



遺傳演算法與試驗設計原理於地下水井網設計之應用

Application of Genetic Algorithm and Experimental Design on Designing a Groundwater Well Network

國立交通大學
土木工程學系
教授

張良正*

Liang C. Chang

國立交通大學
土木工程學研究所
博士班候選人

朱宏杰

Hone Jay. Chu

國立交通大學
土木工程學研究所
博士班候選人

陳宇文

Yu W. Chen

萬鼎工程
服務股份有限公司
工程師

陳信華

Hsin H. Chen

摘要

本研究目的為應用遺傳演算法(Genetic Algorithm)與試驗設計原理,發展地下水井網最佳設計模式,其中試驗設計原理採用 D-Optimal 準則,即以檢定參數之變異數矩陣行列式值最小為目標,本研究以 D-Optimal 原則建構出最佳井網設計問題的一般化表示式,並應用遺傳演算法結合參數檢定模式計算在一定成本限制下,使檢定參數可靠度最大之最佳井網。參數檢定模式採用美國地質調查局(U.S.G.S.)所發展之 UCODE,除檢定最佳水文地質參數外,並計算參數檢定值之敏感度矩陣(Jacobian Matrix),以求得該參數檢定值之變異數矩陣。本研究並以簡例探討觀測井網設計及抽水井網設計兩類問題,及針對前述兩類問題進行探討,研究結果顯示觀測井應位於抽水井鄰近區域,而抽水井應佈置於導水係數較小地區,如此則可降低推估參數之不確定性。

關鍵詞：遺傳演算法, 參數優選, 試驗設計, 井網設計。

ABSTRACT

This research develops a design model of groundwater well network by integrating the Genetic Algorithms (GA) and experiment design theory. The goal of experiment design is to minimize the parameters uncertainty that is represented by the covariance matrix determinant of the estimated parameters (D-optimal Criteria). Based on the D-Optimal criteria, this study develops a general formulation for the optimal design problem of groundwater well network. The design problem is constrained by a specified cost and is solved by GA and a parameter identification model UCODE to seek a network

*通訊作者, 國立交通大學土木工程學系教授, 300 新竹市大學路 1001 號, lcchang@faculty.nctu.edu.tw

with minimum parameter uncertainty. The parameter identification model estimates the optimal parameter value and its associated sensitivity matrices (the Jacobian matrices). The sensitivity matrices are then used to calculate the parameter covariance matrices. The general problem is simplified into two classes of network design problems; a monitoring network design problem and a pumping network design problem. The results demonstrate that, to decrease the estimated parameter uncertainty, the monitoring wells should be installed near pumping wells and, on the other hand, the pumping wells should be installed in the area with small hydraulic conductivity.

Keywords: Genetic algorithm, Experimental design, Parameter optimization, Monitoring network design.

一、緒 論

1.1 前言

地下水常用的現地試驗如抽水試驗，藉由抽水井抽水一段時間，造成含水層之水位變化，再觀測鄰近之水井中水頭變化，依據水井力學理論，便可以決定含水層之特性(如水力傳導係數及導水係數)。經過試驗所得到地質參數，將有助於瞭解地下水觀測井和含水層之水力特性，以及推估地下水含水層的地質特性，作為未來水資源開發及管理上的依據。

目前由於電腦的進步，欲對區域性地下水流系統，進行管理規劃，其中包括各種可行方案之研擬與評估，地下水數值模式乃是最常用的評估工具之一。為了進行數值模擬，首先工作是決定模式中水文地質參數，但是參數之取得通常由現地試驗方能取得，且試驗結果僅代表該觀測點之參數資訊，然而實際所需為涵蓋整個系統之參數資訊，吾人通常由已知的觀測資料進行推估整個系統之參數值。

再者，由於地下水含水層地質結構變化極為複雜，描述地下水層變化的水文地質參數常有取樣點不足或分佈不均之情況發生，若利用這些已知的資料進行參數值推估檢定，將會存在相當的不確定性。為了降低參數推估的不確定性，可預先規劃之試驗設計，可在於滿足成本的限制下，保證獲得更充分的資訊。因此本研究將以在一定成本之限制考量下，以推估參數之不確定性最小

為目標，決定地下水觀測站網之最佳配置方案。

1.2 文獻回顧

關於這方面的研究國外代表的成果有地下水參數檢定之最佳試驗設計研究(Hsu and Yeh, 1989)及地下水含水層參數檢定最佳參數化維度之研究(Yeh and Yoon, 1981)，及在地下水逆向問題參數結構探討之研究(Sun and Yeh, 1985)等。通常地下水參數的不確定性之推估，可藉由共變異數矩陣組合表示(Yeh and Yoon, 1981)。其參數檢定的準則包含有 D-optimality、A-optimality 和 E-optimality 等準則，所謂 D-Optimal 準則之設計，係指在滿足設計限制條件的情況下，使估計參數之變異數矩陣行列式值為最小之設計，其他的準則：矩陣跡(trace)值為最小之設計為 A-optimality 準則；E-optimality 準則為矩陣之 Spectral radius 最小之設計。其中 Nishikawa and Yeh (1989)即採用 D-Optimal 準則做為估計參數可靠度之準則，進行含水層系統抽水試驗方面之研究等。

Hsu and Yeh (1989)提到試驗設計之整體流程，包含試驗設計及參數檢定，其設計流程是以連續試驗設計降低參數不確定性，首先選定估計參數之初始猜測值，依據 D-Optimal 準則所得之試驗設計，再利用這些設計所得的新觀測資料來做參數檢定，直達到所訂定的收斂準則為止。其研究以最小成本為目標，優選最佳的觀測井網，包含抽水和觀測井的位置及數量。Nishikawa and

Yeh (1989)應用連續試驗設計於抽水試驗，並將整個非線性混合整數規劃的問題，拆解成循序試驗設計及試驗設計子程序兩個設計程序，以循序的方式設置觀測井網，藉由所得的新觀測資料進行參數檢定，直到滿足收斂準則為止。

前述研究利用試驗設計之流程建置觀測井網，雖以最小成本為其目標函數，由於井網設計的設井位置具有不連續性，所以無法利用梯度型演算法處理，只利用傳統的啟發式搜尋法考量井網之設置。但是近年發展的具啟發式的搜尋演算法蓬勃發展，其中包含傳遺演算法、模擬退火演算法和禁忌演算法等，這類搜尋方法易於解決變數不連續性的問題，尤其適用在處理井網設置等問題。相關的國外研究有傳遺演算法於非水溶相液體(NAPL)污染場址之水質監測井網規劃之應用(Sciortino et.al,2002)，以及應用傳遺演算法優選地下水分區參數結構 (Tsai et.al, 2003)等。國內相關研究有應用傳遺演算法於地下水觀測井網規劃之研究(陳，1998)及應用傳遺演算法於擬三維地下水數值模式之參數優選(林，1998)；模擬退火演算法在地下水參數分區與抽水量率定之應用(周，2000)、應用禁忌演算法於優選地下水模式參數之分區(周，2002)等，皆顯示應用啟發式搜尋法之適用性及優點，在使用此類搜尋法下，不但大量提高搜尋效率，並且增加找出全區域最佳解的機率。

綜合上述，本文應用傳遺演算法及結合試驗設計之 D-Optimal 準則，以 Hsu and Yen(1989)之試驗設計流程為基礎，發展一以降低地下水參數優選之不確定為目的，並且能考量同時設置多口井之地下水觀測井網試驗設計模式，使得觀測井網之設計更為彈性及周延。再者，本研究將一般化之試驗設計流程，細分成不同設計目標的設計模式，以使井網設計之應用更加明確。

二、相關理論說明

2.1 遺傳演算法

遺傳演算法的理論基礎可回溯自 1859 年達爾文的「物種演化」(On the Origin of Species by Means of Nature Selection)書中的「物競天擇，適

者生存」的演化及淘汰觀念。在這種由自然選擇的演化機制中，生物界中的每個個體會把它們的特徵傳遞到下一代，而生物的特徵是由生物細胞內的染色體來決定的(染色體即是由基因所組成的基因鏈)，由於每個個體的特徵都不大相同，因此不同特徵的個體對環境的適應力也不大一樣，同時生物的突變及交配也會使得上下代個體之特徵不相同，而適應力較高的個體，即它們的特徵較適合於目前的環境，在後代的數目上由於競爭的緣故，適應力較高的個體的後代數目會比適應力較低的後代數目多，因此這會把整個族群的特徵引導向更適合生存於自然環境的方向發展，在長時間中，這種引導所發生的變異會越來越累積，最後演變至產生一整個特徵能適應於特別生態環境下的種族。

遺傳演算法將欲求解的問題變數或參數以一種類似染色體的資料結構(Chromosome-Like Data Structure)來編碼，並應用一些運算元(Operators)如交換(Crossover)、突變(Mutation)等作運算，運算後產生的子代除了保存親代中具優勢的特質外，也有可能因為基因的交換與突變而比親代的表現更佳。

將這種自然界的選擇方法系統化並發展一可用之模式最早是由密西根大學的 John Holland 教授在 1975 年於 Adaption in Natural and Artificial System 文中所提出，發展出遺傳演算法搜尋技術的基本架構，並且由其學生 David Goldberg 成功地運用在工程問題上。之後，有許多研究亦證實了遺傳演算法在最佳化問題的求解上是十分有效率的，其有以下幾個優點：

1. 可優選連續(continuous)及不連續(discrete)的參數。
2. 在優選的過程中，無須求得目標函數的導數。
3. 搜尋的方式不同於以往的單點搜尋方式，而是採用多點搜尋，因此不易掉入局部最佳解(local optimum)。
4. 可以處理多參數的優選問題。
5. 具有隱平行運算的能力，若在平行電腦中，可大量解省運算的時間。

6. 在優選複雜非線性的問題中，其演算機制可跳脫局部最佳解(local optimum)。
7. 演算優選的結果，可提供一組最佳解，而非只有單一最佳解。
8. 參數優選需經由解碼的過程，而整個演算的機制是在解碼後的參數集合中進行，不是在參數集合本身，因此演算的機制不受函數型能的影響。(Goldberg, 1989；張斐章、陳莉，1993)

以上的優點，使得我們發現當傳統的最佳化方法無法解決一個問題或得到令人滿意的優選結果時，遺傳演算法便是一個擁有很大潛力的優選法。對所有的問題而言，遺傳演算法並非都是一個最佳的方法，例如當在處理一具有凸函數型態，且僅有少量變數之問題時，一般傳統以微分為基礎的搜尋法，即可比遺傳演算法快速的找到最佳解，特別一些簡單優選的問題，傳統的演算法亦都能很快的解決，然而當我們在處理實際的問題時，經常會遇見的是非凸函數且多變數型態或更複雜的問題，這是一般演算法不易解決的，而遺傳演算法具有解決此類問題的能力，且可得到近以全域最佳解。

2.2 地下水流控制方程式

本研究應用之數值模式，乃採用 MODFLOW 程式，該程式為美國地質調查局(USGS)所發展，其利用有限差分法(Block Centered Finite Difference Approach)解水流控制方程式，以下簡單介紹 MODFLOW 之水流控制方程式：

控制方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(1)$$

起始條件 (Initial Condition) 方面：
 $h(x, y, z, 0) = h_0(x, y, z)$

邊界條件(Boundary Condition)方面包含 MODFLOW 程式中所支援包括有水井(Well)、區域性補注量(Recharge)、蒸發散(Evapotranspira-

tion)、河川滲流(River)、及定水頭邊界(General-Head)等重要邊界條件處理單元。

(1) 式中：

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} ：沿主軸 X, Y, Z 方向的透水係數(Hydraulic Conductivity) (LT^{-1})
 h ：壓力水頭(Potentiometric Head) (L)
 Q ：單位體積的體積流率(Volumetric Flux)，代表源匯項(Sources/Sinks) (T^{-1})
 S_s ：孔隙介質的比儲水量(Specific Storage) (L^{-1})
 T ：表時間(T)
 $h_0(x, y, z)$ ：表起始水頭函數(L)

2.3 估計參數之共變異數矩陣

估計參數之共變異數矩陣的推導，經由前人的研究有兩種方式均得到相同結果，包括以多重線性迴歸推導，及以非線性迴歸推導[Yeh and Yoon, 1981; Shan, 1978]，茲將以[Yeh and Yoon, 1981]推導出估計參數之共變異數矩陣之近似式整理為下：

$$Cov(\hat{\tau}) = \frac{J(\hat{\tau})}{N - L} [J_D' J_D]^{-1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中，

$Cov(\hat{\tau})$ ：估計參數的共變異數矩陣
 $\hat{\tau}$ ：參數 T 之估計值
 J ：水位誤差平方和， $J = [h - h^0][h - h^0]$ ， h^0 為 h 之真值
 J_D ：敏感度係數矩陣
 N ：觀測值的數量， L ：參數之維度

三、井網設計模式

在本研究中以 Hsu and Yeh (1989)之試驗設計流程為基礎，考量一定成本下進行井網設置，本身的設計基於可靠性及佈井彈性，可同時設置多口井。本研究發展之最佳井網設計方法，乃是應用 D-Optimal 之試驗設計準則，目的在求取估計參數變異數矩陣行列式值最小，亦即估計參數之不確定性為最小之設井方案。本研究假設含水層具等向性，整體以試驗設計原理為基礎之井網

設計問題，可重新表示成下列型態之優選問題：

目標函數

$$\underset{lp, Q(lp)}{\text{Min}} \quad |Cov(\hat{T})| \quad \dots\dots\dots(3)$$

限制式

$$lp \subset \Omega_p \quad \dots\dots\dots(4a)$$

$$lo \subset \Omega_o \quad \dots\dots\dots(4b)$$

$$num..(lo) \leq no^{\max} \quad \dots\dots\dots(4c)$$

$$num(lp) \leq np^{\max} \quad \dots\dots\dots(4d)$$

$$Q(lp) \leq Q_{\max} \quad \dots\dots\dots(4e)$$

$$J(\hat{T}(lo)) = \underset{T}{\text{Min}} \quad J(T|lo) = \underset{T}{\text{Min}} \quad \left[(h - h^0)(h - h^0) \right]_{lo} \quad \dots\dots\dots(4f)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(4g)$$

其中，

$Cov(\hat{T})$ ：估計參數之共變異數矩陣

lp ：抽水井網之集合

lo ：觀測井網之集合

Ω_p ：候選抽水井位置集合

Ω_o ：候選觀測井位置集合

$\hat{T}$ ：參數優選所得之參數值

J ：水位誤差平方和

$num..(lo)$ ：設置觀測井口數

$num(lp)$ ：設置抽水井口數

$Q(lp)$ ：抽水井網之抽水率

$no^{\max}$ ：設置觀測井口數之上限值

$np^{\max}$ ：設置抽水井口數之上限值

$Q_{\max}$ ：抽水率之上限

由式(3)、(4)之一般化表示式可知，整個問題的決策變數有：觀測井數目及位置、抽水井位置及數目、抽水量、及其參數值等，若同時考量則問題的複雜度將非常高，惟在實際應用上鮮少有此種情況發生，因此本研究乃針對實際應用上

可能面臨的情形，將式(3)、(4)所表達的一般化問題，在不同的假設條件下，式(2)代入式(3)及綜合(3)、(4)，將問題分成下列問題：

(1) 觀測井網設計

目標函數

$$\underset{lo}{\text{Min}} \quad |Cov(\hat{T})| \quad \dots\dots\dots(5)$$

限制式

$$lo \subset \Omega_o \quad \dots\dots\dots(6a)$$

$$num..(lo) \leq no^{\max} \quad \dots\dots\dots(6b)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(6c)$$

$$J(\hat{T}(lo)) = \underset{T}{\text{Min}} \quad J(T|lo) = \underset{T}{\text{Min}} \quad \left[(h - h^0)(h - h^0) \right]_{lo} \quad \dots\dots\dots(6d)$$

(2) 抽水井網設計

目標函數

$$\underset{lp, Q(lp)}{\text{Min}} \quad |Cov(\hat{T})| \quad \dots\dots\dots(7)$$

限制式

$$lp \subset \Omega_p \quad \dots\dots\dots(8a)$$

$$num(lp) \leq np^{\max} \quad \dots\dots\dots(8b)$$

$$Q(lp) \leq Q_{\max} \quad \dots\dots\dots(8c)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(8d)$$

$$J(\hat{T}(lp)) = \underset{T}{\text{Min}} \quad J(T|lp) = \underset{T}{\text{Min}} \quad \left[(h - h^0)(h - h^0) \right]_{lp} \quad \dots\dots\dots(8e)$$

這類問題之目標函數均相同，但是決策變數並不相同，第一類觀測井網設計問題之決策變數為觀測井數目及位置，第二類抽水井網設計問題：其決策變數為抽水井位置及數目、抽水量。本研究應用遺傳演算法於地下水觀測井網設計，其主要的井網設計之流程圖，如圖 1 所示。

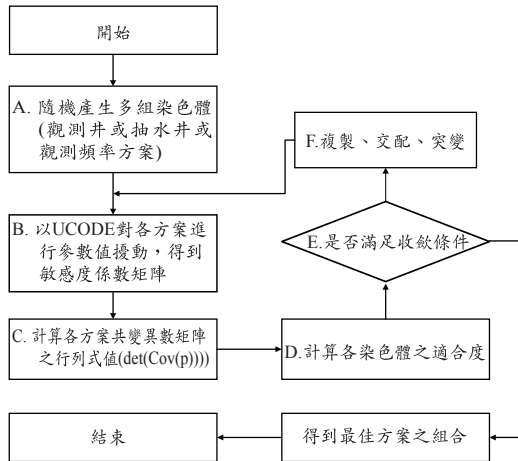


圖 1 井網設計規劃流程圖

茲將各步驟說明如下：

- 佈井系統一開始經由隨機的方式產生多組的佈井方案(或抽水井方案)，每一組方案即為遺傳演算法中的一條染色體。由於不同問題的設計，即在此項程序中決策變數有所差異，所對應之編、解碼變數亦不同。
- 利用 A 產生出來的各佈井方案，開始參數值擾動，進行水頭對參數之敏感度計算，此項工作藉由 UCODE 程式來計算，並得敏感度係數矩陣(Jacobian Matrix)。
- 計算各方案下共變異數矩陣之行列式值。
- 各個染色體(佈井方案)之適合度即共變異數矩陣之行列式值，乃依據文獻中最佳化設計準則(Silvey, 1980)，如 D-Optimal、A-Optimal 等準則來定義目標函數值。其中 D-Optimal 之準則為最常用的方式之一，本研究以 D-Optimal 之準則為主。
- 各個染色體的適合度計算得到之後，系統便可判斷整個演算是否滿足收斂條件，若滿足則收斂得到最佳解，即最佳的佈井方案，因此整個演算結束；若不滿足則進行下個步驟。當系統仍未收斂時，則各染色體便開始進行遺傳演算，即對每代的染色體，利用遺傳演化的機制(包括染色體的複製、交配及突變)，產生出更佳的下一代之多組染色體，之後演算回到步驟 C。

本研究之遺傳演算法所採用之參數，參考陳(2003)：族群數為 500 條染色體，複製採用比較選取法(Tournament Selection)，交配採用均一化交配，交配率為 0.8，突變率為 0.01。

四、數值算例

針對整個試驗設計問題而言，式(3)~(4)，如前所述，影響參數不確定的因素眾多，本研究為充分了解其內在機制，將原問題簡化為兩類較簡單之問題，本章將針對此兩類問題以簡化的案例，探討影響佈井之因素。

4.1 最佳觀測井網設計

抽水試驗設計包含抽水井網與觀測井網之規劃，本小節則以抽水井網與既有之觀測井網為已知條件，進行最佳觀測井網之設計。設計案例為一個二維拘限含水層(2-D confined aquifer)，含水層厚度為 10(m)厚，討論區域格網切割則以南北方向切割為 13 列，東西方向切割為 19 行，並採用 500 公尺等間距的格網，邊界條件在最北與最南邊為不透水邊界，東邊與西邊為定水頭邊界，定水頭高分別為 50(m)及 20(m)。另外，假設目前模擬區域已存在四口觀測井，若以格網左下角為原點，其位置分別位於(5, 4)、(5, 10)、(15, 4)、(15, 10)四個格點上，分別為圖 1 之觀測井 1~4。本研究以不同之觀測井集合進行抽水試驗，從中挑選試驗結果不確定性最低之觀測井集合，優選方法則利用遺傳演算法進行觀測井網設計，模擬區域扣除邊界網格與四口觀測井，共餘 183 個網格，將之視為候選觀測井集合，以二位元染色體進行編碼，0 代表該位置不設置觀測井，1 則代表設置觀測井。

為探討抽水井抽水位置對於觀測井網設計之影響，本研究設計三個案例探討之，在(5,7)、(10,7)與(15,7)位置分別設置抽水井(如表 1 與圖 2~4 上黑色網格所示)，研究區域之水文地質條件為等向均值，其參數均設定為 $T=3.0 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$ 。

本研究區域原已設置四口觀測井，由於觀測井多寡與抽水試驗建置成本息息相關，本研究以五口觀測井為最大觀測井數量限制，亦即若包含

表 1 案例 1~3 設計案例之優選結果

	抽水井位	新設立之觀測井位
案例 1	(5,7)	(4,7),(5,6),(5,8),(6,6),(6,7)
案例 2	(10,7)	(9,7),(9,8),(10,8),(10,6),(11,7)
案例 3	(15,7)	(14,6),(14,7),(15,6),(15,8),(16,7)

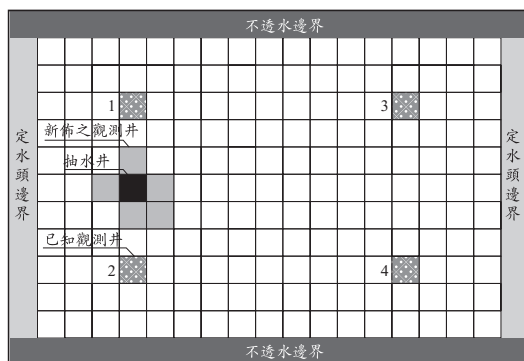


圖 2 佈井位置圖(案例 1)

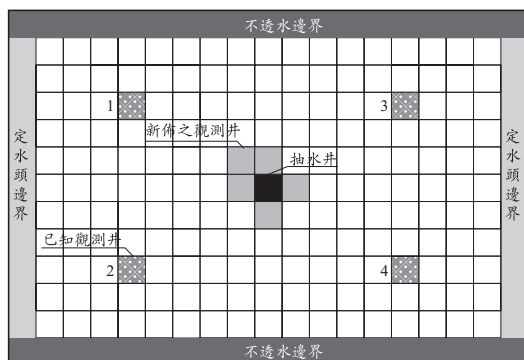


圖 3 佈井位置圖(案例 2)

原本建置之四口觀測井，本區域最多存在九口觀測井。在此以遺傳演算法求取最佳之設井位置組合，其結果如圖 2~4 所示。可以明顯發現最佳觀測井位置是隨著抽水井移動，由於抽水井之抽水行為造成相鄰區域之水位對參數的敏感度增加，因此觀測井多設置在敏感度大的地方。由此 3 個案例得知，抽水井可使區域之敏感度值增加，因此新設立之觀測井會集中在抽水井附近。表 2 顯示新設觀測井的最大水位敏感度均等於所有候選井之最大水位敏感度，由此可知利用遺傳演算法優選觀測井，每一案例均可優選出水位敏感度最大的觀測井，證明遺傳演算法確實能有

表 2 觀測井敏感度之比較

	案例 1		案例 2		案例 3	
	井位	敏感度	井位	敏感度	井位	敏感度
新設觀測井 1	(4,7)	57.87	(9,7)	83.54	(14,6)	55.67
新設觀測井 2	(5,6)	63.07	(9,8)	72.53	(14,7)	66.63
新設觀測井 3	(5,8)	63.07	(10,6)	84.27	(15,6)	63.07
新設觀測井 4	(6,6)	55.67	(10,8)	84.27	(15,8)	63.07
新設觀測井 5	(6,7)	66.61	(11,7)	83.54	(16,7)	57.85
所有候選井之最大敏感度		66.61		84.27		66.63

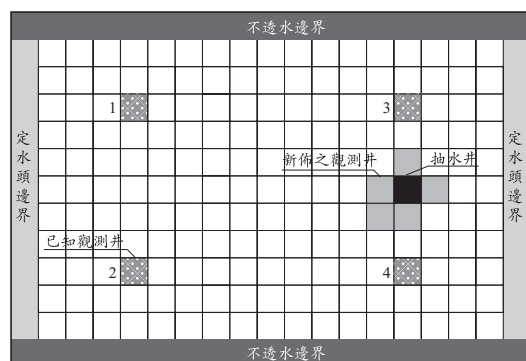


圖 4 佈井位置圖(案例 3)

效率的優選出最佳觀測井。

4.2 最佳抽水井網設計

本節則以最佳抽水井網設計為案例探討重心，研究區域原已設置四口觀測井，欲藉由試驗設計方式，找尋最佳之抽水井位置(案例 4 與案例 5)。此外，本小節另外設計一實驗對照組(案例 6)，任意挑選一口抽水井進行抽水試驗，藉以比較經過最佳設計之抽水井網與隨意配置之抽水井網對於抽水試驗之影響，並進一步比較利用兩組試驗數據之參數推估結論。

本節模擬區域之水文地質參數分為兩區，其參數值分別為 $T_1=2 \times 10^{-2}$ 與 $T_2=4 \times 10^{-2} (\text{m}^2/\text{s})$ ，網格尺寸、數目、邊界條件及既有四口觀測井位置則與 4.1 節相同。

本研究以 0.5 cms 為抽水井之抽水率，由 183 個候選抽水井集合中進行挑選，選取最佳之抽水井位置。當觀測井井網不改變之條件下，案例 4

表 3 案例 4 與案例 5 之抽水井配置與參數推估結果

	新設立之抽水井位	抽水井坐落的區位	推估參數值 (m^2/s)	
案例 4	(5,9)	T_1	1.98×10^{-2}	3.82×10^{-2}
案例 5	(4,3)(6,6)	T_1	1.98×10^{-2}	3.84×10^{-2}

之抽水井設計量為 1 口、案例 5 之抽水井設計量為 2 口。由上述所提的條件下，進行遺傳演算法優選抽水井網設計，模擬區域扣除邊界網格與四口觀測井，共餘 183 個網格，將之視為候選抽水井集合，以二位元染色體進行編碼，0 代表該位置不設置抽水井，1 則代表設置抽水井。

利用設計之觀測井與抽水井集合，進行抽水試驗之模擬，並於選定之觀測井取得抽水試驗數據，利用試驗數據以 UCODE 軟體進行水文地質參數之檢定，表 3 所列為案例 4 與案例 5 之最佳抽水井配置與參數推估結果。

(1) 抽水井設計目標為 1 口(案例 4)

本案例之最佳抽水井應設置在(5,9)(如圖 5 所示)，座落於 T_1 參數分區內，由水位變化對導水係數之敏感度進行探討，較小之 T_1 參數較為敏感，換句話說，導水係數較小時，若受到些微擾動，其水位改變較大。因此抽水井應配置於敏感度較大處，亦可減少系統之不確定性。

本案例之參數檢定結果分別為 1.98×10^{-2} ， $3.82 \times 10^{-2}(\text{m}^2/\text{s})$ ，與原定之 2×10^{-2} ， $4 \times 10^{-2}(\text{m}^2/\text{s})$ 數值誤差分別為 1% 與 4.5%。

(2) 抽水井設計目標為 2 口(案例 5)

本案例之最佳抽水井應設置在(4,3)、(6,6)(如圖 6 所示)，所配置之井位均座落於 T_1 參數分區，其原因與先前所述相同。本案例之參數檢定結果分別為 1.98×10^{-2} ， $3.84 \times 10^{-2}(\text{m}^2/\text{s})$ ，與原定之 2×10^{-2} ， $4 \times 10^{-2}(\text{m}^2/\text{s})$ 數值誤差分別為 1% 與 4%。

(3) 隨意選取一抽水井(案例 6)

依照案例 4 相同之水文參數與抽水量，由其中隨意挑選一抽水井，本案例之水位觀測值則由 MODFLOW 模式正向模擬，藉以與案例 4 之推估成果進行比較。由於本案例為係利用數值模式來進行抽水試驗之模擬，其觀測值係由數值模式正向模擬而得，本身並不存在任何量測誤差，若

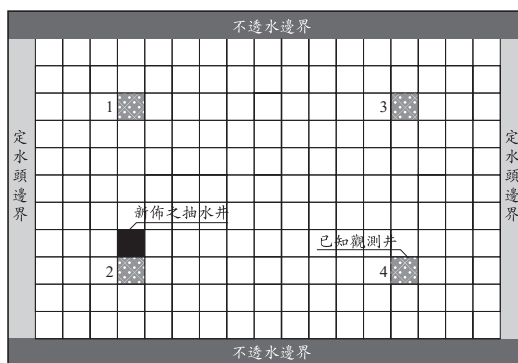


圖 5 佈井位置圖(案例 4)

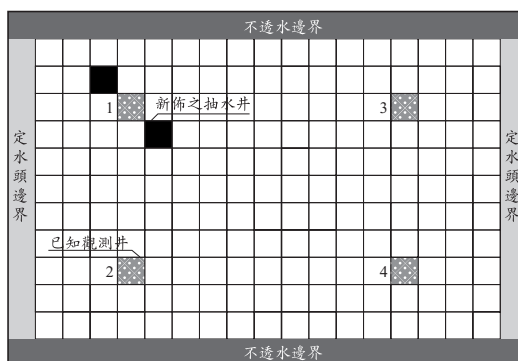


圖 6 佈井位置圖(案例 5)

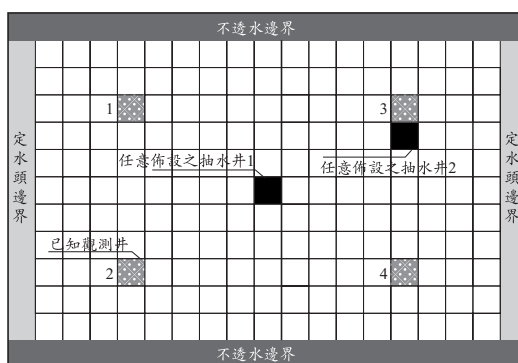


圖 7 佈井位置圖(案例 6)

與現地抽水試驗相比有極大之差異。

本設計案例係驗證試驗設計模式使用與否，是否影響後續抽水試驗所得數據與後續參數檢定所得之參數值，因此隨意選定一抽水井位，在此本案例選定抽水井位(10,7) (抽水井位置如圖 7 所示)，並將參數真值、抽水率，給定 MODFLOW 模式正向模擬，所得水位另行以人

表 4 各抽水井佈置位置優選參數值

		最佳配置	任意位置 1	任意位置 2	真值(m ² /s)
抽水井位置		(5,9)	(10,7)	(15,5)	
T ₁	數值	2.06×10 ⁻²	1.03×10 ⁻²	1.73×10 ⁻²	2.00×10 ⁻²
	誤差百分比	3.0%	48.5%	13.5%	
T ₂	數值	4.12×10 ⁻²	2.26×10 ⁻²	3.52×10 ⁻²	4.00×10 ⁻²
	誤差百分比	3.0%	43.5%	12.0%	

工方式加入噪度(noise)，噪度的產生方式利用常態分佈之隨機函數，其平均值為零，標準差在此選用 0.1 公尺，可得具備某種程度擾動之觀測值。利用此一觀測值進行參數檢定，推估所得之參數分別為 1.03×10⁻², 2.26×10⁻² (m²/s) (如表 4 所示)，與系統真值之 2×10⁻², 4×10⁻² (m²/s) 相比，其推估誤差分別為 48.5%與 43.5%(本案例為案例 6.a)。

以此方式再次驗證，選定抽水井位(15,5)(抽水井位置如圖 7 所示)，進行相同之計算程序，推估所得之參數分別為 1.73×10⁻², 3.52×10⁻² (m²/s) (如表 3 所示)，與系統真值之 2×10⁻², 4×10⁻² (m²/s) 相比，其推估誤差分別為 13.5%與 12%(本案例為案例 6.b)。若以案例 4 所得之最佳抽水井位座落於(5,9)，以參雜噪度(人工擾動)之觀測值，進行相同之計算程序，推估之參數分別為 2.06×10⁻², 4.12×10⁻² (m²/s) (如表 4 所示)，與系統真值之 2×10⁻², 4×10⁻² (m²/s) 相比，其推估誤差分別為 3%與 3%(本案例為案例 6.c)。

比較案例 6.a、6.b 與 6.c 三者，以 6.c 之推估結論最為接近真值，可以發現抽水井配置之優劣將影響後續參數檢定結果，也顯示出經由井網佈置模式之抽水試驗成果較隨意佈置為佳。

綜合由 4.1 與 4.2 兩小節之井網設計案例來看：佈設觀測井時，會有靠近抽水井的趨勢(即敏感度大的位置)；佈設抽水井時，雖亦會接近既有之觀測井，但亦有選擇較敏感區域的傾向，可知若增加敏感度係數值，則可使共變異數矩陣行列式值降低。對增設觀測井而言，因其並不改變流場，亦即不改變計算水位值，因此合理的佈井位置，乃是在原先水位變化之敏感處。另一方面，抽水井的設置將可改變流場而使附近水位對參

數敏感度增加，因此最有效率的做法是抽水井配置在導水係數較小之分區內。

五、結 論

1. 本研究整合遺傳演算法與試驗設計理論，發展出以推估參數不確定性最低之最佳試驗設計模式，並以此模式探討觀測井最佳佈置與抽水井最佳佈置。
2. 於觀測井網佈置案例中，可發現觀測井應佈置於抽水井附近，主要由於抽水井使周遭之參數敏感度增加，可降低推估參數之不確定性。
3. 於抽水井網佈置案例中，由於抽水會造成敏感度之增加，而較小之導水係數會有較大之敏感度增加量，因此抽水井應佈置於導水係數較小區域。
4. 本研究之目標函數為敏感度矩陣之函數，而敏感度乃經由數值模式計算所得，因此可反應系統的物理狀況，如源/匯點位置、強弱及邊界條件等，此乃其他基於統計理論(如地質統計)的井網設計模式未及之處。
5. 由案例驗證，應用本試驗設計模式所優選之最佳佈置方案，可有效降低推估參數之不確定性。

參考文獻

1. 陳信華，“應用遺傳演算法與試驗設計原則於地下水觀測井網設計”，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，(2003)。
2. 周俊安，“禁忌演算法應用於優選地下水模式參數之分區”，國立台灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文，(2002)。

3. 周哲正, “模擬退火演算法在地下水參數分區與抽水率之應用”, 國立台灣大學農業工程研究所碩士論文, (2000)。
4. 蔡威平, “應用遺傳演算法與參數優選於地下水最佳觀測井網設計”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, (1999)。
5. 陳宇文, “類神經網路於入滲池最佳化設計之應用”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, (1999)。
6. 陳宏嘉, “遺傳演算法於地下水觀測井網規劃之應用”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, (1998)。
7. 林明杰, “遺傳演算法應用於擬三維地下水數值模式之參數優選”, 國立交通大學土木工程研究所碩士論文, (1998)。
8. 陳世弘, “二維地下水流系統污染傳輸模式參數檢定之最佳試驗設計”, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文 (1998)。
9. 許澤宇, “二維地下水流系統參數檢定之最佳試驗設計”, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文 (1997)。
10. 張斐章、陳莉, “遺傳演算法於專家系統中參數優選之研究”, 農業工程學報, 39 卷 2 期, 第 1~12 頁, (1993)。
11. Bear, J., “Hydraulics of Groundwater”, McGraw-Hill, New York, (1979).
12. Cieniawski, S. E., J. W. Eheart and S. Ranjithan, “Using genetic algorithms to solve a multiobjective groundwater monitoring problem”, Water Resources Research, V.31(2), p.399-409, (1995).
13. Cooley, R.L., “A comparison of several methods of solving nonlinear regression groundwater flow problem”, Water Resources Research, V.21(10), p.1525-1538, (1985).
14. Frind, E. O., and G. F. Pinder, “Galerkin Solution of the Inverse Problem for Aquifer Transmissivity”, Water Resources Research, V.9(5), p.1397-1410, (1971).
15. Goldberg, D.E. “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison-Wesley Publishing Company Inc, (1989).
16. Hsu, N. S. and William W-G. Yeh, “Optimum Experimental Design for Parameter Identification in Groundwater Hydrology”, Water Resources Research, V.25(5), p.1025-1040, (1989).
17. McKinney, D. C. and M. D. Lin, “Genetic algorithm solution of Groundwater management models”, Water Resources Research, V.30(6), p.1897-1906, (1994).
18. Neuman, S. P. and S. Yakowitz, “a Statistical Approach to the Inverse Problem of Aquifer Hydrology, 1, Theory”, Water Resources Research, V.15(4), p.845-860, (1979).
19. Nishikawa, T, and William W-G. Yeh, “Optimal Pumping Test Design for the Parameter Identification of Groundwater System”, Water Resources Research, V.25(7), p.1737-1747, (1989).
20. Ne-Zheng Sun, “Inverse Problem in Groundwater Modeling”, Kluwer Academic Publishers, (1994).
21. Poeter, E. P. and M. C. Hill, “DOCUMENTATION OF UCODE, A Computer Code for Universal Inverse Modeling”, U. S. Geological Survey Open-File Report 98-4080, (1998).
22. Ritzel, B. J., J. W. Eheart and S. Ranjithan, “Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution problem”, Water Resources Research, V.30(5), p.1589-1603, (1994).
23. Sciortino A, T.C. Harmon, and W.W.G. Yeh, “Experimental design and model parameter estimation for locating a dissolving dense nonaqueous phase liquid pool in groundwater”, Water Resources Research, V.38 (5): art. no. 1057, (2002).
24. Silvey, S. D., “Optimal Design – An

- Introduction to the Theory for Parameter Estimation”, Chapman and Hall, New York, (1980).
25. Sun, N. Z., and William W-G. Yeh,, “Identification of Parameter Structure in Groundwater Inverse Problem”, Water Resources Research, V.21(6), p.869-883, (1985).
 26. Sun, N. Z., and William W-G. Yeh,, “A Stochastic Inverse Solution for Transient Groundwater Flow: Parameter Identification and Reliability Analysis”, Water Resources Research, V.28(12), p.3269-3280, (1992).
 27. Tsai, F.T.C., N.Z. Sun, and W.W.G. Yeh, ”A combinatorial optimization scheme for parameter structure identification in ground water modeling”, GROUND WATER, V.41 (2), (2003).
 28. Wang, M., and C. Zheng, “Optimal Remediation Policy Selection under General Condition”, Groundwater, V.35(5), p.757-764, (1998).
 29. Wang, M., and C. Zheng, “Groundwater Management Optimization using Genetic Algorithms and Simulated Annealing: Formulation and Comparison”, J. the American Water Resources Association, V.34(3), p.519-530, (1998).
 30. Wang, Q. J., “The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models”, Water Resources Research, V.27(9), p.2467-2471, (1991).
 31. Wardlaw, R. and M. Sharif, “Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation”, J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, V.125(1), p.25-33, (1999).
 32. Yeh, W. W-G., “Review of parameter identification procedures in ground-water hydrology – The inverse problem”, Water Resources Research, V.22(2), p.95-108, (1986).
 33. Yeh, W. W-G., and Y.S. Yoon, “Parameter Identification with Optimal Dimension in Parameterization”, Water Resources Research, V.17(3), p.664-672, (1981).

收稿日期：民國 94 年 11 月 21 日

修正日期：民國 95 年 1 月 16 日

接受日期：民國 95 年 1 月 20 日