

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 水庫入流量預測與即時操作因應乾旱之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2313-B-216-001-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：中華大學土木工程學系

計畫主持人：陳莉

計畫參與人員：陳慧敏

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 2 日

# 水庫入流量預測與即時操作因應乾旱之研究

**關鍵字：**語法式進化、即時操作、遺傳演算法

## 摘要

語法式進化(GE)為最佳化領域中一種新的計算架構，可提供系統鑑定直接而結構化的方式，並自動獲得存在於輸入-輸出關係中最適合的函數型態。本研究目的在於應用GE建立水庫之流量預測模式與即時操作，在流量預測模式這部份，將GE的結果與複迴歸方法加以比較，而水庫即時操作部分由複雜的模擬方式來執行，故水庫的最佳放水策略是根據GE流量預測模式以及GA優選模式，其結果顯示此種GE與GA結合的操作模式比傳統的水庫規線操作方法更為理想。

## A Study of Inflow Prediction and Real-time Operation of a Reservoir during Drought

**Keywords :** grammatical evolution, real-time operation, genetic algorithm

## Abstract

Grammatical evolution (GE) is a new computing architecture in the area of optimization. It provides system identification in a transparent and structured way; a fittest function type of input-output relationship will be obtained automatically from this method. The present study aims at the application of GE to establish the inflow prediction model and real-time operation of Reservoir. A multi-regressive (MR) method and a GE model were fitted to the inflow data series and their performances were compared. Reservoir real-time operation policies were formulated through a complex simulation procedure. The optimal release was based on inflow prediction by GE and achieved through genetic algorithm (GA). The results indicate that this new model, GE and GA, is better than traditional reservoir operation by rule curves.

# 一、緒論

## 1-1 前言

近年來，氣候受到溫室效應的加強而改變，對於極端事件之乾旱及洪水發生也會產生影響。因此如何有效地進行水庫營運操作及控制管理，將水庫蓄水量作妥善的運用，實為水資源管理之重要課題。由於不同的操作方法對水庫放水量及未來的水庫蓄水量有很重大的影響，因此除了要能有效調整放水量，以達到放水量最大、缺水量最小之目標外，其操作原則更應簡單、明確，使水庫管理人員易於營運操作。

## 1-2 研究目的

水庫即時操作，可說是最能因應水水量改變之水庫運轉操作方法之一。本文將結合進化演算法(Evolutionary Algorithms、簡稱 EAs)中之語法式進化(Grammatical Evolution、簡稱 GE)與遺傳演算法(Genetic Algorithms、簡稱 GAs)，作為系統中之流量預測模式(簡稱 GEGA)，並以遺傳演算法優選最佳之放水量，進行水庫模擬模式分析以期獲得更為理想的操作策略與符合實際需求。

## 1-3 文獻回顧

### 1-3.1 語法式進化

進化演算法目前已成功應用於程式之自動生成。其中，Koza 所發展之遺傳程式(GP)深受專家學者們所推廣與使用【28,29,30】。目前已有不少專家學者將語法代入 GP 中【20,22,37,31,33,38,27】，更廣泛地克服了所謂的「閉合」(closure)問題。在 Wong 與 Leung【37】以及 Horner【27】的研究中，說明 Whigham【23,19】利用演化樹作為基因型的表現，而演化樹正可明確地說明如何在映射的過程中，將規則(production rules)轉為表現型。Freeman【20】及 Peterson【33】則傾向引用修補機制(repair mechanism)，用來克服第一代演化樹的產生問題，其機制乃使用原始設定值於非節點上，至於節點文中則並未詳加說明。

### 1-3.2 遺傳演算法

遺傳演算法有關於水資源的研究論文有：Goldberg 和 Kuo【23】首次應用 GAs 在水資源問題上，他們應用 GAs 解決了一個管渠最佳化的問題。Oliveira 和 Loucks【32】使用 GAs 發展多水庫操作系統方針，且推斷出 GAs 是一個有實用價值且強健的方法。Chang 和 Chen【17】應用實數編碼的 GAs 於水庫防洪規則管理。Sharif 和 Wardlaw【35】發表以 GAs 作最佳化之多水庫系統，他們並與間斷微分動態規劃(DDDP)作比較，結果顯示 GAs 非常接近最佳效果且方法強健。

### 1-3.3 即時操作

水庫即時操作相關之研究論文有：萬象【14】將其研究分為兩部分：首先探論如何藉由水庫即時操作，改善現有水庫之操作效率，接著再將水庫操作風險予以系統化與量化；郭錦文【12】在流量預測上採用真實流量、並利用間斷微分動態規劃模式(定率 DDDP 模式)於德基水庫操作優選模式之研究；許榮哲【13】以時間序列方法中之 AR(1)模式配合卡門濾波進行流量預測，並引入灰數之觀念將入流量預測值予以灰化，研究中並以模糊動態規劃處理多目標函數問題；陳頌平【10】以 Thomas-Fiering 模式進行流量預測，亦引入灰數之觀念將入流量預測值予以灰化，並以模糊動態規劃建立優選模式；邱仕宏【4】以 Thomas-Fiering 模式進行

流量預測，研究中並以遺傳演算法優選最佳旬放水量。

## 二、模式理論分析

### 2-1 語法式演算架構

#### 1. Backus-Naur Form

BNF 是一套表示語言語法規則形式之紀錄。BNF 語法由節點及非節點所組成。節點部分乃由 +、- 等項目所組成；非節點部分則由一個或多個節點、非節點所擴展而成。語法可以表示為  $\{N, T, P, S\}$ ， $N$  為非節點之集合， $P$  為一個將  $N$  的要素映射至  $T$  之規則集合， $T$  為節點之集合， $S$  則為  $N$  要素之一的開始符號。

在 GE 模式中，BNF 的定義常被用來描述系統所產生的輸出語言。例如已經能夠編譯(compilable)的程式碼，可由  $T$  集合的各節點要素所組成，當 BNF 為系統連接的成分之一時，便意味著 GE 能夠利用各種程式語言產生程式碼，因此也給予系統無比的彈性。

#### 2. 映射處理(Mapping Process)

基因型藉由讀取密碼子 8 個位元所產生整數值，將開始符號映射至節點上，其值便可藉由映射函數的使用，決定合適的語法規則。

**規則 = (密碼子整數值) MOD (當前非節點規則總數)**

例如要映射非節點 op，共有四個規則可供選擇：

<op> :: = +	(0)
-	(1)
/	(2)
*	(3)

假設密碼子產生值為整數 6，將  $6 \text{ MOD } 4 = 2$ ，因此將選擇規則(2)，其代表為符號 /。例如某一個體，如圖 1 所示，推導演算步驟如下：

(1) 首先由 <expr> 開始，第一個密碼子為 11001000，解碼後其值為 200

$200 \text{ MOD } 4 = 0$ ，所以選擇 <expr> 中之規則 0，可得

<expr><op><expr>

(2) 選擇最左邊 <expr>，第二個密碼子為 10100000，解碼後其值為 160

$160 \text{ MOD } 4 = 0$ ，所以選擇 <expr> 中之規則 0，可得

<expr><op><expr><op><expr>

(8) 如此依序處理，將可得到

$\text{Sin}(X) * \text{Cos}(X) + 1.0$

### 2-2 遺傳演算法演算架構

對於求解問題之答案，欲使用遺傳演算法，其演算架構與流程如下【8,18】：

(1) 開始以隨機方式產生具  $n$  個  $L$  位元的染色體之群集(問題的候選解)。

(2) 計算問題中每個染色體  $x$  之適合度值  $f(x)$ 。

(3) 重複以下的步驟直到  $n$  個後代全部產生：

a. 在現有的群集中選擇一對親代染色體，選擇的機率乃根據適合度的遞增函數，採用取代的選擇方式，相同的染色體可能被選擇當親代超過一次。

b. 以  $P_c$ (交換率)使一對親代隨機的選擇位置來交換，以形成兩個子代；若無交換，所形成的兩個子代則完全由其親代複製而來。

- c.突變是以  $P_m$ (突變率)使兩個子代在任一位置上改變其值。  
 (4)以新的群集取代現有的群集  
 (5)重複進行步驟(2)。

經過數代演算後可望得到較佳的解，直到收斂至逼近整體最佳解且不再跳動，方可終止。

### 三、模式之應用

#### 3-1 以德基水庫為例:旬計總入流量預測模式之建立

##### 3-1.1 旬計總入流量因子之選取

本研究結合進化演算法中之語法式進化(Grammatical Evolution)及遺傳演算法(Genetic Algorithms)以建立流量預測模式。此模式在研究中將統稱為 GEGA 模式，供水庫即時操作優選模式演算之用。

本研究之流量預測模式，首先需決定德基旬計總入流量因子之選取。由於流量資料常具有季節性因素及前後旬彼此間之流量關係，因此研究中選取相關程度較高之前一旬流量、前二旬流量、前三旬、前三十六旬流量(即去年同一旬)及該旬流量之平均值作為本模式之主要控制因子(變數)，其相關係數整理如表 1 所示。經由模式高效率之搜尋、優選最適應(吻合)該旬流量之函數式，藉以求得該旬流量之預測值。

##### 3-1.2 各類評鑑指標之定義

研究中適合度優劣之評判，主要是經由個體間不同函數式所求得之數筆流量預測值，分別計算其平均絕對誤差(MAE)，藉此優選平均絕對誤差為最小之函數式以作為該旬之最佳函數式。為了評鑑本模式所推估之預測值與實際值間之關係，研究中採用統計及水文上常用之五種指標，藉此評定模式之表現【3】。首先先定義各評鑑指標中之變數：

$Q_t$ ：旬實際入流量  $\bar{Q}$ ：旬實際入流量之平均值  $\hat{Q}_t$ ：旬預測入流量

$\bar{\hat{Q}}$ ：旬預測入流量平均值  $N$ ：分析旬數  $t$ ：時間

1.平均絕對誤差—MAE (Mean Absolute Error) ，其值愈小代表模式之離散程度愈小，其結果亦較佳。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\hat{Q}_t - Q_t| \quad (1)$$

2.均方根誤差—RMSE (Root Mean Squared Error) ，其值愈小代表模式之離散程度愈小，其結果亦較佳。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (\hat{Q}_t - Q_t)^2}{N}} \quad (2)$$

3.正確率—PAE (Percentage Absolute Error) ，其值愈接近 1 代表模式預測愈準確

$$PAE = 1 - \frac{MAE}{\bar{Q}} \quad (3)$$

4.相關係數—CC (Coefficient of Correlation) ，其值愈接近 1 代表模式預測愈準確

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})(\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})^2 \sum_{t=1}^N (\hat{Q}_t - \bar{\hat{Q}})^2}} \quad (4)$$

5.效率係數—CE (Coefficient of Efficiency), 其值愈接近 1 代表模式預測愈準確, 其結果亦較佳。

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - \hat{Q}_t)^2}{\sum_{t=1}^N (Q_t - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

### 3-2.3 流量預測模式之推估比較

研究中為了評估以 GEGA 建立之流量預測模式, 其模式所推估之預測值是否適用, 乃加入複迴歸模式, 藉以比較模式之適用性。

複迴歸模式(MultiRegressive Model)

以相關程度較高之前一句流量、前二句流量、前三句、前三十六句流量(即去年同一句)及該句流量之平均值作為主要控制因子(變數)。因此在複迴歸的模式中, 亦選取此五項因子作為自變數進行分析。

$$\hat{Q}_t = b_0 + b_1 Q_{t-1} + b_2 Q_{t-2} + b_3 Q_{t-3} + b_4 Q_{t-36} + b_5 Q_{avg} \quad (6)$$

其中,  $\hat{Q}_t$  : 該句預測入流量       $Q_{t-1}$  : 前 1 句實際入流量

$Q_{t-2}$  : 前 2 句實際入流量       $Q_{t-3}$  : 前 3 句實際入流量

$Q_{t-36}$  : 前 36 句實際入流量       $Q_{avg}$  : 該句實際入流量之平均值

t : 時間       $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  : 複迴歸模式之迴歸係數

## 3-3 德基水庫模擬模式之建立

### 3-3.1 系統平衡方程式

本研究在建立水庫之模擬模式時, 以德基水庫與石岡壩聯合運用作為分析方式。系統中主要的水量平衡方程式整理如下:

德基水庫

1. 德基水庫總入流量 = 德基水庫天然入流量 + 志樂壩引水量      (7)

2. 德基水庫放水

依據德基水庫現行運轉規線可區分為水位於規線以上及以下之操作:

(1) 當水庫水位高於標的水位時, 其操作原則以滿足發電用水量為主放水。發電用水量以最大 144.5cms 歷時 6 小時為之。

(2) 當水庫水位低於標的水位時, 其操作原則以滿足下游需水量為主放水。

3. 德基水庫溢流量

該時刻蓄水量 > 最大庫容, 溢流量 = 該時刻蓄水量 - 最大庫容      (8)

該時刻蓄水量 < 最大庫容, 溢流量 = 0      (9)

$$4. \text{德基水庫下一時刻之期初蓄水量} = \text{該時刻蓄水量} + \text{德基總入流量} - \text{蒸發量} - \text{放水量} - \text{溢流量} \quad (10)$$

石岡壩

$$\text{德基水庫至石岡壩間之側流量} = \text{石岡壩入流量} - \text{德基總入流量} \quad (11)$$

本研究之相關計畫需水量

$$1. \text{農業計畫需水量} = \text{石岡壩上游灌區農業需水量} + \text{石岡壩灌區農業需水量} + \text{石岡壩下游灌區農業需水量} \quad (12)$$

$$2. \text{公共計畫需水量} = \text{以大台中地區民國 100 年之公共計畫需水量 127 萬噸, 作為德基水庫下游之公共計畫需水量} \quad (13)$$

$$3. \text{發電用水量(萬噸/日)} = \text{發電計畫水量(cms)} \times \text{發電時間(hr)} \times 0.36 \\ = 144.5 \times 6 \times 0.36 \quad (14)$$

### 3-3.2 系統限制式

#### 1. 水庫之相關限制

(1) 德基水庫之蓄水體積需介於水位高程 1361 公尺至 1408 公尺所對應之有效容量間。

(2) 德基水庫之放水量需介於最小放水量至最大放水量間。

(3) 志樂壩至德基水庫之最大引水量為 10cms。

(4) 德基水庫之出水孔限制為 217.5cms。

#### 2. 電廠之相關限制

(1) 德基電廠之最大處理容量(設計容量)為 200cms。

(2) 該句之發電量為該句電水比(mw/cms)\*該句發電水量(cms)\*該句發電小時數(hr)。

(3) 德基電廠之裝置容量限制為 234mw, 其最大發電量不可超過裝置容量(mw)\*發電小時數(hr)。

### 3-4 德基水庫優選模式之建立

#### 3-4.1 以遺傳演算法建立水庫優選模式

研究中將該句已知之德基總入流量, 代入由 GEGA 模式所求得 36 句之最佳函數式, 進而預測全年 36 句之德基總入流量, 再經遺傳演算法(GAs)高效率之搜尋能力, 優選德基全年 36 句之放水量, 並在水庫模擬模式之系統平衡下, 得到水庫全年之最佳即時操作策略後, 再實際放出該句所優選出之放水量, 等得知下一句之實際總入流量時, 再重新預測全年 36 句之德基總入流量, 以優選演算決定下一句之放水策略, 如此循環即可完成德基水庫全年之即時操作策略。

#### 3-4.2 目標函數之設定

本文之目標函數參照郭錦文【12】及邱仕宏【4】研究中所獲得之結果, 設定其目標函數如式(19)所示:

$$\text{Max } Z = \sum_{t=1}^n \text{CP} \times \text{N} \times \text{ENE}_t - \text{CS} \times \text{A}^{\text{SHt}} \times \text{WSH}_t \quad (15)$$

t : 1, 2, 3,.....,n 句

n : 36(一年共 36 句)

CP : 發電單位淨效益係數(2 元/KWH)

$N$  : 6(大甲溪流域發電量約為德基電廠發電量之 6 倍)

$ENE_t$  : 德基電廠於第  $t$  旬之發電量(KWH)

$CS$  : 缺水單位損失值效益(4 元/ $m^3$ )

$A$  : 指數常數(10)

$SH_t$  : 大甲溪流域第  $t$  旬之缺水率

$WSH_t$  : 大甲溪流域第  $t$  旬之缺水量( $m^3$ )

#### 四、結果討論與分析

本研究主要針對德基水庫 40 年(民國 48 年 民國 87 年)之歷史旬計總入流量，以 GEGA 模式建立流量預測模式—找尋 36 旬函數式，並選定民國 53 年為枯水年，依據此枯水年之歷史流況及本研究之水庫即時操作系統，進行最佳放水策略之優選，以達更為理想的效益。

##### 4-1 流量預測模式之運算結果與比較

為了評估以 GEGA 建立之流量預測模式，研究中並以複迴歸模式，藉以比較模式之適用性。為瞭解各模式在枯水年中預測與實際之變異情況，將之繪製如圖 4 及圖 5 所示。

由表 2 整理之結果得知，各評鑑指標在枯水年優於複迴歸模式，顯示 GEGA 模式在流量預測中具有不錯之預測效能。

##### 4-2 即時操作系統之運算結果與比較

本研究之即時操作系統，在流量預測上採用 GEGA 模式優選 36 旬(個)最佳函數式，藉由這些函數式以求得 36 旬總入流量預測值，再配合遺傳演算法優選 36 旬水庫放水量，即可完成水庫即時操作之策略。

研究中，選定民國 53 年(枯水年)歷史流況進行分析，並依民國 100 年之各類標的需水量作為本系統之目標需水量以進行水庫之模擬分析。最後並與原有規線操作之運算結果，進行分析比較與探討。

在本研究之即時操作中，流量預測的準確與否，將影響到整體之操作結果。由於研究中所使用的 GEGA 模式，在枯水年之入流量預測，其正確率(PAE)達 0.699 以上，在預測上已具有不錯之成效。其中並透過目標函數的設計，在合理的放水條件下使遺傳演算法在優選放水量時，偏向盡量放水使缺水量(率)降低，讓因缺水而導致的收益損失降至最低。當系統模式傾向於放水時，將可降低年總缺水指數、旬最大總缺水率及各標的用水之年缺水量等，而較規線操作可獲得更佳的结果。

#### 五、結論與建議

##### 5-1 結論

1. 本研究利用進化演算法中之語法式進化(GE)及遺傳演算法(GAs)作結合，建構一套流量預測模式。本模式藉由目標函數值之優劣，自動優選重要之流量因子組合最佳函數式—以預測德基水庫旬計總入流量。
2. 由於即時操作首重入流量預測的準確度，有精確的入流量預測資料，才能獲致良好之操作結果。因此本研究中，除了應用 GEGA 模式預測入流量外，並與複迴歸模式作比較。GEGA 模式在各項評鑑指標的表現上，均較複迴歸模式為佳，顯示本模式在流量預測上具有不錯的預測效能。
3. 本研究是以德基水庫為主要分析案例，並以枯水年作測試。其結果顯示即時操

作能夠因應水文現象高度之不確定性作最佳化之調配，並可客觀的同時考慮供水與發電效益。

## 5-2 建議

- 1.由於水庫之即時操作結果，取決於流量預測之準確性。未來在流量預測上，可改採短時距之流量預測，如以三旬實際流量預測未來三旬流量，如此將可提高流量預測之準確性。除了流量因子外更可加入雨量因子，使其更能有效掌握水庫之入流狀況。
- 2.本研究之即時操作系統乃以遺傳演算法優選其放水量。因此在遺傳演算法各項參數設定及目標函數的設計上，可進一步加以改進與研究，以期達到更理想之操作策略。

## 七、參考文獻

- 1.何淑敏，「渾沌理論與類神經網路應用於濁水溪洪水預測之研究」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文 (2000)。
- 2.邱仕宏，「遺傳演算法於水庫即時操作之應用」，中興大學土木工程研究所碩士論文 (2000)。
- 3.張斐章、陳莉，「模糊推論結合遺傳演算法於建立水庫即時操作專家系統之研究」，農業工程研討會，第 371 - 385 頁 (1993)。
- 4.陳莉，「以物件導向之遺傳演算法優選水庫運用規線之研究」，國立台灣大學農業工程研究所博士論文 (1995)。
- 5.陳頌平，「灰色模糊動態規劃於水庫即時操作之應用」，中興大學土木工程研究所碩士論文 (2000)。
- 6.郭錦文，「德基水庫操作優選模式之研究」，中興大學土木工程研究所碩士論文 (1996)。
- 7.許榮哲，「灰色模糊動態規劃於水庫即時操作之應用」，台灣大學農業工程研究所碩士論文 (1997)。
- 8.萬象，「水庫即時優選操作與風險分析之研究」，國立台灣大學土木工程研究所博士論文 (1990)。
- 9.Chang, F.J. and Chen, L., "Real-Coded Genetic Algorithm for Rule-Based Flood Control Reservoir management," Water Resources Management, Vol. 12, pp. 185-198 (1998).
- 10.Davis, L., "Genetic Algorithms and Simulated Annealing," Vol. 216, Pitman London (1987).
- 11.Freeman, J.J., "A Linear Representation for GP using Context Free Grammars," in Genetic Programming 1998: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Annual Conference. Koza, J.R., Banzhaf, W., Chellapilla, K., Deb, K., Dorigo, M., Fogel, D.B., Garzon, M.H., Goldberg, D.E., Iba, H., and Riolo, R.L., Cambridge, MA: MIT Press, pp. 72-77 (1997).
12. Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, INC. (1989).
13. Gruau, F., "Neural Network synthesis using cellular encoding and the genetic

- algorithm,” Ph.D. Dissertation, Centre d’étude nucléaire de Grenoble, Grenoble, France (1994).
14. Goldberg, D.E. and Kuo, C.H., “Genetic algorithms in pipeline optimization,” *J. Comp. In Civ. Engrg., ASCE*, Vol. 1, No. 2, pp.128-141 (1987).
  15. Goldberg, D.E., Korb, B., and Deb, K., “Messy genetic algorithms: Motivation, Analysis, and first results,” *Complex Syst.*, Vol. 3, No. 5, pp. 493-530 (1989).
  16. Holland, J.H., “Herarchical Descriptions of Universal Spaces and Adaptive Systems,” Technical Report ORA Projects 01252 and 08226, Ann Arbor: University of Michigan, Department of Computer and Communication Sciences (1968).
  17. Holland, J.H., “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” Ann Arbor: The University of Michigan Press (1975).
  18. Horner, H., “A C++ Class Library for Genetic Programming: The Vienna University of Economics Genetic Programming Kernel Release 1.0, Operating Instruction,” Vienna University of Economics, Vienna, Austria (1996).
  19. Koza, J.R., *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, Cambridge, MA: MIT Press (1992).
  20. Koza, J.R., *Genetic Programming : Automatic Discovery of Reusable Programs*, Cambridge, MA: MIT Press (1994).
  21. Koza, J.R., *Genetic Programming : Darwinian Invention and Problem Solving*, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann (1999).
  22. Oliveira, R., and Loucks, D.P., “Operating rules for Multireservoir Systems,” *Water Resource Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 839-852 (1997).
  23. Paterson, N., and Livesey, M., “Evolving caching algorithms in C by GP,” *Genetic Press*, pp. 262-267 (1997).
  24. Sharif, M., and Wardlaw, R., “Multireservoir system optimization using genetic algorithms: case study,” *J. Comp. In Civ. Engrg., ASCE*, Vol. 14, No. 4, pp. 255-263 (2000).
  25. Syswerda, G., “Uniform crossover in genetic algorithms,” in *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Genetic Algorithms*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 2-9 (1989).
  26. Wong, M. and Leung, K., “Applying logic grammars to induce subfunctions in genetic programming,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 737-740 (1995).
  27. Whigham, P., “Grammatically-based Genetic Programming,” in *Proceedings of the Workshop on GP: From Theory to Real-World Application*. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, pp. 33-41 (1995).

## 八、圖表

11001000 | 10100000 | 11001110 | 01100000 | 00011011 | 01001000 | 01101011 |



200 | 160 | 206 | 96 | 27 | 72 | 107 | 62 | 21 | 55 | 88 | 100 | 203 | 41

圖 1 八位元密碼子經解碼為整數值之個體

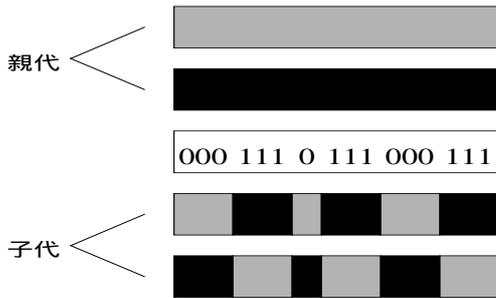


圖 2 均一交換

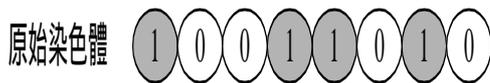


圖 3 第四個位元突變

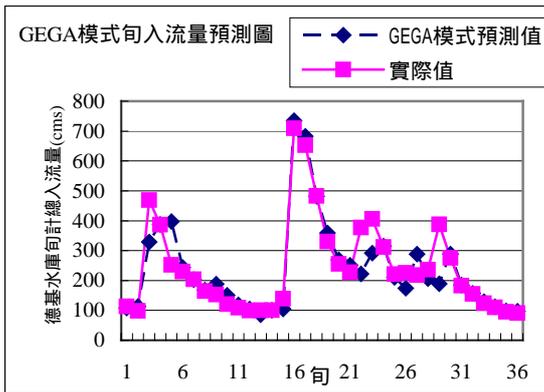


圖 4 民國 53 年(枯水年)GEGA 模式旬入流預測圖

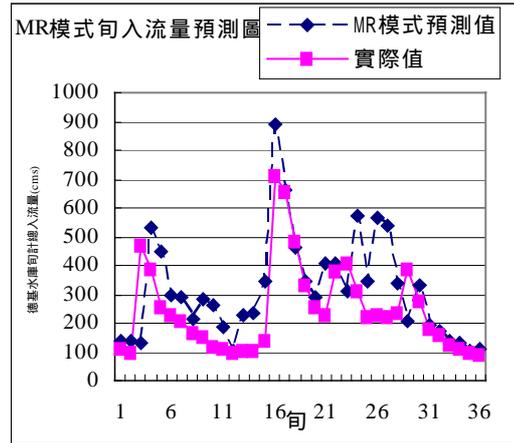


圖 5 民國 53 年(枯水年)MR 模式旬入流量預測圖

表 1 實際流量與前旬流量間之相關係數表

旬數	相 關 係 數
前 1 旬	0.5414
前 2 旬	0.3114
前 3 旬	0.2102
⋮	⋮
前 36 旬	0.1576
平均值	0.4669

表 2 民國 53 年(枯水年)各模式之評鑑指標表

民國 53 年 (枯水年)	GEGA	MR
MAE	34.512	105.774
RMSE	60.868	143.498
CC	0.923	0.724
PAE	0.859	0.568
CE	0.842	0.120