

單人多機之製造單元內部作業循環路徑之研究

黃榮華 薛自興*

(收稿日期：92 年 1 月 6 日；第一次修正：92 年 4 月 8 日；
第二次修正：92 年 5 月 14 日；接受刊登日期：92 年 7 月 3 日)

摘要

在製造單元 (manufacturing cells) 內，單人操作多部機器的模式已經相當普遍。在單人三機模式中，作業員可選擇的作業循環路徑只有 13 種，可以用列舉法求取最佳的路徑，單人四機時，作業循環路徑有一千多種，一旦機器數增至五台時，則所有的循環路徑將多達十三億種以上，在這些可能的作業員循環路徑中，單位輸出之循環時間有的十分相近，亦有差異極大的，如何選定最佳的路徑以增加生產效率，作好成本控管，在實務上，確實是一項重要但又複雜的議題。因為問題本質上為 NP-hard，所以我們先設計探索式演算法，能夠在很短的時間內，取得最佳解或近似最佳解，測試資料結果顯示在七部機器以下，最佳解比率平均超過 85%。若以此法所得之解作為起始解，構建成分枝界限法，則可以迅速地求得最佳解，資料測試結果顯示較現有解法有顯著的改善。

關鍵詞彙：製造單元，單人多機，作業循環路徑，單位循環時間

壹 前言

在現代化的生產系統中，為能增進勞力效率，並且避免作業時間的浪費，單人多機模式 (single operator with multi-machine model) 已被廣泛使用，它的特點是作業員可同時操作多部機器，例如精密鑄造工廠，在製造蠟模的過程中，其作業方式是將數個不同模具同時裝在多部機器上，作業員只須執行按鍵射蠟及取出蠟模等工作，因為這些模具的射蠟、冷卻和取出蠟模的時間都有時差，可以容許作業員同時操作數部機器。換言之，在一個製造單元 (manufacturing cells) 內，作業員不再只是待在一部機器旁工作，而是在一群機器間移動，執行工件安裝 (loading)、卸下 (unloading) 及搬運 (moving) 等工作，以維持生產流程的正常運行。

關於製造單元問題之研究論文，近十幾年來才有較多的發展，但大部份的論文都是以零件編碼、群組佈置或工件的作業排程為主要研究議題，針對作業員配合操作的部份，則甚少提及。這些研究中，探討製造單元內應該如何改

* 作者簡介：黃榮華，輔仁大學管理學研究所副教授；薛自興，土地銀行資訊室領組。

進工作績效的有：Baker and Dzielinski (1960), Black (1983), Dale and Dewhurst (1984), Elvers and Treleven (1985), Graves (1981), Huang *et al.* (1984), Lee (1998), Mahmoodi *et al.* (1992), Nelson (1967), Pullen (1976), Russell *et al.* (1991), Treleven (1989), Chan and Song (2001), Dimopoulos and Mort (2001) 等，都是專注在生產系統設計上的改善，並沒有注意到作業員搭配的問題。而 Nelson (1967) 是最先將作業員的限制考慮在生產系統內，在後來的研究中，如 Elvers and Treleven (1985), Fryer (1975), Huang *et al.* (1984), Russell *et al.* (1991), Treleven (1989), Davis and Mabert (2000) 等學者，也開始將作業員的配合操作部分，視為影響績效的一項重要因素。其中，Holnies (1979) 是第一位強調作業順序為影響生產力的主要因素之一。此外，在有關製造單元排程的相關研究中，Dale and Dewhurst (1984) 和 Lee (1998) 都將作業員的因素，包括在製造單元特徵的裡面，Russell *et al.* (1991) 則進一步說明了在製造單元生產中，不同的作業員配置策略之影響及衝擊，只是他們也都沒有探討作業員配合操作的問題。

真正深入探討作業員循環路徑 (operator cyclic walking pattern) 問題的研究只有 Chen (1991)，其針對此一問題，利用整數規劃可以取得最佳解，但是此一問題為 NP-Hard，而 Chen (1991) 用的是一般性解法，並未針對問題特質設計演算法則，所以求解時間相當冗長。為此，本文將針對此一問題進行研究，希望可以發展出有效之探索式解法，能夠迅速地取得最佳解或近似最佳解。再進一步，以探索法所得之解作為起始解，配合有效的刪除準則及界限值之發展，構建整合式的分枝界限法，可以在合理的時間內，求得最佳解。

貳 問題描述與假設條件

一、問題描述

我們將針對單人多機之製造單元內部，作業員操作循環路徑最佳化問題作研究，其相關名詞之具體定義如下：

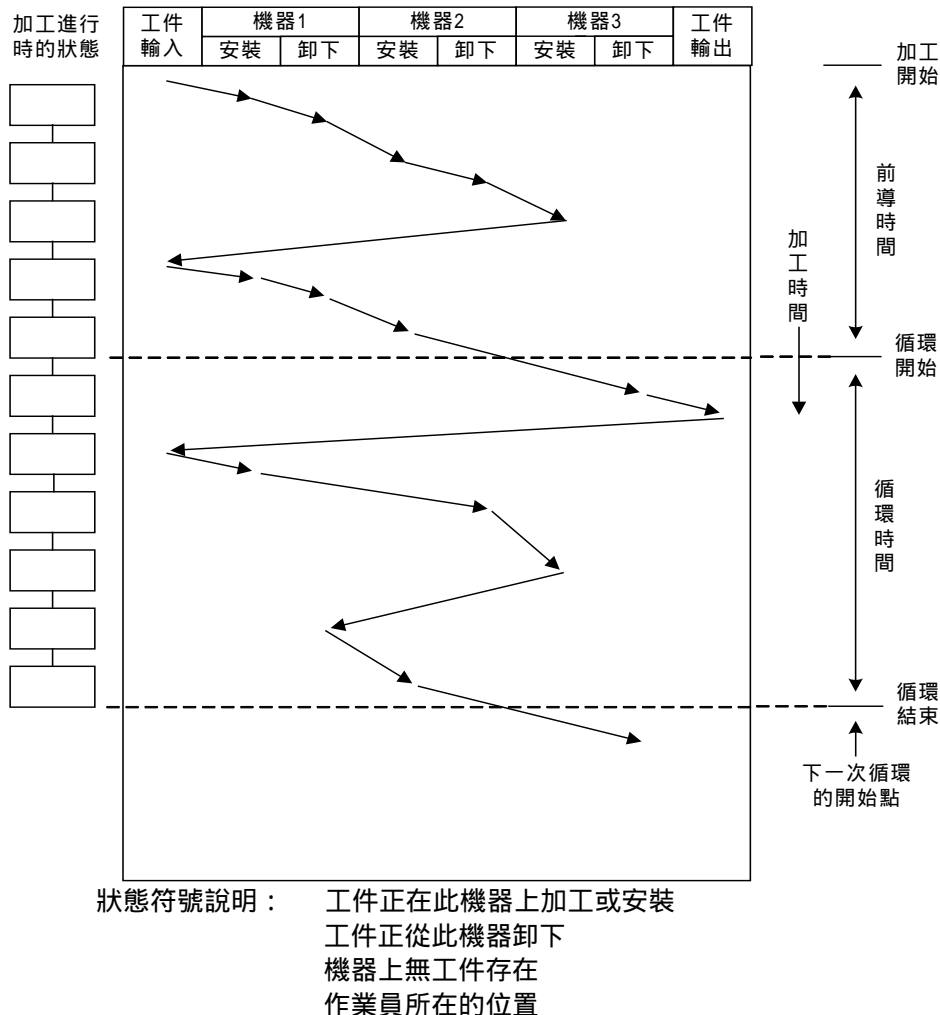
定義一：作業員循環路徑 (operator cyclic walking pattern)

在單人多機模式中，假設狀態 1 為作業員將工件安裝在機器 1 上。狀態 2 為作業員等待機器 1 將工件加工完成後，移動工件到機器 2。狀態 3 則作業員可能選擇等待機器 2 加工完成後將工件移到機器 3，或回到機器 1 作安裝工件的動作。接續將有更多不同的選擇，我們將已發生之狀態均分別記錄於 T 集

合中，當狀態 j 之作業員位置及所有工件位置的狀況，皆與 T 集合中之一狀態 i 相同時，則稱此為一個作業循環的產生。在狀態 j 之後，作業員便依循此作業循環路徑進行加工，即使得狀態 $j+k$ 相同於狀態 $i+k$ (其中, $k=1, 2, \dots$)。因此作業員循環路徑即為：狀態 i (循環開始) 至狀態 $j-1$ (循環結束) 之間的作業員行進路徑。一旦考慮所有可能狀態時，便會形成許多可行的作業員循環路徑，圖一列舉了單人三機模式下，當一種可行的作業員循環路徑。

定義二：前導時間

由於單人多機模式中，作業循環開始狀態不一定為初始狀態 1，因此，在作業循環產生之前，由狀態 1 到循環開始前的狀態，這些不屬於作業循環內的狀態統稱為前導狀態，其經過的時間則稱為前導時間。



圖一 單人三機模式下一種作業循環路徑的產生

如圖一所示，加工開始時，作業員位於輸入站並把第一件工件安裝上第一部機器，由於工件在輸入站時只是暫時的狀態，工件將立刻移至第一部機器上，同樣的，輸出站也是暫時的狀態。我們合理的簡化此一現象，省略了輸入站和輸出站，而將之併入第一部和最後一部機器來考慮。再者，基由循序流程作業型式 (the permutation flow-shop case) 的特性，當工件正在某一機器上加工時，其後序的工件，不得越過此一機器去進行加工，必須等待該機器上的工件加工完畢，經由作業員卸下後，再依序將工件推進。在這段時間內的各工件，只要不違反上述原則，作業員可選擇到任一機器，執行安裝或卸下工件的作業。

一般而言，最佳化作業循環路徑之目的，在於提高生產力，或使得製造單元內最後一個工件，最早離開最後一部機器，因此，本文亦以 Chen (1991) 所提出的單位輸出之循環時間 (unit cycle time) 為績效衡量準則，其定義如下：

定義三：循環時間 (cyclic time)

從循環開始狀態到循環結束狀態所花的時間，如圖一所示。

定義四：單位輸出之循環時間 (unit cycle time, UCT)

$$UCT = \frac{\text{cyclic time}}{\text{outputs per cycle}}$$

單位輸出之循環時間等於循環時間除此循環中輸出的產品數量，即「單位產品之處理時間」。

本研究目的就在求取此一單位輸出之循環時間為最小，由於循環的產生通常都不是由第一個工件，或初始狀態 1 開始，因此，絕大多數循環開始前都有所謂的前導時間，然而此段前導時間相對於後序不斷重複的作業循環，或整批工件的總製程時間 (make span)，只是一小部份，因此，可以合理的予以忽略，而以循環發生後之單位輸出之循環時間，作為績效衡量準則及生產效率之指標。

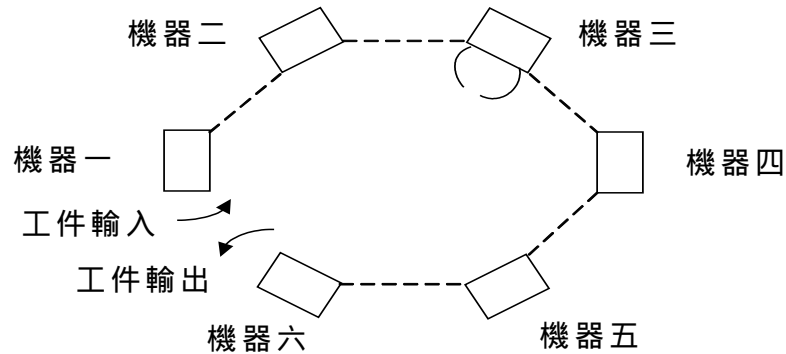
二、假設條件及符號說明

(一)假設條件

本研究主題之主要假設為：

1. 單人多機之製造單元內，所有機器係以 U 型機器佈置，如圖二所示，而

單元內之機器數為兩部以上 ($m \geq 2$)。



圖二 單人多機之 U 型單元機器佈置圖

2. 製造單元在一次考慮時段內只處理一種工件，工件的生產流程已知，即在此一單元內，依循固定方向經過所有的 m 部機器。工件在各機器上之處理時間、工件安裝 (loading) 及卸下 (unloading) 時間均為已知。
3. 沒有放置在製品的緩衝區 (in-process buffers)。
4. 製造單元中，每部機器均可對工件自動執行加工作業，而作業員只要負責工件的安裝、卸下及搬運。
5. 工件必須透過作業員搬運 (moving)，才能在機器間轉移，假設作業員在臨近機器間之移動時間為非臨近機器間之移動時間的一半，而作業員在臨近機器間及非臨近機器間的移動時間假設為一定值。

(二)符號說明

假設在製造單元內，有 m 部機器 (設為 M_1, M_2, \dots, M_m)，在一次考慮時段中處理 k 個加工件 (設為 J_1, J_2, \dots, J_k)，他們都有相同的處理順序。作業員在機器間移動，並執行安裝和卸下作業，且一次只能處理一個工件。所使用的相關符號為：

1. P_{ij} = 第 i 個工件在機器 M_j 上之加工處理時間 ($i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, m$)
2. L_{ij} = 第 i 個工件在機器 M_j 上之安裝準備時間 ($i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, m$)

3. U_{ij} = 第 i 個工件在機器 M_j 上之卸下時間 ($i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, m$)
4. T_{ij} = 作業員在機器 M_i 與機器 M_j 間運送工件的時間。
5. S = 作業員所在的機器位置。當作業員正在機器 M_j 上作業時, $S=j$ 。
6. T 集合 = 作業員加工中經過的工作狀態之集合。

參 作業循環路徑之探索式解法

實務上，相較於最佳解，有時候具有時效性的次佳解，可能更能夠被決策者接受。針對以單位輸出之循環時間為衡量準則的單人多機作業循環路徑問題，我們將先發展一套探索式解法，可以在很短的時間內，取得最佳解或近似最佳解。

一、探索式解法

本探索式解法之主要概念為：儘量維持製造單元內的所有機器都有工件正在被加工、被安裝或等待卸下，萬不得已的時候，才讓這些工件中，最末機器的工件被完成，並以此情況來求解其作業員的循環路徑，計算其時間及正確率。以下是探索式演算法的實施步驟。

- 步驟 1**：開始加工，作業員將 J_1 (第一個工件) 從輸入站安裝至 M_1 (第一部機器) 上進行加工。因此，作業員位置 $S=1$ ，並將此狀態記錄於 T 集合內。
- 步驟 2**：作業員將 J_1 分別經由 M_1 、 M_2 一直推進到 M_m ，並將工件留在 M_m 上，依序將這些經過的狀態，分別記錄於 T 集合內。作業員位置 $S=m$ 。
- 步驟 3**：將 J_2, J_3, \dots 比照步驟 2 的方式，推進到 M_{m-1}, M_{m-2}, \dots 上，直到製造單元內 m 部機器都充滿被加工件。依序將經過的狀態都記錄在 T 集合內。作業員位置又回到 $S=1$ 。
- 步驟 4**：作業員將 M_m 上加工完畢之工件卸下，並移至輸出站上。作業員依舊回到 M_{m-1} 機器上，作業員位置 $S= m-1$ 。經過的狀態均記錄在 T 集合內。
- 步驟 5**：作業員將 M_{m-1} 加工完畢的工件卸下，並移至 M_m 上進行安裝。作

業員位置 $S = m$ ，將狀態記錄於 T 集合內。比對此狀態與 T 集合中的所有狀態，如果出現完全相同者，就表是作業循環已產生，直接到步驟 8。反之，到步驟 6。

步驟 6: 作業員再將 M_{m-2} 上加工完畢的工件卸下，並移至 M_{m-1} 上進行安裝。然後，作業員依此順序可以將 m 部機器上之工件依序移往前推進一步。同時在每個新狀態發生時，都必須將當時的狀態與 T 集合中的所有狀態加以比對，如果出現相同者，就表示作業循環已產生，直接跳至步驟 8。反之，繼續將狀態記錄在 T 集合內，到步驟 7。

步驟 7: 當 M_1 上的工件已移動至 M_2 上時，作業員再由輸入站移入一個新的工件，並安裝上 M_1 。同時也必須將此時的狀態與 T 集合中的所有狀態相互比對，如果出現相同的狀態，則代表作業循環已產生，直接跳至步驟 8。反之，則繼續將狀態記錄在 T 集合內，並回到步驟 4。

步驟 8: 將此狀態作為作業路徑的「循環結束」，而 T 集合中與其相同的狀態點，為「循環開始」。作業員以後的作業進行方式，即可依照此一固定的路徑循環，直到所有的工件都被加工完畢。

二、實例說明

下面將用例題說明探索式解法之實際求解情況。我們考慮一個單人四機的問題，相關資料如表一所示，假設相鄰機器間之移動時間為 1，而非相鄰機器間的移動時間為 2。

表一 單人四機模式例題之相關資料

M_j	M_1	M_2	M_3	M_4
P_{ij}	19	23	24	19
L_{ij}	5	5	5	5
U_{ij}	3	3	3	3

步驟 1: 開始加工作業，作業員將 J_1 從輸入站安裝至 M_1 上，作業員位置 $S=1$ 。將狀態記錄於 T 集合內 (如表二中之 State 1 所示)。

步驟 2: 作業員將 J_1 分別經由 M_1 M_2 M_3 一直推進至 M_4 ，作業員位置 $S=4$ 。依序將這些經過的狀態記錄於 T 集合內 (如表二中之 State 2 至

State 4 所示)。

步驟 3：作業員再將 J_2 推進至 M_3 ，將 J_3 推進至 M_2 ，將 J_4 安裝至 M_1 ，作業員位置 $S=1$ 。依序將這些經過的狀態記錄在 T 集合內 (如表二中之 State 5 至 State 10 所示)。

步驟 4：作業員將 M_4 上加工完畢之工件移至輸出站上，再回到 M_3 ，作業員位置 $S=3$ 依序將這些經過的狀態記錄在 T 集合內 (表二之 State 11)。

步驟 5：作業員將 M_3 上加工完畢之工件移至 M_4 安裝，作業員位置 $S=4$ 。將此狀態與 T 集合中的所有狀態進行比對，沒有完全相同的狀態，將此一狀態記錄在 T 集合內 (表二之 State 12)。

步驟 6：作業員將 M_2 上加工完畢之工件移至 M_3 安裝，將此狀態與 T 集合中的所有狀態進行比對，沒有完全相同的狀態，將此一狀態記錄在 T 集合內 (表二之 State 13)。將 M_1 上加工完畢之工件移至 M_2 安裝，將此狀態與 T 集合中的所有狀態進行比對，出現相同的狀態，代表作業循環已產生，將此一狀態記錄在 T 集合內 (表二之 State 14)，直接到步驟 8。

表二 單人四機模式之探索式解法釋例

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	累積加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		3	65
State 4		4	98
State 5		1	105
State 6		2	133
State 7		3	165
State 8		1	172
State 9		2	200
State 10		1	206
State 11		3	213
State 12		4	222
State 13		3	233
State 14		2	244

前導時間

循環時間

步驟 7：T 集中，State 9 與 State 14 為作業循環路徑的開始狀態和結束狀態，作業員工以後的作業進行方式可循此固定的路徑，直到所有的工件都加工完畢為止。

$$UCT = \frac{\text{cyclic time}}{\text{outputs per cycle}} = \frac{244 - 200}{1} = 44$$

由以上的分析，可以知道本文所發展的探索式解法之應用。為了進一步顯示它和一般推論觀念不同，再以同例說明。一般直觀判斷是將作業員的移動路徑依循機器上工件加工完成的順序來安排，作業員只要看到那一機器加工完成，便到那一部機器進行安裝或卸下作業。若以此方法求解，則可得表三所示之結果。

表三 單人四機模式之一般直觀判斷解法

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	累積加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39
State 4		3	65
State 5		2	76
State 6		1	82
State 7		4	98
State 8		3	109
State 9		1	122
State 10		2	131

表三中，State 5 與 State 10 為作業循環路徑的開始狀態和結束狀態。

$$UCT = \frac{\text{cyclic time}}{\text{outputs per cycle}} = \frac{131 - 76}{1} = 55$$

雖然採用直觀判斷法有可能取得較短的前導時間，但前導時間只有在開始作業時，發生一次，其影響效果不大，重要的是往後不斷重覆發生的循環時間，以上例而言，本文所發展的探索式解法，雖然前導時間較長 (200- 76= 124)，但單位循環時間較短 (55- 44= 11)，即循環一次便可節省 11 個單位時

間，因為兩個方法所得作業循環路徑中的產量都是一件，所以只要加工件數 12 ($124/11 = 11.27$) 以上，本探索式解法將優於直觀判斷法，此一結果顯示對生產效率的提昇，會隨著循環作業次數的增加而更為顯著。

肆 作業循環路徑之最佳解

一、基本定理

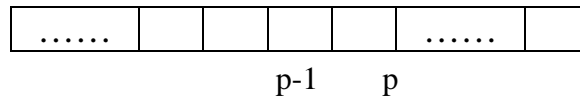
我們將建構分枝界限法，以求取最佳解。一般而言，選擇分枝結點的方式有最佳界限法則 (the best bound rule)，及最新界限法則 (the newest bound rule) 兩種，本文將採最新界限法則，並以探索式所得之結果作為起始解，即第一個上界值 (upper bound)。由於任一結點所處的狀態可能是作業循環路徑尚未開始、將要完成、或正好完成 (即下一個循環剛要開始) 等三種情況之一。當正好完成時，由於已經無法改變循環路徑之完成時間，因此，不要求算其最佳作業循環路徑。如果是另外兩種情況，就必須判斷其分枝後的最佳情況，即下界值 (lower bound)，以之決定是否繼續分枝，有關下界值的取得方式如下：

定理一：

在固定時間中，有最多工件被加工完成，則其單位輸出之循環時間最小。因此，當作業循環路徑尚未開始時，所有在分枝結點以下的可能狀態，最佳狀態是讓製造單元內的機器，儘量維持較多部機器有工件存在，萬不得已才讓最末機器的工件被完成。

證明：

當循環路徑尚未產生時，若讓所有工件都儘量往前推至累積為二件時 (如圖三所示)，再將累積於前面的工件(p)往前移，因為工件(p)是等待其後面工件(p-1)來到時，才往前移的，所以當工件(p)往前移動後，其後面工件(p-1)早已等待一段時間，因此，可以減少後面工件之等待時間，在此接續情況下的工件都能達到較佳的位置，同時，可能形成的作業循環路徑時間會較短。同理，當加工時間較長時，則考慮累積為三件以上的情況，亦可得到工件間較佳位置的作業循環路徑。再以這些情況中之最佳者，作為在此分枝結點的可能最佳作業循環路徑。



圖三 定理之一說明圖例

定理二：

固定一循環路徑中可完工之工件數，則循環時間愈短，將使單位輸出之循環時間愈小。因此，當作業循環路徑將要完成時，則緊盯最後機器的工件，只有在其被加工時，作業員才能利用空檔，去處理其他工件，如此可使其單位輸出之循環時間最小。

證明：

當作業循環路徑快完成時，欲使單位輸出之循環時間最小，如果緊盯該循環的最後一個工件，使其儘快完成，則作業循環路徑為最小。

二、分枝界限法

為能求得最佳解，本文將訂定刪除準則及界限值，建立分枝界限法，其求解步驟如下：

步驟 1：起始 (initialization)

以探索式解法，求得一組起始解，並以其單位輸出之循環時間為上界值 (UB)。

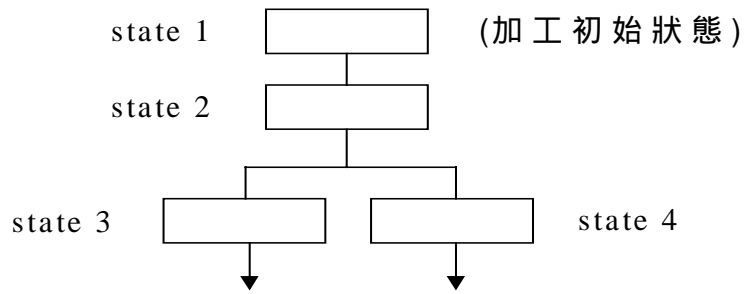
步驟 2：分枝 (branching)

依最新界限法則，由還未洞悉的剩餘子集中，選擇具有最小下界值者，予以分枝。

步驟 3：定界 (bounding)

對分枝後的子集合，以定理一及定理二，分別求算可能的最小單位輸出之循環時間，再取最小者，定其為該剩餘子集的下界值 (LB)。

然而，並非每一個分枝結點，都會產生二種以上的可行狀態，若只有一種可行狀態，則不需執行定界 (bounding) 的步驟，只要繼續分枝，以節省求解時間。例如圖四之 State 1 所示。



圖四 狀態分枝情形圖例

步驟 4：洞悉 (fathoming)

一個分枝結點若符合下列情況之一即告洞悉：

1. $LB \geq UB$
2. 無法再發展可行解。
3. 最佳狀態已知，若其 $LB < UB$ ，則將其解定為新的上界值。

步驟 5：停止 (stop)

當所有分枝結點都被洞悉。

三、實例說明

我們將以分枝界限法求解與前一節相同的例題（資料如表一所示），以便分析比較。

步驟 1：起始

以探索式解法得到一組可行解，其單位輸出之循環時間為 44 單位，令上界值 $UB = 44$ 。

步驟 2：分枝

如表四所示，由 State 1 分枝，只有一種可能情況，此時作業員位置 $S = 2$ ，繼續分枝。

表四 單人四機模式之分枝進行步驟(1)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33

步驟 2：分枝

由 State 2 分枝, 有 State 3 及 State 4 二種可能的情況, 如表五、表六所示。

表五 單人四機模式之分枝進行步驟(2-1)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39

表六 單人四機模式之分枝進行步驟(2-2)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 4		3	65

步驟 3：定界

分別對 State 3 及 State 4 二種情況, 求算可能的最小單位輸出之循環時間, 即下界值 (LB)。

步驟 3-1：(State 3)

- (1) 應用定理一求取可能的最小循環路徑, 如表七、表八、表九所示, 分別為二個、三個及四個工件連續存在的情況, 最佳單位輸出之循環時間分別為 56、51 及 45 單位。

表七 應用定理一所求得的最小循環路徑解(1-1)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39
State 5'		3	65
State 6'		2	76
State 7'		4	98
State 8'		1	105
State 9'		3	115
State 10'		2	132

前導時間
循環時間

註：' 係指第一種可能繼續發展分枝的狀態

表八 應用定理一所求得的最小循環路徑解(1-2)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39
State 5''		3	65
State 6''		2	76
State 7''		1	82
State 8''		4	98
State 9''		3	109
State 10''		2	120
State 11''		1	133

前導時間
循環時間

註：'' 係指第二種可能繼續發展分枝的狀態

表九 應用定理一所求得的最小循環路徑解(1-3)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39
State 5'''		3	65
State 6'''		4	98
State 7'''		2	109
State 8'''		3	141
State 9'''		1	148
State 10'''		2	176
State 11'''		1	182
State 12'''		4	199
State 13'''		3	210
State 14'''		2	221

前導時間
循環時間

註：''' 係指第三種可能繼續發展分枝的狀態

(2)應用定理二求取可能的最小循環路徑，如表十所示，最佳單位輸出之循環時間為 56 單位。比較定理一與定理二所得結果，最小值為 45 單位時間，令 State 3 之 LB= 45。

步驟 3-2 : (State4)

- (1)應用定理一求取可能的最小循環路徑，如表十一、表十二、表十三所示，分別為二個、三個及四個工件連續存在的情況，最佳單位輸出之循環時間分別為 65、50 及 44 單位。在第一種情況下，計算單位輸出之循環時間時，由於作業員在循環起點和循環終點的機器上，其工件之已加工時間有些許的差異，因此，必須將其已加工時間調整為相同，才可求算其單位輸出之循環時間。

表十 應用定理二所求得的最小循環路徑解(1)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 3		1	39
State 5''		3	65
State 6''		2	76
State 7''		1	82
State 8''		4	98
State 9''		3	109
State 10''		2	132

前導時間
循環時間

註：''係指第四種可能繼續發展分枝的狀態

表十一 應用定理一所求得的最小循環路徑解(2-1)

加工進行狀態 (T)	圖示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 4		3	65
State 5'		1	72
State 6'		2	100
State 7'		4	110
State 8'		1	117
State 9'		3	149
State 10'		1	156

前導時間
循環時間

註：'係指第一種可能繼續發展分枝的狀態

表十二 應用定理一所得的最小循環路徑解(2-2)

加工進行狀態 (T)	圖 示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 4		3	65
State 5"		1	72
State 6"		2	100
State 7"		1	106
State 8"		4	117
State 9"		3	132
State 10"		2	143
State 11"		1	156

註：" 係指第二種可能繼續發展分枝的狀態

表十三 應用定理一所得的最小循環路徑解(2-3)

加工進行狀態 (T)	圖 示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 4		3	65
State 5"'		4	98
State 6"'		1	105
State 7"'		2	133
State 8"'		3	165
State 9"'		1	172
State 10"'		2	200
State 11"'		1	206
State 12"'		3	213
State 13"'		4	222
State 14"'		3	233
State 15"'		2	244

註："'" 係指第三種可能繼續發展分枝的狀態

(2)應用定理二求取可能的最小循環路徑，如表十四所示，最佳單位輸出之循環時間為 60 單位。比較定理一與定理二所得結果，最小值為 44 單位時間，令 State 4 之 LB= 44。

表十四 應用定理二所求得的最小循環路徑解(2)

加工進行狀態 (T)	圖 示	作業員位置 (s)	總加工時間 (t)
State 1		1	5
State 2		2	33
State 4		3	65
State 5" "		1	72
State 6" "		4	98
State 7" "		2	109
State 8" "		1	115
State 9" "		3	141
State 10" "		2	152
State 11" "		1	158
State 12" "		4	174
State 13" "		3	185
State 14" "		4	218

前導時間
循環時間

註：“ ” 係指第四種可能繼續發展分枝的狀態

步驟 4：洞悉

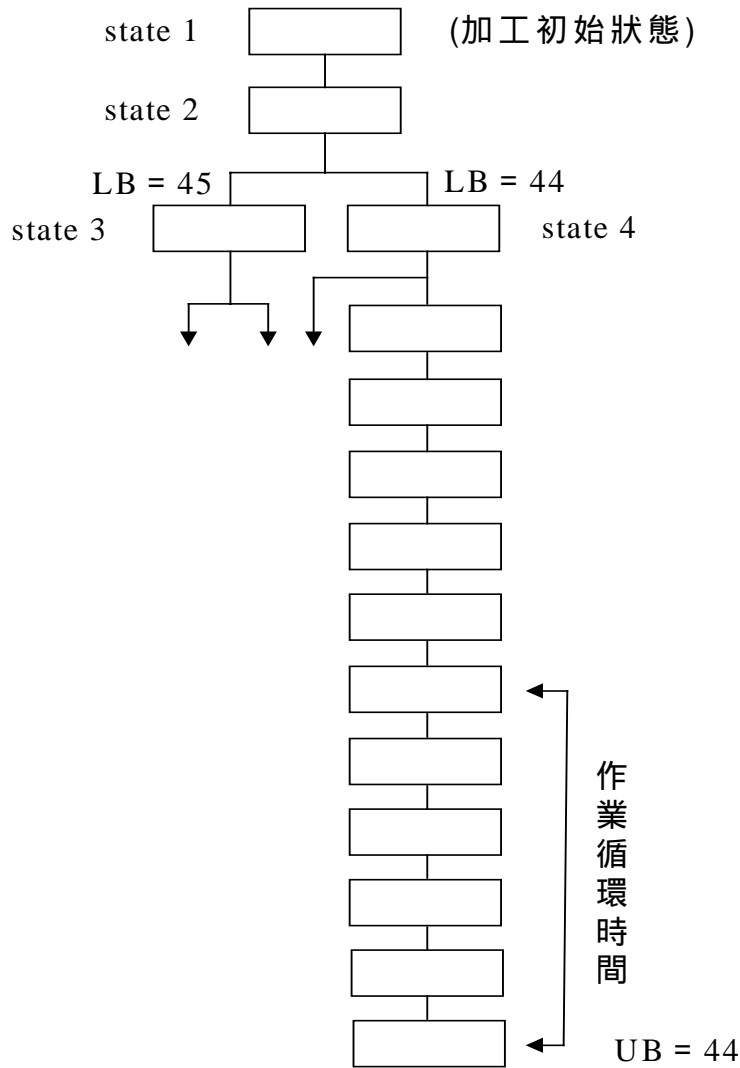
(1)State 3 : LB = 45 UB = 44 , 洞悉。

(2)State 4 : LB = 44 UB = 44 , 洞悉。

步驟 5：停止

所有剩餘子集均已洞悉，所以停止。

以上例題，由探索式解法所得到的起始解，已經是最佳解。圖五所示為分枝界限法之分枝情形，以及最佳的作業員循環路徑，而其單位輸出之循環時間為 44 單位。



狀態符號說明：
 工件正在此機器上加工或安裝
 機器上無工件存在
 作業員所在的位置

圖五 分枝界限法的實際分枝進行狀態實例

伍 資料測試

本文針對所發展之各項演算式，均以 C 語言撰寫程式，並且在 Pentium 4 個人電腦進行測試。配合一般實務上的可能情況，測試之樣本資料從兩部機器

至十部機器，而機器的加工時間則考慮到單人作業的可行性，當機器數愈多時，各機器的平均處理時間應該愈長，如此，作業員才能同時操作這些機器。但是，各機器之加工時間也不宜太長，否則將使作業員過於空閒；反之，也不宜太短，否則機器將有過多等待。因此，測試資料須針對不同機器數，設定加工時間之上、下限值，同時在不失一般性原則下，假設各機器的處理時間變異程度不會太大，否則，容易造成加工瓶頸；果真有處理時間特別大的機器，則可能多設幾部同一型的機器，以分擔其工作負荷，來維持工作流程的順暢。基於上述理由，設計單元內機器的平均加工時間，並利用亂數加以隨機調節，而工件之安裝、卸下、及移動時間則假設為定值。詳細測試資料之建立方法說明如下，我們並將測試結果與 Chen (1991) 所得，進行分析與比較。

1. 製造單元內機器之平均加工時間，隨製造單元內機器數之增加而增加，且平均加工時間界於上限值及下限值之間。
2. 單元內個別機器之加工時間(P_{ij})乃根據機器之平均加工時間，加以亂數調整。
3. 每部機器之安裝時間(L_{ij})及卸下時間(U_{ij})，可以依照實際需要來設定，本文在資料測試時，假設 L_{ij} 為 5 單位時間， U_{ij} 為 3 單位時間。
4. 作業員的移動時間也可以依照實際需要來設定，本文在資料測試時，假設在非臨近機器間的移動需要 2 單位時間，而在臨近機器間的移動需要 1 單位時間。
5. 在單人 m 部機器模式中，加工時間之上限值 $[2m+(m-1)*5]$ ，此乃考慮作業員能夠處理全部機器各一次所須時間而定，若機器加工時間超過此上限值，則作業員將過於空閒。反之，加工時間之下限值 $[m/4*3+m/4*5+(m/2+1)*2]$ ，此乃考量作業員只能處理一半機器各一次所須時間而定，若機器加工時間未達此下限值，則作業員將只能顧及不到一半的機器。

下面表十五、表十六分別為本研究所提之探索式解法及分枝界限法的測試結果。表中，每一種情況分別測試 30 組資料，總計測試 1020 (30*34) 組資料。從表十五中，可以看到探索式解法的最佳解比率，在機器數小於或等於 4 時，都達到 90% 以上，當機器數增加至 10 部時，其最佳解比率也都在 80% 以上。

表十五 本文所發展探索式解法之測試結果

機器數 (m)	加工時間	最佳解比率	平均求解時間 (秒)
2	8 + U (0, 2)	100.00%	0.05133
	9 + U (0, 2)		0.05100
3	11 + U (0, 4)	97.50%	0.07700
	13 + U (0, 4)		0.07733
	14 + U (0, 4)		0.07700
	16 + U (0, 4)		0.07700
4	14 + U (0, 6)	92.50%	0.11333
	17 + U (0, 6)		0.11400
	20 + U (0, 6)		0.11333
	23 + U (0, 6)		0.11367
5	17 + U (0, 8)	88.33%	0.15900
	21 + U (0, 8)		0.15767
	26 + U (0, 8)		0.15733
	30 + U (0, 8)		0.15733
6	20 + U (0, 10)	88.33%	0.21433
	26 + U (0, 10)		0.21433
	31 + U (0, 10)		0.21233
	37 + U (0, 10)		0.21233
7	23 + U (0, 12)	85.83%	0.28367
	30 + U (0, 12)		0.28367
	37 + U (0, 12)		0.28367
	44 + U (0, 12)		0.28367
8	26 + U (0, 14)	84.17%	0.36433
	34 + U (0, 14)		0.36267
	43 + U (0, 14)		0.36367
	51 + U (0, 14)		0.36367
9	29 + U (0, 16)	84.17%	0.46500
	39 + U (0, 16)		0.46500
	48 + U (0, 16)		0.46500
	58 + U (0, 16)		0.46467
10	32 + U (0, 18)	81.67%	0.59133
	43 + U (0, 18)		0.59133
	54 + U (0, 18)		0.59233
	65 + U (0, 18)		0.59133

表面上，探索式解法之最佳解比率是隨著機器數的增加而遞減，若深入分析所得的結果，便可發現最佳解比率降低的原因，主要是發生在機器平均加工時間較小的時候，由於機器數較多時，每部機器的平均加工時間應隨著增加，而本文所用處理時間下限值，是以作業員只能處理一半機器各一次所須的時間來設定，因此，機器數太多時，作業員比較不能兼顧所有的機器，基本上，這個現象在實務上並不多見，實際情況中，合理的人與機器數之配合，機器的加工時間應大多位在測試資料的中間值附近，果真如此，最佳解的比率將大為提高。此外，單人多機模式，若平均處理時間太小時，則作業員可能操控的範

圍將受到限制，因而作業循環路徑也會隨著工件轉移，而選擇較小的區域性移動。

針對最佳解的部分，整合式分枝界限法也有相當不錯的表現，縱使以探索式解法所得的初始解不是最佳解，但其近似最佳解配合最新界限法則的分枝方式，以及有效的刪除準則，確實大大提昇了分枝界限法的解題效率，使其在合理的時間內求得最佳解（如表十六所示），可以滿足實務上應用的需要。

從表十七之綜合比較，可以看出此本文所建構的分枝界限解法，在求解效率上明顯優於 Chen (1991) 之整數規劃解法。

表十六 整合式分枝界限解法之測試結果

機器數 (m)	加工時間	最佳解比率	平均求解時間 (秒)
2	8 + U (0, 2)	100.00%	0.08067
	9 + U (0, 2)		0.08033
3	11 + U (0, 4)	100.00%	0.15200
	13 + U (0, 4)		0.11167
	14 + U (0, 4)		0.11167
	16 + U (0, 4)		0.11167
4	14 + U (0, 6)	100.00%	0.25067
	17 + U (0, 6)		0.16833
	20 + U (0, 6)		0.15367
	23 + U (0, 6)		0.15400
5	17 + U (0, 8)	100.00%	0.47600
	21 + U (0, 8)		0.26167
	26 + U (0, 8)		0.21033
	30 + U (0, 8)		0.21233
6	20 + U (0, 10)	100.00%	0.93367
	26 + U (0, 10)		0.41933
	31 + U (0, 10)		0.29267
	37 + U (0, 10)		0.29300
7	23 + U (0, 12)	100.00%	3.47867
	30 + U (0, 12)		0.39000
	37 + U (0, 12)		0.39067
	44 + U (0, 12)		0.39000
8	26 + U (0, 14)	100.00%	5.57433
	34 + U (0, 14)		0.52200
	43 + U (0, 14)		0.52167
	51 + U (0, 14)		0.52167
9	29 + U (0, 16)	100.00%	5.91733
	39 + U (0, 16)		0.69367
	48 + U (0, 16)		0.69333
	58 + U (0, 16)		0.69400
10	32 + U (0, 18)	100.00%	7.75867
	43 + U (0, 18)		0.91367
	54 + U (0, 18)		0.91367
	65 + U (0, 18)		0.91367

表十七 各項解法之求解效率比較 (平均求解時間單位：秒)

機器數	完全列舉法	分枝界限法	探索式解法	Chen (1991)
2	0.19	0.08	0.05	0.10
3	0.29	0.12	0.08	14.43
4	7.13	0.18	0.11	18.53
5	17467	0.29	0.16	216.77
6	*	0.48	0.21	7243.00
7	*	1.16	0.28	*
8	*	1.78	0.36	*
9	*	2.00	0.47	*
10	*	2.62	0.59	*

註：* 表示求解時間過長

陸 結論與建議

在製造單元內，單人多機模式是一種常見的生產型態，作業員必須在一群機器間來回移動，執行工件安裝、卸下及搬運等工作，以維持生產流程的正常運轉。然而，已發表的相關文獻，都是專注在生產系統設計上的改善，以零件編碼、群組佈置或工件的作業排程研究主，對於作業員配合操作的部份，則甚少提及。事實上，作業員在製造單元中有效率地工作，對於產品輸出時間的減少、總製程時間的降低、生產成本的節省等，都有相當大的影響，所以有關作業員之作業循環路徑的探討，確實是一個相當複雜，而又十分重要的議題。有鑑於此，本文特別針對單人多機之製造單元內部作業循環路徑問題進行探討，因為問題本質上為 NP-hard，我們首先發掘分析問題的特性，設計一套探索式演算法，能夠在很短的時間內，取得最佳解或近似最佳解，測試資料結果顯示在七部機器以下，最佳解比率平均超過 85%。再進一步以此法所得結果作為起始解，配合最新界限法則的分枝方式，以及有效的刪除準則，建構了整合式分枝界限法，可以在合理的時間內求得最佳作業循環路徑，較現有解法有相當顯著的改善，大大提昇了實務上應用的價值。

探討最佳化單人多機模式之作業循環路徑的同時，我們發現若干原則也許可以引用在雙人多機，或多人多機的操作模式上，當然，這些問題將更為複雜，可以作為繼續研究的主題。再者，影響製造單元的績效，有佈置型態、工件的分類及編碼、工件排程、作業員的循環路徑等，這些各別問題雖然都有研

究成果發表，但是總合考慮這些因素，仍然十分欠缺，相信他們之間的交互影響將會形成有趣的議題。此外，衡量作業循環路徑的準則，除了單位輸出之循環時間外，其他如在製品存量也是很好的標準，值得進一步深入研究。

參考文獻

- Baker, C. T. and Dzielinski, B. P., "Simulation of a simplified job shop", *Management Science*, (6), 1960, pp.211-223.
- Baker, R. P. and Maropoulos, P. G., "Manufacturing Capability Measurement for Cellular Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, (36), 1998, pp.2511-2527.
- Beaumont, N., "Scheduling Staff Using Mixed Integer Programming", *European Journal of Operational Research*, (98), 1997, pp.473-484.
- Black, J. T., "Cellular Manufacturing Systems Reduce Setup Time, Make small Lot Production Economical", *Industrial Engineering*, (15), 1983, pp.36-48.
- Chan, G. H. and Song, Y., "Rotation Cycle Scheduling for Multi-item Production Systems", *European Journal of Operational Research*, (135), 2001, pp.361-372.
- Chen, H. G., "A Mixed Integer Programming Model for Operator Cyclic Walking Pattern Development in GTcells", *Computers and Industrial Engineering*, (20), 1991, pp.77-88.
- Dale, B. G. and Dewhurst, F., "Simulation of a Group Technology Product Cell", *Engineering Costs and Production Economics*, (8), 1984, pp.45- 54.
- Davis, D. J. and Mabert, V. A., "Order Dispatching and Labor Assignment in Cellular Manufacturing Systems", *Decision Sciences*, (31), 2000, pp.745-752.
- Dimopoulos, C., and Mort, N., "A Hierarchical Clustering Methodology Based on Genetic Programming for the Solution of Simple Cell-formation Problems", *International Journal of Production Research*, (39), 2001, pp. 1-19.
- Elvers, D. A. and Treleven, M., "Job-shop vs. Hybrid Flow-shop Routing in a Dual Resource Constrained System", *Decision Sciences*, (16), 1985, pp.213-222.
- Fryer, J. S., "Effects of Shop Size and Labor Flexibility in Labor and Machine Limited Production Systems", *Management Science*, (21), 1975, pp. 507-515.
- Holnies, J.G., "An Automated Robot Machining Systems", *In Proceedings of the 9th Int. Symp. on Ind. Robots*, 1979, Washington, D. C.
- Huang, P. Y., Moore, L., and Russell, R. S., "Workload vs. Scheduling Policies in a Dual Constrained Job Shop", *Computers and Operations Research*, (11), 1984, pp.37-47.
- Lee, L. C. "A Study of System Characteristics in a Manufacturing Cell", *International Journal of Production Research*, (36), 1998, pp.1101-1114.
- Mahimoodi, F., Tierney, E. and Mosier, C., "Dynamic Group Scheduling Heuristics in a Flow-through Cell Environment", *Decision Sciences*, (23), 1992, pp.61-85.

- Nelson, R. T., "Labor and Machine Limited Production Systems", *Management Science*, (13), 1967, pp.648-671.
- Potts, C. N. and Kovalyov, M. Y., "Scheduling with Batching: A Review", *European Journal of Operational Research*, (120), 2000, pp.228-249.
- Pullen, R. D., "A Survey of Cellular Manufacturing Cells", *The Production Engineer*, 1976, pp.451-455.
- Russell, R., Huang, P., and Leu, Y., "A Study of Labor Allocation Strategies in Cellular Manufacturing", *Decision Sciences*, (22), 1991, pp.594-611.
- Shang, J. S. and Tadikamalla, P. R., "Multicriteria Design and Control of a Cellular Manufacturing System through Simulation and Optimization", *International Journal of Production Research*, (36), 1998, pp.1515-1528.
- Treleven, M., "A Review of the Dual Resource Constrained System Research", *IIE Transactions*, (21), 1989, pp.279- 287.

A Study on Operator Cyclic Walking Patterns for Single Operator with Multi-machine in Manufacturing Cells

RONG-HWA HUANG, TZU-HSING HSUEN *

ABSTRACT

In manufacturing cells, the single operator with multi-machine model has been used broadly. There are thirteen possible operator cyclic walking patterns in a single operator with three-machine model. So they can be displayed and solved by total enumeration easily. But in a four-machine model, there are more than one thousand possible operator cyclic walking patterns. When the number of machine increases to five, the total number of the possible operator cyclic walking patterns will be more than one billion and three hundred million. Among them, some values of the unit cycle time may be similar but others are different. So choosing an optimal operator cyclic walking pattern in order to improve productivity and decrease production cost is really an important and complex issue. Our study focuses on the problem. Since it is NP-hard, we developed a heuristic approach to derive a sub-optimal solution. The computational results indicate the heuristic approach we developed had a high rate to get the optimal solution, above 85%, and its running time is really short. The solution was then used as the initial point of branch and bound procedure. Further, several dominate rules and a lower bound of the optimal value of the unit cycle time were developed. The integrated branch and bound procedure we developed can get the optimal solution within reasonable time. It is more effective than the existing ones.

Keywords: manufacturing cells, single operator with multi-machine model, operator cyclic walking patterns, unit cycle time

* Rong-Hwa HUANG, Associate Professor, Graduate Institute of Management, Fu Jen Catholic University. Tzu-Hsing HSUEN, Assistant Management, E. D. P. Department, Land Bank of Taiwan.