圖

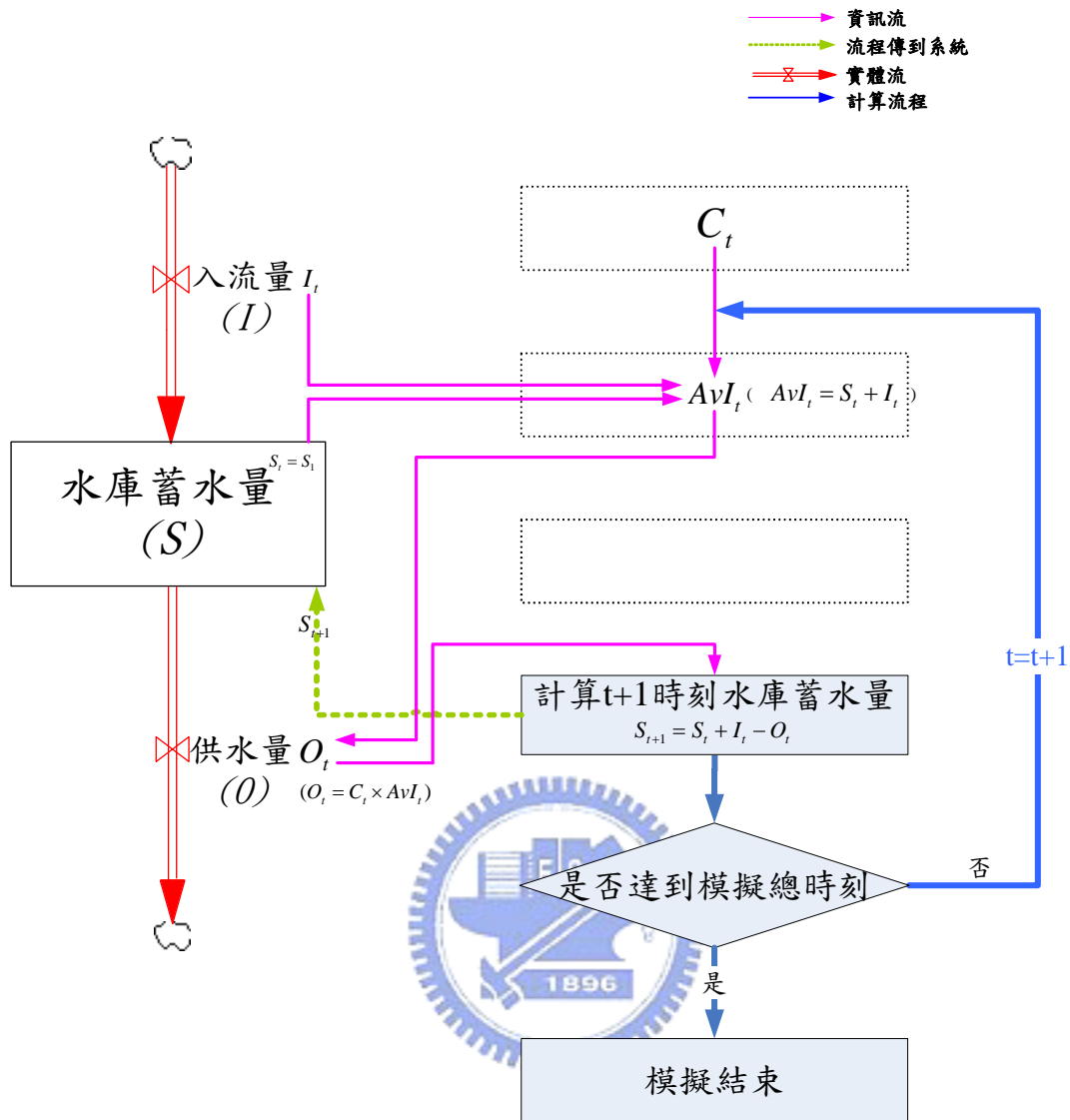


圖 4.1.10 案例一箭線移動("決定 t 時刻水庫之供水量"框架)之修改圖

- 再拆解"計算 t+1 時刻水庫蓄水量"的框架，並將框架中的變數設成獨立之變數( $S_{t+1}$ )，如圖 4.1.11 所示。

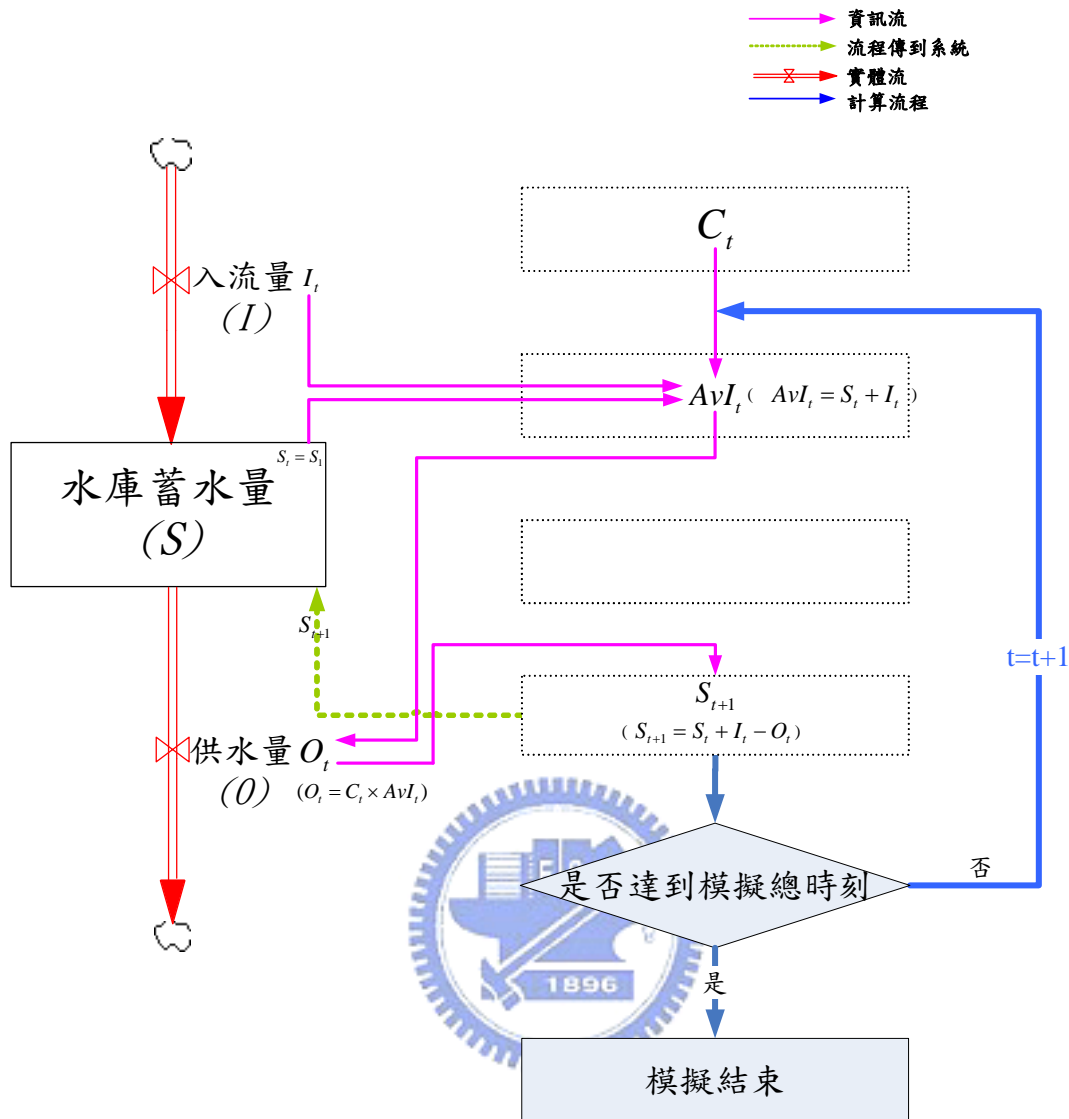


圖 4.1.11 案例一拆解"計算 t+1 時刻水庫蓄水量"的框架後之修改圖

8. 由於系統圖已有水庫蓄水量( $S$ )的變數，所以框架中的  $S_{t+1}$  可直接放置於系統圖上相對應的位置上如圖 4.1.12 所示，而其傳遞至下一個框架的箭線需保留且方向不可任意變動(箭線由系統圖連至下一個框架)，如圖 4.1.13 所示。

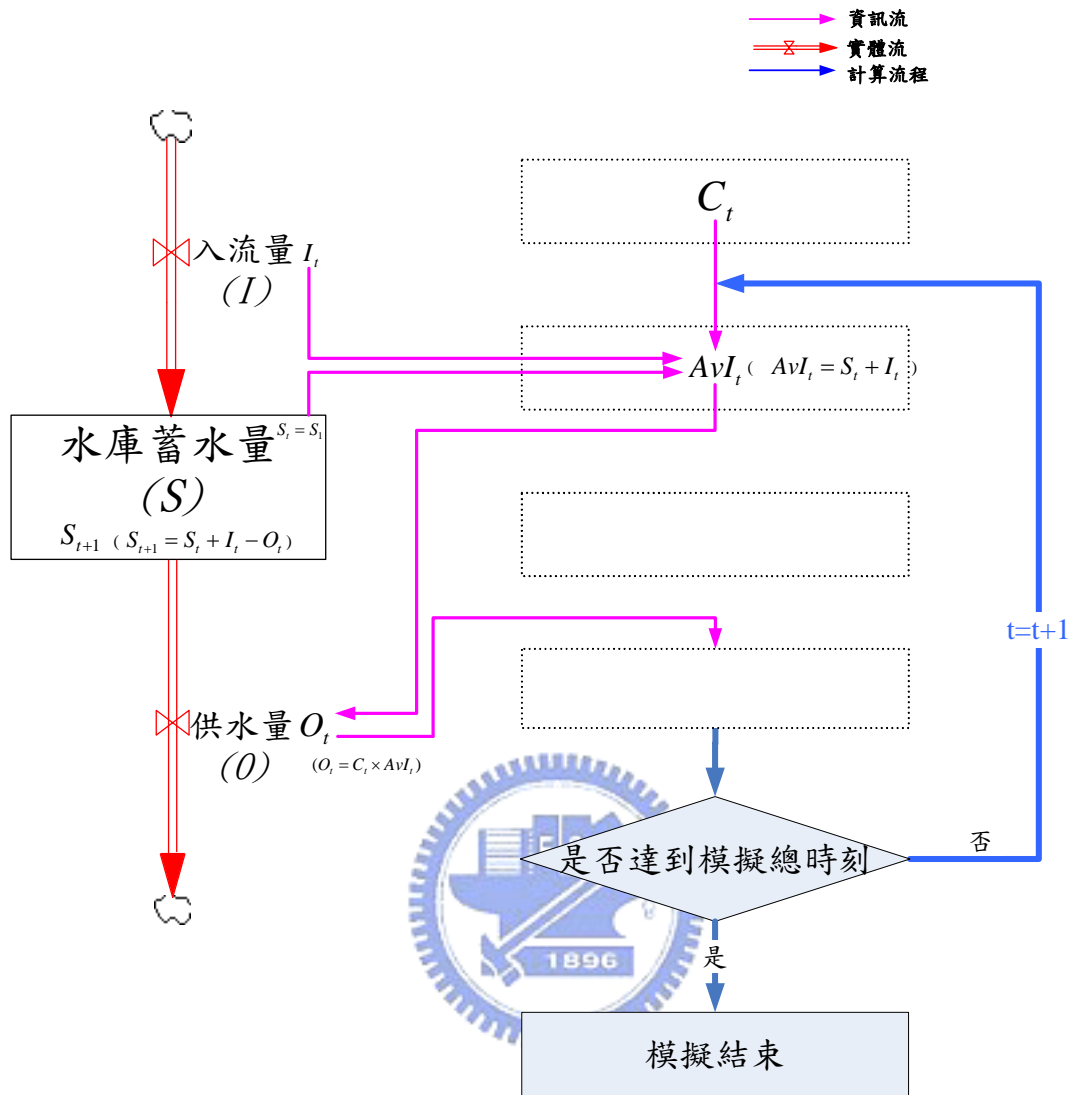


圖 4.1.12 案例一變數傳入與保留之判定("計算 t+1 時刻水庫蓄水量"框架)之修改圖

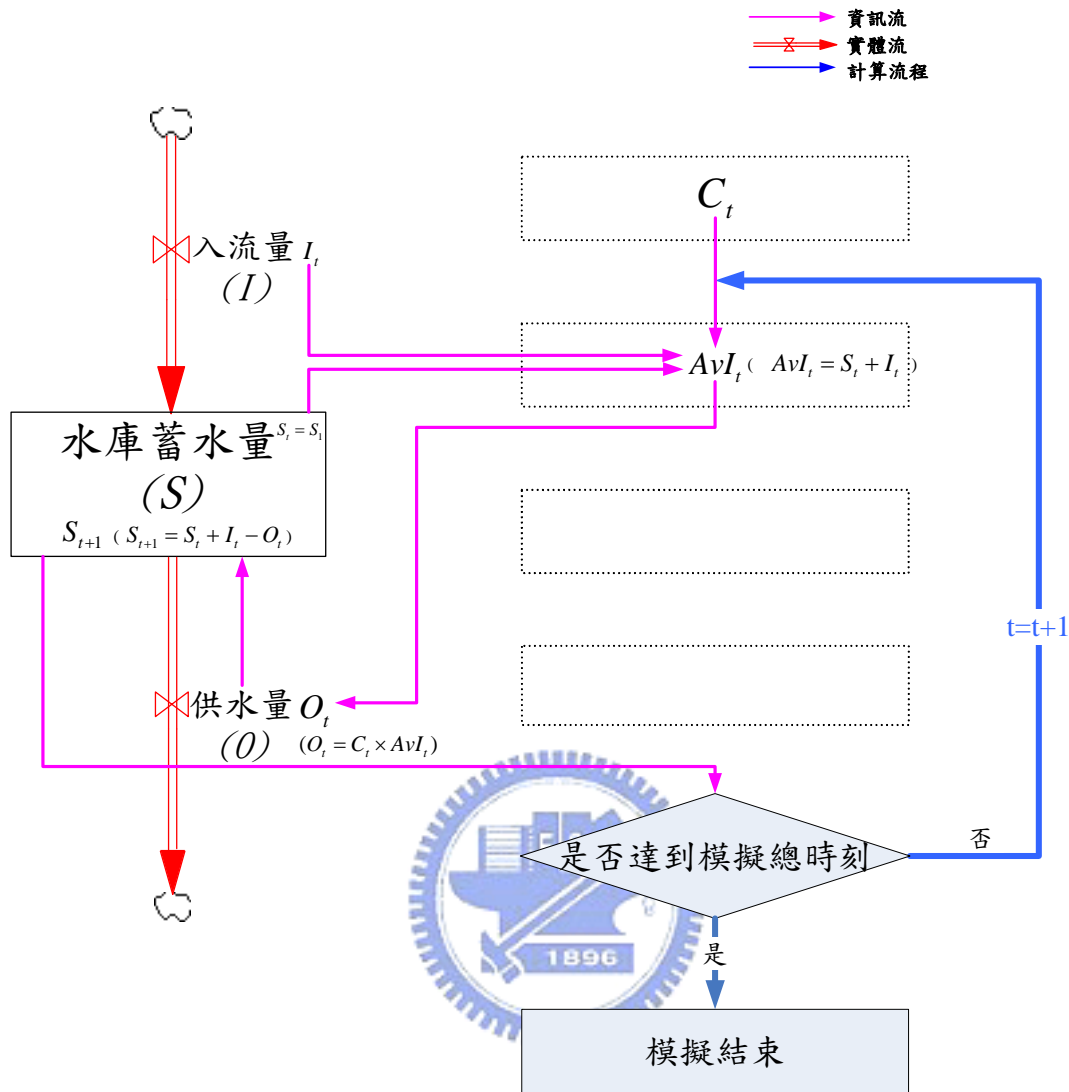


圖 4.1.13 案例一箭線移動("計算 t+1 時刻水庫蓄水量"框架)之修改圖

9. 接下來對"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架作拆解，由於傳至此類框架的變數  $S_{t+1}$  其求解方程式均為狀態轉換方程式，其特性已具有時間推進模擬(t~t+1)的含義，所以只需要水庫蓄水量 (S) 中加入 t=1~n 的註解，即可將此時間邏輯判斷的框架與箭線移除，如圖 4.1.14 所示。

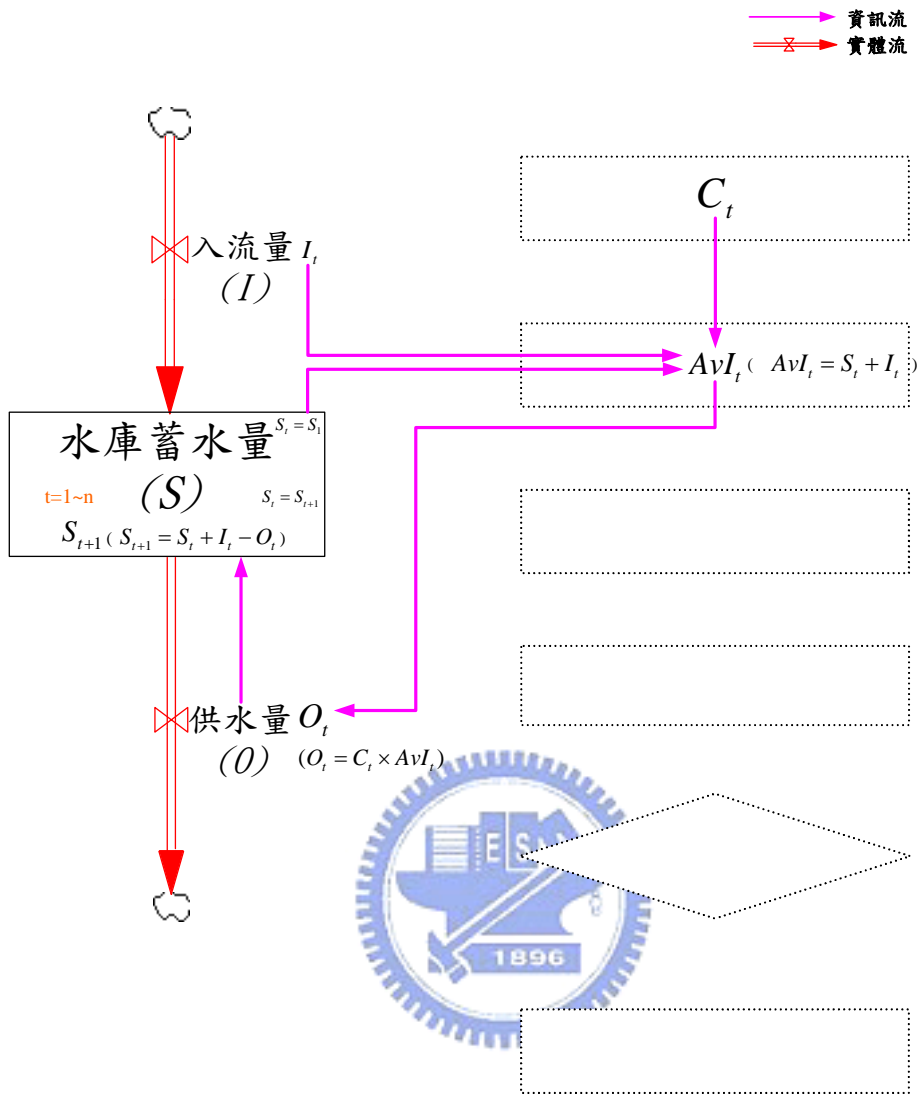


圖 4.1.14 案例一拆解"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖

**步驟四、檢視各變數之間的傳遞行為是否正確：**

由於流程圖框架間的箭線主要是用來顯示步驟間的進行順序，並非兩框架內的變數有因果對應關係，當框架被變數取代時，必需檢視系統內所有變數間為是否的傳遞行為因果關係並加以修正。檢視方法可利用各計算方程式中因變數與自變數組成的資訊來檢定傳遞行為的正確性。如可利用水量=水庫蓄水量+入流量，則表示可利用水量的



計算方式只和入流量與水庫蓄水量有直接關係，故原有的供水係數 ( $C_t$ ) 連接到可利用水量這個變數的箭線需移除，依此原則修正圖 4.1.15 中的三個計算方程式。此外由於水庫蓄水量為蓄水的單元(存量的特性)，所以此單元本身與入流(入流量)與出流(供水量)已具有傳入與傳出之關係，不需要另外以連接線來表示，因此可將供水量連接至水庫蓄水量之箭線移除，如圖 4.1.16 所示。

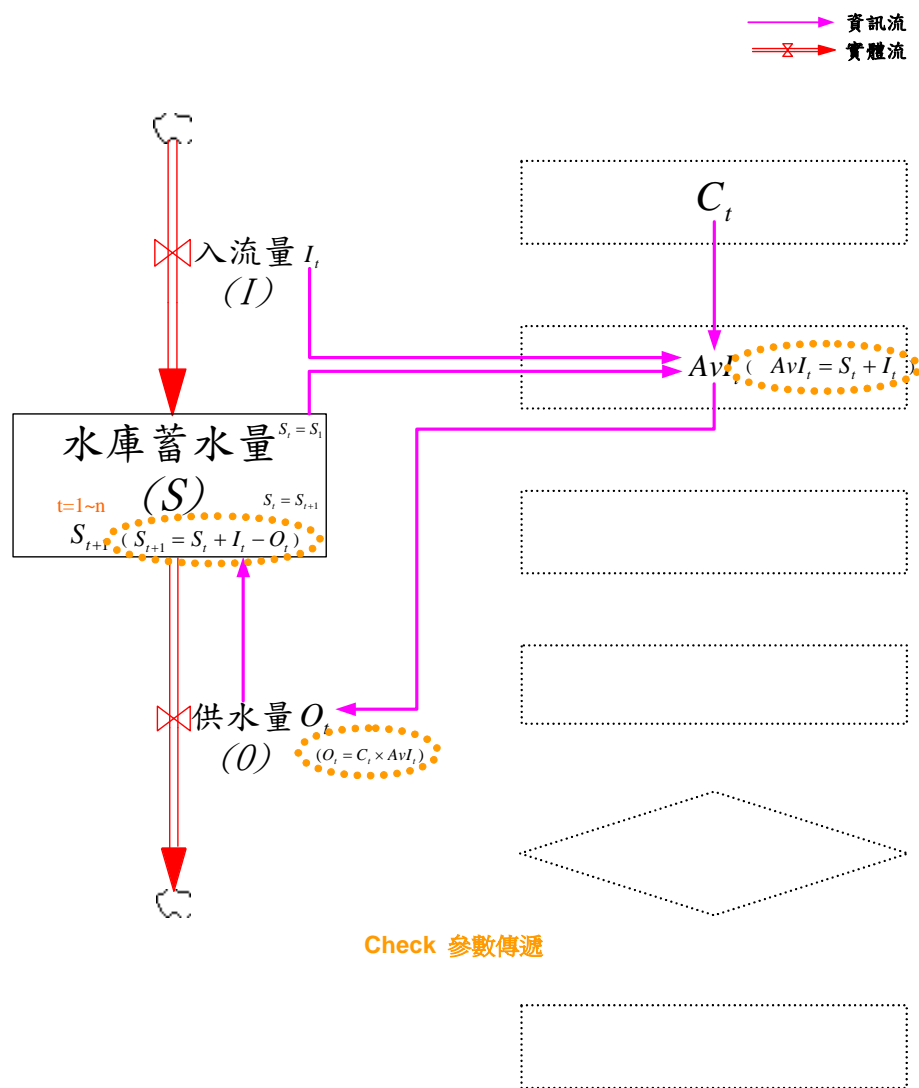


圖 4.1.15 案例一須確認的三個計算方程式示意圖

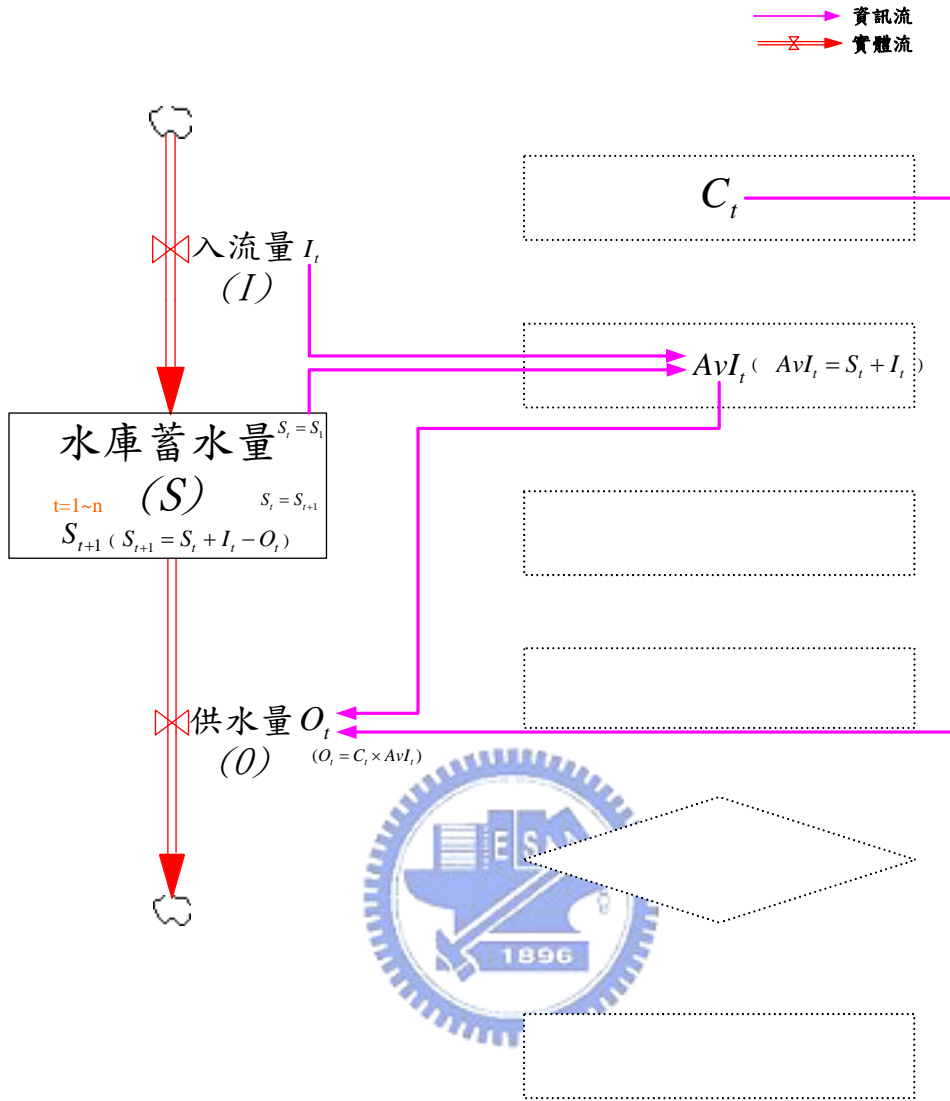


圖 4.1.16 案例一檢視變數傳遞之關係後之示意圖

1. 接著將圖 4.1.16 中各變數的代表名詞寫入並對各連接線進行編號，如圖 4.1.17 所示，再進行變數位置的調整以使圖面上的交叉線段盡量消失，達到圖形清晰不複雜之目的，如圖 4.1.18 所示。

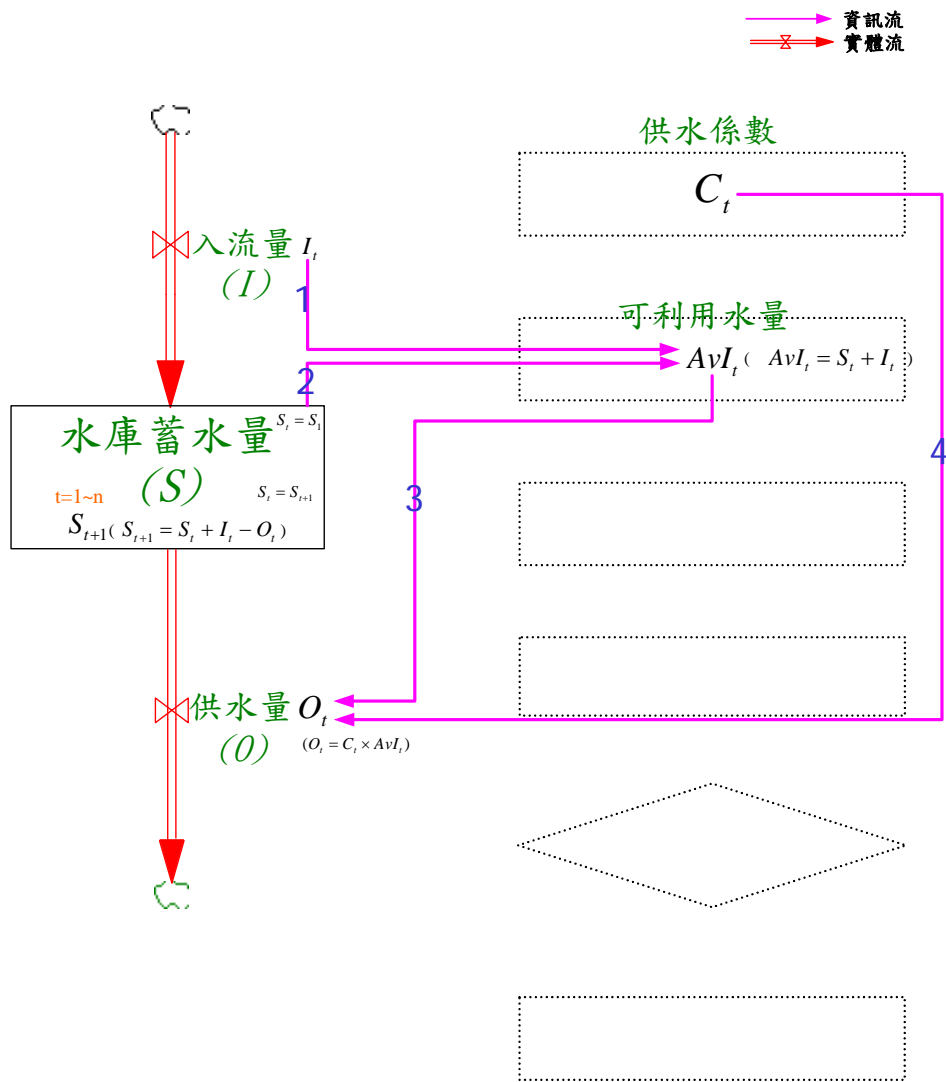


圖 4.1.17 案例一將各變數代名詞寫入及關係線編號後之示意圖

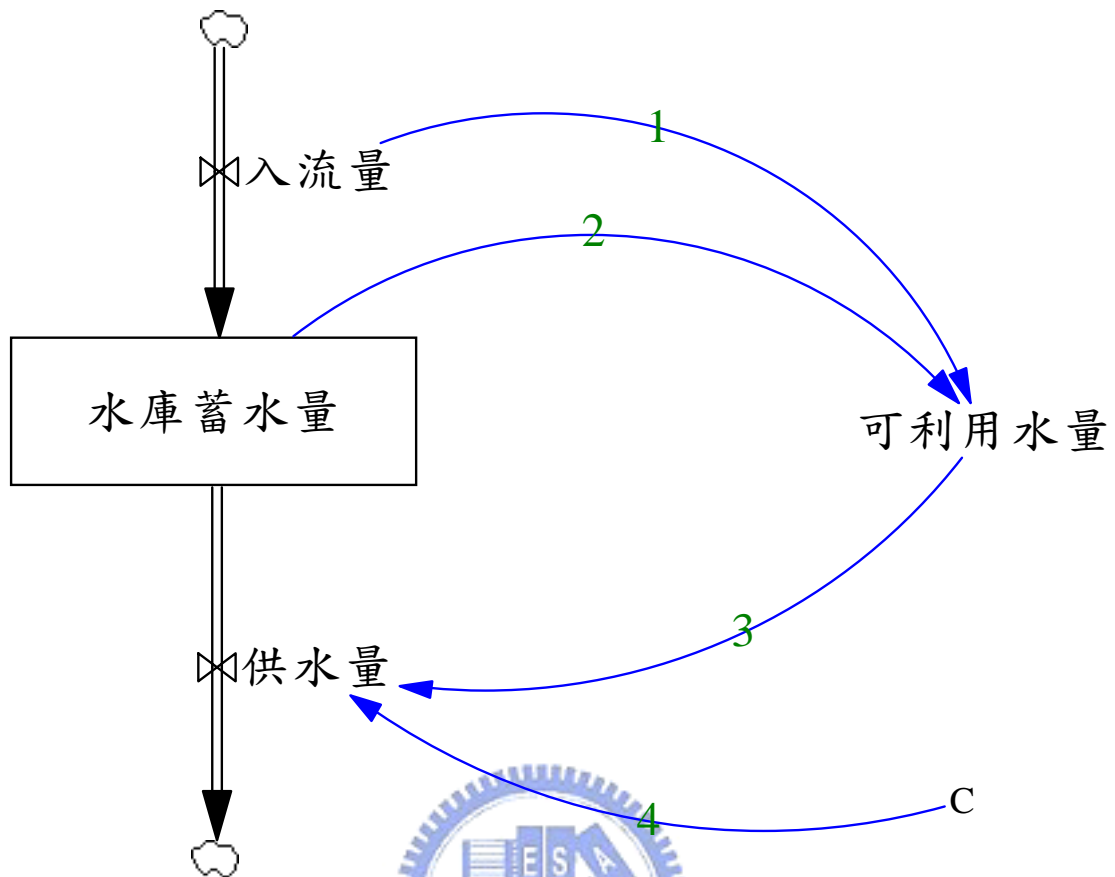


圖 4.1.18 案例一變數位置的調整使交叉線段盡量消失之示意圖

2. 由於圖 4.1.18 中各變數均為名詞，故可將名詞間的因果關係符號標上，如  $A \rightarrow B$  即表示 A 變數與 B 變數有因果關係， $A \xrightarrow{+} B$ ，+ 表示 A 增加則 B 也會增加， $A \xrightarrow{-} B$ ，- 表示 A 增加則 B 會減少；加入因果關係後的圖即為系統動力流圖，如圖 4.1.19 所示。

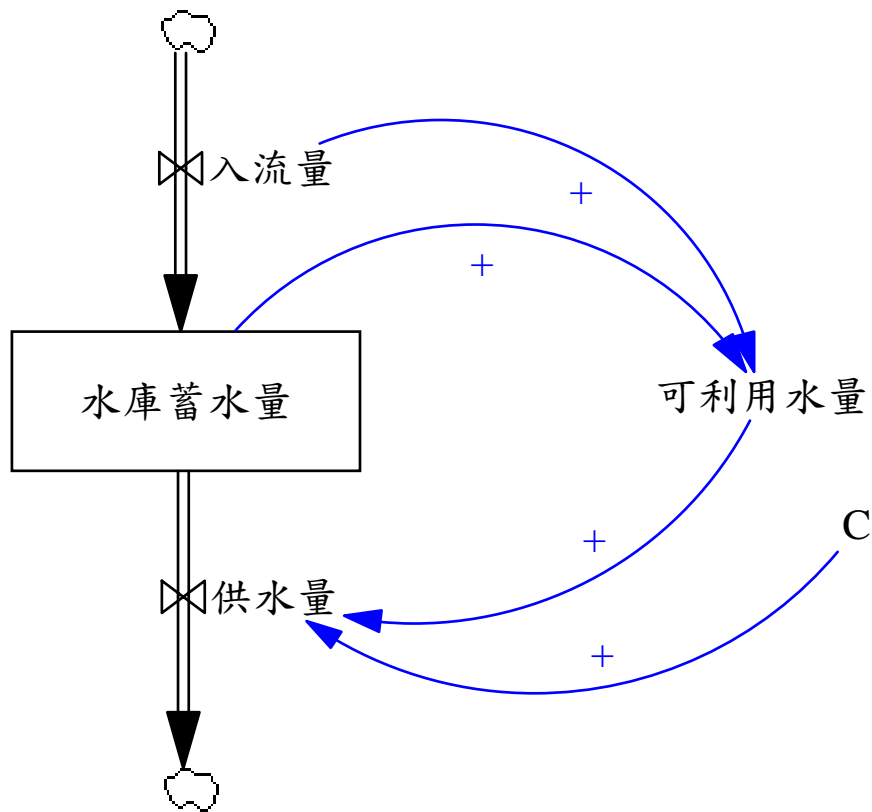


圖 4.1.19 案例一單水庫水量調配系統動力流圖

3. 若將圖 4.1.19 的存量(Stock)與流量(Flow)圖形隱藏，即可形成系統動力學中的因果回饋圖，如圖 4.1.20 所示，在圖 4.1.20 中若回饋環內中負號“-”的個數為雙數或完全沒有時，即為正回饋迴路，正回饋迴路表示系統的累積變數其數值會隨時間的前進而不斷上升或下降；反之則為負回饋迴路，負回饋迴路表示系統的累積變數其數值會隨時間的前進而趨近於系統的目標變數或限制變數。

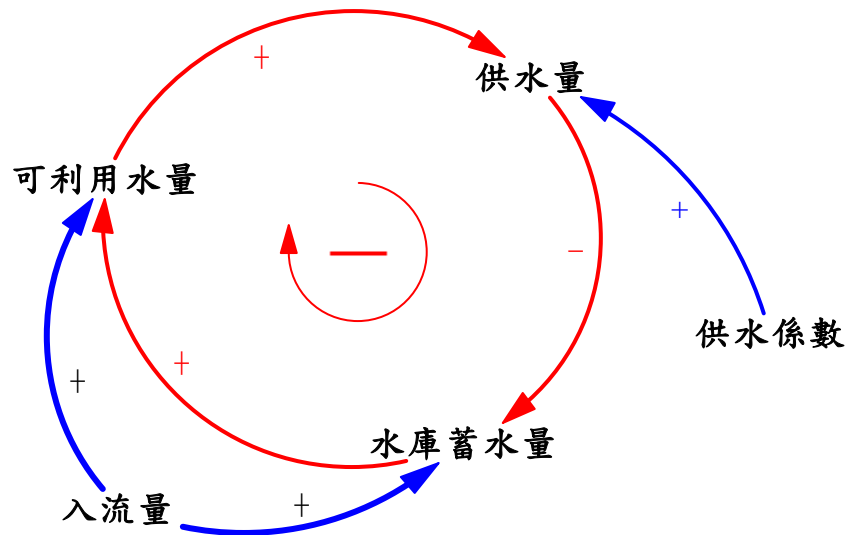


圖 4.1.20 案例一因果回饋圖

以上為單水庫供水案例由系統圖與流程圖整合成系統動力流圖的詳細步驟說明，若把系統動力流圖中的兩個物件存量(Stock)與流量(Flow)元件隱藏，便可得到因果回饋圖，於下章利用因果回饋圖來探討其模擬趨勢。



## 4.2 案例二：單水庫供水加入需求量考量之案例

案例二為一水資源水庫調配問題中單水庫供水的問題，其供水須盡量滿足需求點的需求量。首先我們先對問題利用傳統分析方法繪製系統圖與流程圖，如圖 4.2.1。圖 4.2.1 左方為系統圖，系統圖內的節點為水庫蓄水量( $S$ )，需求量則為一假設之虛擬節點，其箭線為入流量( $I$ )與供水量( $O$ )，其中供水量( $O$ )流入需求節點(虛擬節點)；圖 4.2.1 右方為水庫水量調配演算流程圖，由框架與箭線符號所組成，流程圖內各變數定義與計算方式整理如表 4.2.1 所示：

表 4.2.1 案例二流程圖內各變數定義與計算方式說明表

| 變數              | 名詞              | 方程式                         |
|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| $S_1, I_t, D_t$ | 初始水庫蓄水量，入流量，需求量 | —                           |
| $AvI_t$         | t 時刻之可利用水量      | $AvI_t = I_t + S_t$         |
| $O_t$           | t 時刻之供水量        | $O_t = \min(AvI_t, D_t)$    |
| $S_{t+1}$       | t+1 時刻之水庫蓄水量    | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t$ |

流程演算邏輯說明如下

### 框架一：輸入檔給定

通常流程圖的第一個步驟為給定輸入檔(已知值傳入)，藉由輸入檔我們可以瞭解那些變數是已知值，進而確認那些變數是待定的決策變數。案例一的已知變數設定為初始水庫蓄水量( $S_1$ )、t 時刻的入流量( $I_t$ )與需求量( $D_t$ )。

### 框架二：計算 t 時刻可利用水量

流程圖的第二個步驟為計算可利用水量，t 時刻可利用水量( $AvI_t$ )在案例一中定義為 t 時刻入流量( $I_t$ )與 t 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的總和，

即方程式  $AvI_t = I_t + S_t$  。

### 框架三：決定 t 時刻水庫之供水量

流程圖的第三個步驟為決定水庫的供水量，假設 t 時刻水庫的供水量( $O_t$ )為 t 時刻水庫可利用水量( $AvI_t$ )與需求量( $D_t$ )兩變數中之最小值，即方程式  $O_t = \min(AvI_t, D_t)$  。

### 框架四：計算 t+1 時刻水庫蓄水量

流程圖的第四個步驟為計算下一時刻的水庫蓄水量，t+1 時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )在案例一中定義為 t 時刻入流量( $I_t$ )與 t 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的相加總和再減去 t 時刻水庫的供水量( $O_t$ )，即狀態轉換方程式

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t \text{ 。$$

### 框架五：判斷是否達到模擬總時刻

框架一~四為利用輸入檔的已知資料來依序計算出 t 時刻可供水量、t 時刻水庫供水量以及 t+1 時刻水庫蓄水量，最後第五個步驟為判斷模擬是否達到預設的模擬總時刻，倘若達到的話，則結束模擬；倘若未到達，則繼續模擬下一時刻。



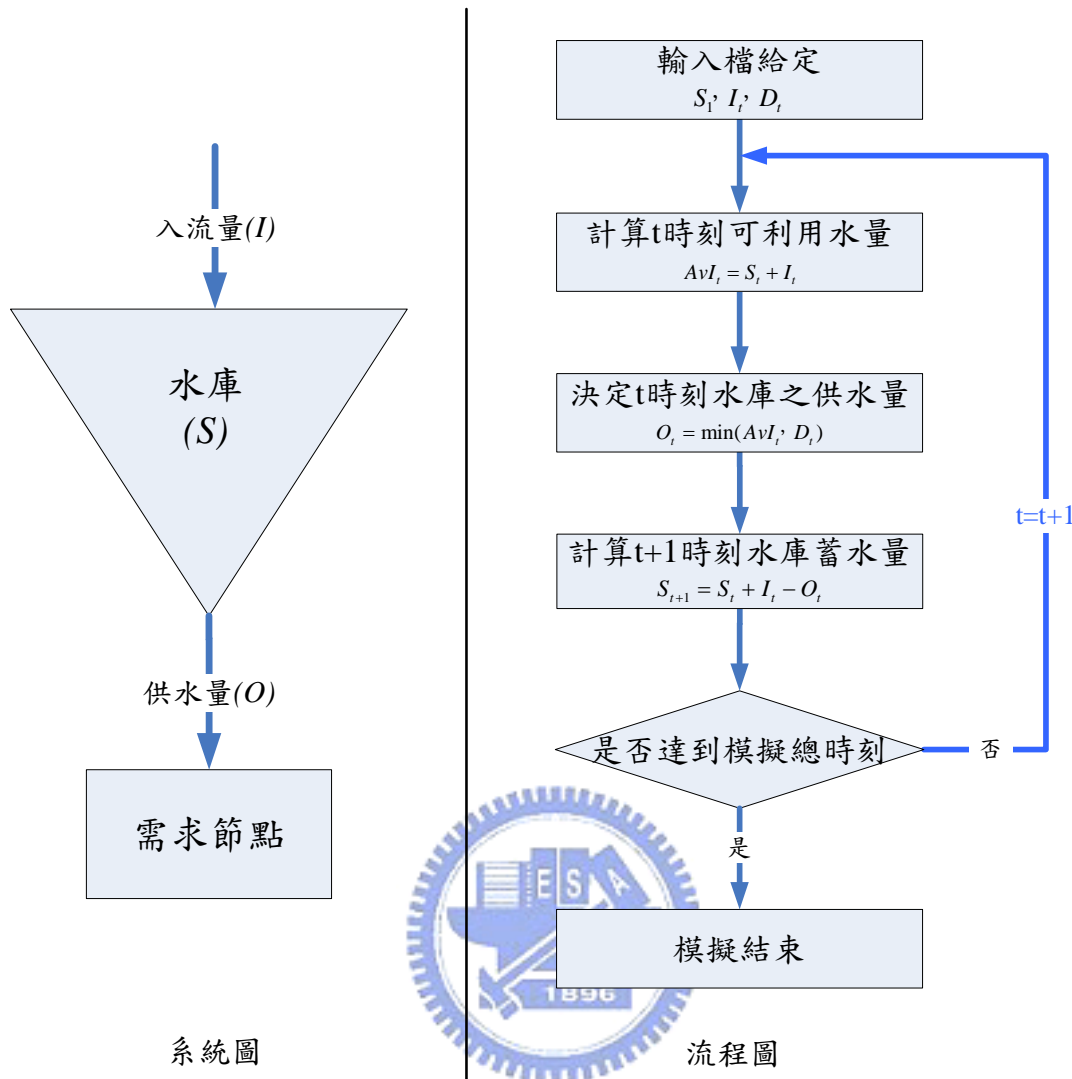


圖 4.2.1 案例二之系統圖及流程圖示意圖

**步驟一、利用連接線初步將系統圖與流程圖連結：**

連結方法可參考案例一之連結方法(圖 4.1.1)，圖 4.2.1 左方的系統圖只可以展現節點的空間相對位置及節點間流動的順序，圖中的未知變數：水庫蓄水量( $S$ )、入流量( $I$ )與供水量( $O$ )在各個時刻的實際值必需藉由流程圖上的相關計算流程來求得並傳入，利用連接線的繪製將系統圖與流程圖之間資訊交換的傳遞關係表達出來，如圖 4.2.2 所示。由於框架一(輸入檔給定)內的水庫初始蓄水量( $S_1$ )、 $t$ 時刻的入流量( $I_t$ )為已知值，所以我們可以繪製兩條由框架一傳入水庫蓄水量( $S$ )與入流量( $I$ )的連接線。框架三(決定  $t$  時刻水庫之供水量)與框架四(計

算  $t+1$  時刻水庫蓄水量)所求得的  $t$  時刻水庫之供水量( $O_t$ )與  $t+1$  時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )皆為系統圖上變數所需的資訊,所以我們可以繪製兩條由框架三傳入水庫之供水量( $O$ )與框架四傳入水庫蓄水量( $S$ )的連接線。由於流程圖框架一的輸入檔僅提供水庫初始蓄水量( $S_1$ )及需求量( $D_t$ ),故框架二在計算  $t=1$  時刻以後的可供應量( $AvI_t$ )時所需要的  $t$  時刻水庫蓄水量( $S_t$ ),則要由系統圖內已知的  $t+1$  時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )來提供。所以我們可以繪製一條由系統圖上水庫蓄水量量( $S$ )傳入框架二中  $t$  時刻可利用水量( $AvI_t$ )的連接線。從這五條連接線的繪製即可清楚觀察出系統圖與流程圖的相互關係。

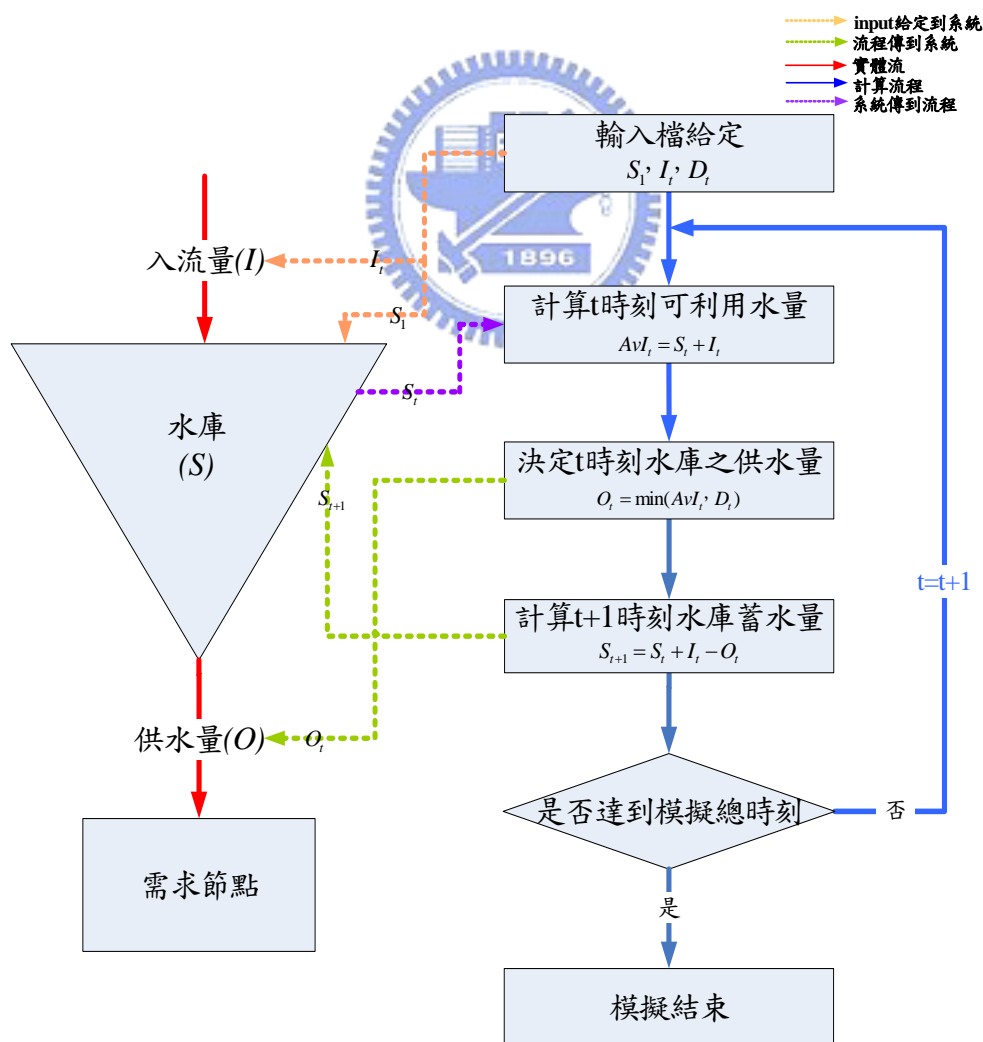

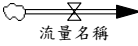
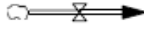





圖 4.2.2 案例二系統與流程圖初步結合示意圖

## 步驟二、釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)

修改方式與案例一修改方法一樣(圖 4.1.3)。圖 4.2.2 中的系統圖為水流實體元件的流動，而流程圖為變數資訊傳遞流動，為更明確分辨實體元件流動與變數資訊流動，於步驟二利用系統動力流圖的兩個繪圖物件，存量(Stock)與流量(Flow)來釐清這兩類不同的流動行為。系統圖上的節點若有累積的行為則以存量(Stock，符號為  )來表示，如：水庫蓄水量(S)。而系統圖內水流的流動則以流量(Flow，符號為  )表示，其中閘門(X)表示水量流動的控制變數，  
 表示入流量(I)， 表示出流量(O)，入流量時的  代表水量的來源(Source)，出流量時的  表示水量要到達的目的地(Sink)，然而需求節點在此案例中為目的地(Sink)，故不以存量(Stock)來表示。採用存量與流量表示的結合圖如圖 4.2.3 所示。



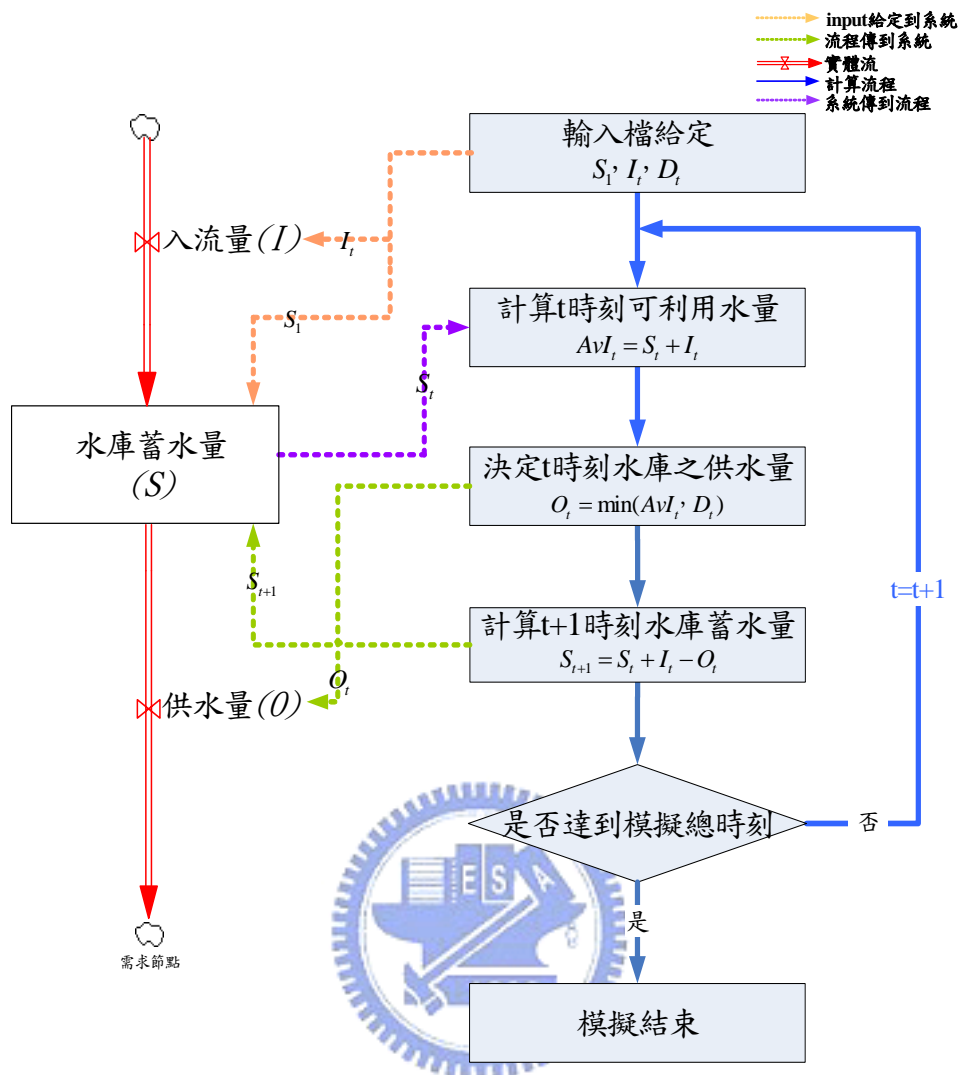


圖 4.2.3 案例二釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖

步驟三、再接著以系統為主體將流程圖整併進去(依照流程圖步驟依序拆解框架，並確認框架內的變數為實體變數或虛擬變數)

拆解整併步驟可參考案例一圖 4.1.4~圖 4.1.14，差異處則在第一個框架(輸入檔給定)與第三個框架(決定 t 時刻水庫之供水量)，於案例一中第一個框架裡的變數不一樣( $C_t$  變成  $D_t$ )；第三個框架的計算方式由原本的  $O_t = C_t \times AvI_t$  修改成  $O_t = \min(AvI_t, D_t)$ ，以系統為主體將流程圖整併進去後之圖形如圖 4.2.4 所示。

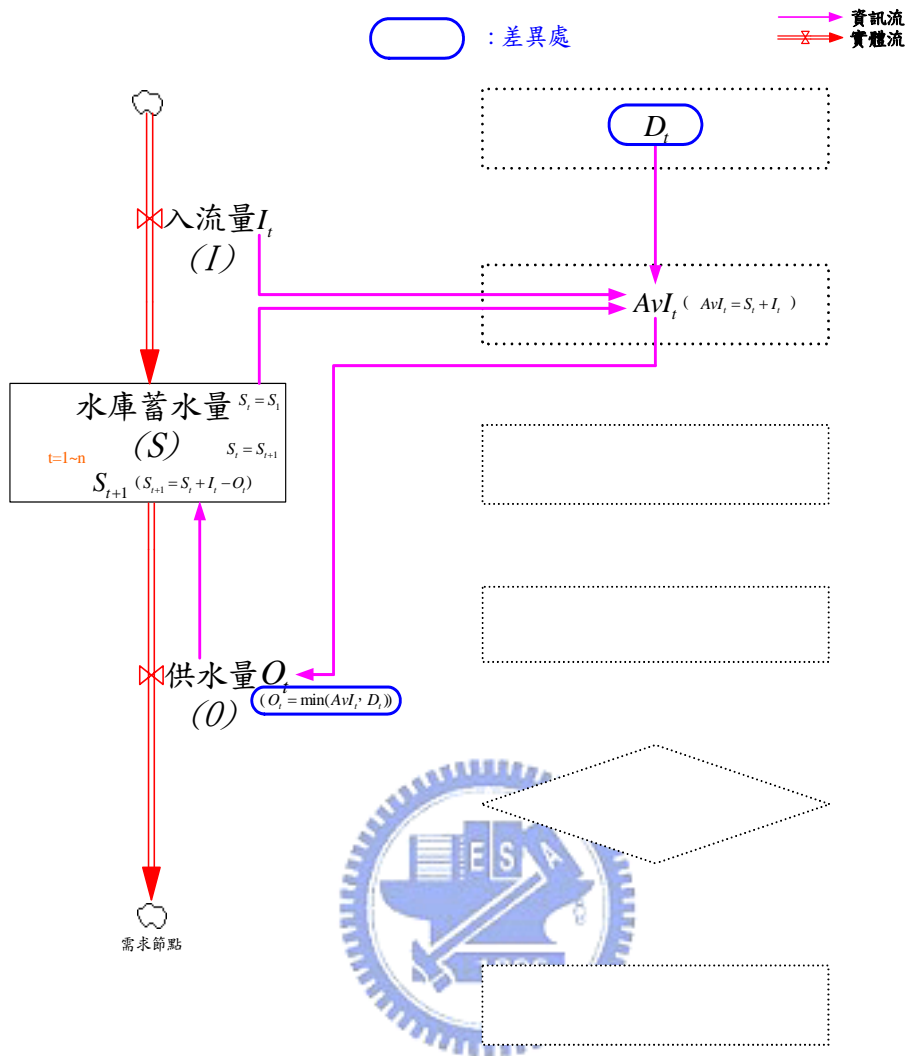


圖 4.2.4 案例二拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖

#### 步驟四、檢視各變數之間的傳遞行為是否正確

檢視方式及修改可參考案例一圖 4.1.15~圖 4.1.16。案例二的變數檢視圖如圖 4.2.5 所示，檢視完之修改圖如圖 4.2.6 所示。

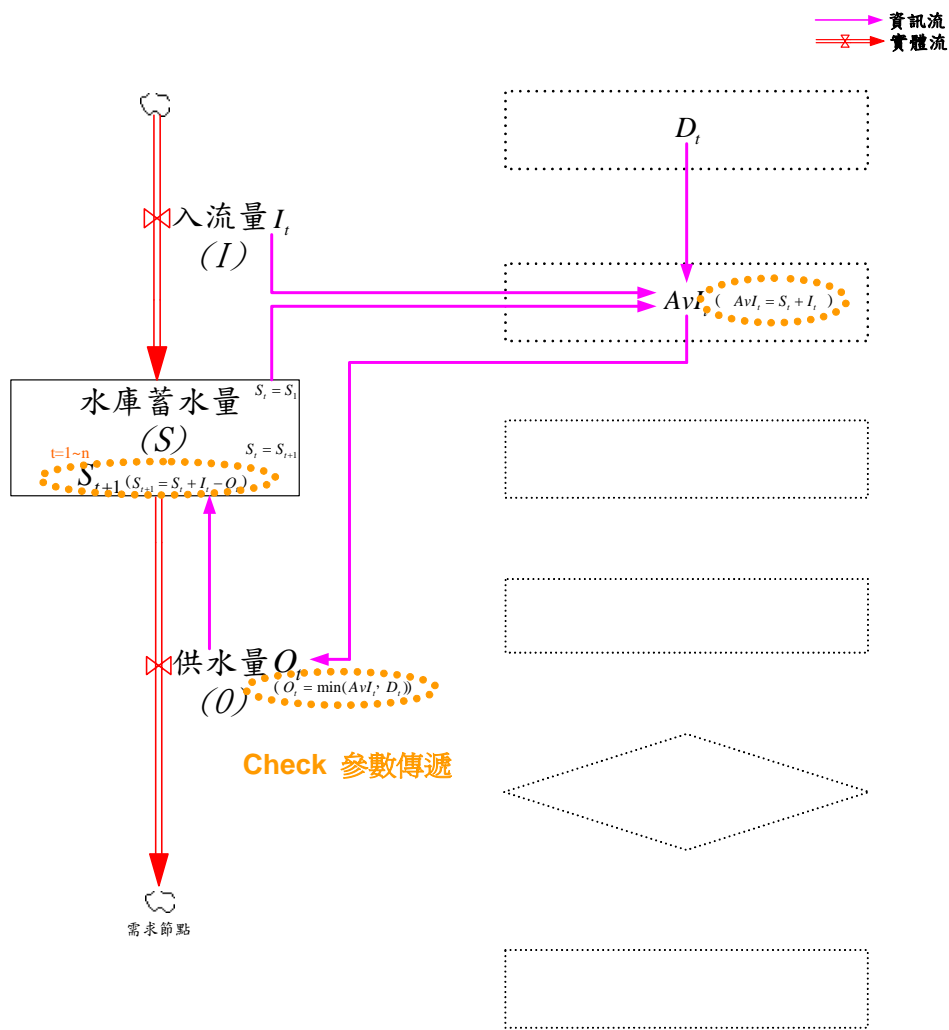


圖 4.2.5 案例二須確認的三個計算方程式示意圖

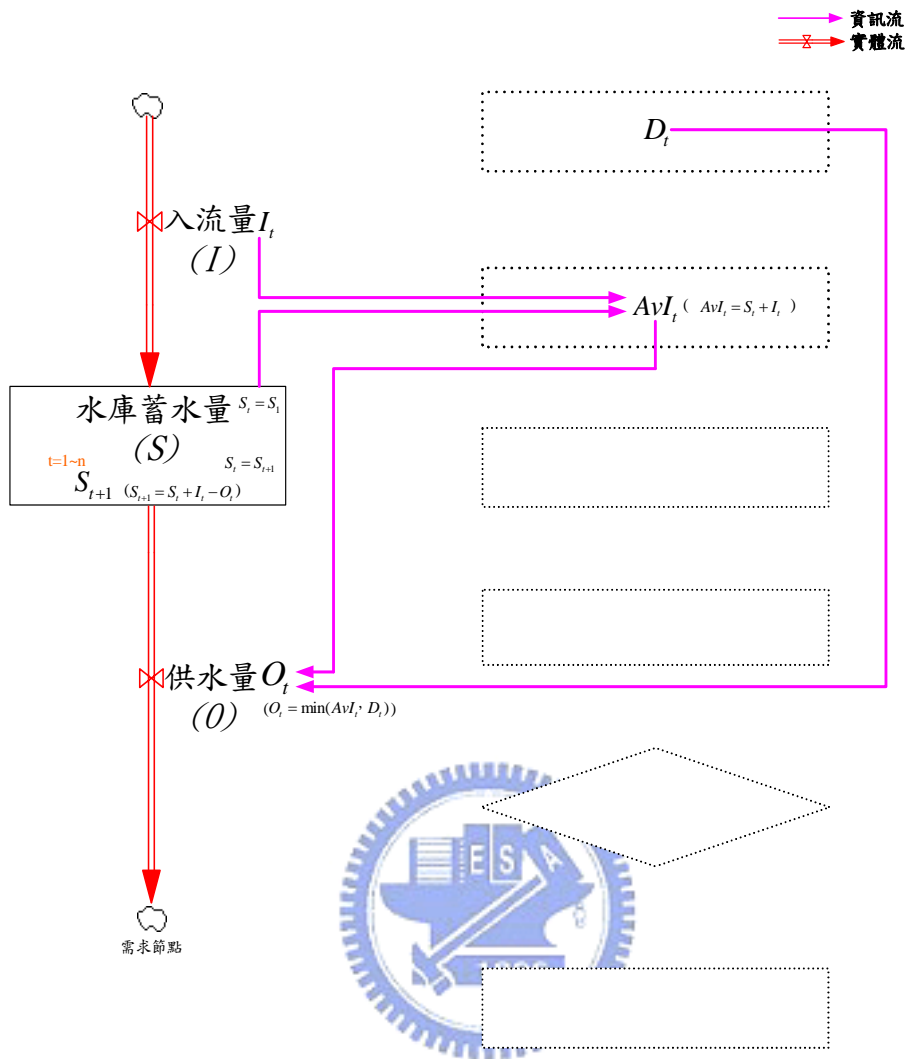


圖 4.2.6 案例二檢視變數傳遞之關係後之示意圖

在根據案例一步驟四中的方法(如圖 4.1.17~圖 4.1.20)得到案例二的因果回饋圖，如圖 4.2.7 所示。

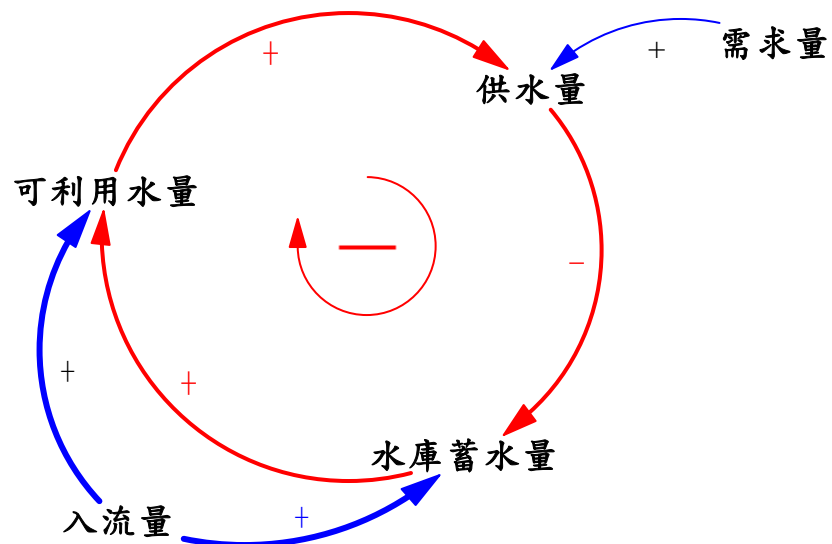


圖 4.2.7 案例二因果回饋圖





### 4.3 案例三：單水庫供水加入需求量以及河川放流量考 量之案例

案例三為一水資源水庫調配問題中單水庫供水的問題，然供水須盡量滿足需求點的需求量，且供水前須滿足下游生態基流量及水庫溢流之情形(二者加總起來稱之為河川放流量)。首先我們先對問題利用傳統分析方法繪製系統圖與流程圖，如圖 4.3.1。圖 4.3.1 左方為系統圖，系統圖內的節點為水庫蓄水量( $S$ )，需求量與海為假設之虛擬節點，而箭線為入流量( $I$ )、民生供水量( $O$ )與河川放流量( $R$ )，其中民生供水量( $O$ )流入需求節點，河川放流量( $R$ )流入海；圖 4.3.1 右方為水庫水量調配演算流程圖，由框架與箭線符號所組成，流程圖內各變數定義與計算方式整理如表 4.3.1 所示：

表 4.3.1 案例三流程圖內各變數與計算方式說明表

| 變數                              | 名詞                       | 方程式                                                                                                                    |
|---------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_1, I_t, D_t, Db_t, S_{\max}$ | 初始水庫蓄水量，入流量，需求量，基流量，水庫庫容 | —                                                                                                                      |
| $AvI_t$                         | t 時刻之可利用水量               | $AvI_t = I_t + S_t$                                                                                                    |
| $Ob_t$                          | t 時刻之供水量(基流量)            | $Ob_t = \min(AvI_t, Db_t)$                                                                                             |
| $O_t$                           | t 時刻之供水量(民生需求量)          | $O_t = \min(AvI_t - Ob_t, D_t), AvI_t > Ob_t$<br>$O_t = 0, AvI_t \leq Ob_t$                                            |
| $R_t$                           | t 時刻之河川放流量               | $R_t = AvI_t - Ob_t - O_t - S_{\max}, AvI_t - Ob_t - O_t > S_{\max}$<br>$R_t = Ob_t, AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{\max}$ |
| $S_{t+1}$                       | t+1 時刻之水庫蓄水量             | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$                                                                                      |

流程演算邏輯說明如下

#### 框架一：輸入檔給定

通常流程圖的第一個步驟為給定輸入檔(已知值傳入)，藉由輸入檔我們可以瞭解那些變數是已知值，進而確認那些變數是待定的決策變數。案例一的已知變數設定為初始水庫蓄水量( $S_1$ )、 $t$ 時刻的入流量( $I_t$ )、需求量( $D_t$ )、基流量( $Db_t$ )與水庫庫容( $S_{\max}$ )。

#### 框架二：計算 $t$ 時刻可利用水量

流程圖的第二個步驟為計算可利用水量， $t$ 時刻可利用水量( $AvI_t$ )在案例一中定義為  $t$ 時刻入流量( $I_t$ )與  $t$ 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的總和，即方程式  $AvI_t = I_t + S_t$ 。

#### 框架三：決定 $t$ 時刻水庫之供水量(基流量)

流程圖的第三個步驟為決定水庫提供基流量的供水量，假設  $t$ 時刻水庫提供基流量的水量( $Ob_t$ )為  $t$ 時刻水庫可利用水量( $AvI_t$ )與基流量( $Db_t$ )兩變數中之最小值，即方程式  $Ob_t = \min(AvI_t, Db_t)$ 。

#### 框架四：決定 $t$ 時刻水庫之供水量(民生需求量)

流程圖的第四個步驟為決定水庫提供民生需求量的供水量，假設  $t$ 時刻水庫提供基流量的水量( $O_t$ )為：

如果在  $AvI_t > Ob_t$  條件下， $O_t = \min(AvI_t - Ob_t, D_t)$ 。

如果在  $AvI_t \leq Ob_t$  條件下， $O_t = 0$ 。

#### 框架五：決定 $t$ 時刻河川放流量

流程圖的第五個步驟為決定河川放流量，假設  $t$ 時刻河川放流量( $R_t$ )為：

如果在  $AvI_t - Ob_t - O_t > S_{\max}$  條件下， $R_t = AvI_t - Ob_t - O_t - S_{\max}$ 。

如果在  $AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{\max}$  條件下， $R_t = Ob_t$ 。

#### 框架六：計算 $t+1$ 時刻水庫蓄水量

流程圖的第六個步驟為計算下一時刻的水庫蓄水量， $t+1$  時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )在案例一中定義為 $t$ 時刻入流量( $I_t$ )與 $t$ 時刻水庫蓄水量( $S_t$ )的相加總和再減去 $t$ 時刻水庫供給民生需求量的供水量( $O_t$ )及河川放流量，即狀態轉換方程式  $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$ 。

### 框架七:判斷是否達到模擬總時刻

框架一~六為利用輸入檔的已知資料來依序計算出  $t$  時刻可供水量、 $t$  時刻水庫提供基流量的供水量， $t$  時刻水庫提供民生需求量的供水量、 $t$  時刻河川放流量及  $t+1$  時刻水庫蓄水量，最後第七個步驟為判斷模擬是否達到預設的模擬總時刻，倘若達到的話，則結束模擬；倘若未到達，則繼續模擬下一時刻。

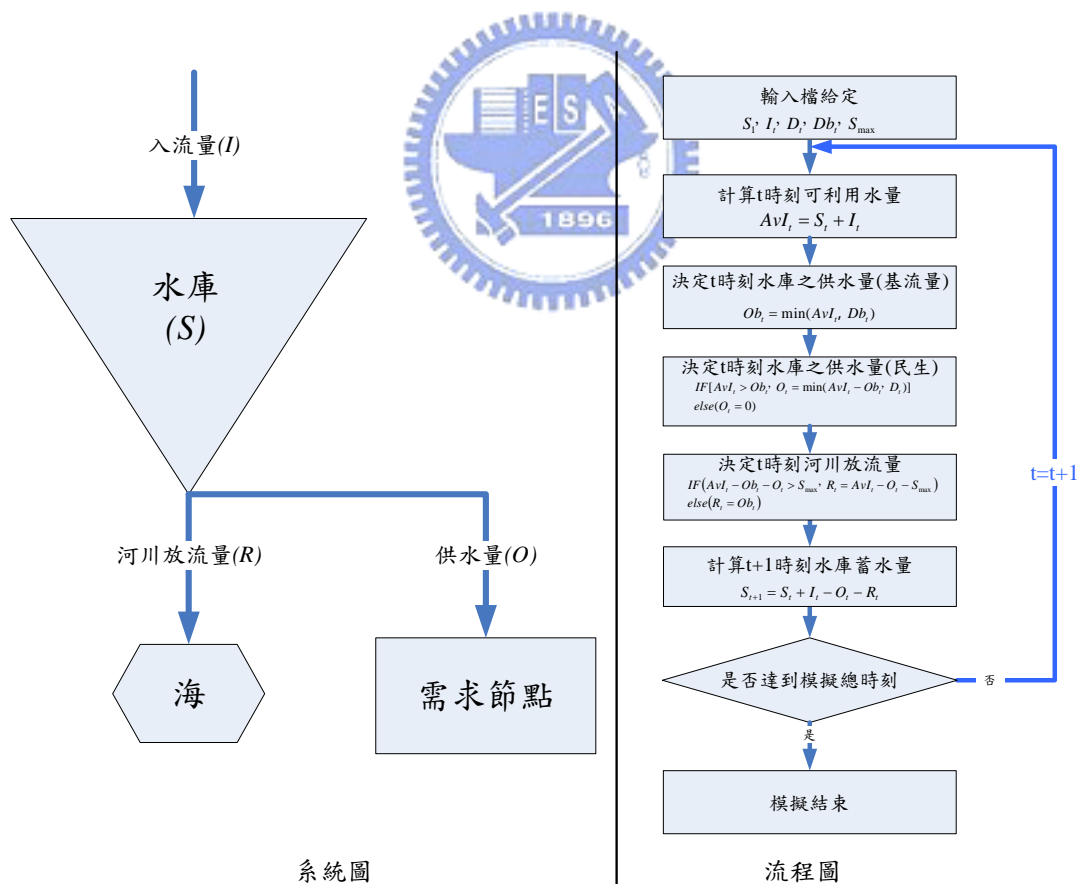


圖 4.3.1 案例三之系統圖及流程圖示意圖

### 步驟一、利用連接線初步將系統圖與流程圖連結：

連結方法可參考案例一與案例二的連結方式，圖 4.3.1 左方的系統圖只可以展現節點的空間相對位置及節點間流動的順序，圖中的未知變數：水庫蓄水量( $S$ )、入流量( $I$ )、供水量( $O$ )與河川放流量( $R$ )在各個時刻的實際值必需藉由流程圖上的相關計算流程來求得並傳入，利用連接線的繪製將系統圖與流程圖之間資訊交換的傳遞關係表達出來，如圖 4.3.2 所示。由於框架一(輸入檔給定)內的水庫初始蓄水量( $S_1$ )、 $t$ 時刻的入流量( $I_t$ )為已知值，所以我們可以繪製兩條由框架一傳入水庫蓄水量( $S$ )與入流量( $I$ )的連接線。框架四(決定  $t$  時刻水庫供給民生需求量之供水量)、框架五(決定  $t$  時刻河川放流量)與框架六(計算  $t+1$  時刻水庫蓄水量)所求得的  $t$  時刻水庫之供水量( $O_t$ )、 $t$  時刻河川放流量( $R_t$ )與  $t+1$  時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )皆為系統圖上變數所需的資訊，所以我們可以繪製三條由框架四傳入水庫之供水量( $O$ )、框架五傳入河川放流量( $R$ )與框架六傳入水庫蓄水量( $S$ )的連接線。由於流程圖框架一的輸入檔僅提供水庫初始蓄水量( $S_1$ )及需求量( $D_t$ )，故框架二在計算  $t=1$  時刻以後的可供應量( $AvI_t$ )時所需要的  $t$  時刻水庫蓄水量( $S_t$ )，則要由系統圖內已知的  $t+1$  時刻水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )來提供。所以我們可以繪製一條由系統圖上水庫蓄水量( $S$ )傳入框架二中  $t$  時刻可利用水量( $AvI_t$ )的連接線，然框架三(決定  $t$  時刻水庫供給基流量之供水量)所需要的可利用水量( $AvI_t$ )及基流量( $Db_t$ )則由框架二的資訊來提供。從這六條連接線的繪製即可清楚觀察出系統圖與流程圖的相互關係。

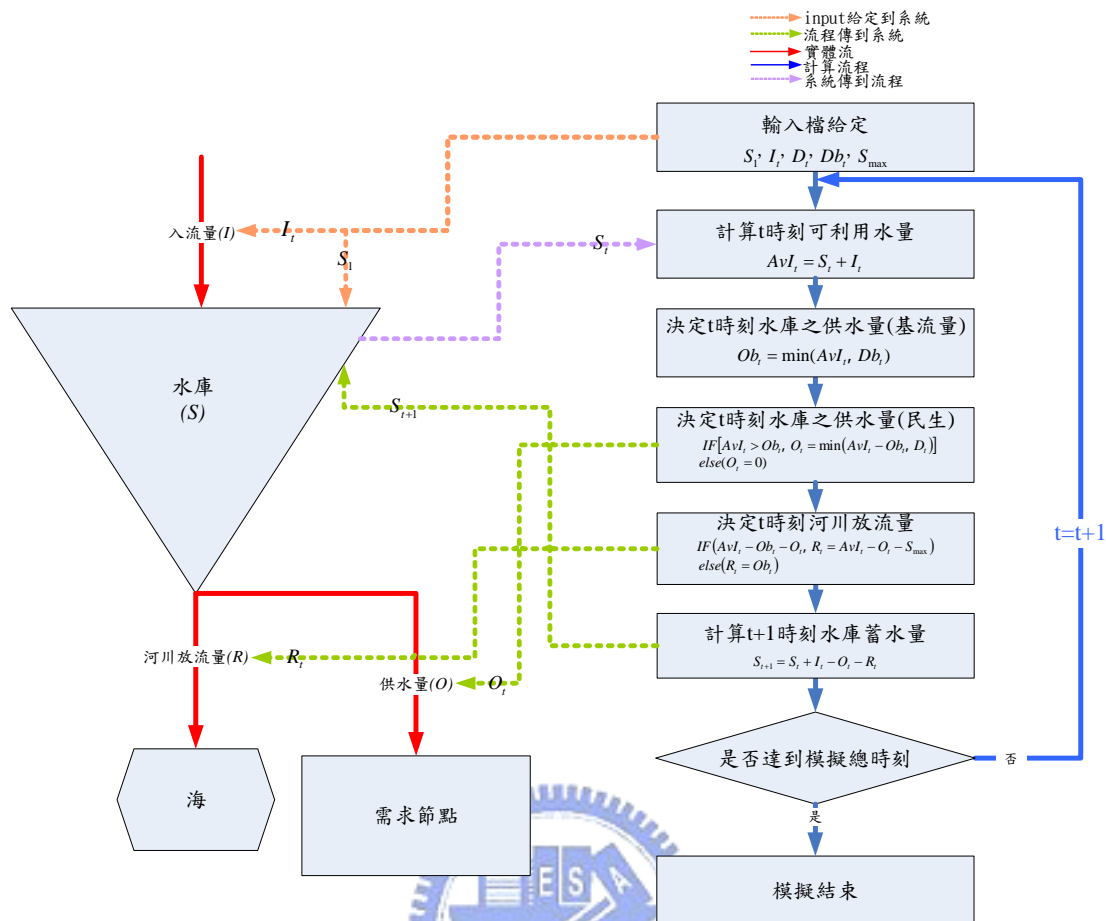


圖 4.3.2 案例三系統與流程圖初步結合示意圖

## 步驟二、釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)

修改方式與案例一與案例二修改方法一樣。圖 4.3.2 中的系統圖為水流實體元件的流動，而流程圖為變數資訊傳遞流動，為更明確分辨實體元件流動與變數資訊流動，於步驟二利用系統動力流圖的兩個繪圖物件，存量(Stock)與流量(Flow)來釐清這兩類不同的流動行為。系統圖上的節點若有累積的行為則以存量(Stock，符號為 存量名稱)來表示，如：水庫蓄水量(S)。而系統圖內水流的流動則以流量(Flow，符號為  $\text{流量名稱} \rightarrow$ )表示，其中閥門( $\otimes$ )表示水量流動的控制變數， $\text{Source} \rightarrow \otimes \rightarrow \text{Sink}$  表示入流量(I)， $\otimes \rightarrow \text{Sink}$  表示出流量(O)，入流量時的  $\text{Source}$  代表水量的來源(Source)，出流量時的  $\text{Sink}$  表示水量要到達的目的地(Sink)，然而需求節點與海在此案例中為目的地(Sink)，故不以存量

(Stock)來表示。採用存量與流量表示的結合圖如圖 4.3.3 所示。

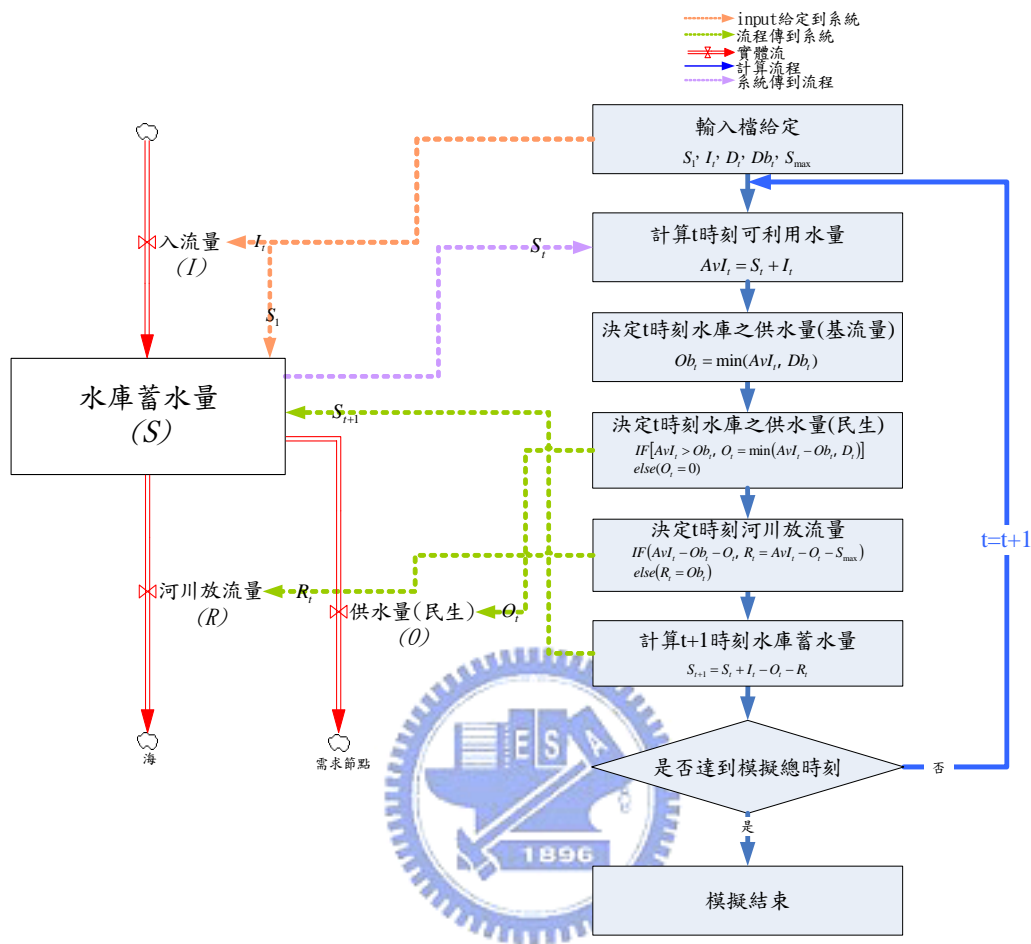


圖 4.3.3 案例三釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖

步驟三、再接著以系統為主體將流程圖整併進去(依照流程圖步驟依序拆解框架，並確認框架內的變數為實體變數或虛擬變數)

其拆解結合步驟可參考案例一圖 4.1.4~圖 4.1.14，差異處則在第一個框架(輸入檔給定)變數  $C_t$  變成  $D_t$  並增加  $Db_t$  與  $S_{\max}$  兩個變數，並於流程中多第三個框架[決定 t 時刻水庫之供水量(基流量)]與第五個框架(決定 t 時刻河川放流量)，其拆解方法與前兩個案例一樣，藉由流程圖步驟依序拆解流程框架，先將框架中之變數變成獨立變數，判斷系統圖上是否存在相同變數，再把變數移置系統圖相對應的位置上或

保留成獨立變數，且由上一個框架傳遞此框架或此框架傳遞至下一個框架的箭線皆需保留且方向不可任意變動，以系統為主體將流程圖整併進去後之圖形如圖 4.3.4 所示。

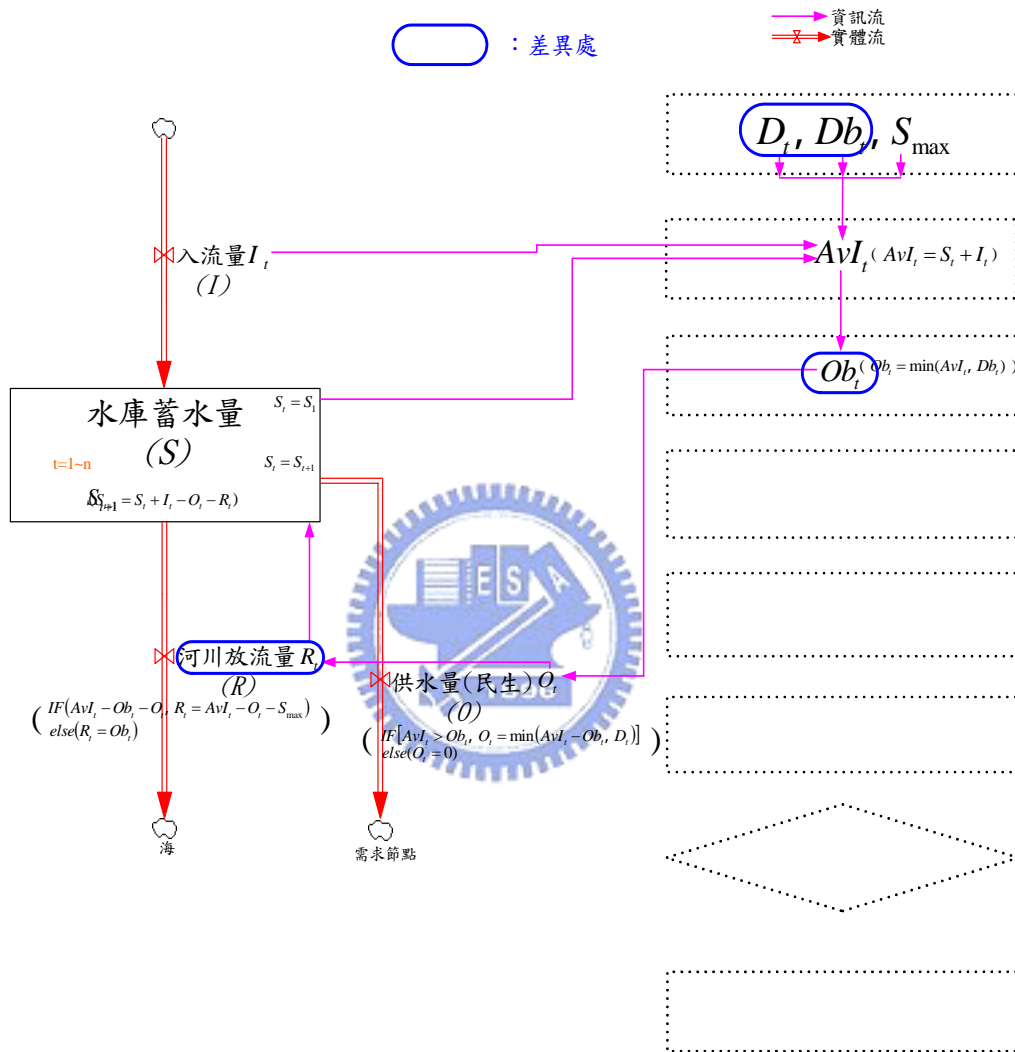


圖 4.3.4 案例三拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖

### 步驟四、檢視各變數之間的傳遞行為是否正確

其檢視方式及修改圖可參考案例一圖 4.1.15 及圖 4.1.16。案例三的變數檢視圖如圖 4.3.5 所示，檢視完之修改圖如圖 4.3.6 所示。

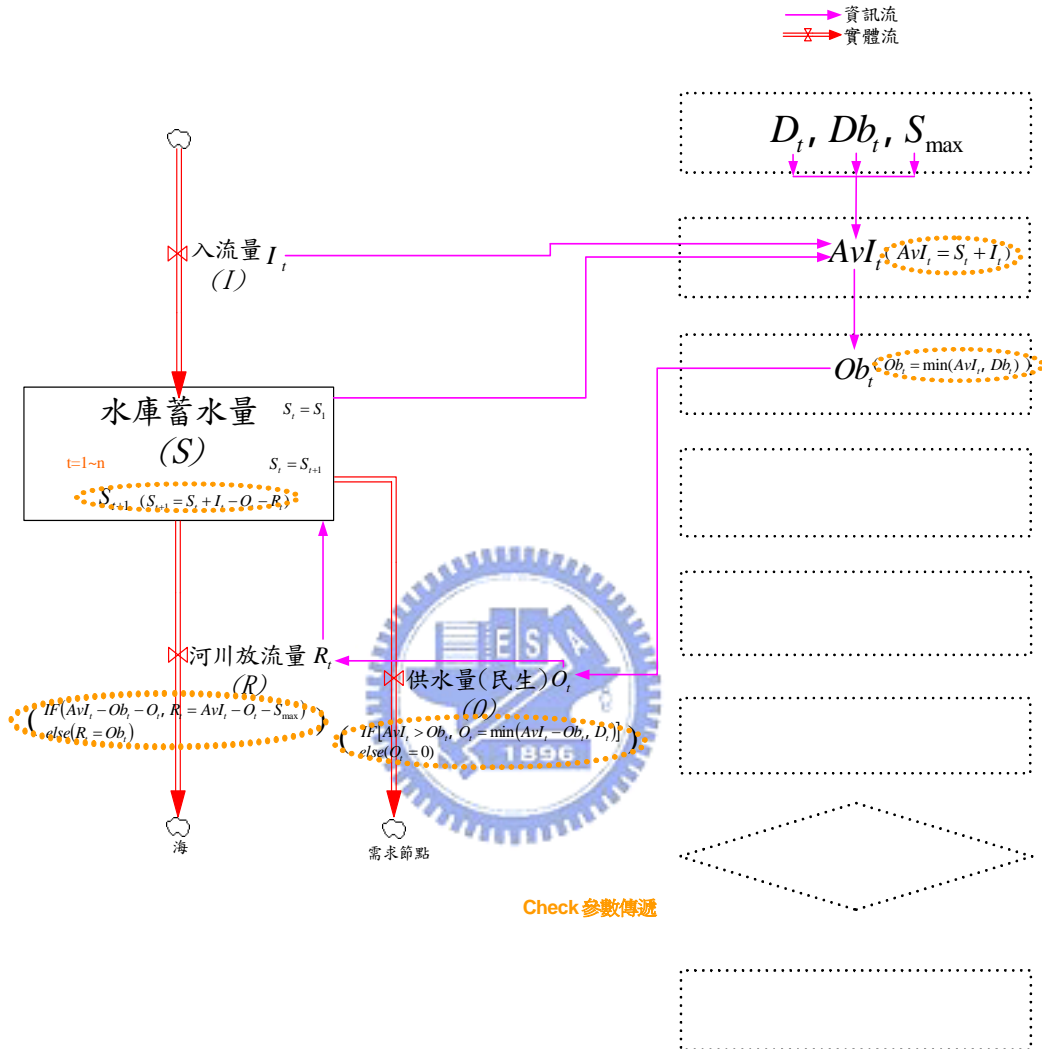


圖 4.3.5 案例三須確認的五個計算方程式示意圖



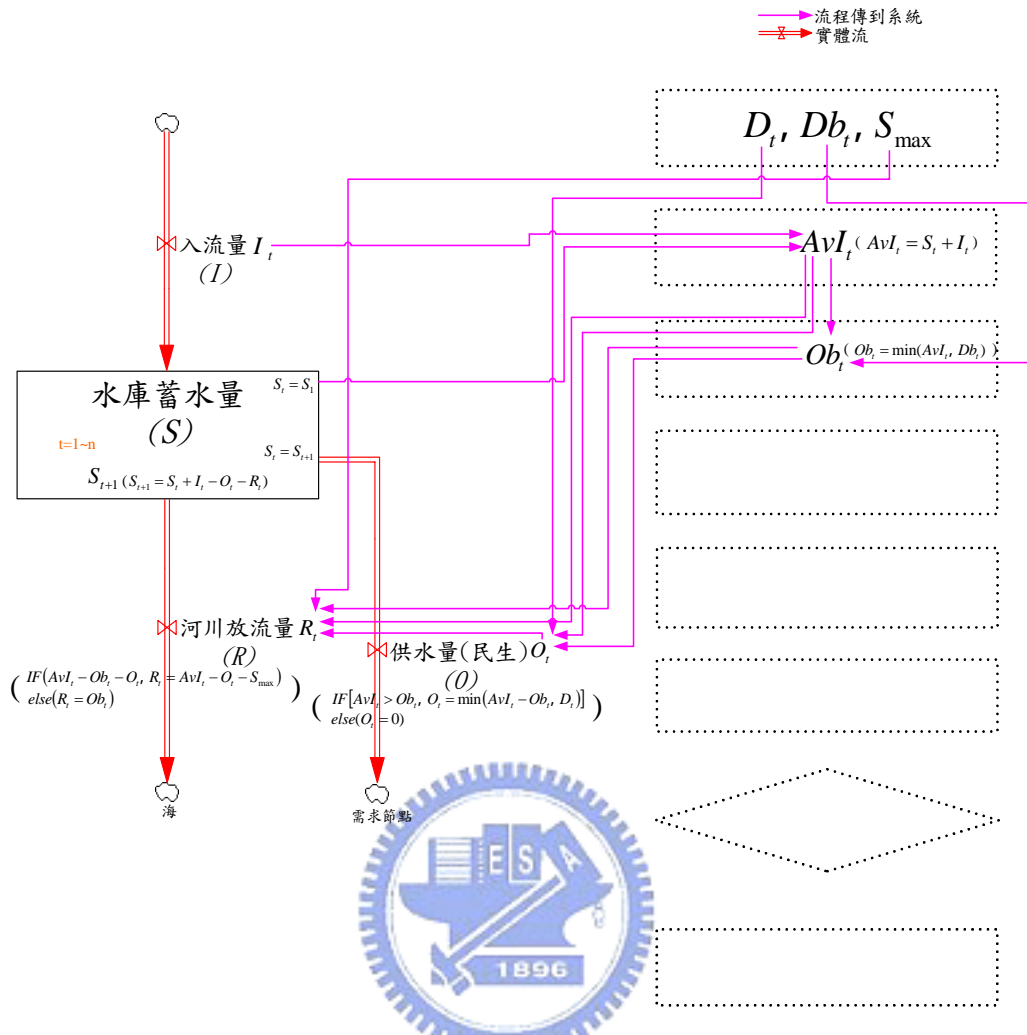


圖 4.3.6 案例三檢視變數傳遞之關係後之示意圖

在根據案例一步驟四中的方法(如圖 4.1.17~圖 4.1.20)得到案例三的因果回饋圖，如圖 4.3.7 所示。

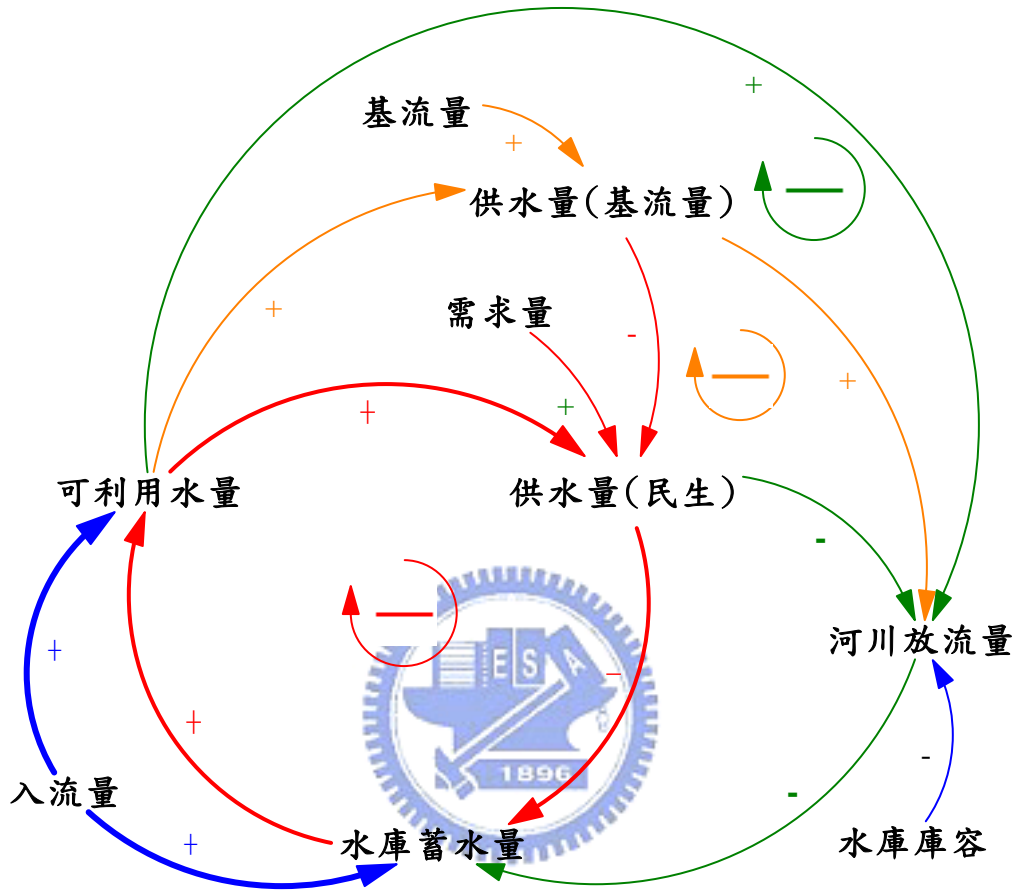


圖 4.3.7 案例三因果回饋圖

## 4.4 案例四：單水庫供水加入需求量、河川放流量以及水庫操作上加入規線操作考量之案例

案例四為一水資源水庫調配問題中單水庫供水的問題，然供水須盡量滿足需求點的需求量與其限制的供水原則(水庫操作規線)，且供水前須滿足下游生態基流量及水庫溢流之情形(二者加總起來稱之為河川放流量)。首先我們先對問題利用傳統分析方法繪製系統圖與流程圖，如圖 4.4.1。圖 4.4.1 左方為系統圖，系統圖內的節點為水庫蓄水量，需求量與海為假設之虛擬節點，而箭線為入流量、民生供水量與河川放流量，其中民生供水量流入需求節點，河川放流量流入海；圖 4.4.1 右方為水庫水量調配演算流程圖，由框架與箭線符號所組成，流程圖內各變數定義與計算方式整理如表 4.4.1 所示：

表 4.4.1 案例四流程圖內各變數與計算方式說明表

| 變數                                              | 名詞                                      | 方程式                                                                                            |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_1, I_t, D_t, Db_t, S_{max}, S_{buffer}, S_d$ | 初始水庫蓄水量，入流量，需求量，基流量，水庫庫容，水庫下限體積，水庫呆水位體積 | —                                                                                              |
| $AvI_t$                                         | t 時刻之可利用水量                              | $AvI_t = I_t + S_t$                                                                            |
| $Ob_t$                                          | t 時刻之供水量(基流量)                           | $Ob_t = \min(AvI_t - S_d, Db_t)$                                                               |
| $O_t$                                           | t 時刻之供水量(民生)                            | $O_t = \min(AvI_t - S_d - Ob_t, DT_t), AvI_t - S_d > Ob_t$<br>$O_t = 0, AvI_t - S_d \leq Ob_t$ |

|           |              |                                                                                                                       |
|-----------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_t$     | t 時刻之河川放流量   | $R_t = AvI_t - O_t - S_{\max}$ , $AvI_t - Ob_t - O_t > S_{\max}$<br>$R_t = Ob_t$ , $AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{\max}$ |
| $S_{t+1}$ | t+1 時刻之水庫蓄水量 | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$                                                                                     |
| $W_i$     | 打折係數         | $W_i = 1$ , $AvI_t \geq S_{buffer}$<br>$W_i = 0.8$ , $S_{buffer} \geq AvI_t \geq S_d$<br>$W_i = 0$ , $S_d \geq AvI_t$ |
| $DT_t$    | t 時刻修正之民生需求量 | $DT_t = W_i \times D_t$                                                                                               |

流程演算邏輯如圖 4.4.1 右方所示，首先為給定輸入檔(已知值輸入)，利用輸入檔來依序計算出 t 時刻可利用水量、t 時刻供水量(基流量)、t 時刻供水量(民生)、t 時刻河川放流量以及 t+1 時刻水庫的蓄水量，其中計算 t 時刻供水量(民生)時，必須利用先前計算的 t 時刻可利用水量來計算 t 時刻打折係數及 t 時刻民生求量，以上步驟完成後再判斷模擬是否達到預設的模擬總時刻，倘若達到的話，則結束模擬；倘若未到達，則繼續模擬下一時刻。

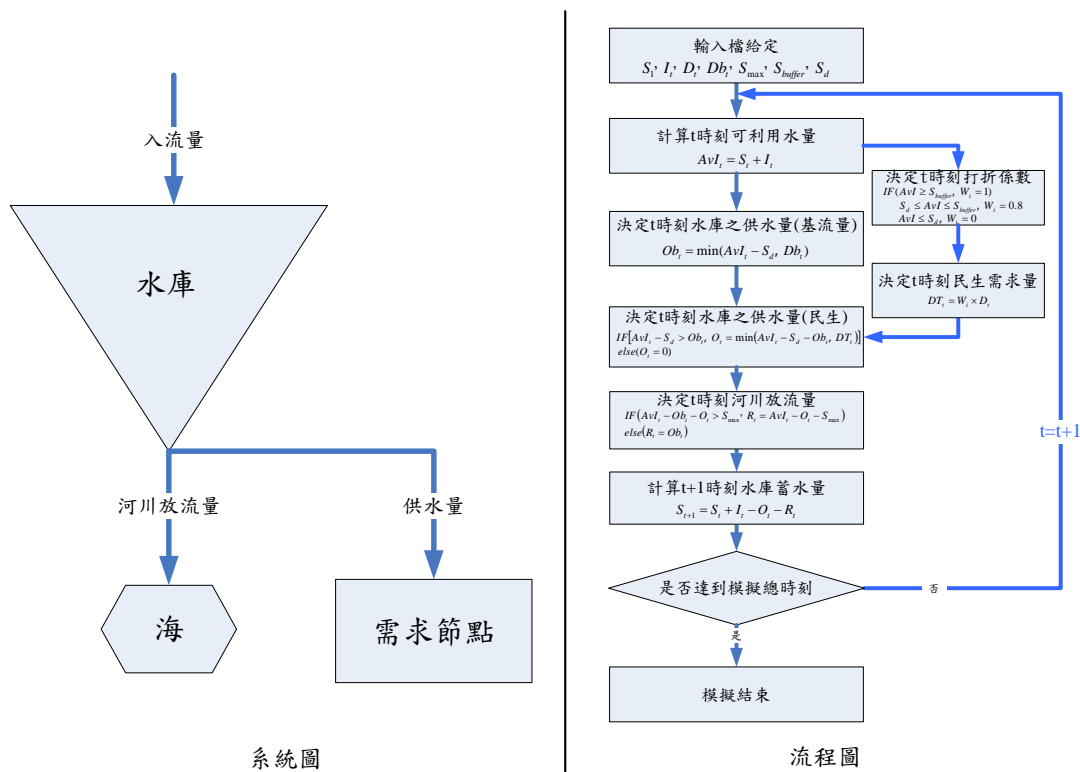


圖 4.4.1 案例四之系統圖及流程圖示意圖

### 步驟一、利用連接線初步將系統圖與流程圖連結：

此步驟可參考案例一、案例二與案例三的連結方式，其連接圖如圖 4.4.2 所示，圖 4.4.2 中系統圖的未知變數入流量( $I$ )、水庫蓄水量( $S$ )、供水量( $O$ )及河川放流量( $R$ )可由流程圖上的相關計算流程來求得並傳入，需求節點與海是實際水流流到的地方，故節點其行為則不考量，所以將此二節點假設成虛擬節點，因此流程圖之變數不會傳入此二節點上。流程圖在計算 t 時刻可利用水量  $AvI_t$  時所需要的  $S_t$  (t=1 時， $S_t = S_1$ )，則需由系統圖(上一時刻)水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )來提供。

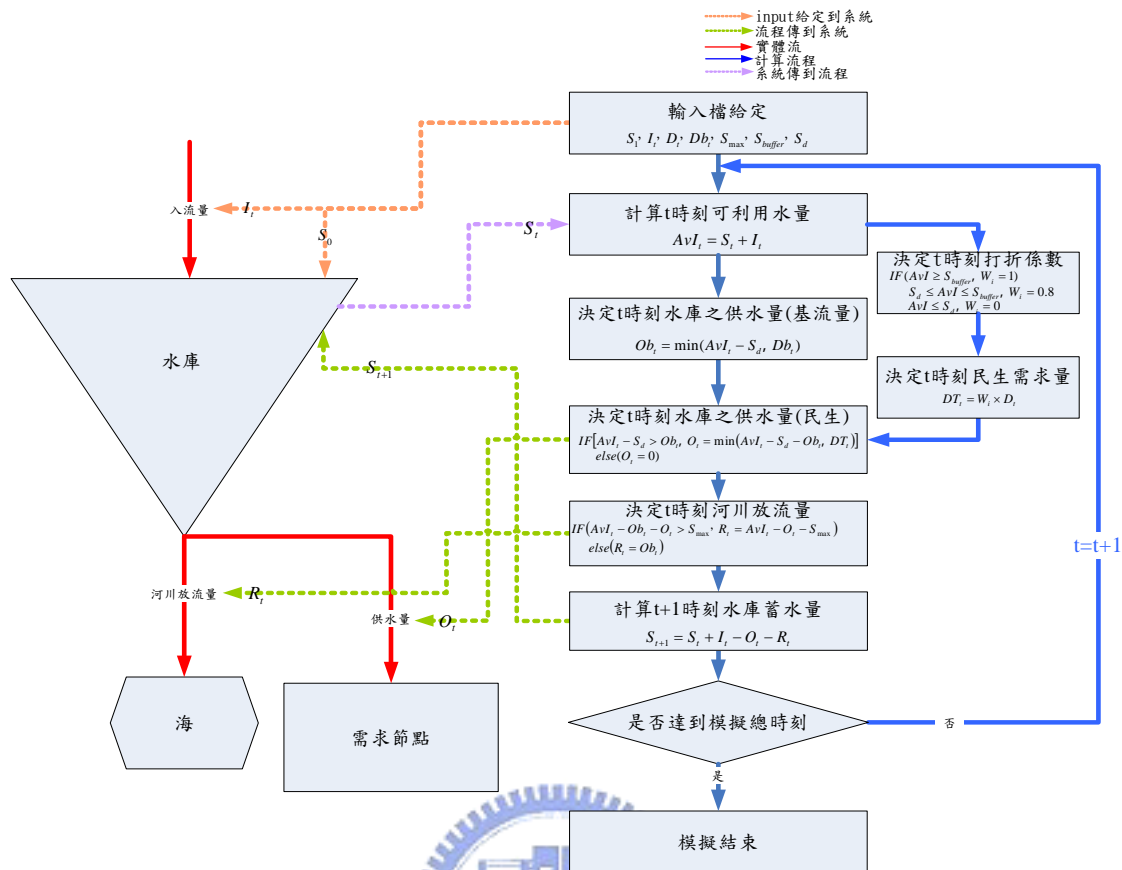


圖 4.4.2 案例四系統與流程圖初步結合示意圖

## 步驟二、釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)

其方法可參考案例一、案例二與案例三(圖 4.1.5、圖 4.2.3 與圖 4.3.3)，然而需求節點與海在此案例中為目的地(Sink)，故不以存量(Stock)來表示。修改後如圖 4.4.3 所示。

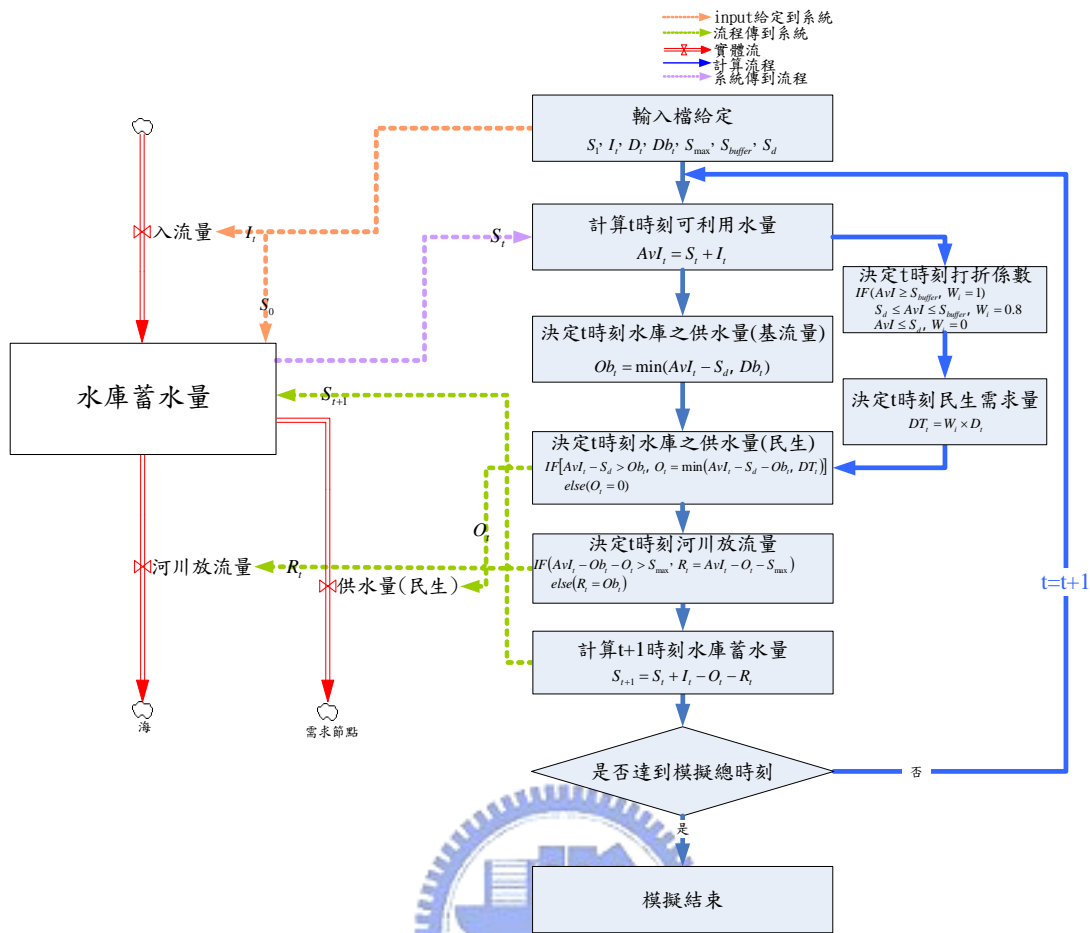


圖 4.4.3 案例四釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖

步驟三、再接著以系統為主體將流程圖整併進去(依照流程圖步驟依序拆解框架，並確認框架內的變數為實體變數或虛擬變數)

其拆解結合步驟可參考案例一圖 4.1.4~圖 4.1.14，拆解方法與前三個案例一樣，藉由流程圖步驟依序拆解流程框架，先將框架中之變數變成獨立變數，判斷系統圖上是否存在相同變數，再把變數移置系統圖相對應的位置上或保留成獨立變數，且由上一個框架傳遞此框架或此框架傳遞至下一個框架的箭線需保留且方向不可任意變動，以系統為主體將流程圖整併進去後之圖形如圖 4.4.4 所示。與案例三差異在多了決定時刻打折係數與決定時刻民生供水量兩個框架，且於計算流程中有三個框架[決定 t 時刻水庫之供水(基流量)、決定 t 時刻水庫之供水(民生)與決定 t 時刻河川放流量]之計算方程式有更動。

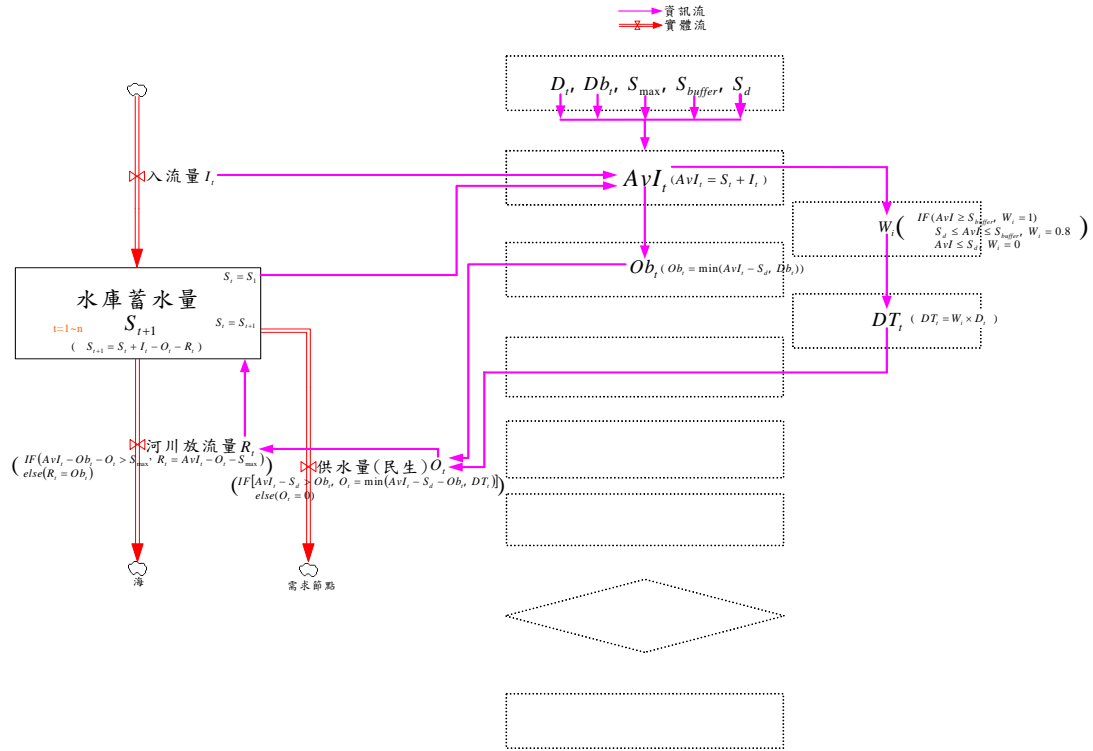


圖 4.4.4 案例四拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖

#### 步驟四、檢視各變數之間的傳遞行為是否正確

其檢視方式及修改圖可參考案例一圖 4.1.15 及圖 4.1.16。案例四的變數檢視圖如圖 4.4.5 所示，於案例中有七個方程式須確認變數的傳遞的關係，檢視完之修改圖如圖 4.4.6 所示。



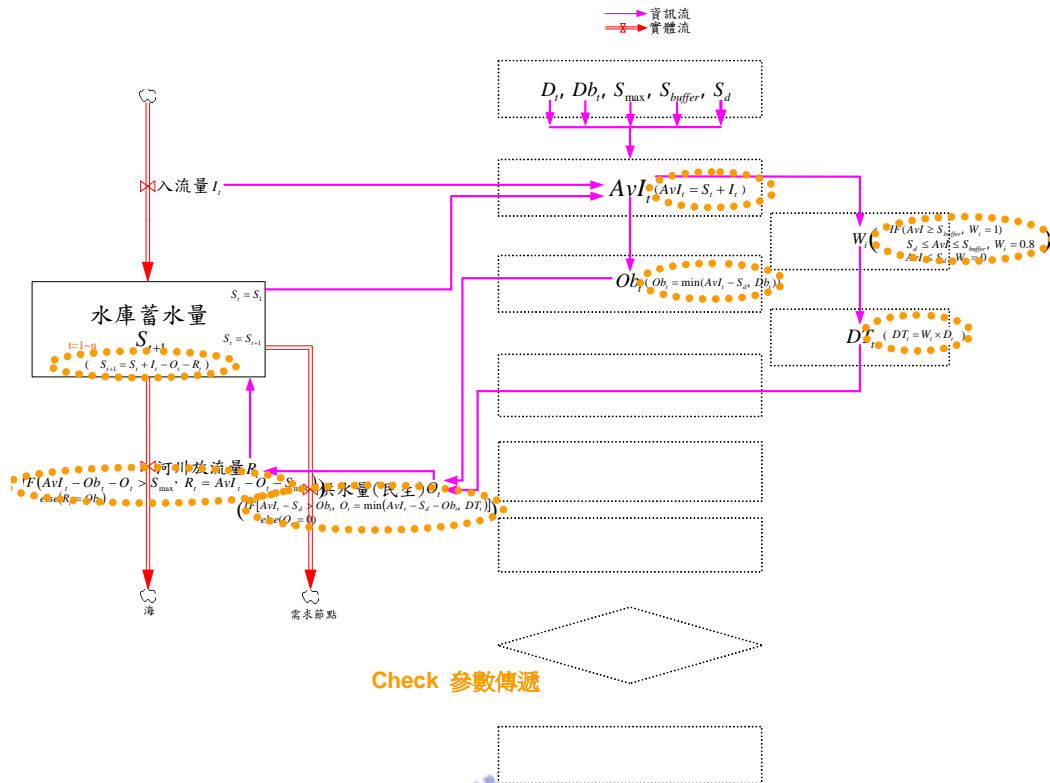


圖 4.4.5 案例四須確認的七個計算方程式示意圖

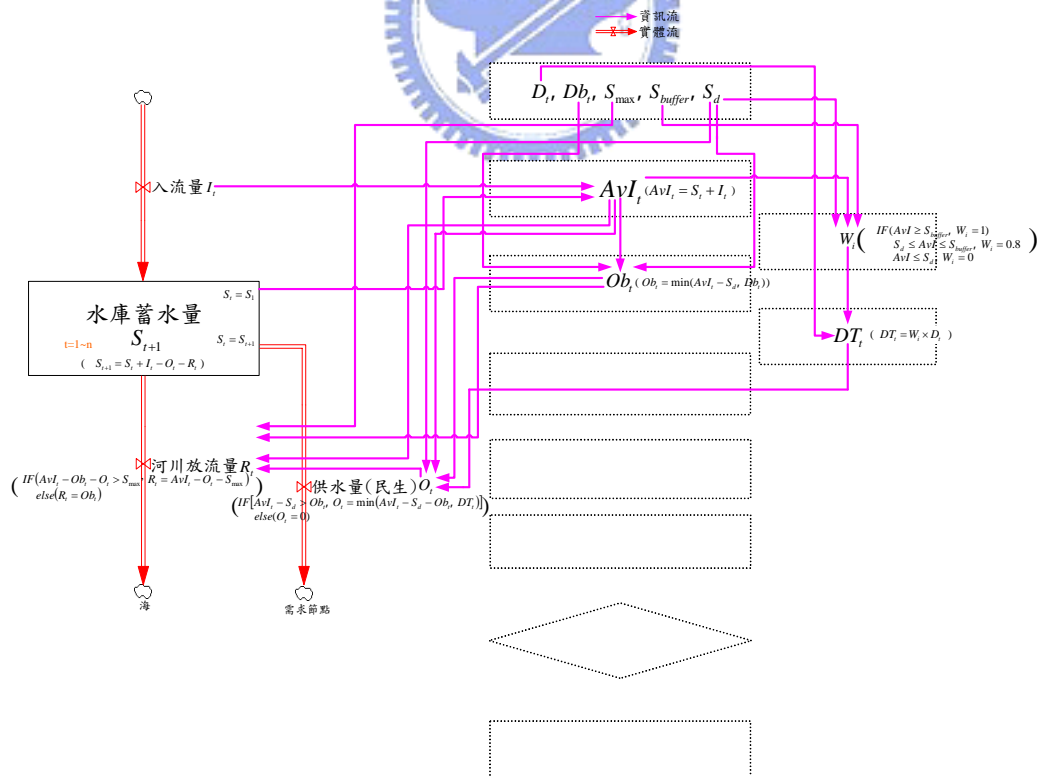


圖 4.4.6 案例四檢視變數傳遞之關係後之示意圖



## 4.5 案例五：兩水庫聯合營運供水之案例

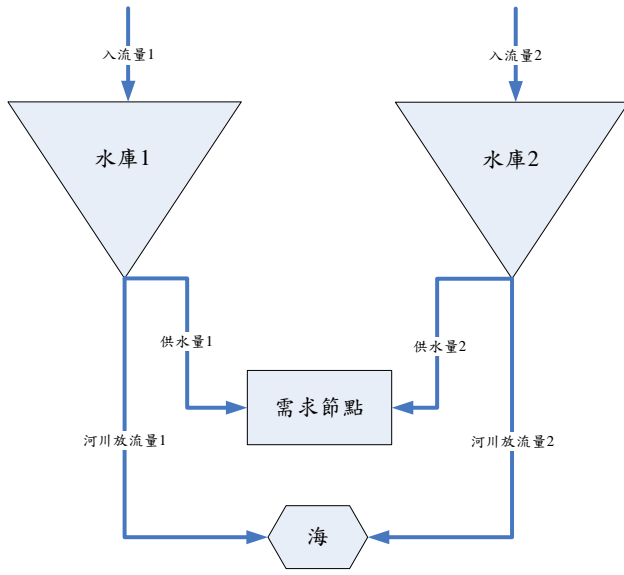
案例五為一水資源水庫調配問題中兩水庫聯合營運供給一需求量的問題，供水原則為由水庫 1 先供給，不足量再由水庫 2 供給，且兩水庫皆需考量下游之基流量與水庫溢流量(兩者加總起來稱之為河川放流量)，並各座水庫中加入操作規線。首先我們先對問題畫出系統圖與流程圖，如圖 4.5.1。圖 4.5.1 左方為系統圖，系統圖內的節點為水庫(1、2)，需求量與海為假設之虛擬節點，而箭線為水庫入流量(1、2)、水庫供水量(民生)[1、2]與水庫之河川放流量(1、2)，其中供水量(民生)[1、2]流入需求節點，河川放流量(1、2)流入海；圖 4.5.1 右方為水庫水量調配演算流程圖，流程圖內各變數與計算方式說明如表 4.5.1 所示：

表 4.5.1 案例五流程圖內各變數與計算方式說明表

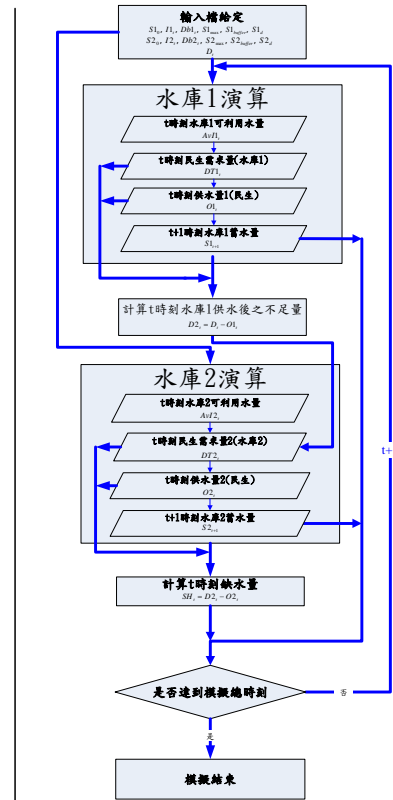
| 變數                                                                                                                                               | 名詞                                                                                                               | 方程式                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $n = 1, 2$ ,<br>$S\hat{n}_1$ , $I\hat{n}_t$ ,<br>$Db\hat{n}_t$ ,<br>$S\hat{n}_{max}$ ,<br>$S\hat{n}_{buffer}$ , $S\hat{n}_d$ ,<br>$D_t$ , $D2_t$ | 第 n 座水庫(1,2) , 初始水庫蓄水量(n 水庫), 入流量(n 水庫), 基流量(n 水庫), 水庫庫容(n 水庫), 水庫下限體積(n 水庫), 水庫呆水位體積(n 水庫) , 需求量, 不足量(水庫 1 供水後) | —                                                            |
| $AvI\hat{n}_t$                                                                                                                                   | t 時刻之可利用水量                                                                                                       | $AvI\hat{n}_t = I\hat{n}_t + S\hat{n}_t$                     |
| $Ob\hat{n}_t$                                                                                                                                    | t 時刻之供水量(基流量)                                                                                                    | $Ob\hat{n}_t = \min(AvI\hat{n}_t - S\hat{n}_d, Db\hat{n}_t)$ |

|                  |                          |                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $O\hat{n}_t$     | t 時刻之供水量(民生)             | $O\hat{n}_t = \min(Av\hat{I}n_t - S\hat{n}_d - Ob\hat{n}_t, DT\hat{n}_t)$ , $Av\hat{I}n_t - S\hat{n}_d > Ob\hat{n}_t$<br>$O\hat{n}_t = 0$ , $Av\hat{I}n_t - S\hat{n}_d \leq Ob\hat{n}_t$                                |
| $R\hat{n}_t$     | t 時刻之河川放流量               | $R\hat{n}_t = Av\hat{I}n_t - O\hat{n}_t - S\hat{n}_{\max}$ , $Av\hat{I}n_t - Ob\hat{n}_t - O\hat{n}_t > S\hat{n}_{\max}$<br>$R\hat{n}_t = Ob\hat{n}_t$ , $Av\hat{I}n_t - Ob\hat{n}_t - O\hat{n}_t \leq S\hat{n}_{\max}$ |
| $S\hat{n}_{t+1}$ | t+1 時刻之水庫蓄水量             | $S\hat{n}_{t+1} = S\hat{n}_t + \hat{I}n_t - O\hat{n}_t - R\hat{n}_t$                                                                                                                                                    |
| $W\hat{n}_i$     | 打折係數                     | $W\hat{n}_i = 1$ , $Av\hat{I}n_t > S\hat{n}_{buffer}$<br>$W\hat{n}_i = 0.8$ , $S\hat{n}_{buffer} \geq Av\hat{I}n_t \geq S\hat{n}_d$<br>$W\hat{n}_i = 0$ , $S\hat{n}_d \geq Av\hat{I}n_t$                                |
| $DT\hat{n}_t$    | t 時刻修正之民生需求<br>量(水庫 1、2) | $DT1_t = W1_i \times D_t$<br>$DT2_t = W2_i \times D2_t$                                                                                                                                                                 |

整體流程演算邏輯如圖 4.5.1 右方所示，首先為給定輸入檔(已知值輸入)，利用輸入檔來依序計算出水庫 1 的 t 時刻可利用水量、t 時刻供水量(基流量)、t 時刻供水量(民生)、t 時刻河川放流量以及 t+1 時刻水庫的蓄水量，如圖 4.5.2 左方水庫 1 演算流程圖所示，再由需求量與供水量(水庫 1)計算出不足量提供為水庫 2 的需求量，依此計算水庫 2 的 t 時刻可利用水量、t 時刻供水量(基流量)、t 時刻供水量(民生)、t 時刻河川放流量以及 t+1 時刻水庫的蓄水量，如圖 4.5.2 右方水庫 2 演算流程圖所示，再由水庫 2 的需求量與供水量計算出缺水量。



系統圖



整體流程圖

圖 4.5.1 案例五之系統圖及流程圖示意圖

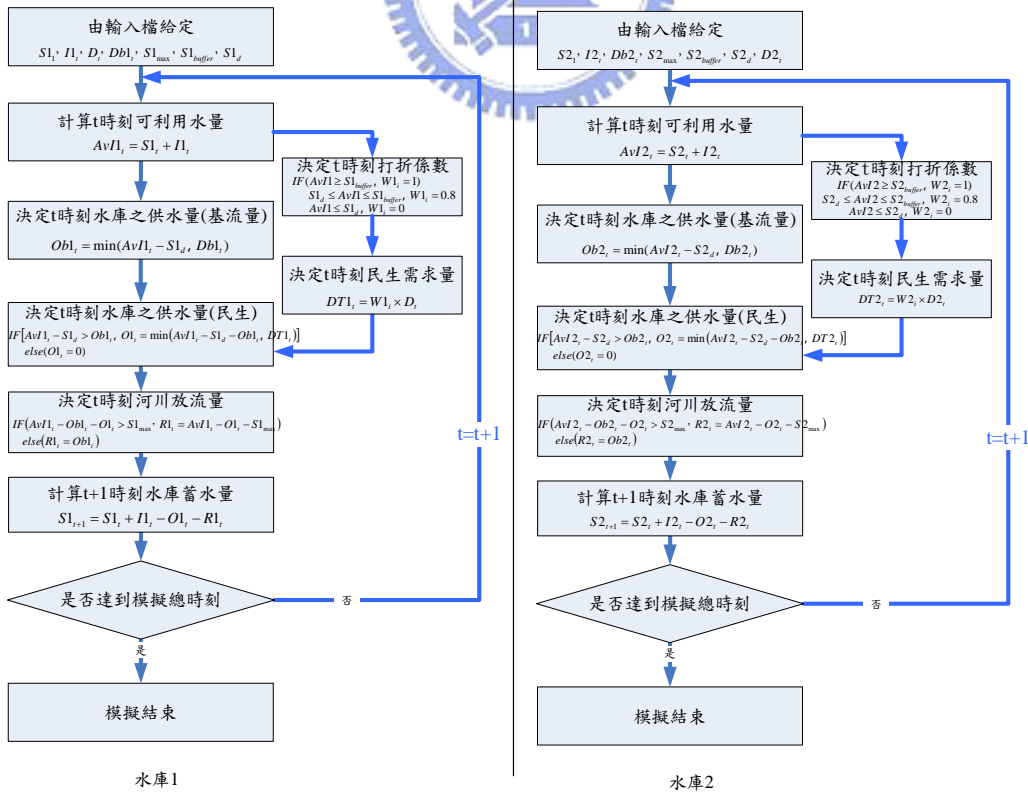


圖 4.5.2 案例五之水庫 1 與水庫 2 演算流程圖

步驟一、利用連接線初步將系統圖與流程圖串起：

此步驟可參考案例一、案例二、案例三與案例四的串接方式，其連接圖如圖 4.5.3 所示，水庫 1 或水庫 2 的入流量、水庫蓄水量、供水量與河川放流量皆會由流程圖傳入系統圖，或由流程圖傳入系統圖。圖 4.5.4 與圖 4.5.5 分別為水庫 1 與水庫 2 的初步結合圖，其中系統圖的未知變數  $I_t$ 、 $S_{t+1}$ 、 $O_t$  及  $R_t$  可由流程圖上的相關計算流程來求得並傳入，需求節點與海是實際水流流到的地方，故節點之行為不考量，所以將此二節點假設成虛擬節點，因此流程圖之變數不會傳入此二節點上。流程圖在計算  $t$  時刻可利用水量  $AvI_t$  時所需要的  $S_t$  ( $t=1$  時， $S_t = S_0$ )，則需由系統圖(上一時刻)水庫蓄水量( $S_{t+1}$ )來提供。

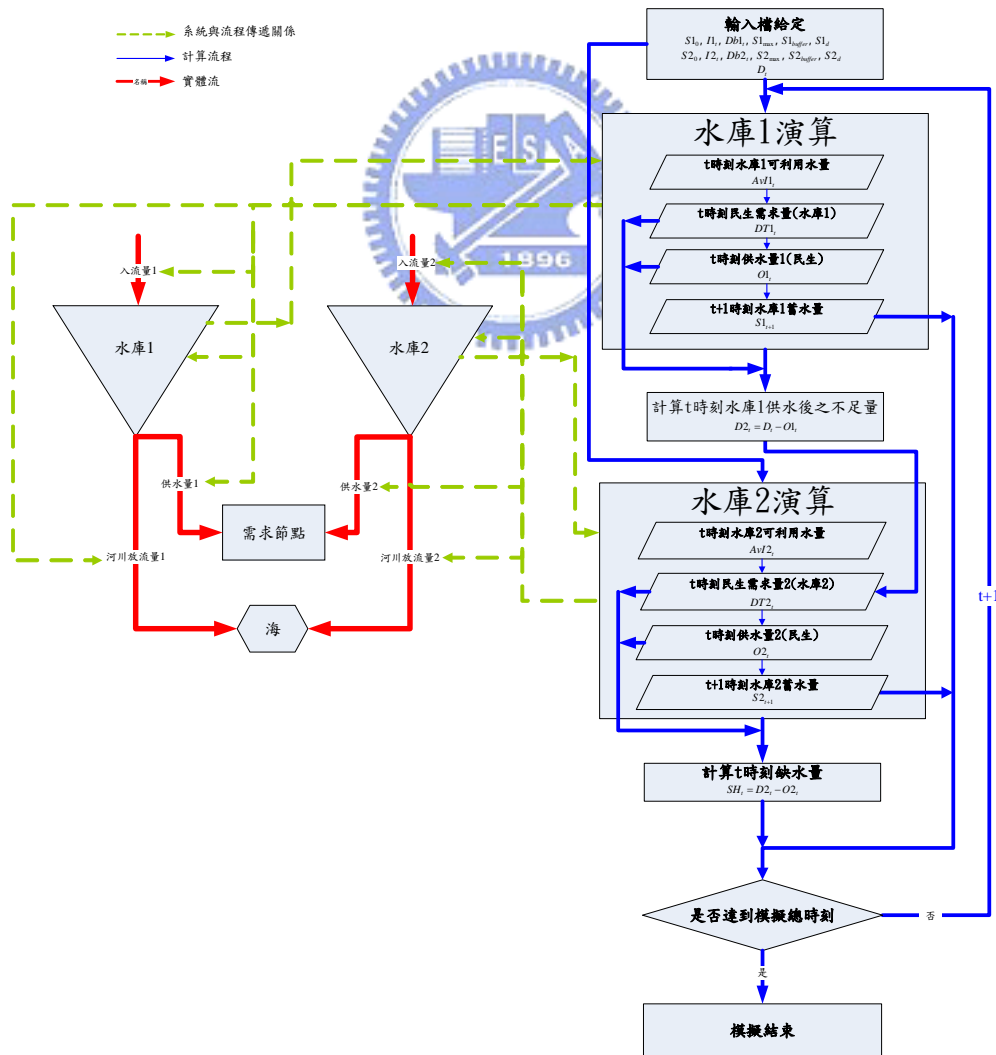


圖 4.5.3 案例五系統與流程圖初步結合示意圖

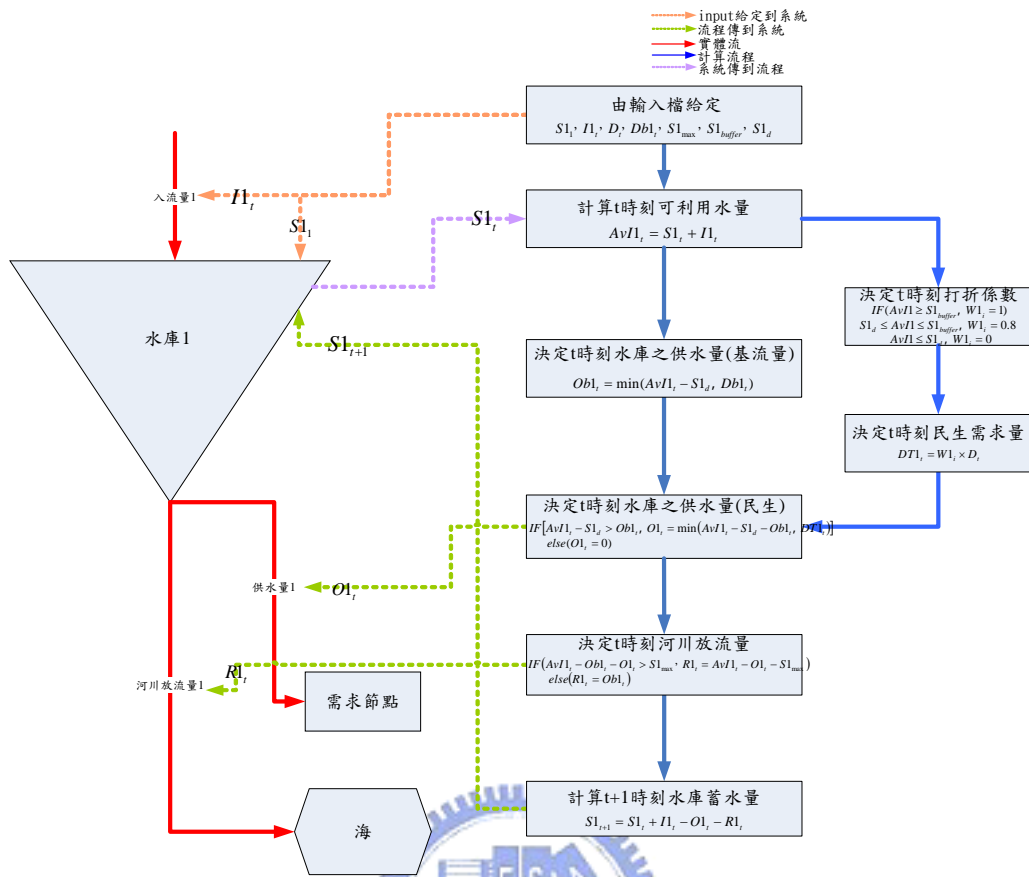


圖 4.5.4 案例五水庫 1 系統與流程圖初步結合示意圖

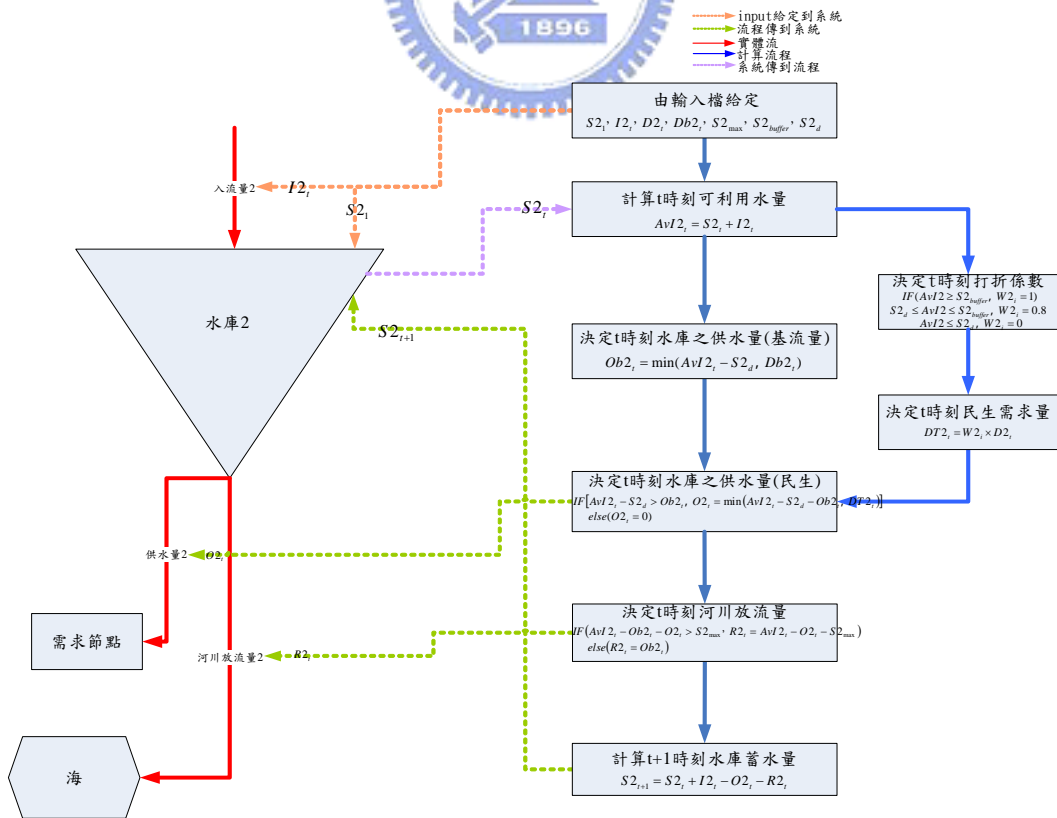


圖 4.5.5 案例五水庫 2 系統與流程圖初步結合示意圖

## 步驟二、釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)

其方法可參考案例一、案例二、案例三與案例四(圖 4.1.5、圖 4.2.3、圖 4.3.3 與圖 4.4.3)，然而需求節點與海在此案例中為目的地 (Sink)，故不以存量(Stock)來表示。修改後水庫 1 與水庫 2 的釐清實體流與資訊流之修改圖如圖 4.5.6 與圖 4.5.7 所示。

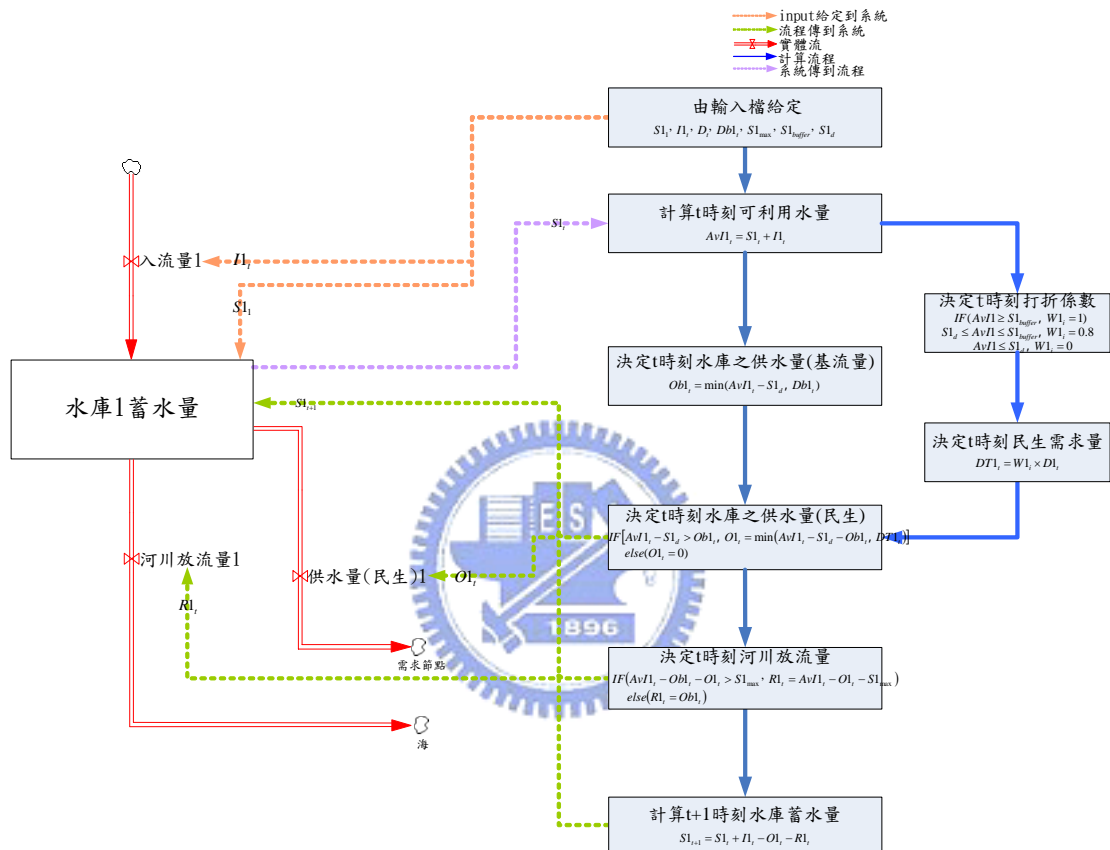


圖 4.5.6 案例五水庫 1 釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖



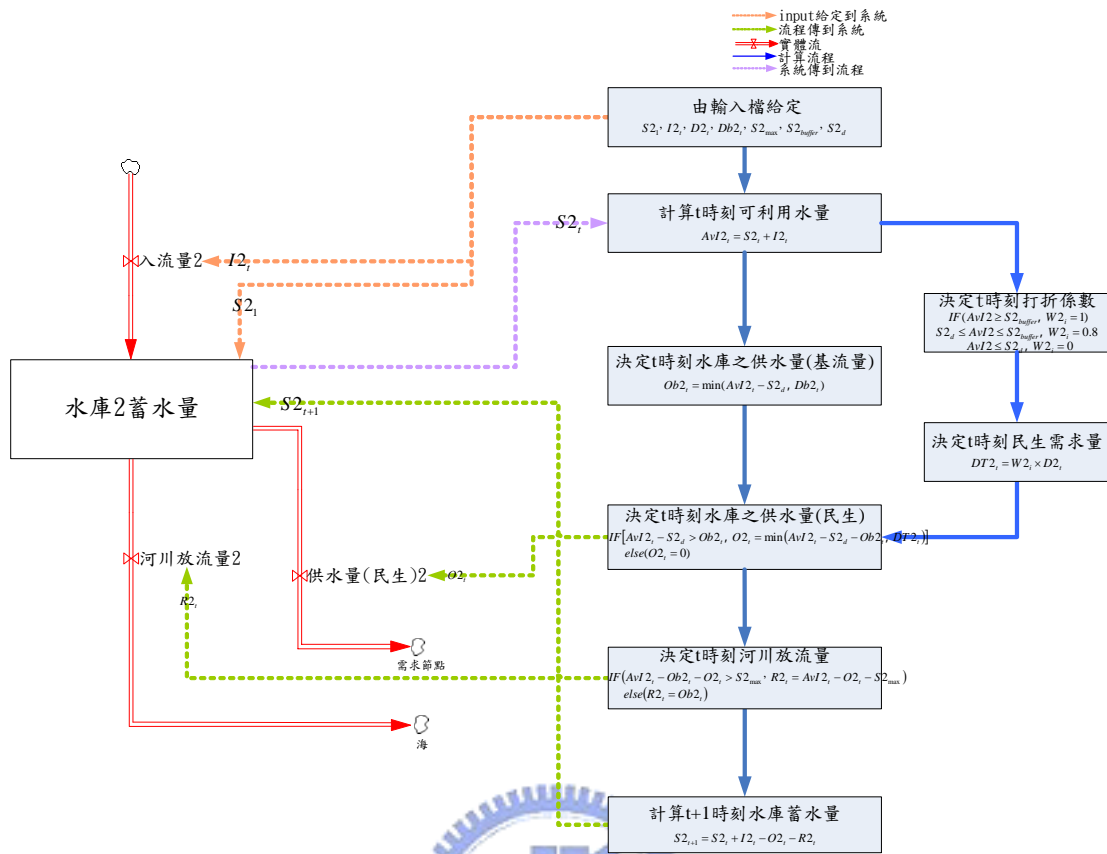


圖 4.5.7 案例五水庫 2 釐清實體流與資訊流(利用 Stock 與 Flow 修改)之修改圖

**步驟三、再接著以系統為主體將流程圖整併進去(依照流程圖步驟依序拆解框架，並確認框架內的變數為實體變數或虛擬變數)**

其拆解結合步驟可參考案例一圖 4.1.4~圖 4.1.14，拆解方法與前四個案例一樣，先將其便獨立變數，再判斷系統圖是否存在相同變數，將此變數移置系統圖相對應的位置上或將變成獨立變數，且由上一個框架傳遞此框架或此框架傳遞至下一個框架的箭線需保留且方向不可任意變動，以系統為主體將流程圖整併進去後之圖形，在此案例中先對兩水庫作拆解合併，在將其整併於整體系統圖與流程圖中，如圖 4.5.8 為水庫 1 之整併後之修改圖，圖 4.5.9 為水庫 2 之整併後之修改圖，圖 4.5.10 為整體之整併後之修改圖。

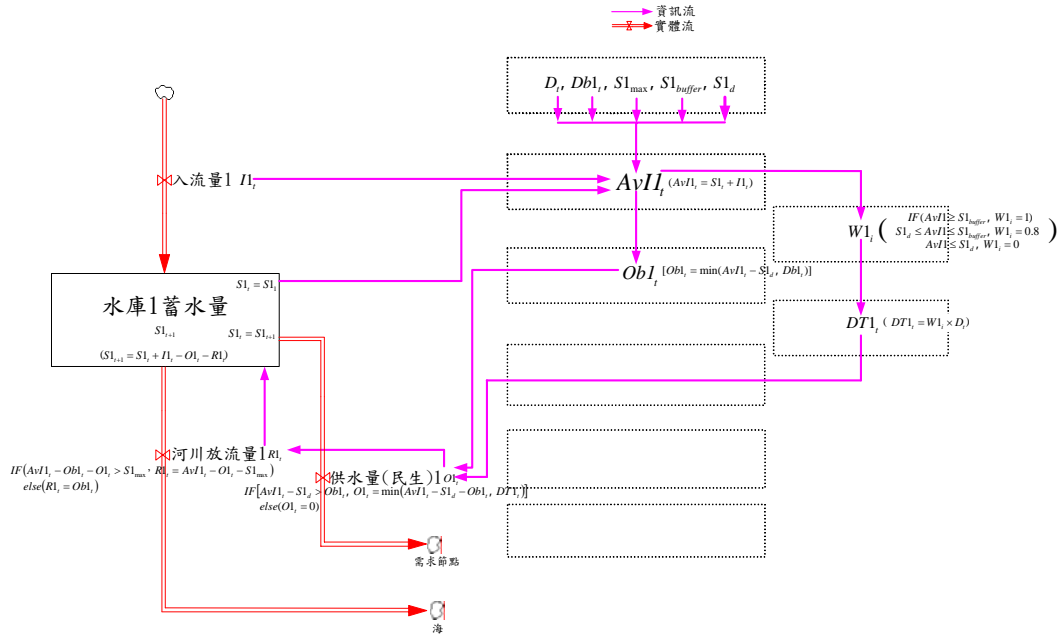


圖 4.5.8 案例五水庫 1 拆解完框架之修改圖

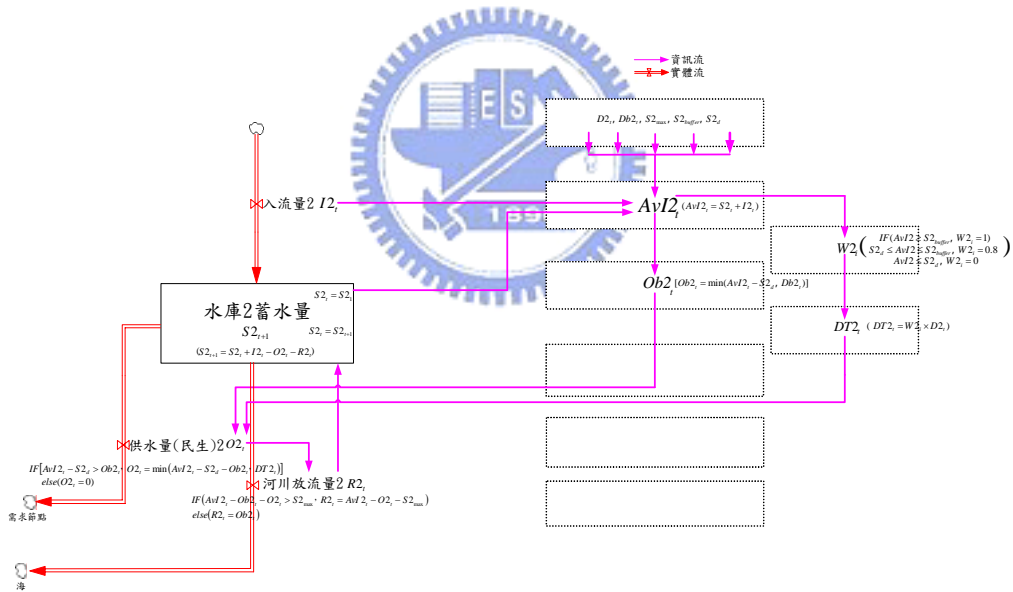


圖 4.5.9 案例五水庫 2 拆解完框架之修改圖

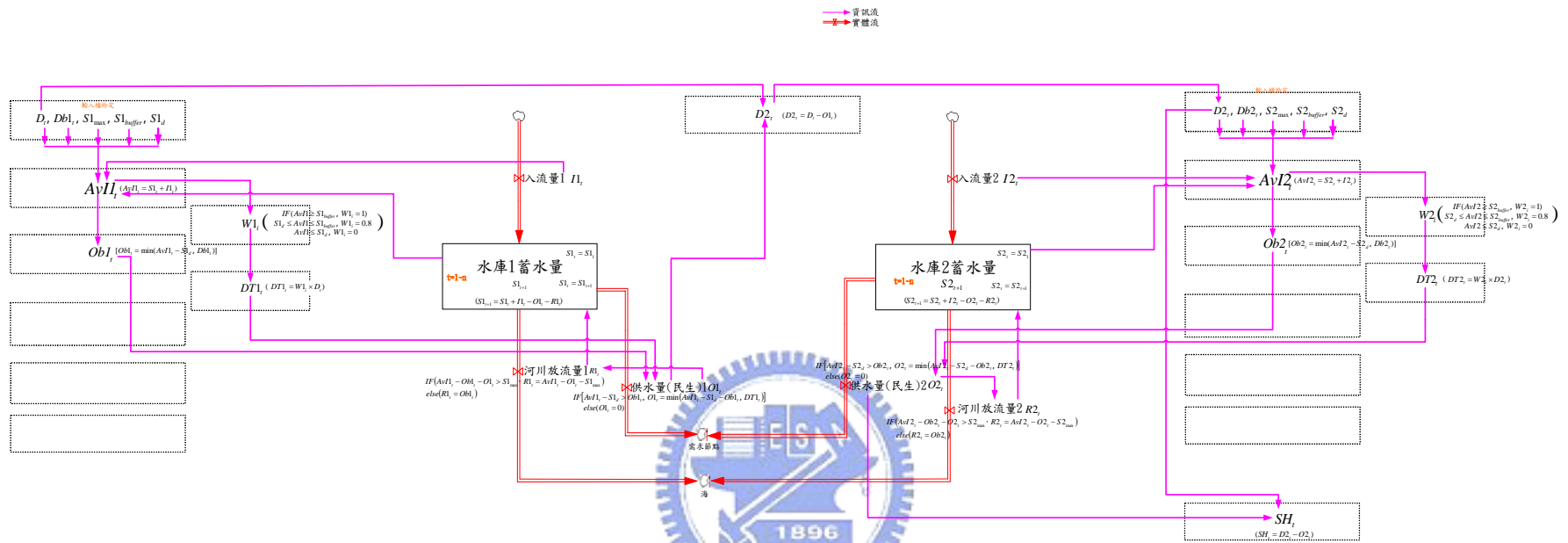


圖 4.5.10、案例五整體拆解完"是否達到模擬總時刻"及"模擬結束"的框架之修改圖

#### 步驟四、檢視各變數之間的傳遞行為是否正確

其檢視方式及修改圖可參考案例一圖 4.1.15 及圖 4.1.16。在根據案例一步驟四中的方法(如圖 4.1.17~圖 4.1.20)得到案例五的因果回饋圖，如圖 4.5.11 所示。

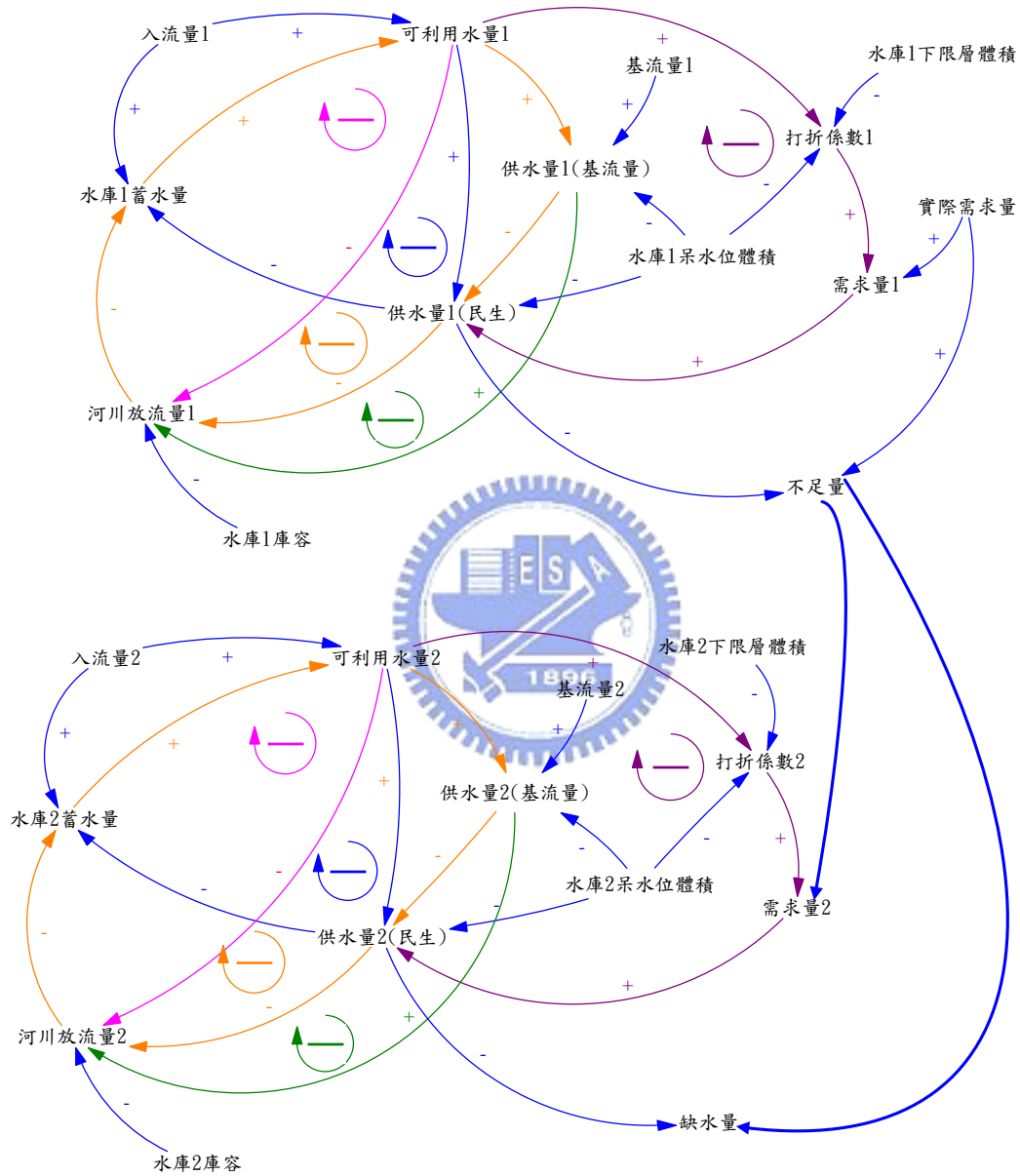


圖 4.5.11 案例五因果回饋圖

## 第五章 因果回饋分析

因果回饋圖的繪製是系統動力學中主要的解題步驟，尤其因果網路中的反回饋迴路(反回饋就是一個因素經過一連串的因果鏈作用後，再反轉回來影響到它本身的過程)又是其中最重要的分析課題。

何謂因果關係與因果回饋關係。因果關係為定義兩個變數間之關係為正向或負向。正向即為一方數量增加時，另一方數量亦會同時增加;或一方數量減少時，另一方數量亦會同時減少。負向即為一方數量增加時，另一方數量亦會同時減少;或一方數量減少時，另一方數量亦會同時增加。變數之間以因果方式連接，可以用箭線(Arrow)來表示，箭頭原點表示影響變數，箭頭終點表示被影響的變數。若兩者為正向變動關係，則以『+』號表示。若兩者為負向變動關係，則以『-』號表示，如圖 5.1 所示。當變數間的影響關係形成一封閉的環路，亦即某一變數同時為影響變數，也是被影響變數時，則形成一回饋環路。而回饋環路的性質則需由環路中的『+』、『-』號的總合決定，當環路中全部為『+』號或『-』總數為偶數時為『正回饋環』(Positive Feedback Loop)，如圖 5.2 所示。當環路中『-』號總數為奇數時為『負回饋環』(Negative Feedback Loop)，如圖 5.3 所示。正回饋環的特性是，環路內的系統狀態隨著時間會呈現持續性成長或持續性衰退，亦即數學上所謂的「發散」。負回饋環的特性是，環路的系統狀態隨著時間呈現漸近線型態的成長或衰退，最後趨近於目標，亦即數學上所謂的「收斂」。由此可知，藉由因果回饋圖，我們可以清楚瞭解各變數的因果關係與作用方向，並瞭解系統結構的特性。

影響變數  $\xrightarrow{+}$  被影響變數

影響變數  $\xrightarrow{-}$  被影響變數

圖 5.1 因果關係示意圖

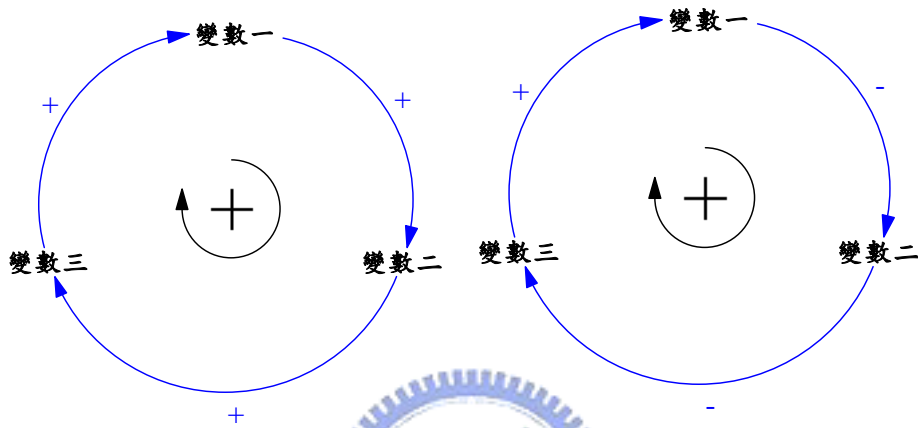


圖 5.2 回饋環路(正回饋環)

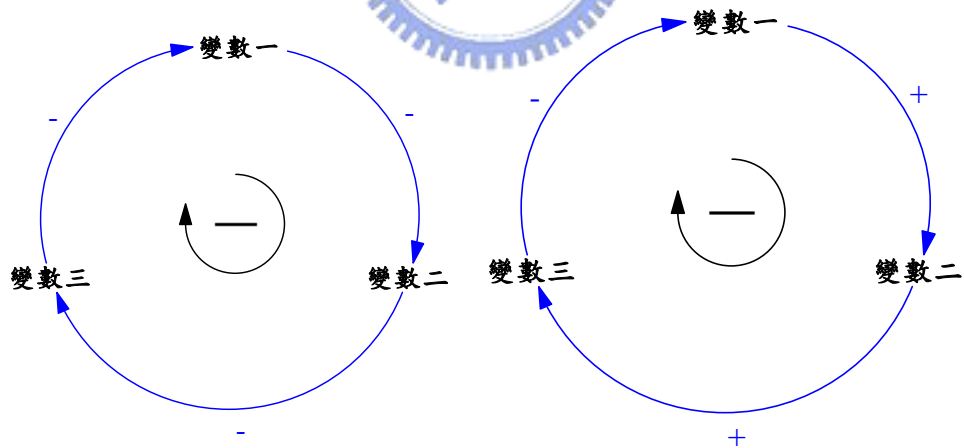


圖 5.3 回饋環路(負回饋環)

然而在許多問題中因果網路中的反回饋行為並非一成不變，如：某些變數在超過其臨界值時，經常會出現回饋環消失或回饋環特性改變的現象，而這些情況最常發生於變數中有判斷行為存在時。本研究

針對變數中有判斷行為發生時作探討，並分析其因果回饋的結構變化，最後利用五個水資源水庫水量調配系統動力模型的各種情模擬的結果來分析說明，其案例分別為：(1)單水庫供水之案例；(2)單水庫供水加入需求量考量之案例；(3)單水庫供水加入需求量及河川放流量考量之案例；(4)單水庫供水加入需求量、河川放流量及水庫操作上加入規線操作考量之案例；(5)兩水庫聯合營運供水時之案例。



## 5.1 案例一：單水庫供水之案例

圖 5.1.1 為單水庫供水之因果回饋圖，圖形代表的意義為：當入流量愈多時則水庫蓄水量也會隨之越多，入流量或水庫蓄水量愈多時則可利用水量也會隨之越多，可利用水量愈多或供水係數越大則供水量也會隨之越多，但是供水量越大則會造成水庫蓄水量隨之越少。其中可利用水量、供水量與水庫蓄水量會構成一個封閉的回饋迴路，若回饋迴路內所有負號“-”的個數為雙數或完全沒有時，即為正回饋迴路，正回饋迴路表示系統的狀態變數其數值會隨時間的前進而不斷上升或下降；反之則為負回饋迴路，負回饋迴路表示系統的狀態變數其數值會隨時間的前進而趨近於系統的目標變數或限制變數。藉由這樣的定義，我們可以觀察出可利用水量、供水量與水庫蓄水量所構成的是是一個負回饋迴路(負號“-”的個數為奇數)，表示水庫蓄水量(狀態變數)會隨著時間的前進逐漸趨近至一個定值。通常組成回饋迴路的變數我們稱之為內部變數(可利用水量、供水量與水庫蓄水量)，而迴路外的變數則稱作外部變數(入流量與供水係數)。

水庫各時刻蓄水量變化問題的情境模擬假設條件與相關方程式如表 5.1.1 所示，其中水庫初始蓄水量假設為已知值( $S_1=50$ )，入流量與供水係數均設定為不隨時變的常數，接著我們藉由入流量與供水係數這兩個外部變數的數值調動來觀察水庫各時刻蓄水量的變化趨勢，如圖 5.1.2(調動入流量)與圖 5.1.3(調動供水係數)所示。



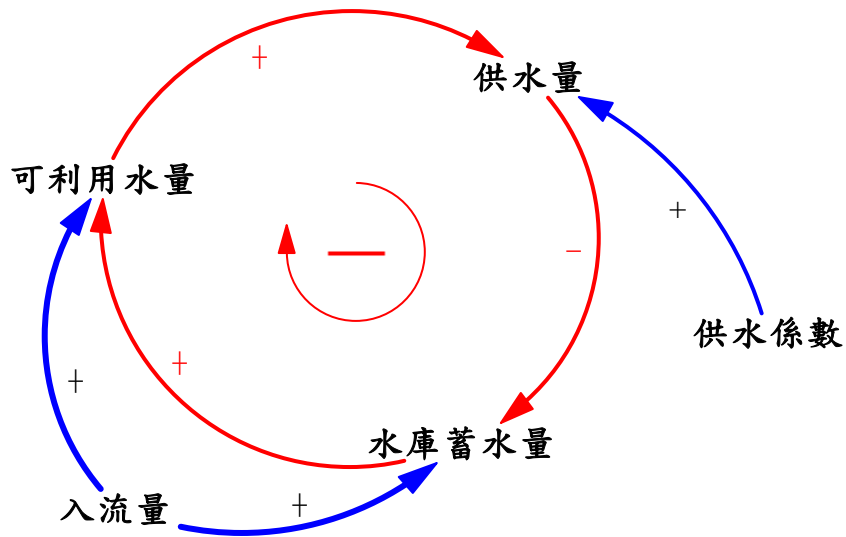


圖 5.1.1 案例一因果回饋圖

表 5.1.1 案例一模擬條件與變數之方程式之列表

| 變數        | 名詞           | 模擬假設條件與變數之方程式                     |
|-----------|--------------|-----------------------------------|
| $S_1$     | 初始水庫蓄水量      | 50                                |
| $I_t$     | 入流量          | constant                          |
| $C_t$     | 供水係數         | constant                          |
| $AvI_t$   | t 時刻之可利用水量   | $AvI_t = I_t + S_t$               |
| $O_t$     | t 時刻之供水量     | $O_t = C \times AvI_t$            |
| $S_{t+1}$ | t+1 時刻之水庫蓄水量 | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$ |

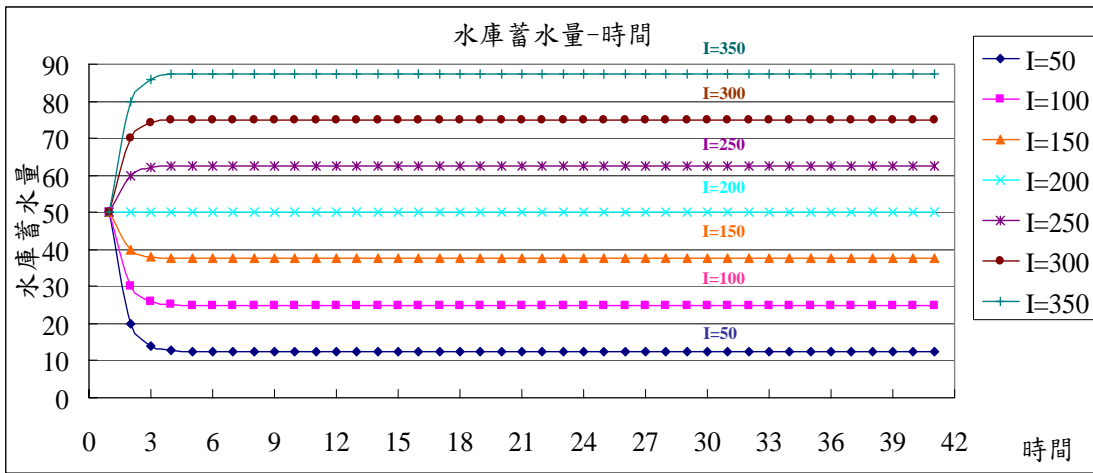


圖 5.1.2 案例一(調動入流量)模擬結果圖

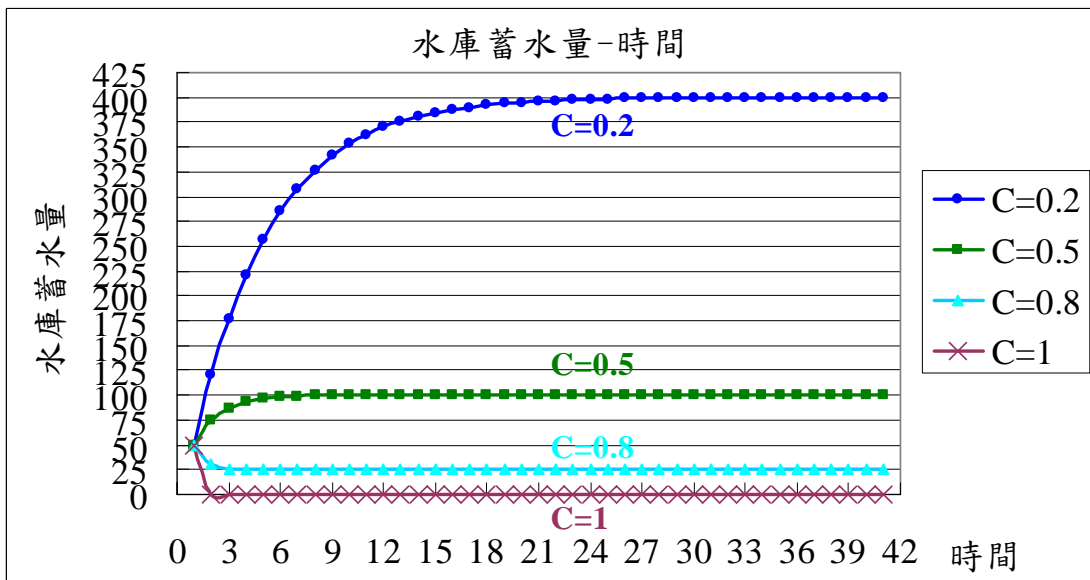


圖 5.1.3 案例一(調動供水係數)模擬結果圖

## 5.2 案例二：單水庫供水加入需求量考量之案例

圖 5.2.1 為單水庫供水加入需求量考量之因果回饋圖，圖形中與案例一不同處在需求量此變數，它屬於外部變數，且當需求量越大時則供水量也會隨之越多。但是需求量的加入將使供水量的決定出現邏輯判斷的現象，若每個時刻可利用水量均小於需求量，則供水量將完全等於可利用水量，此時可利用水量、供水量與水庫蓄水量將構成一個封閉的負回饋迴路，如圖 5.2.2，此迴路代表水庫蓄水量（狀態變數）會隨著時間的前進，而漸漸趨近於某一個定值；若每個時刻可利用水量均大於需求量，則供水量將完全等於需求量，則上述的負回饋迴路將不存在，如圖 5.2.3。

加入需求量考量的水庫蓄水量問題之情境模擬假設條件與相關方程式如表 5.2.1 所示。其中初始水庫蓄水量假設為已知值( $S_1=500$ )，入流量與需求量均設定為不隨時變的常數，接著我們藉由入流量與需求量這兩個外部變數的數值調動來觀察庫蓄水量的變化趨勢。模擬情境一：改變入流量(假設為入流量每時刻都為 constant)，其模擬結果如圖 5.2.4 所示，圖中以 500 為介，水庫蓄水量值小於 500 為圖 5.2.2 之回饋圖；水庫蓄水量值大於 500 則為圖 5.2.3 之回饋圖無回饋圖行為存在；情境二：改變入流量(假設入流量為 sin 函數)，其入流量與模擬結果如圖 5.2.5 所示，上方為入流量變化圖，下方為情境模擬圖，一樣水庫蓄水量以值 500 為介，500 以下為負回饋之行為，500 以上則無回饋行為；情境三：改變入流量(假設入流量為 random 函數，random 一組變化)，其入流量與模擬結果如圖 5.2.6 所示，上方為入流量變化圖，下方為情境模擬圖，其行為與情境二相同，水庫蓄水量值 500 以下為一收斂行為，以上為發散行為；情境四：改變入流量(假設入流量為 random 函數，random 多組變化)，其入流量與模擬結果如

圖 5.2.7~圖 5.2.10(入流量漸增)所示，上方為入流量變化圖，下方為情境模擬圖，其行為與情境二與三相同，水庫蓄水量值 500 以下為一收斂行為，以上為發散行為。由以上所模擬的結果來修正因果回饋圖，在變數的計算方程式如有判斷式的時候，則利用虛線來表示，如圖 5.2.11 所示。

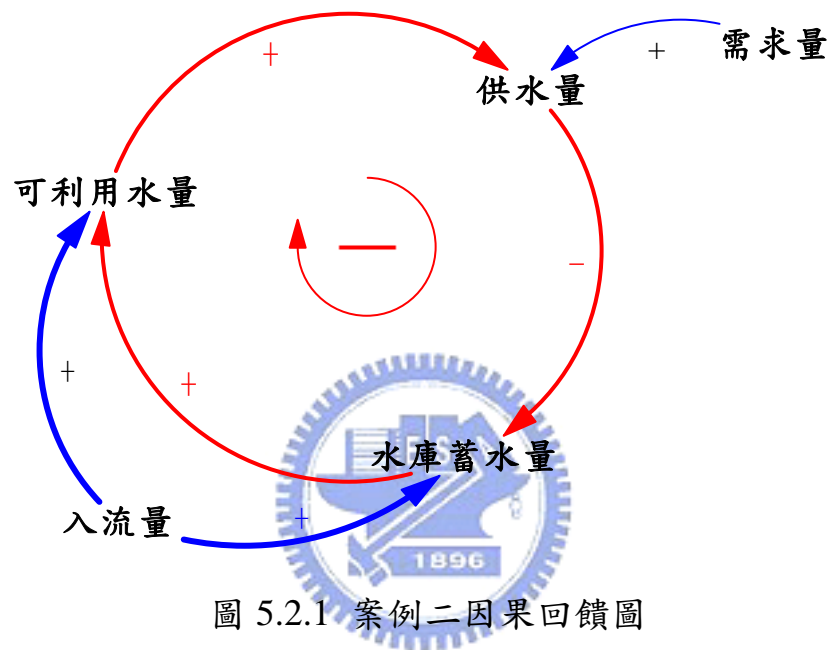


圖 5.2.1 案例二因果回饋圖

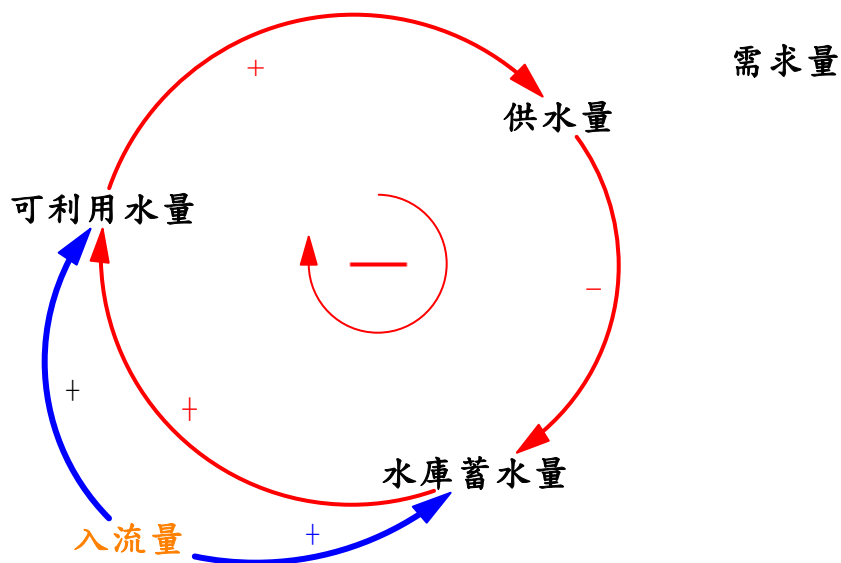


圖 5.2.2 案例二因果回饋圖(可用水量小於需求量)

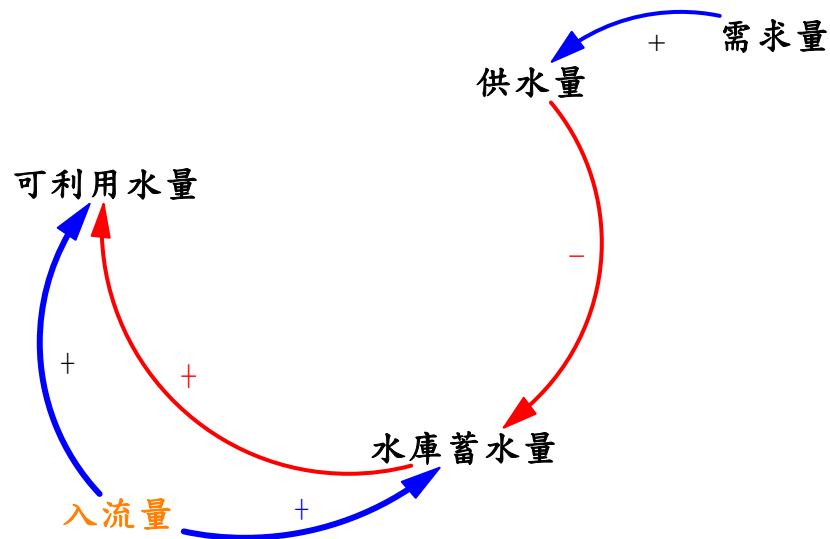


圖 5.2.3 案例二因果回饋圖(可用水量大於需求量)

表 5.2.1 案例二模擬條件與變數之方程式之列表

| 變數        | 名詞           | 模擬假設條件與變數之方程式                     |
|-----------|--------------|-----------------------------------|
| $S_0$     | 初始水庫蓄水量      | 500                               |
| $I_t$     | 入流量          | constant or random                |
| $D_{t_t}$ | 需求量          | constant                          |
| $AvI_t$   | t 時刻之可用水量    | $AvI_t = I_t + S_t$               |
| $O_t$     | t 時刻之供水量     | $O_t = \min(AvI_t, D_t)$          |
| $S_{t+1}$ | t+1 時刻之水庫蓄水量 | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$ |

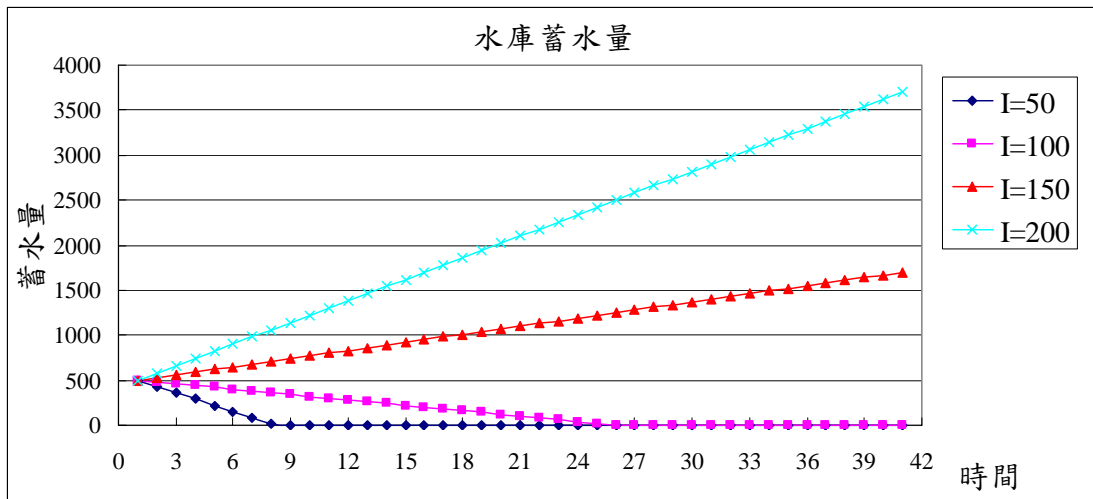


圖 5.2.4 案例二情境一(入流量=constant)模擬結果圖

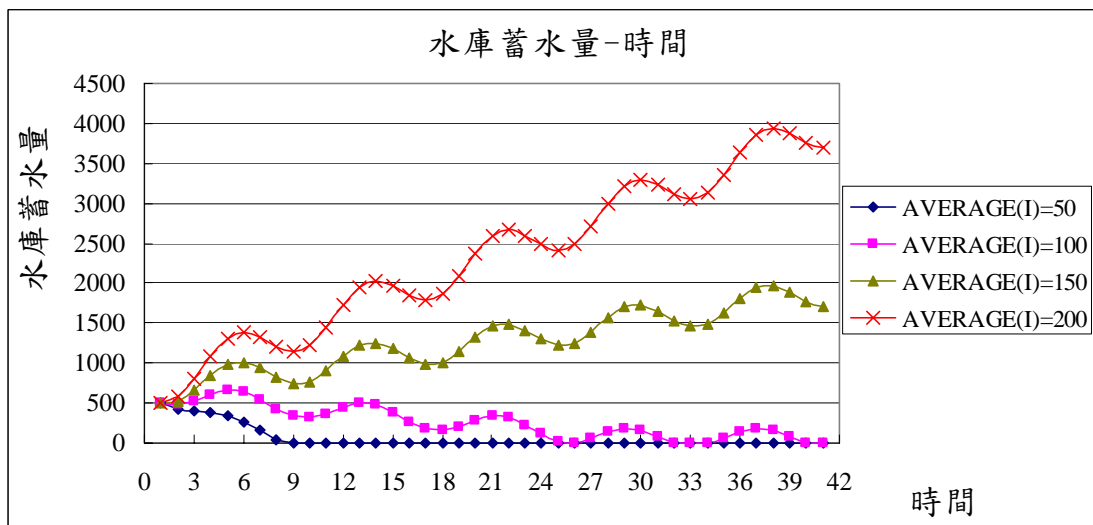
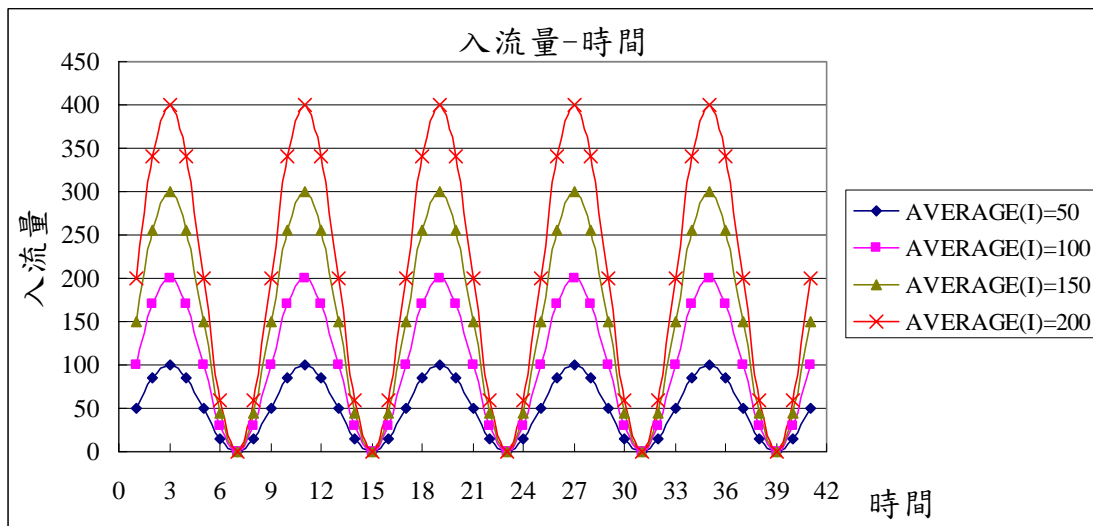


圖 5.2.5 案例二情境二(入流量=sin 函數)模擬結果圖

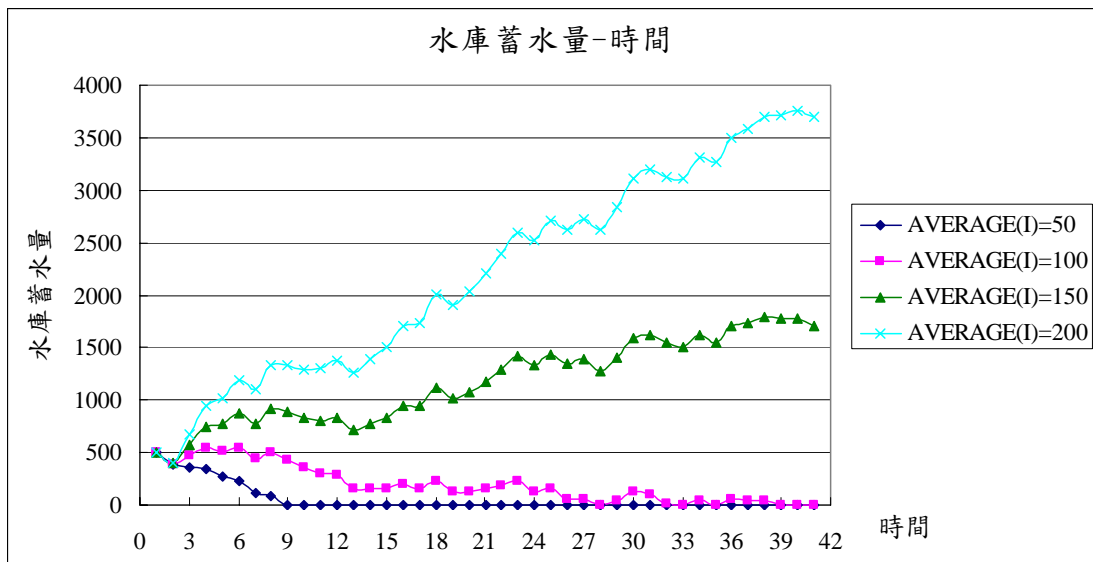
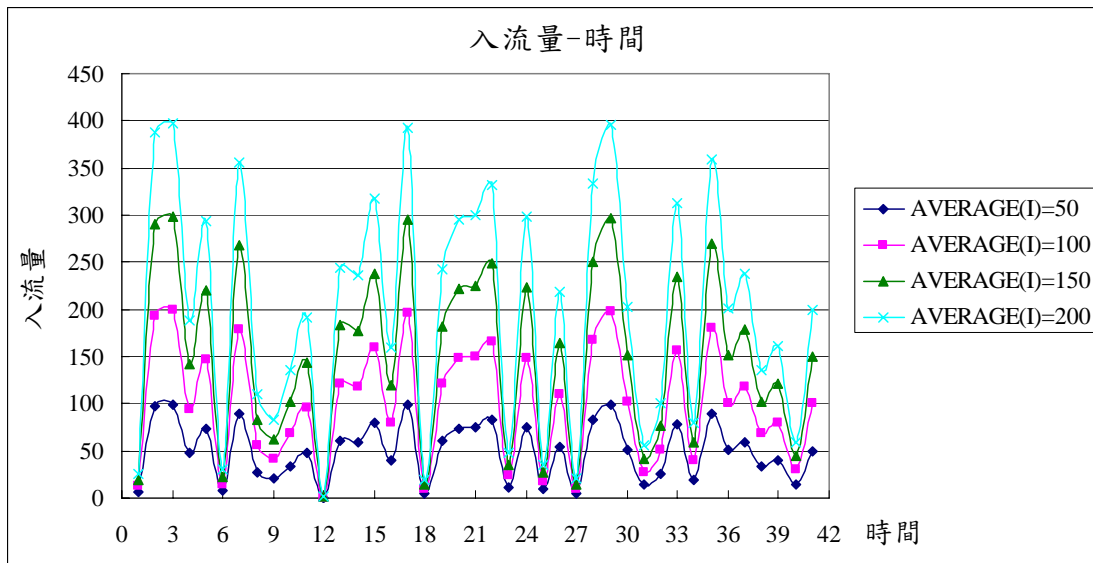


圖 5.2.6 案例二情境三(入流量=random 函數，random 一組變化)模擬結果圖

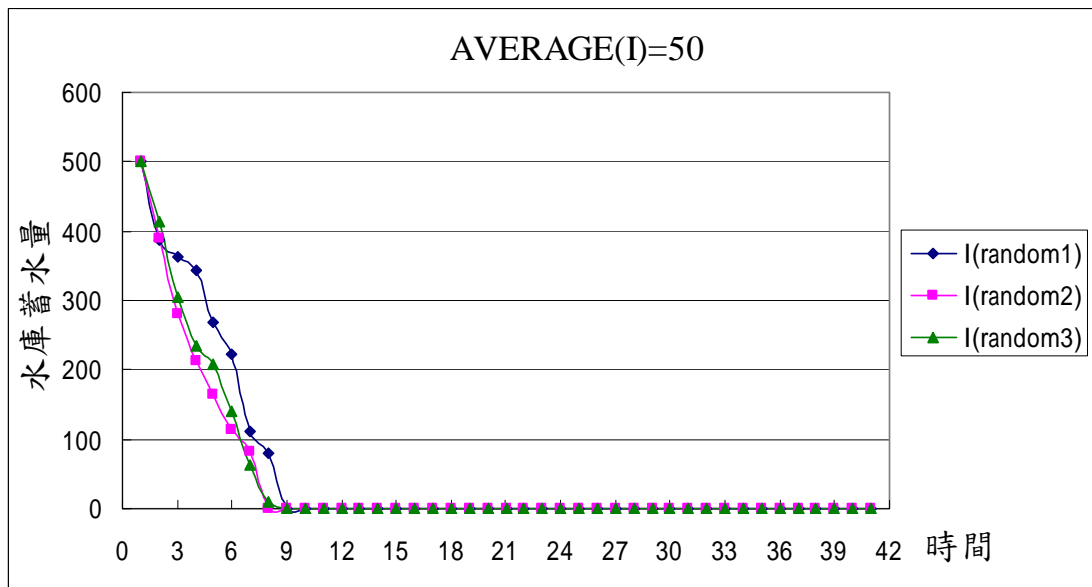
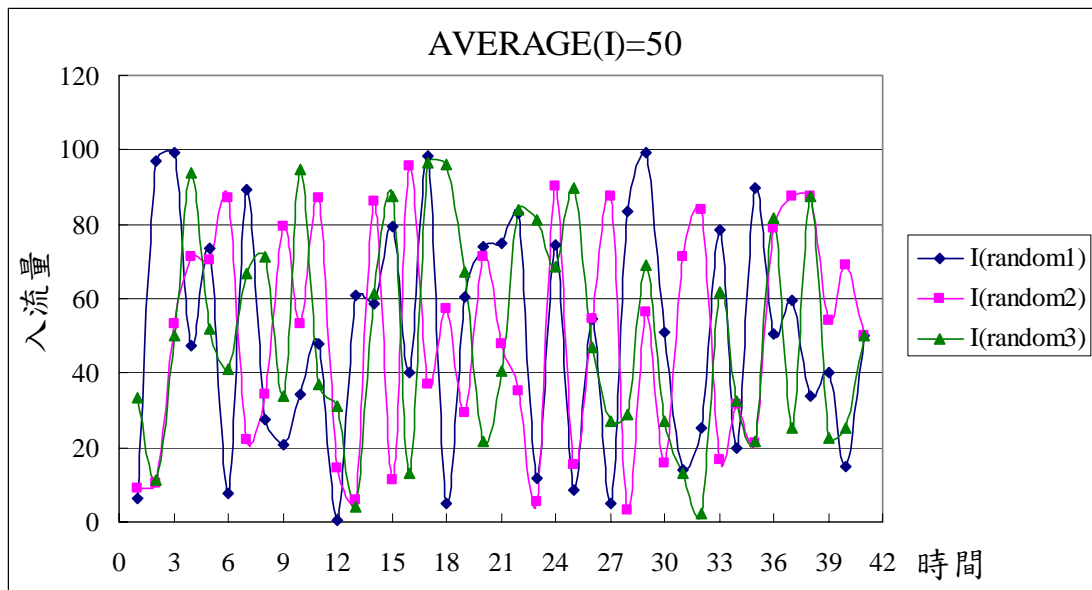


圖 5.2.7 案例二情境四(random 多組變化, I=50)模擬結果圖



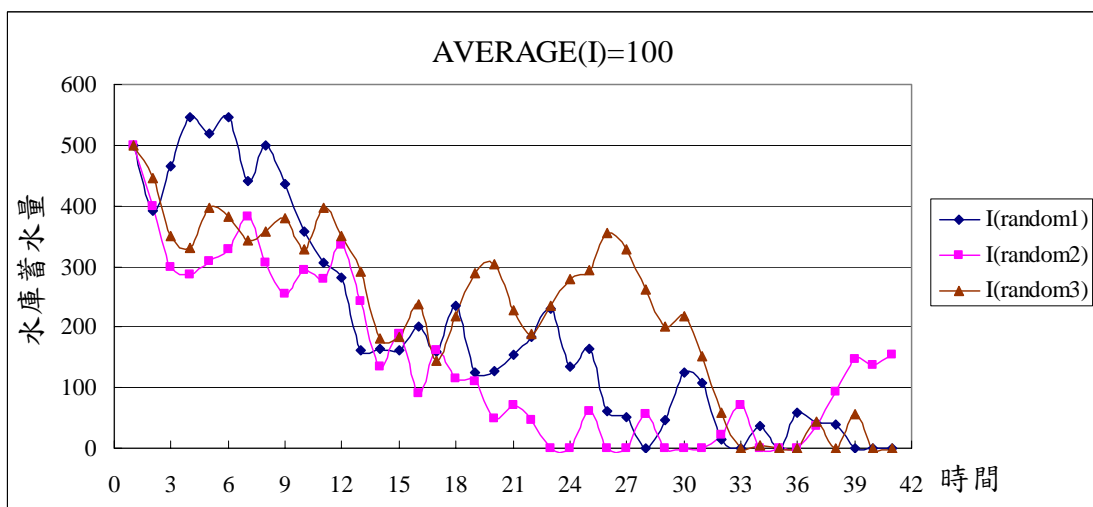
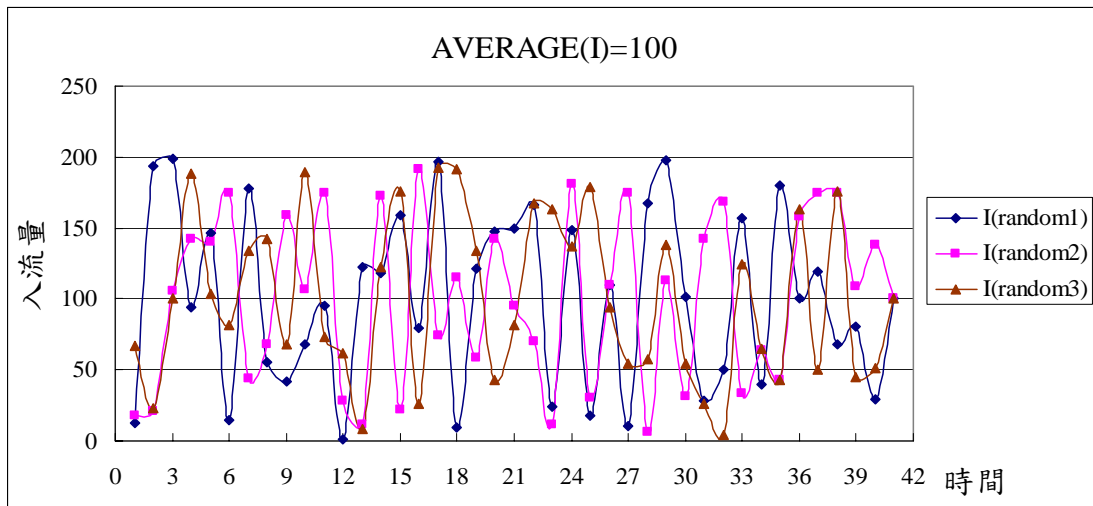


圖 5.2.8 案例二情境四(random 多組變化, I=100)模擬結果圖

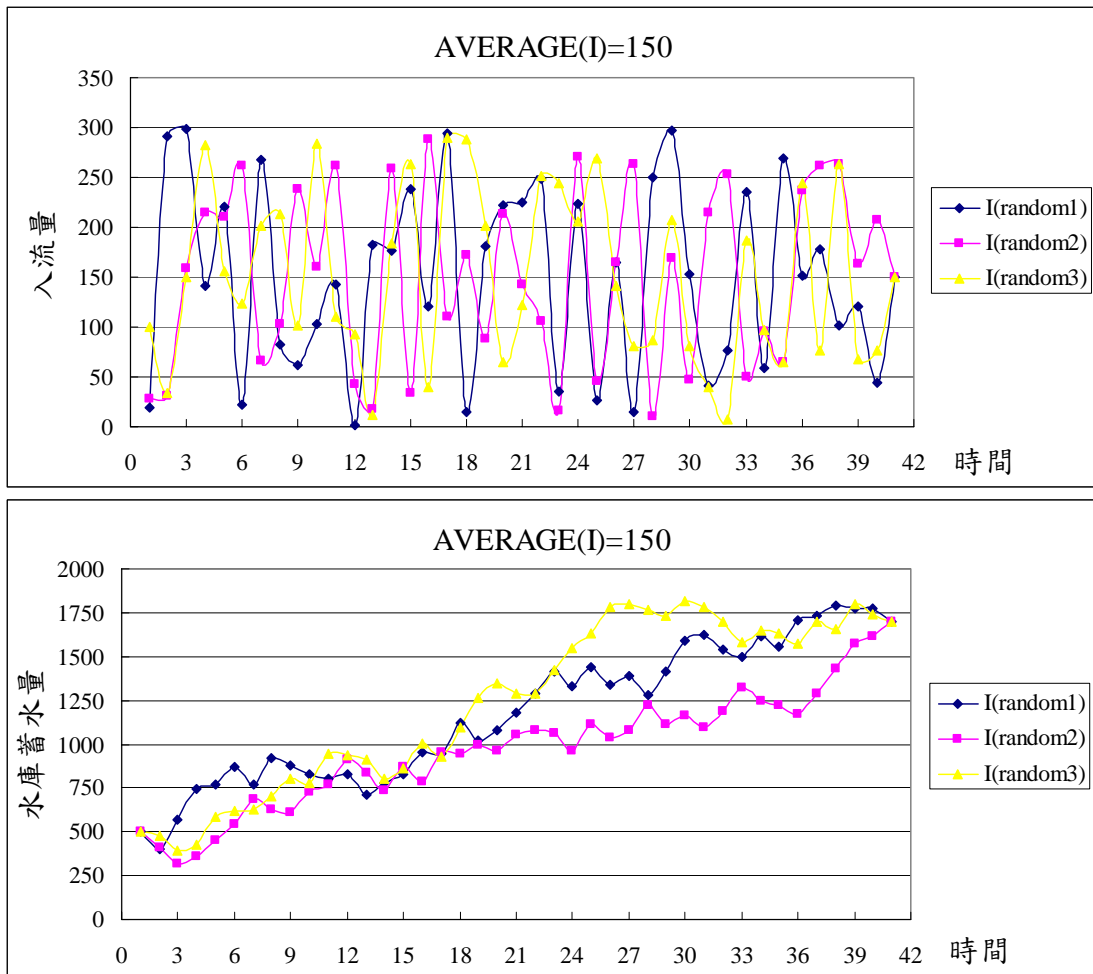


圖 5.2.9 案例二情境四(random 多組變化, I=150)模擬結果圖

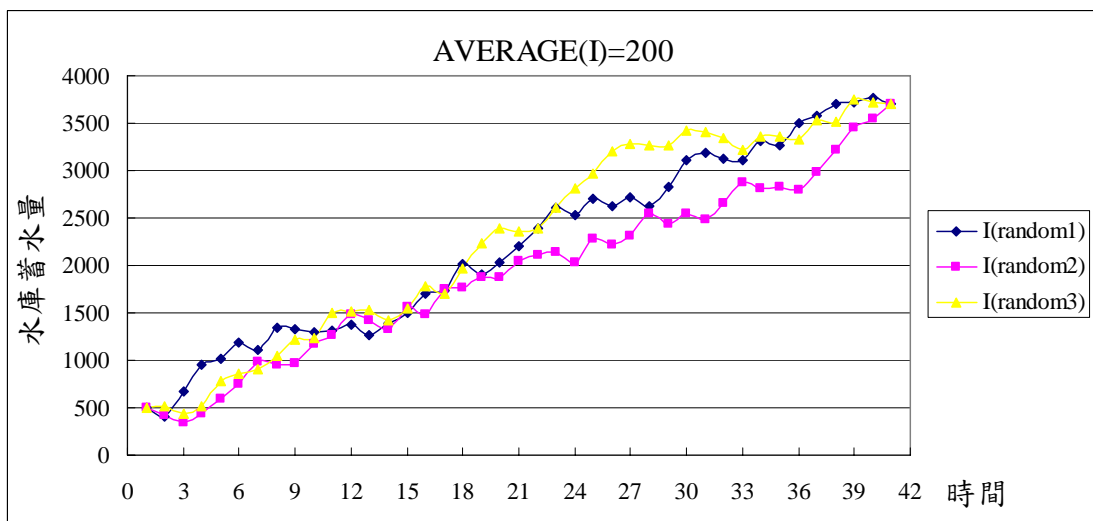
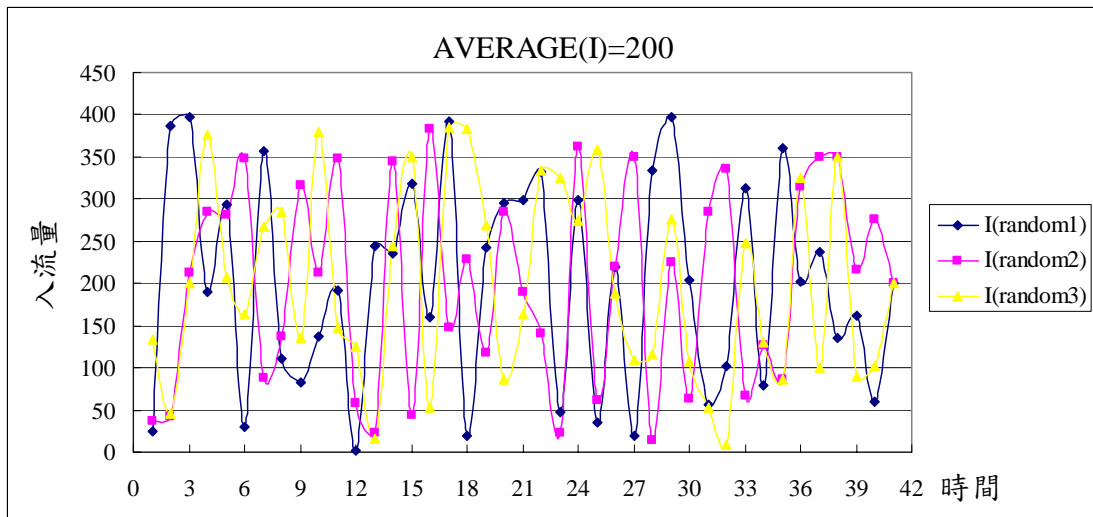


圖 5.2.10 案例二情境四(random 多組變化，I=200)模擬結果圖

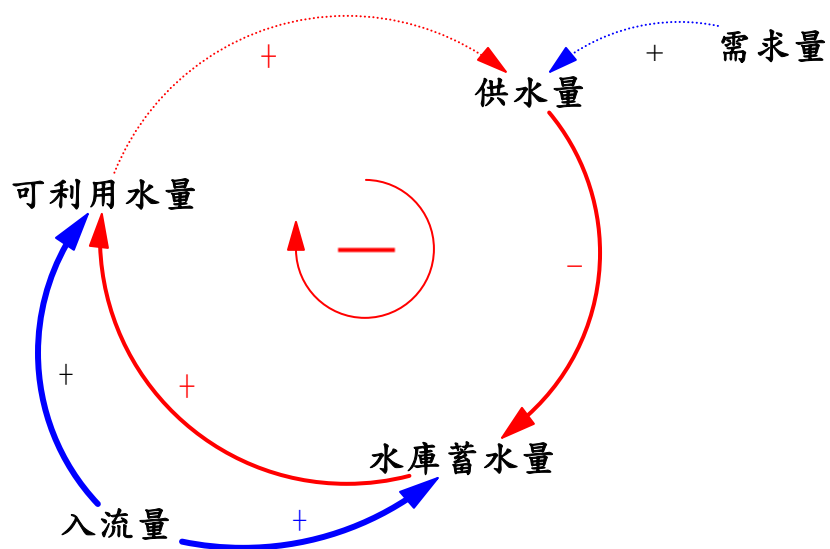


圖 5.2.11 案例二修改後之回饋圖

### 5.3 案例三：單水庫供水加入需求量以及河川放流量考量之案例

圖 5.3.1 為單水庫供水加入需求量及河川放流量考量之因果回饋圖，與案例二不同處為圖形增加了基流量、水庫供給基流量的供水量，河川放流量及水庫庫容，其中基流量與水庫庫容屬於外部變數，水庫供給基流量的供水量與河川放流量屬於其中某一回饋迴路的內部變數。變數方程式中有三個變數之方程式裡有判斷式，其變數及判斷的順序分別為供水量(基流量)、供水量(民生)與河川放流量。三個變數的判斷組合應為  $2 \times 2 \times 2 = 8$  種，但由於變數判斷有先後順序，所以可能產生前面的變數判斷完後，後面的變數判斷就不會產生的情況，此案例因果回饋圖經判別後所衍生的列表如表 5.2.3 所示。

此案例之情境模擬假設條件與相關方程式如表 5.3.1 所示，其中初始水庫蓄水量假設為已知值( $S_1=500$ )，其模擬結果如圖 5.3.2 所示。由表 5.3.2 知當  $AvI_t > Db_t$ 、 $AvI_t - Ob_t > D_t$  and  $AvI_t - Ob_t - O_t > S_{max}$  條件下，則水庫蓄水量、可利用水量與河川放水量形成一負回饋迴路(如衍生的回饋圖圖 1)，其模擬後的結果如圖 5.3.2 中的入流量為 200 時之圖形，水庫蓄水量會到達水庫庫容；當  $AvI_t > Db_t$ 、 $AvI_t - Ob_t > D_t$  and  $AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{max}$  條件下，則回饋圖中並無迴路存在(如衍生的回饋圖圖 2)，其模擬後的結果如圖 5.3.2 中的入流量為 150 時之圖形，模擬初始時水庫蓄水量成發散的現象(圖形往上成長)，當達到入流量加上水庫蓄水量(可利用水量)扣除供應量後，若大於水庫庫容回饋迴路又變到回饋圖圖 1 的收斂迴路圖形，水庫蓄水量會到達水庫庫容；當  $AvI_t > Db_t$ 、 $AvI_t - Ob_t \leq D_t$  and  $AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{max}$  條件下，則可利用水量、供水量(民生)與水庫蓄水量形成一負回饋迴路(如衍生的回饋圖圖 3)，其模擬後的結果如圖 5.3.2 中的入流量為 100 時之圖形，水庫

蓄水量會隨時間的演進而到達空庫的狀態(水庫蓄水量為 0)；當  $AvI_i \leq Db_i$  條件下，則可利用水量、供水量(基流量)、河川放流量與水庫蓄水量形成一負回饋迴路(如衍生的回饋圖圖 4)，其模擬後的結果如圖 5.3.2 中的入流量為 50 時之圖形，由於可利用水量供應基流量都不足夠了，所以水庫蓄水量會更快到達空庫的狀態(水庫蓄水量為 0)。由以上所模擬的結果來修正因果回饋圖，在變數的計算方程式如有判斷式的時候，則利用虛線來表示，如圖 5.3.3 所示。

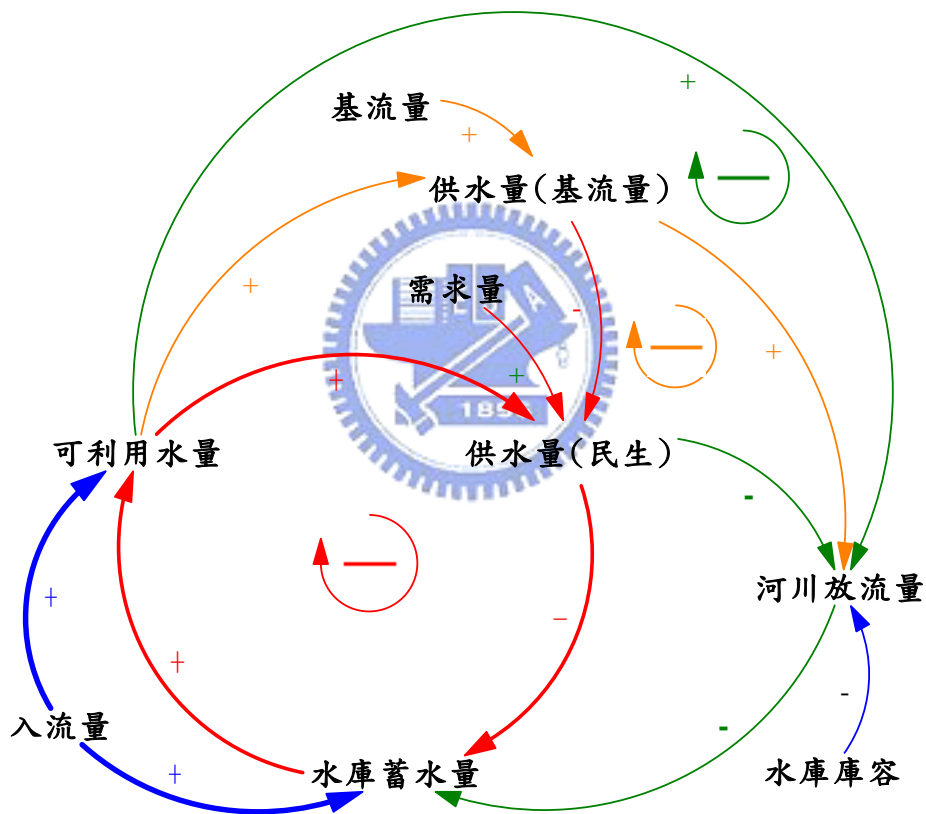

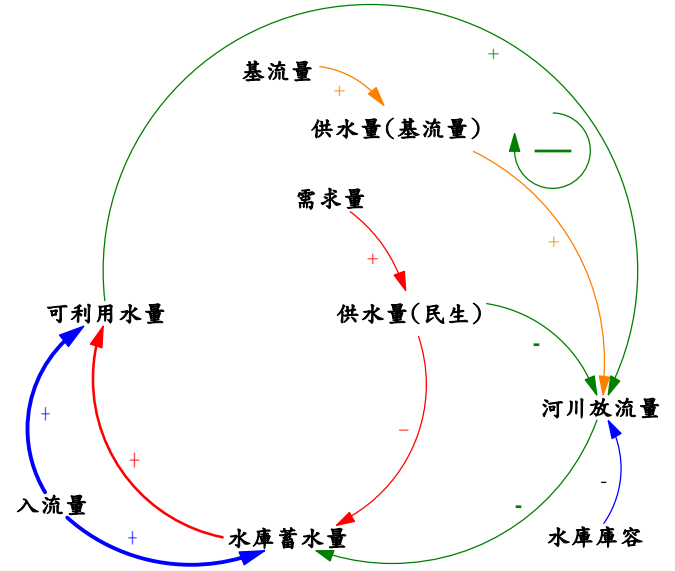


圖 5.3.1 案例三因果回饋圖

表 5.3.1 案例三模擬條件與變數之方程式之列表

| 變數                              | 名詞                  | 模擬假設條件與變數之方程式                                                                                                          |
|---------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_0$                           | 初始水庫蓄水量             | 500                                                                                                                    |
| $I_t, D_t,$<br>$Db_t, S_{\max}$ | 入流量, 需求量, 基流量, 水庫庫容 | constant                                                                                                               |
| $AvI_t$                         | t 時刻之可利用水量          | $AvI_t = I_t + S_t$                                                                                                    |
| $Ob_t$                          | t 時刻之供水量(基流量)       | $O_t = \min(AvI_t, Db_t)$                                                                                              |
| $O_t$                           | t 時刻之供水量(民生)        | $O_t = \min(AvI_t - Ob_t, D_t), AvI_t > Ob_t$<br>$O_t = 0, AvI_t \leq Ob_t$                                            |
| $R_t$                           | t 時刻之河川放流量          | $R_t = AvI_t - Ob_t - O_t - S_{\max}, AvI_t - Ob_t - O_t > S_{\max}$<br>$R_t = Ob_t, AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{\max}$ |
| $S_{t+1}$                       | t+1 時刻之水庫蓄水量        | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$                                                                                      |

表 5.3.2 案例三經判斷後的所有因果回饋圖列表

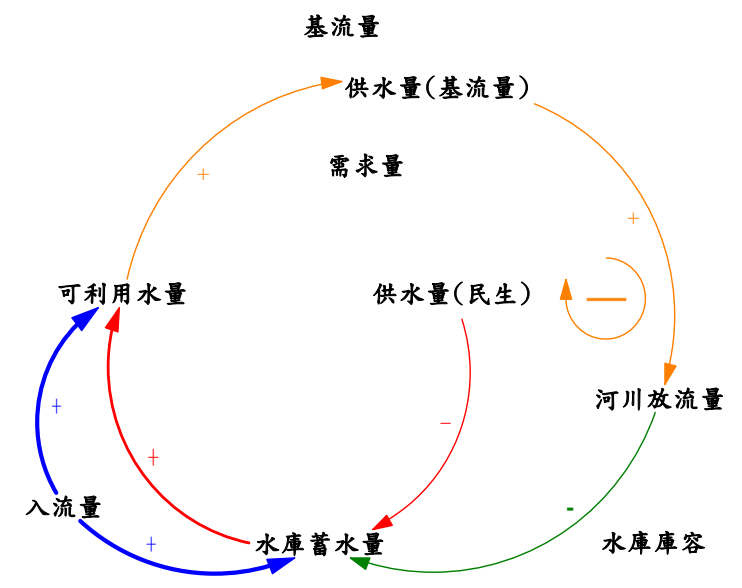
| 判斷之變數                 |                                  |                                                                                                                                | 回饋圖                                                                                           |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.供水量(基流量)            | 2.供水量(民生)                        | 3.河川放流量                                                                                                                        | —                                                                                             |
| <p>可利用水量 &gt; 基流量</p> | <p>可利用水量 - 供水量(基流量) &gt; 需求量</p> | <p>可利用水量 - 供水量(基流量) - 供水量(民生) &gt; 水庫庫容</p>  | <p>1.</p>  |

接續頁

|                      |                                 |                                                                                                  |           |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <p>可用水量 &gt; 基流量</p> | <p>可用水量 - 供水量(基流量) &gt; 需求量</p> | <p>可用水量 - 供水量(基流量) - 供水量(民生) ≤ 水庫庫容</p>                                                          | <p>2.</p> |
| <p>可用水量 &gt; 基流量</p> | <p>可用水量 - 供水量(基流量) ≤ 需求量</p>    | <p>(此情況不會發生)<br/>可用水量 - 供水量(基流量) - 供水量(民生) &gt; 水庫庫容</p> <p>可用水量 - 供水量(基流量) - 供水量(民生) ≤ 水庫庫容</p> | <p>3.</p> |

接續頁



|            |                                  |                                           |                                                                                               |
|------------|----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 可用水量 ≤ 基流量 | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量) > 需求量 | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量)-供水量(民生) > 水庫庫容 |  <p>4.</p> |
|            |                                  | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量)-供水量(民生) ≤ 水庫庫容 |                                                                                               |
|            | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量) ≤ 需求量 | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量)-供水量(民生) > 水庫庫容 |                                                                                               |
|            |                                  | (此情況不會發生)<br>可用水量-供水量(基流量)-供水量(民生) ≤ 水庫庫容 |                                                                                               |

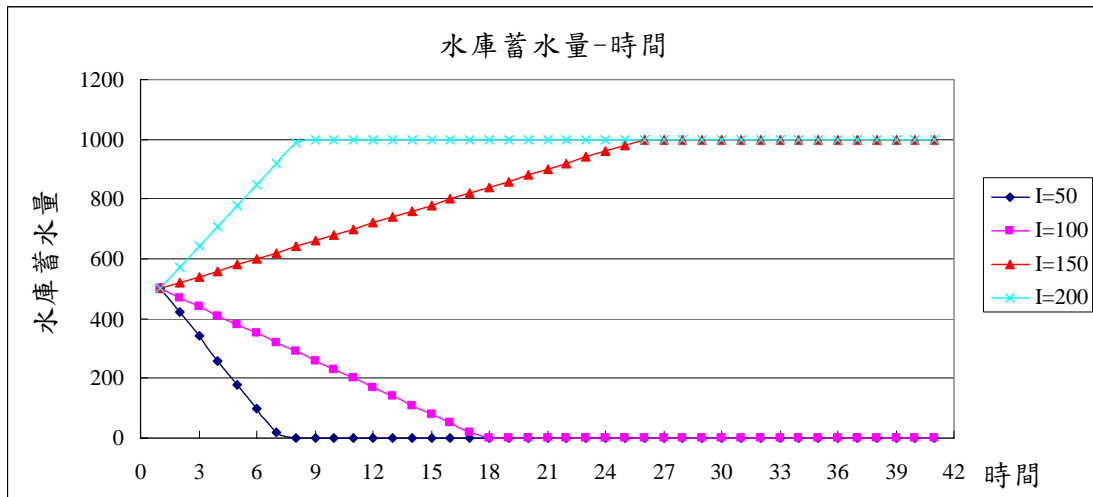


圖 5.3.2 案例三模擬結果圖

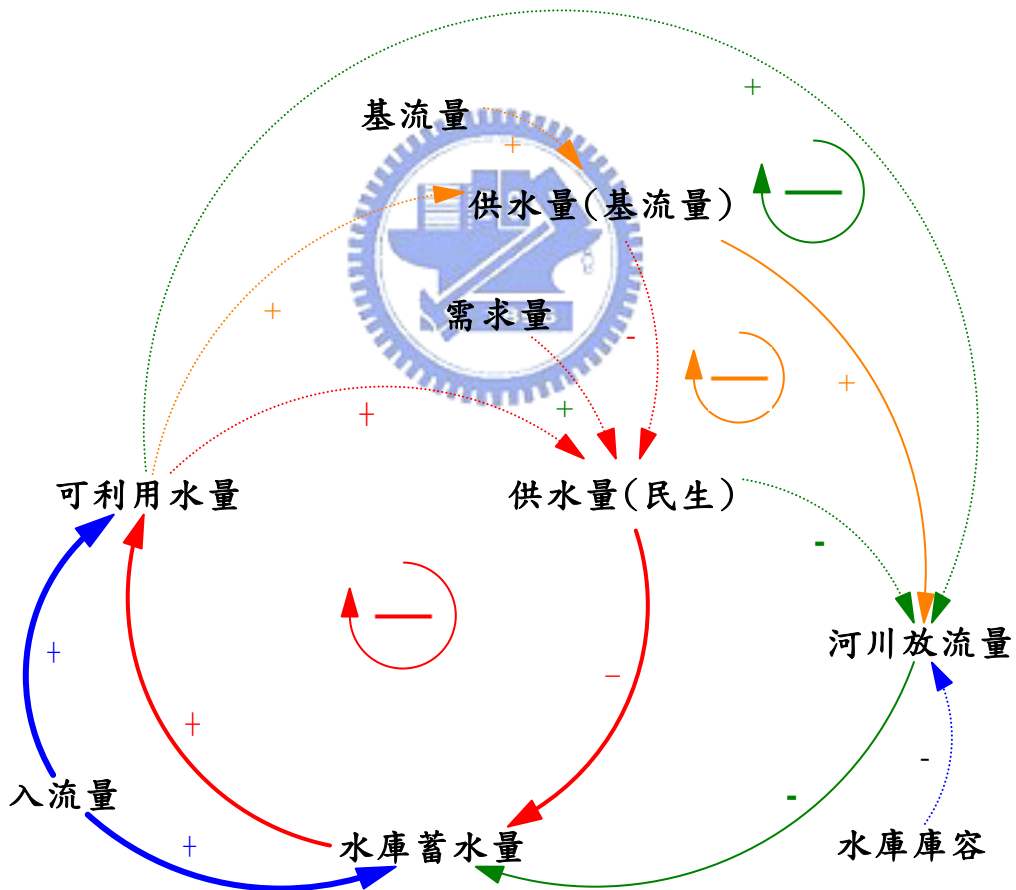


圖 5.3.3 案例三修改後之因果回饋圖

## 5.4 案例四：單水庫供水加入需求量、河川放流量以及水庫操作上加入規線操作考量之案例

圖 5.4.2 為單水庫供水加入需求量、河川放流量及水庫操作上加入規線(水庫操作規線如圖 5.4.1 所示)考量之因果回饋圖，與案例三不同處為圖形增加水庫操作規線的變數，包含打折係數、實際需求量、水庫下限層體積及水庫呆水位體積，其中打折係數、實際需求量與水庫下限層體積皆為決定水庫所需供應的需求量大小，而水庫呆水位體積則為水庫蓄水量最低水量(水庫最低蓄水量=水庫呆水位體積)，並非像案例三為空庫(水庫最低蓄水量=0)，故因果回饋判斷與案例三相同。此案例之情境模擬假設條件與相關方程式如表 5.4.1 所示其模擬結果與案例三大致相同，不同的地方為當入流量為 100 時可利用水量位於下限與呆水位之間，故供水量需打折供應，因此水庫蓄水量下降的變的很緩慢，如圖 5.4.3 所示。由以上所模擬的結果來修正因果回饋圖，在變數的計算方程式如有判斷式的時候，則利用虛線來表示，如圖 5.4.4 所示。

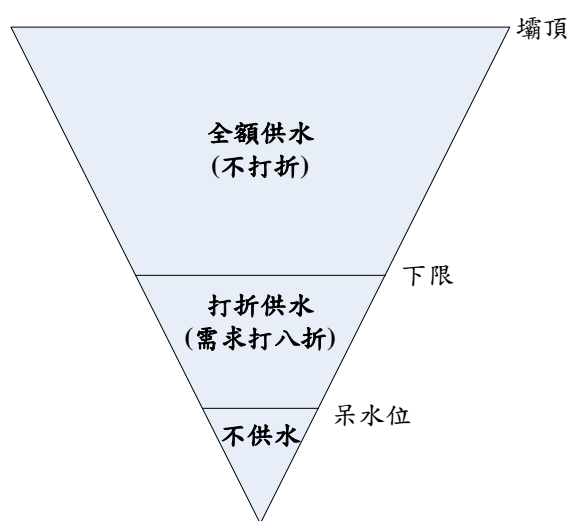


圖 5.4.1 案例四水庫操作分層示意圖

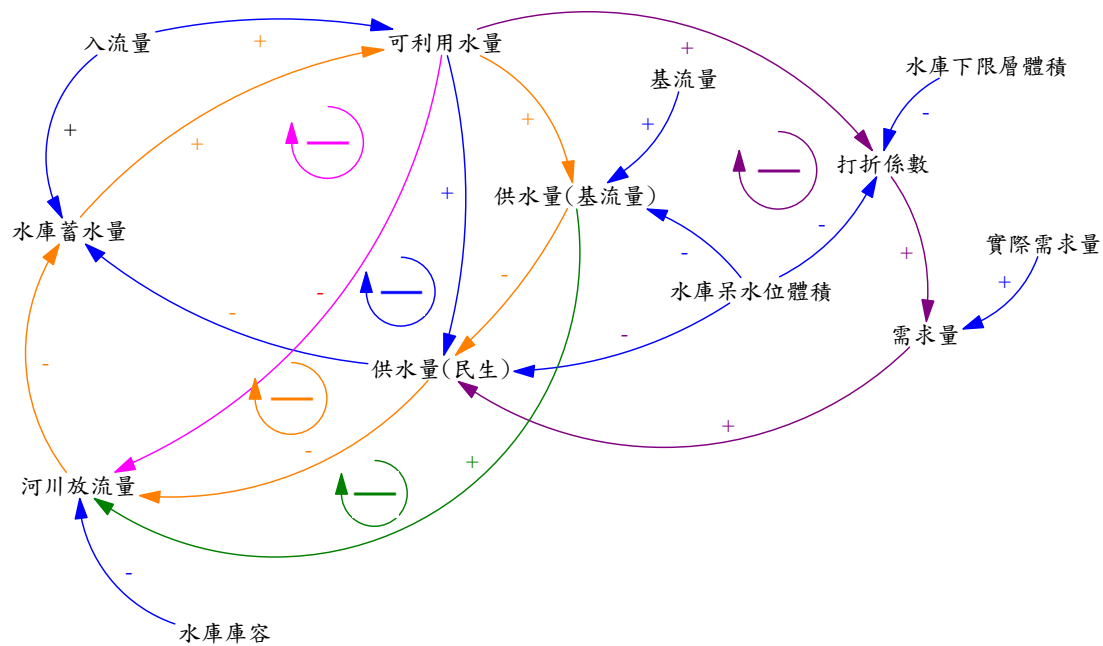


圖 5.4.2 案例四因果回饋圖

表 5.4.1 案例四模擬條件與變數之方程式之列表

| 變數                                         | 名詞                                                   | 模擬假設條件與變數之方程式                                                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $S_0$                                      | 初始水庫蓄水量                                              | 500                                                                                            |
| $I_t, D_t, Db_t, S_{max}, S_{buffer}, S_d$ | 入流量, 需求<br>量, 基流量, 水<br>庫庫容, 水庫下<br>限體積, 水庫呆<br>水位體積 | constant                                                                                       |
| $AvI_t$                                    | t 時刻之可利用<br>水量                                       | $AvI_t = I_t + S_t$                                                                            |
| $Ob_t$                                     | t 時刻之供水量<br>(基流量)                                    | $Ob_t = \min(AvI_t - S_d, Db_t)$                                                               |
| $O_t$                                      | t 時刻之供水量<br>(民生)                                     | $O_t = \min(AvI_t - S_d - Ob_t, DT_t), AvI_t - S_d > Ob_t$<br>$O_t = 0, AvI_t - S_d \leq Ob_t$ |

|           |                  |                                                                                                                       |
|-----------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_t$     | t 時刻之河川放<br>流量   | $R_t = AvI_t - O_t - S_{\max}$ , $AvI_t - Ob_t - O_t > S_{\max}$<br>$R_t = Ob_t$ , $AvI_t - Ob_t - O_t \leq S_{\max}$ |
| $S_{t+1}$ | t+1 時刻之水庫<br>蓄水量 | $S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - R_t$                                                                                     |
| $W_i$     | 打折係數             | $W_i = 1$ , $AvI_t \geq S_{buffer}$<br>$W_i = 0.8$ , $S_{buffer} \geq AvI_t \geq S_d$<br>$W_i = 0$ , $S_d \geq AvI_t$ |
| $DT_t$    | t 時刻修正之民<br>生需求量 | $DT_t = W_i \times D_t$                                                                                               |

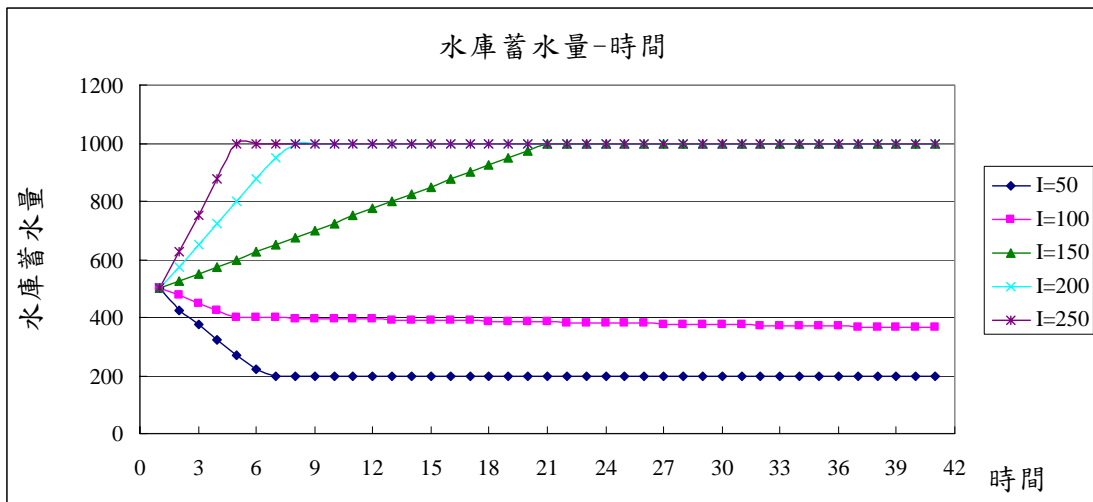


圖 5.4.3 案例四模擬之結果圖

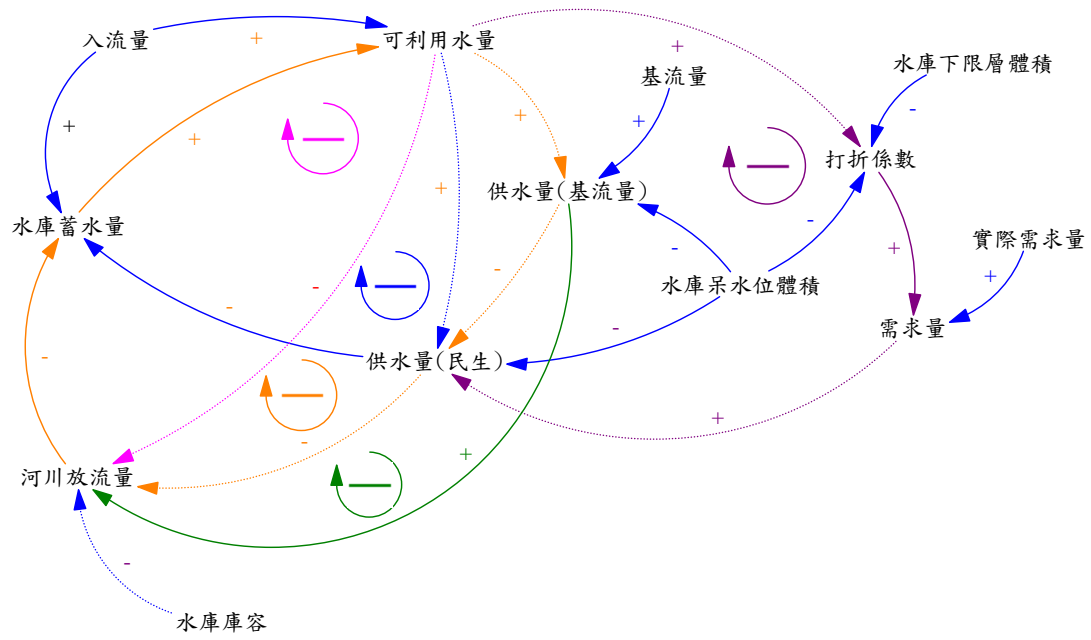


圖 5.4.4 案例四修改後之因果回饋圖



## 5.5 案例五：兩水庫聯合營運供水之案例

圖 5.5.1 為兩水庫聯合營運供水時之因果回饋圖，此案例可看成兩個案例四所構成，差異點為供水的時候由水庫 1 先供給，不足再由水庫 2 供給，因此因果回饋圖中會多出一個不足量(水庫 1 供水後)的變數用以決定水庫 2 演算過程中的須用到的需求量。此案例之情境模擬假設條件與相關方程式如表 5.5.1，所示其模擬結果如圖 5.5.2~圖 5.5.3，圖 5.5.2 為水庫 1 蓄水量之模擬圖，由圖可知水庫 1 之蓄水量為優先供水，所以蓄水量的圖形呈現下降至水庫呆水位。圖 5.5.3 為水庫 2 蓄水量之模擬圖其結果與案例四大致相同，不同點為一開始由於供水量皆由水庫 1 提供，所以水庫 2 的蓄水量一開始會呈現成長的情況(逐漸趨近水庫庫容)，當水庫 1 之蓄水量用完時，則供水量就必須由水庫 2 提供，其結果便與案例四的結果一樣。由以上所模擬的結果來修正因果回饋圖，在變數的計算方程式如有判斷式的時候，則利用虛線來表示，如圖 5.4.4 所示。

表 5.5.1 案例五模擬條件與變數之方程式之列表

| 變數                                                                                                                                               | 名詞                                                                                                                     | 模擬假設條件與變數之方程式                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $n=1,2$ ,<br>$S\hat{n}_0$ , $I\hat{n}_t$ ,<br>$Db\hat{n}_t$ ,<br>$S\hat{n}_{max}$ ,<br>$S\hat{n}_{buffer}$ ,<br>$S\hat{n}_d$ , $D_t$ ,<br>$D2_t$ | 第 n 座水庫(1,2) , 初始水庫蓄水量(n 水庫) , 入流量(n 水庫) , 基流量(n 水庫) , 水庫庫容(n 水庫) , 水庫下限體積(n 水庫) , 水庫呆水位體積(n 水庫) , 需求量 , 不足量(水庫 1 供水後) | constant                                                                                                                                                                                                             |
| $AvI\hat{n}_t$                                                                                                                                   | t 時刻之可利用水量                                                                                                             | $AvI\hat{n}_t = I\hat{n}_t + S\hat{n}_t$                                                                                                                                                                             |
| $Ob\hat{n}_t$                                                                                                                                    | t 時刻之供水量(基流量)                                                                                                          | $Ob\hat{n}_t = \min(AvI\hat{n}_t - S\hat{n}_d, Db\hat{n}_t)$                                                                                                                                                         |
| $O\hat{n}_t$                                                                                                                                     | t 時刻之供水量(民生)                                                                                                           | $O\hat{n}_t = \min(AvI\hat{n}_t - S\hat{n}_d - Ob\hat{n}_t, DT\hat{n}_t)$ , $AvI\hat{n}_t - S\hat{n}_d > Ob\hat{n}_t$<br>$O\hat{n}_t = 0$ , $AvI\hat{n}_t - S\hat{n}_d \leq Ob\hat{n}_t$                             |
| $R\hat{n}_t$                                                                                                                                     | t 時刻之河川放流量                                                                                                             | $R\hat{n}_t = AvI\hat{n}_t - O\hat{n}_t - S\hat{n}_{max}$ , $AvI\hat{n}_t - Ob\hat{n}_t - O\hat{n}_t > S\hat{n}_{max}$<br>$R\hat{n}_t = Ob\hat{n}_t$ , $AvI\hat{n}_t - Ob\hat{n}_t - O\hat{n}_t \leq S\hat{n}_{max}$ |
| $S\hat{n}_{t+1}$                                                                                                                                 | t+1 時刻之水庫蓄水量                                                                                                           | $S\hat{n}_{t+1} = S\hat{n}_t + I\hat{n}_t - O\hat{n}_t - R\hat{n}_t$                                                                                                                                                 |
| $W\hat{n}_i$                                                                                                                                     | 打折係數                                                                                                                   | $W\hat{n}_i = 1$ , $AvI\hat{n}_t > S\hat{n}_{buffer}$<br>$W\hat{n}_i = 0.8$ , $S\hat{n}_{buffer} \geq AvI\hat{n}_t \geq S\hat{n}_d$<br>$W\hat{n}_i = 0$ , $S\hat{n}_d \geq AvI\hat{n}_t$                             |
| $DT\hat{n}_t$                                                                                                                                    | t 時刻修正之民生需求量(水庫 1、2)                                                                                                   | $DT1_t = W1_i \times D_t$<br>$DT2_t = W2_i \times D2_t$                                                                                                                                                              |



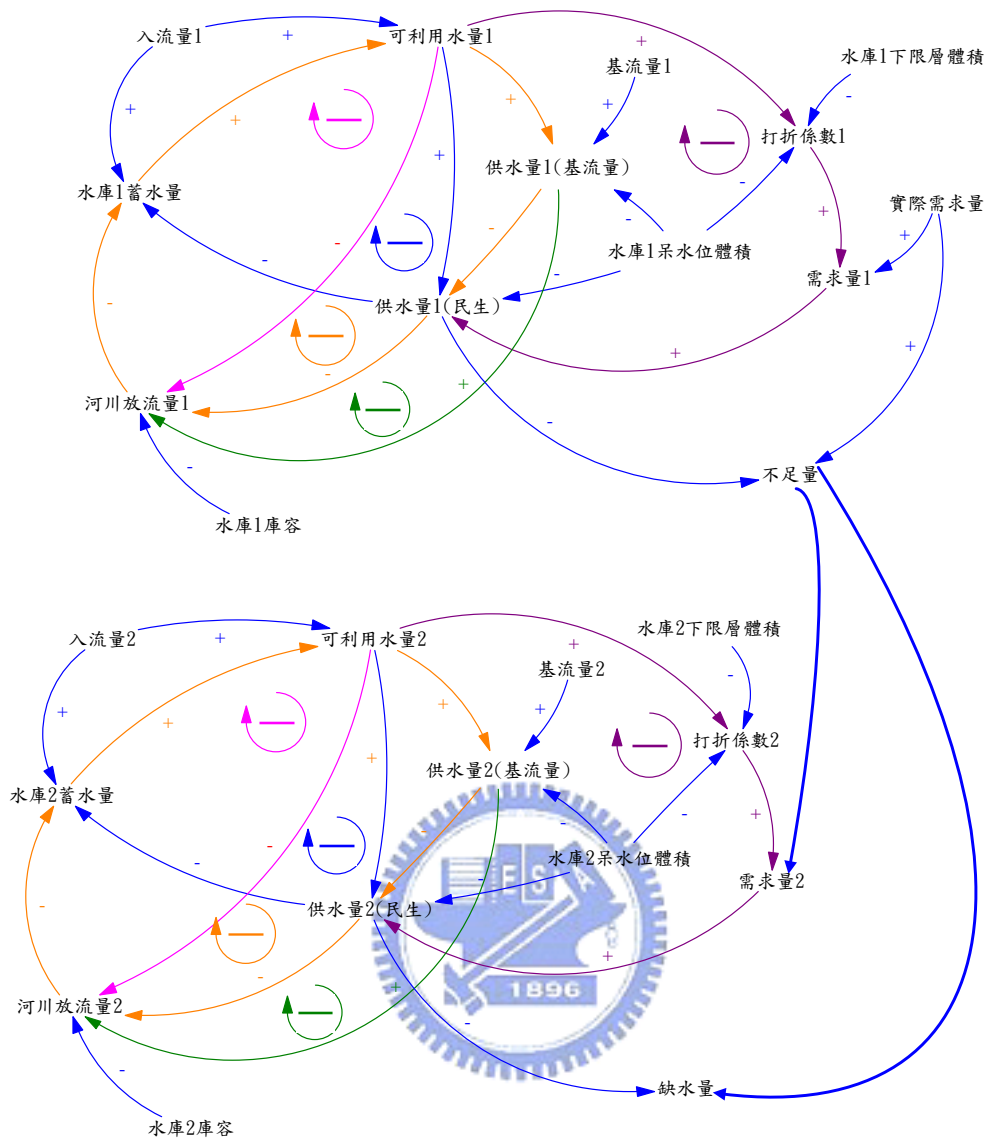


圖 5.5.1 案例五經整理後之因果回饋圖

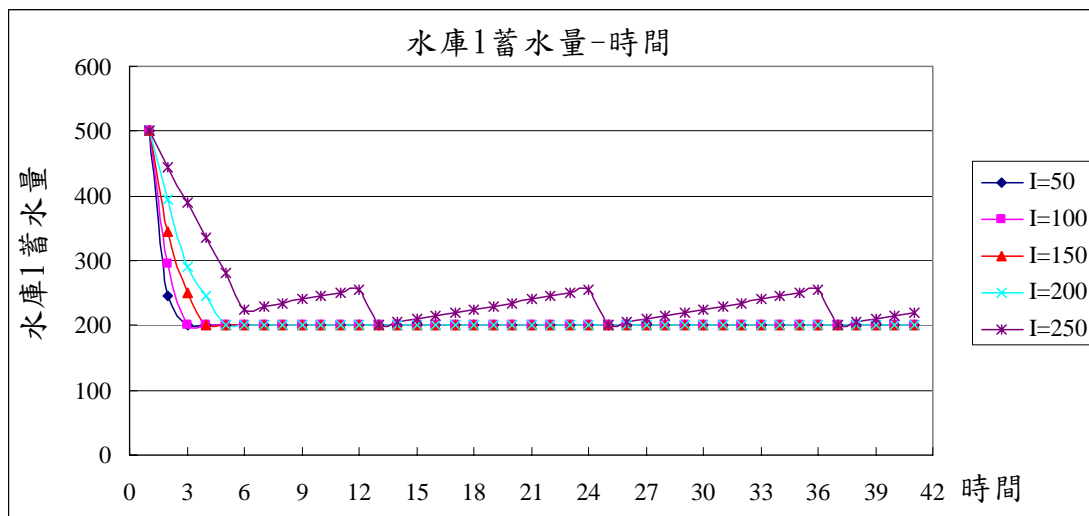


圖 5.5.2 案例五水庫 1 蓄水量模擬圖

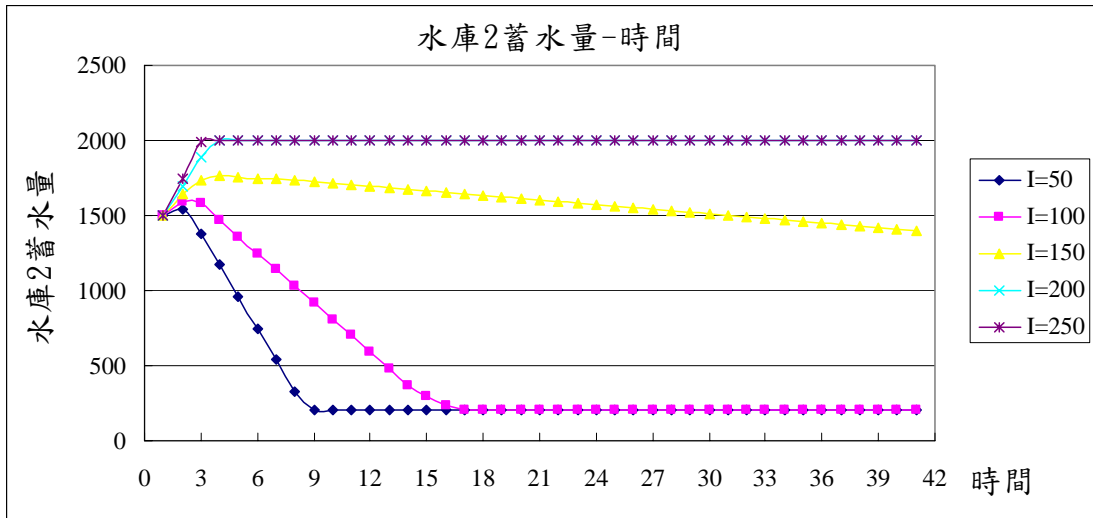


圖 5.5.3 案例五水庫 2 蓄水量模擬圖

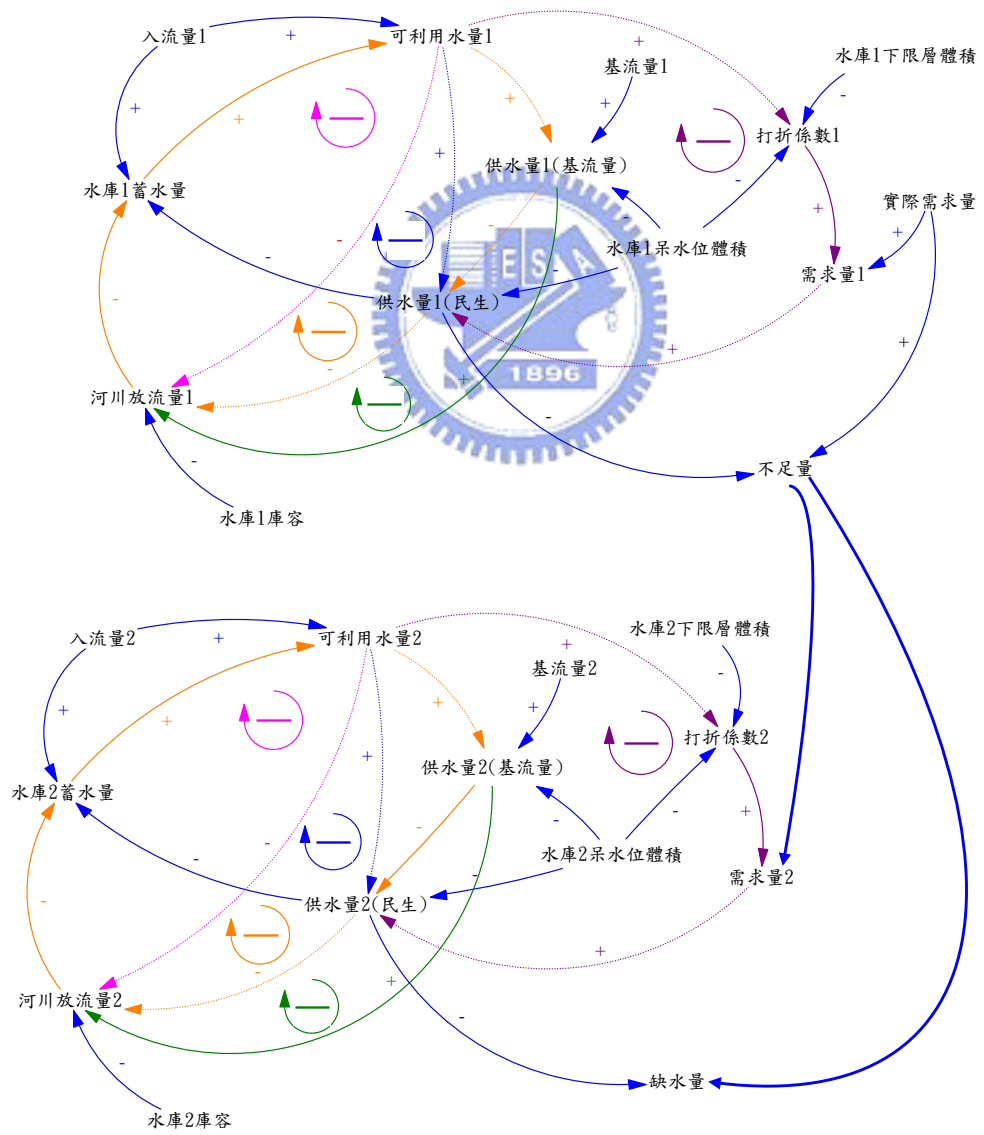


圖 5.5.4 案例五修改後之因果回饋圖

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

1. 本研究已初步發展出整合系統圖與流程圖成系統動力流圖的方法與步驟，並以五個不同的水資源案例作驗證。經由此整合流程可連貫傳統分析方式與系統動力學的分析邏輯，幫助一般人掌握系統動力學的基本理念。
2. 本研究顯示系統圖與流程圖各自只表達了解題所需的部份資訊，而動力流圖不僅同時涵蓋了系統圖與流程圖的資訊，還可以展現變數間的互動關係，將原本隱藏於分析者思維中的資訊表達出來。
3. 本研究進一步經由系統動力流圖整理出因果回饋網路，並證明若有邏輯判斷變數存在，將使回饋環的結構隨著時間推演變化，此發現將有助於分析者更深入的觀察及解釋系統的反應。
4. 前述之動態回饋環結構，本研究進一步以各種單水庫水量調配案例說明之，在此類問題中，以水庫可利用水量與標的需求量所得之邏輯判斷結果，將決定問題之回饋環結構，分析結果可整理如下：
  - (1) 若可利用水量均大於需求量，則因果回饋圖中將無任何回饋環路存在，此時水庫蓄水量受入流量與供水量兩變數的影響，在供水量為定值下情況下，入流量愈大則水庫蓄水量也愈大，而不會如負回饋環路般之達到平衡。
  - (2) 若可利用水量均小於需求量，則因果回饋圖中將存在一負回饋環路，此時在不同入流量下，水庫蓄水量最後皆會呈現平衡的狀態。
  - (3) 各種情境模擬結果的驗證顯示，因果回饋圖中的回饋環路只與內部變數有關，不受外部變數的影響。且在某一回饋環路

結構下，系統外部變數如入流量的改變雖會影響系統的反應量，惟卻不會影響系統的變化趨勢。



## 6.2 建議

1. 本研究中僅以水資源中五個案例初步得到結合之方法與步驟，然而由於五個案例中最複雜只有雙水庫供水結構，且此兩水庫僅有供水先後順序，並無同時供水之問題，未來可以在加入對等水庫及指標平衡之考量。
2. 本研究雖對系統因果回饋圖加以分析，得到回饋環會隨著時間前進而出現或消失，並無法知道哪個回饋環此問題癥結所在，建議未來可針對關鍵回饋環進行研究。



## 參考文獻

1. Yeh, William W. -G., “Reservoir Management And Operations Model : A State-Of-The-Art Review”, Water Resources Research, pp. 1797–1818, 1985.
2. Yu, Philip S. and Asit Dan, “Effect of System Dynamics on Coupling Architectures for Transaction Processing”, Proceedings of the Eighth International Conference on Data Engineering, pp. 458–469, 1992.
3. Ralph A. Wurbs, “Reservoir-system simulation and optimization models” , Journal of Water Resources Planning and Management, pp. 455–472, 1993
4. Sajjad, Ahmad and Slobodan P. Simonovic, “System Dynamics Modeling of Reservoir Operations for Flood Management”, Journal of Computing in Civil Engineering, pp.190-198, 2000.
5. XU, Z. X., K. Takeuchi, H. Ishidaira and X. W. Zhang, “Sustainability Analysis for Yellow River Water Resources Using the System Dynamics Approach”, Water Resources Management, 16, pp.239-261, 2002.
6. Burak, Güneralp and Yaman Barlas “Dynamic modelling of a shallow freshwater lake for ecological and economic sustainability”, Ecological Modelling, 167, pp.115-138, 2003.
7. Stave, Krystyna A., ”A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada”, Journal of Environmental Management, 67, pp.303-313, 2003.
8. Labadie, John W., ”Optimal Operation of Multireservoir Systems : State-of-the-Art Review”, Journal of Water Resources Planning and

- Management, 130, pp.93-111, 2004.
9. David, F. Gillespie, Karen Joseph Robards and Sungsook Cho, "Designing Safe Systems: Using System Dynamics to Understand Complexity", Natural Hazards Review, pp.82-88, 2004.
  10. Sajjad, Ahmad and Slobodan P. Simonovic, "Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems", Journal of Computing in Civil Engineering, pp.331-340, 2004.
  11. Gerald, Sehlke and Jake Jacobson, "System Dynamics Modeling of Transboundary Systems: The Bear River Basin Model", Ground Water, 43, 5, pp.722-730, 2005.
  12. 蘇懋康，系統動力學原理及應用，上海交大，1991。
  13. 陶在樸，系統動態學，五南圖書出版有限公司，1999。
  14. 韓釗，系統動力學—探索動態複雜之鑰，華泰出版社，2002。
  15. 經濟部水利署水利規劃試驗所，多功能人工湖永續經營研究，經濟部水利署，2004。
  16. 經濟部水利署中區水資源局，大安溪及大甲溪水資源聯合運用初步規劃報告，經濟部水利署，2005。
  17. 經濟部水利署，多元化水源開發綱領計畫，經濟部水利署，2005。
  18. 吳瑞賢、林建章、蘇文瑞，「水庫規線之制定與操作之研究」，第八屆水利工程研討會論文集，1996。
  19. 林松青、王茂興、吳瑞賢，「並聯水庫與下游攔河堰系統聯合運轉出水量之解析模擬」，第九屆水利工程研討會論文集，D15-D22 頁，1998。
  20. 楊淑敏，「區域性系統供水潛能之分析」，國立台灣大學台灣大學土

- 木工程研究所，碩士論文，1998。
21. 周乃昉、黃義銘，「南部區域水資源調配模式之初步研究」，第九屆水利工程研討會論文集，D23-D33 頁，1998。
  22. 陳亭玉，「河川流域水土資源承载力與永續力評量模式之發展」，國立中央大學生物環境工程研究所碩士論文，1999。
  23. 黃文政、朱壽銓、黃珮貞，「模擬法在水庫操作規線上之應用」，台灣水利 46 卷第 4 期，53-63 頁，2000。
  24. 林堅俊，「營造業流程再造模式探討-以企業個案為例」，國立台灣科技大學營建工程系暨研究所碩士論文，2000。
  25. 陳俊源，「以本體論為基礎之企業流程分析方法論」，國立清華大學工業工程與工程管理研究所碩士論文，2001。
  26. 詹麗梅，「區域供水系統系統動力模型建立與策略評估-以大基隆供水區為例」，國立台灣海洋大學河海工程學系碩士學位論文，2001。
  27. 林松青，「整合型區域水庫與攔河堰聯合運轉系統模擬解析及優化之研究」，國立中央大學土木研究所博士論文，2002。
  28. 陳明業，「淡水河水資源系統動力模式與永續管理策略之研究」，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，2002。
  29. 蔡嘉訓，「多水庫系統聯合操作模擬模式與逐時段優選求解方法之建立與應用」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，2002。
  30. 鄭韻如，「多水庫聯合營運模式之建立與應用」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2002。
  31. 張光漢，「ERP 系統與系統動力學模式結合介面之研究與發展」，義守大學管理研究所碩士論文，2002。
  32. 張育雅，「應用遺傳演算法於大甲溪及大安溪水資源最佳聯合調配



- 模式」，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，2003。
33. 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。
  34. 李健源，「企業流程內在績效評估指標建立之研究---以系統科學理論為探討」，私立中原大學企業管理學系碩士論文，2004。
  35. 莊博全，「企業流程觀點轉換為系統動力學流徑觀點之實地研究」，國立屏東科技大學資訊管理系碩士論文，2005。
  36. 黃志民，「工程顧問機構知識管理導向企業流程再造模式之研究」，國立台灣科技大學營建工程系碩士論文，2006。

