

第五章 實證模型之發展

以前一章所推導之理論模型與實地情境為基礎，本研究將於本章詳細說明由理論模型發展至實證模型的過程，具體內容包括：在理論模型中各參數的意義及預期方向；在考慮實地情境的特性下如何為各項參數下操作性定義；以及實證模型推演的過程與變數衡量等。以下共分成三節，分別說明與產品多樣性、路徑彈性及機器彈性相關之實證模型的發展。

第一節 產品多樣性對生產績效之影響

一、產品多樣性對設備生產力之影響

(一) 理論基礎

由前一章的分析，吾人可知產品多樣性與設備生產力間的關係如(5)式所示，即：

$$R = 1/\{E[P] + s_{mi}(1/k) + s_{ma}[(k-1)/k]\} \quad (5)$$

因此，吾人可得：

$$1/R = E[P] + s_{ma} + 1/k(s_{mi} - s_{ma}) \quad (5.1)$$

$$= E[P] + s_{ma} - 1/k(s_{ma} - s_{mi}) \quad (5.2)$$

各變數對設備產出率的影響可表示如下：

$$R = f(k, s_{ma}, s_{mi}, E[P]) \quad (5.3)$$

(5.3)式隱含：當產品多樣性愈高時，由於處理的製程種類數(k)愈多，設備生產力隨之降低；然而，在檢視產品多樣性之影響的同時，吾人需控制每一生產批量之處理時間與啟動時間的影響，因為：當啟動時間增加時，不論是主啟動(s_{ma})或微啟動(s_{mi})，都會造成設備生產力下降，而當平均每一生產批量的處理時間($E[P]$)愈長，設備生產力也會隨之降低。

(二) 變數衡量

在本節中，吾人依據積體電路的生產特性，說明前述模型之變數衡量。

R：以個別機台之設備綜合效率值(Overall Equipment Effectiveness，簡稱OEE)衡量之。在理論模型中，由於吾人係以單一生產區域，單一機台為探討標的，因此，可以直接以個別機台在特定時間內之產出量衡量設備生產力，然而，在實際的生產環境中，個別機台的產出率會受產能可用度、產品組合及生產速度所影響，且影響幅度會因機台特性而異，因此，若以機台產出率為比較基礎無法評估不同機台間之生產力的相對高低，故而，本研究採用一相對指標，即設備綜合效率值衡量之。所謂設備綜合效率，為半導體業特有的生產力衡量指標，具體定義為：

$$\begin{aligned} \text{設備綜合效率(OEE)} &= \text{可用度} * \text{效率} \\ &= [(\text{總時間}-\text{當機時間}-\text{計劃性的機台閒置時間})/\text{總時間}] * [(\text{實際每小時的產出片數})/(\text{理論每小時的產出片數})] \\ &= (\text{實際生產總數})/(\text{理論可生產總數}) \end{aligned}$$

由上式，吾人可看出：由於該項指標將個別機台之實際產出量以理論產出量平減，因此可解決因機台特性的不同所導致之比較基礎不一致的問題。

k：以製程種類數衡量之，與理論模型一致。由於個案公司係致力於晶圓代工，其主要提供給顧客的產品即製程，因此，本研究以製程的多樣性來衡量產品多樣性的觀念。其中，由於製程的分類粗細有別，較粗的分類係以金氧互補半導體邏輯製程(CMOS Logic Process)、類比/數位訊號製程(Mixed-Mode Process)等來區分，較細的分類則依據製程特性來區分，例如：匣極線寬、光罩層數、雙井區技術或自行對準 CMOS(Self-alignment CMOS)技術等。基於匣極線寬(width of transistor)是半導體製程的主要特性，也是決定製程能力的關鍵，因此，本研究係以匣極線寬定義製程類別，此項衡量的適當性並可由多篇研究中獲得證實(i.e. Cooper et al. 1995; Hatch and Mowery 1998)。

s_{ma} , s_{mi} ：採用虛擬變數衡量之，凡屬於蝕刻區、擴散區或銅製程區者為 1，否則為 0。在理論模型中， s_{ma} 及 s_{mi} 係分別代表主啟動(major setup)與微啟動(minor setup)所需時間，本研究原擬以實際啟動時間衡量之，但由於個案公司在生產紀錄中並未刻意區分啟動時間及處理時間，因此，作者未能取得啟動時間之量化資料，不過，經由工程師訪談，作者了解：由於個案公司採用電腦整合製造，大部分的製程配方均內設於電腦程式中，除了少數幾個生產區域，大部分的機台花費在製程轉換的時間極低。因此，本研究乃依據各區域之生產特性，找出啟動時間較高之生產區域，包括擴散區、蝕刻區與銅製程區，據以設計衡量啟動時間之代理變數。

以擴散區為例，當在進行熱氧化製程時，為了防止晶片送入高溫爐管內時，晶片產生扭曲的現象，所以晶舟(搭載矽晶片的石英製工具)移入與移出爐管的速度必須控制在一個適當的範圍內；且晶片進出爐管的溫度也必須比熱氧化製程低，故而需要升溫(ramp up)與降溫(ramp down)的動作。另一方面，當機台前後處理兩種不同製程時，由於需調整製程條件外，因此，工程師需在製程開始之前額外進行製程條件測試(test run)以及機台的維護保養(preventive and maintenance)。基於此生產特性，在擴散區的機台通常需要較長的機台設定時間。

E[P]：以平均每一生產批量的實際處理時間除以每一生產批量的理論處理時間衡量之。在理論模型中，E[P]係代表個別生產批量之處理時間的平均值，因此，本研究擬以個別生產批量之實際處理時間衡量之，但考慮不同機台間存在生產速度的差異性，因此，本研究並以個別生產批量之理論處理時間予以平減，以控制機台間生產速度的差異。

其他控制變數：在理論模型中，吾人係假設在設備產能充分利用下，分析產品多樣性對設備生產力的影響，然而，在實際的生產環境中，每一部機台的利用率係取決於該機台所處理的產品總數，當機台所處理的產品數愈少時，其設備生產力愈低，因此，為控制該項因素的影響，吾人額外納入產品總數作為控制變數。另一方面，由於本研究的樣本包含了6個月的機台別資料，經初步測試發現存在一階自我相關的現象，故而，本研究並額外納入落後一期的設備綜合效率值(即 R_{t-1})以控制之。

(三) 實證模型

以理論模型為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如下：

$$OEE_t = \alpha^{NI} + \beta_1^{NI} VARIETY_t + \beta_2^{NI} TIME_t + \beta_3^{NI} SETUP_t + \beta_4^{NI} QTY_t + \beta_5^{NI} OEE_{t-1} + \varepsilon^{NI} \quad (M1-1)$$

其中，

OEE_t ：第t期個別機台的設備綜合效率值，

$VARIETY_t$ ：第t期個別機台處理之製程種類數，

$TIME_t$ ：第t期在個別機台上平均每一生產批量的實際處理時間除以每一生產批量之理論處理時間的比率，

$SETUP_t$ ：若該機台屬於蝕刻區、擴散區或銅製程區，則為1；否則為0，

QTY_t ：第t期個別機台生產之產品總數，

OEE_{t-1} ：第t-1期個別機台的設備綜合效率值。

一、 產品多樣性對生產週期時間之影響

(一)理論基礎

關於產品多樣性與生產週期時間的關係，吾人可由第四章第一節所推導出的(9)式來看：

$$\begin{aligned} E[W] &= \frac{[(n^2 k^2 E^2[T]/C^2)(C/n) + Var[T](n/C)]}{2[1 - (nkE[T]/C)]} \\ &= \frac{nC[(k^2 E^2[T]/C^2) + (Var[T]/C^2)]}{2[1 - (nkE[T]/C)]} \end{aligned} \quad (9)$$

因此：

$$\begin{aligned} E[F] &= \frac{nC[(k^2 E^2[T]/C^2) + (Var[T]/C^2)]}{2[1 - (nkE[T]/C)]} + E[T] \\ &= \frac{n[k^2 E^2[P] + 2k^2 E[P] + s_{mi}^2 - 2s_{ma}s_{mi} + (1+k^2)s_{ma}^2 + 2kE[P](s_{mi} - s_{ma}) + Var[P]]}{2\left\{C - nk\left[E[P] + \frac{1}{k}(s_{mi} - s_{ma}) + s_{ma}\right]\right\}} + \\ &E[P] + \frac{1}{k}(s_{mi} - s_{ma}) + s_{ma} \end{aligned} \quad (9.1)$$

由上式，吾人可得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[F]}{\partial C} &= \left\{ \frac{(nk^2 E^2[T])/C^2}{[1 - (nkE[T])/C]} - \frac{(nVar[T])/C^2}{[1 - (nkE[T])/C]} \right\} \cdot \{2[1 - (nkE[T])/C]\}^{-1} + \\ &\left\{ \frac{(nk^2 E^2[T])/C + (nVar[T])/C}{[1 - (nkE[T])/C]} \right\} \cdot \{-2[1 - (nkE[T])/C]\}^{-2} \cdot \left\{ \frac{(nkE[T])/C}{[1 - (nkE[T])/C]} \right\} < 0 \end{aligned} \quad (9.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[F]}{\partial k} &= \left\{ \frac{nC[(k^2 E^2[P])/C^2]}{[1 - (nkE[P])/C]} \right\} \cdot \left\{ -2[1 - (nkE[P])/C]^2 \cdot [-2nE[P]/C] \right\}^{-1} + \\ &nck(E^2[P]/C^2) \cdot \{1 - [(nkE[P])/C]\} > 0 \end{aligned} \quad (9.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[F]}{\partial E[P]} &= \{2[1 - (nkE[P])/C]\}^{-1} \cdot \frac{(2nkE[P])/C}{[1 - (nkE[P])/C]} + \\ &\left\{ \frac{(n^2 k^2 E^2[P])/C^2 \cdot (C/n) + Var[P](n/C)}{[1 - (nkE[P])/C]} \right\} \cdot (2nk/C) \cdot [1 - (nkE[P])/C]^2 + 1 > 0 \end{aligned} \quad (9.4)$$

$$\frac{\partial E[F]}{\partial Var[P]} = \frac{1}{2n\left\{C - nk\left[E[P] + \frac{1}{k}(s_{mi} - s_{ma}) + s_{ma}\right]\right\}} > 0 \quad (9.5)$$

因此，連同(11)式，可將各變數對生產週期時間之影響表示如下：

$$E[F] = f(k, C, E[P], Var[P]) \quad (9.6)$$

+ - + +

(9.6)式隱含：當可用產能(C)增加時，可降低平均生產週期時間；當製程種類數(k)增加時，亦即產品多樣性增加時，平均生產週期時間也隨之上升；當每一生產批量的平均處理時間($E[P]$)增加時，平均生產週期時間也會增加；生產批量處理時間的變異數($Var[P]$)同樣對平均生產週期時間具有正向影響。

(二) 變數衡量

依據積體電路之生產特性，前述模型之變數衡量可說明如下：

$E[F]$ ：以平均每一生產批量之實際生產週期時間衡量之，亦即，平均每一生產批量從到達機台至完成處置離開所需時間。

C ：以產能利用率衡量之。在模型中， C 係代表可用產能，吾人定義其為理論產能，然而，由於機台功能與特性的差異，使得不同機台間理論產能的比較並無意義，因此，本研究改以產能利用率衡量之。依據生產管理文獻，產能利用率可由產出面或時間面來定義，為與理論模型的設計一致，本研究採用的是時間面的定義，具體而言，產能利用率定義為：個別機台耗用於生產性或其他非生產性用途的時間佔該機台之理論可用時間的比例。亦即，(生產性時間+非生產性時間)/最大理論可用產能。所謂生產性用途，係指直接花在產品製造上的時間；非生產性用途，包括花費在機台維護、校正、啟動、測試、等候與當機上的時間。所謂最大理論可用產能係指以一天 24 小時，一個月 30 天作為計算產能的基礎。

k ：以製程種類數衡量之，與理論模型一致。由於個案公司係致力於晶圓代工，其主要提供給顧客的產品即製程，因此，本研究以製程的多樣性來衡量產品多樣性的觀念。此外，如前節所述，本研究係以匣極線寬定義製程類別，此項衡量的適當性可由多篇研究中獲得證實(i.e. Cooper et al. 1995; Hatch and Mowery 1998)。

$E[P]$ ：以個別生產批量實際製造時間之平均值衡量之，與理論模型一致。

$Var[P]$ ：以個別生產批量實際製造時間之變異係數(Coefficient of variation)衡量之，其定義為：(個別生產批量實際製造時間之標準差/個別生產批量實際製造時間之平均值)。在理論模型中， $Var[P]$ 係代表各生產批量製造時間之變異數，然而，考慮在不同機台上生產批量所需之製造時間不同，無法直接比較不同機台間製造時間變異數的相對大小，因此，依據作業管理文獻(ex. Hopp and Spearman 1996)，本研究採用標準化的變異係數衡量，亦即將個別生產批量實際製造時間之標準差以個別生產批量實際製造時間之平均值加以平減而得。

其他控制變數：由於本研究的樣本包含了6個月的機台別資料，經初步測試發現存在一階自我相關的現象，故而，本研究並額外納入落後一期的生產週期時間(即 $E[F]_{t-1}$)以控制之。

(三)實證模型

以理論模型為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如下：

$$CYCLE_t = \alpha + \beta_1^{N2} VARIETY_t + \beta_2^{N2} VAR_PT_t + \beta_3^{N2} TIME_t + \beta_4^{N2} UTIL_t + \beta_5^{N2} CYCLE_{t-1} + \varepsilon^{N2} \quad (M1-2)$$

其中，

$CYCLE_t$ ：第t期個別機台處理之生產批量的平均生產週期時間，

$VARIETY_t$ ：第t期個別機台處理之製程種類數，

VAR_PT_t ：第t期在個別機台上所處理之生產批量實際製造時間的變異係數，

$TIME_t$ ：第t期在個別機台上平均每一生產批量的實際處理時間除以每一生產批量之理論處理時間的比率，

$UTIL_t$ ：第t期個別機台的產能利用率，

$CYCLE_{t-1}$ ：第t-1期個別機台處理之生產批量的平均生產週期時間。

三、產品多樣性對生產品質之影響

(一) 理論基礎

依據生產管理文獻，品質為一多面向的觀念，涵蓋了多種不同的定義¹，但一般而言，可將之區分為內部品質(internal quality)與外部品質(external quality)，所謂外部品質，係指由顧客決定品質的優劣，評量客體為產品本身，屬於產品導向(product-oriented)的衡量，在此種定義下，品質的衡量主要取決於產品特性、產品價格、顧客偏好與顧客直觀等因素；為確保外部品質的達成，廠商需要衡量與監控內部品質，所謂內部品質，係指符合工廠內部品質規格的程度，當符合的程度愈高，品質水準愈高。內部品質主要係由許多與製程相關的因素所決定，例如：生產排程決策、人力管理政策以及生產作業的控制等等，具體衡量指標包括：

¹Garvin (1988)依據定義的不同將品質分成五類：直覺判定品質(Transcendent)、產品基礎品質(Product-based)、使用者基礎品質(User-based)、製造基礎品質(Manufacturing-based)與價值基礎品質(Value-based)。

報廢率與重製率(Hopp and Spearman 1996)。

在積體電路的製造環境中，衡量內部品質的主要指標有二：(1)生產線良率(Line yield)與(2)檢測後良率(WAT yield)。所謂生產線良率，係指完成全部製程的晶圓(wafer)數目佔最初進入生產線之晶圓數目的比例，主要考量的是晶圓的報廢(scrap)量；而檢測後良率則是指通過功能測試的晶粒(die)數目佔晶圓上之晶粒總數的比例。其中，生產線良率係由單站良率(step yield)所決定，因此，可再細分成各站的良率，單站良率的定義為： $(\text{進入該站的晶圓數目}-\text{晶圓的報廢數目})/\text{進入該站的晶圓數目}$ 。

另一方面，在特定生產區域(即黃光與濕蝕刻區)，為確保續後製程的順利進行，會在關鍵製程完成後進行品質檢查，除了剔除無法被繼續加工的晶圓外，對於少數可加以修正的錯誤，會再送回之前的製程進行重新加工，謂之晶圓重製(rework)，由於重製過的晶圓發生污染與破損的機率大於正常晶圓，因此，晶圓的重製率(rework rate)也是衡量生產品質的重要指標。

基於本研究之主要目的在於檢視製造彈性與製造環境的不確定性對生產績效的影響，著重的是營運面的管理，因此，係以內部品質，亦即製造基礎(manufacturing-based)品質為研究範疇，其中並以單站良率(step yield)與重製率(rework rate)作為品質的衡量變數。

依據晶圓代工的製程特性，影響內部品質的因素包括：產品組合、人員經驗、設備效能、原物料品質與製程變異(process variability)等，吾人可進一步將之歸類為：與產品組合有關、與製造環境有關以及與生產技術有關三類。

在**產品組合**方面，由於晶圓代工廠商係提供製造技術，為顧客製造各種不同的晶片，主要產品為各類 IC 製程，因此產品組合是由製程多樣性加以定義。其中，匣極線寬(width of transistor)是決定良率最重要的製程特性，以黃光微影製程為例，當線寬愈細時，愈不易顯像成形、對製程變異性的容忍度愈低，因此愈容易發生重製或報廢的情況；另一方面，當線寬愈細時，所需的氧化層厚度愈薄，氧化製程對雜質與微塵的敏感度愈高，愈容易造成良率的下降。故而，在本研究中，係以匣極線寬為基礎區分製程等級，並據以衡量製程多樣性。

在**製造環境**方面，則以環境變異性為影響良率的主要因素(Bohn 1995)。依據晶圓代工廠的特性，環境變異性可能來自於顧客需求的改變、工程實驗的進行、緊急訂單的插入、啟動頻率的增加、人員疏失、設備當機或原物料瑕疵等問題，由於變異性的來源甚多，本研究乃依據作業研究(eg., Hopp and Spearman 1996; Anupindi et al. 1999)，將環境變異性區分為三類：處理時間的變異性、生產批量到達時間的變異性以及產品需求的變異性，據以檢視製造環境的不確定性對生產品質的影響。

在**生產技術**方面，de Groote (1994)提出：彈性是生產技術的特性，也是因應

環境不確定性的機制，當生產技術的彈性愈高，環境不確定對生產績效的影響愈小，多篇製造彈性文獻也指出生產品質不僅取決於環境的不確定性，同時受到製造流程彈性的影響(Gerwin 1987; Correa 1994; Koste and Malhotra 2000)，而機器彈性與路徑彈性是其中最基本的二種彈性型態(Browne et al. 1984; Sethi and Sethi 1990)。因此，本研究採用機器彈性與路徑彈性作為生產技術的衡量指標。

綜而言之，依據理論文獻與個案公司的生產特性，本研究設計品質模型如下：

報廢率= f (製程種類數，製程時間變異性，到達時間變異性，產品需求變異性，機器彈性，路徑彈性，控制變數)

重製率= f (製程種類數，製程時間變異性，到達時間變異性，產品需求變異性，機器彈性，路徑彈性，控制變數)

(二) 變數衡量

依據個案公司的生產特性，說明前述模型之變數衡量如下：

報廢率：以個別工作站(step)在特定時間內報廢的晶圓數目佔該工作站當期處理之晶圓總數的比例衡量之。

重製率：以個別工作站(step)在特定時間內各機台發生重製之晶圓數目佔該機台所處理之晶圓總數的比例衡量之。

產品多樣性：依據晶圓代工的產業特性，以製程種類數衡量之，與前述模型一致。

製程時間變異性：以個別生產批量之處理時間的變異係數(coefficient of variation)衡量之，亦即，以個別生產批量之處理時間的標準差除以個別生產批量之處理時間的平均值而得。採用此項衡量的原因在於：處理時間的變異數(variance)是一項絕對衡量(absolute measure)，不同工作站的變異性無法直接比較，而處理時間的變異係數(coefficient of variation)經過標準化程序，為一相對衡量(relative measure)，可用以比較不同工作站間變異性的相對高低，因此，本研究採用之。此衡量也是作業研究中常用之變異性指標(Hopp and Spearman 1996)。

到達時間變異性：以個別生產批量之到達時間的變異係數衡量之，亦即，以前後兩生產批量之到達時間間隔(inter-arrival time)的標準差除以兩生產批量之到達時間間隔(inter-arrival time)的平均值計算而得。此項衡量不同於處理時間變異性之處在於：處理時間變異性僅考慮個別工作站的情況，而到達時間變異性則考慮了上下游工作站之間的交互影響。

產品需求變異性：以個別機台之總生產數目的變異係數衡量之，亦即，以特

定期間內個別工作站每日所處理之晶圓數目的標準差除以個別工作站平均每日處理之晶圓數目計算而得。

機器彈性：以特定期間內個別機台的功能轉換次數衡量之。依據製造彈性文獻，所謂機器彈性係指一部機台可以輕易轉換，以執行不同作業(operations)的能力(Gupta and Goyal 1989; Sethi and Sethi 1990; Koste and Malhotra 1999)。在分析性研究及模擬分析中，可執行的作業(operation)數以及轉換時間與成本是常用以衡量機器彈性的參數。而在個案公司實際的生產環境中，機台有單工與多工之別，亦即有些機台僅能專注於執行特定的功能(function)，有些機台則可執行多種功能，當產品組合改變、或特定 operation 的產能不足時，這些機台可透過設定的改變，轉換執行的功能以因應之。因此，考量理論基礎與實地情境，本研究以特定期間內個別機台功能轉換次數作為機器彈性的衡量。

路徑彈性：以個別機台群組中可選擇的生產路徑數目衡量之。所謂路徑彈性係指一個製造系統可以多種路徑生產特定生產批次的的能力(Sethi and Sethi 1990; Chen et al. 1992; Chandra and Tombak 1992)，由於路徑彈性可平衡各機台的負荷量，達到較有效率的生產排程，並可以因應突發性的當機或緊急批量的插入，故而對績效具有正向影響(Sethi and Sethi 1990; Tsubone and Horikawa 1999)。路徑彈性一般係透過機台群組的設計或增加個別工作站的生產路徑而達成，與個案公司的情境一致，因此，本研究採用個別生產批量在特定機台群組中可選擇的生產路徑數目作為路徑彈性的衡量。

其他控制變數：由於有研究顯示：高產能利用率所帶來的擁擠(congestion)現象對品質具有負面影響(Balakrishnan and Soderstrom 2000; Gupta, Randall and Wu 2001)，因此，本研究額外納入產能利用率作為控制變數。此外，由於本研究的機台別資料，經初步測試發現存在一階自我相關的現象，故而並額外納入落後一期的報廢率與重製率以控制之。

(三) 實證模型

以理論文獻為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如下：

$$SCRAP_t = \alpha^{N3} + \beta_1^{N3} VARIETY_t + \beta_2^{N3} VAR_PT_t + \beta_3^{N3} VAR_AR_t + \beta_4^{N3} VAR_OUT_t + \beta_5^{N3} MACH_t + \beta_6^{N2} ROUT_t + \beta_7^{N2} UTIL_t + \beta_8^{N2} SCRAP_{t-1} + \varepsilon^{N2} \quad (M1-3)$$

$$REWORK_t = \alpha^{N4} + \beta_1^{N4} VARIETY_t + \beta_2^{N4} VAR_RT_t + \beta_3^{N4} VAR_AR_t + \beta_4^{N4} VAR_OUT_t + \beta_5^{N4} MACH_t + \beta_6^{N4} ROUT_t + \beta_7^{N4} UTIL_t + \beta_7^{N4} REWORK_{t-1} + \varepsilon^{N4} \quad (M1-4)$$

其中，

$SCRAP_t$ ：第t期個別機台的報廢產品數佔總生產數目的比例，

$REWORK_t$ ：第t期個別機台的重製產品數佔總生產數目的比例，

$VARIETY_t$ ：第t期個別機台處理之製程種類數，

VAR_PT_t ：第t期個別機台所處理之生產批量之處理時間的變異係數，

VAR_AR_t ：第t期個別機台所處理之生產批量到達時間的變異係數，

VAR_OUT_t ：第t期個別機台所處理之總生產數目的變異係數衡量之，

$MACH_t$ ：第t期個別機台之功能轉換次數，

$ROUT_t$ ：第t期個別機台群組中可選擇之生產路徑數目，

$UTIL_t$ ：第t期個別機台的產能利用率，

$SCRAP_{t-1}$ ：第t-1期個別機台的報廢產品數佔總生產數目的比例，

$REWORK_{t-1}$ ：第t-1期個別機台的重製產品數佔總生產數目的比例。

第二節 製造彈性對生產績效之影響

一、製造彈性對設備生產力之影響

(一) 理論基礎

由前一章的分析，吾人可知機器彈性與設備生產力間之關係可以(11)式表達如下：

$$\begin{aligned} \Pi(P) &= [1 - \Phi(z_1)]\Phi(z_2) \\ z_1 &= -[h\mu - (h+k-1)s] / \sigma\sqrt{h} \\ z_2 &= -[(m-h)\mu - (m-h-k+1)s] / \sigma\sqrt{m-h} \end{aligned} \quad (11)$$

假設 m 與 u/σ 為定值，代入(11)式檢視 k 與 $\Pi(P)$ 的關係，可發現： $\Pi(P)$ 會隨著 k 的增加而降低，亦即，當機器彈性愈大時，產品需求未被處理的比例愈低，換言之，機台的產出率會隨著機器彈性的增加而遞增。此外，機器彈性與生產力的關係也會受到產品需求所影響，由(11)式我們可看出：固定總設備產能，亦即假設個別機台的產能(s)與機台總數(m)固定不變，當產品需求(μ)愈大時，完全彈性與有限彈性間的生產力差距會愈小，換言之，產品需求對設備生產力具有正向影響；另一方面，當產品需求的不確定性(σ)愈大時，機器彈性對生產力的影響也會隨之提高。

故而，吾人可將各變數對完全彈性(total flexibility)與有限彈性(limiting flexibility)之生產力差異的影響表示如下：

$$\Pi(P) = f(h, k, \sigma, \mu) \quad (11.1)$$

- - + -

其中，由於達到完全彈性時的設備生產力為最大值，與該值的差距愈小代表生產力愈高，因此，吾人可將(11.1)式轉換如下，其中， EP 代表設備生產力：

$$EP = f(h, k, \sigma, \mu) \quad (11.2)$$

++ - +

模型(11.1)隱含：當總產能固定時，設備生產力(EP)會隨著產品需求(μ)與機器彈性(k)的增加而增加，而產品需求的不確定性(σ)則對設備生產力具有負面影響。此外，當產品可指派至更多機台(h)生產，亦即路徑彈性愈高時，設備生產

力愈高。

(二) 變數衡量

在本節中，吾人依據積體電路之生產特性，說明前述模型的變數衡量如下：

EP：以設備綜合效率值(Overall Equipment Effectiveness，簡稱 OEE)衡量之。設備綜合效率為半導體業特有的生產力衡量指標，其具體含義為：

設備綜合效率(OEE)

= 可用度 * 效率

= [(總時間-當機時間-計劃性的機台閒置時間)/總時間] * [(實際每小時的產出片數)/(預計每小時的產出片數)]

h：以個別產品可選擇之機台數目衡量之，與理論模型一致。

k：以個別機台之功能轉換次數衡量之。在理論模型中，*k* 係代表機器彈性，以個別機台所能處理之產品數目描繪，而在個案公司實際的生產環境中，機台有單工與多工之別，亦即有些機台僅能專注於執行特定的功能(function)，可處理的產品種類較少，有些機台則可執行多種功能，當產品組合改變、或特定作業(operation)的產能不足時，這些機台可透過設定的改變，轉換執行的功能以因應之，可處理的產品種類數較多。因此，考量理論基礎與實際狀況的一致性，本研究以特定期間內，個別機台功能轉換次數作為機器彈性的衡量。

σ：以產品需求變異係數衡量之，亦即以特定期間內個別機台每日所處理之晶圓數目的標準差除以該期間內個別機台平均每日所處理之晶圓數目而得。在理論模型中，**σ** 係代表產品需求的變異數，然進行實證分析時，為利於不同型態之機台間的比較，本研究採用相對衡量指標，將產品需求標準差除以產品需求的平均值，據以衡量產品需求的不確定性。

μ：以特定期間內個別機台處理之晶圓數目衡量之，與理論模型一致。

(三) 實證模型

以理論模型為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如下：

$$OEE_t = \alpha^{FI} + \beta_1^{FI} ROUT_t + \beta_2^{FI} MACH_t + \beta_3^{FI} VAR_OUT_t + \beta_4^{FI} QTY_t + \beta_5^{FI} OEE_{t-1} + \varepsilon^{FI} \quad (M2-1)$$

其中，

OEE_t ：第t期個別機台之設備綜合效率值，

$ROUT_t$ ：第t期個別機台群組內個別生產批量可選擇之機台數目，

$MACH_t$ ：第t期個別機台之功能轉換次數，

VAR_OUT_t ：第t期個別機台所處理之產品數目的變異係數，

QTY_t ：第t期個別機台所處理之晶圓數目，

OEE_{t-1} ：第t-1期個別機台之設備綜合效率值，

ε^{Fl} ：為隨機誤差項。

二、製造彈性對生產週期時間之影響

(一)理論基礎

如第四章第二節所推導，吾人可知路徑彈性與生產週期時間的關係可以下式表示：

$$E[F_k] = \frac{\pi_k (1 + V_s^2)(V_a^2 + \rho^2 V_s^2)}{2k(1/E[P])(1 - \rho)(1 + \rho^2 V_s^2)} + E[P]$$

$$\text{Where } \pi_k = \left\{ \sum_{j=0}^{k-j} [k!(1 - \rho)/j!(k\rho)^{k-j}] + 1 \right\}^{-1} \quad (17)$$

由上式，吾人可得：

另外，將(17)式重新整理後可得：

$$E[F_k] = \frac{\pi_k}{k(1/E[P])} \cdot \frac{(1 + V_s^2)(V_a^2 + \rho^2 V_s^2)}{2(1 - \rho)(1 + \rho^2 V_s^2)} + E[P]$$

$$= V/R + P$$

$$\text{Where } V = \frac{(1 + V_s^2)(V_a^2 + \rho^2 V_s^2)}{2(1 - \rho)(1 + \rho^2 V_s^2)}$$

$$R = k(1/E[P])/\pi_k \quad (18)$$

由上式，我們可推得：

$$E[F_k] = f(V, R, P) \quad (18.1)$$

+ - +

由於V分別為生產變異性(variability)，即 V_s^2 與 V_a^2 的單調遞增函數，而R則為路徑彈性，即k的單調遞增函數，且R為E[P]的單調遞減函數，因此，吾人可續將各變數對生產週期時間之影響表示如下：

$$E[F_k] = f(k, E[P], V_s^2, V_a^2, \rho) \quad (18.2)$$

- + + + (?)

(18)式與(18.2)式隱含：生產週期時間(即 $E[F_k]$)會隨著生產變異性的增加而增加，其中生產變異性可能來自於處理時間的變異性(V_s^2 ，即process time variability)以及生產批量到達率的變異性(V_a^2 ，即arrival variability)；然而，路徑彈性(即 k)的存在則會改變生產變異性與生產週期時間的函數關係，亦即，隨著路徑彈性的增加，生產變異性對生產週期時間的影響將會降低，另一方面，產能利用率(即 ρ)則會增加處理時間變異性對生產週期時間的影響；至於每一生產批量的製造時間(即 $E[P]$)則對個別生產批量之生產週期時間(即 $E[F_k]$)具有正向影響。

(二) 變數衡量

在本節中，吾人依據積體電路之生產特性，說明前述模型的變數衡量如下：

$E[F_k]$ ：以平均每一生產批量之實際生產週期時間衡量之，亦即，平均每一生產批量從到達機台至完成處置離開所需時間。

k ：以每一生產批量可選擇之生產路徑數目衡量之，與理論模型一致。

$E[P]$ ：以個別生產批量實際製造時間之平均值衡量之，與理論模型一致。

V_s^2 ：以每一生產批量之實際製造時間的變異係數(coefficient of variation)衡量之，亦即以每一生產批量之實際製造時間的標準差除以實際製造時間之均值而得，與理論模型一致。

V_a^2 ：以個別生產批量到達時間之變異係數(coefficient of variation)衡量之。亦即以連續兩生產批量到達時間間隔之標準差除以到達時間間隔之平均數而得，與理論模型一致。

ρ ：以產能利用率衡量之。與理論模型的設計一致，本研究採用的是時間面的定義，具體而言，產能利用率定義為：個別機台耗用於生產性或其他非生產性用途的時間佔該機台之理論可用時間的比例。亦即，(生產性時間+非生產性時間)/最大理論可用產能。所謂生產性用途，係指直接花在產品製造上的時間；非生產性用途，包括花費在機台維護、校正、啟動、測試、等候與當機上的時間。所謂最大理論可用產能係指以一天 24 小時，一個月 30 天作為計算產能的基礎。

其他控制變數：如前述模型，由於本研究係採用 6 個月的生產資料，經測試發現存在一階自我相關現象，因此，在實證模型中額外納入落後一期的生產週

期時間作為控制變數(即 $E[F]_{t-1}$)。

(三)實證模型

以理論模型為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如下：

$$CYCLE_t = \alpha + \beta_1^{F2} ROUT_t + \beta_2^{F2} VAR_PT_t + \beta_3^{F2} VAR_AR_t + \beta_4^{F2} TIME_t + \beta_5^{F2} UTIL_t + \beta_6^{F2} CYCLE_{t-1} + \varepsilon^{F2} \quad (M2-2)$$

其中，

$CYCLE_t$ ：第t期在個別機台上處理之生產批量之平均生產週期時間，

$ROUT_t$ ：第t期個別機台群組中每一生產批量可選擇之生產路徑數目，

VAR_PT_t ：第t期個別機台所處理之生產批量實際製造時間的變異係數

VAR_AR_t ：第t期到達個別機台之生產批量到達時間間隔之變異係數，

$TIME_t$ ：第t期個別機台所處理之生產批量實際製造時間的平均值，

$UTIL_t$ ：第t期個別機台之產能利用率，

$CYCLE_{t-1}$ ：第t-1期在個別機台上處理之生產批量之平均生產週期時間，

ε^{F2} ：為隨機誤差項。

三、製造彈性對生產品質之影響

關於製造彈性對生產品質之影響，Correa(1994)認為：製造系統的彈性高低，會影響換機的頻率與容易程度，改變產品維持在標準內的機率，因而造成產品發生報廢或重製之機率的變動。Koste and Malhotra (1999)則提出：機器彈性與一致性品質之間可能存在取捨關係，換言之，當機器彈性愈高時，對一致性品質具有負面影響。

依據晶圓代工的生產特性，影響內部品質的因素大抵可歸為：與產品組合有關、與製造環境有關以及與生產技術有關三類。與產品組合有關的因素，如前一節所述，可由製程多樣性加以捕捉；至於製造環境方面，則以環境變異性為影響良率的主要因素(Bohn 1995)，環境變異的來源很多，包括：人員疏失、設備當機、原物料瑕疵等問題，或者是工程實驗的進行、緊急訂單的插入、啟動頻率的增加等都是造成製造環境不穩定的原因，為了捕捉這這些因素的影響，本研究依據作業研究(eg., Hopp and Spearman 1996; Anupindi et al. 1999)，將環境變異性區分為三類：製程時間的變異性、生產批量到達時間的變異性以及產品需求的變異性，據以檢視製造環境的不確定性對生產品質的影響；而在生產技術方面，本研究主要探討的是機器彈性與路徑彈性的影響。

所謂機器彈性，在個案公司係源自於個別機台可執行功能的多寡，而可執

行的功能數除了與機台本身的世代相關之外，也取決於購買機台時是否額外購買特定工具(tools)，當機台可執行的功能愈多時，可以處理的生產批量型態愈多，設備產能受到產品需求波動的影響愈小，但另一方面，發生換機的次數也愈頻繁，對品質的一致性具有負面影響；至於路徑彈性，則源自於在各工作站時，個別生產批量可以選擇之機台數目的多寡，由於在積體電路的生產流程中，有許多未預期改變的發生，例如：機器當機的發生無法事前預測，但卻對生產流程的順暢影響甚巨，因此，在生產現場會藉由機台群組的設計，減少製造環境中的不確定性對生產績效的傷害，同時也直接減少了生產改變的頻率，故而，可預期路徑彈性對內部品質具有正向影響。

在內部品質的衡量方面，本研究則依據實地環境的特性，選擇以單站良率(step yield)與重製率(rework rate)作為衡量變數。具體而言，在積體電路的製造環境中，衡量內部品質的主要指標有二：(1)生產線良率(line yield)與(2)檢測後良率(WAT yield)。所謂生產線良率，係指完成全部製程的晶圓(wafer)數目佔最初進入生產線之晶圓數目的比例，主要考量的是晶圓的報廢(scrap)量；而檢測後良率則是指通過功能測試的晶粒(die)數目佔晶圓上之晶粒總數的比例。其中，生產線良率係由單站良率(step yield)所決定，因此，可再細分成各站的良率，單站良率的定義為：(進入該站的晶圓數目-晶圓的報廢數目)/進入該站的晶圓數目。

另一方面，在特定生產區域(即黃光與濕蝕刻區)，為確保續後製程的順利進行，會在關鍵製程完成後進行品質檢查，除了剔除無法被繼續加工的晶圓外，對於少數可加以修正的錯誤，會再送回之前的製程進行重新加工，謂之晶圓重製(rework)，由於重製過的晶圓發生污染與破損的機率大於正常晶圓，因此，晶圓的重製率(rework rate)也是衡量生產品質的重要指標。

依據上述的推論，本研究形成品質模型如下：

報廢率= f (製程種類數，製程時間變異性，到達時間變異性，產品需求變異性，機器彈性，路徑彈性，控制變數)

重製率= f (製程種類數，製程時間變異性，到達時間變異性，產品需求變異性，機器彈性，路徑彈性，控制變數)

至於變數衡量與實證模型的部分，本研究沿用前一節模型(M1-3)與(M1-4)之設計，故於此不擬贅述。

第三節 製造彈性對生產成本之影響

一、 理論基礎

關於內部彈性與生產成本之間的關係，Correa(1994)提出：彈性水準的增加會改變製造系統的成本、速度與品質。具體而言，當製造系統的彈性愈高時，會有較低的換機時間(changeover time)，對設備資源的使用愈有效率，同時，也因換機時間較短之故，可有較小的生產批量，使生產流程更為順暢，進而增加機台與人員的利用率，造成生產成本的降低；另一方面，彈性製造系統擅於處理生產流程中未預期的生產改變，因此可以較少的資源克服生產中斷的問題，對資源的生產力與成本效率具有正向影響。Koste and Malhotra(2000)也具有類似的看法。

然而，除了彈性之外，依據生產管理文獻，決定生產成本的因素尚包括：產品複雜性與產能利用率(Sethi and Sethi 1990; Anderson 1995; MacArthur et al. 1998)，若欲檢視製造彈性對生產成本之影響，必須控制這些因素的改變。因此，本研究提出一般化的成本模型如下：

生產成本= f (機器彈性，路徑彈性，產品複雜性，產能利用率，其他控制變數)

在**產品複雜性**方面，依據積體電路的生產特性，決定製程複雜性最重要的因素有二：即匣極線寬(width of transistor)與光罩層數(Hatch and Mowery 1998)。所謂匣極線寬係指連結電晶體(transistor)之金屬線的寬度，當金屬線寬度愈細時，可容許較高的元件積集度，資訊傳輸的速度愈高，然而，當線寬愈細時，所需的製程技術愈高，電路元件對微塵、雜質或水氣的敏感性也愈高。以黃光微影製程為例，當金屬線的寬度愈細，微影成像時所需的解析度愈高，在成像過程中對環境潔淨度的要求愈嚴格，且對於製程變異性的容忍度愈低，因此需要使用較先進的微影設備，需要較多人力監測製程條件，愈可能發生晶圓重製，故而，需要耗用較多的生產資源。另一方面，光罩層數也是決定產品成本的關鍵因素，具體而言，在積體電路的製造過程中，需要重複地進行電路圖的圖像轉印，當電路設計愈複雜，所需的光罩層數愈多，由於完成每一光罩層平均需要約 60 道生產步驟，光罩層數愈多，生產過程愈長，所耗用的生產資源愈多。

在**產能利用率**方面，Cooper and Kaplan(1991,1992)指出單位產品成本的變化可能來自於生產效率的改變或是產能利用率的改變，二者應加以區分，方能觀察到生產效率的提昇對生產成本的影響。因此，與 Anderson (1995)及 Fisher and Ittner(1999)一致，本研究納入產能利用率作為控制變數，以釐清製造彈性對生產成本之影響。

在**其他控制變數**方面，由於在生產現場，產品係以生產批量(lot)的方式在各生產區域間移動，到各機台接受處置，設備與人力資源的耗用與生產批量數目直

接相關，因此，單位產品成本會因個別生產批量的報廢率與重製次數的增加而增加，是故，本研究額外加入個別生產批量的報廢率與重製次數作為控制變數。

是故，形成本研究之成本模型如下：

產品成本 = f (匣極線寬，光罩層數，機器彈性，路徑彈性，產能利用率，重製次數，報廢率)

二、變數衡量

依據理論基礎與半導體製造環境之特性，本研究說明變數衡量如下：

生產成本：以平均每一單位產品實際耗用的製造成本衡量之，其中包括直接原料、直接人工與間接製造費用，但不包括支援部門成本。

匣極線寬：所謂匣極線寬，係指連接電晶體之金屬線寬度，一般係以微米為衡量單位，1 微米是 1/10000 公分，目前個案公司的製程能力已達 0.13 微米。

光罩層數：在個別生產批量製造過程中所需使用的光罩(mask layers)數目。

機器彈性：在彈性變數的衡量上，首先，本研究以生產區域為基礎，比較各生產區域內各機台的相對彈性高低，當機台的彈性衡量大於該區域內各機台彈性衡量水準的中位數時，即歸類為高彈性機台，低於或等於中位數者歸類為低彈性機台。進而，計算生產過程中個別生產批量經過高彈性機台的次數佔總生產步驟的比例，據以衡量該生產批量之機器彈性。

路徑彈性：在彈性變數的衡量上，首先，本研究以生產區域為基礎，比較各生產區域內各機台群組之相對路徑彈性高低，當機台群組的彈性衡量大於該區域內各機台群組彈性衡量水準的中位數時，即歸類為高路徑彈性，低於或等於中位數者歸類為低路徑。進而，計算生產過程中個別生產批量經由高彈性群組處理的次數佔總生產步驟的比例，據以衡量該生產批量之路徑彈性。

產能利用率：以 90% 的產能利用率水準為門檻，將各生產區域區分成高、低三種不同產能水準，再依據生產過程中，個別生產批量經過高利用率機台次數佔總生產步驟數目的比例衡量之。

重製次數：以每一生產批量在生產過程中的重製次數衡量之。

報廢率：以每一生產批量的晶圓報廢數目佔該生產批量之總晶圓數目的比例衡量之。

三、實證模型

以理論文獻為基礎，考量個案公司之生產特性後，形成本研究之實證模型如(M3-4)，然而，為釐清製造彈性對生產成本的影響是直接或係間接透過其他績效衡量所致，本研究並額外檢視製造彈性對個別生產批量之重製次數、報廢率與生產週期時間的影響，因此，形成模型(M3-1)~(M3-4)如下：

$$SCRAPR = \alpha^{P1} + \beta_1^{P1} TECH + \beta_2^{P1} LAYER + \beta_3^{P1} MACHP + \beta_4^{P1} ROU TP + \beta_5^{P1} UTILP + \varepsilon^{P1} \quad (M3-1)$$

$$REWORKN = \alpha^{P2} + \beta_1^{P2} TECH + \beta_2^{P2} LAYER + \beta_3^{P2} MACHP + \beta_4^{P2} ROU TP + \beta_5^{P2} UTILP + \varepsilon^{P2} \quad (M3-2)$$

$$CYCLET = \alpha^{P3} + \beta_1^{P3} TECH + \beta_2^{P3} LAYER + \beta_3^{P3} MACHP + \beta_4^{P3} ROU TP + \beta_5^{P3} UTILP + \beta_6^{P3} REWORKN + \varepsilon^{P3} \quad (M3-3)$$

$$COST = \alpha + \beta_1^{P4} TECH + \beta_2^{P4} LAYER + \beta_3^{P4} MACHP + \beta_4^{P4} ROU TP + \beta_5^{P4} UTILP + \beta_6^{P4} SCRAPR + \beta_7^{P4} REWORKN + \varepsilon^{P4} \quad (M3-4)$$

其中，

TECH：個別生產批量之匣極線寬，

LAYER：個別生產批量之光罩層數，

MACHP：個別生產批量在生產過程中經過高機器彈性之機台的比例，

ROU TP：個別生產批量在生產過程中經過高路徑彈性之機台群組的比例，

SCRAPR：個別生產批量之平均報廢率，

REWORKN：個別生產批量之平均重製次數，

CYCLET：個別生產批量之平均生產週期時間，

COST：平均每一單位產品之實際生產成本，

UTILP：個別生產批量在生產過程中經過高利用率機台的比例，

ε^{P1} 、 ε^{P2} 、 ε^{P3} 、 ε^{P4} 為隨機誤差項。

茲將本章各節所論及各變數之定義及實證模型之預期方向，分別彙總列示於表 5-1 與表 5-2。

表 5-1 本研究各實證模式之變數定義彙總表

類別	變數名稱	定義--個別機台分析	定義—生產批量分析
自變數	機器彈性	機台轉換功能的次數	生產過程中經由高機器彈性機台處理的比例
	路徑彈性	個別機台群組內可選擇之生產路徑數	生產過程中經由高路徑彈性機台群組處理的比例
	產品多樣性	個別機台處理之製程種類數	--
	環境不確定性	個別生產批量處理時間之變異係數	--
	環境不確定性	生產批量到達時間之變異係數	--
	環境不確定性	個別機台處理之產品總數的變異係數	--
應變數	生產週期時間	個別機台所處理之生產批量的平均生產週期時間	平均每一生產批量的實際生產週期時間
	生產品質 (報廢率)	個別機台所處理之生產批量的平均報廢率	平均每一生產批量的平均報廢率
	生產品質 (重製率)	個別機台所處理之生產批量的平均重製率	平均每一生產批量的重製次數
	設備生產力	設備綜合效率值 =[(總時間-當機時間-計劃性的機台閒置時間)/總時間] * [(實際每小時的產出片數)/(預計每小時的產出片數)]	--
	生產成本	--	平均每一單位產品之實際製造成本
控制變數	產能利用率	(生產性時間+非生產性時間)/總時間	生產過程中經由高產能利用率之機台處理的比例
	產品複雜性	--	匣極線寬
	產品複雜性	--	光罩層數
	生產數量	特定時間內個別機台處理之產品數目	--
	啟動時間	為虛擬變數，凡屬於蝕刻、擴散或銅製程區者為 1；否則為 0	--
	處理時間	平均每一生產批量之製造時間	--

表 5-2 本研究之實證模式預期方向彙總表

自變數	變數定義	應變數				
		時間	品質		設備 生產力	生產 成本
			報廢率	重製率		
機器 彈性	1. 個別機台轉換功能的次數 2. 個別生產批量在生產過程中經過 高機器彈性的比例	+/-	+	+	+	-
路徑 彈性	1. 個別機台群組包含的生產路徑數 2. 個別生產批量在生產過程中經過 高路徑彈性的比例	-	-	-	+	-
產品 多樣性	個別機台處理之製程種類數	+	+	+	-	(略)
環境不 確定性	1. 生產批量處理時間之變異係數 2. 生產批量到達時間之變異係數 3. 個別機台處理之產品數目的變異 係數	+	+	+	-	(略)