

隨機規劃法在半導體機台組態規劃之應用

Application of Stochastic Programming to Tool Portfolio Planning In Semiconductor Manufacturing

林毓舜 Yu-Shen Lin 張毓恆 Yu-Heng Chang 周雍強 Yon-Chun Chou

國立台灣大學工業工程研究所

Institute of Industrial Engineering, National Taiwan University

(Received June 21, 2004; Final Version May 5, 2005)

摘要：半導體製造的機台組態規劃問題是指依據產品需求與製程要求，考量投資報酬與風險等因素，以決定工廠內機台類別與數量的規劃程序，所面臨的困難主要在於產品需求的動態變化、複雜的製造途程、以及設備採購前置時間所綜合造成的不確定性。機台組態規劃常見的方法有公式試算、整數規劃、以及隨機規劃，文獻上還未見這些方法的比較分析，因此本文探討隨機規劃法在機台組態規劃的應用價值。隨機規劃法是一種適用於不確定性問題的數學規劃法，其效益與不確定性的程度有關，本文分兩大部分，第一部份是以產業的需求與途程實務資料，先量測產品類別、企業、工廠三個階層所面臨的需求變動特性，以界定需求的不確定程度，第二部份評估隨機規劃法在機台組態決策的適用性，並證實該方法確能有顯著效益。隨機規劃法還未為產業所普遍採用，本文建議在面對需求不確定的產業環境，晶圓製造廠值得採用這個方法。

關鍵詞：隨機規劃、機台組態規劃、半導體製造、產能規劃

Abstract : Tool portfolio planning is an important task in semiconductor manufacturing in which the types and quantities of processing tools are determined. The challenging facing tool portfolio planning is the uncertainty in product demand and process technology, complicated process routing and long procurement lead-time. Methods commonly used for tool portfolio planning include static computation using formulas, integer programming, and stochastic programming. There have been no studies on comparing the relative merits of these methods in application to tool portfolio planning. The paper is

made up of two parts. In the first part, we calibrate the uncertainties of demand in several product segments: in the aggregate demand of a company and in the output of several factories. Stochastic programming is a method that is suitable for problems with uncertain factors; its utility will depend on the level of uncertainty. We evaluate the economic value of using stochastic programming in the second part of the paper. We show that the benefits are very significant and thus recommend that stochastic programming be used in tool portfolio planning in the semiconductor manufacturing industry.

Keywords : Stochastic programming, Tool portfolio planning, Semiconductor manufacturing, Capacity planning

1. 緒論與問題背景

半導體製造需要鉅額的設備投資，是講求資產運籌效率的產業 (asset-heavy industry)，觀察該產業的發展歷程與現狀，產能與需求不能匹配會嚴重影響企業獲利甚至斷傷永續經營能力 (周雍強，民93)。機台組態 (tool portfolio) 規劃是產能的重要決策之一，所謂機台組態規劃是指依據產品需求與製程要求，考量投資報酬與風險等因素，以決定工廠內機台類別與數量的規劃程序，其規劃視野 (planning horizon) 一般在9至18個月以上，所以機台組態規劃不僅包含機台組合的抉擇 (choices)，也涵蓋產能水準的訂定。半導體晶圓製造廠大致分為少樣大量與多樣小量兩種生產模式，例如美國Intel公司製造CPU相關晶片、韓國Samsung電子公司生產記憶體晶片，都屬少樣式大批量的生產，相反地，多樣小量生產是我國廠商的獨特競爭力，台積電公司與聯電公司也正由於開創專業製造的經營模式，成為該產業的世界級領導廠商。晶圓廠若從事少樣大量的生產，其機台數量問題注重的是生產線平衡 (line balancing)，而多樣小量生產模式要面對產品組合經常變動的困擾，且由於不同產品所需的製造途程(包括機台與標準工時)會有不同，機台組態規劃更為複雜，另外，機台成本可達每台三、四億新台幣，因此機台組態是一個重要且複雜的產能決策，文獻可見多種規劃方法，本文以多樣小量的晶圓製造所處的不確定環境為對象，探討機台組態的最適當規劃方法。

半導體產業的機台組態規劃所面臨的困難主要來自於產品需求不確定、產品組合的變動、極長的設備採購前置時間、以及設備個體與廠區產能分析的高複雜度。一座晶圓廠內約有近百種的機台類別與群組，機台總數達三百以上，製造途程冗長，又有各種流線 (serial)、批量 (batch) 與叢集 (cluster) 機台，以及顯著的等候線現象 (Connors *et al.*, 1996)，產能的分析相當複雜 (Chou *et al.*, 2001)。半導體產品需求的不確定性也非常之高，圖1 顯示半導體元件近三十年的全球營收變動，1995年是一個分水嶺，之前的成長相當規則，之後卻是一個劇烈變動的時代，正到負30%

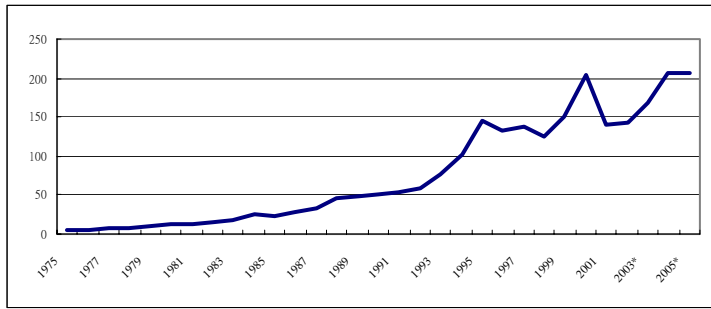


圖1 半導體元件全球總銷售額的變動（單位：十億美元）

的年變動率幾乎成為常態，需求預測的難度超過任一個公司的能力。對一個企業或是專業製造廠 (foundry) 而言，除了產品需求總量的不確定性外，產品組合的變化也很劇烈 (參見附錄)。由於機台從採購到上線的前置時間經常需要9~12個月以上，而規劃視野必須大於前置時間，產能決策與機台組態規劃往往必須以一年以後的需求為目標，因此這個決策面臨非常高的不確定因素，以及所伴隨的投資風險。

隨機規劃法是一種適用於不確定性問題的數學規劃法，由上所述，半導體製造有很高的不確定因素，文獻上有關機台組態規劃的決策方法不乏採用混合整數規劃模式或更簡單的公式試算，因此到底哪一種規劃模式最適合還未有定論。隨機規劃法的效益其實與相關因素的不確定性的程度有關，不確定性愈高，效益將愈顯著，相反地，若不確定性不顯著，簡略的方法可能就足敷所需。本文的目的即是針對需求的不確定性，探討隨機規劃法在機台組態決策的適用性，並以產業的需求與途程實務資料，量測其不確定性的程度，然後證明該方法確有顯著效益。本文所採用之資料均為多年來蒐集而得，部份資料為合作廠商所提供，本文僅能有限度地披露，以保障廠商權益。本文第二節將回顧並簡述文獻可見之機台組態的各種規劃方法，第三節將分析半導體產業需求不確定性的程度，這是實證研究的部份，針對幾類難得的需求資料，本文量測其不確定的程度 (level of uncertainty)，以作為不確定情境的參數表示 (representation)。第四節是分析隨機規劃法在第三節所得不確定情境的適用性，第五節將提出本文的結論，即這個產業的機台組態規劃應採用隨機規劃法，並討論應用時的一些應注意事項。

2. 機台組態的規劃方法

機台組態規劃問題的輸入資料是產品需求預測、產品的製造途程、以及機台的可用率、價格、產出率等相關資料，而抉擇變數 (choice variables) 則是規劃視野內各時期各機台類別所需的數量。文獻一般可見的機台組態規劃方法大致採用四類模式，包括(1)試算表模式、(2) 混合整

數規劃模式、(3)多目標績效模式、與(4)隨機規劃模式。試算表模型是以確定的產品需求做為輸入資料，然後依據每單位產品對機台的標準工時以及機台可用率、製程良率等資料，計算出所需要的機台數量。試算表模型，佐以離散事件的模擬驗證，是最基本的方法，產業實務相當常見（Witte, 1996; Wu *et al.*, 1998; Neudorff, 1999; Occhino, 2000）。這個方法必須透過試誤（trial-and-error）程序，而且所獲得的結果也未必是或接近最佳可能。

2.1 混合整數規劃模式

機台組態的核心抉擇具有組合優化（combinatorial optimization）的特性，因此在文獻上可見到採用線性規劃或混合整數規劃模式。（Yang, 2000）利用線性規劃法額外考量廠房面積的限制，來進行晶圓廠黃光區的產能與產品組合規劃。（Bermon and Hood, 1999）也利用線性規劃法來處理IBM規模最大的生產線的產能規劃問題，其模式除了用以計算給定需求所需的機台數量之外，若改變產能限制還能夠計算最佳利潤的產品組態（即敏感度分析）。這些混合整數規劃模式有如下的形式（以下稱為DM模式）。令 $d_{i,t}$ 為產品 i 在時期 t 的預期需求， $w_{i,h,k}$ 為產品 i 之加工步驟 j 在機台 k 的標準工時， α_k 為機台成本， C_k 為機台的單位產能， β_i 為產量不足需求所造成的短缺成本。抉擇變數 $x_{k,t}$ 為機台類型 k 在時期 t 的增添數量。由於同一個產品的製造步驟經常可由多個機台加工，再令 $v_{i,h,k,t}$ 為產品 i 加工步驟 h 被分配到機台 k 之數量， $y_{i,t}$ 為產品 i 在時期 t 的生產量， $u_{i,t}$ 為時期 t 產品 i 的短缺量。這個模式將在第四節的比較研究中作為參考模式。

$$(DM) \quad \text{Min} \quad \sum_t \sum_k \alpha_k \cdot x_{k,t} + \sum_t \sum_i \beta_i \cdot u_{i,t} \quad (1)$$

$$S.T. \quad \sum_t \sum_h w_{i,h,k} \cdot v_{i,h,k,t} \leq C_k \left(\sum_{\tau=0}^t x_{k,\tau} \right) \quad \forall k, t \quad (\text{機台產能限制})$$

$$\sum_{k=1}^M v_{i,h,k,t} \geq y_{i,t} \quad \forall i, h, t \quad (\text{生產量限制})$$

$$y_{i,t} + u_{i,t} \geq d_{i,t} \quad \forall i, t \quad (\text{需求總量限制})$$

$$x_{k,t} \in Z_+ \quad (\text{正整數})$$

$$u_{i,t}, y_{i,t} \in R_+ \quad (\text{正實數})$$

2.2 多目標產能績效模式

由於晶圓廠有很顯著的等候線現象，設備與製程變異甚大，流程時間相當長（約二個月），績效指標除了產出率外，流程時間也是重要的要求，因此機台組態決策是一個多績效目標的問題。Wu *et al.* (2004) 採用退火演算法以及等候線分析，求解產出率與流程時間兩個因素的最佳機台組態。Chou and Wu (2002) 採用靜態產能模式、等候線產能模式、以及模擬學等分析方法，提出一個規劃程序搜尋最佳的機台組態解，並發展效用與經濟分析模式，以滿足多項績效的要求。

2.3 隨機規劃法

數學規劃問題如果參數或輸入資料具有不確定性，隨機規劃法是普遍被採用的模式。機台組態問題中最主要的不確定資料是產品需求，所以採用隨機規劃法的主要建模部分便是將需求視為服從某種機率分配的隨機變數，這是與混合整數規劃模式的主要區別。隨機規劃法還有一個特點，便是隨機變數所代表的隨機事件 (event) 經常會將諸多抉擇變數在時間軸線上作出區隔。例如，在DM模式中， $x_{k,t}$ 與 $v_{i,h,k,t}$ 是兩個主要抉擇變數，以圖2 來說明，以 ξ 代表需求變數的事件，由於產能建置的前置時間很長，機台組態變數 ($x_{k,t}$) 必須在需求事件之前就決定，若實現的需求以情境樹表示 (S_1 、 S_2 、 S_3 為節點， p_1 、 p_2 、 p_3 為機率)，則分配抉擇 ($v_{i,h,k,t}$) 是在事件發生之後，依實現的情境 S_i 而決定。

圖2 的概念是所謂二階隨機規劃法的架構基礎，以不確定事件 (ξ) 發生的時點為界線，將抉擇變數區分為兩類，在事件之前的抉擇變數並不會受到隨機事件情境的直接影響，而在事件之後的抉擇變數是依實現的情境而決定其值。(Swaminathan, 2000; Ahmed, 2002; Christie and Wu, 2002; Hood *et al.*, 2003) 利用隨機規劃法來進行不同層次的產能規劃分析，抉擇變數主要有各廠產能配置、外包量、機台增添量、甚至作業分派；目標函數則是營收、存貨成本、外包成本、機台成本、產出不足需求的短缺成本、機台使用率等；所考慮的限制除上述DM模式的限制式外，還可包括資金預算。下列的模式是這些論文所採用的隨機規劃模式的典型形式（以下簡稱SM模式）。SM模式與DM模式的不同是在於各變數所新增的情境節點下標 s ，以及情境的機率 ($P_{s,t}$)，由於情境節點下標 s 與時期 t 有關，因此也可以 (s,t) 表示。

$$\begin{aligned}
 (SM) \quad & \text{Min} \sum_t \sum_k \alpha_k \cdot x_{k,t} + \sum_t \sum_s \sum_i P_{s,t} \cdot \beta_i \cdot u_{i,(s,t)} \\
 S.T. \quad & \sum_i \sum_h w_{i,h,k} \cdot v_{i,h,k,(s,t)} \leq C_k \left(\sum_{\tau=0}^t x_{k,\tau} \right) \quad \forall k, (s,t)
 \end{aligned} \tag{2}$$

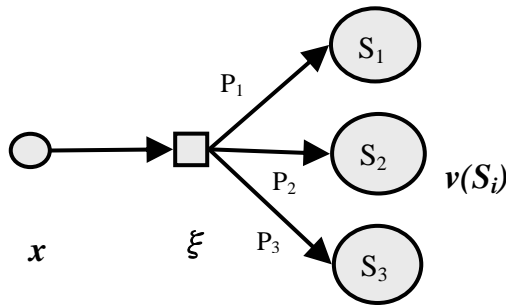


圖2 兩階隨機規劃模式

$$\sum_{k=1}^M v_{i,h,k,(s,t)} \geq y_{i,(s,t)} \quad \forall i, h, (s, t)$$

$$y_{i,(s,t)} + u_{i,(s,t)} \geq d_{i,(s,t)} \quad \forall i, (s, t)$$

$$x_{k,t} \in Z_+, \quad u_{i,(s,t)}, y_{i,(s,t)} \in R_+$$

3. 需求的不確定性

隨機規劃法求得的機台組態解代表的是一種穩健的抉擇，能讓營收或需求滿足率對於需求的變動不致於太過敏感。雖然隨機規劃法有其理論上的優點，然而在產業界甚少採用。隨機規劃法的效益須在有較高不確定性的問題才能顯現，然而半導體產業的不確定性是否高到必須採用隨機規劃法，在文獻上還未見比較性研究。本節先對該產業的需求的不確定性作實證分析，在下節再據以評估隨機規劃法相對於混合整數規劃模式的效益。以下首先介紹本文所採用的不確定性的量測工具，即幾何布朗運動過程。

幾何布朗運動 (Geometric Brownian Motion, 簡稱 GBM) 的隨機過程經常用於描述股票價格的變化, (Black and Scholes, 1973) 所推導出來的選擇權評價公式, 即是假設股票之變化將會服從幾何布朗運動, (Benavides *et al.*, 1999) 也以幾何布朗運動作為半導體產品的需求模型, 探討晶圓廠擴產最佳規模、彈性程度與時點。若時間 t 之需求 q_t 為 GMB 過程, 令時間基期為 $t=0$, 其需求為 q_0 , 則 q_t 可以表示為 (Dixit and Pindyck, 1994) :

$$q_t = q_0 \exp[(\mu - \frac{\sigma^2}{2})t + \sigma w_t] \quad (3)$$

其中 μ 為飄移參數, σ 為變異參數, $dw_t = \varepsilon_t \sqrt{dt}$, $\varepsilon_t \sim N(0,1)$, 換言之, 需求的對數(logarithmic) 成長率呈現常態分佈。

$$\ln q_t - \ln(q_0) = \ln \frac{q_t}{q_0} \sim N((\mu - \frac{\sigma^2}{2})t, \sigma^2 t) \quad (4)$$

本節將針對幾類難得的需求資料, 以GBM過程量測 (calibrate) 其變異程度。這些資料分別為全球的半導體IC的產能需求、一個擁有多個晶圓廠的企業的產能需求、以及個別工廠的產能需求。值得注意的是, 本文的重點並非以GBM過程來預測不可捉摸的需求, 而是以其變異參數 σ 來衡量需求變異的程度。

(Industrial Economic Model, 2002) 所提出的產業經濟模型中包含半導體IC五個市場區隔 (market segments) 的歷史產能需求與未來預測資料 (1991到2006年), 這五個區隔分別是高階製程的記憶體元件 (LEM)、高階製程邏輯元件 (LEL)、其他高階製程元件 (OLE)、其他積體

電路元件（OIC）以及其他半導體元件（OSC）。如同圖3，這些產品需求的時間序列有很高的變異。我們接著要分析其變異的程度。第一部步驟是對資料先作前處理，確定其為平穩的時間序列，第二步驟則是以GBM模式來估計變異參數的值。

以 $q_{i,t}$ 表示產品類別 i 在時間 t 的需求量，透過Dickey-Fuller檢定，在顯著水準設定在0.05的情況下，五個產品區隔的檢定統計量的p-value均遠遠地超過0.05，這意味著原始時間序列資料呈現了非平穩的特性。將原始的時間序列資料經由對數轉換 (logarithmic transformation)，接著對之進行一次差分，得到一個新時間序列資料 $r_{i,t}$ 。

$$r_{i,t} = \ln(q_{i,t}) - \ln(q_{i,t-1}) = \ln\left(\frac{q_{i,t}}{q_{i,t-1}}\right) \quad (5)$$

進行對數轉換的原因在於消除變異隨時間增大的問題，而透過一次差分的步驟可以將部分原先非平穩的時間序列資料，轉換成平穩的時間序列資料（p-value分別為0.0011、0.0018、0.0006、<0.0001、0.0009）。 $r_{i,t}$ 的意義就是原始序列資料 $q_{i,t}$ 的對數成長率，亦即需求量的對數成長率。如圖4 所示 $r_{i,t}$ 的估計機率分配均呈現近似的鐘型分配。

在確定上述對數轉換後的时间序列呈現穩態特性後，分別利用GBM模式分析五個市場區隔的歷史需求，所得到的變異參數值如表1，其中顯示各類別元件的需求成長率約為每年10%，變異參數在0.13~0.22之間。

圖5 是某廠商十年期間的歷史產能與產出量的時間序列，由於產出量事實上代表某種形式的產能需求，同樣利用GBM模式分析其變異，得到的飄移參數與變異參數值分別為0.2596 與 0.3339。

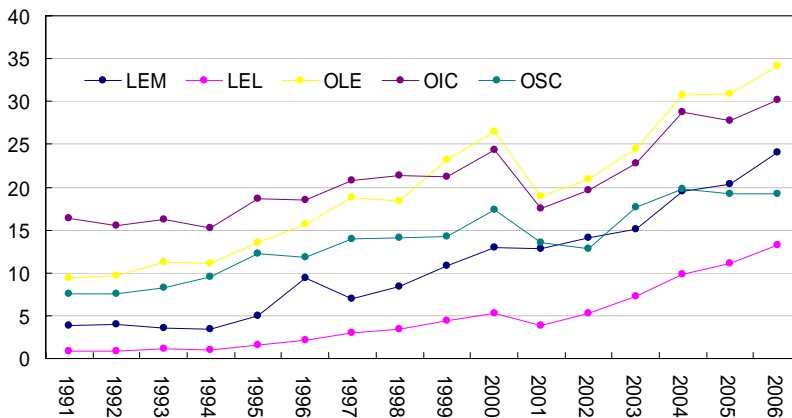


圖3 半導體IC需求量(百萬片晶圓/年) (Courtesy of Semitech)

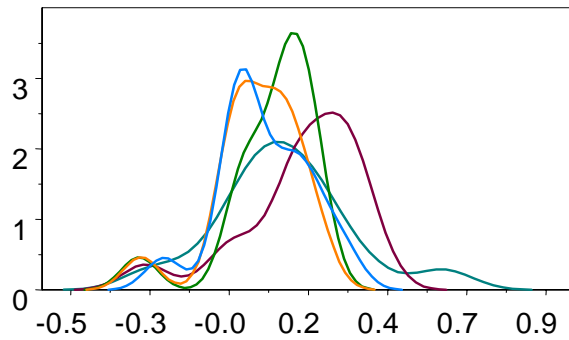


圖4 $r_{i,t}$ 的估計機率分配

表1 IC元件五種市場區隔之需求量飄移與變異參數

	LEM	LEL	OLE	OIC	OSC
μ	0.14	0.18	0.09	0.06	0.07
σ	0.22	0.19	0.14	0.14	0.13

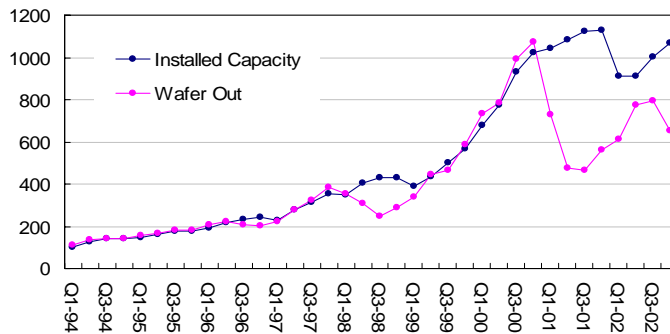


圖5 某製造廠商之歷史產能與產出量

附錄是我國某晶圓製造工廠一年半的時間範圍所生產的50多種產品（或稱routings）之中幾個主要產品的組合變動。由於各產品的生產量是排程的結果，不能以隨機過程視之，但是我們仍能估計其統計變異。本段將敘述對個別工廠生產量產、標準工時以及機台需求的組合變異。基本資料是七座晶圓廠18個月（78週的資料）的詳細生產量資料（附錄一僅為其中一座工廠的資料，該圖已將各週的生產量加總為各季生產量），我們先對各期（78週）的產品生產量進行標準化，以便消除總量變化對組合變異的影響，作法是，選取產出量前80%的產品，然後以產出量為權重

來計算需求的變異係數 (coefficient of variation)，其餘20%為試產產品，不納入產能規劃的考量。令 $D_{i,t}$ 為產品 i 在時期 t 的生產量。以 σ_i 表示產品 i 生產量的標準差， CV^D 表示生產量的變異係數。

$$CV^D = \sum_i \alpha_i \cdot CV_i \quad (6)$$

$$\text{其中 } \alpha_i = \sum_t D_{i,t} / \sum_i \sum_t D_{i,t}, \quad CV_i = \frac{\sigma_i}{E(D_i)}$$

其次，機台需求(R)是由產品需求(D)與工時資料(W)相乘而得，將產品生產量轉換為機台產能的需求量。令 $w_{i,k}$ 為產品 i 在機台 k 的工時，即 $R_{k,t} = \sum_i D_{i,t} \cdot w_{i,k}$ 。再針對各機台種類 k 計算其數量需求的變異係數。有一些機台對各種產品的工時並不敏感，所以這些機台的產能需求對產品組合不敏感，因此我們可先去除這些機台(CV值小於0.2)，然後對挑選出的機台種類計算其變異係數的平均值 (CV^R)。表2 是依據上述程序所計算的的七個晶圓廠的相關變異係數。由這些數據可知一個半導體製造廠所面對的機台需求的變異是很高的，其變異係數的平均值(七個廠)為0.23。

上述三類的需求數據代表三個層次的集成 (aggregation)，考量集成對標準差的影響，上述所得飄移參數值與變異係數沒有不一致的跡象。例如，五個產品區隔的飄移參數值介於0.13~0.22，而單一企業的飄移參數值為0.3339。由於產能規劃一般係以一個企業所面對的需求來考量，因此，我們認為飄移參數值與變異參數值分別為0.2596 與 0.3339的情況，可以作為不確定情境的實驗設計的參考。

4. 隨機規劃法的適用性分析

前節的分析顯示IC的產品需求變異很適合用GBM的隨機過程來描述。並且量測出某廠商歷史的產能需求的變異參數為0.3339，又該廠商的目標市場是LEM與LEL，根據表2這兩個市場區隔的需求變異參數值為0.19與0.22。本節將依據這些數值，以產業實際的製造途程資料來分析隨機規劃法的適用性。

4.1 基本資料

本文所採用的資料是某晶圓廠在籌建工廠時所規劃5種產品，每個產品的加工途程有數百步驟，機台類別有73種，機台單價在五百萬至四億 (NTD) 之間。由於中長期的產能規劃大多以主要機台為對象，我們以機台價格為篩選因素，選出17種機台（價格在一億兩千萬以上），進行組

表2 各晶圓廠生產量與機台產能需求的變異係數

	Plant 0	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6
CV^D	.45	.63	.84	.96	1.03	.94	1.12
CV^R	.13	.04	.11	.26	.37	.54	.18

態規劃。另外產能不足以滿足需求的短缺成本 (penalty cost) 訂為每片42,000至63,000元，平均來說，缺貨成本與機台成本比值大約是1比6000。

由於需求服從GBM過程(式4)，需求的對數成長率服從常態分配，但是多個時期的需求並非獨立變數，其總和還未有解析解的公式，因此文獻上一般的作法是以模擬法產生需求的時間序列路徑，並且以情境樹的形式表達。情境樹是由節點 (node) 與弧線 (arc) 組成，節點代表在某一時間點系統的狀態 (state)，弧線代表不確定因素的多種可能實現，一個節點可引出多條弧線，不過一般多採用二元情境樹 (binary tree)，如圖6 所示，節點S之值為V，由S而實現S1與S2的機率分別為p與(1-p)。S1與S2之值分別為V加上一個增量 ΔU 或減去一個下降量 ΔD 。(Cox *et al.*, 1979) 提出等量跳動的二元情境樹模型，即 $\Delta U = \Delta D$ ，並證明該模式用來表達GBM過程具有良好的逼近性質。(Jarrow and Rudd, 1983) 提出具有更佳漸進性質的等量機率二元樹模型，即 $p = 1-p$ 。

下一節的證證將採用等量機率的二元情境樹模型。以t為基期，則時期t+ Δt 之需求 $q_{t+\Delta t}$ 有兩種可能，分別以 $q_{t+\Delta t}^+$ 與 $q_{t+\Delta t}^-$ 表示。

$$\begin{aligned} q_{t+\Delta t}^+ &= q_t \exp[(\mu - \sigma^2)\Delta t + \sigma\sqrt{\Delta t}] \\ q_{t+\Delta t}^- &= q_t \exp[(\mu - \sigma^2)\Delta t - \sigma\sqrt{\Delta t}] \\ p &= 1-p = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

圖7 為基期需求訂為每月30,000片晶圓，經模擬產生的情境樹範例，一般所謂情境係指情境樹中由初始節點至最終階段節點的完整路徑，因此圖8 代表四種情境。

4.2 隨機規劃模式的效用 (Value of Stochastic Programs)

隨機規劃模式的效用可由兩個指標分析，一個是EVPI (*the expected value of perfect information*)，另外一個是VSS (*the value of the stochastic solution*)，可參考 (Birge and Louveaux, 1997)。本節將以圖7 的需求情境，比較DM模式與SM模式目標函數值的差異。以DM以及SM

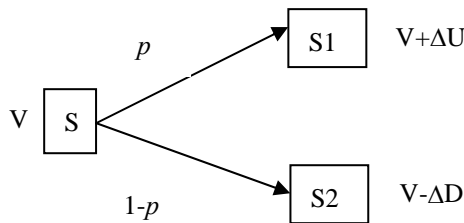


圖6 二元情境樹

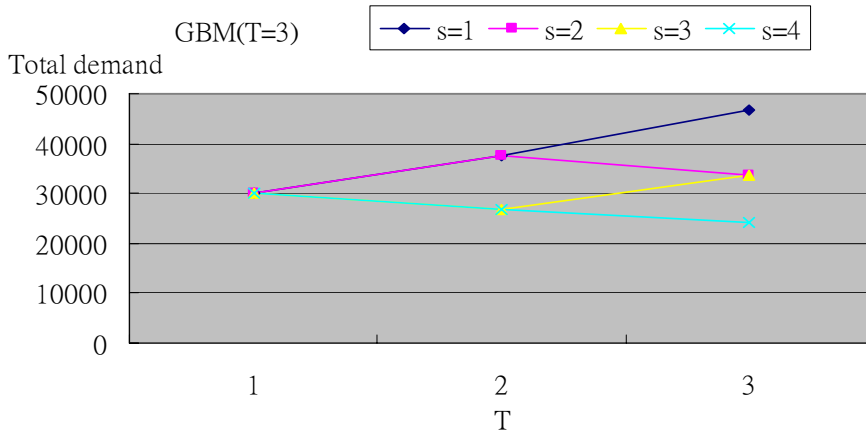


圖7 需求情境範例

分別代表2.1節與2.3節的機台組態規劃模式，以 $DM(s_i)$ 表示DM模式在情境 s_i 所求得最佳機台組態，以 $SM(s_i, i \in I)$ 表示SM模式對整個情境樹所求得的最佳機台組態，以下簡化其符號為 $SM(\cdot)$ 。以 Z 表示目標函數的成本，包含機台成本與短缺成本。由於 $DM(s_i)$ 所導致的 Z 值會依實現的情境而不同，因此其 Z 是一個包含兩個引數(arguments) 的函式，這兩個引數是機台組態與情境。例如， $Z(DM(s_1), s_2)$ 是依照情境 s_1 所求得的 $DM(s_1)$ 在情境 s_2 所實現的總成本。基於這樣的設定，EVPI 的定義是

$$EVPI = SM(s_i, i \in I) - \sum_i P_i \cdot Z(DM(s_i), s_i) \quad (8)$$

這個等式右邊第二項的意涵是，如果對隨機事件的實現值能夠完全預知，那麼若預知 s_i 會發生，我們必然會採用 $DM(s_i)$ 的機台組態，因此長期的期望總成本將是 $\sum_i P_i \cdot Z(DM(s_i), s_i)$ ，所以第二項所代表的意義便是完全資訊 (perfect information) 情況的最佳成本，而 $SM(\cdot)$ 是隨機規劃法所得最佳成本，所以EVPI是完全資訊的一個價值評量。

VSS是量測 $SM(\cdot)$ 與DM差異的一個指標。如果採用DM模式，輸入資料將是諸多情境之一，而非全部。若選取 s_j 作為可能發生的情境，則期望總成本將是 $\sum_i P_i \cdot Z(D(s_j), s_i)$ 。令 $VSS(s_j) = \sum_i P_i \cdot Z(D(s_j), s_i) - SM(\cdot)$ 則

$$VSS = \sum_j P_j \cdot VSS(s_j) \quad (9)$$

VSS可視為隨機規劃模式SM相對於混合整數規劃模式DM的效益的一個評量指標。

4.3 效用分析

本文的目的是評估隨機規劃法於機台組態規劃問題之適用性。表3 是以4.1節的資料作為輸入，DM與SM模式所求的最佳機台組態的總成本。SM模式的優越性可由EVPI與Optimality指標判定：

$$EVPI = SM(\cdot) - \sum_{i=1}^4 Z(DM(s_i), s_i)$$
$$Optimality = \frac{EVPI}{\sum_{i=1}^4 Z(DM(s_i), s_i)}$$

Optimality指標愈小表示SM解愈接近能預知未來所能得到的最佳解。表3 之EVPI值為33,983 (千)，Optimality指標值為0.25%，因此在這個例子，隨機規劃模式所得之解幾近於最佳解 (near-optimal)。

表4 是各 $VSS(S_i)$ 之值，所有 $VSS(S_i)$ 之平均為550,425 (千)。而 $Z(D(s_i), s_j)$ 的平均13,797,311，所以VSS約為 $Z(D(s_i), s_j)$ 的3.99%。換言之，隨機規劃法的效益將比整數規劃模式高出約4%，以一座晶圓製造廠投資成本約20億美元來看，這樣的效益不容忽視。情境對DM模式的影響可由各列看出，若實現的情境為 S_i ， $DM(S_j)$ ， $j \neq i$ ，較 $DM(S_i)$ 為大。舉例而言，在產品需求情境為 s_1 時，其 $DM(s_1)$ 小於 $DM(s_2)$ 、 $DM(s_3)$ 與 $DM(s_4)$ 。

表3 與4 的結果是一次的隨機實驗所得，重複十次試驗，將五種產品的組合比例隨機產生(均勻分配)，所得結果列於表5。EVPI的平均為33,689 (千)，optimality之平均為0.25%。採用隨機

表3 整數規劃模式與隨機規劃模式所得最小成本

	Deterministic model	Stochastic model
s_1	15,644,931	13,246,886
s_2	13,636,322	
s_3	12,288,178	
s_4	11,282,180	
Mean	13,212,903	13,246,886

表4 隨機規劃模式之價值

	DM(s_1)	DM(s_2)	DM(s_3)	DM(s_4)	SM(.)
s_1	15,644,931	15,738,863	16,088,563	16,472,339	13,246,886
s_2	14,388,961	13,636,322	13,986,185	14,497,972	
s_3	13,956,076	12,743,233	12,288,177	12,671,865	
s_4	13,411,005	12,201,062	11,749,241	11,282,179	
VSS(s_i)	1,103,357	332,984	281,155	484,203	

表5 隨機規劃模式之價值效用分析

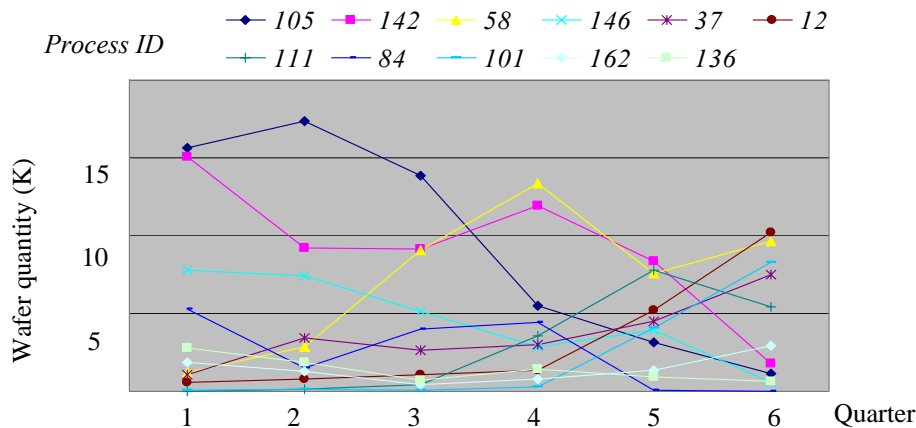
	EVPI	Optimality (%)	VSS	VSS效益 (%)
1	34,071	0.25	550,425	4.05
2	31,513	0.24	544,093	4.01
3	33,496	0.25	557,296	4.1
4	36,177	0.27	553,503	4.07
5	33,190	0.25	550,445	3.99
6	32,551	0.24	551,742	4.04
7	35,033	0.26	548,275	4.01
8	34,402	0.26	552,198	4.05
9	33,121	0.25	556,243	4.09
10	33,336	0.25	547,300	3.99
Mean	33,689	0.25	551,152	4.04

規劃法的效益可定義為VSS與 $Z(D(s_i), s_j)$ 的比值，則效益平均約為4.04%，標準差為0.037，以一座晶圓製造廠投資成本約20億美元來衡量，設備機台約佔7成，這樣的效益非常顯著。

5. 討論與結論

本文以實證的方法，證明半導體產業的機台組態規劃若採用隨機規劃法會比混合整數規劃法為佳，以機台成本與短缺成本的目標函式而言，預估會有4%的成本節約，以一座晶圓製造廠投資成本約20億美元來衡量，又設備機台約佔其7成，這樣的效益不容忽視。這個方法還未為產業所普遍採用，因此，本文建議在面對需求不確定的產業環境，晶圓製造廠非常值得進行這個方法的評估。若要採用隨機規劃法，有幾點注意事項。規劃視野不必太遠，太遠的視野並不見得能得到更準確的結果。更值得注意的是，如果在規劃視野內需求有成長的趨勢，則隨機規劃法的模式會將所有情境納入考量，包括最樂觀的情境，因此所得的機台組態解會傾向提前採購機台，為了防止這個隱藏的效果，隨機規劃模式SM目標式的機台成本應增加成本的折價率 (discount factor)。

附錄：某晶圓製造工廠之產品組合的變動 (weekly data converted to quarterly data)



參考文獻

周雍強，「高科技產業的產能投資的一個思維」，台灣大學嚴慶齡工業研究中心簡訊，第 52 期，民國 93 年，1-2 頁。

Ahmed, S., "Semiconductor Tool Planning via Multi-stage Stochastic Programming," *Proceeding of 2002 International Conference on Modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing*, Tempe, Arizona, U.S.A., April, 2002, pp. 153-157.

Benavides, D. L, Duley, R. and Johnson, B. E., "As Good as It Gets: Optimal Fab Design and Deployment," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 12, No. 3, 1999, pp. 281-287.

Bermon, S., and Hood, S., "Capacity optimization planning system (CAPS)," *Interfaces*, Vol. 29, No. 5, 1999, pp. 31-50.

Birge, J. R., and Louveaux, F., *Introduction to Stochastic Programming*, Springer-Verlag, New York, 1997.

Black, F. and Scholes, M., "The Pricing of Options and Corporate Liabilities," *The Journal of Political Economy*, Vol. 81, No. 3, 1973, pp. 637-654.

Chou, Y. C. and Wu, C. S., "Economic Analysis and Optimization of Tool Portfolio in Semiconductor Manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 15, No. 4, 2002, pp.447-453.

- Chou, Y. C., Wu, C. S., Kao, C. E., and Hsieh, S. H., "Integration of Capacity Planning Techniques for Tool Portfolio Planning in Semiconductor Manufacturing," *International Journal of Industrial Engineering*, December, Vol. 8, No. 4, 2001, pp. 279-288.
- Christie, M. E. R. and Wu, D., "Semiconductor Capacity Planning: Stochastic Modeling and Computational Studies," *IIE Transactions*, Vol. 32, 2004, pp. 131-143.
- Connors, D. P., and Yao, D., "A queuing network model for semiconductor manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 9, No. 3, August 1996, pp. 412-427.
- Dixit, A. K., and Pindyck, R. S., *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- Hood, S. J., Berman, S. and Barahona, F., "Capacity Planning Under Demand Uncertainty for Semiconductor Manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 16, No. 2, 2003, pp. 273-280.
- Industrial Economic Model User Guide*, Version 5.01, Sematech International, 2002.
- Jarrow, A. R., and Rudd, A., *Option Pricing*, Irwin, 1983.
- Neudorff, J., "Static capacity analysis using Microsoft Visual Basic," *International Conference on Semiconductor Manufacturing Operational Modeling and Simulation*, San Francisco, 1999, pp. 207-212.
- Occhino, T. J., "Capacity Planning Model: The Important Inputs, Formulas, and Benefits," *IEEE/SEMI International Semiconductor Manufacturing Symposium*, 2000, pp. 455-458.
- Swaminathan, J. M., "Tool capacity planning for semiconductor fabrication facilities under demand uncertainty," *European Journal of Operations Research*, Vol. 120, 2000, pp. 545-558.
- Yang, J., "An approach to determine appropriate fab development plans by taking space constraints and cost-effectiveness into consideration," *Proc. 9th Int. Symp. Semiconductor Manufacturing*, Sept. 2000, pp. 217-220.
- Witte, J. D., "Using static capacity modeling techniques," *Proc. 1996 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conf.*, Nov. 1996, pp. 31-35.
- Wu, M. C., Hsiung, Y., and Hsu, H. M., "A tool planning approach considering cycle time constraints and demand uncertainty," In *J Advance Manufacturing Technology*, Published online: 1 December 2004.
- Wu, W. F., Yang, J. L. and Liao, J. T., "static capacity checking system with cycle time considered," *Proceedings of the Seventh International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 1998, pp. 307-310.