臺大管理論叢 2013/6
第 23 卷第 2 期 263-296
DOI: 10.6226/NTURM2013.FEB.R10015

運用能力集合擴展規劃產品生產程序

Competence Set Expansion for Production Process Planning

蔡榮發／國立臺北科技大學經營管理系教授
Jung-Fa Tsai, Professor, Department of Business Management, National Taipei University of Technology

王佩淳／國立臺北科技大學工商管理研究所博士後研究
Pei-Chun Wang, Post-Doctoral Research, Graduate Institute of Industrial and Business Management, National Taipei University of Technology

蔡宛玲／國立臺北科技大學經營管理系碩士
Wan-Ling Tsai, Master, Department of Business Management, National Taipei University of Technology

Received 2010/4, Final revision received 2012/2

摘 要

本研究運用能力集合擴展概念，視一生產系統中所有生產程序為解決產品製造問題所需的能力集合，依據生產規劃所需考量的目標分別提出三項產品生產程序規劃模型：單一產品之生產程序規劃模型、多廠合作之生產程序規劃模型以及技術水準最佳化之生產程序規劃模型。此外，本研究求解生產程序規劃模型之多重解，以提昇生產程序規劃的彈性。本研究之主要貢獻為：(1) 運用能力集合擴展方法以解決產品生產程序規劃問題；(2) 求解三項生產程序規劃模型之多重解並以推導圖呈現所得之結果。研究結果顯示所提出的方法確實可有效解決生產程序規劃問題，並找出所有的最佳生產程序以增加使用上的彈性，推導圖所呈現之結果更進一步強化使用的方便性，範例說明也驗證了所提方法之正確性與可行性。

【關鍵字】能力集合擴展、生產程序規劃、最佳化

Abstract

This study utilizes competence set expansion to solve production process planning problems by treating all production skills as the competence set of the production system. Aimed at different objectives, three models are formulated such as manufacturing cost minimization model, production collaboration model of multi-plant facility and multi-level skill model of manufacturing process optimization. Furthermore, multiple solutions of the problems are derived to find out all alternative manufacturing processes. The main contributions of this study include applying competence set expansion to solve production process planning problems, obtaining multiple optimal solutions of the constructed models and visualizing the obtained results by deduction graphs. The research results reveal that the proposed method can effectively solve the production process planning problems and get all optimal production processes. The deduction graph also enhances the usability of the presented method. Moreover, several examples are used to illustrate the correctness and usefulness of the proposed methods.

【Keywords】competence set expansion, production process planning, optimization

臺灣大學學術期刊資料庫

壹、緒論

生產程序規劃問題是指在產能與製造資源的限制下，有效的配置資源，選擇最佳的產品生產程序。一般而言，生產程序有五種型態，分別是零工式生產、批量生產、重覆性生產、連續性生產及專案式生產。生產程序規劃的相關研究大部份以零工式生產環境為主 (Joo, Park, & Cho, 2001; Li & McMahon, 2007; Guo, Li, Mileham, & Owen, 2009; Li, Gao, Shao, Zhang, & Wang, 2010)，其主要任務包含生產作業的選擇 (Operation Selection) 與作業程序的次序安排 (Operation Sequencing) (Mojtaba & Reza, 2010)，前者主要將符合產品特徵的技術需求或設備指定給各項生產作業；後者則是決定各生產作業的先後次序。由於零工式生產的特性包括作業規模較小，高彈性的設備，各作業程序的技術需求有些許不同，適合產品組合多樣化的市場需求。因此，本研究基於各作業程序技術需求的重要性，在零工式生產環境下，規劃最佳生產程序。

而生產程序規劃相關的研究議題可分為兩類，一類是生產程序與排程整合規劃 (Integrated Process Planning and Scheduling；IPPS)，主要以最小化總排程時間、平衡機器使用水準、最小化工作延遲以及製造成本為決策目標，規劃滿足其特定目標需求的最佳生產程序，最終以甘特圖呈現其生產程序 (Li & McMahon, 2007; Moon, Lee, Jeong, & Yun, 2008; Guo et al., 2009; Li et al., 2010)。另一類是電腦輔助生產程序規劃 (Computer-Aided Process Planning；CAPP)，以創造決策支援系統為主，首先以 AND/OR 圖或樹狀圖表示初始的生產程序，然後依據輸入不同的產品特徵輸出所需的製造參數，如：技術型態或切割方式等，並產生滿足特定目標需求的最佳的生產程序 (Joo et al., 2001; Sankar, Asokan, Prabhaharan, & Phani, 2008; Woo, Kulvatunyou, & Cho, 2008; Mojtaba & Reza, 2010)。

由上述的文獻可知，任一類型的生產程序規劃議題，其主軸皆為滿足決策目標，選擇最佳生產程序。而目前針對生產程序規劃的研究，在模型的求解方法方面，大多採用啟發式 (Heuristic) 演算法，生產程序的選擇如黑箱作業，使得求解結果有落入區域最佳解的疑慮，無法確保獲得之解答為全域最佳解 (Global Optimum)。在研究結果方面大部份著重於最小總排程時間之生產程序，並採用以總排程時間為橫軸，製造資源為縱軸的甘特圖表示各生產作業的先後次序 (Sankar et al., 2008; Li & McMahon, 2007; Moon et al., 2008; Guo et al., 2009; Li et al., 2010)，較缺乏程序性圖形結構的可讀性；而且大多以時間觀點 (Time-dependent) 衡量生產程序，缺乏程序開發成本與生產程序的連結。在決策目標方面，近十年來的相關研究在模型建構上大多只考量上述最小化總排程時間、平衡機器使用水準等四項決策目標，並未討論生產程序技術共享或整合，缺乏與時俱進的生產程序技術水準觀點，使得過去生產程序規劃的決策目標已不符合決策需求。而現今的製造產業逐漸考量多廠合作生產策略，但對於多廠合作的生產規劃卻是鮮少探討。以印刷產業為例，圖像印刷技術除了大規模量產之包裝外盒

臺灣大學圖書館期刊資料庫

或外殼、電器產品、建材裝飾外，諸如個性 T 恤、馬克杯及帽子等，具客製化特性的產品也大量運用圖像印刷技術，傳統大多利用熱轉印技術將圖文等內容印刷至塑膠產品、衣服、帽子或馬克杯的各類產品，其生產程序根據加壓來源型態可分為：熱轉印、水轉印、氣轉印、絲網轉印、低溫轉印等種類。隨著數位印刷的廣泛應用，生產技術便研發出數位噴墨熱昇華轉印技術，為因應不同產品的印刷需求，進一步將傳統熱轉寫製程與數位印刷整合，也因而改變了印刷業的生產程序技術，而廠商之間的技術交流與合作更提升了整體的生產技術並降低生產成本 (周遵儒、洪國倫，2010)。基於上述，無論是產品組合多樣化的生產程序規劃或者多廠合作生產環境，當產品設計改變或生產程序技術改變時，若能透過分析生產程序之間的關係，加強生產程序機動調整的程度，便能達成提高生產程序彈性的目的。因此，本研究改善過去生產程序規劃模型未考量生產程序技術整合因素的問題，將生產程序技術的變動因素以及各廠不同的產品組合與生產程序技術整合因素納入生產程序規劃模型，運用能力集合擴展概念，視生產系統中所有生產程序技術為解決產品製造問題所需的能力集合，透過線性規劃建構生產程序規劃模型，求解最佳生產程序並從中分析生產程序的最佳替代方案，讓製造廠能夠以現有生產程序技術為基礎，進行生產程序的擴展與規劃，透過協調合作與技術整合，選擇最佳的生產程序，進而提升生產系統的彈性。

由於能力集合擴展 (Competence Set Expansion) 是以程序化技術擴展為重點，詳細呈現集合中每個程序節點之間以及集合與集合之間的關係，可量化處理有能力階級分別的變數，並以推導圖 (Deduction Graph) 清楚表達程序性模型的次序關係，因此，綜合以上優點，本研究運用能力集合擴展，以最佳化產品生產程序為目的，探討三項生產程序規劃模型，分別為：單一產品之生產程序規劃模型、多廠合作之生產程序規劃模型以及技術水準最佳化之生產程序規劃模型。讓製造廠能夠以現有的核心生產程序技術為基礎，透過協調合作與技術整合選擇最佳的生產程序。由於所建構之數學模式為混合整數線性規劃 (Mixed-integer Linear Programming) 模式，故可有效應用最佳化運算軟體求得最佳解，可確保所得結果為全域最佳解，改善啟發式演算法的求解結果落入區域最佳解的疑慮。而且，能力集合擴展適合各種具備次序限制特性的程序規劃模型，如專案管理或交通運輸路徑等 (謝秉蓉，2004；胡宜中、邱榆淨，2005；江勁毅、曾國雄，2001； Chen, 2002; Shee, 2006)，因此，本研究針對生產程序規劃提出新的概念作法，運用能力集合擴展概念，視生產系統中所有生產程序技術為解決產品製造問題所需的能力集合，並將製造某項產品必須取得的生產程序技術視為目標能力，透過能力集合的擴展獲得最佳的生產程序；同時，採用推導圖的概念以呈現最佳的生產程序，提昇研究結果的可讀性。本研究之主要優點可歸納如下：

1. 運用能力集合擴展方法以解決產品生產程序規劃問題，並考量生產技術水準與多廠合作生產規劃問題。

臺灣大學圖書館授權

2. 相較於啟發式方法，所提之方法可有效求得全域最佳解。

3. 探討生產程序規劃模型之多重解並以推導圖呈現所得之結果。

本文於第二節針對過去生產程序規劃以及能力集合擴展的相關研究進行文獻回顧，第三節以能力集合擴展為基礎說明產品生產程序規劃模型，第四節範例說明，分別驗證依據三項決策目標所建構的生產程序規劃模型，第五節為結論。

貳、文獻回顧

近年來，生產程序規劃相關的研究議題可分為兩類，生產程序與排程整合規劃 (IPPS) 與電腦輔助生產程序規劃 (CAPP)，前者以規劃滿足其特定目標準則的最佳生產程序為主，後者以創造決策支援系統為主；其主軸皆以滿足單一或多個決策目標的生產程序規劃；其運算結果主要包括製造參數與作業程序的次序安排。以下將 CAPP 與 IPPS 近幾年主要相關文獻比較整理如表 1：

表 1　CAPP 與 IPPS 相關文獻

類別	作者	研究重點	模型建構方法	求解方法	主要目的
CAPP	Joo et al. (2001)	發展動態生產程序規劃架構於零工式生產系統	以類神經網路為基礎，建立製造特徵與生產程序之知識庫	由類神經網路訓練後，輸出各種製造參數	依據輸入不同的產品特徵，產生不同生產程序所需的製造參數
	Sankar et al. (2008)	建構生產程序規劃系統	以幾何規劃建構生產成本函數與生產作業條件	以粒子群演算法，趨近最佳解	決定最佳的生產程序與生產作業參數
	Woo et al. (2008)	研究供應鏈環境下的分散式生產程序規劃	以混合整數規劃建構生產程序規劃模型	深度優先搜尋法	選擇成本最小化的製造商以及最佳的生產程序
IPPS	Li 與 McMahon (2007)	在零工式生產環境下，整合生產程序規劃與排程問題	將整合生產程序規劃與排程之決策目標，設定為模擬退火法 (Simulated Annealing) 之終止條件	由模擬退火法搜尋所有可能的生產程序與排程的組合	依據單一或多重決策目標，產生符合目標的生產程序。
	Moon et al. (2008)	在供應鏈環境下的整合生產程序規劃與排程問題	以混合整數規劃建構生產程序規劃與排程模型	以拓撲排序法 (Topological Sort) 產生初始的生產程序，再以演化式演算法 (Evolutionary Algorithm) 求解模型	總排程時間最小化之最佳生產程序與排程

臺灣大學學術期刊資料庫

IPPS	Guo et al. (2009)	整合生產程序規劃與排程問題	以粒子群演算法為基礎，擴展生產程序規劃的搜尋空間	粒子群演算法	決定最佳的生產程序與排程
	Li et al. (2010)	在零工式生產環境下，整合生產程序規劃與排程問題	以混合整數規劃建構生產程序規劃與排程之多目標模型	以演化式演算法求解模型	滿足多目標之最佳生產程序與排程

表 1 所列示的生產程序規劃相關文獻採用數學規劃或以演算法為基礎建構模型，求解方法都屬於啟發式方法，主要是因為大規模的生產程序規劃問題複雜度高，所建構的混合整數規劃模式求解時間過長，故採用啟發式方法求解，而求解結果可能為一區域最佳解或可行解 (Feasible Solution)，無法確保獲得之解答為全域最佳解，這也意味所得到的結果將使得生產成本提高或降低產品競爭力；為了提升求解品質，本研究運用混合整數規劃技術建構三種產品生產程序規劃模型，並以推導圖呈現求解結果。為說明啟發式方法與確定性方法的求解差異，本研究也進一步運用基因演算法分別求解三種模式並比較其結果。

運用數學規劃方法求解的相關研究包括：Jayaraman 與 Pirkul (2001) 將製造工廠與零售商的產能限制納入考量，以多階生產模式整合多廠生產規劃；Dasci 與 Verter (2001) 運用混合整數規劃解決由生產至配銷網路上廠區間的替代問題；Timpe 與 Kallarath (2000) 利用混合整數規劃求各廠最適生產數量；Carlo (1999) 運用整數規劃建立以最小成本為目標之多廠生產規劃模型；郭瑞祥、蔣明晃、陳亞男與劉基全 (2005) 提出二階段決策模式，運用混合整數規劃求得最佳的生產計劃。

綜合上述，以往的生產規劃皆強調各類成本函數，較少討論生產程序技術共享或整合，然而，若能以現有生產程序技術擴充或透過生產系統之間的生產程序移轉，使生產程序技術充份運用，降低生產程序技術的閒置或不足便能減少生產成本，配合完善的成本函數便可進一步降低整體生產成本。因此，有別於以往強調成本函數的生產規劃，本研究提出的生產程序規劃模型以選擇最佳生產程序為主要目的，將生產程序技術的變動因素以及各廠不同的生產技術水準因素納入生產程序規劃，讓製造廠能夠以現有的核心生產程序技術為基礎，透過協調合作與技術整合選擇最佳的生產程序。故本研究運用能力集合擴展規劃產品生產程序，探討最佳生產程序選擇以及生產系統間的生產程序整合使合作利潤最大，並考量不同生產技術水準與生產預算，找出所有最佳生產程序，以提供決策者選擇最合適的生產程序。

能力集合擴展最佳化的目的是以最小的擴展成本獲得解決問題所需能力的最佳擴展路徑，模型的改良以及求解方法的相關研究皆基於此目的發展最佳化演算法。最初以最小擴張樹 (Minimum Spanning Tree) 的概念，以最小擴展成本為目標，求得最佳化能力集合擴展路徑，然後進一步考量成本與利潤分析邊際效益 (Yu & Zhang, 1992,

臺灣大學學術期刊資料庫

1993)。之後，Feng 與 Yu (1998) 便延伸最小擴張樹的概念提出以最小擴張表格法 (Minimum Spanning Table；MST)，直接在矩陣或表格上運算，求得最佳能力集合擴展路徑。在實際應用上，能力集合不僅指單一能力，而是包含複合能力 (Compound Skill) 以及中介能力 (Intermediate Skill)，因此，納入複合能力與中介能力改良其擴展模型，並考量循環性 (Cyclic) 的能力集合擴展路徑，利用整數規劃求解最佳能力集合擴展路徑，並以推導圖 (Deduction Graph) 的圖形概念更清楚呈現循環性的能力集合擴展路徑 (Li & Yu, 1994; Shi & Yu, 1999; Li, 1999)。但上述方法中成本函數皆為對稱，實際問題中的資訊或技術的取得成本並非完全對稱，Shi 與 Yu (1996) 便提出利用樹狀擴展程序 (Tree Expansion Process) 求解成本不對稱的能力集合擴展路徑，但此方法未考量複合能力，因此 Li 、Chiang 與 Yu (2000) 便提出最佳化多階段擴展法 (Optimal Multiple Stage Expansion) 解決循環路徑中包含複合能力的能力集合擴展問題。因此，經過模型改良的演進之後，目前的能力集合擴展模型可處理包含複合能力與中介能力並具循環特性的能力集合擴展。

上述能力集合相關研究僅討論能力集合的取得與否，並未探討多階能力集合 (Multilevel Competence Set) 相關議題，模糊理論 (Fuzzy Theory) 也因此被應用於能力集合的程度區分。歸屬函數 (Membership Function) 是模糊理論的基本概念，描述模糊集合的性質，可運用歸屬函數將能力按程度區分為多階的能力集合 (Li & Yu, 1994; Wang & Wang, 1998; Chen, 2002; Hu, Tzeng, & Chen, 2004)。另外，模糊理論的基本概念也用於處理多目標決策問題，Huang、Tzeng 與 Ong (2006) 運用模糊理論來表示成本與利潤的誤差空間，並結合演化式演算法求解能力集合擴展，稱為多目標進化演算法，同時考量成本與利潤函數，在多項目標情況下求得均衡解，提供決策者在可接受的風險程度下選擇合適的擴展路徑。Lin (2006) 利用混合基因演算法結合模糊理論，同時處理不確定性及多目標情況，運用模糊理論處理不同程度的成本與利潤目標，然後將能力集合擴展分解成若干階段，運用混合基因演算法求解各階段之間的能力集合擴展，找出滿足成本與利潤之最佳生產程序。Hu、Chen、Tzeng 與 Chiu (2003) 為改善以往研究皆假設複合能力與擴展成本為已知的問題，運用類神經網路結合模糊理論以及在灰關聯分析的基礎上，從現存的能力集合萃取潛在且有用的複合能力並制訂其擴展成本，有效率的獲取最佳能力集合擴展，提昇複合能力及擴展成本制訂的客觀性。除了上述關於能力集合擴展的發展以及應用，能力集合擴展概念也已被廣泛應用於各種議題，如多目標決策、交通運輸路徑、產品製造、專案管理等 (陳亭羽，2003；謝秉蓉，2004；胡宜中、邱榆淨，2005；Li, 1999; Shee, 2006)。

根據能力集合擴展應用的相關文獻得知，能力集合擴展適合各種具備次序限制特性的程序規劃模型。雖然過去只有 Lin (2006) 將能力集合擴展應用在生產程序規劃問題，並以啟發式演算法求解滿足成本與利潤目標的最佳生產程序；但由此文獻可知，

臺灣科學技術期刊資料庫

能力集合擴展運用在生產程序規劃上的可行性。本研究運用能力集合擴展的特點，提出三項生產程序規劃模型，首先是符合最小化擴展成本目標建構的單一產品之生產程序規劃模型；第二是以最大化合作利潤為目標的多廠合作之生產程序規劃模型；第三是以最大化生產程序技術水準為目標的生產程序規劃模型。並且，本研究提出生產程序規劃之多重解模型，可在不影響決策目標的條件下，提供替代方案，有效提昇生產程序規劃的彈性。透過以上模型可讓製造廠能夠以現有的核心生產程序技術為基礎，透過協調合作與技術整合研發符合產品製造需求的生產程序技術，選擇最佳的生產程序。

參、產品生產程序規劃模型

一、能力集合擴展基本定義

本研究延伸能力集合擴展概念，視一生產系統中所有技術為解決決策問題所需的能力集合，並將製造某項產品所需技術視為解決問題所需的目標能力，為達成生產該產品的目標，必須尋求最佳的產品生產程序擴展路徑。首先說明能力集合基本元素，能力集合包括 4 項基本元素 (Li, 1999)：

(1) T (The Required Competence Set)：目標能力集合。達成目標所需具備的必要能力集合；如為生產某產品或解決問題所需具備的技術、製程、知識或技能等。

(2) S (The Decision Maker's Acquired Skills or Competence Set)：本身所擁有的能力集合。如現有生產程序技術或資源。

(3) I (The Intermediate Skill Set)：中介能力集合。非必要取得能力，但可加速取得技能之中介能力集合。

(4) HD (Habitual Domains)：習慣領域。為達到生產目的或解決問題所需具備的所有可能之能力集合 (The Set of All Possible Skills) $HD = S \cup T \cup I$。

以推導圖的概念求解最佳化能力集合擴展路徑，可明確表達路徑選擇。推導圖基本定義包括：

定義 1. 透過本身擁有的能力集合 (S) 可取得達成目標所需具備的必要能力集合 (T)，取得成本為 $\min\{c(i, j),\ where\ i \in S\ and\ j \in T\}$。如圖 1 所示：

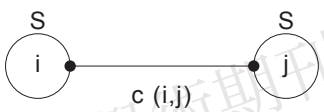


圖 1 能力的取得成本 (Li, 1999)

臺灣大學學術期刊資料庫

定義 2. 在推導圖中，*Bf*(*i*) 為在 *i* 節點之前的所有節點的集合；*Af*(*i*) 為在 *i* 節點之後的所有節點的集合。

Li 與 Yu (1994) 提出路徑非循環圖 (Acyclic Graph)，僅討論單向路徑，如圖 2 所示，*Bf*(*b*) = {*a*}, *Af*(*b*) = {*d*}。

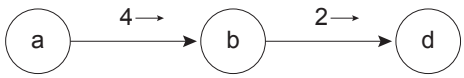


圖 2 路徑非循環圖 (Li & Yu, 1994)

為更符合實際問題，Li (1999) 便提出容許循環圖 (Cyclic Graph)，探討雙向路徑，如圖 3 所示，*Bf*(*b*) = *Af*(*b*) = {*a*,*d*}, *Bf*(*a*) = {*b*}。

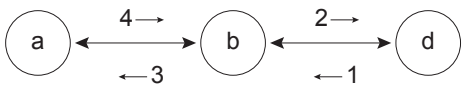


圖 3 路徑循環圖 (Li, 1999)

定義 3. 通常兩項能力之間的擴充成本是不會相等的，因此 Shi 與 Yu (1996) 提出非對稱的成本關係，$c(x_i, x_j) \neq c(x_j, x_i)$，更符合實際狀況，如圖 3 中 *c*(*a*,*b*) = 4, *c*(*b*,*a*) = 3。

定義 4. 複合節點 (Compound Node) 是包含一個以上單一能力的集合，亦可加速對於其他能力的取得。在圖形中，如果節點 i_0 可以被分解成 $\{i_1,...,i_k\}$，且每個被分解的節點 $i_t \in BF(i_0)$，並且和 i_0 之間必須以虛線 $r(i_t,i_0)$ 相連接，而虛線 $r(i_t,i_0) = 0$，表示彼此間是沒有成本的，則複合節點 $i_0 = i_l \hat{} ... \hat{} i_k$，如圖 4。

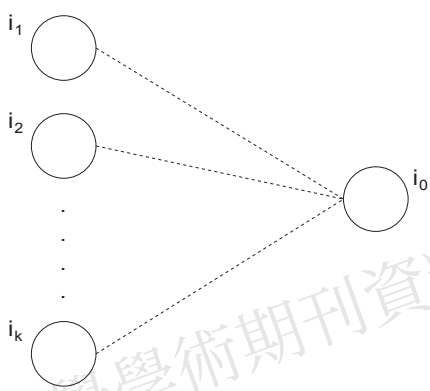


圖 4 複合節點 (Li & Yu, 1994)

臺灣大學學術期刊資料庫

定義 5. $G(S,T)$ 表示求解後所選擇之擴展路徑，令變數 u_i 為 0-1 變數，代表節點 i 是否存在於擴展路徑中；$v(i,j)$ 亦為 0-1 變數，表示是否選擇從節點 i 到節點 j 的路徑。故當 $v(i,j) = 1$，則 $u_i = u_j = 1$，表示路徑被選定時，路徑的起始點 i 和終點 j 也一定存在於擴展路徑中。則以下函數成立：

$$u_i = \begin{cases} 1, \text{ if } i \in G \\ 0, \text{ if } i \notin G \end{cases}, \quad v(i,j) = \begin{cases} 1, \text{ if } v(i,j) \in G \\ 0, \text{ if } v(i,j) \notin G \end{cases}。$$

二、單一產品之生產程序規劃模型

運用能力集合擴展的基本模型概念 (Li, 1999)，以成本最小化為目標建構生產程序規劃模型，解決單一產品的生產程序規劃問題，模型建構如下：

(Model 1)

$$\text{Minimize } Cost(S,T) = \sum_{r(i,j)\in G} c(i,j)\cdot v(i,j) \tag{1}$$

$$\text{subject to } u_i = 1, \text{ for all } i \in T, \tag{2}$$

$$\left[Af(i)\right] u_i \geq \sum_{j\in Af(i)} v(i,j), \quad \text{if } i \in S, \tag{3}$$

$$u_i \leq \sum_{j\in Bf(i)} v(j,i), \quad \text{if } i \notin S \text{ and } i \text{ is not a compound node}, \tag{4}$$

$$\left(\left[Af(i) + Bf(i)\right]\right) u_i \geq \sum_{j\in Bf(i)} v(j,i) + \sum_{j\in Af(j)} v(i,j), \quad \text{if } i \notin S, \tag{5}$$

$$\lambda_i = 0, \quad \text{if } i \in S, \tag{6}$$

$$\lambda_i - \lambda_j + mv(i,j) \leq m-1, \tag{7}$$

$$\text{for each node } i \text{ and } j \text{ is not a compound node},$$

$$u_i \leq \lambda_i \leq mu_i, \tag{8}$$

$$yu_i \leq \sum_{t=1}^{y} u_i, \tag{9}$$

$$\lambda_{i0} + m\left(y - \sum_{t=1}^{y} u_{i_t}\right) \geq \lambda_{it}, \text{ for } t = 1,2....,y, \tag{10}$$

其中，$\lambda_i \in$ 非負整數, $u_i, v(i,j) \in 0-1$變數 。

目標式 (1) 為求最小擴展成本，其中 $c(i,j)$ 為程序節點 i 到程序節點 j 的擴展成本，$v(i,j)$ 為 0-1 變數，判斷是否選擇此生產程序技術擴展路徑。限制式 (2) 為定義所有目標能力 (T) 必存在於路徑中；限制式 (3) 至 (5) 主要為定義程序節點個數與路徑關係，限制式 (4) 其中的程序節點 i 為非複合程序節點；限制式 (6) 至 (8) 主要為定義程序節

臺灣大學圖書館期刊資料庫

點間的順序關係，*m* 代表除起始點之外的程序節點個數；限制式 (9) 至 (10) 主要為定義複合程序節點的順序關係，*y* 代表複合程序節點之前的程序節點個數。

三、多廠合作之生產程序規劃模型

多廠合作之生產程序規劃模型為考量多廠生產策略，透過生產系統之間生產程序技術的整合，選擇最佳的生產程序，達成合作利潤最大化的目標。此模型應用混合能力集合擴展 (Expansion of Incorporating Competence Sets) 概念 (Li, 1999) 所建構，主要目的為提供多個決策者都能以最低的成本進行資源配置，達成合作利潤最大化的目標。基本定義如下：

定義 6. 當多個決策者 (*A*,*B*...) 共同合作時，其所有能力集合為

$$HD = S(A) \cup S(B) \cup T(A) \cup T(B) \cup I \text{ 。}$$

定義 7. 主要目標為「合作利潤最大化」，例如 : 決策者 A 生產 x 產品，決策者 B 生產 y 產品，整合二者能力集合進行資源整合，欲選其中一項產品生產，達成二者利潤最大化，其利潤函數為生產 x 產品或 y 產品的收益 $re(x \,\&\, y)$ 減共同生產 x 產品的成本 $c(S'(A) \cup S'(B), I) - c(I, x)$ 或共同生產 y 產品的成本 $c(S'(A) \cup S'(B), I) - c(I, y)$，其中 $S'(A)$ 及 $S'(B)$ 分別為由決策者 A 的所有能力集合 $S(A)$ 經擴展後獲得的能力集合 $S'(A)$ 與由決策者 B 的所有能力集合 $S(B)$ 經擴展後獲得的能力集合 $S'(B)$ 如圖 5。

$$\begin{aligned}\text{Benefit}(A \cup B) = \max \{ & re(x \,\&\, y) - c(S'(A) \cup S'(B), e) - c(e, x) - c(S'(A) \cup S'(B), f) \\ & - c(f, y), \text{ where } x \in T(A),\ y \in T(B),\ S'(A) \subset S(A),\ S'(B) \subset S(B), \\ & e, f \in I \}\end{aligned}$$

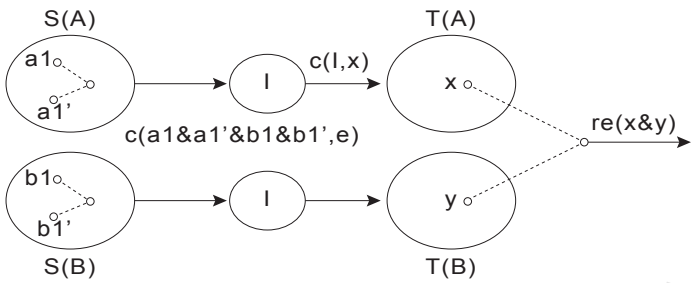


圖 5 混合能力集合 (Li, 1999)

定義 8. 當決策者 A 無向外購買任何技術，則本身的利潤函數為：

$$Benefit(A) = \max \{ re(x) - c(S(A), e) - c(e, x) \} \text{ 。}$$

臺灣大學學術期刊資料庫

多廠合作生產規劃模型可透過資源的整合或彼此生產程序技術的移轉，配合各生產系統之間的能力集合進行擴展，以合作利潤最大化為目標，獲取生產各目標產品所需的能力集合。多廠合作生產規劃模型及符號意義如下：

DM_l　　第 l 個廠區，l = 1,...,n；

$q(n)$　　第 n 組產品組合方案，n = 1,...,m；

$\theta^l = \{\theta^l_{q(1)}, \theta^l_{q(2)}, ..., \theta^l_{q(n)}\}$ 第 l 個廠區 (DM_l) 所有的產品組合方案組 q，θ^l_k 為 0-1 變數，每組 q 有 k 項組合策略，此廠區僅能選擇其中一項組合策略，故 $\sum_{k=1}^{q(l)} \theta^l_k = 1$；

$Budget_l$　　為一已知的常數，代表 DM_l 的預算上限；

$\mathrm{Re}\, v(k_l)$　　當 DM_l 選擇策略 k 所獲得的收益。

(Model 2)

$$Maximize \sum_{l=1}^{n}\left[\sum_{k_1=1}^{q(1)}\cdots\sum_{k_n=1}^{q(n)}\theta_{k_1,\ldots,k_n} * \mathrm{Re}\, v(k_l \mid k_1,\cdots,k_n) - Cost_l(S_l,T_l)\right], \tag{11}$$

$$\text{subject to } \theta_{k_1},\ldots,\theta_{k_n} \le \theta_{k_l}, (l = 1,\ldots,n), \tag{12}$$

$$Cost_l(S_l,T_l) \le Budget_l, \tag{13}$$

$$[Bf(k)]\theta^l_k \le \sum_{k_1 \in Bf(k)} u_{k_1}, \tag{14}$$

$$u_i \le \sum_{j \in Bf(i)} v(j,i) + \sum_{l \in Bf(i)} v(DM_l,i), \tag{15}$$

以及 Model 1 中的限制式 (3) 及限制式 (5) 至 (10)。

目標式 (11) 求解合作利潤最大化，限制式 (12) 確認各產品組合方案中，僅能選擇其中一組方案進行生產；限制式 (13) 定義擴展成本不可超過預算限制；限制式 (14) 定義當 DM_l 選擇策略 k，則目標能力集合必須滿足策略 k；限制式 (15) 定義自有與外購的生產技術，除現有生產技術還需加入從其它廠區所取得的生產技術，$v(DM_l,i)$ 為 0-1 變數，當 $v(DM_l,i) = 1$ 時，表示此程序節點 i 是從 DM_i 所取得的生產技術。限制式 (3) 及限制式 (5) 至 (10) 根據 Model 1 而來，定義程序節點之間的關係以達成模型的完整性。

四、技術水準最佳化之生產程序規劃模型

技術水準最佳化之生產程序規劃模型，以生產技術水準最大化為目標選擇最佳的產品生產程序。此模型應用多階能力集合擴展 (Expansion of Multilevel Competence Sets) 概念 (Li & Yu, 1994) 所發展，主要處理不同程度區別的生產技術擴展，滿足預算

臺灣大學圖書館期刊資料庫

條件下取得最高技術水準。基本定義如下：

定義 9. 程度指數的能力集合為 $\gamma(T_k)=\min\{\mu_i(e_i), i=1,\cdots,n\}$。

當 T^k 為有程度高低之能力集合，則 $T^k=(e_1,\cdots,e_n), e_i\in L_i, i=1,\cdots,n$。

L_i 表示此能力可接受的程度指數，例如：某能力 g 程度水準可分為三個等級：g_1（普通），g_2（良好），g_3（優良），則 $L_g=\{g_1,g_2,g_3\}$。根據模糊理論之歸屬函數 (Membership Function) 概念量化能力的程度指數，因此程度指數的能力集合為 $\gamma(T^k)=\gamma(\mu_1(e_i),\cdots,\mu_n(e_n))$，$\gamma$ 為一單調非遞減函數 (Monotonic Nondecreasing Function)，依據歸屬函數定理中之結合率 (Aggregation Condition)，則 $\gamma(T_k)=\min\{\mu_i(e_i), i=1,\cdots,n\}$，$\mu_i$ 表示能力係數，$0\le\mu_i\le 1$，若此能力無程度上差別，僅有取得與否的考量，則其能力程度指數為 1。

定義 10. 能力程度指數為 $\mu_i(e_i)=\sum_{k\in\phi_i}\mu_i(k)\cdot u_k$。已知目標能力集合 T^k 其所對應的變數 u_i 及 $v(i,j)$ 為 0-1 變數，則 $\sum_{k\in\phi_i}u_k=1$，$u_k=\begin{cases}1, & if\ k=e_i\\ 0, & if\ k\neq e_i\end{cases}$，滿足推導圖中只能選擇其中一項程度之能力；因此，各能力程度指數為 $\mu_i(e_i)=\sum_{k\in L_i}\mu_i(k)\cdot u_k$。

考量製造廠的生產程序技術的水準不同，所建構的技術水準最大化之生產程序規劃模型為：

(Model 3)

$$Maximize\ W \tag{16}$$

$$\text{Subject to } W\le\sum_{k\in L_i}\mu_i(k)u_k, \tag{17}$$

$$\sum_{v(i,j)\in G}c(i,j)v(i,j)\le budget, \tag{18}$$

以及 Model 1 中的限制式 (2) 至 (10)。

目標式 (16) 以技術水準 (W) 最大化為目標，選擇最佳生產程序。限制式 (17) 依據定義 10，各項程度能力集合，僅能選擇其中一項程度的能力；限制式 (18) 定義擴展成本必須低於預算；以及 Model 1 中的限制式 (2) 至 (10)，定義程序節點之間的關係以達成模型的完整性。

臺灣大學學術期刊資料庫

五、生產程序規劃多重解模型

生產程序規劃多重解模型，依據以上所有生產程序規劃模型定義，在不影響目標函數前提下，求取所有可替代的最佳解方案，達成提昇生產程序彈性的目的。所有的生產程序規劃模型皆為包含整數及 0-1 變數的整數線性規劃，因此，可依據 Tsai、Lin 與 Hu (2008) 提出的整數線性規劃多重解模型，求取生產程序規劃模型之所有最佳解方案。

(Model 4)

$$Minimize\ f(X)\ , \tag{19}$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^{n}\left|x_i - x_i^t\right| \geq 1\ , t=1,\cdots,T-1, \tag{20}$$

$$g_k(X) \leq 0, k=1,2,....K, \tag{21}$$

$$X=(x_1,....,x_n),\ x_i \in \{0,1\}\ for 1 \leq i \leq m,\ x_i \in Z, for\ m+1 \leq i \leq n, \tag{22}$$

$$0 \leq \underline{x}_i \leq x_i \leq \overline{x},\ \ i=m+1,m+2,....n, \tag{23}$$

其中，f 及 $g_k \in$ 線性函數，$\overline{x}$ 及 $\underline{x}$ 分別為整數變數 x_i 的上界及下界。

限制式 (20) 當中 $x_1^1,....,x_i^t$ 為第 t 組最佳解，當 t = 1 時，則透過 $\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - x_i^t\right| \geq 1$ 取得不同的替代解，如此反覆 t 次，直到所得之目標函數值改變則停止，即可得到所有可替代的最佳解。

以上所探討三項生產程序規劃模型 Model 1-3，試圖讓製造廠能夠以現有的核心生產程序技術為基礎，透過協調合作與技術整合，選擇最佳的生產程序，三項模型分別適用於不同情境，三項生產程序規劃模型的比較列示於表 2，由表 2 可知 Model 2 與 Model 3 是 Model 1 的延伸模式，為清楚說明本研究所討論之三項模型所適用之情境，本文並未將三項模型再延伸至多目標的生產程序規劃問題，未來研究可進一步探討利潤、成本與風險等各種多目標的問題。

臺灣大學學術期刊資料庫

表 2 生產程序規劃模型的比較

模型名稱	單一產品之生產程序規劃模型	多廠合作之生產程序規劃模型	技術水準最佳化之生產程序規劃模型
決策目標	成本最小化	合作利益最大化	技術水準最大化
輸入參數	a、既有的生產技術 b、目標生產技術 c、生產技術的次序 d、兩項能力或技術之間的擴充成本	・ 廠商數量 ・ 產品組合別 ・ 產品組合收益 ・ 技術移轉成本 ・ 技術擴展成本預算 以及 a,b,c,d	・ 生產技術之程度係數 ・ 技術擴展成本預算 以及 a,b,c,d
適用情境	單一產品以及單一廠商	各廠具備相似生產技術，並考慮多廠合作製造同質性產品	生產技術有程度分別以及高度技術需求的單一廠商

肆、範例說明

根據上述所建構的三項生產程序規劃模型，在此提出三個應用範例，呈現三個生產程序規劃模型的適用情境，並運用多重解模型分別分析與驗證各應用情境的替代方案，而為了說明啟發式方法與確定性方法的求解差異，也進一步運用基因演算法分別求解三個範例並比較其結果。範例一為單一產品的產品生產程序規劃，運用成本最小化之生產程序規劃模型，以最小成本的生產程序技術找出最佳的生產程序；範例二為三家子工廠欲進行產品規劃，透過跨廠區的生產程序整合，選擇一項使合作利潤最大的產品組合進行生產，運用多廠合作之生產程序規劃模型求解合作利潤最大之最佳產品組合及生產程序；範例一及範例二的修改自於 Li (1999) 文章中的範例。範例三修改自 Li 與 Yu (1994) 文章中的範例，運用技術水準最佳化之生產程序規劃模型取得成本預算內最高階的生產程序技術水準。

一、範例一

假設某製造商計劃生產一項產品，欲以現有生產程序技術為基礎經由擴展，發展新產品所需的生產程序技術；為生產此產品，生產程序須具備 g、h 兩項生產程序技術 ($T = \{g,h\}$)，本公司現有之生產程序技術為 a、b、d ($S = \{a,b,d\}$)。已知製造商可經由 $\{a,b,c,d,e,f\}$ 生產程序技術的擴展，獲得 g、h 兩項生產程序技術，然後依據最小擴展成本目標，選擇最佳的生產程序。表 3 為擴展各生產程序技術所需之成本，* 表示公司現有之生產程序技術，c (a,c) = 2 表示由 a 程序去完成 c 程序需花費 2 單位的成本，且 a 程序無法直接完成 b,d,e 及 h 程序；其中，a^b 及 e^f 為複合節點，表示同時具備 a 及 b (e 及 f) 程序時，可以較低的擴展成本來完成 c、f 或 g (g 或 h) 程序，藉由表 3 可轉換成為圖 6 的推導圖。

臺灣大學學術期刊資料庫

表 3 各生產程序技術之擴展成本

$c(i,j)$	c	e	f	g	h
a^*	2		3	4	
b^*	2				
c		3			
$a\hat{}b$	1.4		2.5	3.5	
d^*		4	1.8		
e	1				4
f				2	
$e\hat{}f$				1.5	1.5
g			1		2
h		2		1	

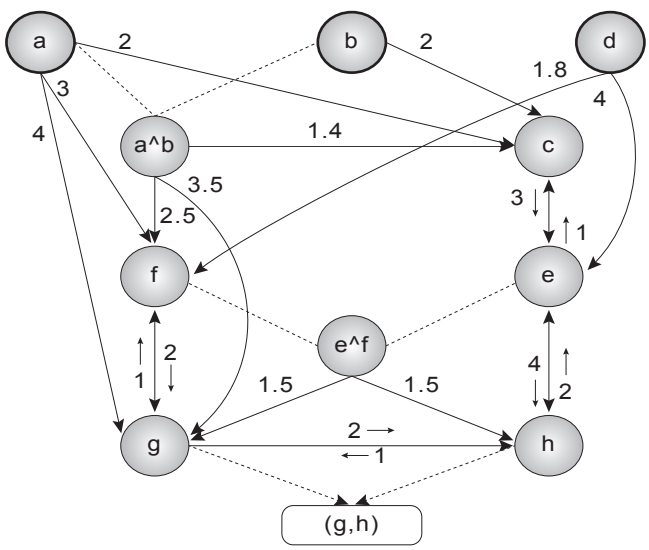


圖 6 生產程序技術擴展推導圖

依據單一產品之生產程序規劃模型 (Model 1)，運用 Lingo 數學運算軟體求解模型，所得最小擴展成本為 5.5 單位，獲得最佳的生產程序為 $T^*=\{a,b,a\hat{}b,g,h\}$。生產程序擴展路徑包括 $v(a\hat{}b,g),v(g,h)$，製造商可整合生產程序技術 a 與 b，以複合程序 $a\hat{}b$ 為起始的生產程序，接著進行程序 g，完成程序 g 後進行最後的程序 h，完成產品生產程序。因此，製造商的最佳生產程序如圖 7。另外，經過多重解模型驗證後得知此解已為最佳解，在最小成本 5.5 單位情況下，並無可替代的生產程序。

臺灣大學學術期刊資料庫

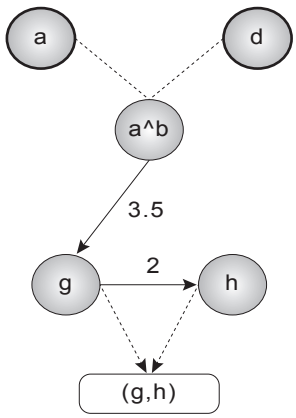


圖 7 最佳生產程序

二、範例二

某電子零件製造商旗下擁有三間子工廠 A、B、C，皆生產具有高度同質性的產品。三間子工廠欲進行生產規劃，期望透過跨廠區的製程整合，降低各廠產能的閒置或不足，降低製造成本，選擇共同利潤最大的產品組合進行生產並找出各自最佳的生產程序，達成合作利潤最大化的目標。

首先，A、B、C 廠區各自提出生產計劃，如表 4 所示。各廠區根據各種產品組合估計可能獲得之報酬矩陣，其收益分配如表 5 所示。由表 5 可知，當 A 廠區生產 X1，B 廠區生產 Y1，C 廠區生產 Z2 時，其收益分別為 7,6.5,10 單位。

表 4 A、B、C 三家子工廠生產計劃

工廠	生產計劃		
A 廠區	X1：示波器	X2：電容表	X3：變壓器
B 廠區	Y1：電容表	Y2：電源濾波器	
C 廠區	Z1：示波器	Z2：電源供應器	

表 5 產品收益分配表

Z1	X1	X2	X3
Y1	8, 7.5, 8	12, 6, 6	8, 7, 7.5
Y2	8, 10 , 8	11, 11.5, 6	7, 9, 5
Z2	X1	X2	X3
Y1	7, 6.5, 10	8, 7.5, 9	6.5, 7, 10.5
Y2	7, 9, 9.5	8, 8, 8	6, 9, 10

臺灣大學學術期刊資料庫

表 6　各產品之目標生產程序技術

		生產程序技術需求													
廠區	產品	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*	*l*	*m*	*n*
A	X1			1			1	1							
	X2			1	1	1		1	1						
	X3						1	1							
B	Y1		1			1					1				
	Y2				1					1		1			
C	Z1					1							1		1
	Z2			1										1	1

（“1”表必須完成之生產程序技術項目）

表 7　各廠區既有之生產技術

廠區	生產技術				
	a	*b*	*c*	*d*	*e*
A	1	1		1	
B	1	1	1		1
C	1	1		1	

（“1”表擁有）

表 8　生產技術移轉成本

廠區	*c*	*d*	*e*
A		1.5	
B	1.2		7
C		5	

各廠區為生產其產品所需具備生產技術為 *a*,*b*,*c*,...,*n*，如表 6 所示；其中，A 廠區生產產品 X1 最終必須以 *c*,*f*,*g* 此三項生產程序完成產品生產。各廠區除本身既有生產技術之外 (如表 7)，亦可將本身之生產技術移轉至其他廠區，如：A 廠區本身擁有生產技術 d，B、C 廠區可將生產技術 *d* 以 1.5 單位的成本取得。移轉成本列於表 8。A、B、C 廠區的生產程序技術擴展圖，如圖 8-10。

臺灣大學學術期刊資料庫

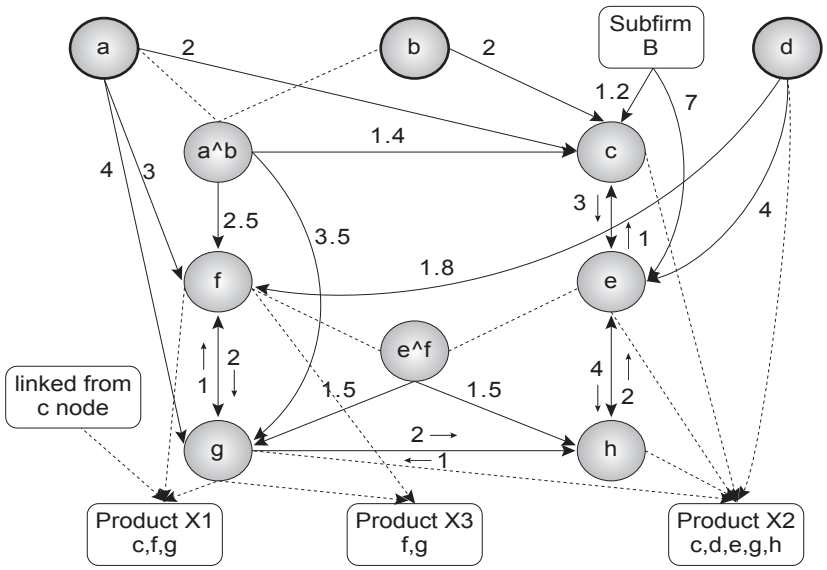


圖 8 A 廠區的生產程序技術推導圖

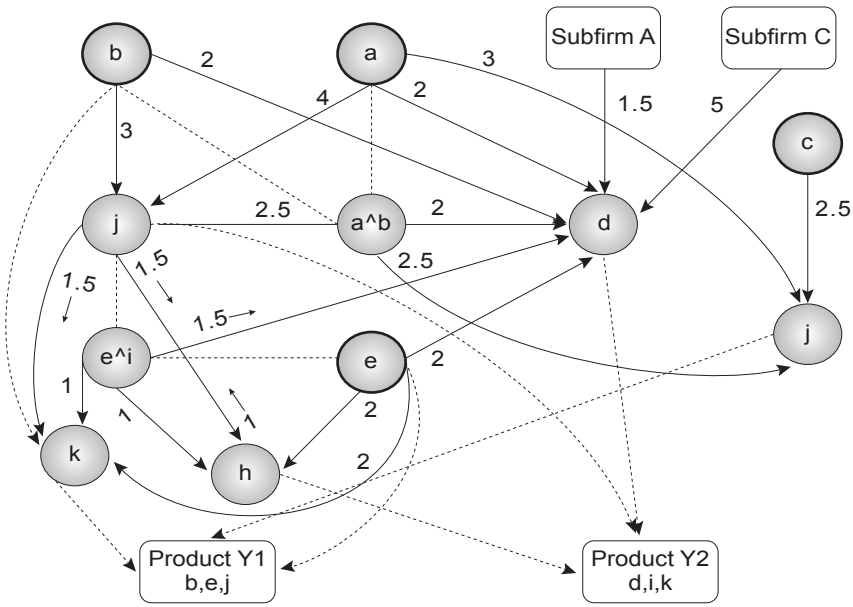


圖 9 B 廠區的生產程序技術推導圖

臺灣大學學術期刊資料庫

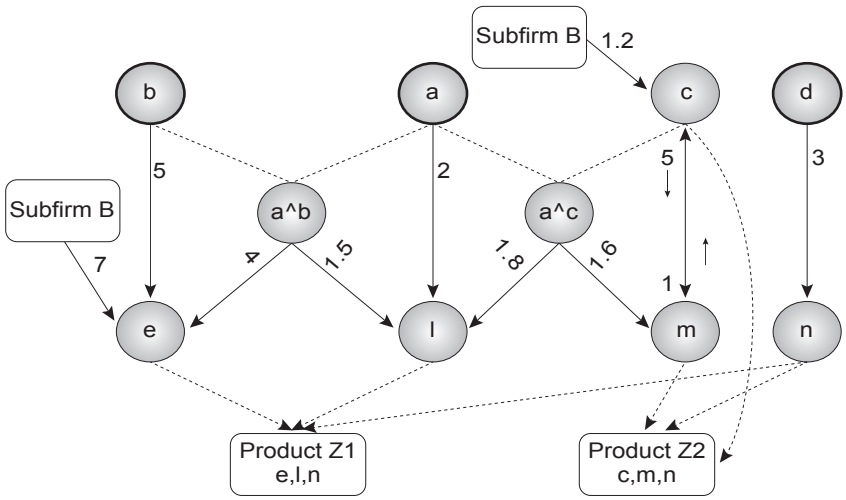


圖 10 C 廠區的生產程序技術推導圖

A、B、C 三家工廠的生產預算上限各為 6 個單位成本，各廠區希望在預算許可範圍內找出最佳的生產程序以及合作利潤最大的產品組合。依據多廠合作之生產程序規劃模型 (Model 2) 求解此生產程序規劃問題。所得結果為 A 廠區選擇生產變壓器 (X3)，B 廠區選擇生產電容表 (Y1)，C 廠區選擇生產電源供應器 (Z2)，A、B、C 三家工廠最佳產品生產程序如圖 11-13。

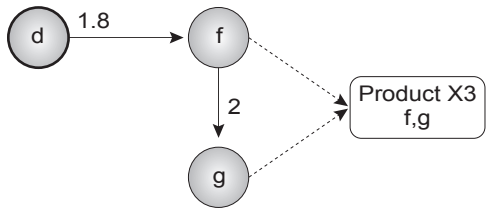


圖 11 A 廠區最佳產品生產程序

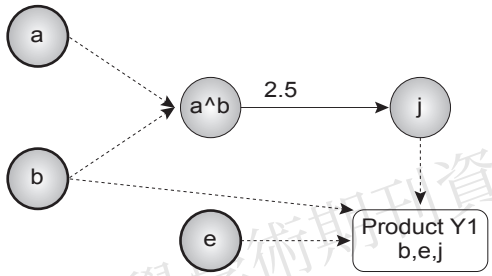


圖 12 B 廠區最佳產品生產程序

臺灣人學術期刊資料庫

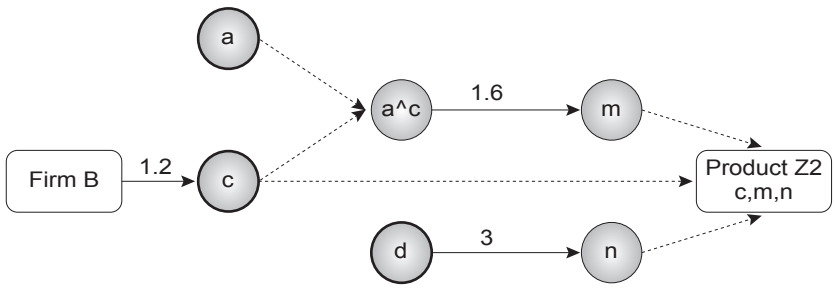


圖 13 C 廠區最佳產品生產程序

A、B、C 三家工廠最佳的生產計劃結果如表 9，A 廠區以 3.8 單位成本來生產 X3 產品，預期收益為 6.5 單位，可為 A 廠區創造 2.7 單位的利潤。B 廠區以 2.5 單位成本來生產 Y1 產品，預期收益為 7 單位，可為 B 廠區創造 4.5 單位的利潤。C 廠區由於整合產品生產技術 *a* 與 *c* 來擴展至產品生產技術 *m*，因此需額外以 1.2 個單位的成本向 B 廠區取得生產技術 *c*，才能以 5.8 個單位成本來生產 *Z*2 產品，預期收益為 10.5 單位，可為 C 廠區創造 4.7 單位的利潤。

目標值最大合作利潤為：

總收益【(X3, Y1, *Z*2) = (6.5, 7, 10.5) = 24 單位】－總成本【(X3,Y1 ,*Z*2) = (3.8, 2.5, 5.8) = 12.1 單位】= 11.9 個利潤單位。

表 9 最佳生產計劃

	A	B	C
生產計劃	X3：變壓器	Y1：電容表	Z2：電源供應器
所需技術	{*f*,*g*}	{*b*,*e*,*j*}	{*c*,*m*,*n*}
自行研發之技術成本	{*f*,*g*} = 3.8	{*b*,*e*,*j*} = 2.5	{*m*,*n*} = 4.6
向外取得之技術成本			*B*{*c*} = 1.2
預期收益	6.5	7	10.5
生產成本	3.8	2.5	5.8
利潤	2.7	4.5	4.7

透過以上的範例說明可以得知，各子工廠可發揮自己的核心生產技術，並與其他廠區充分合作，有效降低生產成本，創造出更高的附加價值。進一步運用產品生產程序規劃多重解模型 (Model 4) 驗證產品生產程序是否存在多重解，驗證結果得知在成本與合作利潤不變情況下，B 廠區存在可替代的產品生產程序如圖 14，當複合生產技

臺灣大學圖書館

術 a^b 不敷使用或故障時，則提供 B 廠區可採用的替代生產技術，避免生產線中斷問題產生。

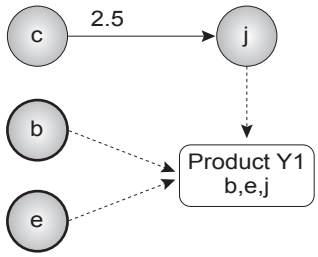


圖 14 B 廠區之產品生產程序替代解

三、範例三

範例三考量生產系統具備不同生產技術水準，運用技術水準最佳化之生產程序規劃模型獲取得預算內最大的生產技術水準。假設某製造商生產產品之目標生產程序技術有七項，故 $T=\{a,b,c,d,e,f,g,h\}$。其中，生產技術 g 及生產技術 h 皆有程度上的區別，生產技術 g 可分為三個等級：低階 (g_1)、中階 (g_2)、高階 (g_3)，$\phi_g=\{g_1,g_2,g_3\}$，能力係數分別為 0.5,0.8,1；生產技術 h 亦分為兩個等級：低階 (h_1)、高階 (h_2)，$\phi_h=\{h_1,h_2\}$，能力係數分別為 0.4 與 1。此外，a^b 為複合能力，代表若同時擁有生產技術 a 及 b，能以較低的成本取得 d,e,f,g 生產技術。假設廠內現有生產技術為 a,b,c 三項生產技術 $(S=\{a,b,c\})$，生產程序技術擴展成本如圖 15。

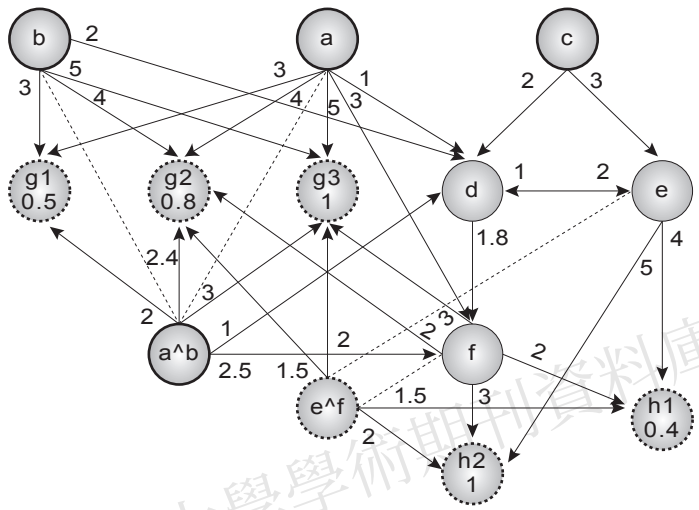


圖 15 不同技術水準之生產程序技術推導圖

臺灣大學學術期刊資料庫

此例之生產程序技術擴展成本預算為 8 單位，在預算許可範圍內取得最大的生產技術水準及最佳生產程序。在 8 單位成本預算的條件下，依據技術水準最佳化之生產程序規劃模型 (Model 3)，獲得目標生產程序技術 T* = $\{a,b,c,d,e,f,g_3,h_2\}$ 之擴展成本為 7.8 單位，於多階生產技術方面皆採用最高階 (g_3h_2) 之生產技術，最佳產品生產程序如圖 16。

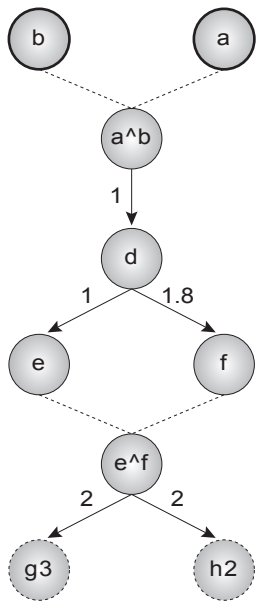


圖 16　最佳產品生產程序

本研究以生產程序規劃多重解模型 (Model 4) 驗證後，得知在生產技術擴展成本為 7.8 單位情況下無可替代的生產程序技術。另外，考量不同生產技術水準往往受到內外部因素影響，為因應生產技術變動或不足，因此，運用多重解模型求解次級生產技術之製造程序，得知在採取生產技術 (h_1) 的情況下，生產技術擴展成本為 7.3 單位下存在 T* = $\{a,b,c,d,e,f,g_3,h_1\}$ 和 T* = $\{a,b,c,d,e,f,g_1,h_1\}$ 二組可替代的生產程序，可採取不同程度之生產技術，提供廠區在高階生產技術 (g_3) 或 (h_2) 不足情況下的可替代方案，分別如圖 17 和圖 18 所示。

臺灣大學學術期刊資料庫

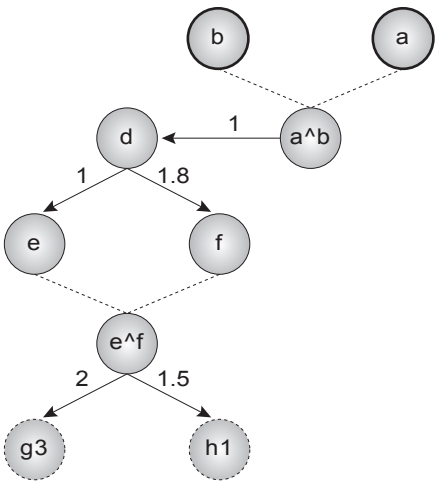


圖 17 次級生產技術之替代生產程序

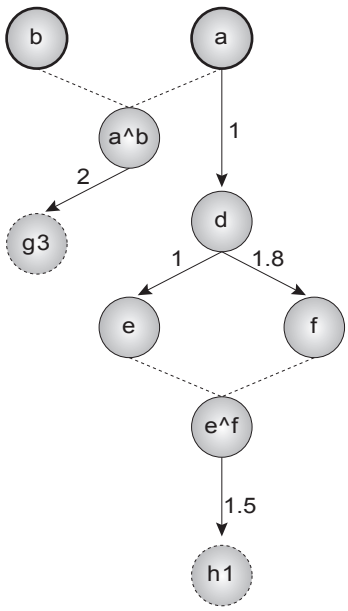


圖 18 次級生產技術之替代生產程序

透過本研究所提出的所有生產程序規劃模型，獲得上述生產程序規劃問題的多重解，可提供製造商在不同的生產技術水準情況下，因應生產技術變動而選擇其他生產技術水準的替代方案來生產產品，並透過所求得之多組最佳解提供製造商因應變動條件選擇一組最適方案，使本研究所提出之生產程序規劃模型具備良好的使用彈性，以適應快速變化的市場環境。

四、以基因演算法求解

本研究將三個生產程序規劃範例運用基因演算法求解，表 10 列示基因演算法與確定性最佳化方法求解結果，比較結果顯示對於同一個問題於同一個電腦平台計算結果，採用數學規劃法之求解結果與求解時間皆優於基因演算法。由於此三個範例所建構的模式不屬於大規模的混合整數規劃問題，所以可運用數學規劃法於合理時間內求得一全域最佳解；而為了使基因演算法能收斂到一可行解，相對花費較多的時間，三個範例運用基因演算法求解過程之收斂狀況與結果如圖 19-21。

臺灣大學學術期刊資料庫

表 10　數學規劃法與基因演算法求解結果比較

	數學規劃法			基因演算法		
	範例一	範例二	範例三	範例一	範例二	範例三
目標函數	最小化擴展成本	最大化合作利潤	最大化生產技術水準	最小化擴展成本	最大化合作利潤	最大化生產技術水準
目標值	5.5	11.9	1	7.5	10.8	0.6
求解時間	00:00:01	00:00:03	00:00:01	00:00:05	00:00:11	00:00:06
推導圖	圖 7	圖 11-13	圖 16	圖 19	圖 20	圖 21

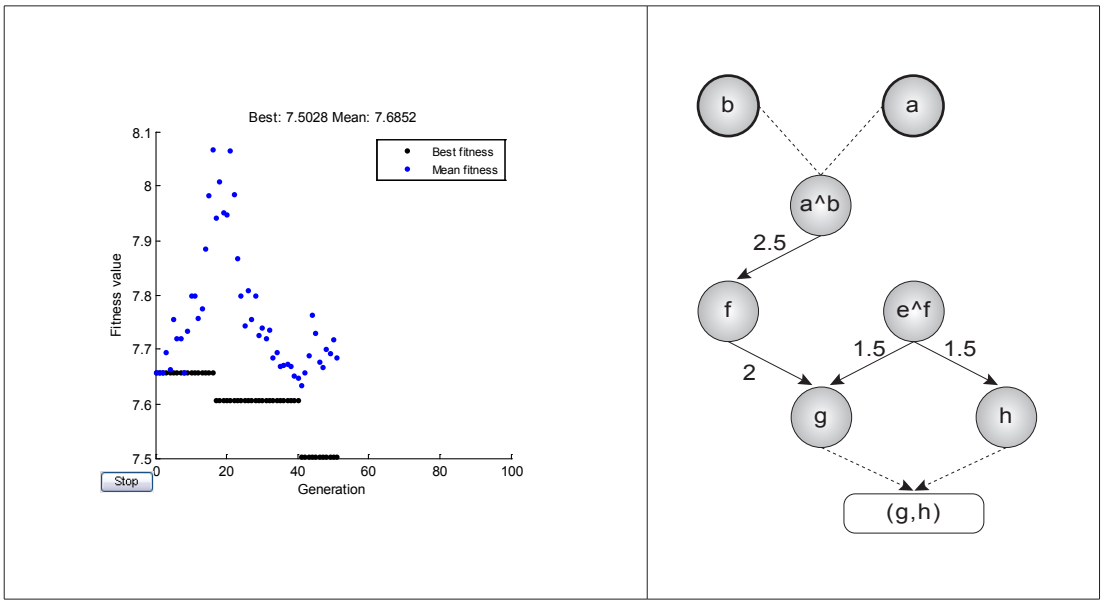


圖 19 範例一結果

臺灣大學學術期刊資料庫

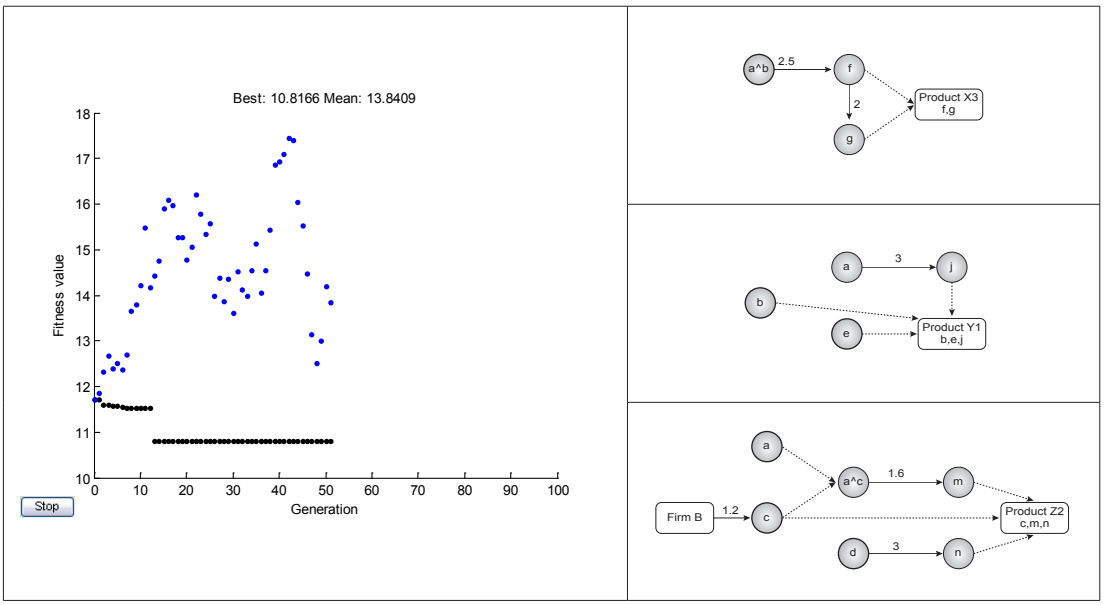


圖 20 範例二結果

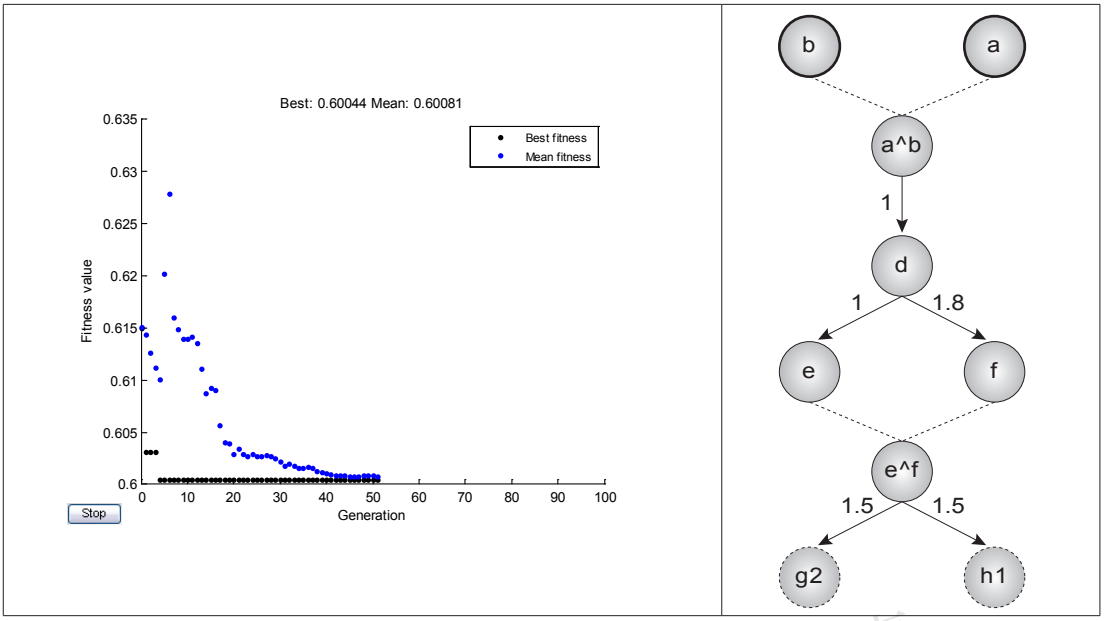


圖 21 範例三結果

根據兩種方法計算結果與所對應的推導圖可比較得知，圖 19 範例一結果中多了 {*f*, *e^f*} 擴展路徑，使得目標值比圖 7 的結果高了 2 單位擴展成本。圖 20 範例二結果中，產品組合為 (X3,Y1,Z2) 與圖 11-13 顯示的結果相同，唯 A 廠區生產程序由 {*d*, *f*, *g*} 改

臺灣人學產業資料庫

變為 {*a*^*b*, *f*, *g*} 與 B 廠區生產程序由 {*a*^*b*, *e*, *j*} 改變為 {*a*, *b*, *e*, *j*}，因此目標值最大合作利潤由 11.9 降為 10.8。最後，在圖 21 範例三結果當中，生產程序與圖 16 的結果相同，唯多階生產技術方面由最高階 (g_3, h_2) 之生產技術改變為次級 (g_2, h_1) 之生產技術，能力係數分別為 0.8 與 0.4，基因演算法求解結果之目標值為能力係數之平均值 0.6。透過以上比較結果可知，本研究所提出的三種生產程序規劃模型可用數學規劃法或基因演算法求解並於有限時間內求得解答，而數學規劃法的求解品質優於基因演算法。

伍、結論

本研究提出技術導向的生產程序規劃模型，因應廠商生產程序技術研發的需求，以生產程序技術觀點為主軸，考量生產技術水準與多廠生產策略因素，建構三項生產程序規劃模型：單一產品之生產程序規劃模型、多廠合作之生產程序規劃模型以及技術水準最佳化之生產程序規劃模型；讓製造廠能夠以現有的核心生產程序技術為基礎，透過協調合作與技術整合，取得符合產品製造需求的生產程序技術，選擇最佳生產程序。並且，為因應市場與生產程序技術的變動，本研究提出生產程序規劃之多重解模型，可在不影響決策目標的條件下，提供替代方案，有效提昇生產程序規劃模型的應用彈性。經過範例驗證三項生產程序規劃模型，在運算方面，以數學規劃方式建構模型，可有效求得全域最佳解；在程序決策方面，其技術擴展程序化的特點，可清楚表達生產程序技術間的次序關係，並透過推導圖呈現所得之結果，使最佳生產程序能詳細展現擴展路徑；而所有最佳替代解之取得可有效因應生產技術或市場變動之不確定因素，提昇生產程序規劃上的彈性。本研究中假設能力或技術水準可量化且並未同時考量技術水準與成本的多目標問題，未來可繼續探討考量利潤、成本與風險等各種多目標的問題並進一步考量能力集合中之技術水準的衡量方式，建構更完備的模型。

臺灣大學學術期刊資料庫

Competence Set Expansion for Production Process Planning

Jung-Fa Tsai, Professor, Department of Business Management, National Taipei University of Technology

Pei-Chun Wang, Post-Doctoral Research, Graduate Institute of Industrial and Business Management, National Taipei University of Technology

Wan-Ling Tsai, Master, Department of Business Management, National Taipei University of Technology

Introduction

A competence set is an accumulation of ideas, knowledge, information, and skills (Li, 1999; Shi & Yu, 1999). Optimal competence set expansion aims to analyze how to facilitate a decision maker, given an acquired competence set, and to effectively reach a new competence set and thus resolve a decision problem.

The competence set expansion enables participants with different manufacturing skills, resources, and competencies to exchange and learn manufacturing skills from each other. The applications of competence set expansion include operations management, information management, marketing, project management, and strategic alliance analysis (Chen, 2002; Hu & Chiu, 2005; Shee, 2006; Chiang & Tzeng, 2001; Hsieh, 2004).

Production process planning problems focus on effectively allocating resources and selecting an optimal production process capability and manufacturing resources limitations. The related research topics include integrated process planning, scheduling (IPPS) and computer-aided process planning (CAPP). For example, Li and McMahon (2007) presented a simulated annealing-based optimization approach for solving IPPS problems, and Moon et al. (2008) discussed the IPPS problem in a supply chain. Guo et al. (2009) and Li et al. (2010) also proposed a particle swam optimization approach and an evolutionary algorithm-based approach, respectively for IPPS problems. Joo et al. (2001) used neural network techniques to treat adaptive and dynamic process planning problems. Sankar et al. (2008) proposed a CAPP framework with optimized process parameters for rational components. Woo et al. (2008) proposed a heuristic methodology to facilitate the evolution and evaluation of process plans for distributed manufacturing facilities. Mojtaba and Reza (2010) applied genetic algorithms to CAPP such that the feasible sequences of operations are generated in the preliminary stage, while the optimized operations sequence, the optimized selection of the machine, cutting tool, and tool access direction for each operation are obtained in the detailed planning stage.

The purpose of this study is to utilize competence set expansion to solve production process planning problems by treating all production skills as the competence set of the

臺灣大學學術期刊資料庫

production system. This study also explores ways to optimize the cooperative solution of production process planning by expanding competence sets for multi-plant production and multi-level skill production problems. The participants with different skills, resources, and competencies can exchange and learn skills from each other so that the competence sets of the participants can be expanded, and thus solve the problem for achieving specific objective of the whole group. According to different objectives, three models are formulated, such as manufacturing cost minimization model, production collaboration model of multi-plant facility, and multi-level skill model of manufacturing process optimization. Furthermore, multiple solutions with the same objective value of the problems are derived to find out all manufacturing processes. The research results reveal that the proposed method can effectively solve the production process planning problems and get all optimal production processes. The deduction graph also enhances the applicability of the presented method. Moreover, several examples are used to illustrate the correctness and usefulness of the proposed methods.

Methodology

Based on the concept of competence set expansion, this study constructs three models for solving production process planning problems according to different objectives, such as manufacturing cost minimization, production collaboration of multi-plant facility, and multi-level skill of manufacturing process optimization. The techniques from Tsai et al. (2008) are used to find out all alternative optimal solutions. Moreover, the deduction graphs proposed by Li and Yu (1994) are utilized to illustrate the expansion process. The optimal expansion process obtained from the acquired competence set can be described as follows.

Let $HD = S \cup T \cup C \cup I$, where *HD* (Habitual Domains) is the set of skills related to solving a particular problem, S denotes the already acquired competence set. T denotes the true required competence set for solving the problem. I denotes the set of all intermediate skills, and C denotes the set of all compound skills. Let $G(S, T)$ be the graph formed by all nodes or skills in HD and their directed arcs including the arcs among the compound nodes and their single nodes. Given a node i in a graph, the arc connecting j from i is denoted by $r(i, j)$, and the corresponding cost of reaching j from i is denoted by $c(i, j)$. Therefore, the optimal expansion process can be obtained by equation $\min\{c(i, j), \textit{where } i \in S \textit{ and } j \in T\}$.

First, the model for finding an optimal expansion process of competence sets, aimed for production process planning of single product in minimal cost, is formulated as a mixed-

臺灣大學管理學院期刊資料庫

integer programming problem. Next, a production collaboration model of multi-plant facility is constructed. The objective of this model is to select an optimal combination of strategies for maximizing total benefit of all cooperative firms. A multi-level skill model of manufacturing process optimization is then discussed. The objective of the multi-level skill model is to plan an optimal manufacturing process for maximizing skill level subject to the budget constraint. Finally, the model for finding multiple solutions of production process planning is presented to find out all alternative manufacturing processes. In practice, alternative optima are useful since they allow a decision maker to choose from multiple solutions without experiencing any deterioration in the objective function (Tsai et al., 2008). It means that alternative optima enhance the flexibility of decision making and allow a decision maker to choose an ideal strategy from those alternative optimal solutions according to management and organizational concerns.

Findings

Three examples modified from the literature are used to demonstrate the capability of the proposed method. Example1 illustrates that a manufacturer produces a product, and the objective of the manufacturer is, by expanding acquired manufacturing techniques and minimize the expansion cost, to obtain new techniques for producing the product. Example 2 is a three plants production planning problem. The problem assumes that three plants cooperate to produce a set of products. All plants in the alliance plan to effectively collaborate by exchanging and learning skills for maximizing their total profit. Example 3 illustrates how to utilize multi-level skill optimization model to obtain optimal production process with maximal skill level. In practice, skills can be classified into different levels of proficiency and this situation should be considered in competence set analysis. The three examples mentioned above are solved by using the mathematical programming techniques and genetic algorithms. Since the formulated models are mixed-integer linear programs, the global solutions can be found by using the optimization software LINGO. Although these models can be solved by using genetic algorithms, the solutions obtained cannot guarantee to be optimal. The computational results reveal that the solution quality of the proposed method is better than genetic algorithms and the comparison results are listed in Table 1. From Table 1, we know that the objective values obtained by the proposed models are better than those obtained by genetic algorithms. The computational time needed for solving the proposed models is slightly shorter than that for genetic algorithms in these three examples.

臺灣大學學術期刊資料庫

Table 1 The comparison results of the proposed models and genetic algorithms

	Proposed models			Genetic algorithms		
	Example 1	Example 2	Example 3	Example 1	Example 2	Example 3
Objective function	cost minimization	total profit maximization	level of skills maximization	cost minimization	total profit maximization	level of skills maximization
Objective value	5.5	11.9	1	7.5	10.8	0.6
CPU time	00:00:01	00:00:03	00:00:01	00:00:05	00:00:11	00:00:06

Research Limitations and Suggestions

Although the proposed model seems promising in applying competence set expansion to solve production process planning problems, and the obtained solution is also a global optimum, formulating the models manually is in fact very time consuming and error-prone. Further studies may design a system to generate the models automatically and examine whether a simplified version of the proposed models with fewer binary variables is existent so that it can improve computational efficiency in solving large-scale problems. Future studies may also consider applying the proposed models to other real-world applications such as supply chain management or human resource management.

Contributions

The main contributions of this study include applying competence set expansion to solve production process planning problems, obtaining multiple optimal solutions of the constructed models, and visualizing the obtained results by deduction graphs. The research results reveal that the proposed method can effectively solve the production process planning problems and get all optimal production processes. The presented multiple solutions for the optimal competence set expansion model can facilitate the selection of a solution that improves adaptability and flexibility of the competence set expansion. The deduction graph also enhances the applicability of the presented method. Moreover, several examples are used to illustrate the correctness and usefulness of the proposed methods.

臺灣大學學術期刊資料庫

參考文獻

胡宜中、邱榆淨，2005，「使用能力集合擴展決定專案中子系統開發之優先順序」，臺大管理論叢，16 卷 1 期：頁 21-40。(Hu, Yi-Chung, & Chiu, Yu-Jing. 2005. Competence set expansion for determining the development precedence among various subsystems in a project. ***NTU Management Review***, 16 (1): 21-40.)

周遵儒、洪國倫，2010，「泛論熱轉寫印刷製程與發展」，印刷科技，26 卷 1 期：頁 29-50。(Chou, Tsun-Ju, & Hung, Kuo-Lun. 2010. Review on decalcomania printing process and development. ***Journal of CAGST***, 26 (1): 29-50.)

陳亭羽，2003，「消費者決策問題之能力集合擴展設計」，管理學報，20 卷 5 期：頁 859-897。(Chen, Ting-Yu. 2003. Expansion design of competence sets for the consumer decision problem. ***Journal of Management***, 20 (5): 859-897.)

郭瑞祥、蔣明晃、陳亞男、劉基全，2004，「多廠生產規劃之供應鏈決策支援模式」，臺大管理論叢，15 卷 1 期：頁 49-74。(Guo, Ruey-Shan, Chiang, Ming-Huang, Chen, Ya-Nan, & Liu, Ji-Chyuan. 2004. Decision support models for multi-plant production planning. ***NTU Management Review***, 15 (1): 49-74.)

謝秉蓉，2004，以整合性方法決定企業資源規劃系統應用模組的導入順序，國立成功大學企業管理研究所博士論文。(Hsieh, Ping-Jung. 2004. ***An integrated approach to determine the implementing priority for ERP systems***. Doctoral dissertation, Department of Business Administration, NCKU.)

江勁毅、曾國雄，2001，「模糊環境下之最佳能力集合擴展」，交通運輸，20 卷 1 期：頁 15-27。(Chiang, Ching-Yi, & Tzeng, Guo-Hsiug. 2001. Optimal competence set expansion in fuzzy environments. ***Traffic and Transportation***, 20 (1): 15-27.)

Carlo, V. 1999. Multi-plant production planning in capacitated self-configuring two-stage serial systems. ***European Journal of Operational Research***, 119 (2): 451-460.

Chen, T. Y. 2002. Expanding competence sets for the consumer decision problem. ***European Journal of Operational Research***, 138 (3): 622-648.

Dasci, A., & Verter, V. 2001. A continuous model for production-distribution system design. ***European Journal of Operational Research***, 129 (2): 287-298.

Feng, J. W., & Yu, P. L. 1998. Minimum spanning table and optimal expansion of competence set. ***Journal of Optimization Theory and Applications***, 99 (3): 655-679.

Guo, Y. W., Li, W. D., Mileham, A. R., & Owen, G. W. 2009. Optimization of integrated process planning and scheduling using a Particle Swam Optimization approach. ***International Journal of Production Research***, 47 (14): 3775-3796.

臺灣大學學術期刊資料庫

Hu, Y. C., Chen, R. S., Tzeng, G. H., & Chiu, Y. J. 2003. Acquisition of compound skills and learning costs for expanding competence sets. ***Computers and Mathematics with Applications***, 46 (5/6): 831-848.

Hu, Y. C., Tzeng, G. H., & Chen, C. M. 2004. Deriving two-stage learning sequences from knowledge in fuzzy sequential pattern mining. ***Information Sciences***, 159 (1/2): 69-86.

Huang, J. J., Tzeng, G. H., & Ong, C. S. 2006. Optimal fuzzy-criteria expansion of competence sets using multi-objectives evolutionary algorithms. ***Expert Systems with Applications***, 30 (4): 739-745.

Jayaraman, V., & Pirkul, H. 2001. Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. ***European Journal of Operational Research***, 133 (2): 394-408.

Joo, J., Park, S., & Cho, H. 2001. Adaptive and dynamic process planning using neural network. ***International Journal of Production Research***, 39 (13): 2923-2946.

Li, H. L. 1999. Incorporating competence sets of decision makers by deduction graph. ***Operations Research***, 47 (2): 209-220.

Li, J. M., Chiang, C. I., & Yu, P. L. 2000. Optimal multiple stage expansion of competence set. ***European Journal of Operational Research***, 120 (3): 511-524.

Li, X. Y., Gao, L., Shao, X. Y., Zhang, C. Y., & Wang, C. Y. 2010. Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling. ***Computers and Operations Research***, 37 (4): 656-667.

Li, W. D., & McMahon, C. A. 2007. A simulated anneling-based optimization approach for integrated process planning and scheduling. ***International Journal of Computer Integrated Manufacturing***, 20 (1): 80-95.

Li, H. L., & Yu, P. L. 1994. Optimal competence set expansion using deduction graphs. ***Journal of Optimization Theory and Applications***, 80 (1): 75-91.

Lin, C. M. 2006. Multiobjective fuzzy competence set expansion problem by multistage decision-based hybrid genetic algorithms. ***Applied Mathematics and Computation***, 181 (2): 1402-1416.

Mojtaba, S., & Reza, T. M. 2010. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in preliminary and detailed planning. ***Engineering Application of Artificial Intelligence***, 22 (8): 1179-1187.

Moon, C., Lee, Y. H., Jeong, C. S., & Yun, Y. S. 2008. Integrated process planning and scheduling in a supply chain. ***Computers and Industrial Engineering***, 54 (4):

臺灣大學學術期刊資料庫

1048-1061.

Sankar, R. S., Asokan, P., Prabhaharan, G., & Phani, A. V. 2008. A CAPP framework with optimized process parameters for rotational components. ***International Journal of Production Research***, 46 (20): 5561-5587.

Shee, D. Y. 2006. An analytic framework for competence set expansion: Lessons learned from an SME. ***Total Quality Management***, 17 (8): 981-997.

Shi, D. S., & Yu, P. L. 1996. Optimal expansion and design of competence sets with asymmetric acquiring cost. ***Journal of Optimization Theory and Applications***, 88 (3): 643-658.

_____. 1999. Optimal expansion of competence sets with intermediate skills and compound nodes. ***Journal of Optimization Theory and Applications***, 102 (3): 643-657.

Timpe, C. H., & Kallarath, J. 2000. Optimal planning large multi-site production networks. ***European Journal of Operational Research***, 126 (2): 422-435.

Tsai, J. F., Lin, M. H., & Hu, Y. C. 2008. Finding multiple solutions to general integer linear programs. ***European Journal of Operational Research***, 184 (2): 802-809.

Wang, H. F., & Wang, C. H. 1998. Modelling of optimal expansion of a fuzzy competence set. ***International Transactions in Operational Research***, 5 (5): 413-424.

Woo, J., Kulvatunyou, B., & Cho, H. 2008. Allocation of manufacturers through internet-based collaboration for distributed process planning. ***International Journal of Production Research***, 46 (7): 1991-2007.

Yu, P. L., & Zhang, D. 1992. Optimal expansion of competence sets and decision support. ***Information Systems and Operational Research***, 30 (2): 68-85.

_____. 1993. Marginal analysis for competence set expansion. ***Journal of Optimization Theory and Applications***, 76 (1): 87-109.

臺灣大學學術期刊資料庫

作者簡介

*** 蔡榮發**

國立交通大學資訊管理研究所博士，美國史丹佛大學博士後研究，現為國立臺北科技大學經營管理系教授。主要研究領域為資訊管理、最佳化方法與應用、管理與決策。學術著作主要發表於 INFORMS Journal on Computing、European Journal of Operational Research、Journal of Global Optimization、Journal of the Operational Research Society、Computers & Operations Research 等期刊。

王佩淳

現為國立臺北科技大學工商管理研究所博士後研究，主要研究興趣為全域最佳化、數量方法與應用。目前參與「混合整數非線性規劃問題之全域最佳化方法與應用」之國科會研究計劃。

蔡宛玲

國立臺北科技大學經營管理系碩士班畢業，目前任職於彰化商業銀行。

作者衷心感謝匿名評審所提出的寶貴意見，以及國科會專題研究計畫 (NSC 99-2410-H-027-008-MY3, NSC 101-2811-H-027-001) 之經費補助。

* E-mail: jftsai@ntut.edu.tw

臺灣大學學術期刊資料庫