

以裴氏網路為基結合基因演算法之零工型生產排程優化研究

姚文隆, 潘一銘

國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系, 高雄市 臺灣 824

摘要: 本研究探討零工型生產排程的優化研究, 提出創新裴氏網路基因演算法(PNGA), 進行案例求解, 並和傳統基因演算法(GA)與田口基因演算法(HTGA)作比較, 以模具廠的零工型生產排程作為案例, 驗證裴氏網路基因演算法的求解能力。本研究以程式設計軟體 MATLAB 撰寫程式, 建構裴氏網路模型, 運用田口實驗法求得實驗最佳組合參數, 再將實驗最佳組合參數帶入程式進行運算, 並與裴氏網路模型搭配求得加工時間。研究結果顯示應用 PNGA 計算的加工時間(單位時間)平均值為 287 低於 GA 的 289.55 與 HTGA 的 288.8; 而應用 PNGA 計算的標準差為 5.33 低於 GA 的 6.0 與 HTGA 的 6.03, 顯示裴氏網路基因演算法具有較優之求解能力。

關鍵字: 零工型生產排程; 基因演算法; 田口基因演算法; 裴氏網路

The Optimum Job Shop Production Scheduling by Using Petri Nets and Genetic Algorithm

Wen-Long Yao*, Yi-Ming Pan

Department of Mechanical and Automation Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Kaohsiung, China, 824

yao@nkfust.edu.tw

Abstract: This study aims at exploring the job shop production scheduling optimization. A novel Petri nets and genetic algorithm (PNGA) is present. Using the job shop production of a mold factory as a case study, we examined the capability of the proposed PNGA method and compared its performance with the traditional Genetic Algorithm (GA) and Hybrid Taguchi-Genetic Algorithm (HTGA) methods. The programming software of MATLAB was employed to model the Petri nets in this study. Taguchi's method was adopted to obtain the optimal experimental parameters. The optimal parameter settings were then programmed into the PNGA program. In conjunction with the Petri nets model, the process time was then estimated. The simulation results show that the average processing time of PNGA is about 287 (unit time). It is less than 289.55 of the GA and 288.8 of the HTGA. The standard deviation of processing time of PNGA is about 5.20. It is less than 6.0 of the GA and 5.88 of the HTGA. That is, the proposed Petri nets and genetic algorithm (PNGA) is able to provide a better job shop production scheduling optimization.

Keywords: Job Shop Production Scheduling; Genetic Algorithm; Hybrid Taguchi-Genetic Algorithm; Petri Nets

引言

當今全球的各大產業隨著時間快速地發展, 從接單開始, 經研發、製造、行銷、包裝到最後的配送, 每一步驟均須縝密的管控與配合才能降低成本, 讓獲利最大化^[1]。尤其是產品生產製造會隨著不同產品而決定對應制程, 根據 Haye 等人在 1979 年提出產品的生產制造型態可分為: 少量多樣的零工型生產(Job shop)、批量生產(Batch)、裝配線生產(Assembly line)和大量標準化的流程型生產(Continuous flow)^[2]。而目前的產業如半導體產業、TFT-LCD 產業、成衣製造業、零件製造業等, 大多屬於零工型生產的範疇^[3]。

傳統零工型生產排程(Job Shop Production Scheduling)為零工型生產流程的排程方法, 由 Muth 與 Thompson 在 1963 年所提出, 生產模式假設有 n 個工件與 m 個機台, n 個工件均需經過 m 個機台進行加工處理, 但每個工件

的處理順序不盡相同^[4]。Nakano 與 Lawler 等人分別在 1991 與 1993 年證實此排程為指數型困難問題(NP-hard)，意指隨著工件與機台數的增加會使排程越趨複雜化^{[5], [6]}，但仍符合實際的生產現況，故此排程法仍廣泛被運用。

近年來，由於零工型生產排程的廣泛被運用，研究者研發多種演算方法應用於零工型排程優化之研究，諸如：分支界限法(Branch and Bound Method)、基因演算法(Genetic Algorithm, GA)、蟻群演算法(Ant Colony Optimization, ACO)、模擬退火法(Simulated Annealing)、塔布演算法(Tabu Search, TS)、貪婪演算法(Greedy Algorithm)、粒子群演算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等，目的在於尋求「在最短的時間獲取零工型生產排程的最佳加工路徑」。然而不同的演算方法在求解加工路徑時其時間並不一致，且求得的加工路徑也未必相同，故演算方法的選擇對零工型生產排程的求解具有其重要性與困難度^[7]。

傳統零工型生產排程在計算加工路徑時，容易陷入局部最佳解(Local Optimum)窘境^[8]，局部最佳解意指排程方法計算加工路徑中，排程方法在搜尋空間只會考慮單一個點而不是多個點，導致算出的加工路徑與實際相比有落差。容易陷入局部最佳解的演算方法：蟻群演算法、貪婪演算法與粒子群演算法等。而基因演算法是以編碼的方式進行運算，能有效跳脫搜尋空間中單一個點的限制，進而找到最佳解^[9]。此外，在計算加工路徑的過程中，排程方法會將參與的機台個別進行加工時間的計算，最後經加總以決定整個排程的時間，但此計算方式所得到的加工時間結果，未考慮到排程實際運行的加工時間^[10]。裴氏網路是一種網路圖形並具有數學理論的建模工具，可有效進行排程時間的模擬運算。

零工型生產排程的求解方式很多，最常見的為選擇合適的演算方法後進行參數(Parameter)與其水準值的組合，經此組合並搭配演算方法的計算找出最短的加工時間與路徑。韓駿逸提出以基因演算法的參數為基，藉由參數與其水準值互相組合的方式產生了 32 種演算組合，並以 3 個零工型生產排程案例進行試驗。蘇恒磊把基因演算法中的參數分成 3 個水準值，形成三種演算方法，並以 4 個零工型生產排程案例進行試驗。由上述可得知，演算方法中的參數與水準值的組合對零工型生產排程的求解過程中是極為關鍵性的工作。

本研究旨在提出創新混合裴氏網路基因演算法(PNGA)，進行零工型生產排程的優化研究。PNGA 具有三種技術原理，分別為：基因演算法、裴氏網路與田口實驗法。裴氏網路基因演算法能使零工型生產排程問題跳脫局部最佳解並有效類比排程運行的加工時間，而在參數與其水準值的組合方面，則運用田口實驗法能快速找出其最佳組合。為驗證此方法對零工型生產排程的求解能力，並以基因演算法(GA)與田口基因演算法(HTGA) 兩種演算方法作為對照組，本研究架構如圖 1 所示。

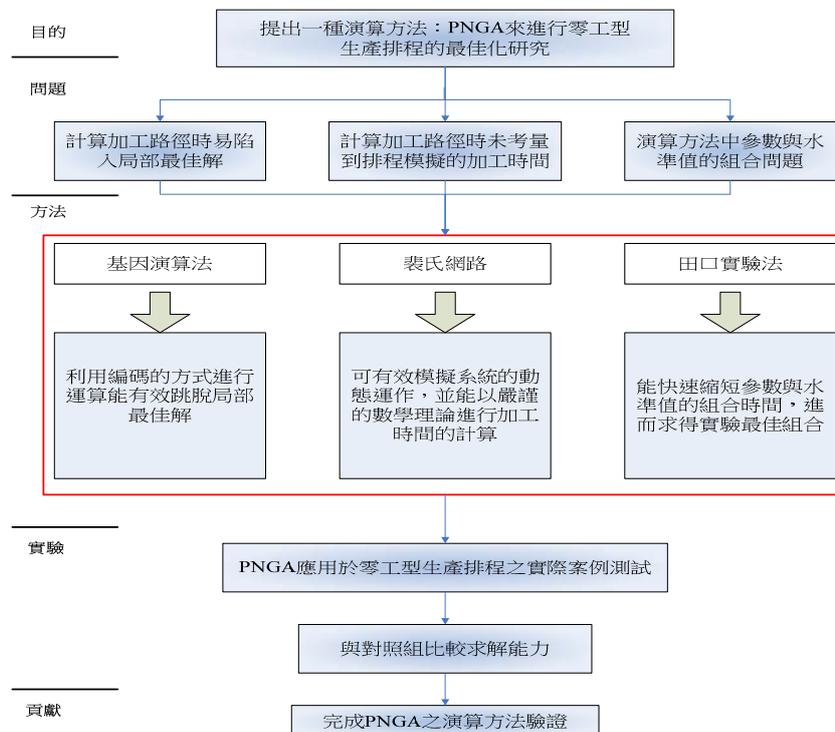


圖 1 研究架構圖

1 相關技術與原理介紹

1.1 田口實驗法

田口實驗法(Taguchi Methods)是由田口玄一(Genichi Taguchi)博士在 1950 年代所提出，其特色為運用直交表與信號雜音比兩工具，快速尋求最佳參數組合。本研究使用田口實驗法的目的在於找出參數與其水準值的最佳組合，其流程如圖 2 所示^[11]。

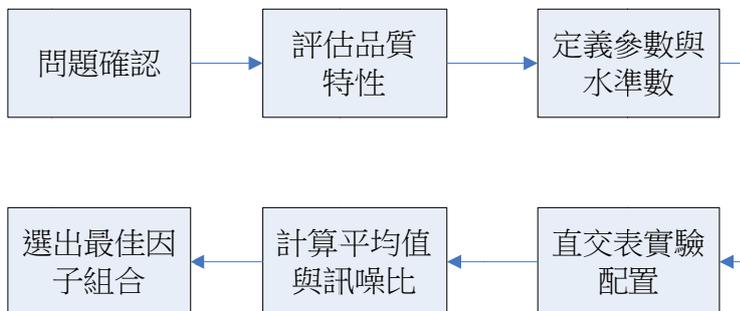


圖 2 田口實驗法流程圖[11]

直交表(Orthogonal Array)是一種讓實驗以最少次數進行的工具。常見的有 $L_4(2^3)$ 、 $L_8(2^7)$ 、 $L_9(3^4)$ 、 $L_{16}(2^{15})$ 等類型。圖 3 與表 1 分別為 $L_4(2^3)$ 直交表的意義說明與其型式，表 1 中的行數共有 4 行，代表其實驗次數為 4 次，而每一行內的數值表示參數與水準數的組合情況[11]，本研究所用的直交表為 $L_9(3^4)$ 。



圖 3 直交表意義說明圖[11]

表 1 $L_4(2^3)$ 直交表[11]

實驗編號	參數		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

信號雜音比 (Signal-to-Noise, SN 比) 是一種用來找尋最佳水準組合的機制，SN 比以下列方式表示^[11]：

$$SN = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{信號}}{\text{雜音}} \right) \tag{2-1}$$

其中 SN 比的單位為分貝(dB)，信號代表需要的部分，意指平均值；雜音代表不需要的部分，其值愈小愈佳，通常意指標準差^[11]。SN 比可依問題的品質特性分成三類：望小特性 SN 比、望大特性 SN 比與望目特性 SN 比，而本研究所用的為望小特性 SN 比^[11]。

(一)望小特性 SN 比：

其品質特性為連續，具有其值愈小愈佳但非負數且目標值為零等特性，應用面包含制程時間、機械零件磨耗、電腦處理時間、產品劣化等。望小特性 SN 比方程式為：

$$SN = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \tag{2-2}$$

(二)望大特性 SN 比:

其品質特性為連續，具有其值愈大愈佳但非負數且目標值為無限大等特性，應用面包含產品壽命、燃油效率、黏接強度等。望大特性 SN 比方程式為:

$$SN = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \tag{2-3}$$

(三)望目特性 SN 比:

其品質特性為連續，目標值為一個特定值且不為零的特性，應用面包含尺寸、重量、精度等。望目特性 SN 比方程式為:

$$SN = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{y}{s^2} \right)^{-2} \tag{2-4}$$

1.2 基因演算法

基因演算法(GA)最早於 1975 年由美國密西根大學 John Holland 教授所提出，成為求解優化問題時常用的一種演算工具。演算過程中以隨機化方式同時產生多組染色體，較優的染色體將被留下進行下一次運算，而劣質的染色體會被逐次淘汰，經由世代演化的方式即可求出最佳染色體，最後將求得的最佳染色體作為近似最佳解^[9]。本研究使用此方法的目的是在於可以有效跳脫局部最佳解，圖 4 為 GA 架構圖。

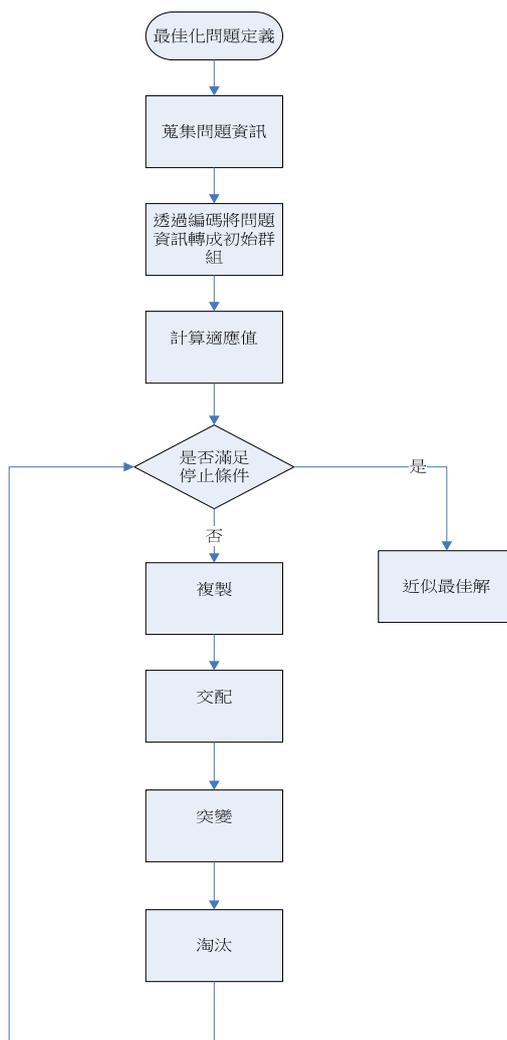


圖 4 GA 架構[9]

田口基因演算法(Hybrid Taguchi-Genetic Algorithm, HTGA)是以 GA 為基準，延伸發展出一種穩健方法，由劉與周於 2004 年所提出^[12]。此方法是將田口實驗法應用在 GA 的交配階段。HTGA 的交配階段分為「一般交配」與「田口交配」。一般交配與 GA 的交配方式相同；而田口交配則是接在一般交配之後，根據题目的特性選擇最合適的直交表，利用直交表以最少的實驗次數依序計算出適應值與 SN 比，以 SN 比來評估因數並找出最佳的因數進而產生較佳的子代，最後將較佳的子代進行突變與淘汰的運算^[12]，圖 5 為 HTGA 架構圖。

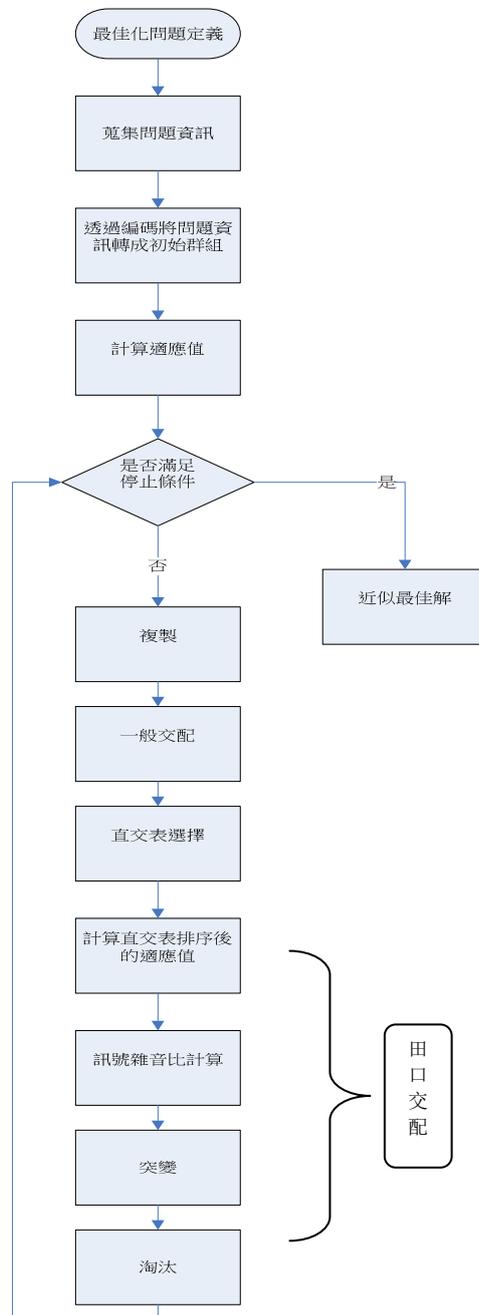


圖 5 HTGA 架構[12]

1.3 裴氏網路

裴氏網路(Petri nets, PN)是一種運用圖形來描述動態系統的技術，可有效模擬系統的動態運作，並能以嚴謹的數學理論進行系統的建模與分析，最早是在 1962 年由 Carl Adam Petri 博士所提出^[13]。本研究使用此方法的目的在於能以類比的方式計算出排程的加工時間。

PN 的基本組成元件主要有站區(Place)、轉移條件(Transition)、方向弧(Arc)與標記(Token)等四項 (圖 6)，站區代表一種狀態，在生產排程中可視為一個加工站，並以圓圈作為表示；轉移條件表示程式、事件或是活動，是以粗直線作為表示；標記為物件代表，以黑色實心作為表示；方向弧表示系統中標記的流動方向，介於站區與轉移條件間，以一個箭頭作為表示^[13]，典型的 PN 模型如圖 7 所示。

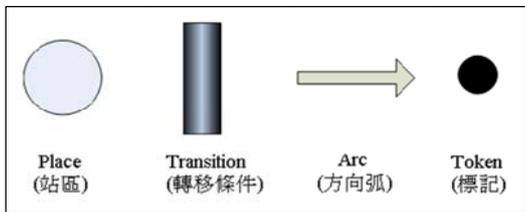


圖 6 典型 PN 基本組成元件^[13]

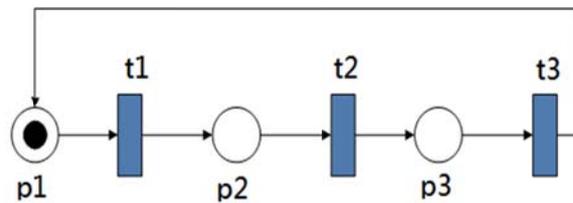


圖 7 典型的 PN 模型

2 模型案例與程式撰寫

本研究以模具廠的零工型生產排程作為案例，進行程式撰寫與 PN 模型建立。其中程式撰寫分成 GA 與 HTGA 兩部分，分別計算 GA、PNGA 與 HTGA 之排程案例的加工時間。

排程案例確認以模具廠的零工型生產排程作為案例^[9]。模具工廠擬生產一套模具的 6 個零件，每個零件從開始製作到加工完成必須經過 6 道制程。表 2 為每個零件的制程順序，以零件 1 為例，零件 1 在加工過程中所用機台的順序為：機台 3、機台 1、機台 2、機台 4、機台 6 與機台 5，其餘零件以此類推。表 3 為零件在機台的加工時間 (時間單位)，以零件 1 為例，零件 1 在機台 1 至機台 6 的加工時間依序為 3、6、1、7、6 與 3 單位，其餘零件以此類推。

表 2 每個零件的制程順序表^[9]

	制程 1	制程 2	制程 3	制程 4	制程 5	制程 6
零件 1	3	1	2	4	6	5
零件 2	2	3	5	6	1	4
零件 3	3	4	6	1	2	5
零件 4	2	1	3	4	5	6
零件 5	3	2	5	6	1	4
零件 6	2	4	6	1	5	3

表 3 零件在機台的加工時間表 (時間單位) ^[9]

	零件 1	零件 2	零件 3	零件 4	零件 5	零件 6
機台 1	3	10	9	5	3	10
機台 2	6	8	1	5	3	3
機台 3	1	5	5	5	9	1
機台 4	7	4	4	3	1	3
機台 5	6	10	7	8	5	4
機台 6	3	10	8	9	4	9

本研究以模具生產製造案例為基準，使用程式設計軟體 MATLAB R2009b 進行 GA 與 HTGA 的程式撰寫。GA 的程式撰寫分為八個部分，分別為題目定義、初始化與編碼、適應值計算、輪盤法選擇、交配、突變、子群體適應值計算與淘汰（圖 8）。而 HTGA 的撰寫方式與 GA 相同，不同之處在於「田口實驗法」的應用（圖 9）。

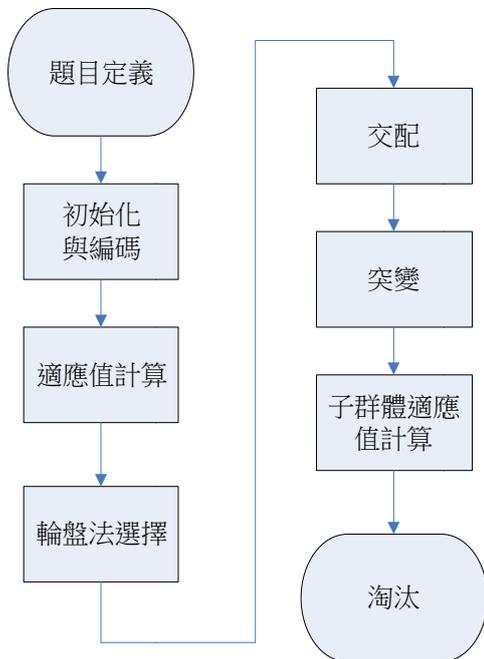


圖 8 GA 程式撰寫流程

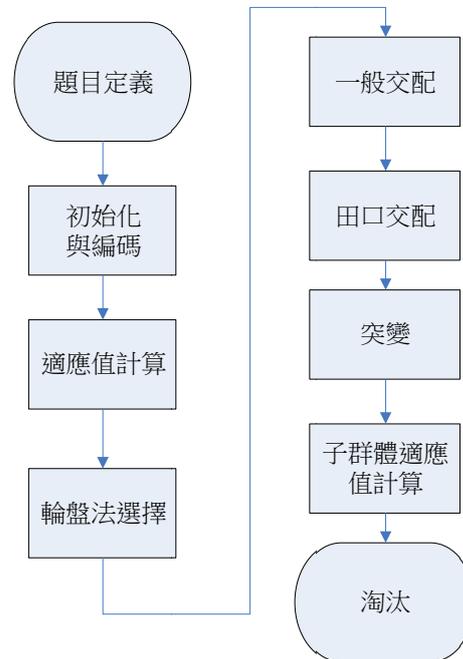


圖 9 HTGA 程式撰寫流程

本研究以 MATLAB 程式設計軟體中的 Prtri Net Toolbox 2.3 建構 PN 模型，其特色在於能快速建立模型並準確模擬排程所需的加工時間。本案例屬於 6×6 排程問題，意指 6 個零件必須進行加工，每個零件各有 6 道制程。以零件 1 為例，6 道制程等於 6 個站區，而在加工開始前與加工結束後必須各設一個站區作為零件的存放，故零件 1 在 PN 的繪製共有 8 個站區，圖形如圖 10 所示，而 6 個零件所繪製的 PN 模型如圖 11 所示。

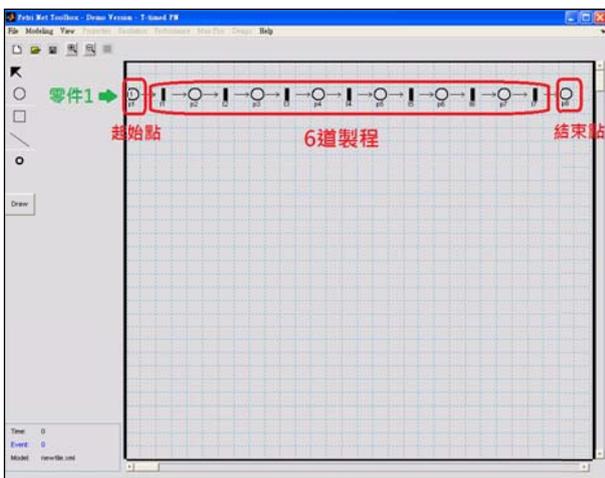


圖 10 零件 1 的 PN 繪製圖

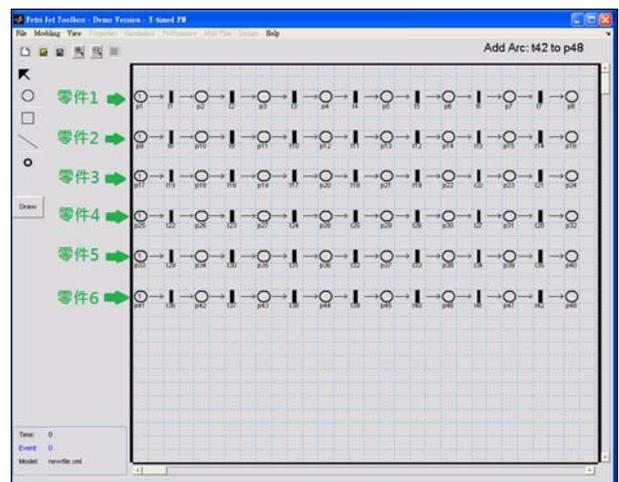


圖 11 研究案例的 PN 繪製圖

3 參數設定與田口實驗設計

由程式撰寫與 PN 模型建立完成後，藉由田口實驗設計尋求最佳參數組合。篩選具指標性的參數，並將選出來的參數個別進行水準值設定，再利用直交表與 SN 比將參數與其水準值進行三種演算方法的田口實驗設計，以獲得最佳參數組合。

GA、HTGA 中主要有四種參數，分別為群體數中的母群體與子群體、演化世代數、交配率、突變率。本研究在進行基因演算法中選用交配種類為無性交配，故在此不考慮交配率，僅以群體數、演化世代數與突變率作為實驗參數。每個參數各設 3 個水準進行實驗，詳細的參數與其水準數如表 4 所示。

表 4 參數與其水準數設定

		水準 1	水準 2	水準 3
群體數	母群體	200	1000	2000
	子群體	150	750	1500
演化世代數		10	100	1000
突變率		0.01	0.5	0.99

運用 Microsoft Office Excel 來進行田口實驗的版面配置，依據參數與水準數來選用合適的直交表與合乎研究特性的 SN 比來進行實驗設計。本研究提出的演算方法為 PNGA，另有兩個對照組：GA 與 HTGA，故需進行三個演算方法的田口實驗設計。

直交表選擇與試驗次數說明如下，經由程式中選出的參數有 3 個，其水準數各有 3 個水準，選擇直交表前必須計算自由度，其計算方式如表 5 所示。

表 5 自由度計算

參數	自由度(水準值減 1)
群體數	3-1=2
演化世代數	3-1=2
突變率	3-1=2
總計	2+2+2=6

經上述計算得知自由度為 6，故選擇實驗次數為 9 次的 $L_9(3^4)$ 直交表作為實驗用，其直交表如表 6 所示。

表 6 $L_9(3^4)$ 直交表

實驗編號	行			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	3
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

將表 4 的參數與水準數依據表 6 的 $L_9(3^4)$ 直交表的排序規則進行實驗配置，本研究設定 9 個實驗均需進行 20 次的試驗，並計算其平均值與標準差，配置如表 7 所示。

表 7 實驗次數配置表

實驗	世代數	群體數	突變率	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均值	標準差	
1	10	200	0.01																							
		150																								
2	10	1000	0.5																							
		750																								
3	10	2000	0.99																							
		1500																								
4	100	200	0.5																							
		150																								
5	100	1000	0.99																							
		750																								
6	100	2000	0.01																							
		1500																								
7	1000	200	0.99																							
		150																								
8	1000	1000	0.01																							
		750																								
9	1000	2000	0.5																							
		1500																								

SN 比選擇則依據零工型生產排程的特性，希望以最短的時間獲取最佳的加工路徑，故運行的時間愈短愈好，因此選擇『望小特性』的 SN 比。而望小特性的 SN 比計算出其值後必須進行各參數水準的回應平均值與 SN 比平均值的計算，以驗證上述 9 個實驗其平均值、標準差與望小特性的 SN 比的值是否有誤，進而找出最佳實驗組合。

表 8 為各參數水準的回應平均值計算示意圖。左表 9 個實驗的平均值為經由 20 次試驗所得到的，依順序分別為 a、b、c、d、e、f、g、h 與 i。而右表為三個參數與其水準數的組合關係，共有 9 個空格需填入，以世代數的水準 1 為例，對照左表世代數為水準 1 的有實驗 1、實驗 2 與實驗 3，其平均值分別為 a、b 與 c，將三個值加總並作平均則為世代數水準 1 的值，其餘 8 格依此方式進行。最後計算右表 3 個參數與其水準的回應平均值，可發現回應平均值均相同（均為 j），代表之前在左表的平均值計算無誤，若不相同則要回到左表重新計算。表 9 為各參數水準的 SN 比平均值計算示意圖，其計算方式與表 8 相同。

表 8 各參數水準的回應平均值計算示意表

實驗	世代數	群體數	突變率	平均值	標準差	望小SN比
1	10	200	0.01	a		
		150				
2	10	1000	0.5	b		
		750				
3	10	2000	0.99	c		
		1500				
4	100	200	0.5	d		
		150				
5	100	1000	0.99	e		
		750				
6	100	2000	0.01	f		
		1500				
7	1000	200	0.99	g		
		150				
8	1000	1000	0.01	h		
		750				
9	1000	2000	0.5	i		
		1500				

各參數水準的響應平均值				
	水準1	水準2	水準3	平均值
世代數	$(a+b+c)/3$	$(d+e+f)/3$	$(g+h+i)/3$	j
群體數	$(a+d+g)/3$	$(b+e+h)/3$	$(c+f+i)/3$	j
突變率	$(a+f+h)/3$	$(b+d+i)/3$	$(c+e+g)/3$	j

PN 模型進行 30 次零工型生產排程其加工時間的模擬，會以模擬時間為依據，將 10 次模擬時間較高的做淘汰的動作，而剩下的 20 次進行第二次的試驗，如表 12 所示。

表 13 為三種演算方法得到最佳實驗組合後，利用最佳實驗組合進行 20 次試驗所計算出的結果，分別為加工時間的平均值、標準差、最大值與最小值、出現最小值的次數。在平均值方面，PNGA 的 287 低於 GA 的 289.55 與 HTGA 的 288.8。而標準差方面，PNGA 的 5.33 低於 GA 的 6 與 HTGA 的 6.03。此排程案例可發現加工時間最小值為 284，三種演算方法在實驗過程中最小值均為 284，但在最大值方面，GA 的最大值為 298 高於 PNGA 與 HTGA 的 296。而出現最小值 284 的次數以 PNGA 出現 15 次為最高，而 GA 與 HTGA 分別為 10 次與 12 次。

表 13 實驗結果

最佳實驗組合	PNGA	GA	HTGA
世代數	100	100	100
群體數	1000	1000	2000
	750	750	1500
突變率	0.99	0.99	0.99
實驗結果			
平均值	287	289.55	288.8
標準差	5.33	6.00	6.03
最大值	296	298	296
最小值	284	284	284
最小值出現次數	15	10	12

5 結論

本研究提出一種創新裴氏網路基因演算法（PNGA），以模具廠的零工型生產排程作為案例，驗證裴氏網路基因演算法的求解能力，進行零工型生產排程的優化研究。經案例確認、程式撰寫、PN 建模、田口實驗設計至田口實驗，最後與對照組 GA 與 HTGA 相比較，研究結果顯示 PNGA 的加工時間（單位時間）平均值為 287 低於 GA 的 289.55 與 HTGA 的 288.8。而 PNGA 的標準差為 5.33 低於 GA 的 6.0 與 HTGA 的 6.03。結果顯示裴氏網路基因演算法（PNGA）之加工時間的平均值與標準差均為三種方法中之最低值，而在加工時間最小值的出現次數也多於對照組，顯示裴氏網路基因演算法具有良好的求解能力。

致謝

本研究承蒙國科會(NSC 101-2221-E-327 -004)部份經費支持，及碩士生潘一銘同學的參與研究，一併致謝。

參考文獻

- [1] 周春芳, 2003, “流通業現代化與電子商務”, 第三版, 五南圖書出版股份有限公司, 臺北.
- [2] R. H. Hayes and S.C. Wheelwright, 1979, “Link manufacturing process and product life cycles,” *Harvard Business Review*, pp. 133-140.
- [3] 傅和彥, 2008, “生產與作業管理: 建立產品與服務標竿 5/e”, 初版, 前程企業管理有限公司, 新北.
- [4] A.M.S. Zalzal and P.J. Fleming, 1997, “Genetic algorithms in engineering systems,” *The Institution of Electrical Engineers*, pp. 134-160.
- [5] R. Nakano and T. Yamada, 1991, “Conventional Genetic Algorithm for Job-Shop Problems,” the 4th International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, U.S.A., pp. 474-479.

- [6] E. L. Lawler, J. K. Lenstra, R. Kan, and D. B. Shmoys, 1993, "Sequencing and Scheduling: Algorithms And Complexity," Handbook in Operations Research and Management Science, Volume 4, North Holland, Amsterdam, pp. 407-425.
- [7] 曾文宏, 賴鬱玲, 基因演算法解算交期限制單機排程問題之效果分析, 企業全球佈局策略學術研討會, 頁 25-39, 台中, 臺灣, 2005.
- [8] 郭定, 2009, 基因演算法中不同選擇策略的替代性與互補性, 科學與工程技術期刊, 第 5 卷, 第 2 期, 頁 25-34.
- [9] 劉東官, 2011, 智慧型多目標動態生產排程系統教材, 智商整合實驗室, 國立高雄第一科技大學.
- [10] T. Gu and P. A. Bahri, "A survey of Petri net applications in batch processes, 2002," Computers in Industry, Vol . 47, pp. 99-111.
- [11] Genichi Taguchi, E. A. Elsayed, and T. C. Hsiang, 1989, Quality engineering in production systems, New York.
- [12] J. T. Tsai, T. K. Liu, and J. H. Chou, 2004, "Hybrid Taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 8, No. 4, pp. 365-377.
- [13] T. O. Boucher, 1996, Computer Automation in Manufacturing: An introduction, Chapman & Hall, pp. 327-330.

【作者簡介】



姚文隆（1958），男，臺灣，國立高雄第一科技大學 機械與自動化工程系 教授，美國紐澤西理工學院機械工程博士，研究方向:自動化、智慧型監控系統整合、逆向工程與快速原型，學習經歷: 美國紐澤西理工學院機械工程碩博士、美國康乃迪克州註冊專業工程師(RPE)、美國 AdvanTech 公司 工程師、中山科學院/航發中心 儀錶工程師、永進機械公司 開發工程師。
Email:yao@nkfust.edu.tw