

禁區搜尋法在機組排程決策之應用

Tabu search approach to optimal unit commitment decision

張振松¹

南開技術學院資管系²

E-mail: cschang@nkc.edu.tw

摘要

本文以禁區搜尋法(Tabu Search, TS)來進行電力系統之最佳機組排程決策(Unit Commitment Decision, UCD)；使得電力系統運轉成本能降至最低。本文以台灣電力公司之大型實際系統(Tai-Power System)為例，以 TS 進行最佳排程決策，以證實該決策方法之發展潛力與實用價值。結果證實禁區搜尋法之最佳化技巧，確實能在短時間內就能求得令人滿意的收斂值，是解決組合性最佳化問題的有效方法。

關鍵字：機組排程決策、禁區搜尋法

Abstract

This paper adopted the Tabu search (TS) approach to optimal Unit Commitment Decision (UCD) in order to reduce the total operation cost of power systems. In this paper, we used a large-scale practical power system, Taiwan Power System (Tai-Power System) as example approach to the optimal UCD by TS, to indicate its high potential and practical values. From the test results, it can be found that the tabu search is the most effective technique to solve the combinatorial optimization problem.

Keywords: unit commitment decision, tabu search

¹ Chen-Sung Chang

² DTSartment of Information Management, Nan-Kai College

壹、緒論

一、研究背景與動機

隨著科技的進步與經濟的成長，帶動工商業的蓬勃發展與人民生活水準的提升，人類對電力的需求量與日俱增，用電量屢創新高。台灣地區的電力需求更是以驚人的速率成長，並潛藏限電危機及電廠跳機的威脅。

目前台灣對電力吃緊的解決之道，可分為「開源」與「節流」兩方面。在「開源」方面，為積極的興建大型的發電機，以開發新電源，才能應付快速成長的電力需求量。但由於電廠用地之取得越來越不容易，且環保意識高漲，以致新電廠的興建易遭抗爭而停滯。因此在「節流」方面，更顯得其重要性，如何運用現有電力能源，做最適當的調度與運用，在最經濟有效的前提下，供應穩定而可靠的電力給用戶，實現為現代電力供應業者的當務之急，也是本文進行最佳機組排程決策(Unit Commitment Decision, UCD)研究之動機。

台灣地區電力供應系統之主要發電方式，依機組的特性概分為火力發電，包括核能、燃煤、燃油和天然氣等火力發電機組，與水力發電，包括獨立水力電廠、串接電廠和抽蓄電廠。而其中核能機組因燃料成本低、發電容量大及反應速度緩慢，通常維持定額的發電量並用以負擔基載(base load)部份的發電，是固定成本；燃煤、燃油和天然氣等機組，則依其效率、燃料成本及反應速度，而分別當成基載、中載或尖載(peak、load)機組來使用，是一般經濟調度為主的機組；而水力電廠由於沒有燃料成本且反應速度快，但卻受限於水力資源供應量的限制，一般當作尖載時段發電之用；抽蓄電廠則利用離峰時段較廉價的電力來抽水而於尖峰時段放水發電，以取代尖峰時段較昂貴的機組發電。

由於台灣地區缺乏天然水力資源，致水力電廠的發電量僅佔全部電力供應的一小部分，因此，本文之機組排程問題，係針對火力發電機組之調度規劃，暫不考慮水力發電機組。

所謂機組排程問題，是在決定各發電組於各規劃時段之運轉或停機狀態及發電量，並同時滿足系統負載需求及各種限制條件，以使得總發電成本為最低。由每部發電機組在每個時段中都可能有的運轉或停機兩種狀態，也就是開機或關機兩種狀態；以台灣電力公司之大型實際系統(Tai-Power System)40部發電機組為例，單是在每個時段中可能的狀態組合便有 2^{40} 種。這是很大的數目，若再加上實際電力系統之機組調度排程時，許多操作上的限制條件，將使得機組排程問題更形複雜。

二、研究目的

本文主要研究目的，主要係以考量各種最佳化數學模式之特點，提出以隨機法(Stochastic Approach)中之禁區搜尋法(Tabu search, TS)求解電力供應系統之發電機組排程問題，改善解的品質及求解效率。

三、研究文獻回顧

機組排程問題是屬於大型、非線性及混合整數之限制式組合最佳化問題(combinatorial optimization problem with constrains)。對實際電力系統之機組排程而言，欲求得其精確解之唯一方式為窮舉法(complete enumeration)，但此法可能會花費很多之電腦計算時間及記憶體，致求解效率較低而不實用[1]。因此，有關機組排程問題，現今許多研究者致力於一些提高求解效率且能使解答品質接近最佳解(near-optimal solution)之研究。文獻上，求解機組排程問題之常用方法如下：

- 優先順序法 (priority list method) [2]
- 先將機組依燃料成本高低順序排列，當負載需求增加時，燃料成本低之機組，優先考慮併聯運轉；當負載需求減少時，燃料成本高之機組，優先考慮解聯離線。此種解法原理簡單且計算迅速，但解答的品質較粗糙，較難趨近最佳解。
- 動態規劃法 (dynamic programming) [3][4]
- 考慮每個時段之機組狀態組合解空間，找尋一條最佳路徑，即為機組排程之解答。此種解法、計算頗為簡潔、快速且富彈性，但由於需佔用很大的電腦記憶體容量，而可能有“維度的詛咒” (curse of dimensionality) 現象，故本法較不適用於大型機組排程之解法。
- 整數規劃法 (integer programming) [5]
- 利用作業研究 (operation research) 中的線性規劃 (linear programming) 技巧來求解，但由於此法需作一些線性的假設，而限制了解答空間的範圍。
- 支界法 (branch-and-bound) [6]
- 支界法能有系統的搜尋有限個可行解 (feasible solution) 之解答空間，利用分支 (branch) 與定界 (bound) 之方式來求得上限 (upper bound) 和下限 (lower bound) 以縮小搜尋範圍，進而求得較佳可行解。
- 類神經網路 (artificial neural network) [7][8]
- 為一種模擬生物神經網路的演算法，籍著學習法則，來修正網路權值及類神經元 (artificial neuron) 界限，以使誤差函數 (error function) 得以最小，亦即使網路的推論運作能夠符合訓練樣本之要求。
- 模擬退火法 (simulated annealing, SA) [9]
- 為一種模擬物理學上物質結晶退火程序的一種隨機性最佳化演算法，將問題的解空間表示成粒子的結晶狀態。在物質結晶過程中，如果溫度下降的速度夠慢時，則粒子間活動會達一熱平衡 (thermal equilibrium)，直到冷凍狀態，粒子間有一高密度結晶格結構，使得系統的能量最低，此類比於最佳化問題之最佳解。
- 基因演算法 (genetic algorithm, GA) [10][11]
- 為一種模擬自然界中生物遺傳及進化的行為，將問題的解空間表示成生物學上的染色體 (chromosomes)，依據達爾文「物競天擇，適者生存」的進化論，透過複製 (reproduction)、交配 (crossover) 和突變 (mutation) 的進化機制來繁衍下一代。世代演進的結果，最適者之染色體將存活下來，此最佳化問題之最佳解。

四、研究方法

機組排程決策，是在決定各發電組於各規劃時段之開機或關機狀態及發電量，是一種組合最佳化問題。Glover 於 1989 年及 1990 年所發表的論文[12,13]，奠定了禁區搜尋法(Tabu Search, TS)的基礎；並在 1993 年將 TS 作一完整且明確的數學上的分析而成既嚴謹且詳盡的最佳化演算法，而發揚光大[14]。1991 年 Bland 首先運用 TS 處理最佳化問題[15]，接著 TS 就被積極地使用在組合最佳化問題上[16-22]。

TS 和基因演算法 (GA) 一樣是模擬生物進化過程之隨機搜尋最佳化方法，使用隨機運算來取代確定法則去搜尋合適的解。TS 具有快速與反向隨機搜尋能力，有別於其他進化演算法之搜尋方式；TS 在尋優過程中會不斷的產生新的父代解，再由

父代的解產生子代新解，然後從子代新解檢查是否有比搜尋到目前為止最佳解更好的解。作為 TS 父代解是不可以在禁區之內(非禁區)；若在禁區之內，則須經過一定的規則(希望法則)才能作為父代解。因為整個過程是採用隨機方式加以搜尋，因此可以避免掉入局部最佳解之內。由於，基因演算法在處理最佳化問題時，若其編碼所使用的字串長度不夠，會有只能搜尋到最佳解附近問題發生；另外當目標函數的參數增多時，也會影響 GA 的執行速度。因此，本文採用禁區搜尋法(TS)來解決電力系統之機組排程決策(UCD)問題。並於第三介紹本研究方法—禁區搜尋法。

本文共分為五節，其內容綱要如下：第二節為問題描述與數學模式；第三節則介紹以禁區搜尋法進行機組排程最佳化之過程。接著，第四節將以台灣電力公司之大型實際系統為例來測試。最後，針對本文之特點於第五節作一結論並展望未來。

貳、問題描述與數學模式

一、問題描述

電力供應業者最終目標為提供價廉且可靠的電力給用戶使用。故如何隨著尖、離峰電力需求的週期性變化，適當的規劃各發電機組的開機或關機時間及發電量，將可有效率的降低總發電成本及提高經濟效益。因此“機組排程決策”之目的，是在決定各發電機組之最佳運轉發電排程，以使得總發電成本為最低。

故本文之最佳化機組排程問題是在決定各機組的最佳發電策略，並同時滿足系統負載需求及各種限制條件。茲將本文機組排程決策之目標函數及限制條件說明如下：

(一)目標函數(objective function)

機組維修排程決策的目標，是在決定

各發電機組於各規劃時段之運轉或停機狀態及發電量，使得「總發電成本」為最低。

(二)限制條件(constraints)

1、電力供需平衡(power balance)

在任何時段，系統各發電機組之發電量總和需滿足負載預測所得的負載需求及系統損失。

2、充裕備轉容量(spinning reserve)

所謂備轉容量，係指系統可利用之發電容量的餘裕，即系統在該時段最大可用之發電量減去系統負載需求及損失後，所剩餘可利用之發電容量。為確保系統之供電可靠度，需有足夠的備轉容量，才能防止發電機組因突發狀況(故障或跳機)而無供電；或負載突然增加而產生供電不足現象。

3、機組發電量限制(generation limit)

為了延長發電機組運轉壽命，對於每一部發電機組之運轉，需考慮其發電量限制。

4、最小運轉時限(minimum up time)

由於受到發電機組機械特性之限制，因此發電機組一經啟動，併入系統運輸供電後，必須連續運轉一段時間方可考慮關機，不可啟動後立即關機。

5、最小停機時限(minimum down time)

由於發電機組溫度、壓力等的改變係靠漸進方式，因此系統解聯停機之發電機組，至少必需連續停機一段時間，方可考慮再行啟動併入系統運轉供電。

二、機組排程決策數學模式

本文之機組排程決策，是藉由 TS 來產生最佳的發電排程決策，並在符合系統之限制條件下，以「總發電成本為最低」當成排程決策之目標函數。所以，對一含有 n 個發電機組之系統，目標函數及限制條件

之數學模式可表示如下：

(一)目標函數(objective function)

$$\text{Min } \Phi(X, P)$$

其中

$$\Phi(X, P) = \sum_{i=1}^N \sum_{h=1}^H FC_i(P_{ih}) * X_{ih} \quad (1)$$

$\Phi(\bullet)$: 總發電成本函數

X : 發電機組狀態向量

P : 發電機組發電量之向量

i : 第 i 部發電機組

h : 第 h 時段

N : 發電機組之總數量

H : 機組排程之總時段

P_{ih} : 第 i 部發電機組在 h 時段之發電量

X_{ih} : 第 i 部發電機組在 h 時段之關/關機狀態

($X_{ih}=1$ 表開機狀態, $X_{ih}=0$ 表關機狀態)

$FC_i(\bullet)$: 第 i 部發電機組之成本函數{註一}

{註一}: 不同發電機組為了做經濟調度, 必須將每部發電機之生產成本(發電成本)以其輸出電力函數表示。生產總成本包括燃料、工資及維護費等。上述費用一般僅對可變動的燃料成本感興趣; 亦即我們將生產成本簡化為燃料成本, 因其他成本費用為固定支出。典型的燃料成本曲線, 縱軸單位為每小時 MBtu 輸入燃料, 若乘以燃料價格(元/MBtu)就成為每小時元單位, 橫軸則用百萬瓦輸出電力作單位。基本上, 係先量取發電機之輸出電量及單位時間之輸入燃料量, 再以電腦模擬出燃料成本曲線。為簡化問題, 一般火力機組之成本函數皆以下二次式表示:

$$FC_i(P_{ih}) = a_i P_{ih}^2 + b_i P_{ih} + c_i$$

其中, a_i, b_i, c_i : 表發電機燃料成本之係數

(二)限制條件(constraints)

1、電力供需平衡(power balance)

$$\sum_{i=1}^N P_{ih} X_{ih} \geq D_h \quad (2)$$

其中

D_h : 第 h 時段之負載需求

2、充裕備轉容量(spinning reserve)

$$\sum_{i=1}^N X_{ih} * P_i(\text{max}) \geq D_h + R_h \quad (3)$$

其中

R_h : 第 h 時段之備轉容量需求

$P_i(\text{max})$: 第 i 部發電機組之最大發電量

D_h : 第 h 時段之負載需求

3、機組發電量限制(generation limit)

$$P_i(\text{min}) \leq P_{ih} \leq P_i(\text{max}) \quad (4)$$

其中

$P_i(\text{min})$: 第 i 部發電機組之最小發電量

4、最小運轉時限(minimum up time)

$$X_{ih}=1 \text{ for } t \geq up_i \quad (5)$$

其中

up_i : 第 i 部發電機組之最小運轉時限

5、最小停機時限(minimum down time)

$$X_{ih}=0 \text{ for } t \geq down_i \quad (6)$$

其中

$down_i$: 第 i 部發電機組之最小停機時限

參、禁區搜尋法(TS)

禁區搜尋法(TS)乃基於達爾文進化論”物競天擇，適者生存，不適者淘汰”之精神，以優勝劣敗，去腐存菁的觀念發展而來。TS 在尋優過程中必須不斷的產生新的父代解，再由父代的解產生子代新解，然後從子代新解檢查是否有比搜尋到目前為止最佳解更好的解。作為 TS 父代解是不可以在禁區之內(非禁區)；若在禁區之內，則須經過一定的規則(希望法則)才能作為父代解。因為整個過程是採用隨機方式加以搜尋，因此可以避免掉入局部最佳解之內。以禁區搜尋法進行機組排程最佳化之過程，大致可以分為下列三個階段：

一、染色體表示方式

TS 執行時，首先將問題的決策變數表示成一個族群之染色體。也就是說，染色體常以一組有限長度的字串集表示。機組排程問題之族群之染色體，其最簡單而直接的表示法，是以圖 1 所示之預定排程矩陣當作族群之染色體格式。

		時段(小時)						
		1	2	...	h	...	H-1	H
機	1	1	0	....	1	....	0	1
	:	:	:	:	:	:	:	:
	:	:	:	:	:	:	:	:
	i	1	1	....	0	....	1	1
	:	:	:	:	:	:	:	:
	N	0	1	....	1	....	1	0

圖 1 預定排程矩陣

其中，1 表開機狀態，0 表關機狀態， N 為機組數量， H 為機組排程之規劃時段，字串長度是機組與時間的乘積即 $N * H$ 。但是為了將最小運轉時限和最小停機時限等兩時間限制條件隱藏於染色體格式中，本文採用另一種族群個體表示方式，如圖 2 所示：

		Y_{i1}				Y_{i2}				Y_{i3}				Y_{i4}				...
機	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	..
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
	i	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	..
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
	N	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	..

圖 2 機組排程之染色體矩陣

在圖 2 機組排程之染色體矩陣，每一列(row)代表著每部機組在 H 時段期間內的運轉狀態，每一列還被分割成數個二進位

元的子字串(sub-string)，如第 i 列的 Y_{i1} ， Y_{i2} ， Y_{i3} ， Y_{i4} 等。每個子字串表示機組一連串相同的運轉狀態，係由四個二進位元

組成，第一個二進位元稱為前導位元 (leading bit) 代表機組的開機或關機狀態 (1 為開機，0 為關機)，而子字串其餘的二進位元記錄這一連串與前導位元相同的狀態所持續之時間，但需加上最小運轉時限 (若前導位元為 1) 或最小停機時限 (若前導位元為 0)。舉例而言，若機組且 i 的最小運轉時限為 2 小時，最小停機時限為 3 小時，則子字串 $Y_{i2} = 1011$ 意指機組 i 為開機狀態 (前導位元為 1)，且持續了 5 小時，亦即 3 小時 (二進位元 011 所表示的數值) 加上 2 小時的最小運轉時限。同理，若子字串 $Y_{i3} = 01011$ 意指機組 i 為關機狀態 (前導位元為 0)，且持續了 6 小時，亦即 3 小時 (二進位元 011 所表示的數值) 加上 3 小時的最小停機時限。(註：一般發電機之最小運轉時限和最小停機時限皆設定值為 2~3 小時，如表 1 所示，故本文以 3 位元表示之)

二、決定適合度函數(Fitness Function)

自然界中群演進的方向是朝著更適合生存發展，產生更合適生存的族群個體。也就是說，適應力強的族群個體生存較久且得以有機會來繁衍新的一代。所以，禁區搜尋法衡量群體的適合度作為族群個體選取與淘汰的依據。就機組排程最佳決策的運用時，目標函數值愈低且限制條件符合者，其適合度值應愈大；反之目標函數值愈高且不滿足限制條件者，其適合度值應愈小。因此，本文適合度除了考慮(1)式之發電成本外，尚包含(2)式之電力供需平衡、(3)式之備轉容量和(4)式之機組發電量等限制條件。故適合度函數為

$$f_{p_i} = \frac{1}{\Phi_{p_i} + \sum_{h=1}^H \lambda_h * pf} \quad (7)$$

其中

- Φ_{p_i} 為族群個體 p_i 發電成本函數
- h 為時段指標
- H 為機組排程規劃時段數
- λ_h 為 1 或 0；當在第 h 時段，若不滿足與違反限制條件時，則 $\lambda_h = 1$ ，否則 $\lambda_h = 0$
- pf 為處罰因數 (penalty factor)，通常為一很大的常數。

處罰因數係為了提供滿足與違反限制條件之族群個體間的鑑別度，並由適合度值就可辨識出來。適合度函數在實際應用時，常將其正規化 (normalize) 使其介於 0 與 1 間，則正規化適合度函數為

$$\Gamma_{p_i} = \frac{1}{1 + K \left(\frac{f_{\max}}{f_{p_i}} - 1 \right)} \quad (8)$$

其中

- K 為一很大的常數。
- f_{\max} 為族群的個體，經由式(7)求得之適合度值最大者

三、執行 TS 程序

禁區搜尋法 (TS) 之求解流程架構，如圖 3 所示，而其程序大致可以歸納成如下七個步驟，並分別說明如下：

步驟一：編碼並隨機產生一組初始族群個體

以隨機方式產生一組初始族群個體，並加以編碼。若欲處理之最佳化問題有個決策變數，而每個變數用個位元編碼，則隨機產生的初始族群之染色體可以表示為：

$$S_0 = [A_1 A_2 \cdots A_{k_1}, B_1 B_2 \cdots B_{k_2}, \cdots, N_1 N_2 \cdots N_{k_n}] \dots\dots\dots (9)$$

其中

n ：為待解變數個數

k_n ：為每個變數所含的基因個數

m ：族群大小

在本文中， n 為機組與時間的乘積即 $N * H_Y$ 。 H_Y 是將最小運轉時限和最小停機時限等兩時間限制條件隱藏於染色體格式中之總時段表示方式。

步驟二：解碼並計算父代適應函數值

S_0 解碼後對應到狀態空間中的一個解 Ω_0 。然後，計算出每一個族群個體之適應函數值

$$\Gamma(\Omega_0) = G(\Omega_0) \quad (10)$$

其中 $G(\Omega_0)$ 為族群個體 Ω_0 之適應函數。

在本文中，是以正規化後之適合度函數{式(8)}，計算每一族群個體之適合度值。

步驟三：子代突變

經由類似基因演算法的突變方式產生 m 組子代族群個體。

所謂突變(mutation)，是根據突變率，隨機選定某一染色體字串的某個位元，使其值由 0 變為 1 或由 1 變為 0。在最佳化求解過程中，為了避免過早收斂於局部最佳或次佳解上，可藉由突變的技巧，使其得以跳出局部最佳解。

步驟四：評估新解與排序

針對步驟三中所產生每一個族群個體，解碼並計算子代適應函數值，然後按照適應函數值大小予以排序。

$$\Gamma(\Omega_{i+m}) = G(\Omega_{i+m}) \quad (11)$$

在本文中，是以正規化後之適合度函數{式(8)}，計算每一子代族群個體之適合度值。

步驟五：選取新的父代解

從最好的子代解開始依次檢查是否滿

足下列情況之一，即可被選取為新的父代解。

(一)、非禁區之內。以數學式表示如下：

$$|\Omega_j - \Omega_{tabu}| > D_{tabu} \quad (12)$$

其中

Ω_j ：子代族群個體

Ω_{tabu} ：在禁區表中(tabu list)的其中一個以向量表示解

D_{tabu} ：禁區距離

(二)、雖然在禁區之內。但是其適應值比搜尋到目前為止的最佳解(current best solution)更好，則希望法則(aspiration criteria)。以數學式表示如下：

$$|\Omega_j - \Omega_{tabu}| \leq D_{tabu} \quad \& \quad G(\Omega_j) < G(\Omega_{current\ best}) \quad (13)$$

其中

$G(\bullet)$ ：為族群個體適應函數

$\Omega_{current\ best}$ ：為搜尋到目前為止的最佳解

步驟六：重新整理禁區表

將新的父代解放入禁區表中，並將禁區表中最舊的向量予以移除。這種一進一出方式，使得禁區表中之向量數維持固定。

步驟七：收斂準則

檢查是否符合收斂準則，若符合則停止，並選出最佳族群個體；若不符合則回到步驟三。

當完成以上步驟，將最佳解族群個體之矩陣表示法解碼，即可得最佳機組預定排程矩陣，包含各機組在規劃時段之開／關狀態與總發電成本。

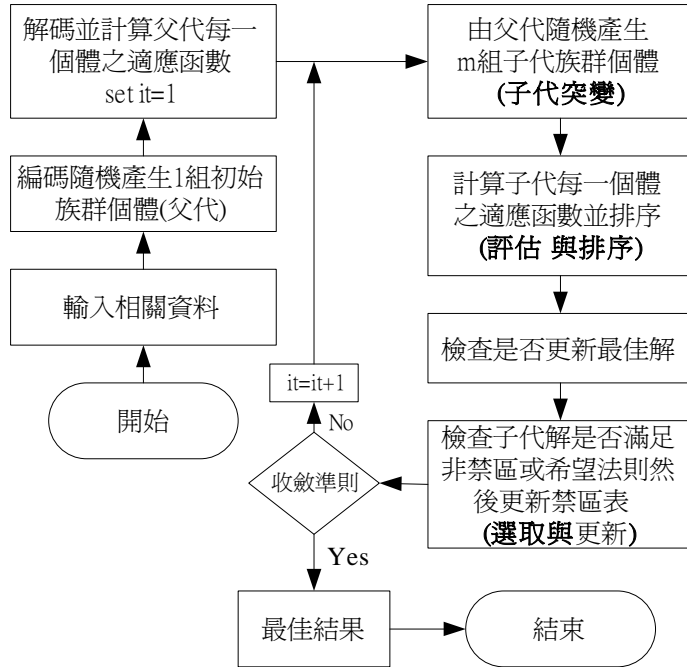


圖 3 禁區搜尋法求解流程架構

肆、實例測試與結果

本文是以台灣電力公司之大型實際系統(Tai-Power System)為例，來測試所提出之方法；也就是以 TS 進行台電系統之 40 部火力機組最佳排程決策。TS 是使用 MATLAB 語言寫成適用於個人電腦與工作站[23, 24]。其中，和本文有關之台電系統基本資料如下所示。

本文實際以 TS 來處理機組排程最佳化問題時，運用了兩項技巧來提高 TS 效率：
 (一)禁區表只放入一個機組排程解向量，以搜尋到目前為止的最佳解當禁區表之機組排程解向量，而不在決定禁區表的大小(Tabu Size, Z)維度，也就是禁區表的大小，Z；並將禁區表之大小(Z)固定為機組與時間的乘積即 $N * H$ 。
 (二)以每一個體相對禁區距離取代絕對禁區距離，如下式所示。

$$D_j = \|X_j - X_{current\ best}\| \quad (14)$$

其中

D_j ：父代與子代合成代數的每一個個體相對禁區距離

X_j ：父代與子代合成代數中第 j 個的向量

$X_{current\ best}$ ：為搜尋到目前為止的最佳解向量(禁區表中的向量)

如此，就不用決定禁區距離，避免禁區距離設定不當，影響搜尋效率。本文是在系統限制條件為前提下，以 TS 來進行機組排程決策；為使所需設定之所有相關參數則如表 2 所示：

表 1 台電 40 部機組與負載資料

機組	最大 電力 (MW)	最小 電力 (MW)	燃料成本係數			最小運 轉時限 (h)	最小停 機時限 (h)
			c_i (\$/MW ² h)	b_i (\$/MWh)	a_i (\$/h)		
1	80	40	170.4	8.336	0.0307	2	3
2	120	60	309.5	7.0706	0.0202	2	3
3	190	80	369.0	8.1817	0.0094	2	3
4	42	24	135.4	6.9467	0.0848	2	3
5	42	26	135.1	6.5595	0.0969	2	3
6	140	68	222.3	8.0543	0.0114	2	3
7	300	110	28737	8.0323	0.0035	2	3
8	300	135	391.9	6.999	0.0049	2	3
9	300	135	455.7	6.602	0.0057	2	3
10	300	130	722.8	12.908	0.0060	2	3
11	375	94	635.2	12.986	0.0051	2	3
12	375	94	654.6	12.796	0.0056	2	3
13	500	125	913.4	12.501	0.0042	2	3
14	500	125	1760	8.8412	0.0075	2	3
15	500	125	1728	9.1575	0.0070	2	3
16	500	125	1728	9.1575	0.0070	2	3
17	500	125	1728	9.1575	0.0070	2	3
18	500	220	647.8	7.9691	0.0031	2	3
19	500	220	649.6	7.9550	0.0031	2	3
20	550	242	647.8	7.9691	0.0031	2	3
21	550	242	647.8	7.9691	0.0031	2	3
22	550	254	758.9	6.6313	0.0029	2	3
23	550	254	758.9	6.6313	0.0029	2	3
24	550	254	794.5	6.6611	0.0028	2	3
25	550	254	794.5	6.6611	0.0028	2	3
26	550	254	801.3	7.1032	0.0027	2	3
27	550	254	801.3	7.1032	0.0027	2	3
28	150	10	1055	3.3353	0.5212	2	3
29	150	10	1055	3.3353	0.5212	2	3
30	150	10	1055	3.3353	0.5212	2	3
31	70	20	1207	13.052	0.2509	2	3
32	70	20	810.7	21.887	0.1676	2	3
33	70	20	1247	10.244	0.2635	2	3
34	70	20	1219	8.3707	0.3057	2	3
35	60	18	641.4	26.258	0.1836	2	3
36	60	18	1112	9.6956	0.3256	2	3
37	60	20	1044	7.1633	0.3372	2	3
38	60	25	832.2	16.339	0.2391	2	3
39	60	25	834.2	16.339	0.2391	2	3
40	60	25	1035	16.339	0.2391	2	3

本文是以搜尋到目前為止的最佳解向量為禁區表中的向量，故到目前為止禁區表內容有可能是最佳解，也就是最佳機組排程之決策，如表 3 決策內容。在系統的

使用率為 87%時，以 TS 進行機組排程之決策結果如表 3 所示。其中，規劃之機組為 40 部，規劃週期為 24 小時。

表 2 相關參數的設定

參數名稱	符號	設定值
機組數量	N	40
規劃時段	H	24
禁區表的大小	Z	40*24
進化之代數	g	50

在表 3 中，數值“1”代表機組運轉狀態，而數值“0”則代表機組停機狀態。故由表 3 可看出各發電機組在一天 24 小時中之最佳運轉發電時程，也就是台電 40 組機之排程決策結果。

為證明本文所使用之禁區搜尋法除了適用進行排程決策外，並可改善解的品質及求解效率。故特和其他進化計算方法比較，而一般進化計算方法比較項目有三：

1. 求解的速度，就是平均收斂時間及代數。
2. 求解品質，以本文之經濟調度問題來說就是總發電成本。
3. 求解穩定性，指在一定測試次數(如 100 次)，可以獲得整體最佳解的次數。

為了證實本文 TS 之最佳化技巧，確實能在短時間內就能求得令人滿意的收斂值，且是解決組合性最佳化問題的有效方法，本文特與基因演算法(GA)之測試結果相比較。有關比較方法(基因演算法)之虛擬碼和相關參數設定如附錄所示；而兩種方法所求出之系統總發電成本比較和其他結果，則如表 4 所示：

表 4 系統總發電成本

	GA法	TS法
總發電成本(\$)	2,408,663	2,387,072
平均收斂時間(sec)	288	287
代數	50	50
穩定性	0.98	0.99

其中，本文機組排程最佳化問題所在意的為總發電成本和平均收斂時間。故由

表 4 可以證實 TS 之最佳化技巧，確實能在短時間內就能求得令人滿意的收斂值，且是解決機組排程決策的有效方法。

伍、結論與展望

一、結論

針對本文所提出方法之特點，列出以下四項結論：

1. TS 是一深具潛力的尋優技巧，具快速與反向搜尋處理能力，能改善求解效率，且有跳脫局部最佳解而趨近全域最佳解之能力。
2. TS 為一個兼具一般性與彈性的演算法，可適於各領域的最佳化問題，不論目標函數可微分和不可微分、凸型和非凸型皆適用。且同時可以處理等式和不等式之限制條件，連續型與離散型皆可。
3. 運用 TS 進行機組排程決策，經測試結果可知，TS 的確可以在系統之限制條件下，以「發電成本為最小」當成決策系統之目標，搜尋出最佳排程決策。
4. TS 最佳化技巧，確實能在短時間內就能求得令人滿意的收斂值，是解決組合性最佳化問題的有效方法。

本文所提出之 TS，在排程決策方面是深具潛力與實用價值；且經過台電系統之測試，的確證實其優越性能。

二、未來展望

針對機組排程問題之未來研究方向，本文提出以下四種值得探討項目：

1. 將水力機組納入機組排程決策，乃在於使系統的機組排程規劃與決策更加完善。
2. 環保意識抬頭，污染排放標準日漸嚴格，考慮電廠污染排放限制之機組排程決策。

表 3 台電 40 機組排程決策

時段 機組																									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
15	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
25	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
34	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
35	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
36	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3. 電業自由化的來臨，考慮民營電廠之機組排程決策。
4. 嘗試將其他隨機法和確定法相結合，並擷取各自優點，使處理組合最佳化

問題時，收斂速度和解答品質能進一步提昇。

參考文獻

- 【1】Allen J. Wood and Bruce F. Wollenberg, *Power Generation, Operation & Control*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 【2】Sheble, G. B., "Solution of the Unit Commitment Problem by the Method of Unit Periods," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 1, 1990, pp. 257-260.
- 【3】Dillon T. S. and Edwin, K. W., "Integer Programming Approach to the Problem of Optimal Unit Commitment with Probabilistic Reserve Determination," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 6, 1978, pp. 2154-2166.
- 【4】Snyder, Jr. W. L., Powell, Jr. H. D., and Rayburn, J. C., "Dynamic Programming Approach to Unit Commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 2, 1987, pp. 339-350.
- 【5】Lowery, P. G., "Generation Unit Commitment by Dynamic Programming," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, 1983, pp. 1218-1225.
- 【6】Cohen A. I. and Yoshimura, M., "A Branch-and-Bound Algorithm for Unit Commitment," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 2, 1983, pp. 444-451.
- 【7】Zhuang F. and Galiana, F. D., "Towards a more Rigorous and Practical Unit Commitment by Lagrangian Relaxation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, 1988, pp.763-772.
- 【8】Ouyang Z. and Shahidehpour, S. M., "A Hybrid Artificial Neural Network/Dynamic Programming Approach to Unit Commitment," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, 1992, pp. 236-242.
- 【9】Sasaki, H., Watabable, M., Kubokawa, J., Yorino, N. and Yokoyama, R., "A Solution Method of Unit Commitment by Artificial Neural Networks," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, 1992, pp. 974-985.
- 【10】Zhuang F. and Galiana, F. D., "Unit Commitment by Simulated Annealing," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 1, 1990, pp. 311-317.
- 【11】Dasgupta D. and McGregor, D. R., "Thermal Unit Commitment using Genetic Algorithms," *IEE Proceedings-C*, Vol. 141, No. 5, 1994, pp. 459-465.
- 【12】Glover, F., "Tabu search: Part I," *ORSA Journal of Computing*, Vol. 1, No. 3, 1989, pp.190-206.
- 【13】Glover, F., "Tabu search: Part II," *ORSA Journal of Computing*, Vol. 2, No. 1, 1990, pp. 4-32.
- 【14】Glover, F., "A user's guide to tabu search," *Annals of Operational Research*, Vol. 41, 1993, pp. 3-28.
- 【15】Bland, J. A., "Tabu search and design optimization," *Computing Aided Design*, Vol. 23, No. 3, 1991, pp. 195-201.
- 【16】Glover, F. and M. Laguna, *Tabu Search*. Boston, MA: Kluwer, pp. 2-151, 1997.
- 【17】Cvijovic, D and Klinowski, J., "Taboo search: An approach to the multiple minima problem," *Science*, Vol. 267, 1995, pp. 664-666.
- 【18】Wen, F. S. and Chang, C. S., "Tabu search approach to alarm processing in power system," *IEE Proc. Gen. Trans. Dis.*, Vol. 144, Jan. 1997, pp. 31-38.
- 【19】Wen, F. S. and Chang, C. S.,

“Transmission Network Optimal Planning Using the Tabu Search Method”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 42, 1997, pp. 153–163.

【20】 Lee, C.Y. and Kang, H. G., “Cell planning with capacity expansion in mobile communications: a tabu search approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 5, 2000, pp.1678 – 1691.

【21】 *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, 2000, pp. 490–495.

【22】 Hajji, O.; Brisset, S.; and Brochet, P, “A New Tabu Search Method for Optimization with Continuous Parameters”; *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol. 40, No. 2, 2004, pp. 1184–1187.

【23】 William H. Press and Saul A. Teuko, *Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing*, Cambridge, 2002.

【24】 John H. Mathews and Kurtis D. fink, *Numerical Methods Using MATLAB*, Prentice Hall, 2002.

【25】 Gallego, R.A.; Romero, R.; and Monticelli, A.J., ”Tabu search algorithm for network synthesis”;

群體較大者則表現會較好，且可以防止結果過早收斂去局部最佳解。但若串集群體太大，則將導致收斂速度降慢到不可接受的地步。因此，一般均將串集群體大小隨著不同問題而設計在 10 至 500 之間。

2. 交配率(Crossover Rate, C_r): 交配率即交配運算元被使用的頻率。交配率若愈大，新的結構將愈快出現於群體中；但交配率若太高時，則會使得群體中表現優異者在選取步驟發揮前就被改變了；過低的交配率則會令系統的腳步裹足不前。一般而言 C_r 值設在小於且接近於 1。

3. 突變率(Mutation Rate, M_r): 突變運算元是為避免遺失任何重要資訊而特地用來增加群體的變動性。它可增加串集群體的變化；但太高的突變率將使整個搜尋過程完全隨機化。因此，一般 M_r 均將設計成很小值。

最大世代數(Maximum Generation Number, M_g): 最大世代數為 GA 的停止準則。因此，其設定停止的原則是當每一世代間的最佳解變化非常微小或連續幾代的最佳解均無改變時，即可停止該演算法的搜尋過程。

附錄

一、基因演算法的參數設定

運用基因演算法進行最佳化問題求解的過程中，為達有效率地求得各種最佳解；故對於初化的參數必需小心建立。在此特別針對幾個重要參數加以討論。

1. 串集群體大小(Population Size, P_N): 串集群體大小將影響整個系統的表現和 GA 的效能。串集群體小的系統，由於無法提供足夠關於問題空間的資訊，因而演進結果通常都不佳；串集

表 A GA 相關參數的設定

參數名稱	符號	設定值
串集群體大小	P_N	40
交配率	C_r	0.8
突變率	M_r	0.1
最大世代數	M_g	50

二、基因演算法虛擬碼

```
The GA algorithm
begin
  initialize the all parameters;
  randomly generate the old population;
  for generation := 1 to max_generation
    compute the fitness of each string in the old population;
    store the string with the highest fitness to the solution set;
    while the string number < population size
      do {
        apply reproduction, crossover and mutation
        operators to generate new population;
      }
    endwhile
  endfor
  restore the string with the highest fitness the solution set as the
  final solution;
  print out the final solution.
end
```

圖 A 簡單的 GA 虛擬碼