

斐氏網路圖為基礎之彈性製造系統建模與效率分析

王中行 劉大銘* 趙柏鴻

大葉大學自動化工程學系

*大葉大學機械工程學系

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

摘要

本文主要係探討彈性製造系統中工作物件與加工機台間的關係，藉由斐氏網路圖（Petri Nets）來描述之，並針對經過模組化的彈性製造系統圖形進行分析。具體完成的目標有二；第一，藉由斐氏網路圖特性中活性（liveness）指標，分析彈性製造系統是否有死鎖（deadlock）現象。第二，藉由時間性的圖形事件，建構一個週期性的製造系統，而將具有時間效率的圖形事件數學化，求取最佳的執行效率。

本研究以彈性製造系統單元為依據，藉由斐氏網路圖建立系統模型，進行系統死鎖偵測與預防，並應用時序斐氏網路圖（timed Petri Nets），藉由時間性的圖形事件，建構加工件所有的工作排程模型，求其工作效率，繼而從中求取最佳排程；另一方面，在不同的時序斐氏圖網路圖，其可能有同形的狀態圖形，亦可藉由同形狀態圖形的轉換，簡化一個龐大複雜的斐氏網路圖，而有助於彈性製造系統的執行效率分析。

關鍵字：斐氏網路圖，彈性製造系統，建模，活性，死鎖，效率分析

Modelling and Performance Analysis of A Flexible Manufacturing System Based on Petri Nets

CHUNG-SHING WANG, TA-MING LIU* and PO-HUNG CHAO

Department of Automation Engineering, Da-Yeh University

**Department of Mechanical Engineering, Da-Yeh University*

112 Shan-Jiau Rd., Da-Tsuen, Changhua, Taiwan

ABSTRACT

In this paper modelling of the workstations and the machining parts in a flexible manufacturing system is described. Petri Nets (PN) are a graphical and mathematical tool applicable to a flexible manufacturing system. Two approaches to analyse of such models are presented: (1) Deadlock detection and avoidance are performed by the live property of PN. (2) Timed Petri Nets for building a cyclic manufacturing system are used for optimal performance analysis.

To illustrate the methodology presented in this paper, a timed Petri Nets to describe parts and machines in a flexible manufacturing cell is implemented. Performance-preserving reduction nets are proposed which simplify the original nets to an analytical form for use. Using PN to analyse and



verify a flexible manufacturing system is a specific and convenient method.

Key Words: Petri Net, flexible manufacturing system, modelling, deadlock, liveness, performance

一、前言

國內製造業近幾年一直處於低迷不振，為提升整體的工作環境，有效率的前置性製造管理規劃便成為相當重要的課題；斐氏網路圖 (Petri Nets) 正是一種可用以描述分析系統行為的一種簡單且有效的模擬與分析工具，而被廣泛地應用於電腦整合製造、彈性製造系統、電子電路設計等方面的系統模式設計與分析 [1, 4, 13]。

斐氏網路圖是 1962 年由 Petri 博士所提出，由於斐氏網路圖是一種圖形化的建構工具，其不僅容易使用，且易於了解，並且擁有許多與製造系統相似的特性，而具有相當好的建構與分析能力，藉由斐氏網路圖以站區 (place)、暫態 (transition) 與代物 (token) 間對應之標記 (marking) 的激發 (firing) 轉換，及設備間的狀態變化，以呈現一個彈性製造系統 (flexible manufacturing system, FMS) 的動態行為，將有助於系統之分析與瞭解，再則，斐氏網路圖除以網路的形式表達複雜彈性製造系統的同步行為 (concurrency) 的特性外，並能以數學形式進行製程的分析與驗證，以便獲得有關於彈性製造系統結構和動態行為的資訊，作為系統執行效率評估與改善的依據，而被視為現今產、學界解決動態系統之離散事件 (discrete events dynamic system, DEDS) 最有效的工具 [6, 11, 12]。

一個彈性製造系統主要係包括多台 NC 加工機、搬運設備 (無人搬運車、輸送帶、機械手)、倉儲系統 (AS/RS) 與監控電腦組成，而能順序完成單一或不同工件的加工與儲存系統 [10]；而彈性製造系統死鎖 (deadlock) 的偵測與避免，以及執行效率的提升，被視為判定系統好壞的依據 [7, 15]。

關於彈性製造系統死鎖問題之研究；Lawley 等 [9] 根據死鎖根本的原因在於加工站緩衝區容量限制問題，而發展一套 DAP (deadlock avoidance policy) 方式，作為死鎖修正與量測工具；Dsouza 和 Khator [5] 係以重置工作站緩衝區 (buffer reallocating) 法則，解決組立件死鎖問題；Abdallah [2] 是將系統中之機械與零件的製程關係以斐氏網路圖模組化，再利用斐氏網路圖模型經可達樹 (reachability tree) 形式來執行彈性製造系統死鎖偵測與預防。另一方面，關於彈性製造系統建模及執行效率的提升，相關的研究，Bowden [3]

針對暫態時序斐氏網路圖 (transition timed petri net, TTPN) 描述說明其圖形的動態行為；Kuo 等 [8] 更進一步提出修正正式彩色時序斐氏網路圖 (MCTPN)，並結合專家系統，以建構 FMS 模型；Huang 等 [7] 使用方案 (scenarios) 方法建構斐氏網路圖模型，再針對建構完成的模型進行分析；Zuberek [15] 依暫態時序斐氏網路圖 (TTPN)，並對不同的時序斐氏網路圖可能有的同形狀態圖形，藉由簡化法則，來處理一個龐大複雜的斐氏網路圖，以便於執行效率分析。

本文主要是藉由斐氏網路圖的結構性質、死鎖的偵測與圖形事件的效率分析，以應用於彈性製造單元上；在彈性製造系統中死鎖的偵測，採用可達樹和矩陣形式兩種方式；死鎖避免就是使死鎖發生之條件變為偽，使其不發生死鎖；關於圖形事件效率，則是藉由暫態時序斐氏網路圖 (TTPN)，建構週期性的製造系統，將具有時間效率的圖形事件數學化，求取最佳的執行效率，另外一方面，在不同的時序斐氏網路圖，其可能有同形的狀態圖形，藉由同形的狀態圖形來簡化一個龐大複雜的斐氏網路圖，以便於執行效率分析。

二、斐氏網路圖基本結構

斐氏網路圖的基本理論架構，係藉由站區與暫態的觀點，可以將離散系統狀態之變化視為一個事件的發生，而事件發生前的狀態與事件發生後的狀態，可以分別視為事件的先發條件與後續的狀況；事件發生後的後續的狀況，又可視為另一事件的先發狀況，而系統所有狀態之間的結構性關係，可以用圖形的標記來表示，另外，狀態改變可應用斐氏網路法則，了解其標記移動的情形，而標記改變即可判斷整個系統的運作，其相關符號標示可依下列 4 項定義說明之。

定義 (1)

斐氏網路圖的基本結構，如圖 1，包含 4 項 $C=(P,T,I,O)$ ，其中 $P=(P_1,P_2,\dots,P_n)$ 是有限的站區 (place) 所構成的集合， $n>0$ ； $T=(T_1,T_2,\dots,T_m)$ 是有限的暫態 (transition) 所構成的集合， $m>0$ ； $I:T \rightarrow P^\infty$ 是輸入函數，表示從暫態 (T) 到站區 (P) 的一種輸入映成關係； $O:T \rightarrow P^\infty$ 是輸出函數，表示從暫態 (T) 到站區 (P) 的一種輸出映成關係。 $P = \{P_1,P_2,P_3,P_4,P_5\}$ ， $T = \{t_1,t_2,t_3,t_4\}$ ， $I(t_1) = \{P_1\}$ ， $I(t_2) = \{P_2,P_3,P_5\}$ ， $I(t_3) = \{P_3\}$ ， $I(t_4) = \{P_4\}$ ， $O(t_1) = \{P_2,P_3,P_5\}$ ，



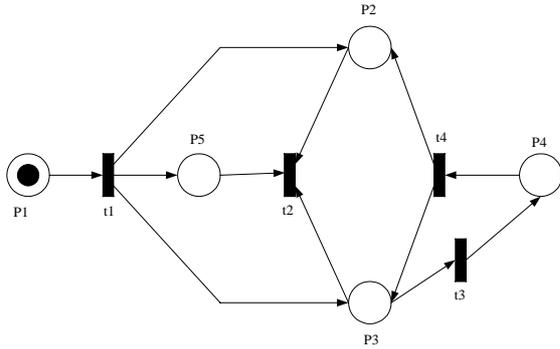


圖 1. 斐氏網路圖結構模型

$O(t_2)=\phi$, $O(t_3)=\{P_4\}$, $O(t_4)=\{P_2,P_3\}$ 。

定義 (2)

斐氏網路圖的圖形 $G=(V,A)$, 其中 $V=\{v_1,v_2,v_3,\dots,v_s\}$, 是由頂點 (vertex) 所構成, $s>0$; $A=\{a_1,a_2,\dots,a_r\}$ 是由有向弧線 (directed arc) 所構成的集合, $r>0$; 且 $a_i=(v_j,v_k)$, $v_j,v_k \in V$ 。 V 集合可分割成 P 和 T 集合, 且 $P \cup T = V$; $P \cap T = \phi$ 。 而 V 與 A 的關係為 $\#((p_i,t_j),A)=\#((p_i,I(t_j)))$ 與 $\#((t_j,p_i),A)=\#(p_i,O(t_j))$ 其中 $\#(X,B)$ 表示元素 X 在 B 集合中所出現的次數。

定義 (3)

斐氏網路圖 $C=(P,T,I,O)$ 的標記 Marking (M) 表示方式。 $M:P \rightarrow N$ 的對應關係, N 為非負整數, M 也可定義為 n 維向量, $M=(M_0,M_1,M_2,\dots,M_n)$ 。

定義 (4)

斐氏網路圖 $C=(P,T,I,O)$, $t_j \in T$, 如果所有的 $P_i \in P$, 使得 $M(P_i) \geq \#(P_i,I(t_j))$ 則標記可被啟動, t_j 可被激發 (firing)。

斐氏網路圖的圖形, 通常以圓圈代表 Place (p) , 用垂直細條槓代表 Transition (t) , 以小點 “•” 表示 P_i 上之代物 (token) 的數目。由圖 2(a) 可知, $M_0=(1,0,1,0,1)$ 顯示系統存有代物在 P_1, P_3, P_5 之狀態。當 t_1 被激發後, $M_1=[0,1,0,0,1]$ 。

三、死鎖偵測與預防

彈性製造系統的工作流程經斐氏圖模組化後, 藉由斐氏網路圖特性中活性 (liveness) 分析製造系統是否有死鎖現象, 而在死鎖的偵測可分為可達樹 (reachability tree) 和矩陣形 (matrix equation) 兩種方式。另外, 死鎖現象的發生,

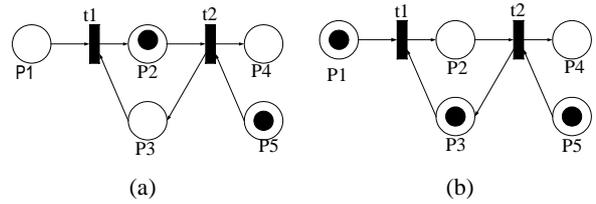


圖 2. 代物移動的情形

必須是互相排斥 (mutual exclusion) 握持和等待 (hold and wait) 沒有優先權 (no preemption) 與循環等待 (circular wait) , 同時都成立才可發生, 於是死鎖避免就是使死鎖發生之條件變為偽, 使其不發生死鎖 [4, 12]。

對於有關死鎖的偵測方面, 主要可分為可達樹和矩陣形式兩種方式。相關說明如下所示:

(一) 死鎖矩陣形式

定義 (5)

斐氏圖 $C=(P,T,D^-,D^+)$, 其中 D^- 為輸入矩陣, $D^-[j,i]=\#(P_i,I(t_j))$ D^+ 為輸出矩陣, $D^+[j,i]=\#(P_i,O(t_j))$ $D=D^+-D^-$ 為關聯矩陣

定義 (5) 的含義是將定義 (1) 中的輸入函數, 與輸出函數以矩陣方式表示, 如此連接下來定義 (6) (7) 也是可用矩陣的方式分別表示, 其激發條件、與激發後所產生新的標記。

定義 (6)

斐氏圖 $C=(P,T,D^-,D^+)$, $t_j \in T$, 如果所有的 $P_i \in P$ 使得, $M \geq e[j] \bullet D^-$, 則標記 M 可被啟動, 同時稱 t_j 可被激發, 其中 $e[j]$ 為非負整數的單位向量。

定義 (7)

$$\begin{aligned} & t_j \text{ 被激發後一個新的標記 (狀態) } \delta \text{ 為} \\ & \delta(M,t_j) \\ & = M - e[j] \bullet D^- + e[j] \bullet D^+ \\ & = M + e[j](D^+ - D^-) \\ & = M + e[j] \bullet D \end{aligned}$$

此外, 如果有多個 t_j 可被激發, 其觸發序列



$\sigma=t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$ ，則產生其新的標記（狀態） δ 為：

$$\delta(M, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}) = \delta(M, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k})$$

$$\delta(M, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k})$$

$$= M + e[j_1] \bullet D + e[j_2] \bullet D + \dots + e[j_k] \bullet D$$

$$= M - (e[j_1] + e[j_2] + \dots + e[j_k]) \bullet D$$

$$= M + f(\sigma) \bullet D$$

其中 $f(\sigma) = e[j_1] + e[j_2] + \dots + e[j_k]$ ，被叫做一個連續激發

$t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$ 。

由此式進一步可以了解斐氏網路圖其具有的同步性質，也就是說允許系統有多個沒有交互作用的狀態，同時發生改變。圖 3 說明斐氏網路圖的激發序列，若其激發序列能被求得解，則表示目標標記 M_g 可抵達，即在過程中沒有死鎖的現象。

$$\text{輸入矩陣 } D^- = \begin{matrix} & t_1 & t_2 \\ \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$\text{輸出矩陣 } D^+ = \begin{matrix} & t_1 & t_2 \\ \begin{matrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{matrix} \end{matrix}$$

關聯矩陣 $D = D^+ - D^-$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

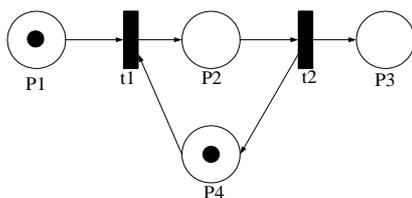


圖 3. 斐氏網路圖沒有死鎖的現象說明

目標標記 M_g =初始標記 $M_0 + f(\sigma) \bullet D$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + f(\sigma) \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

由上式，可求得， $f(\sigma) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ ，其表示有一個連續激發 $t_1 t_2$ 。

另外，若為求系統是否有死鎖現象，也可回溯到定義（5），標記 M 可被啟動的基本要素為 $M \geq e[j] \bullet D^-$ ，尋找關鍵狀態（ M 標記所處的狀態），若滿足定義（5） $M \geq e[j] \bullet D^-$ ，則可被激發，產生新的標記 M_k ，由以上方法連續不斷地實行，直到斐氏圖活性與死鎖現象被偵測到為止。

（二）死鎖可達樹形式

可達樹主要是用來表示代物的抵達的情形，其中有一個特別符號 w ；它是表示無窮。其演算結構如下：

1. 在樹上存有一個 X 節點，而這個 X 節點不是一個新的節點，並且存有另一個相同的標記，以致 $M[Y]=M[X]$ ，於是這 Y 是一個重覆的點（duplicate node）。
2. 標記 $M[X]$ 不能夠使暫態激發的話，而這個 X 節點便是一個末端點（terminal node）。
3. 有一些節點，而這些節點的代物數大於它的起源節點代物數，並且代物數沿著分支不斷地增加，這些節點被叫做無限點（infinite node）。

由圖 4 的斐氏圖所建立的可達樹，如圖 5 所示。

（三）死鎖偵測與預防

當死鎖的發生，以下數個條件要同時都成立才可，也就是死鎖的充分條件：

1. 互相排斥：一個資源同一時間只能由一個工作所使用，

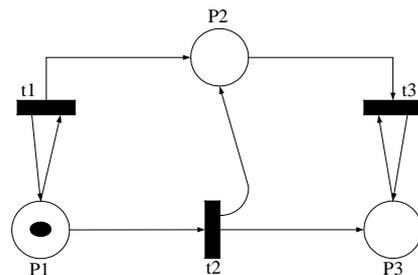


圖 4. 圖形可達樹化



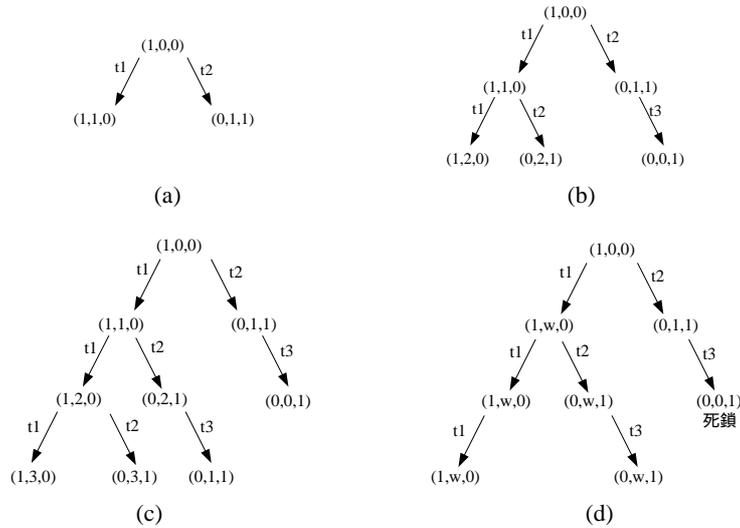


圖 5. 可達樹步驟

而不能夠同時由數個工作共同使用，直到該工作釋放該資源。

2. 握持和等待：一個工作佔有一項資源，並且要求另一項資源，但該項資源卻又被另一個工作所佔有。
3. 沒有優先權：對於一項資源的要求必須要等待該項資源被釋放或沒有工作站用之時才可以。
4. 循環等待：有一個工作之集合，而其各個工作又互相等待，形成了一個圖形等待。

死鎖避免就是使死鎖發生之條件變為偽，使其不發生死鎖，以達成死鎖的偵測與預防。

四、斐氏網路圖圖形事件與轉換 [14]

(一) 時序圖形事件

加執時間於暫態，建構一個週期性的時序圖形事件，可由定義 (8) (9) 與 (10) 以分析圖形效率。

定義 (8)

若 $s_i(n_i)$ 是暫態 t_i 開始執行它第 n_i 個的時間，因而 t_i 的週期時間被定義為

$$C_i = \lim_{n_i \rightarrow \infty} \frac{s_i(n_i)}{n_i}$$

定義 (9)

對於一個標記的圖形，最小週期 C_m

$$C_m = \max\{T_k/N_k\} \text{ for } k=1, \dots, q$$

在式中

q 為在模型中基本迴圈的數目

T_k 為在基本迴圈 k 中，暫態延遲總和

N_k 為在基本迴圈 k 中，代物的總和

定義 (10)

由週期時間，生產率 (through rate) 可以定義為

$$\lambda = 1/C_m = \min\{N_k/T_k, k=1, 2, \dots, q\}$$

如圖 6，存有兩個基本迴圈

$$r1 = \langle p1, t2, p3, t3, p4, t4, p2, t1, p1 \rangle$$

$$r2 = \langle t2, p3, t3, p4, t4, p7, t6, p6, t5, p5, t2 \rangle$$

$$N_1(r1) = 4 \text{ 和 } N_2(r2) = 2$$

依據定義 (9)：

$$C_m = \max\{T_k/N_k\} \text{ for } k=1, \dots, q$$

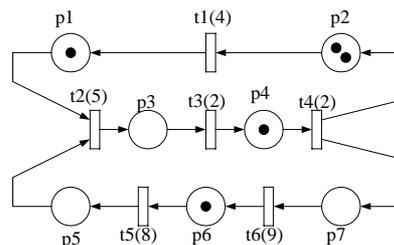


圖 6. 一個圖形事件



其週期時間：

$$\text{迴圈 } r1 : \frac{T_1}{N_1} = \frac{13}{4} = 3.25$$

$$\text{迴圈 } r2 : \frac{T_2}{N_2} = \frac{26}{2} = 13$$

因此，最少週期時間為

$$\max\{3.25, 13\} = 13$$

依據定義 (10)：

$$\lambda = 1/C_m = \min\{N_k/T_k, k=1, 2, \dots, q\}$$

$$\lambda = 1/13 = 0.07 \text{ (代表單位時間代物所經過暫態的數)}$$

(二) 斐氏網路圖圖形轉換

斐氏網路圖的圖形轉換與簡化，可簡述如下，以進一步應用於彈性製造系統。由圖 7、8、9 顯示出，在不同的時間性斐氏網路圖，其可能有同形的狀態圖形，其意為如此的斐氏網路圖在執行特性上是相等的。

1. 向後切開 (backward splits)：一個單一暫態緊隨著一個分支，相等於單一暫態以平行路徑替代分支，如圖 7。
2. 平行路徑的簡化 (reduction of parallel paths)：平行路徑的例子如圖 8，此路徑能由單一暫態所取代，此單一暫態的激發時間相等於各個路徑全部激發時間的最大。
3. 平行路徑的移動 (removal of parallel paths)：以一個路徑只包含一個站區的平行路例子，如圖 9 則此單一站區的路徑能被移動，不會影響這模型的執行。

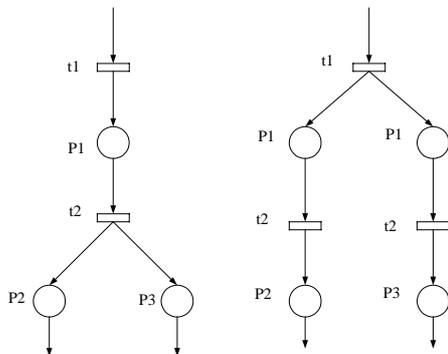


圖 7. 向後切開的轉換圖形

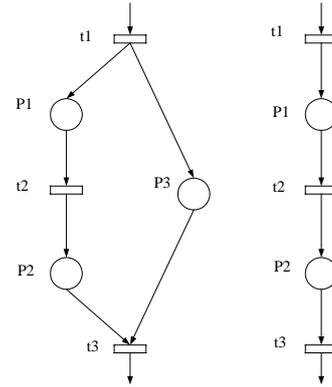


圖 8. 平行路徑簡化的轉換圖形

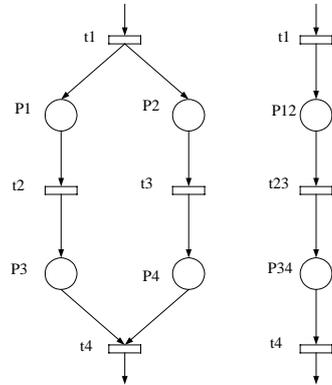


圖 9. 平行路徑移動的轉換圖形

五、彈性製造系統排程分析驗證

本彈性製造系統主要由自動倉儲 (AS/RS) 無人搬運車 (AGV) 門形機械手、CV1、CV2 輸送帶，台中精機 VT26 CNC 車床，工件翻轉台、友嘉 FV600 切削加工中心機、友嘉 FTC180 CNC 車床，FANUC S-500 六軸機械手臂所組成，機台相關位置，如圖 10 所示。本彈性製造系統的工件製造加工流程關係如下：AS/RS AGV 門形開 CV1 傳送帶 CCD 偵測 機器手臂 友嘉 FTC180 CNC 車床 機器手臂 工件翻轉台 機器手臂 友嘉 FV600 切削加工中心機 機器手臂 台中精機 VT26 CNC 車床 機器手臂 CV2 傳送帶 門形開 AGV AS/RS。

(一) 彈性製造系統死鎖偵測

系統工作流程經斐氏網路圖模組化後，由於彈性製造系統的製造流程是從 AS/RS 提供一個欲加工的物件，送往各機台加工，完成的加工品再送回 AS/RS 儲存，而其表示著，系統最終狀態必須相等於起始狀態(目標標記 M_g =初始標記



表 1. 為圖 12 三機的排程序列

排程	行為步驟
A	In ⇒ M1 ⇒ M2 ⇒ M3 ⇒ Out In
B	In ⇒ M1 ⇒ M2 M3 ⇒ Out M2 ⇒ M3 In
C	In ⇒ M1 M3 ⇒ Out M1 ⇒ M2 ⇒ M3 In
D	In ⇒ M1 M2 ⇒ M3 M1 ⇒ M2 M3 ⇒ Out In
E	In ⇒ M1 M2 ⇒ M3 ⇒ Out M1 ⇒ M2 In
F	In ⇒ M1 M3 ⇒ Out M2 ⇒ M3 M1 ⇒ M2 In

在表 1, X Y 表示著機械手臂從 X 移到 Y, X⇒Y 表示著機械手臂負載一個加工物從 X 移到 Y, In 代表輸入輸送帶, Out 代表輸出輸送帶。

圖 12(a) 的時間斐氏網路圖, 顯示如圖 13, 在圖 13 中 t1, t2, t3 表示三台加工機 (M1, M2, M3) 的操作, 此些暫態的輸入站區 P1, P3 和 P5 表示欲加工物的裝載; 輸出站區 P2, P4 和 P6 則是完成加工機的操作, 暫態的激發時間分別定義為:

$$f(t_1) = o_1 \rightarrow \text{表示機台 M1 的加工操作時間}$$

$$f(t_2) = o_2 \rightarrow \text{表示機台 M2 的加工操作時間}$$

$$f(t_3) = o_3 \rightarrow \text{表示機台 M3 的加工操作時間}$$

機械手臂的動作序列, 由路徑 t4, t5, t6, t7, t8 顯示於表 2, 在表中, a 定義為抓取時間; b 定義為卸下時間; c 定義為裝載時間; d 定義為放下時間; e 定義為移動時間。

彈性製造單元排程 A 的斐氏網路圖, 如圖 13 的模型, 包含好幾個平行的路徑 (P7 和 t1, P8 和 t2, P9 和 t3), 其能被簡化成一個基本網路, 如圖 14, 所以排程 A 的生產率, 容易被求得 (移動 P7, P8, P9 的輸入與輸出路徑):

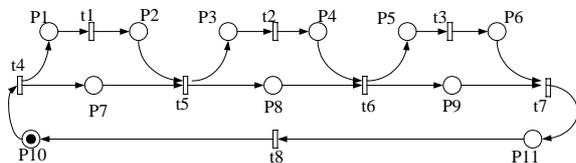


圖 13. 三機台彈性製造單元排程 A 的斐氏網路圖

表 2. 三機台排程 A 機械手臂的動作序列

暫態	操作	時間
t4	從 In 抓取一個加工物, 移到 M1 和裝載	a+c+e
t5	從 M1 卸下貨物, 移到 M2 和裝載	b+c+e
t6	從 M2 卸下貨物, 移到 M3 和裝載	b+c+e
t7	從 M3 卸下貨物, 移到 Out 和放下	b+d+e
t8	從 Out 移動到 In	e

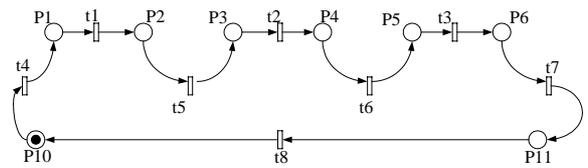


圖 14. 彈性製造單元排程 A 的斐氏網路圖簡化

$$\lambda_A = \frac{1}{o1 + o2 + o3 + a + 3b + 3c + d + 5e}$$

三機台彈性製造單元排程 B 到 E, 可參考 [1], 另機械手臂排程 F 的斐氏網路圖, 顯示在圖 15, 其 t1, t2 和 t3 同樣表示加工機的操作, 剩下的暫態屬於機械手臂的動作, 如表 3。

將彈性單元排程 F 的斐氏網路圖, 圖 15, 向後切開暫態 t4 和 t9, 導致成為如圖 16 斐氏網路圖。生產率為

$$\lambda_F = \min\left(\frac{1}{(o1 + a + b + 2c + 3e)}, \frac{1}{(o2 + 2b + 2c + 3e)}\right),$$

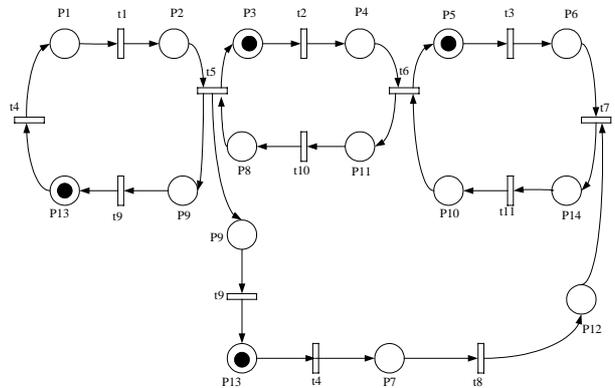


圖 15. 彈性製造單元排程 F 的斐氏網路圖

表 3. 三機台排程 F 機械手臂的動作序列

暫態	操作	時間
t4	從 In 抓取一加工物, 移到 M1 和裝載	a+c+e
t5	從 M1 卸下貨物, 移到 M2 和裝載	b+c+e
t6	從 M2 卸下貨物, 移到 M3 和裝載	b+c+e
t7	從 M3 卸下貨物, 移到 Out 和放下	b+d+e
t8	從 M1 移動到 M3	e
t9	從 M2 移動到 In	e
t10	從 M3 移動到 M1	e
t11	從 Out 移動到 M2	e



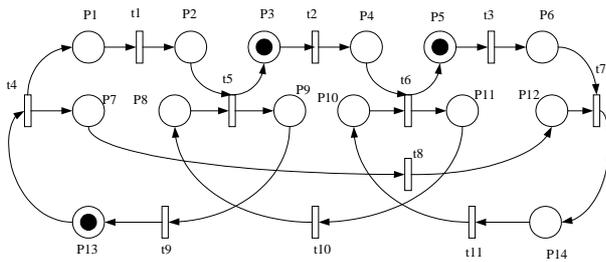


圖 16. 三機台彈性製造單元排程 F 的斐氏圖簡化

$$\frac{1}{(o3+2b+c+d+3e)}, \frac{1}{(a+3b+3c+d+8e)}$$

其週期時間

$$C_m^{(F)} = \max(o1+a+b+2c+3e, o2+2b+2c+3e, o3+2b+c+d+3e, a+3b+3c+d+8e)$$

對於欲生產某形式加工件，其物件需經過友嘉 FV600 切削加工中心機 友嘉 FTC180 車床與台中精機 VT26 CNC 車床的最佳排程，可先行計算 λ_A 、 λ_B 、 λ_C 、 λ_D 、 λ_E 、 λ_F 工作效率，再找出最大值 $\max(\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \lambda_D, \lambda_E, \lambda_F)$ ，即可。

本文以 Visual SimNet 軟體及 C 語言完成系統建模及檢測，並以 Matlab 語言，進行最佳排程效率分析，由圖 17 的程式介面，可輸入各個排程的斐氏網路圖模型之迴圈暫態延遲時間與迴圈標記，經過執行可得所要的最佳排程。

實際線上加工排程測試，以選定齒輪粗胚為主，其加工程序可見於圖 18 圖 21，經分析結果，彈性製造加工單元排程 A，具有最佳之加工效率。

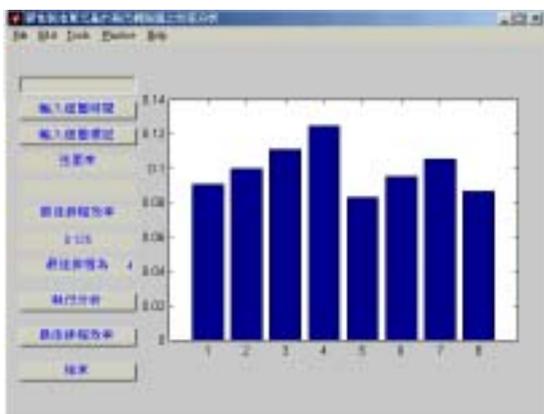


圖 17. 斐氏網路圖模型之最佳排程效率分析



圖 18. 機械手臂夾取工件至第一臺 CNC 車床



圖 19. 機械手臂夾取工件到 FV600 切削加工機



圖 20. 機械手臂夾取工件至第三臺 CNC 車床



圖 21. 工件成品與工件胚料



五、結論

由於斐氏網路圖是一種圖形化的建構工具,不僅容易使用,而且易於瞭解,具有相當好的建構與分析能力。本研究分析方法有助於彈性製造系統的設計且提供彈性製造系統分析者一個簡易方便的分析工具,並具體達到下列目標:第一部份,將彈性製造系統的工作流程經斐氏網路圖模組化後,藉由斐氏網路圖特性中活性,分析製造系統是否有死鎖現象,另外,當有死鎖情形時,使死鎖發生之條件變為偽,達成死鎖避免。第二部份,應用時序斐氏網路圖描述彈性製造單元中工作物件與機台的相互關係,藉由時間性的圖形事件,建構所有的工作排程模型,求其工作效率,進而從中求取最佳排程;又於不同的時間性斐氏網路圖,其可能有同形的狀態圖形,可藉由同形的狀態斐氏網路圖形,簡化一個龐大複雜的時間性斐氏網路圖,以便於效率分析。

本文實際應用於本校彈性製造系統,藉由斐氏網路圖建構出機械手臂與三台加工機所有的6種排程模型,獲得有關於彈性製造單元生產效率的資訊,以求取可行的最佳排程。

參考文獻

- 趙柏鴻(民89),以物件導向斐氏網路圖為基礎之彈性製造系統死鎖偵測與預防研究,大葉大學自動化工程學系碩士論文。
- Abdallah, I. B. and H. A. ElMaraghy (1998) Deadlock prevention and avoidance in FMS: A Petri Net based approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, 704-715.
- Bowden, F. D. J. (2000) A brief survey and synthesis of the roles of time in Petri Nets. *Mathematical and Computer Modeling*, 31, 55-68.
- DiCesare, F., G. Harhlakis, J. M. Proth, M. Silva and F. B. Vernadat (1993) *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, Chapman & Hall, London.
- Dsouza, K. A. and S. K. Khator (1997) System reconfiguration to avoid deadlocks in automated manufacturing systems. *Computer Industry Engineering*, 32(2), 455-465.
- Huang, H. P. and P. G. Chang (1992) Specification, modeling and control of a flexible manufacturing cell. *International Journal of Production Research*, 30, 2515-2543.
- Huang, Y., M. D. Jeng and S. Chung (2001) Design, analysis and implementation of a real-world manufacturing cell controller based on Petri Nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14(3), 304-318.
- Kuo, C. H., H. P. Huang and M. C. Yeh (1998) Object-oriented approach of MCTPN for modeling flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, 737-749.
- Lawley, M. A., S. A. Reveliotis and P. M. Ferreira (1998) A correct and scalable deadlock avoidance policy for flexible manufacturing systems. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 14(5), 796-809.
- Lin, J. T. and C. C. Lee (1992) A modular approach for the modeling of a class of zone control conveyor system using timed Petri Nets. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 5(4-5), 277-289.
- Murata, T. (1989) Petri Nets: properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-574.
- Peterson, J. L. (1981) *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice Hall, NJ.
- Proth, J. M. and X. Xie (1996) *Petri Nets - A Tool for Design and Management of Manufacturing Systems*, John Wiley & Sons, NY.
- Song, J. S. and T. E. Lee (1998) Petri Net modeling and scheduling for cyclic job shops with blocking. *Computer Industry Engineering*, 34(2), 281-295.
- Zuberek, W. M. and W. Kubiak (1999) Timed Petri Nets in modeling and analysis of simple schedules for manufacturing cells. *International Journal of Computers & Mathematics with Applications*, 37, 191-206.

收件：90.07.09 修正：90.10.11 接受：90.10.30

