

製造系統複雜度的分析與評估

ANALYSIS AND EVALUATION OF COMPLEXITY FOR MANUFACTURING SYSTEMS

呂明山*

國立雲林科技大學工業工程與管理研究所教授

陳建富

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*

Chien-Fu Chan

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

摘要

製造系統的彈性是為了應客戶需求的變化，然而彈性的增加會造成系統變得越來越複雜，系統複雜的程度則是會影響作決策時的困難性。因此，系統的複雜程度可視為影響決策判斷的重要因素。製造系統的複雜程度可分成兩個部份，分別是靜態複雜度與動態複雜度。靜態複雜度是由系統結構與組成元素關係所造成的複雜程度，動態複雜度則是系統動態操作行為所造成的複雜程度。本研究以訊息熵當作衡量複雜度的工具，利用熵值的計算得到不同狀態下系統的熵值來探討製造系統作業的靜態及動態複雜度，建立衡量系統複雜度的指標。在靜態複雜度方面，考慮的因子包括機台彈性、作業彈性以及批量中產品混合比例，並討論這些因子對於靜態複雜度的影響。在動態複雜度方面，考慮多機台下，在投入率與服務率的變化下，造成等候狀態發生的不確定性，利用等候理論的學理基礎，分析系統的動態等候行為模式，並引用訊息熵的概念，發展出等候行為的複雜度評估模式，探討系統投入率與服務率、最大容量、平行機台數量等因子對於複雜度所造成的影響，以作為管理者決策的依據。

*通訊作者，地址：雲林縣斗六市大學路三段 123 號，電話：(05)534-2601 轉 5129
E-mail：mslu@yuntech.edu.tw

關鍵詞：複雜度、製造系統、績效評估、訊息熵。

ABSTRACT

In order to respond to the change in customer demand, flexible manufacturing systems are developed and implemented. However, the increasing of flexibility results in that the system is more complex. The level of system complexity will cause the difficulty of decision making. Therefore, systems' complexity can be treated as an important factor for decision making. There are two types of complexities: static complexity and dynamic complexity. The static complexity includes the complexity coming from system structure and the interaction of internal components. The dynamic complexity includes the complexity coming from system dynamic behaviors. In this research, the information entropy is proposed to evaluate the static and dynamic complexities of the system. For the static complexity, the influences of machine number, job number and part mix on static complexity are discussed. For the dynamic complexity, queuing theory is introduced to analyze the behavior of system dynamic queue, and the influences of arrival rate, service rate, system capacity and the number of parallel machine on dynamic complexity are discussed. The results of evaluated system complexity can help managers for decision making.

Keywords: Complexity, Manufacturing System, Performance Evaluation, Information Entropy

壹、前言

為了面對企業客戶需求的變化，企業試圖將製造系統變的更有彈性、增加產能、以及擁有越強大的客製化能力是各企業努力的目標。然而彈性成長如果沒有伴隨著適當的控制能力，將會出現沒有效用的決策制定、更長的前置時間、無法達成的計畫、或是出現更多的存貨及成本，最後導致顧客出現不滿意的情況。現今製造系統面對增加彈性，必須認知伴隨著複雜性增加的取捨關係，唯有具備良好控制的複雜製造系統能力，才能夠使得增加彈性變成一種製造上的潛力。

彈性的擴張造成製造系統變得越來越複雜，大大的增加面對決策時選擇及控制上的困難度，同時增加了影響系統行為的不確定性，造成無法有效地對於每次決策所造成的影響作出預測，因此，系統本身的複雜性將會影響做決策的好壞。複雜性的衡量，也就是系統的複雜度（**complexity**），被視為在面臨決策點時用來評估系統績效的一個重要指標。複雜度包含的範疇很廣，從計算上的複雜度，到生物以及社會上的複雜度都有相關的研究討。**Frizelle and Woodcock (1995)** 學者提出，與系統有關的多樣化跟不確定性即為複雜度，兩種複雜度分類的定義，分別是結構（或靜態）的複雜度與操作（動態）的複雜度。所謂結構複雜度代表的是內嵌在靜態系統內的多樣性；而操作複雜度則是在動態系統之下所相關的不確定性。由於對於上述的多樣性與不確定性多使用口語上的語義詞，使得對於複雜度的管理與判斷更加困難，往往造成了研究者發展的限制。**Calinescu, Efstathiou, Schim, and Bermejo (1998)** 學者提出製造複雜度包含了產品結構、現場或工廠結構、規劃和排程功能、資訊流、環境的動態性、變化性與不確定性、以及其他組織內的功能如員工訓練、法規、資訊等等。靜態複雜度可以視為系統結構、系統聯繫型態、系統元件相似性、系統內部互動強度的函數；動態複雜度可視為系統因為時間變化而不可預期的行為。**Khurana (1999)** 將複雜度分成四類：運籌複雜度、技術複雜度、組織複雜度及環境複雜度。並且對於技術複雜度再深入討論，提出技術複雜度包含兩個層面：互動的複雜度和不可拆解性。從產品的角度，互動複雜度來自於多重的產品功能的交互作用，一但改變某個顯著的元件或子系統時就必須要對整個系統重新設計；不可拆解性則是產品拆解之後的元件無法衡量績效。從流程的角度，不同流程的步驟擁有多重以及難以理解的互動關係，此為流程的互動複雜度；不同流程的步驟拆解將會影響整體系統的績效，此為流程上的不可拆解性。同時以產品及流程兩個構面構成製造系統的複雜度。

綜合以上學者，複雜度對於實體的製造系統上可以分成兩部分來看待，分別是靜態複雜度與動態複雜度：

- 1.靜態複雜度：包含系統結構、內部互動的型態、組成元件的相似性、以及子系統之間互動的強度，在製造系統當中的影響因素包含機台的數量，多樣的作業組合，以及機台之間的互動程度，作業經過機台的相似性，作業法則的限制等。
- 2.動態複雜度：系統處在許多不確定性因素下，隨著時間變化而出現的狀態改變行為，包含了機台加工與閒置、等候線的發生、機台故障、進行維修作業、作業員曠工、缺料、插單、換線等。

訊息熵 (information entropy) 常被應用來當作複雜度衡量的工具。訊息熵是由 Shannon (1948) 學者所提出, 利用熱力學中熵的觀念在資訊理論衡量當中, 用來衡量當需要充分描述一個系統時所需要的資訊量程度。「熵」值常拿來用於複雜度的衡量上, 是用在當想要具體說明系統中一個特定狀態時, 所需要的資訊程度多寡。越複雜的系統, 包含越多子系統、互動關係、非線性關係等, 將會需要越多的資訊量, 不能明確的說明系統每個時點狀態如何。訊息熵其公式如下:

$$I = -K \sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

假設其中系統內部擁有 n 個狀態, 每一個狀態都會對應到一個機率值 P_i , 此機率值代表的是狀態會出現的機率。一但每個狀態的機率值都是相等的, 那麼訊息熵的值 I 將會隨著狀態 n 的數量增加而遞增, 也就是說一個系統內部所會發生的狀態越多, 將會影響到系統所需資訊的增加, I 值越大訊息的混亂程度越大, 尤其在狀態機率皆相等時候訊息熵的值將會最大。 K 則是代表熱力學當中的波茲曼函數, 在訊息理論當中假設為 1。對數中的底數為 2, 是來自於資訊傳遞的位元 (bit) 單位觀念得來, 訊息存在與否是由位元值的 0 與 1 來表示。

在熵應用於製造系統靜態複雜度的衡量上, Deshmukh, Talavage, and Barash (1998) 學者探討零件相似度、批量的大小及產品設計等的多樣性對製造系統複雜度的影響, 並利用時間作為製造系統結構內狀態出現機率的加權值, 導入熵的計算公式裡, 計算製造系統結構複雜度值及分析複雜度與系統績效的關係。在熵應用於動態製造複雜度的衡量上, Frizelle and Woodcock (1995) 學者的研究當中提出操作複雜度 (operational complexity) 包含了可計畫性 (programmable) 以及不可計畫性 (non-programmable) 兩個構面, 表示系統狀態分成可以在計畫裡面所預期到的狀況, 或是發生了不在計畫中的狀況。可計畫性狀態包含了加工、設立、以及閒置; 不可計畫性的狀態代表機台發生故障、拒絕執行作業、重複加工等無法預測的狀況。然而不可計畫性狀態通常會降低執行有效作業的時間可獲性, 造成系統當中的瓶頸發生。上述兩個構面又各自包含了作業進行是否在容許範圍裏面, 例如品管當中的良率及不良率。Sivadasan, Efstathiou, Frizelle, Shirazi, and Calinescu (2002) 及 Sivadasan, Efstathiou, Calinescu, and Huatuco (2006) 學者提出了利用訊息熵在供應商及顧客系統中的操作性複雜度的計算, 將系統狀態分成在控制中 (in control) 不在控制中 (out of control) 兩種。並且舉出實例上在預估訂單跟實際訂單的差異, 計算上述兩個作業複雜度指標, 找出影響因素如內部限制 (如員工、機台)、供應商限制 (如配送政策、品質) 及顧客要求 (如訂單變更) 對於操作複雜度的影響程度大小。Zhang and Efstathiou (2006) 提出在考慮不同的庫存策略下, 以訊息熵計算大量客製化製造系

統複雜度的方法，並找出影響系統複雜度最顯著的因子。Wang and Hu (2010) 提出以訊息熵的方法來分析連續、並行及混合式的三種組裝系統的複雜度，每一工作站作業員及組裝系統型態列入複雜度量測考慮，並發展出包含複雜度的系統產出的分析模式。

另外，有許多學者應用複雜度來衡量系統的敏捷性 (agility)，敏捷性是系統對外在環境、客戶需求改變或是其他種種不確定性因素所產生的反應速度來評量的；換句話說，就是達到適應外在環境改變而調整所需要的反應程度快慢。因此，系統的組成以及系統內部物件之間的資訊傳遞，將會是影響其敏捷性程度的主要因素。所以系統的複雜度，包含結構面或是資訊面都會影響到系統敏捷性程度。Goranson (1999) 提出組織內擁有過多的節點或是迴路，代表著改變企業流程是複雜且困難的；同時此複雜結構程度越高，代表著這個企業是越不具有敏捷性的。因此，衡量複雜度並認為越複雜的流程越難改變，也認定此流程是越不具敏捷性的。所以建議在 Goldman, Nagel, and Preiss (1995) 學者提出的敏捷性矩陣中，在「控制改變和不確定性」論域中加入複雜度的衡量成為績效指標之一。Arteta and Giachetti (2004) 學者提出利用複雜度來衡量敏捷性的模式，越是複雜的企業系統或是流程，就越不容易達到重組再造的結果；越是不複雜程度的企業或是流程，相對的要重新組合或是再造就會顯得比較容易，也就代表越具有敏捷性。作者利用派翠網當作塑模的工具，並利用訊息熵理論來計算複雜度，並以一套電話預付卡系統當做評估對象，此研究結果指出可以利用這套複雜度衡量模式，評估出流程再造之前的複雜度大於再造之後的複雜度，即是說流程再造之後的電話預付卡系統更具有敏捷性。Calvo, Domingo, and Sebastian (2008) 學者提出利用製造系統的彈性度及複雜度來計算敏捷製造持續度 (sustainability)，其中彈性度定義為系統效用度 (utility) 隨著狀態變化的程度，複雜度則由熵計算得之。並以一個組裝線為例說明所提出的敏捷製造持續度的概念。

本研究以訊息熵當作衡量複雜度的工具，利用熵值的計算得到不同狀態下系統的熵值，來探討彈性製造系統作業的靜態及動態複雜度，建立衡量作業複雜度的指標。在靜態複雜度方面，考慮機台彈性、作業彈性以及批量中產品混合比例，對於靜態複雜度的影響。在動態複雜度方面，考慮在多機台下，投入率與服務率的變化下，發生等候狀態的不確定，造成管理者現場管理決策的複雜性提高，本研究利用等候理論的學理基礎，分析系統的動態等候行為模式，發展出等候行為的複雜度評估，以探討系統投入率與服務率、系統最大容量、平行機台數量等因子對於複雜度變化所造成的影響。

貳、靜態複雜度的分析

靜態複雜度主要為衡量系統結構及組織元件間的關係所造成的複雜度。以彈性製造系統而言機台的彈性及作業的彈性，雖然提供多樣產品的生產，但同時也增加生產規劃的複雜及不確定性。因此，本研究探討的是機台彈性、作業彈性以及批量產品混合比例對於靜態複雜度的影響，機台彈性與作業彈性結構如圖1、圖2所示。機台彈性指的是一項作業可以被進行加工的機台數量；作業彈性指的則是一台機器可以支援的作業種類數量，藉由定義機台、作業彈性及產品混合生產的比例所造成的不確定與選擇性來衡量系統的複雜度。參考 Deshmukh et al. (1998) 學者提出的觀點，以加工時間作為製造系統內狀態出現機率的加權值，導入訊息熵的公式，計算製造系統的結構複雜度。

假設製造系統生產 1 種零件，所需的作業共 n 種作業，以及所使用的機台共 m 種機台。每項作業可選擇的機台數目與種類不盡相同，每台機器所能支援的加工作業也依照機台的彈性而有所不同，因此，可建立零件作業對應機台的加工時間集合 T ，如公式 (2) 所示；其中 T_{ijk} 則是代表零件 k 中的作業 i 在機台 j 執行所需加工時間。以機台執行零件 k 作業加工時間表來表示。

$$T = \{T_{ijk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l)\} \quad (2)$$

假設每次批量中共有 1 種零件，每種零件所佔總零件的比例為 Ψ ， $\Psi = (\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_l)$ ，每種零件的數量為 Q ， $Q = (1, q_2, \dots, q_l)$ ，則可得零件 k 所佔的比例 Ψ_k 為公式 (3) 所示。

$$\Psi_k = \frac{q_k}{\sum_{k=1}^l q_k} \quad (3)$$

接著依據製程計畫決定機台執行零件加工作業的紀錄表。零件 k 依照作業順序列出作業對應機台紀錄 Φ ，其欄位參數為 $\{0,1\}$ 變數。當機台 j 可支援零件 k 所需作業 i 便登記為 1，若是機台無法支援作業則是登記為 0，因此，機台執行零件加工作業的紀錄集合 Φ ，如公式 (4) 所示。

$$\Phi = \{\Phi_{ijk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l)\} \quad (4)$$

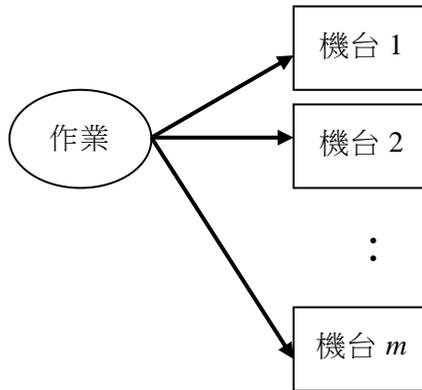


圖 1 機台彈性示意圖

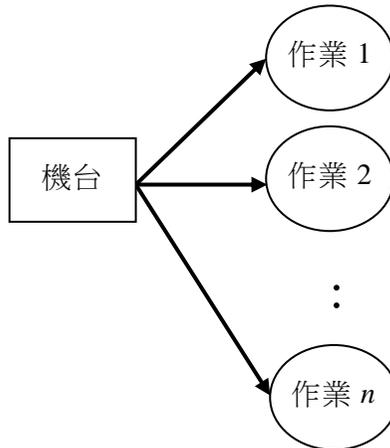


圖 2 作業彈性示意圖

下一步則是建立以作業選擇機台觀點的時間集合。首先確定機台的優先關係，接著定義所有零件在不同作業下，考慮可選機台的優先關係機台加工的記錄集合 Π ， Π 的表示如公式 (5) 所示。

$$\Pi = \{ \pi_{ijk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall r \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l) \} \quad (5)$$

其中 π_{ijrk} 的定義分成有優先關係及無優先兩種條件定義， π_{ijrk} 定義如下：

1. 有優先關係時：從機台執行零件的作業紀錄表判斷機台可否進行作業後，在可執行作業的機台 j 與機台 r ，且 $j \neq r$ 的前提下，當系統進行第 k 零件的第 i 作業時，若是機台 j 比機台 r 擁有較高的優先順序，則在 π_{ijrk} 和 π_{ijjk} 的欄位紀錄作業 i 在機台 j 的加工時間 T_{ijk} ，以及 π_{irjk} 紀錄為 0。考慮機台 j 比機台 r 有較高優先權後，高優先權的機台 j ， π_{ijrk} 有 T_{ijk} 的值，而低優先權的機台 r ， π_{irjk} 為 0，因此，在有優先關係時，只考慮機台 j 狀態的複雜度，而忽略了機台 r 狀態的複雜度。
2. 無優先關係時：若是機台 j 與機台 r 之間並沒有存在優先關係的話，機台 j 與機台 r 有相同的被選擇權，因此，除了在 π_{ijrk} 和 π_{ijjk} 的欄位紀錄作業 i 在機台 j 上的加工時間 T_{ijk} ，也必須在 π_{irjk} 紀錄為作業 i 在機台 r 上的加工時間 T_{irk} 。也就是說，當選擇機台 j 時， π_{ijrk} 有加工時間 T_{ijk} ；當選擇機台 r 時， π_{irjk} 有加工時間 T_{irk} ，兩者均納入複雜度的計算。

考慮機台優先權加工時間後，接著是建立機台是否可進行作業的紀錄集合 A 。 A 集合中的元素值為 0 或 1，當 Π 中的元素值大於 0 時，表示機台可進行作業，對應 A 集合中的元素值就登記 1；反之為 0。 A 的定義如公式 (6) 所示。

$$A = \{A_{ijrk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall r \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l)\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } A_{ijrk} &= 1, \text{ if } \pi_{ijrk} > 0 \\ A_{ijrk} &= 0, \text{ if } \pi_{ijrk} = 0 \end{aligned}$$

將各種零件的 A 集合中的元素值加總，形成紀錄機台可進行各種作業的零件的種類數 A' ， A' 集合中的元素定義如公式 (7) 所示。

$$A'_{ijr} = \sum_{k=1}^l A_{ijrk} \quad (7)$$

下一步建立各種零件在各種機台進行各種作業下的加權加工時間集合 Π' ，如公式 (8) 所示。加權時間的計算必須考慮各零件所占的比例及機台可進行各種作業的零件的種類數，當比例占的越大及機台可進行各種作業的零件的種類數越多，則時間加權的值越大。因此，零件 k 加權後的時間可由公式 (9) 計算得之。

$$\Pi' = \{\pi'_{ijrk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall r \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l)\} \quad (8)$$

$$\text{其中 } \pi'_{ijrk} = \pi_{ijrk} \times \Psi_k \times A'_{ijr} \quad (9)$$

最後則是建立零件 k 正規化的 Π'' 集合。把零件 k 的加權時間除上所有零件加權時間使其正規化後的值介於 $(0,1)$ 之間，目的是計算機台進行作業加工時間所占比例，作為訊息熵計算所需。零件 k 正規化 Π'' 可由公式 (11) 計算得之。

$$\Pi'' = \left\{ \pi''_{ijrk}, \forall i \in (1, \dots, n), \forall j \in (1, \dots, m), \forall r \in (1, \dots, m), \forall k \in (1, \dots, l) \right\} \quad (10)$$

$$\text{其中 } \pi''_{ijrk} = \frac{\pi'_{ijrk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^l \pi'_{ijrk}}, \text{ 且 } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^l \pi''_{ijrk} = 1 \quad (11)$$

將零件 k 作業 i 機台加工時間正規化以後，利用所得機率值代入訊息熵公式 (12) 計算製造系統靜態複雜度。

$$MSC = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^l \pi''_{ijrk} \log_2 \pi''_{ijrk} \quad (12)$$

參、動態複雜度的分析

等候線的發生是由於生產過程中投入率與服務率的變化，或者機台當機等因素造成零件等候的狀態，而等候狀態發生機率分佈狀況的不確定，造成管理者現場管理決策的複雜性提高。因此，本研究引用等候理論的學理基礎，來分析系統的等候動態行為模式，進而推導出等候行為的複雜度。首先，定義等候線狀態為特定時間點 t 上存在系統當中的零件數 n ，利用等候理論的公式，可以求出系統當中每一種狀態發生的機率 P_n ，以及期望等候線長度和期望平均等候時間，將計算出來的等候狀態發生機率帶入訊息熵公式，求出所有狀態所產生的複雜度，藉此探討等候線與複雜度的關係及其影響的因數。另外，機台前的暫存區的容量是不可能無止盡且沒有限制的，一旦投入的數目超過暫存區的容量時，便開始造成系統阻塞的狀況，對於加工站則是暫時無法安排零件進入暫存區等候加工，因此，等候線長度的限制在等候線的計算上將給予考慮。等候行為模式使用參數定義如下：

A ：平均零件到達率

μ ：平均服務（作業）率

s ：平行服務機台數量

K ：系統容量限制

P ：使用率 $= \lambda / s\mu$

假設零件在單位時間內的到達個數與單位時間內的服務個數均服從 Poisson 分配，依(1)單作業單機台的 $M/M/1/K$ 及(2)單作業多平行機台的 $M/M/s/K$ ，兩種狀況分析系統等候行為模式的複雜度。

一、 $M/M/1/K$ 模式

系統內只負責一項作業，只有單一機台支援該作業，因此 $s=1$ 。假設零件在單位時間內的到達個數與單位時間內的服務個數均服從 Poisson 分配，基於等候理論中的生死過程，某特定狀態的流入率（rate in）與流出率（rate out）要相等的前提下，便可以求出每個狀態的機率值。 P_0 為狀態 0 發生的機率， P_n 為狀態 n 發生的機率， P_0 與 P_n 的計算可由（13）及（14）得之：

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty} C_n} \quad (13)$$

$$P_n = C_n \cdot P_0 \quad (14)$$

其中 C_n 為投入 / 產出的函數，如下式表示：

$$C_n = \frac{\lambda_{n-1}\lambda_{n-2}\dots\lambda_0}{\mu_n\mu_{n-1}\dots\mu_1}, \text{ for } n=1,2,\dots \quad (15)$$

而且，當 $n=0$ 時， $C_n=1$ 。

假設系統容量的上限值為 K ，代表系統（包含等候線）最多只能有 K 個零件在其中，一旦超過 K 以後的零件到達率就變成為 0，系統內個數超過 K 時便不再投入， λ_n 表示等候狀態 n 時的投入率，可表示為

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & \text{if } n=0,1,\dots,K-1 \\ 0 & \text{if } n=K,K+1,\dots \end{cases} \quad (16)$$

μ_n 為等候狀態為 n 時之服務率，服務率為不變， $\mu_n = \mu$ ，所以

$$P_n = \begin{cases} \rho^n P_0 & \text{if } n = 0, 1, \dots, K \\ 0 & \text{if } n = K+1, K+2, \dots \end{cases} \quad (17)$$

又因為 $\sum_{n=0}^K P_n = 1 = \sum_{n=0}^K \rho^n P_0$ ，所以

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^K \rho^n} = \begin{cases} \frac{1-\rho}{1-\rho^{K+1}} & \text{if } \rho \neq 1 \\ \frac{1}{K+1} & \text{if } \rho = 1 \end{cases} \quad (18)$$

依據李德爾（Little）公式，平均等候線長度 L_q 與平均等候線時間 W_q 公式如下：

$$L_q = L_s - (1 - P_0) \quad (19)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{L_q}{\lambda(1 - P_K)} \quad (20)$$

其中 L_s 整個等候系統平均長度如下：

$$L_s = \begin{cases} \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(K+1)\rho^{K+1}}{1-\rho^{K+1}} & \text{if } \rho \neq 1 \\ \frac{K}{2} & \text{if } \rho = 1 \end{cases} \quad (21)$$

藉由公式（17）、（18）就可以得到各狀態所發生的機率，將各狀態的機率代入公式（1）裡，便可以得到複雜度的。當 $\rho=1$ 的時候，所有的狀態發生機率相同，複雜度會最高，符合訊息熵理論最大熵的情況。

二、M/M/s/K 模式

負責作業的機台從單一機台增加到有多台平行機加工時，系統可以同時進行加工的容量也隨著增加。假設共有 s 台平行機台可以進行作業時，即 $s > 1$ 。同時有 s 台機器可以進行作業時，系統加工的上限就等於 s ，超過 s 的就進入等候線等待，如圖 3 所示。

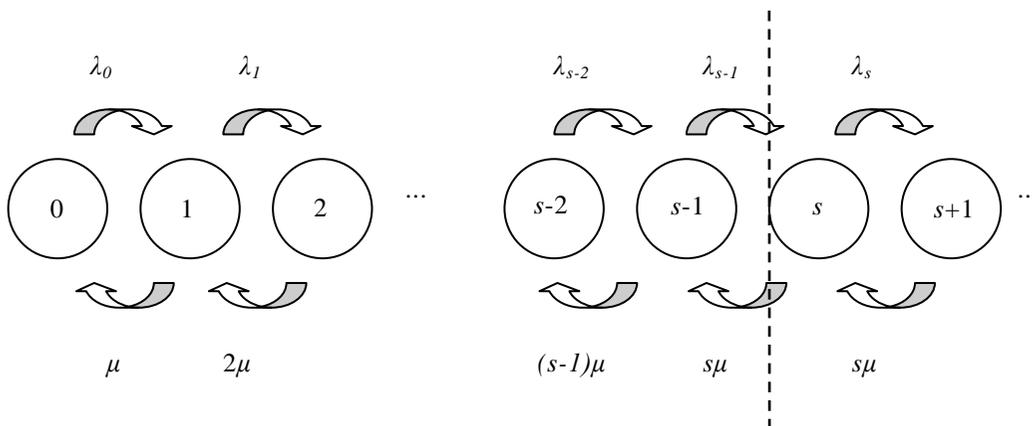


圖 3 系統容量上限示意圖

考慮系統容量最大值為 \$K\$ 時，投入率與服務率分別如下：

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & \text{if } n = 0, 1, \dots, K-1 \\ 0 & \text{if } n = K, K+1, \dots \end{cases} \quad (22)$$

$$\mu_n = \begin{cases} n\mu & \text{if } n = 1, 2, \dots, s-1 \\ s\mu & \text{if } n = s, s+1, \dots, K \end{cases} \quad (23)$$

(1) 當 \$0 \le n \le s\$ 時，服務率隨著機台遞增，第 \$n\$ 狀態的服務率為 \$n\mu\$，所以 \$\mu_n = n\mu\$。可得到 \$C_n\$ 的公式如下：

$$C_n = \frac{\lambda \cdot \lambda \cdot \lambda \cdots \lambda}{\mu \cdot 2\mu \cdot 3\mu \cdots n\mu} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} \quad (24)$$

(2) 當 \$n > s\$ 時，服務率因為機台容量已達飽滿，所以 \$\mu_n = s\mu\$ 為服務率的最大值，因此，可得到 \$C_n\$ 的公式如下：

$$C_n = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)^{n-s}}{s!} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{s^{n-s} s!} \quad (25)$$

將 (22)、(23)、(24) 及 (25) 代入 (13) 及 (14)，可得 \$P_n\$ 及 \$P_0\$ 如下：

$$P_n = \begin{cases} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} P_0 & \text{if } n = 1, 2, \dots, s-1, s \\ \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{s^{n-s} s!} P_0 & \text{if } n = s, s+1, \dots, K \\ 0 & \text{if } n > K \end{cases} \quad (26)$$

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{n!} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s}{s!} \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)}} \quad (27)$$

因此，平均等候線長度 L_q 與平均等候線時間 W_q 如下式：

$$L_q = \frac{P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \rho}{s! (1-\rho)^2} \left[1 - \rho^{K-s} - (K-s) \rho^{K-s} (1-\rho) \right] \quad (28)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{L_q}{\lambda(1-P_K)} \quad (29)$$

從公式 (26)、(27) 得到狀態發生的機率後，帶入公式 (1) 可得系統複雜度值。

肆、實例的探討

經過前述對於零件加工作業靜態複雜度，以及零件等候線動態複雜度的衡量模式建立以後，接透過兩個實例探討不同的因子對複雜度的影響。在靜態複雜度的部份，探討機台彈性、作業彈性及零件混合的比例變化對於靜態複雜度所產生的影響。而在動態複雜度的部份，透過改變投入率與產出率的比例，以及調整系統容量限制來探討對動態複雜度、等候線長度與等候時間的影響。

一、靜態複雜度的實例探討

經過零件加工作業靜態複雜度衡量模式建立以後，透過實例的模擬，探討機台彈性、作業彈性及零件混合的比例變化對於靜態複雜度所產生的影響。假設製造系

統包含二十個機台，支援二十種加工作業，生產零件 A 與零件 B。零件 A 與零件 B 在機台的加工時間由隨機產生介於 0 與 20 間的整數值，表 1 及表 2 為其中一組零件 A 與零件 B 的機台加工時間表。其中若加工時間為 0，代表機台不支援加工作業。當考慮機台優先權時，假設機台優先權已知且等於機台數字順序；如果沒有優先權的考量，則每台機器的優先順序相同。接下來，利用第二章推導的複雜度計算模式，分析製造系統的靜態複雜度。

(一)機台彈性對複雜度的影響

在機台彈性對複雜度的影響分析中，把可支援機台的數量當成調整參數，固定批次所需的總作業，在此設定為三種作業，機台數量則從一台遞增到二十台，將零件 A 與零件 B 的機台作業時間隨機變化三十次，求得在機台變化下的平均複雜度，得到複雜度變化如圖 4 所示。由圖 4 得知，有機台優先權的複雜度小於無機台優先權的複雜度，而且無論是有優先權或無優先權的情況下，複雜度隨著機台增加而遞增，而且增加的趨勢漸為緩和。接著將三十筆隨機樣本透過 ANOVA 分析利用 ANOVA F-test 檢定機台數量對複雜度是否有顯著影響。樣本資料滿足 ANOVA 分析的基本假設：(1)各母體均為常態分配；(2)各母體變異數均相同；(3)抽自各母體的各組隨機樣本互為獨立。ANOVA 分析結果有優先權及無優先權情況下 F 值分別為 34583.30 及 45977.53，其值均大於 $F_{0.05} = 1.604496$ ，因此，代表在 $\alpha = 0.05$ 的顯著水準下，機台數量對複雜度有顯著影響。

(二)作業彈性對複雜度的影響

在作業彈性對複雜度的影響分析中，先固定系統中所使用的機台數目，在此設定為三台機器，支援作業範圍則從一種遞增到二十種，將零件 A 與零件 B 的機台作業時間隨機變化三十次，求得在作業變化下的平均複雜度，得到複雜度變化如圖 5 所示。由圖 5 得知，有機台優先權的複雜度小於無機台優先權的複雜度，而且無論是有優先權或無優先權的情況下，複雜度隨著作業增加而遞增，而且增加的趨勢漸為緩和。接著將三十筆隨機樣本透過 ANOVA 分析，利用 ANOVA F-test 檢定作業數量對複雜度是否有顯著影響，ANOVA 分析結果有優先權及無優先權情況下 F 值分別為 9353.893 及 9497.444，其值均大於 $F_{0.05} = 1.604496$ ，因此，代表在 $\alpha = 0.05$ 的顯著水準下，作業數量對複雜度有顯著影響。

(三)機台與作業彈性對複雜度的交互作用

同時改變機台與作業數量，探討機台數量與作業數量對於複雜度變化的交互作用。假設系統生產 A 與 B 兩種零件，零件所需的加工作業因子有五種水準變化，分別是需要 1 至 5 種作業；支援的機台因子也有五種水準的變化，分別是有 1 至 5 種

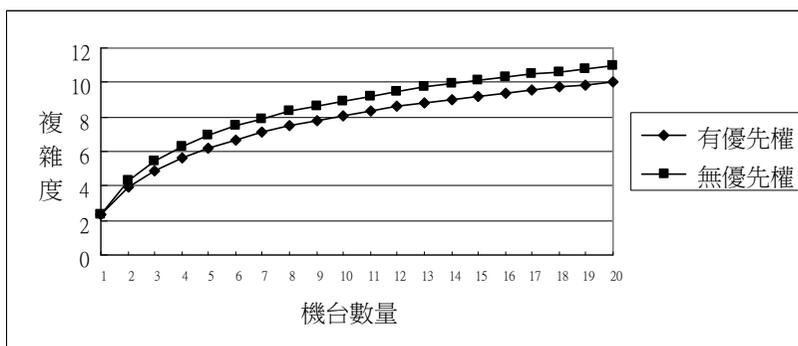


圖 4 機台數量對複雜度的影響

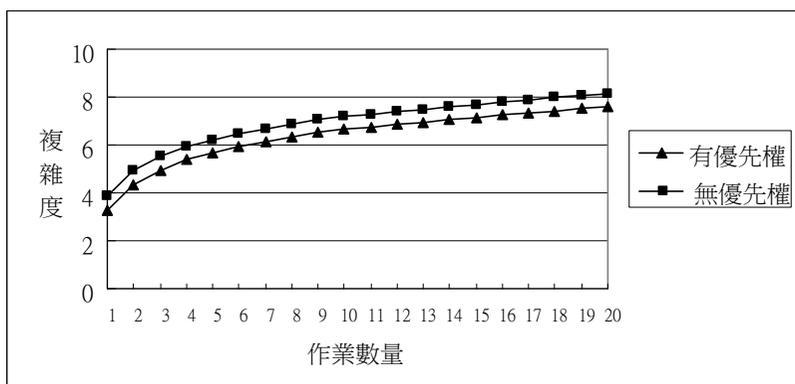


圖 5 作業數量對複雜度的影響

表 1 零件 A 作業對應機台的加工時間表

機台 作業	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	7	6	6	1	8	4	8	3	6	4	11	10	5	13	14	3	8	8	5
2	3	5	9	5	9	2	5	9	8	5	2	12	10	19	1	14	19	12	20	14
3	3	4	5	2	8	7	8	9	6	2	16	10	5	16	8	0	10	8	4	16
4	5	6	1	4	1	7	8	5	6	4	15	9	15	3	7	1	2	4	20	18
5	9	4	2	6	3	5	9	7	8	7	10	1	10	8	6	16	3	3	12	2
6	2	1	5	6	8	5	7	3	1	5	2	0	4	17	11	11	1	16	19	9
7	9	4	1	7	5	6	3	5	3	3	1	15	18	3	17	9	4	11	17	19

續下表

續表 1

8	7	1	3	3	5	4	1	4	7	8	8	1	16	17	12	18	2	16	9	3
9	8	6	3	1	8	5	3	5	7	2	12	14	3	2	9	19	8	20	14	14
10	7	2	5	9	6	8	6	9	4	8	17	4	4	7	13	12	6	16	4	3
11	6	9	3	12	18	15	4	11	12	7	4	3	1	16	13	14	8	15	15	8
12	12	3	17	14	8	20	10	2	0	16	16	8	5	10	4	17	6	14	20	9
13	5	20	3	4	12	3	7	6	16	4	7	5	5	12	6	5	15	6	3	4
14	2	4	18	11	20	4	15	1	1	7	5	19	13	9	14	16	0	9	16	8
15	15	3	2	13	4	16	9	8	18	20	9	12	8	0	0	19	19	13	16	0
16	17	2	7	12	13	20	2	8	4	1	20	3	17	12	10	13	3	4	17	5
17	18	19	3	9	8	9	13	18	1	8	20	5	14	19	11	0	0	4	15	8
18	11	14	11	17	6	11	8	11	9	7	6	3	20	12	5	20	10	11	19	9
19	4	5	7	9	17	9	18	19	8	9	16	8	3	5	3	8	1	8	14	5
20	7	7	1	3	3	2	9	6	19	16	8	10	16	9	8	6	11	19	18	8

表 2 零件 B 作業對應機台的加工時間表

機台 作業	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	9	6	1	1	8	1	4	7	7	1	11	0	2	19	14	13	10	12	8	7
2	2	7	3	7	1	6	8	3	9	1	15	4	10	7	11	11	6	19	20	12
3	6	9	8	2	6	3	8	8	5	8	15	0	7	4	20	4	3	14	15	16
4	4	7	1	9	3	5	6	5	8	1	4	3	17	18	16	10	18	7	16	16
5	8	1	1	4	8	1	8	3	1	2	11	3	12	17	11	19	13	7	19	20
6	7	4	2	4	5	6	6	7	9	6	20	13	6	14	18	14	13	13	2	2
7	4	9	1	8	7	3	3	5	2	2	8	8	11	4	6	19	16	18	7	3
8	1	9	6	5	5	8	2	4	2	4	18	20	17	6	11	4	3	19	5	19
9	8	4	2	2	3	8	3	6	8	1	19	5	1	18	13	13	9	8	14	3
10	4	8	1	6	1	5	5	6	7	9	6	13	20	5	16	8	19	4	16	18
11	20	17	10	19	19	14	15	7	9	17	8	6	20	19	13	3	9	2	15	11
12	15	12	12	2	2	4	16	6	1	10	19	15	12	11	8	18	0	5	5	16
13	5	17	6	3	1	7	0	12	4	18	16	10	10	16	6	3	17	2	3	6

續下表

續表 2

14	9	14	8	5	16	16	2	4	0	5	17	8	16	17	16	1	15	3	5	4
15	2	16	4	15	14	7	16	7	11	10	16	2	0	4	1	6	4	17	17	14
16	8	5	13	5	12	13	6	6	8	12	10	7	5	11	14	6	5	13	2	12
17	10	7	3	13	1	1	6	16	6	1	19	8	10	15	16	9	10	15	7	16
18	16	10	13	6	5	18	3	8	15	7	15	2	4	2	9	15	8	7	19	7
19	6	11	14	5	6	11	16	6	5	8	11	18	16	13	5	8	4	14	14	14
20	13	18	19	16	18	12	19	3	11	17	10	13	2	9	1	17	19	14	0	9

台機。各種水準組合下，隨機變動加工時間三十次，求得在機台及作業變化下的平均複雜度。圖 6 表示無機台優先權下交互作用圖，圖 7 表示有機台優先權下交互作用圖。由圖 6 及圖 7 得知，複雜度隨著作業數量及機台數量增加而增加，而且無優先權的複雜度比有優先權的複雜度高。

將三十筆隨機樣本透過 ANOVA 分析，利用 ANOVA F-test 進行三種檢定，三種檢定分別為作業數量對複雜度顯著性、機台數量對複雜度顯著性，以及機台數量與作業數量對於複雜度的交互作用顯著性。對於作業數量對複雜度顯著性的檢定，ANOVA 分析結果有優先權及無優先權情況下 F 值分別為 32280.85 及 7853.734，其值均大於 $F_{0.05} = 2.384216$ ，因此，代表在 $\alpha = 0.05$ 的顯著水準下，作業數量對複雜度有顯著影響。對於機台數量對複雜度顯著性的檢定，ANOVA 分析結果有優先權及無優先權情況下 F 值分別為 8108.845 及 8108.842，其值均大於 $F_{0.05} = 2.384216$ ，因此，代表在 $\alpha = 0.05$ 的顯著水準下，機台數量對複雜度有顯著影響。對於機台數量與作業數量對複雜度交互作用顯著性的檢定，ANOVA 分析結果有優先權及無優先權情況下 F 值分別為 1.342041 及 1.342008，其值均小於 $F_{0.05} = 1.657471$ ，因此，代表在 $\alpha = 0.05$ 的顯著水準下，機台數量與作業數量對複雜度交互作用不顯著。

(四)零件混合比例

假設 A 與 B 兩種零件生產的機台與作業數量皆等於 3，而且 A 與 B 零件混合生產，每次變動 0.05 的混合比例，隨機變化 A 與 B 零件中的機台加工時間共三十次，然後調整 A 與 B 兩種零件的比例，分別計算有優先權與無優先權情況的製造系統複雜度，得到零件比例與平均複雜度變化關係如圖 8 所示。從圖 8 中得知零件比例大約在 0.5 到 0.6 之間可得到最大的複雜度，表示零件比例接近相等時有較高的複雜度。

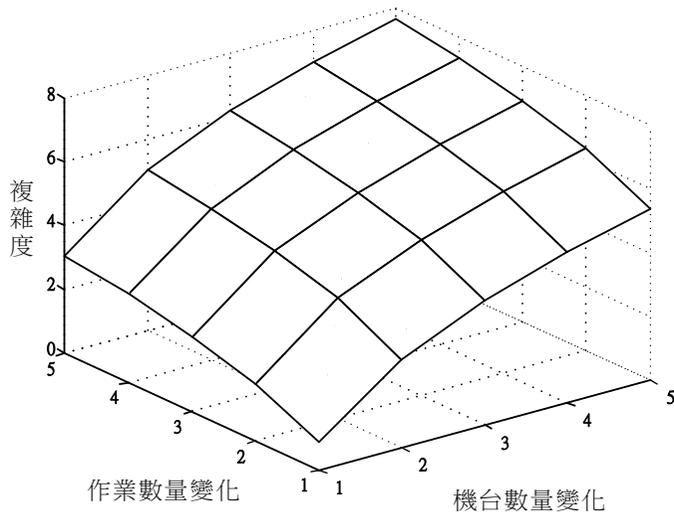


圖 6 無優先權情況下機台與作業數量對複雜度的交互作用

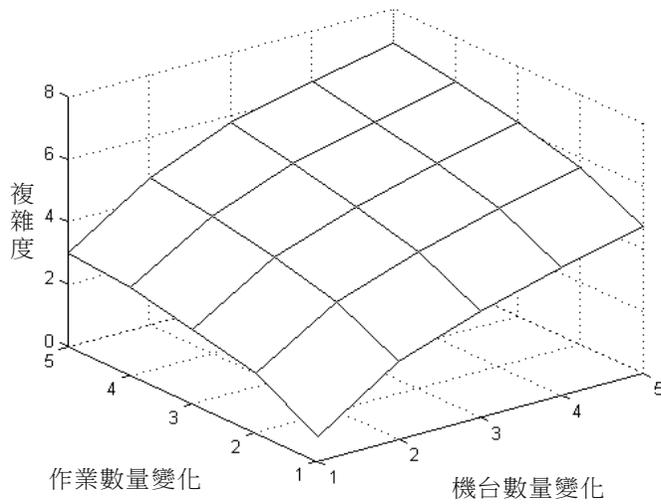


圖 7 有優先權情況下機台與作業數量對複雜度的交互作用

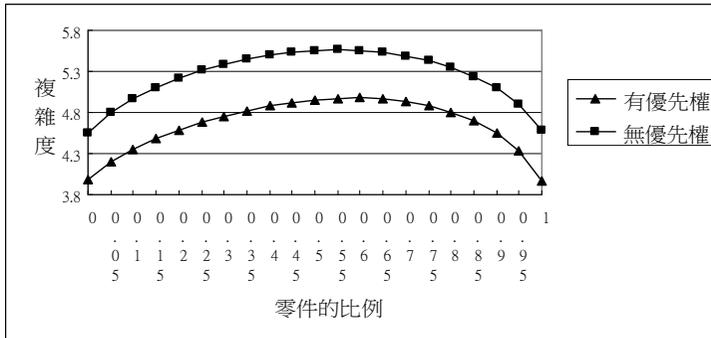


圖 8 零件比例對平均複雜度的影響

透過實例探討得知機台彈性、作業彈性、零件比例都是會造成靜態複雜度變化的影響因子，而優先權的考慮則是會降低系統結構的複雜度。比較機台數目及作業數目對複雜度的影響程度，由圖 4 與圖 5，機台數目有較大影響程度。

二、動態複雜度的實例探討

等候狀態越多，或是各狀態發生的機率越平均，等候線長度與等候時間越難預測，且易受投入率與服務率變化的影響，而提高系統的複雜度。因此，利用第三章建立的系統等候線複雜度模式，探討投入率與服務率變化、系統容量限制、平行機台數目對複雜度、平均等候長度、以及平均等候時間的影響，來驗證等候線複雜度評估模式。在討論投入率與服務率變化時，本研究以投入率與服務率的比值（利用率 ρ 值）進行參數變動，並考慮系統容量的限制，分別以單一機台、三台平行機台及五台平行機台三種情境進行探討。參數的設定如表 3 所示：

(一) 單一機台

對於單一機台，在不同的系統容量限制下，利用率 ρ 對於複雜度、平均等候線長度，以及平均等候線時間影響，如圖 9、圖 10 及圖 11 所示。由圖 9 得知，當 $\rho < 1$ 時，複雜度隨著 ρ 增加而增加；當 $\rho = 1$ 時，出現複雜度最大值；當 $\rho > 1$ 時，複雜度隨著 ρ 增加而減少。這是因為當 $\rho < 1$ 時，系統內零件數量少的狀態有較大機率發生，隨著 ρ 的增加，系統增加零件數量多的狀態機率，因此，系統狀態機率越分散，複雜度就越高；當 $\rho = 1$ 時，投入率與服務率相等，系統內各狀態的發生機率均等，複雜度為最大；當 $\rho > 1$ 時以後系統開始累積等候零件，使得系統內零件數量大的狀態機率增加，所以複雜度會隨之減少。另外，容量限制 K 越大的複雜度越大，因為容量較大的系統所出現的零件數量狀態越多，所以複雜度越大。

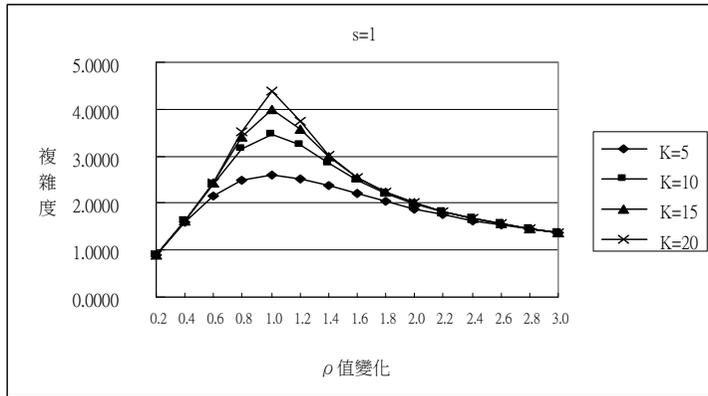


圖 9 s=1 時，複雜度的變化圖

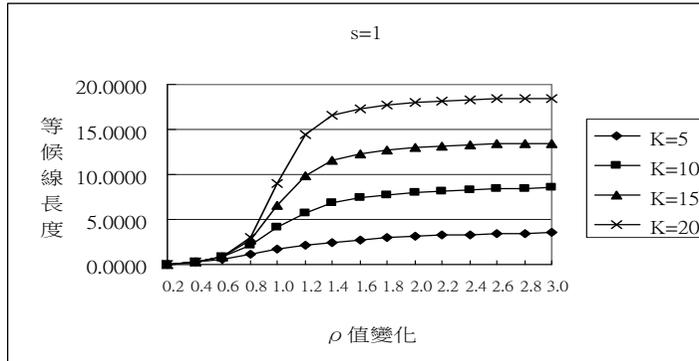


圖 10 s=1 時，平均等候線長度變化圖

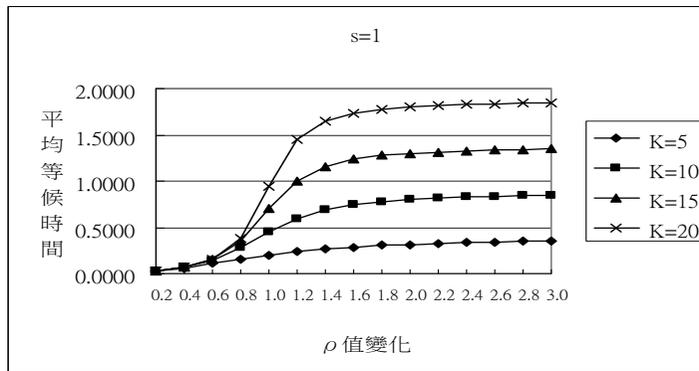


圖 11 s=1 時，平均等候線時間變化圖

表 3 參數設定

參數項目	設定數據								
系統容量限制 K (包含加工中與等候線上數目)	5	10	15	20					
平行機台數目 s	1	3	5						
平均投入率 λ (個 / 單位時間)	2	4	6	8	10	12	14	16	
平均服務率 $s\mu$ (個 / 單位時間)	10								
利用率 ρ 值	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	
	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0		

圖 10 及圖 11 表示平均等候線長度及平均等候線時間變化。當 ρ 大約為 1，因為投入率約等於服務率，平均等候線長度及平均等候線時間快速的增加，但是隨著 ρ 值的增加，系統達容量限制時，平均等候線長度及平均等候線時間趨近於常數值。比較圖 9、圖 10 及圖 11，系統複雜度越大時，平均等候線長度及平均等候線時間的變化幅度就越大，系統複雜越小時，平均等候線長度及平均等候線時間的變化幅度就越小。這表示平均等候線長度及平均等候線時間的變化越大，系統的不確定性較高，等候線越複雜。

(二)三台平行機台

對於三台平行機台，在不同的系統容量限制下，利用率 ρ 對於複雜度、平均等候線長度，以及平均等候線時間影響，如圖 12、圖 13 及圖 14 所示。在圖 12 中，複雜度隨著 ρ 的變化與圖 9 相似，複雜度先隨著 ρ 值增加而增加，但過了 $\rho=1$ 後，隨著 ρ 值增加而減少。但是在 $K=5$ 的時候，複雜度最大值並非出現在 $\rho=1$ 的時候，而是出現在約 $\rho=0.8$ 。

圖 13 及圖 14 顯示平均等候線長度與平均等候時間的變化趨勢與單機相似，但是平均等候線長度與時間卻比單機低；在多機的服務下，可以降低平均等候線長度與時間。同時比較複雜度、等候線長度與平均等候時間變化。比較圖 12、圖 13 及圖 14，系統複雜度越大時，平均等候線長度及平均等候線時間的變化幅度就越大，系統複雜越小時，平均等候線長度及平均等候線時間的變化幅度就越小，與單機台的趨勢相似。

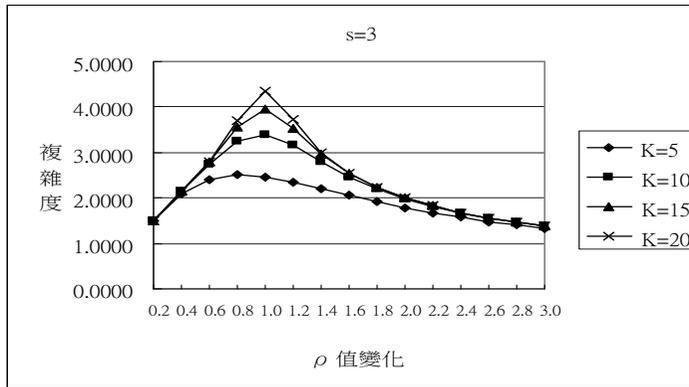


圖 12 s=3 時，複雜度的變化圖

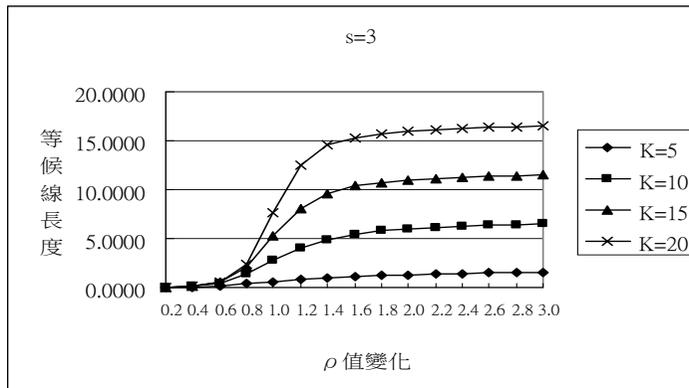


圖 13 s=3 時，平均等候線長度變化圖

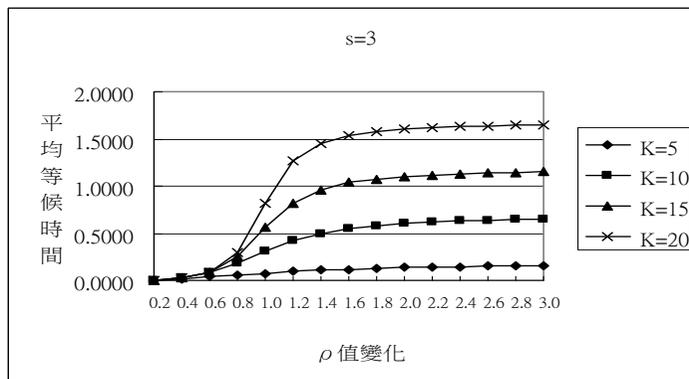


圖 14 s=3 時，平均等候線時間變化圖

(三)五台平行機

對於五台平行機台，在不同的系統容量限制下，利用率 ρ 對於複雜度、平均等候線長度，以及平均等候線時間影響如圖 15、圖 16、圖 17 所示。圖 15 的複雜度隨著 ρ 增加而增加，與圖 9、圖 12 的趨勢相似，複雜度隨著 ρ 值增加而增加，過了 $\rho=1$ 開始減少。但是在 $K=5$ 、 10 的時候，複雜度最大值並非出現在 $\rho=1$ 。 $K=5$ 的時候，複雜度最大值出現在約 $\rho=0.6$ ； $K=10$ 的時候，複雜度最大值出現在約 $\rho=0.8$ 。圖 16 及圖 17 之中，當 $K=5$ 時平均等候線長度與平均等候時間皆為 0，當容量與平行機台數目相同時，代表沒有等候線的存在，因此不管是平均等候線長度與平均等候時間都不存在，其餘容量限制時仍然會出現跟單一機台、三平行機台一樣的趨勢。

(四)平行機台變化對於複雜度影響

本小節探討平行機台數量對於複雜度的影響。固定系統容量限制為 5、10、15、20，同時觀察平行機數量為 1、3、5 的情況下變動 ρ 值對於複雜度的變化，結果如圖 18、圖 19、圖 20 及圖 21 所示。從圖 18 及圖 19， $K=5$ 及 10 的情況下，不同平行機台最大複雜度對應的 ρ 值不同。當 $K=5$ ， $s=1$ 時，最大複雜度出現在 $\rho=1$ ； $s=3$ 時，最大複雜度出現在 $\rho=0.8$ ； $s=5$ 時，最大複雜度出現在 $\rho=0.6$ 。當 $K=10$ ， $s=1$ 及 $s=3$ 時，最大複雜度出現在 $\rho=1$ ； $s=5$ 時，是出現在 $\rho=0.8$ 。但從圖 20 及圖 21， $K=15$ 及 20 的情況下，不同平行機台最大複雜度對應的 ρ 值皆為 1。所以隨圖 21， $K=15$ 及 20 的情況下，不同平行機台最大複雜度對應的 ρ 值皆為 1。所以隨著平行機台數量接近在系統容量時，發生最大複雜度的 ρ 值隨著降低；在系統容量與平行機台數量相差較大時，最大複雜度發生在 $\rho=1$ 時。另外，不論系統容量限制大小，在到達最大複雜度之前，平行機台數目小的複雜度會比平行機台數目大的複雜度低。比較在相同的機台數下，較大的系統容量有較大的最大複雜度。

伍、結論與後續研究建議

製造系統變得越複雜時，增加決策時選擇及控制上的困難度，也增加了影響系統行為的不確定性，因此，系統的複雜度的衡量被視為在面臨決策點時用來評估系統績效的一個重要指標。本研究以訊息熵當作衡量複雜度的工具，來探討彈性製造系統作業的靜態及動態複雜度。在靜態複雜度方面，以機台彈性、作業彈性以及產品混合比例等多樣性，並考慮可選機台的優先關係下，利用時間作為製造系統結構內狀態出現機率的加權值，導入熵的計算公式裡，用於評估製造系統靜態結構複雜

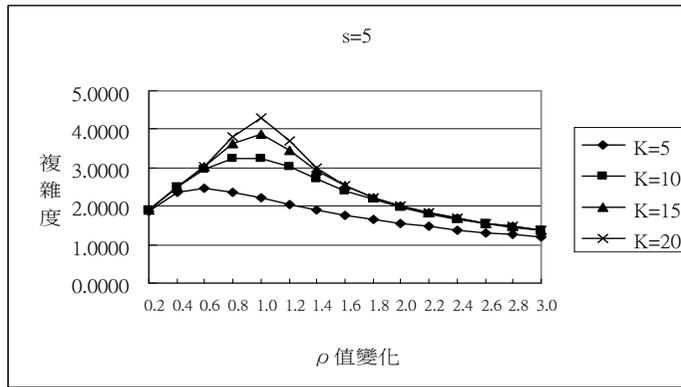


圖 15 $s = 5$, $K = 5, 10, 15, 20$ 複雜度變化圖

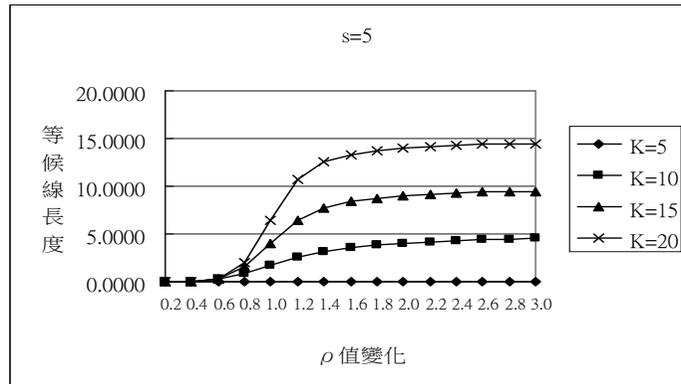


圖 16 $s = 5$, $K = 5, 10, 15, 20$ 平均等候線長度變化圖

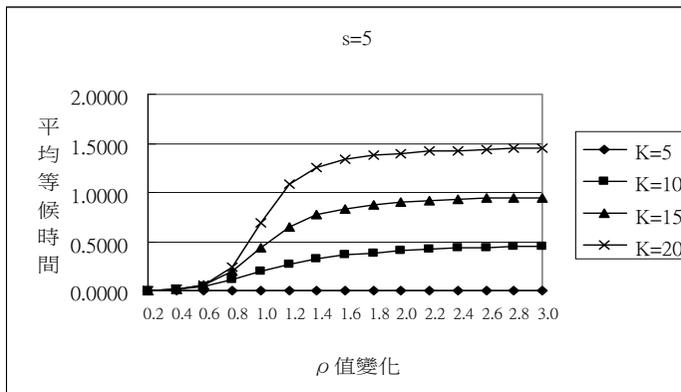


圖 17 $s = 5$, $K = 5, 10, 15, 20$ 平均等候時間變化圖

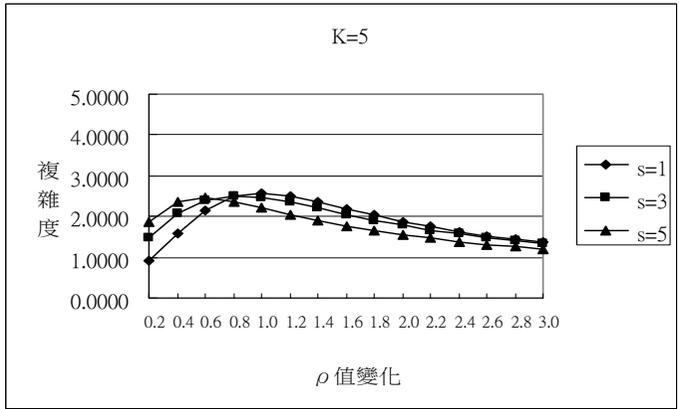


圖 18 $K=5$, $s=1,3,5$ 複雜度變化圖

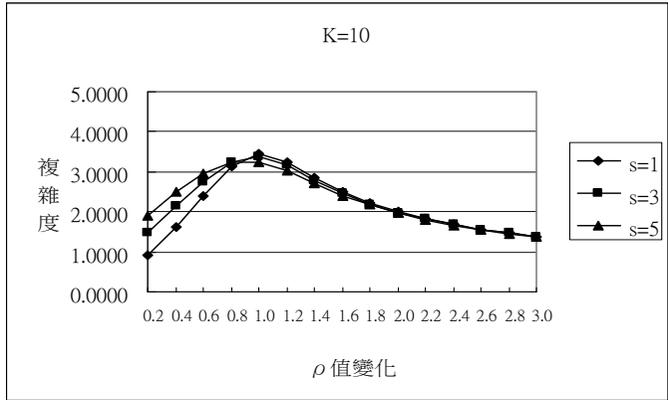


圖 19 $K=10$, $s=1,3,5$ 複雜度變化圖

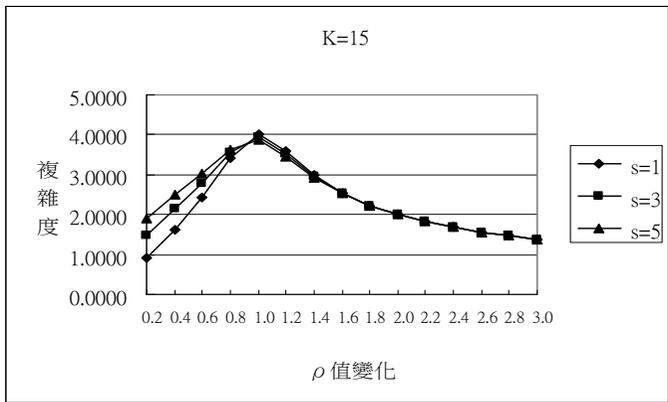


圖 20 $K=15$, $s=1,3,5$ 複雜度變化圖

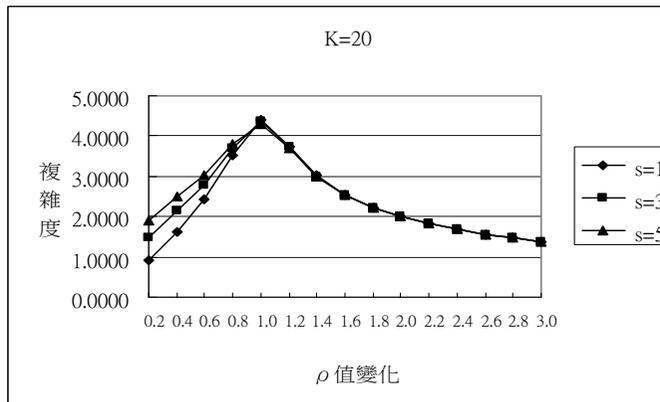


圖 21 $K = 20$ ， $s = 1, 3, 5$ 複雜度變化圖

度。在動態複雜度方面，在生產過程中由於投入率與服務率的變化造成零件等候的狀態，而等候狀態發生機率分佈狀況的不確定，造成管理者現場管理決策的複雜性提高，因此，本研究基於等候理論的學理基礎，分析系統的動態等候行為模式，結合熵的觀念，用於評估等候行為的動態複雜度。最後，透過兩個實例來驗證製造系統複雜度的評估，並探討不同的因子對複雜度的影響，綜合結論如下：

1. 靜態複雜度中，機台彈性與作業彈性增加，都會造成靜態複雜度上升的結果，並且從作業選擇機台的角度來看，機台彈性的變化對於靜態複雜度的影響比作業彈性高。
2. 在選擇機台時如果具有優先權的限制，複雜度會比沒有優先權低，因為系統受到限制而較為穩定。
3. 同時加工多項產品時，複雜度會在產品比例接近均等時出現最大值，印證 Deshmukh et al. (1998) 學者所提出的觀點。
4. 動態複雜度中，在系統容量與平行機台數量相差較大時，當投入率與服務率相等時，系統的複雜度最高。
5. 平均等候線長度及平均等候線時間的變化越大，系統的不確定性較高，等候線越複雜。
6. 隨著平行機台數量接近在系統容量時，發生最大複雜度的 ρ 值隨著降低。
7. 不論系統容量限制大小，在到達最大複雜度之前，平行機台數目小的複雜度會比平行機台數目大的複雜度低。
8. 在相同的機台數下，較大的系統容量有較大的最大複雜度。

在後續研究方面，有以下幾點建議：

1. 本研究在靜態複雜度討論機台以及作業彈性，除了機台與作業彈性以外，可嘗試從作業流程的相似性及機台之間的互動關係來探討對於系統結構複雜度的影響。
2. 在動態複雜度方面，可以在加入其他系統動態行為如機台故障、缺料、作業員曠工、緊急訂單等的考量進行動態複雜度的衡量。
3. 在一般績效與複雜度的關係探討方面，本研究只考慮系統等候線長度與系統等候時間，可以加入加工時間、在製品數量、機台稼動率等的系統績效值與複雜度的關係探討。

參考文獻

1. Arteta, B. M., & Giachetti, R. E. (2004). A measure of agility as the complexity of the enterprise system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 20, 495-503.
2. Calvo, R., Domingo, R., & Sebastian, M. A. (2008). Systemic criterion of sustainability in agile manufacturing. International Journal of Production Research, 46(12), 3345-3358.
3. Calinescu, A., Efstathiou, J., Schim, J., & Bermejo, J. (1998). Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing. The Journal of The Operational Research Society, 49, 723-733.
4. Deshmukh, A. V., Talavage, J. J., & Barash, M. M. (1998). Complexity in manufacturing systems part 1: Analysis of static complexity. IIE Transactions, 30(7), 645-655.
5. Frizelle, G., & Woodcock, E. (1995). Measuring complexity as an aid to developing operational strategy. International Journal of Operations & Production Management, 15(5), 26-39.
6. Goldman, S. L., Nagel, R. N., & Preiss, K. (1995). Agile Competitors and Virtual Organizations. New York: Van Nostrand Reinhold.
7. Goranson, T. (1999). The Agile Virtual Enterprise, Cases, Metrics, and Tools.

Westport: Quorum Books.

8. Khurana, A. (1999). Managing complex production processes. MIT Sloan Management Review, 40, 85-97.
9. Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal, 27, 379-423.
10. Sivadasan, S., Efstathiou, J., Frizelle, G., Shirazi, R., & Calinescu, A. (2002). An information-theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems. International Journal of Operations & Production Management, 22(1), 80-102.
11. Sivadasan, S., Efstathiou, J., Calinescu, A., & Huatuco, L. H. (2006). Advanced on measuring the operational complexity of supplier-customer systems. European Journal of Operational Research, 171(1), 208-226.
12. Wang, H., & Hu, S. J. (2010). Manufacturing complexity in assembly systems with hybrid configurations and its impact on throughput. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59(1), 53-56.
13. Zhang, T., & Efstathiou, J. (2006). The complexity of mass customization systems under different inventory strategies. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 19(5), 423-433.

2012年06月01日收稿

2012年06月22日初審

2012年10月30日複審

2012年12月05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三段 123 號
Address No.123, Sec.3, Dasyue Rd., Douliou City, Yunlin County 640, Taiwan
E-mail mslu@yuntech.edu.tw
專長 彈性製造系統，自動化，機器人，電腦整合製造
Specialty Flexible Manufacturing Systems, Automation, Robotics, Computer Integrated
Manufacturing

姓名 陳建富
Name Chien-Fu Chan
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三段 123 號
Address No.123, Sec.3, Dasyue Rd., Douliou City, Yunlin County 640, Taiwan