

應用 NSGA-II 和 TOPSIS 在生產多種零件 下可重構製造系統最佳化的規劃

OPTIMAL CONFIGURATION PLANNING FOR RECONFIGURABLE MANUFACTURING SYSTEMS WITH MULTIPLE TYPES OF PARTS USING NSGA-II AND TOPSIS

呂明山*

國立雲林科技大學工業工程與管理研究所教授

李岱穎

國立雲林科技大學工業工程與管理研究所研究生

Ming-Shan Lu

*Professor, Graduate Institute of Industrial Engineering and Management,
National Yunlin University of Science and Technology*

Dai-Ying Lee

*Graduate Student, Graduate Institute of Industrial Engineering and Management,
National Yunlin University of Science and Technology*

摘要

以可重構工具機為基礎的可重構製造系統，因可重組機台組態以因應生產產品的變動，所以成為製造系統發展的重點。過去的研究著重以生產單一產品單序列流程的可重構製造系統的機台組態及數量的決策為主，然而，可生產多種產品的可重構製造系統，不但可以減少機台組態的重組，更能快速回應產品變動及多樣性的需求。不同的產品有不同的生產階段及作業，規劃時需要整合不同產品的生產階段及作業，以決定機台組態及數量。而且多種產品共同生產時，可能共用一台機台來生產，作業流程不再是單一個序列，而是多個序列組成的非對稱配置，讓規劃問題變的更複雜。本研究在考慮滿足各種產品作業需求及產能需求下，以成本、可重構能力、操作性能、擴

*通訊作者，地址：640 雲林縣斗六市大學路 3 段 123 號，電話：(05)534-2601 分機 5129
E-mail：mslu@yuntech.edu.tw

展性四個目標指標下找出生產多種產品的可重構製造系統最佳的配置，系統的配置包括階段數、階段間的連結方式、各階段作業、作業所使用的機台組態及其數量。最後，以結合非支配排序基因演算法 II 及逼近理想解排序法在四個目標指標下找出最佳的系統配置。

關鍵字：可重構工具機、多目標、機台組態選擇、非支配排序基因演算法 II

ABSTRACT

The development of a reconfigurable manufacturing system (RMS) based on reconfigurable machine tools (RMTs) becomes an important issue, for its capability of reassembling machine configurations responds to product changes. Previous researches focused on configuration selection and number determination of machines for RMSs, producing a product with a single sequence of processes. However, an RMS, capable to produce a variety of products, not only reduces reassembly of machine configuration, but also quickly responds to the needs of product diversities and changes. Different products have different stages of production and operations so it is necessary to integrate these different stages and operations for determining the number and configuration of machines. Moreover, when a variety of products are produced together, machine sharing may occur, and the process flow is no longer a single sequence, but an asymmetric configuration of multiple sequences. Thus, planning of the RMS becomes more complex. In this research, a multiple-objective optimal configuration selection for the RMS, producing a variety of products, is proposed. The four objectives considered are cost, machine reconfigurability, operational capability and scalability. The configuration selection includes the number of stages, connection type between stages, operation in stages, the number and configuration of machines. Finally, non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) are applied to find optimal configuration selection of the RMS.

Keywords: Reconfigurable Machine Tool, Multiple-Objective, Machine Configuration Selection, NSGA-II

壹、前言

隨著近年來消費者意識的高漲，消費者對產品的要求越來越多元化，產品以少量、多樣及客製化為主，企業唯有不斷的改變才能在這樣的環境中站穩腳步。因此，為了保持企業的競爭力，傳統大量製造標準化產品的時代已經過去，取而代之的是彈性製造以及可重構製造系統（**Reconfigurable Manufacturing System, RMS**），這類的製造系統具備小批量、客製化、以及可以快速的回應市場上所帶來的巨變。可重構製造系統的核心精神在於可重構工具機（**Reconfigurable Machine Tool, RMT**），可重構工具機可以重組不同的機台組態以因應生產產品的變動，因此，成為製造系統發展的重點。可重構工具機由多個基本模塊與輔助模塊組成，如圖 1 所示，基本模塊為結構性質用來支撐機台，輔助模塊為用來做加工的工具或固定加工物的位置。Koren, Hu, and Weber（1998）提出可重構製造系統模塊化的特性，這些機台可以透過新增、剔除以及修改部份模塊來改變機台能夠操作的作業，同時也壓低製造系統的建構投資、生產成本及合理的運用資源。文中更提到一個可重構製造系統需要具備五個特性，除了模塊化外還包括可整合性、可轉換性、可診斷性及客製化。Mehrabi, Ulsoy, and Koren（2000）指出可重構製造系統不只可以彈性的變化生產的產品，而且可以改變系統本身的結構，可重構製造系統兩個重要組成部份為可重構工具機與可重構控制器，這兩項因素使得可重構製造系統能夠因應變化的市場需求。Wang and Koren（2012）認為可擴展性應為可重構製造系統的關鍵特性之一，以應付當產品需求變更且超出系統負荷時的系統擴增能力。Mittal and Jain（2014）更指出可重構製造系統是能夠按需求提供準確功能和能力的製造系統，評估的性能指標包括成本、可靠性、可用性、交貨時間及重構時間等，這些指標會影響可重構製造系統的建構。

可重構製造系統的規劃一般包括可重構工具機的選擇及配置。一個製造系統由多個階段組成，成品從投入到產出會經過一個又一個的階段，每個階段有指定操作的作業及使用的機台，直到所有產品的指定作業完成後即可離開系統。一般機台的配置會依照產能需求、階段及作業的流程來配置。Spicer, Koren, Shpitalni, and Yip-Hoi（2002）將配置大致分成四類純並聯、純串聯、並聯交叉即並聯無交叉，如圖 2 所示。Koren and Shpitalni（2010）又把配置區分為對稱型與非對稱型，如圖 2 和圖 3 所示，研究中指出非對稱型配置主要用於生產多產品的製造系統，對稱型配置用來建構生產單一產品的製造系統，不一樣的系統配置會顯著影響製造系統的生產能力、產品品質、擴展能力及建構成本。

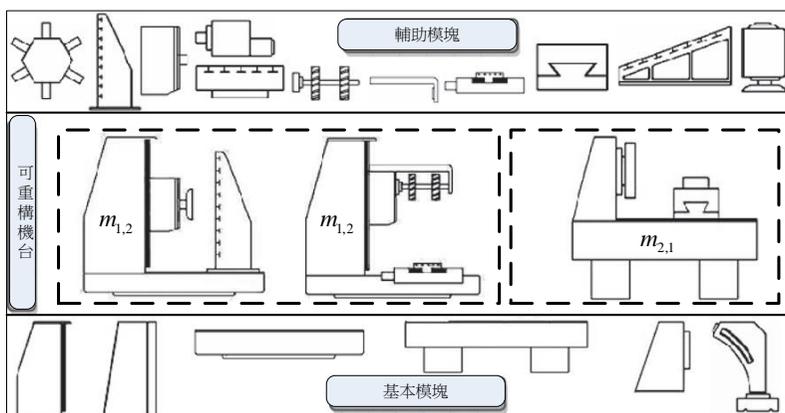


圖 1 可重構工具機示意圖 Goyal, Jain, and Jain (2012)

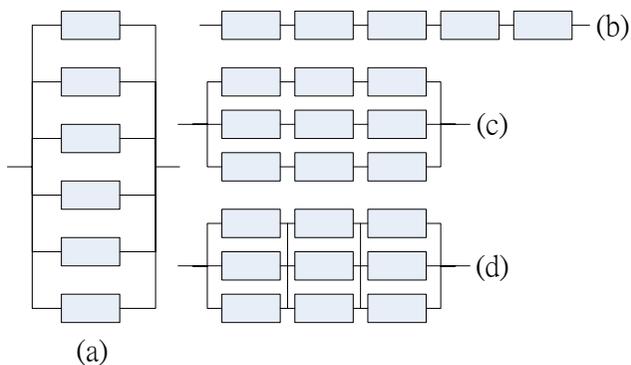


圖 2 對稱型機台配置圖(a)純並聯(b)純串聯(c)並聯無交叉(d)並聯交叉

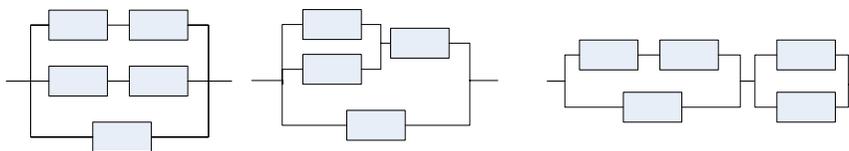


圖 3 非對稱機台配置圖

在可重構工具機的選擇及配置規劃方面，Dou, Dai, and Meng (2010) 使用基因演算法來建構生產多種零件的可重構製造系統，以最小成本為系統的性能指標，考慮到系統中每個工作站的機台數量和種類，利用產品族的概念將作業分成多個區域做加工，產品作業流程仍為流線型，產品可跨階段做加工。Koren and Shpitalni (2010) 認為可重構製造系統的機台配置會影響到系統的整體表現，因此，介紹了在不同機台排列的配置與各目標之間的影響，以及配置階段間輸送帶連接的方式會影響到系統的產能。在研究中也提到對稱型的配置與非對稱型的配置之間的差異，非對稱型配置不適用於生產單一產品，因為不同的作業途程會導致產品生產的品質不一與管理上的困難。Gumasta, Kumar Gupta, Benyoucef, and Tiwari (2011) 提出以模塊化、可轉換性、可擴展性及可診斷性作為衡量可重構製造系統的特性的指標，利用多屬性效用理論依系統的需求來訂定屬性之組合，進行可重構製造系統方案評估。Wang and Koren (2012) 提出可擴展能力作為建構可重構製造系統的指標，所有產品需要的加工作業都以 CNC 機台來執行，利用基因演算法選擇每個階段中需要的機台數目，研究結果顯示機台配置越短可擴展能力就越高。Goyal, Jain, and Jain (2012) 以最小成本、最大可重構能力及操作性能作為選擇機台的指標，研究中強調可重構工具機為可重構製造系統的核心，可重構工具機由基本模塊與輔助模塊組成，機台的選擇以基本模塊與輔助模塊的組合成機台組態為重點。Goyal, Jain, and Jain (2013) 是 Goyal, Jain, and Jain (2012) 為基礎的後續研究，在 Goyal, Jain, and Jain (2013) 中將原有的可重構能力與可操作性能合併為系統回應能力指標 (responsiveness index) 作為可重構製造系統的評估，在結論中提到回應指標可以幫助管理者快速地知道每一單位的系統回應能力需要付出多少成本來換取。Bensmaine, Dahane, and Benyoucef (2013) 運用非支配排序基因演算法 (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 為方法並以成本與加工時間作為指標來建構可重構製造系統，研究中的成本指標為機台使用成本、配置更換成本、刀具使用成本與刀具更換成本的加總，時間指標則為刀具更換時間與配置更換時間的加總，指標的細分讓建構出來的製造系統更貼近現實，管理者也可透過這兩個指標清楚地選擇符合限制的配置。Haddou-Benderbal, Dahane, and Benyoucef (2017) 在考慮生產零件家族產品最小化機台更換的出力，以及最大化平均機台使用率與可替代機台三目標下，以模擬退火多目標演算法 (Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm, AMOSA) 決定生產零件家族產品的機台配置。Wang, Shang, Yan, Allen, and Mistree (2018) 提出以一個樹狀圖為基礎的可重構工具機台組態的設計方法，將機台組態的組裝樹狀圖建立一個數學模式，考慮樹狀圖中機台組態所需的模塊數量及其可具有的功能，在最小成本及最大的重構能力下決定機台組態的設計。

過去的研究中以可重構工具機為基礎的可重構製造系統規劃，主要以生產單一產品單序列流程的機台組態及數量決策為主，然而，生產多樣產品的可重構製造系統可

以減少機台組態的重組，更能快速回應產品變化及多樣的需求。不同的產品包括不同的生產階段及作業，當多種產品共同生產時，作業流程不再是一個序列，而是多個序列組成的非對稱配置，並具選擇性的分歧路徑，多種產品也可使用同一機台生產，讓規劃問題變得更複雜，可重構製造系統規劃需要整合不同產品的生產階段及作業，並決定機台組態及數量。本研究在考慮滿足各種產品作業需求及產能需求下，找出最佳的生產多樣產品的可重構製造系統的配置，系統的配置包括階段數、階段間的連結方式、各階段作業、作業所使用的機台組態及其數量。

以可重構工具機為基礎的可重構製造系統，透過系統中現有的模塊做重新組合，以最低的成本得到新的功能或是擴大系統的能力，達到快速重構系統的要求，以及減少後期所需的重新配置次數。因此，本研究中系統配置的考慮目標為兩部份，第一為機台作業的生產成本，第二為系統的回應能力。機台作業的生產成本為操作機台生產產品所需的成本，如人力成本、機台的折舊成本、以及機台運作的能源成本等。系統的回應能力為系統回應需求改變需要付出的成本，回應能力可由可重構能力、操作性能，以及擴展性來決定。可重構能力為機台可以增加、剔除和調整輔助模塊改變其功能與能力的容易性；操作性能為機台能執行作業的多寡，機台可執行的作業越多表示其功能性越強，越容易適應需求的變化，減少因應後期所需的重新配置次數；擴展性為當產品需求變動且超出系統負荷時，可以增加最少量的機台數來擴張系統生產的能力，此能力與作業的流程中各階段的連結方式有關。在此四種目標指標下找出最佳生產多樣產品的可重構製造系統的配置。

本研究為多目標最佳化求解問題，GA 具有同時在不同區域的解決方案空間中搜索能力，可以為非凸 (non-convex)、不連續和多模式的解決方案空間的難題中找到多樣化的解決方案集，因此，GA 一直是解決多目標設計和優化問題最流行的啟發式方法。NSGA-II 是由 Deb, Pratap, Agarwal, and Meyarivan (2002) 等人提出，由 NSGA 發展而來，NSGA-II 演算核心與傳統的 GA 相似，不同的是採用了精英策略並保留找到的最佳解，使其求解的速度大幅提升。NSGA-II 利用由非支配排序後所得的柏拉前緣解集合族群分級，及計算各族群目標間的距離，再透過演算法選擇、交配及突變找到最佳的前緣解。其優勢在於，透過產生多個非支配排序後所得的柏拉前緣，將多個目標簡化為單一適應性的度量。NSGA-II 提供了許多非支配的解，要得到這些解的主觀排名是非常困難的，而且也不精確，因此，在本研究中採用由 Hwang and Yoon (1981) 所提出的 TOPSIS 方法，對非支配的解進行排名，並以 Shannon (1948) 所提的熵權理論獲得屬性的權重值。另外，過去的研究中，因只考慮單產品單流程，產品作業的階段數是固定的，因此，可以階段數當作為染色體的長度，且不考慮路徑的規劃。但在本研究中階段數為系統配置決策因子之一，階段數會因階段作業的合併與否而改變，

不適用此種編碼方法。本研究參考 Wang, Kwong, Jin, Wei, and Man (2005) 所提出的遞階遺傳演算法 (Hierarchical Genetic Algorithm, HGA) 作為編碼的邏輯，以生物學的基因中含有的顯性基因與隱性基因去選擇真正顯現在外表的型態的概念，由控制基因決定作業的合併及階段數，並逐層呈現其機台配置的基因碼。最後，結合 NSGA-II 及 TOPSIS 在四個目標指標下找出最佳的可重構製造系統的配置。

貳、研究架構及符號定義

為了符合現今市場中產品的多樣性且又可以應付消費者對產品需求的快速變化，本研究以可重構工具機為基礎，規劃一個能夠生產多樣產品的可重構製造系統，研究的架構圖如圖 4 所示。基本假設及限制如下：

1. 各產品的需求率與作業流程為已知。
2. 機台組態的已知資訊包括基本模塊與輔助模塊的組成、生產成本、可操作的作業及生產速率。
3. 在同一個序列的相鄰作業中，若可使用相同的機台組態，可以合併在同一階段中執行，以縮短機台組態配置。
4. 考慮每個產品有其個別的作業流程，因此，不同序列間的作業即使有相同的機台組態也不可合併在同一階段做加工。
5. 每個階段只使用同一種機台組態。
6. 不考慮產品的機台整備、加工及搬運等時間的成本。

在上述的已知及限制下，考慮生產成本、可重構能力、操作性能及擴展性等四個目標指標下，找出最佳的生產多樣產品的可重構製造系統的配置，系統的配置包括階段數、階段間的連結方式、各階段作業、作業所使用的機台組態及其數量。

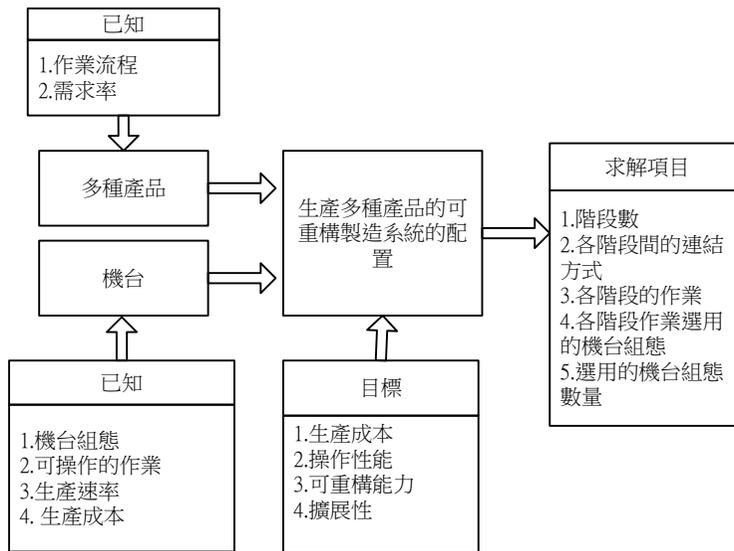


圖 4 研究的架構圖

使用的符號說明如下：

P_o 產品， $o=1,2,\dots,O$

OP_k 作業， $k=1,2,\dots,K$

$m_{p,q}$ 機台 p 在第 q 個組態；機台的編號 p ， $p=1,2,\dots,P$ ；不同機台 p 有不同種類數量的組態 Q_p ， $q=1,2,\dots,Q_p$

BM_i 基本模塊， $i=1,2,\dots,I$

AM_j 輔助模塊， $j=1,2,\dots,J$

$MB_{p,q}$ 機台 p 在第 q 個組態使用的基本模塊的集合

$MA_{p,q}$ 機台 p 在第 q 個組態使用的輔助模塊的集合

$d_{o,k}$ 產品 P_o 在操作作業 OP_k 下所需的需求率，單位為個／小時

$c_{p,q}^k$ 機台組態 $m_{p,q}$ 進行作業 OP_k 所需的生產成本，美金

$r_{p,q}^k$ 機台組態 $m_{p,q}$ 進行作業 OP_k 的生產速率，單位為個／小時

$\delta_{p,q}^k$	機台組態 $m_{p,q}$ 可進行作業 OP_k
g	系統配置中階段的編號， $g=1,2,\dots,G$
w	選定機台輔助模塊組態的編號， $w \in q$
GB_g	在階段 g 兩邊相鄰最近的交叉點中的階段數
$n_{p,q}^{g,k}$	為了滿足階段 g 中指定的作業 k 所需的機台組態 $m_{p,q}$ 數量
$n_{p,q}$	整體使用機台組態 $m_{p,q}$ 的總數
N	機台的總數
$PC_{p,q}^{g,k}$	選定階段 g 作業 k 的機台組態 $m_{p,q}$ 所需的總生產成本
TPC	機台配置的總生產成本
$OC_{p,q}^g$	選定階段 g 的機台組態 $m_{p,q}$ 具有的操作能力
OC	機台配置的總操作能力
$RC_{p,q}^g$	選定階段 g 機台組態 $m_{p,q}$ 具有的重構能力
RC	機台配置的總重構能力
S_g	機台配置在階段 g 的可擴展性
SC	機台配置的總擴展性

其中機台組態 $m_{p,q}$ 由多個基本模塊及輔助模塊組合而成，基本模塊為支撐機台的結構體，輔助模塊為加工的刀具或固定加工物的夾治具。 p 表示機台使用第 p 種基本模塊集合，相同的 p 表示機台使用相同的基本模塊集合； q 表示在機台第 p 種基本模塊集合下使用第 q 種輔助模塊集合，因此，機台組態 $m_{p,q}$ 稱為機台 p 在第 q 個組態，這些機台組態 $m_{p,q}$ 及其基本模塊及輔助模塊的組成為已知。

舉一例來說明可重構製造系統配置的規劃問題。假設有一製造系統要生產 P_1 與 P_2 產品， P_1 產品的作業流程是 $OP_1-OP_2-OP_3-OP_4-OP_5$ ， P_2 產品的作業流程是 $OP_1-OP_2-OP_6$ ，如圖 5 所示，兩產品合併的流程圖如圖 6(a) 所示。圖 6(a) 中，由於 P_1 與 P_2 的作業流程皆須經過 OP_1 與 OP_2 ，如果 OP_1 與 OP_2 可以使用同一種機台組態 $m_{1,2}$ 來執行，可以將這兩作業合併為同一個階段，其餘的作業如果皆選用單一階段獨立的機台

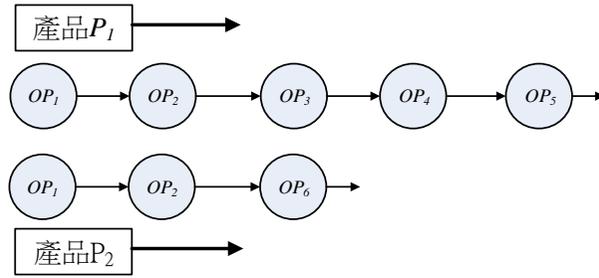


圖 5 產品的作業流程

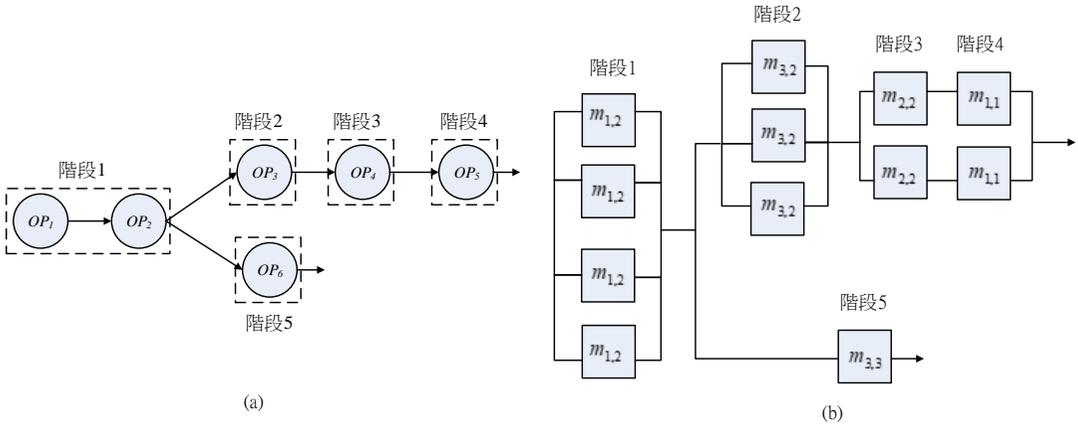


圖 6 (a)合併的作業流程，(b)對照(a)的可能一種系統配置

組態，且階段 3 與 4 使用串聯連接，其餘階段間的連接皆為交叉，則一種可能的可重構製造系統配置如圖 6(b)所示。圖 6(b)表示 OP_1 與 OP_2 合併成第一個階段，選用 4 台機台組態 $m_{1,2}$ ；第二階段 OP_3 與第一階段交叉連接，選用 3 台機台組態 $m_{3,2}$ ；第三階段 OP_4 與第二階段交叉連接，選用 2 台機台組態 $m_{2,2}$ ；第四階段 OP_5 與第三階段串聯連接，選用 2 台機台組態 $m_{1,1}$ ；第五階段 OP_6 與第一階段交叉連接，選用 1 台機台組態 $m_{3,3}$ 。各階段作業選用的機台組態，由該作業可以被執行的機台組態來決定；各階段作業可選用的機台組態數量，由產品的需求率及該機台組態的生產速率來決定；各階段作業可選用的機台組態數量，由產品的需求率及該機台組態的生產速率來決定。

參、可重構製造系統配置規劃的目標指標

本研究在滿足各種產品作業需求及產能需求下，以生產成本、可重構能力、操作性能及擴展性四個目標指標下，找出最佳的可重構製造系統的配置，以減少機台組態的重組，快速回應產品變化及多樣的需求，以下就這四個目標指標加以說明。

一、生產成本

成本是個重要的在目標，它左右在選擇操作指定作業的機台，本研究的成本定義為生產成本，生產成本包括操作機台的人力成本、機台的折舊成本、刀具更換的耗材，以及提供機台運作的能源成本等。在階段 g 作業 k 選定機台組態 $m_{p,q}$ 所需的總生產成本可由在階段 g 作業 k 的生產各種產品總機台組態數量乘上作業 k 選定機台組態所需的生產成本計算求得，如下式：

$$PC_{p,q}^{g,k} = n_{p,q}^{g,k} \times c_{p,q}^k \quad (1)$$

其中 $c_{p,q}^k$ 在 k 作業選定機台組態 $m_{p,q}$ 所需的生產成本； $n_{p,q}^{g,k}$ 為在階段 g 作業 k 的生產各種產品總機台組態 $m_{p,q}$ 數量：

$$n_{p,q}^{g,k} = \frac{\sum_{o=1}^O d_{o,k}}{r_{p,q}^k} \quad (2)$$

為了滿足指定需求，機台數量若為小數時將被無條件進位。機台配置的目標為最小化完成所有階段內作業的總生產成本，總生產成本的計算如下：

$$TPC = \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K PC_{p,q}^{g,k} \quad (3)$$

二、操作性能

每部機台能執行的作業越多越能因應產品的變動，操作性能表示機台能執行作業的多寡，本研究以最大化操作性能為目標，機台配置中所有使用機台的操作作業總和越多的機台配置具有越大的操作性能。依據 Goyal, Jain, and Jain (2012)，在階段 g 選用機台組態 $m_{p,q}$ ，機台組態 $m_{p,q}$ 的操作性能計算如下：

$$O_{p,q}^g = \left[\sum_{k=1}^K \delta_{p,q}^k - 1 \right]^Y \quad (4)$$

其中 $\delta_{p,q}^k$ 為機台組態 $m_{p,q}$ 可進行的作業 OP_k ； Y 決定了機台組態 $m_{p,q}$ 在每增加一樣操作，目標指標增加的趨勢， Y 是權重係數可以自由調整。機台配置的目標為最大化所有階段的總操作性能。總操作性能計算如下：

$$OC = \sum_{g=1}^G O_{p,q}^g \quad (5)$$

其中各階段若有選用相同的機台組態 $m_{p,q}$ ，其操作性能只能計算一次。

三、可重構能力

機台由可重構工具機所組成，可重構工具機可以透過更換輔助模塊來更換機台的型態，藉此達到原有機台無法操作的作業，在固定的基本模塊下可以轉換的形態越多表示機台的重構能力越好。在重構的過程中可分為增加、剔除和調整輔助模塊，如圖 7 所示。增加、剔除及調整會生成不同程度的困難性，困難性表示重構的不易性，一般而言增加及剔除的困難性會較調整來的高。可重構能力表示機台可以增加、剔除和調整輔助模塊的容易性及組成機台的多樣性的能力，本研究以最大化可重構能力為目標。依據 Goyal, Jain, and Jain (2012)，在 g 階段選擇機台組態 $m_{p,q}$ 的可重構能力計算如下：

$$R_{p,q}^g = \frac{[Q_p - 1]^Z}{n_{p,q} \sum_{w=1, w \neq q}^{Q_p} \left[\alpha \frac{|MA_{p,w} - MA_{p,q}|}{|MA_{p,q} \cup MA_{p,w}|} + \beta \frac{|MA_{p,q} - MA_{p,w}|}{|MA_{p,q} \cup MA_{p,w}|} + \gamma \frac{|MA_{p,w} \cap MA_{p,q}|}{|MA_{p,q} \cup MA_{p,w}|} \right]} \quad (6)$$

其中 $n_{p,q}$ 為整體階段機台組態 $m_{p,q}$ 所需的總量，如下式：

$$n_{p,q} = \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K n_{p,q}^{g,k} \quad (7)$$

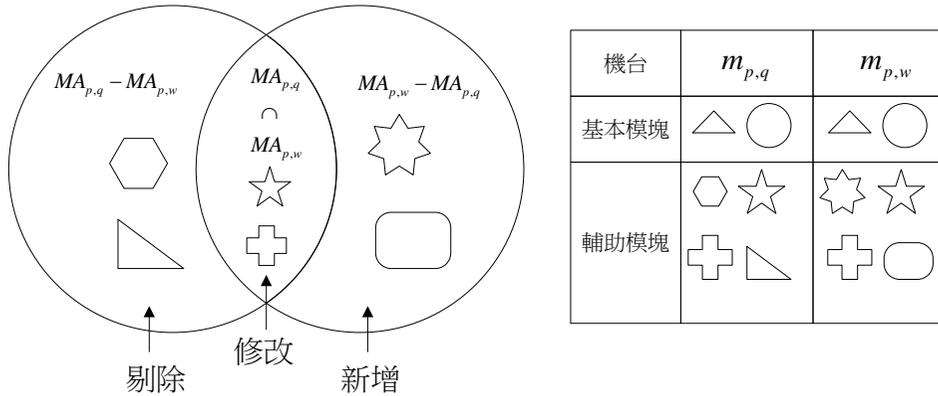


圖 7 新增、刪除、修改輔助模塊示意圖

公式 (6) 所代表的意思為每單位成本可以更換的可行機台數。公式 (6) 分母為選定機台組態 $m_{p,q}$ 替換成任意可行替代機台 $m_{p,w}$ 的成本，其中 $MA_{p,q} - MA_{p,q}$ 、 $MA_{p,q} - MA_{p,w}$ 、 $MA_{p,w} \cap MA_{p,q}$ 分別是機台組態 $m_{p,q}$ 替換成機台組態 $m_{p,w}$ 時需增加、剔除和調整的輔助模塊，如圖 7 所示，其分別對應的係數 α 、 β 、 γ ($\alpha > \beta > \gamma$ ，且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$) 為增加、剔除和調整輔助模塊的成本權重；分子 $Q_p - 1$ 為可行替換機台的數量； Z 是權重係數可以自由調整。整體的重構能力為使用各種機台組態 $m_{p,q}$ 重構能力的總和，機台配置的目標為最大化總可重構能力。總重構能力計算如下：

$$RC = \sum_{g=1}^G R_{p,q}^g \tag{8}$$

四、擴展性

Wang and Koren (2012) 定義可擴展性為當產品需求變動且超出系統負荷時，其可以增加最少量的機台數來擴張系統的生產能力。一般在系統中找出階段中的瓶頸站，在此階段中的瓶頸站增加機台，以解決超出系統負荷的問題。但是依照瓶頸站相鄰階段連接方式的不同需要增加機台的數量也會不同，擴展性能力也就不同。以圖 8 為例，當瓶頸作業站發生在串聯的階段時 (圖 8(a))，除了瓶頸作業站階段機台需增加外，相鄰的所有串聯的階段必須跟著增加機台。然而瓶頸作業站發生在相鄰階段皆為交叉的階段時 (圖 8(b))，只需增加瓶頸作業站的機台即可，以此類推，對於混合型階段連接機台，如圖 8(c) 所示。

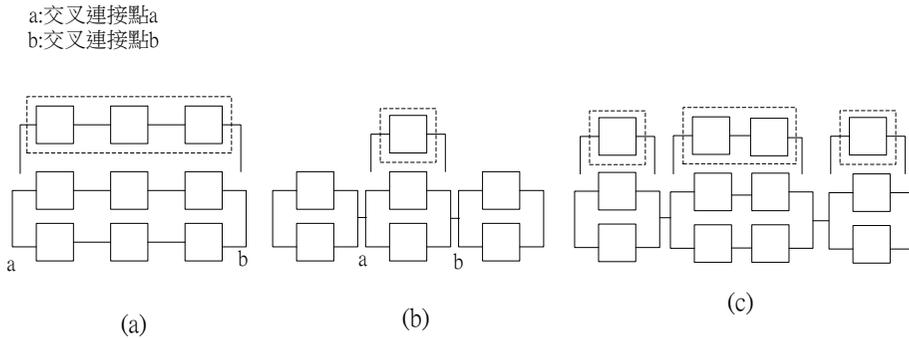


圖 8 相鄰階段連接方式(a)串聯連接(b)交叉連接(c)混合型連接

一個擴展性高的配置會擁有較多的交叉連結，階段 g 的擴展性的計算如下：

$$S_g = \frac{1}{G} \times \left(1 - \frac{GB_g}{N} \right) \times 100\% \tag{9}$$

其中 N 為配置中使用的機台總數； GB_g 為在階段 g 交叉連結開始到結束中間所包含的階段數； G 為總階段數。機台配置的目標為最大化所有 G 階段的總擴展性，總擴展性計算如下：

$$SC = \sum_{g=1}^G S_g \tag{10}$$

當階段間為串連時，會有較大的 GB_g 值，所以 S_g 較小，擴展性較差。對於混合型的配置，可以將混合型的配置拆開來看，以圖 8(c)中為例，共有 4 階段，階段 1 與階段 4 為交叉連接，階段 2 與階段 3 為串聯連接，依照各別階段連接方式的不同分別計算擴展性，加總各別階段的擴展性可得整體的擴展性。

肆、NSGA-II 和 TOPSIS 求解最佳的配置

在滿足上述最小化的生產成本、最大化的操作性能、最大化的可重構能力、以及最大化的擴展性，本研究提出結合 NSGA-II 及 TOPSIS 的方法來找出最佳的可重構製造系統的配置規劃。NSGA-II 引進了精英保留的觀念，將母代與子代共同競爭，另外

也多了群聚距離的計算，用來判斷各染色體間的壅擠程度來得到更多元的解。首先，NSGA-II 利用前緣柏拉解的分級概念將群體分級，計算各級中的可行解的距離，再利用基因演算法中的交配、突變逼近柏拉最佳解，接著，將 NSGA-II 最後找到的解群體利用 TOPSIS 找出群體中的最佳解。TOPSIS 為一種多目標決策的方法，在多個目標中各目標間互有勝負，導致無法比較出方案的好壞，TOPSIS 便是用來協助決策者處理多目標的問題。TOPSIS 的計算必須先界定正理想解（ideal solution）與負理想解（negative ideal solution），其目的在於尋找最接近正理想解且遠離負理想解的方案，結合 NSGA-II 及 TOPSIS 的求解流程圖，如圖 9 所示。以下就染色體的編碼與解碼，以及基因演算法的設定作說明。

一、染色體的編碼與解碼

本研究中階段數為系統配置決策因子之一，階段數會因階段的合併與否而改變，不適用以產品作業的階段數為固定長度的染色體的編碼方法，因此，引用 HGA 作為編碼的邏輯，利用生物學的基因中含有的顯性基因與隱性基因去選擇真正顯現在外表的型態。在生物學中，控制外在的基因可分為顯性基因與隱性基因，通常由顯性基因來控制外在的表現，但有時候顯性基因因為交配的過程中未被挑選出來導致由隱性基因代替來控制外在的表現。求解主要分成三個部份，包含了配置中的階段數、階段間的連結方式以及階段中的可行機台選擇，根據此三個部份選出符合作業流程的可行機台配置，這三個部份將被編入染色體中做選擇，因此，將染色體分為三段，說明如下：

1. 第一段決定配置的階段數並且產生一段 0 與 1 組成的控制基因。第一段的每個基因碼代表作業流程圖中所有可能合併的作業，其可能合併的作業依照機台可行的操作的作業而定，若解碼後為 0 則其對應的作業不合併在同一個階段中，若為 1 則合併在同一個階段中。且當第一段基因解碼後會產生一段控制基因，這段控制基因將決定外在的表現是由顯性基因或是隱性基因來表現，每個顯性基因都會配對一段隱性基因，當顯性基因被激活時則相對應的隱性基因為休眠狀態。控制基因為 1 時激活顯性基因，控制基因為 0 時不激活顯性基因。
2. 第二段是顯性基因，作為選擇操作合併階段的機台。第二段的每個基因碼代表序列中可能合併的作業，其基因數量會與第一段基因相同。
3. 第三段是隱性基因，作為選擇操作各單獨作業的機台，亦即若在第二段基因中還有階段中的機台未被選擇，則交由第三段基因作決定，在此第三段基因也決定了作業

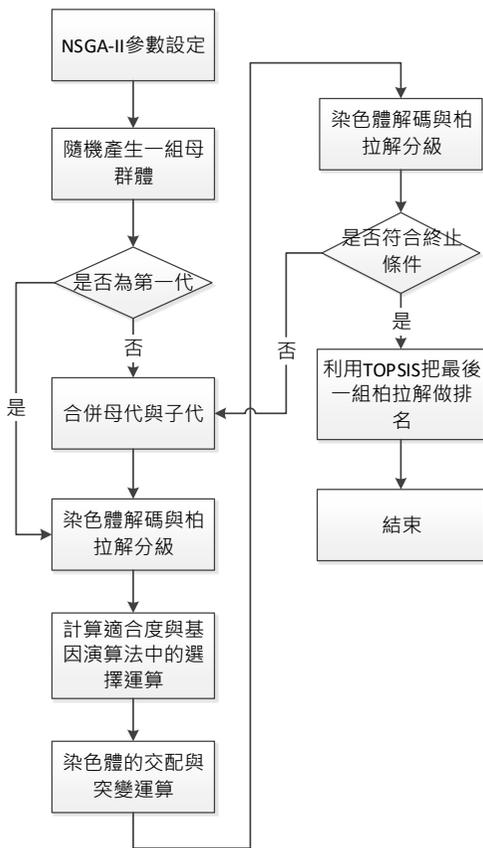


圖 9 NSGA-II 及 TOPSIS 的求解流程圖

間的路徑方式，第三段的每個基因碼表示作業流程圖中的每個作業中選用的機台與作業間的連接方式。

本研究的解碼是利用基因中的亂數乘上此基因的可行解數量，將得到的數字無條件進位得到的整數 n ，再把可行解由上往下數到第 n 個解就是代表此基因的解。解碼流程如下：

1. 將第一段基因解碼得到系統的階段數與一段控制基因。
2. 利用控制基因的 0 與 1 來控制第二段基因，如為 1 則激活第二段對應的基因並休眠第三段對應的隱性基因，如為 0 則休眠的二段對應的基因並激活第三段對應的基因。若出現一個隱性基因同時被兩個顯性基因所控制，若其中一個控制隱性基因碼的顯性基因為激活狀態，則隱性基因碼必為休眠，休眠也可謂無效參數。

3. 將被激活的基因解碼，可以得到每個階段決定使用的機台組態，並利用公式 (2) 算出階段中指定機台的數量，即可得到圖中的系統配置。

以圖 5 的範例為例，圖 10 為一個基因編碼示意圖，其中路徑 (route) 解碼後可以得到作業間的連接方式是串聯 (series) 或是交叉 (cross)，圖 11 為圖 10 的染色體解碼後的製造系統配置圖。

二、基因演算法中的設定

適合度函數是採用基於 Pareto 理論基礎，所設計出的評估函數 GPSIFF (Generalized Pareto-base Scale-Independent Fitness Function)，計算公式如下：

$$F(x_i) = a - b + h \quad (11)$$

其中 x_i 為目前評估的個體， a 為被 x_i 支配的個體數量， b 為可以支配 x_i 的個體數量， h 為當前參與評估運算的所有個體數目，根據適合度計算出各解的機率，如公式 (12) 所示，再使用輪盤法選出需求的母體數量。

$$P(x_l) = \frac{F(x_l)}{\sum_{l=1}^L F(x_l)} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

本研究將染色體分成三段分別為控制基因、顯性基因與隱性基因，因為三段基因各別表現不同的事物，所以將三段基因各別進行交配運算。在基因交配方面採用雙點交配，被選擇出來的染色體會得到一個隨機亂數，若值小於交配率則進行交配，在交配過程中，兩染色體會隨機產生兩個交配點，將此兩交配點中間的基因互換，得到新的兩條染色體並且進行解碼。在基因突變方面採單點突變，各條染色體會得到一個隨機亂數，若此數值小於突變率則進行突變。由於解為非連續型，為了確保突變的過程不會選擇到同一個解，會將原本的亂數加上可行解數量分之其餘可行解數量的隨機亂數並去掉整數位只留小數位，以確保突變的效率。

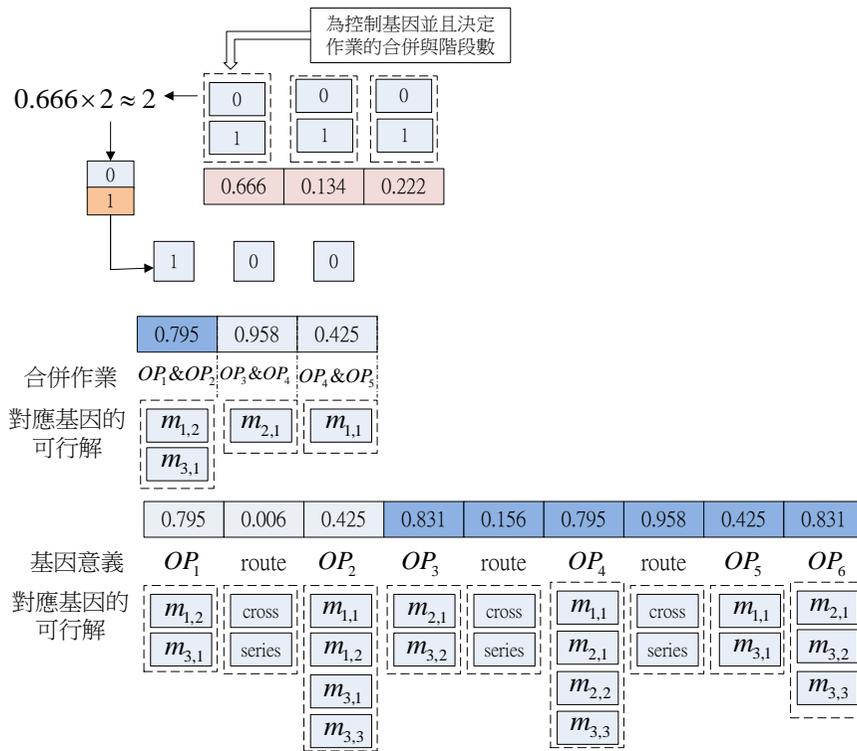


圖 10 染色體編碼與解碼

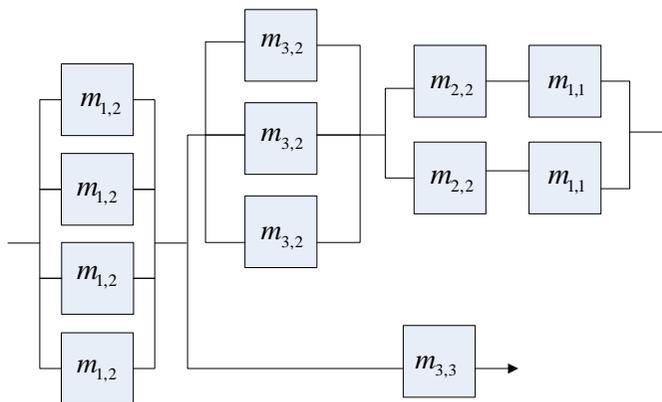


圖 11 解碼後的系統配置圖

伍、範例與討論

以一個範例進行驗證及分析討論，探討在考慮多目標下的解、各目標對可重構製造系統的配置的影響，以及需求率對配置影響的分析。假設有一可重構製造系統要生產三種產品 P_1 、 P_2 及 P_3 ，三種產品的作業流程分別為 $OP_3-OP_7-OP_4-OP_6-OP_{11}-OP_1$ 、 $OP_3-OP_7-OP_4-OP_6-OP_8-OP_1$ 及 $OP_3-OP_7-OP_9-OP_5-OP_2-OP_1$ ，合併的作業流程圖如圖 12 所示，三種產品的需求率如表 1 所示。表 2 為機台組態 $m_{p,q}$ 使用基本模塊的集合，共有 10 種基本模塊組成 5 種的機台 p ；表 3 表示機台組態 $m_{p,q}$ 中使用輔助模塊的集合，15 種不同的輔助模塊共組成 18 種輔助模塊集合，機台組態 $m_{p,q}$ 共有 18 種；表 4 表示各機台組態對應可操作的作業；表 5 及 6 分別表示各機台組態執行各項作業的生產速率及所需的生產成本。舉例來說， $m_{1,1}$ 可執行作業 OP_4 及 OP_8 ，其執行作業的生產速率分別為 14 及 12 個／小時，所需的生產成本分別為 100 及 120 美金。

在操作性能計算公式 (4) 中的參數 Y 設為 2，可重構能力計算公式 (6) 中的參數 α 、 β 、 γ 的值分別設為 0.5、0.4、0.1，以及 Z 值設為 2。NSGA-II 的參數設定為交配率 0.7、突變率 0.1、母體數 80，以及迭代次數 100 次，依據圖 9 的 NSGA-II 及 TOPSIS 的求解流程找出系統配置。表 7 列出最後 TOPSIS 正規化後所得到的部份前 20 名的系統配置，系統配置包括各階段中所使用的機台組態、數量及階段間的連接方式，部份前 20 名中含有 4 個目標值排名第一的系統配置。表 8 為表 7 每個排名中相對應的各階段所選用的作業，表 9 為表 7 每個排名中的生產成本、操作性能、可重構能力及擴展性四個目標值與 TOPSIS 正規化的值，各目標排名第一的值以粗體標示出來。圖 13 為 TOPSIS 第一名的系統配置的示意圖。

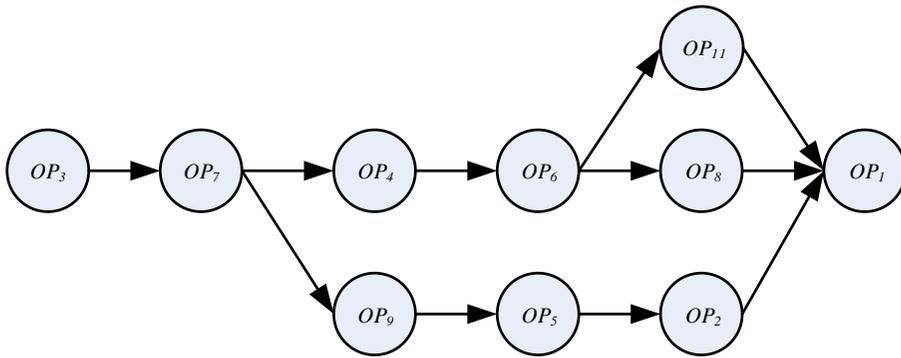


圖 12 三種產品合併的作業流程

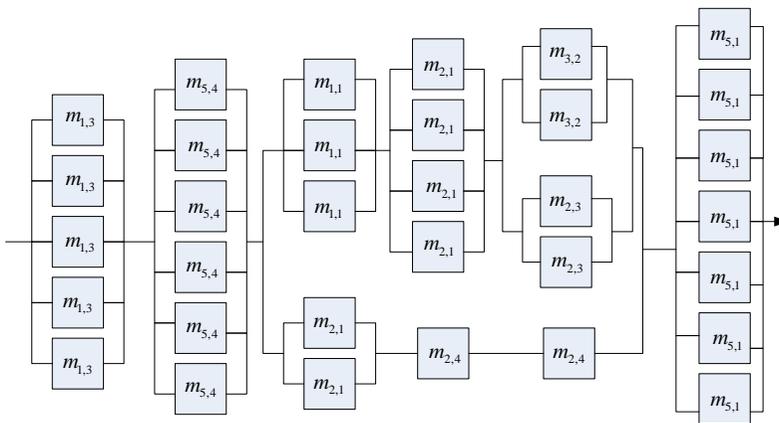


圖 13 TOPSIS 排名第一的系統配置

表 1 各產品在不同作業的需求率 $d_{o,k}$ (個/小時)

	OP_1	OP_2	OP_3	OP_4	OP_5	OP_6	OP_7	OP_8	OP_9	OP_{10}	OP_{11}
P_1	40	0	40	40	0	40	40	0	0	0	40
P_2	30	0	30	30	0	30	30	30	0	0	0
P_3	20	20	20	0	20	0	20	0	20	0	0
總和	90	20	90	70	20	70	90	30	20	0	40

表 2 機台組態 $m_{p,q}$ 使用基本模塊的集合 $MB_{p,q}$

機台組態基本模塊集合	基本模塊 BM_i 集合
$MB_{1,1}$	$\{BM_1, BM_5\}$
$MB_{1,2}$	$\{BM_1, BM_5\}$
$MB_{1,3}$	$\{BM_1, BM_5\}$
$MB_{1,4}$	$\{BM_1, BM_5\}$
$MB_{2,1}$	$\{BM_2, BM_4, BM_8\}$
$MB_{2,2}$	$\{BM_2, BM_4, BM_8\}$
$MB_{2,3}$	$\{BM_2, BM_4, BM_8\}$
$MB_{2,4}$	$\{BM_2, BM_4, BM_8\}$
$MB_{2,5}$	$\{BM_2, BM_4, BM_8\}$
$MB_{3,1}$	$\{BM_3, BM_5, BM_7\}$
$MB_{3,2}$	$\{BM_3, BM_5, BM_7\}$
$MB_{4,1}$	$\{BM_4, BM_9\}$
$MB_{4,2}$	$\{BM_4, BM_9\}$
$MB_{4,3}$	$\{BM_4, BM_9\}$
$MB_{5,1}$	$\{BM_3, BM_6, BM_{10}\}$
$MB_{5,2}$	$\{BM_3, BM_6, BM_{10}\}$
$MB_{5,3}$	$\{BM_3, BM_6, BM_{10}\}$
$MB_{5,4}$	$\{BM_3, BM_6, BM_{10}\}$

表 3 機台組態 $m_{p,q}$ 使用輔助模塊的集合 $MA_{p,q}$

機台組態輔助模塊集合	輔助模塊 AM_j 集合
$MA_{1,1}$	$\{AM_3, AM_7, AM_{11}, AM_{12}\}$
$MA_{1,2}$	$\{AM_2, AM_3, AM_5, AM_{10}, AM_{11}\}$
$MA_{1,3}$	$\{AM_1, AM_7, AM_8, AM_{10}, AM_{11}\}$
$MA_{1,4}$	$\{AM_5, AM_7, AM_8\}$
$MA_{2,1}$	$\{AM_1, AM_3, AM_6, AM_{12}, AM_{14}\}$
$MA_{2,2}$	$\{AM_4, AM_6, AM_9\}$
$MA_{2,3}$	$\{AM_3, AM_9, AM_{14}\}$
$MA_{2,4}$	$\{AM_1, AM_3, AM_5, AM_8, AM_{14}\}$

續下表

續表 3

$MA_{2,5}$	$\{AM_1, AM_4, AM_8\}$
$MA_{3,1}$	$\{AM_1, AM_2, AM_4, AM_6, AM_8\}$
$MA_{3,2}$	$\{AM_2, AM_3, AM_4, AM_7, AM_9, AM_{10}\}$
$MA_{4,1}$	$\{AM_8, AM_{13}\}$
$MA_{4,2}$	$\{AM_1, AM_5, AM_8, AM_{10}, AM_{11}\}$
$MA_{4,3}$	$\{AM_3, AM_4, AM_7, AM_8\}$
$MA_{5,1}$	$\{AM_{10}, AM_{12}\}$
$MA_{5,2}$	$\{AM_6, AM_7, AM_9, AM_{10}, AM_{15}\}$
$MA_{5,3}$	$\{AM_1, AM_2, AM_3, AM_5, AM_{12}\}$
$MA_{5,4}$	$\{AM_{10}, AM_{12}, AM_{14}\}$

表 4 機台組態 $m_{p,q}$ 對應可行操作的作業 OP_k , $\delta_{p,q}^k$

	OP_1	OP_2	OP_3	OP_4	OP_5	OP_6	OP_7	OP_8	OP_9	OP_{10}	OP_{11}
$m_{1,1}$	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$m_{1,2}$	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
$m_{1,3}$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
$m_{1,4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$m_{2,1}$	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
$m_{2,2}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{2,3}$	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
$m_{2,4}$	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
$m_{2,5}$	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
$m_{3,1}$	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$m_{3,2}$	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
$m_{4,1}$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$m_{4,2}$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{4,3}$	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
$m_{5,1}$	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
$m_{5,2}$	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
$m_{5,3}$	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
$m_{5,4}$	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

表 5 機台組態 $m_{p,q}$ 對應作業 OP_k 的生產速率， $r_{p,q}^k$ (個/小時)

	OP_1	OP_2	OP_3	OP_4	OP_5	OP_6	OP_7	OP_8	OP_9	OP_{10}	OP_{11}
$m_{1,1}$	0	0	0	14	0	0	0	12	0	0	0
$m_{1,2}$	0	0	0	0	15	0	0	0	20	0	0
$m_{1,3}$	0	0	20	0	0	0	15	0	0	0	0
$m_{1,4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0
$m_{2,1}$	14	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0
$m_{2,2}$	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{2,3}$	0	0	25	0	0	0	0	18	0	0	25
$m_{2,4}$	0	20	0	0	20	0	18	0	0	0	0
$m_{2,5}$	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0
$m_{3,1}$	0	12	0	0	0	0	0	0	15	0	0
$m_{3,2}$	30	0	0	26	0	0	0	24	0	0	24
$m_{4,1}$	0	0	0	0	0	25	0	0	0	30	0
$m_{4,2}$	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{4,3}$	0	18	0	25	0	0	0	16	0	0	0
$m_{5,1}$	16	0	0	0	0	0	15	0	0	0	15
$m_{5,2}$	0	0	24	0	20	0	0	0	0	25	0
$m_{5,3}$	0	0	0	24	0	0	0	0	30	0	0
$m_{5,4}$	20	0	0	0	0	22	14	0	0	0	0

表 6 機台組態 $m_{p,q}$ 對應作業 OP_k 的單位生產成本， $c_{p,q}^k$ (美金)

	OP_1	OP_2	OP_3	OP_4	OP_5	OP_6	OP_7	OP_8	OP_9	OP_{10}	OP_{11}
$m_{1,1}$	0	0	0	100	0	0	0	120	0	0	0
$m_{1,2}$	0	0	0	0	150	0	0	0	123	0	0
$m_{1,3}$	0	0	121	0	0	0	120	0	0	0	0
$m_{1,4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0
$m_{2,1}$	59	0	0	0	0	117	0	0	0	0	0
$m_{2,2}$	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{2,3}$	0	0	79	0	0	0	0	94	0	0	158
$m_{2,4}$	0	116	0	0	182	0	178	0	0	0	0

續下表

續表 6

$m_{2,5}$	0	0	0	133	0	0	0	0	0	0	0
$m_{3,1}$	0	155	0	0	0	0	0	0	144	0	0
$m_{3,2}$	193	0	0	122	0	0	0	188	0	0	143
$m_{4,1}$	0	0	0	0	0	159	0	0	0	135	0
$m_{4,2}$	148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{4,3}$	0	134	0	88	0	0	0	95	0	0	0
$m_{5,1}$	167	0	0	0	0	0	153	0	0	0	157
$m_{5,2}$	0	0	145	0	133	0	0	0	0	174	0
$m_{5,3}$	0	0	0	136	0	0	0	0	147	0	0
$m_{5,4}$	200	0	0	0	0	170	165	0	0	0	0

表 7 TOPSIS 正規化後的排名及其系統配置

系統配置 (階段：機台組態/機台數量，連結：1 表示交叉連接、0 表示串連連接)																			
排名	階段 1	連 接	階段 2	連 接	階段 3	連 接	階段 4	連 接	階段 5	連 接	階段 6	連 接	階段 7	連 接	階段 8	連 接	階段 9	連 接	階段 10
1	m _{1,3} /5	1	m _{5,1} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
2	m _{1,3} /5	1	m _{5,1} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
3	m _{5,2} /4	1	m _{5,1} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,2} /2	1	m _{2,1} /7
4	m _{1,3} /5	1	m _{5,1} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,2} /2	1	m _{2,1} /7
5	m _{1,3} /11	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,2} /2	1	m _{2,1} /7	-	-
6	m _{1,3} /5	1	m _{1,3} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{2,1} /5	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
7	m _{5,2} /4	1	m _{1,3} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
8	m _{1,3} /11	1	m _{2,5} /4	1	m _{4,3} /3	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7	-	-
9	m _{1,3} /11	1	m _{4,3} /3	1	m _{4,3} /3	1	m _{5,1} /3	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7	-	-
10	m _{1,3} /11	1	m _{1,1} /5	1	m _{2,1} /5	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /2	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7	-	-
11	m _{5,2} /4	1	m _{1,3} /6	1	m _{4,3} /3	1	m _{4,1} /3	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
.....																			
16	m _{1,3} /5	1	m _{5,4} /7	1	m _{2,5} /4	1	m _{4,1} /3	1	m _{5,1} /3	1	m _{2,3} /2	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7
17	m _{1,3} /11	1	m _{1,1} /5	1	m _{5,4} /4	1	m _{5,1} /3	1	m _{2,3} /1	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{3,2} /3	-	-
18	m _{1,3} /5	1	m _{5,4} /7	1	m _{1,1} /5	1	m _{2,1} /5	1	m _{5,1} /3	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{3,2} /3
19	m _{5,2} /4	1	m _{5,4} /7	1	m _{2,5} /4	1	m _{2,1} /5	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,2} /2	1	m _{2,1} /7
20	m _{5,2} /4	1	m _{5,4} /7	1	m _{1,1} /5	1	m _{2,1} /5	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /2	1	m _{5,3} /1	1	m _{1,2} /2	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /7

表 8 各階段所選用的作業

排名	階段 1	階段 2	階段 3	階段 4	階段 5	階段 6	階段 7	階段 8	階段 9	階段 10
1	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
2	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
3	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
4	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
5	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
6	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
7	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
8	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
9	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
10	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
11	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
									
16	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
17	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
18	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
19	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
20	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1

表 9 生產成本、操作性能、可重構能力、擴展性及 TOPSIS 正規化的值

排名	TPC	OC	RC	SC	TOPSIS
1	3726	36	44.278	0.969	0.728
2	3750	36	44.7013	0.969	0.720
3	3822	35	40.58	0.969	0.716
4	3774	32	36.503	0.970	0.715
5	3649	28	38.168	0.970	0.707
6	3457	28	38.571	0.970	0.699
7	3503	32	36.314	0.968	0.681
8	3617	25	41.401	0.969	0.668
9	3534	24	41.897	0.969	0.668
10	3669	25	38.981	0.971	0.663

續下表

續表 9

11	3300	29	35.646	0.967	0.663
.....					
16	4213	24	45.329	0.971	0.646
17	4139	32	41.555	0.968	0.645
18	4479	33	44.112	0.970	0.644
19	4232	27	38.305	0.971	0.642
20	4270	29	37.073	0.972	0.642

一、各目標對系統配置的影響

表 9 中排名 11 的系統配置為成本目標中最優的解，依據公式 (1) 及 (2)，將各機台組態的生產成本除以其對應的生產速率得到各機台組態的生產效率成本，如表 10 所示，效率好 (低) 的機台表示機台具備低成本及高生產效率。排名 11 選擇的機台組態如表 10 中粗體斜線的部份，除了作業 3 與作業 9 外，其餘的作業皆使用了生產效率成本最好的機台組態，所以在成本目標排名最好。操作性能最優的系統配置為排名 1 與排名 2，兩者有相同的操作性能。由表 7 中得知，排名 1 與排名 2 的系統配置皆使用了最大階段數十個階段來完成產品，並在各階段中皆使用不相同的機台組態，以及選擇支援較多作業的機台組態來操作作業，唯一的差別在階段 7 使不同的機台組態，分別為 $m_{1,2}$ 及 $m_{5,3}$ ，但此兩種的機台組態支援相同數量的作業，因此，有相同的操作性能。可重構能力最優的系統配置為排名 16，由表 7 中得知，此系統配置也使用了最大階段數十個階段來完成產品，在各階段中皆使用不相同的機台組態，並挑選有較優的重構性的機台組態，所以在重構性能目標排名上最佳。擴展性最高的系統配置為排名 20 的系統配置，從擴展性能的目標式 (9) 中可以得知，擴展性的高低與連接方式和機台數量有關，當機台數越多時及連接方式皆為交叉連接時為最優，在所有階段間的連接方式皆為交叉連接的情況下排名 20 所使用的機台數為 36 台，在所有系統配置中為數量最高者，所以在擴展性目標上排名最好。

整體而言排名第一的 TOPSIS 正規化值為 0.728，在生產成本、操作性能、可重構能力及擴展性等目標的排名分別為 10、1、3、4 及 2。比較排名 1 與排名 2 系統配置的差異，只有在階段 7 使不同的機台組態，排名 1 $m_{1,2}$ ，而排名 2 選用 $m_{5,3}$ ，這兩種機台組態的差別在於生產成本與重構能力。 $m_{1,2}$ 所需的成本低於 $m_{5,3}$ 所需的成本，因此，排名 1 的整體系統配置的花費低於排名 2。在機台組態方面， $m_{1,2}$ 與 $m_{5,3}$ 在固定基本模塊下可以替換的機台組態與在系統配置中所需的機台數量皆相同，唯一的差別在於

其更換機台組態時所需新增、刪除、修改輔助模塊的數量不同，因此，造成了排名 1 與排名 2 在重構能力上有些微的差距。

二、需求率的敏感度分析

當工廠在規劃產線時，必須考慮產能的需求，產能的需求可由需求率高低來決定，此小節探討需求率變動下，在各目標下系統配置的選擇的狀況。本研究將生產每個產品的需求率設為相同，並且將需求率由 20（個／小時）開始往上遞增，每個需求等級的間隔為 20（個／小時），如表 11 中列出部份的 8 個等級。接著依照不同的需求等級可以得到各等級 TOPSIS 第一名的系統配置、各目標的值，以及各階段中操作對應的作業，其中部份 8 個等級的 TOPSIS 第一名的系統配置、各目標的值，以及各階段中操作對應的作業，分別如表 12、13、14 所示。

由表 13 我們可以看到各目標在不同需求率等級下的變化。成本與擴展性這兩項指標皆會隨著需求率等級的上升而有增加的趨勢，由於需求率等級的上升，系統需要更多的機台才能滿足需求，因此，所需的成本會增加，而擴展性也因為機台數的上升而隨之遞增。另外，也因為機台數的增加，可重構能力也隨著需求率等級的上升有減少的趨勢。操作性能在不同的需求率等級下，因機台組態可支援的作業不變，所以並沒有太大的變化。

隨著需求率的上升，為了因應上升的需求，工廠必須購置更多機台才能應付產能的需求。在一般的直覺中必定會選擇機台花費較便宜的機台作為系統配置的選擇，但是不要忘記機台的生產速率也會影響此機台在操作作業時所需使用的數量，如前一節所述，生產效率成本好（低）的機台表示機台具有高生產率且低成本，在需求增加時為考慮的重點。比較等級編號 1 及編號 3 的系統配置，由表 14 中可以發現等級編號 1 及編號 3 每個階段選擇了相同的作業，又由表 12 得知，其中作業 6、8、9 及 11 使用了不同的機台組態做操作。由表 10 得知，作業 6、8、9 需求等級高的編號 3 選擇生產效率成本較優的機台組態執行相同作業的操作，然而作業 11 選擇生產效率成本較差的 $m_{2,3}$ ，選擇的原因是只有產品 P_1 需要使用作業 11，且 $m_{2,3}$ 與 $m_{3,2}$ 的生產效率成本差異不大，以及 $m_{2,3}$ 比 $m_{3,2}$ 有較佳的重構能力。

表 10 機台組態對應作業的生產效率成本

	OP_1	OP_2	OP_3	OP_4	OP_5	OP_6	OP_7	OP_8	OP_9	OP_{10}	OP_{11}
$m_{1,1}$	0	0	0	7.14	0	0	0	10.00	0	0	0
$m_{1,2}$	0	0	0	0	10.00	0	0	0	6.15	0	0
$m_{1,3}$	0	0	6.05	0	0	0	8.00	0	0	0	0
$m_{1,4}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.93	0
$m_{2,1}$	4.21	0	0	0	0	7.80	0	0	0	0	0
$m_{2,2}$	0	5.46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{2,3}$	0	0	3.16	0	0	0	0	5.22	0	0	6.32
$m_{2,4}$	0	5.08	0	0	9.10	0	9.88	0	0	0	0
$m_{2,5}$	0	0	0	7.38	0	0	0	0	0	0	0
$m_{3,1}$	0	12.91	0	0	0	0	0	0	9.6	0	0
$m_{3,2}$	6.43	0	0	4.69	0	0	0	7.83	0	0	5.95
$m_{4,1}$	0	0	0	0	0	6.36	0	0	0	4.50	0
$m_{4,2}$	5.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$m_{4,3}$	0	7.44	0	3.52	0	0	0	5.93	0	0	0
$m_{5,1}$	10.43	0	0	0	0	0	10.20	0	0	0	10.46
$m_{5,2}$	0	0	6.04	0	6.65	0	0	0	0	6.96	0
$m_{5,3}$	0	0	0	5.66	0	0	0	0	4.90	0	0
$m_{5,4}$	10.00	0	0	0	0	7.72	11.78	0	0	0	0

表 11 8 個部份等級的產品需求率 (個/小時)

等級編號	P_1	P_2	P_3
1	20	20	20
2	40	40	40
3	60	60	60
		
4	100	100	100
5	120	120	120
		
6	180	180	180
7	200	200	200
8	220	220	220

表 12 8 個部份等級需求下的系統配置

系統配置 (階段：機台組態/機台數量，連結：1 表示交叉連接、0 表示串連連接)																			
等級	階段 1	連 接	階段 2	連 接	階段 3	連 接	階段 4	連 接	階段 5	連 接	階段 6	連 接	階段 7	連 接	階段 8	連 接	階段 9	連 接	階段 10
1	m _{1,3} /7	1	m _{4,3} /2	1	m _{5,4} /2	1	m _{3,2} /1	1	m _{3,2} /1	1	m _{1,2} /1	1	m _{5,2} /1	1	m _{2,4} /1	1	m _{2,1} /5	-	-
2	m _{1,3} /6	1	m _{5,1} /8	1	m _{4,3} /4	1	m _{5,4} /4	1	m _{3,2} /2	1	m _{2,3} /3	1	m _{1,2} /2	1	m _{5,2} /2	1	m _{2,4} /2	1	m _{2,1} /9
3	m _{1,3} /21	1	m _{4,3} /5	1	m _{4,1} /5	1	m _{2,3} /3	1	m _{2,3} /4	1	m _{5,3} /2	1	m _{5,2} /3	1	m _{2,4} /3	1	m _{2,1} /13	-	-
.....																			
4	m _{1,3} /15	1	m _{1,3} /20	1	m _{3,2} /8	1	m _{4,1} /8	1	m _{2,3} /4	1	m _{4,3} /7	1	m _{5,3} /4	1	m _{5,2} /5	1	m _{2,4} /5	1	m _{2,1} /22
5	m _{1,3} /18	1	m _{5,4} /26	1	m _{1,1} /18	1	m _{4,1} /10	1	m _{2,3} /5	1	m _{3,2} /5	1	m _{5,3} /4	1	m _{5,2} /6	1	m _{2,4} /6	1	m _{2,1} /26
.....																			
6	m _{2,3} /22	1	m _{1,3} /36	1	m _{4,3} /15	1	m _{4,1} /15	1	m _{3,2} /8	1	m _{2,4} /15	1	m _{1,1} /6	1	m _{5,3} /9	1	m _{5,2} /9	1	m _{2,1} /39
7	m _{2,3} /24	1	m _{1,3} /40	1	m _{4,3} /16	0	m _{4,1} /16	1	m _{3,2} /9	1	m _{2,4} /13	1	m _{4,3} /7	1	m _{5,3} /10	1	m _{5,2} /10	1	m _{2,1} /43
8	m _{2,3} /27	1	m _{1,3} /44	1	m _{4,3} /18	1	m _{4,1} /18	1	m _{3,2} /10	1	m _{2,4} /14	1	m _{4,3} /8	1	m _{5,3} /11	1	m _{5,2} /11	1	m _{2,1} /48

表 13 8 個部份等級需求下的目標

等級編號	TPC	OC	RC	SC	TOPSIS
1	2372	32	52.628	0.952	0.709
2	4825	36	26.598	0.976	0.728
3	6378	29	17.612	0.983	0.744
				
4	10891	29	11.098	0.989	0.765
5	15204	30	10.185	0.991	0.806
				
6	18131	30	6.180252	0.994253	0.752
7	19226	29	4.898318	0.993617	0.699
8	21366	29	4.392894	0.995215	0.701

表 14 8 個部份等級各階段對應的作業項目

等級編號	階段 1	階段 2	階段 3	階段 4	階段 5	階段 6	階段 7	階段 8	階段 9	階段 10
1	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
2	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
3	3,7	4	6	11	8	9	5	2	1	-
									
4	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
5	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
									
6	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
7	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1
8	3	7	4	6	11	8	9	5	2	1

陸、結論

生產多樣產品的可重構製造系統可以回應快速的市場變化及客製化的需求，不同的產品包括不同的生產階段及作業，當多種產品共同生產時，作業流程不再是一個序列，而是多個序列組成的非對稱配置，多種產品也共同使用同一機台生產，讓規劃問題也變的複雜。本研究以具有模塊化概念的可重構工具機作為基礎，在考慮滿足各種產品作業及產能需求下，規劃生產多樣產品的可重構製造系統，以生產成本、可重構能力、操作性能及擴展性等四個目標指標下，找出最佳的可重構製造系統配置，系統的配置包括階段數、階段間的連結方式、各階段作業、作業所使用的機台組態及其數量。與以往機台配置相關研究的不同之處在於本研究考慮同時多種零件的生產、允許在一個階段中操作多個作業、同時在階段間考慮串聯連接與交叉連接，更多更複雜的選擇使得重構製造系統更能回應多元化的生產需求。

本研究系統配置的方法分為兩個階段來進行，首先採用 NSGA-II 來選擇各系統配置階段中使用的機台與各階段間的連接方式，接著利用 TOPSIS 的五個目標值從眾多的系統配置中挑選出最優的系統配置，並進而瞭解各系統配置在選擇不同的機台組態與階段間的連階方式對各績效指標的影響，歸納出以下幾點結論：

1. 在機台組態的選擇方面，機台組態的生產成本與生產速率會影響成本的目標，又機台組態的生產效率成本對成本目標上的影響，會隨著需求的增加影響的程度越大，在需求率高時，機台配置在選擇機台組態時會盡量挑選生產效率成本較優的機台。而在需求率低時，機台組態的生產效率成本影響較低，因此，機台配置會避免在不同階段中選擇相同的機台組態來進行加工，以提高操作性能與重構能力上的優勢，也就是以操作性能與重構能力為考慮的重點。
2. 在選擇連接方式方面，連接方式的選擇會明顯得影響擴展性能的優劣，又以交叉連接在擴展性的表現上優於串聯連接。
3. 在系統配置階段數方面，階段數多的系統配置有較多的不同的機台組態，在可重構能力與操作性能會優於階段數少的系統配置。
4. 在相同有限的機台組態的環境與限制下，需求增加到達某一值，也就是生產型態為大量生產時，可重構製造系統會以專用的高生產效率的固定系統配置的製造系統來做生產。

在研究過程中經過分析與探討，發現一些議題值得進一步探究，以下提供後續研究者一些方向：

1. 在生產環境方面，本研究建構的是多零件共同生產的系統配置，但有些工廠是已知需要生產的多樣產品，並一次生產一種產品，在滿足生產中產品的需求後再做生產線換線的重構，因此，後續的研究可以將產品生產的先後順序納入考量來建構機台的配置。
2. 在成本指標上可以再做更細部的探討，例如將人力成本與生產各零件的作業成本分開計算；另外，可靠度也是製造系統運作的重要指標，一個低可靠度的系統會擾亂生管人員原先規劃的生產排程、拉長預計的工時，以及機台故障與維修帶來的成本，不穩定的系統提高了系統的決策複雜度，未來可以將可靠度納入系統配置的考量之一。
3. 本研究未考慮到機台在場地的面積及佈置問題，而在實際建構製造系統時，場地的面積也會限制總機台數的多寡，並間接的影響機台配置的建構成本。

參考文獻

一、英文部分

1. Bensmaine, A., Dahane, M., & Benyoucef, L. (2013). A non-dominated sorting genetic algorithm based approach for optimal machines selection in reconfigurable manufacturing environment. Computers & Industrial Engineering, 66(3), 519-524.
2. Dou, J., Dai, X., & Meng, Z. (2010). Optimisation for multi-part flow-line configuration of reconfigurable manufacturing system using GA. International Journal of Production Research, 48(14), 4071-4100.
3. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182-197.
4. Goyal, K. K., Jain, P. K., & Jain, M. (2013). A novel methodology to measure the responsiveness of RMTs in reconfigurable manufacturing system. Journal of Manufacturing Systems, 32(4), 724-730.

5. Goyal, K. K., Jain, P. K., & Jain, M. (2012). Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing system using NSGA II and TOPSIS. International Journal of Production Research, 50(15), 4175-4191.
6. Gumasta, K., Kumar Gupta, S., Benyoucef, L., & Tiwari, M. K. (2011). Developing a reconfigurability index using multi-attribute utility theory. International Journal of Production Research, 49(6), 1669-1683.
7. Haddou-Benderbal, H., Dahane, M., & Benyoucef, L. (2017). Layout evolution effort for product family in reconfigurable manufacturing system design. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 10166-10171.
8. Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications. Berlin: Springer.
9. Koren, Y., Hu, S. J., & Weber, T. W. (1998). Impact of manufacturing system configuration on performance. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 47(1), 369-372.
10. Koren, Y., & Shpitalni, M. (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems, 29(4), 130-141.
11. Mittal, K. K., & Jain, P. K. (2014). An overview of performance measures in reconfigurable manufacturing system. Procedia Engineering, 69, 1125-1129.
12. Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., & Koren, Y. (2000). Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing, 11(4), 403-419.
13. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 27(3), 379-423.
14. Spicer, P., Koren, Y., Shpitalni, M., & Yip-Hoi, D. (2002). Design principles for machining system configurations. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 51(1), 275-280.
15. Wang, W., & Koren, Y. (2012). Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems, 31(2), 83-91.

16. Wang, G., Shang, X., Yan, Y., Allen, J. K., & Mistree, F. (2018). A tree-based decision method for the configuration design of reconfigurable machine tools. Journal of Manufacturing Systems, 49, 143-162.
17. Wang, H., Kwong, S., Jin, Y., Wei, W., & Man, K. F. (2005). Multi-objective hierarchical genetic algorithm for interpretable fuzzy rule-based knowledge extraction. Fuzzy Sets and Systems, 149(1), 149-186.

109 年 10 月 13 日收稿

109 年 10 月 21 日初審

109 年 12 月 02 日複審

109 年 12 月 23 日接受

作者介紹

Author's Introduction

姓名 呂明山
Name Ming-Shan Lu
服務單位 國立雲林科技大學工業工程與管理研究所教授
Department Professor, Graduate Institute of Industrial Engineering and Management,
National Yunlin University of Science and Technology
聯絡地址 雲林縣斗六市大學路 3 段 123 號
Address No.123, University Road, Section 3, Douliou, Yunlin County, Taiwan,
R.O.C.
E-mail mslu@yuntech.edu.tw
專長 彈性製造系統、電腦整合製造、機器人
Specialty Flexible Manufacturing System, Computer-Integrated Manufacturing,
Robotics

姓名 李岱穎
Name Dai-Ying Lee
服務單位 國立雲林科技大學工業工程與管理研究所研究生
Department Graduate Student, Graduate Institute of Industrial Engineering and
Management, National Yunlin University of Science and Technology
聯絡地址 雲林縣斗六市大學路 3 段 123 號
Address No.123, University Road, Section 3, Douliou, Yunlin County, Taiwan,
R.O.C.