

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 晶圓代工廠產能擴充時期機台組合之穩健設計方法

### A Robust Design Methodology of Machine-mix Configuration for an IC Foundry in Ramp-up Stage

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-037

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：許錫美 國立交通大學工業工程與管理學系

計畫參與人員：陳溪川，吳宏祥，陳彥匡

#### 1、中文摘要

因機台組合對生產績效影響甚鉅，且機台十分昂貴，晶圓代工廠設廠時在面對未來需求不確定的情況下，如何決定機台組合是一個相當重要的問題。

本研究考量產品組合不確定的情況下，給定生產期時間限制，以機台購置成本及產出損失成本最小化為目標，建構晶圓代工廠機台組合的決策機制。

**關鍵字：**機台組合、週期時間、產出、半導體

#### Abstract

A machine-mix configuration describes the type and number of machine required for factory capacity planning. Most previous studies have been devoted on developing methods for maximizing the throughput under a certain budget constraint. In an IC foundry, short cycle time is very important yet rarely discussed. This research proposes a decision-making mechanism for designing the machine-mix configuration under the given sets of product-mix and the probabilities, and cycle time constraint in an IC foundry. By using this mechanism, we can find out a machine-mix configuration that minimizes the sum of machine cost and throughput loss cost.

**Keywords:** Machine-mix, cycle time, throughput, product-mix, IC foundry.

#### 2、緣由與目的

晶圓代工業是我國重要產業之一，晶圓代工廠機台組合及數量對未來的生產會有很大的影響，好的機台組合會有較高的產出量，較短的生產週期時間，同時能盡量提高設備的利用率；相反的，較差的機台組合，會造成產能的閒置與浪費，嚴重的更可能會降低產出、提高週期時間。此外，晶圓代工廠的機台成本相當昂貴。因此，在建廠時，機台組合及其數量的決定十分重要。

晶圓代工廠的生產線十分複雜。一般晶圓代工廠廠內約有 100 多種機台，每個產品的加工道次約有 300~500 個，且生產流程中有重複回流現象 (Re-entry)，導致生產線相當複雜。因系統的複雜度太高，晶圓代工廠在新建工廠時，目前未見一個系統化的決策機制，輔助規劃者來決定機台組合及其數量。業界目前大多是憑以往擴廠的經驗，或以粗略的產能估算來決定機台組合及其數量。

L. H. Chen [1] 利用模擬配合實驗設計方法，針對不確定的生產情境，討論一個零工型生產系統各工作站應該有的機台數量，但未考慮機台成本。M. Mollaghasemi [3] 將機台數量規劃視為多目標問題，以縮短產品週期時間和提升各機台的使用率為目標，運用 STEM 方法配合模擬，找出最佳的機台數量。E. Neacy[4]運用模擬得到在製品、週期時間、產出的系統績效。隨之並利用這些系統績效值，配合一些啟發式法則作為增添機台的依據。D. P. Connors[2]發展一個開放式等候網路，討論機台設置的問題。計算每種機台分別增加一部時，系統週期時間改善的幅度，並優先新增單位成本改善率最大的機台。以上有關機台決策的文獻，其共同缺點為僅考量一種產

品組合，且僅適用於少量的機台種類及數量，對系統複雜度太高的晶圓代工廠無法適用。因此，本研究希望能夠發展一套系統化的決策機制，考量未來市場需求的不確定性，最小化機台購置成本及三年期望產出損失成本為目標，滿足給定的產品生產週期時間限制，決定最適機台組合及其數量。以提供晶圓代工廠在新建工廠時，決定機台組合及其數量之參考。

### 3、研究方法

本研究的目的是在已知未來三年將面對的多種產品組合及其發生機率的情況下，在滿足產品生產週期時間限制，以最小化最小化機台購置成本及三年期望產出損失成本為目標，發展一套晶圓代工廠最佳機台組合決策機制。上述成本函數如下：

$$f(M) = \sum_{k=1}^N (c_k \times m_k) + \sum_{i=1}^n \left\{ \Pr(PX_i) \times \left[ \sum_{j=1}^l [g_j(PX_i, M^*(PX_i)) - g_j(PX_i, M)] \times (p_j - vc_j) \right] \right\}$$

其中，

$n$ ：未來需求可能發生之產品組合種類。

$PX_i$ ：第  $i$  種產品組合， $i=1, \dots, n$ ，例如

$PX_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3})$  表示產品 1、產品 2、產品 3 之需求比例為  $X_{i1} : X_{i2} : X_{i3}$ 。

$\Pr(PX_i)$ ：產品組合  $PX_i$  發生機率， $i=1, \dots, n$ 。

$N$ ：機台種類

$M$ ：機台組合  $M = (m_1, \dots, m_N)$ ， $m_k$  表示第  $k$  種機台數， $k=1, \dots, N$ 。

$M^*(PX_i)$ ：對應第  $i$  種產品組合之單一產品組合最佳機台組合，

$M^*(PX_i) = (m_1^{(i)*}, \dots, m_N^{(i)*})$ ， $i=1, \dots, n$ ，其中  $m_k^{(i)*}$  表示  $M^*(PX_i)$  中第  $k$  種機台數， $k=1, \dots, N$ 。

$c_k$ ：表示第  $k$  種機台購置成本， $k=1, \dots, N$ 。

$g_j(PX_i, M^*(PX_i))$ ：利用機台組合

$M^*(PX_i)$  生產產品組合  $PX_i$ ，其中產品  $j$  之 3 年總產出量， $i=1, \dots, n$ ， $j=1, \dots, l$ 。

$g_j(PX_i, M)$ ：利用機台組合  $M$  生產產品組合  $PX_i$ ，其中產品  $j$  之 3 年總產出量  $i=1, \dots, n$ ， $j=1, \dots, l$ 。

$p_j$ ：產品  $j$  的價格， $j=1, \dots, l$ 。

$vc_j$ ：產品  $j$  的變動成本， $j=1, \dots, l$ 。

本研究之解題解題流程如下：

(1) 找尋起始解；(2) 計算機台購置成本及三年期望產出損失成本；(3) 檢查是否還有改善空間；(4) 若有，尋找下一個改善解。

【步驟一】單一產品組合之最佳機台組合產生模組—對所有未來的多種產品組合，針對每一種各產品組合  $PX_i$ ，找出其對應之最佳機台組合  $M^*(PX_i)$ 。

【步驟二】起始解產生模組—用來產生產品組合不確定時之一組起始機台組合

$M^k = (m_1^k, \dots, m_N^k)$ ， $k=0$ ，即起始機台組合

$M^0 = (m_1^0, \dots, m_N^0)$ 。

【步驟三】產出績效計算模組—模擬計算系統在週期時間限制下的產出量。即計算  $g_j(PX_i, M^*(PX_i))$  和  $g_j(PX_i, M^k)$  在週期時間限制  $CT^{Max}$  下的產出量， $M^k$  表示第  $k$  次搜尋之機台組合。

【步驟四】成本函數計算模組—計算第  $k$  次搜尋之機台組合期望總成本  $f(M^k)$ 。

【步驟五】是否還有改善空間？若是，到步驟六；若否，到步驟七。

【步驟六】改善解產生模組—找出下一個改善解， $k=k+1$ ，並跳回步驟三。

【步驟七】結束搜尋—產生最佳解  $M^*$ 。

以下將對上述步驟做一較詳細的說明：

3.1 【步驟一】單一產品組合之最佳機台組合產生模組，其步驟如下：

(1) 起始解產生模組

根據等候理論  $\dots = \frac{\lambda}{s}$ ，考慮機台因為

當機、預防保養等因素而導致的可用率損失後，就可用下式求出各種機型需要的機台數目上限，將此上限定義為起始解機台組合  $M_1$ 。

$$s = \left[ \frac{\lambda \sim (1 + (1 - U))}{\dots} \right] = \left[ \frac{\lambda \sim (2 - U)}{\dots} \right]$$

其中， $\lambda$ 為單位時間平均到達率、 $\sim$ 為每一 Lot 平均使用機台的單位時間、 $\dots$ 為機台使用率、 $U$ 為扣除當機後的可用率(Up Time)。為了保證起始機台組合有足夠的產能，上式中的使用率 $\dots$ 寬放為 0.7。

### (2)在製品搜尋模組

在製品量很難用簡單的公式精確估計，因此本研究運用模擬並配合固定在製品 (con-wip) 投料，先假設起始在製品量 = 目標產出量，計算模擬產出量，接著利用 Little's Law  $L = \lambda \bar{S}$ ，計算目前產出量與預期產出量的差額，並配合模擬所得的週期時間，計算應該增加(減少)的在製品量。利用新的在製品量，模擬求得新的產出量及週期時間。假設(在製品--產出曲線)為一直線，反覆運用線性內(外)插法修正在製品量，尋找達到目標產出量時的最佳在製品量。

(3)模擬計算系統的產出量、週期時間及機台利用率。並計算機台總成本，檢查產出量、週期時間是否符合限制條件，若是，跳至步驟(4)；若否，跳至步驟(5)。

(4) 機台數量是否有改善空間？若是，跳至步驟(5)；若否，跳至步驟(6)。

(5)改善解產生模組：找出下一個改善解。跳回步驟(2)。

如果目前機台組合的產出量及週期時間無法滿足限制條件，或是機台數目可以再進一步降低，就必須再找一組新的機台組合。

起始解機台組合  $M_i$  因為配置較多的產能，可以達到預定的產量，而且週期時間會比管理階層所設定的目標要來的短。

利用簡單的供給需求法則計算在產能沒有寬放的情形下，至少需要的機台數量  $M_R$ 。以下式定義最低需求機台組合  $M_R$ 。

$$\begin{aligned} \text{工作站 } i \text{ 最低需求機台數 } s_i &= \left[ \frac{\text{需求時間}}{\text{供給時間}} \right] \\ &= \left[ \frac{\text{所有產品在工作站 } i \text{ 上加工總時間}}{\text{總可用時間} \times \text{工作站 } i \text{ 可用率}} \right] \end{aligned}$$

起始機台組合  $M_i$  和最低需求機台組合  $M_R$  兩者在各工作站數量的差距即是可刪除的機台組合。從起始機台組合到最低需求機台組合之間存在著一個刪除順序，將按照此刪除順序刪除機台。找出刪除順序後，採用二分搜尋法來搜尋機台購置總成本最低，同時滿足產出及週期時間限制的最佳機台組合。

以下將介紹決定機台刪除順序之方法：

使用率可以說是影響整個系統績效的重要關鍵。其影響方式分為兩種：目前機台的使用率 $\dots$ 和機台減少一部後增加的使用率 $\dots$ 。利用  $L = \dots \times \dots$  當作衡量機台減少後所產生的影響。每一部可刪除的機台即為一個可行方案，以  $L$  值及機台成本為評估準則，採用 PROMETHEE II 之評估法，來決定各機台優先刪除順序，並針對評估準則制訂評估函數  $P_j$ ，計算機台  $a$  和機台  $b$  在此評估準則之下相互比較的結果。 $P_j(a, b)$  代表機台  $a$  比機台  $b$  優先刪除的程度：

$$P_j(a, b) = P_j[d_j(a, b)]$$

另假設機台成本與  $L$  值為相同重要的考量。換言之，即希望取得成本與績效(對系統影響程度)間的平衡，故兩者之權重值  $W_{\text{成本}} = W_L = 0.5$ 。藉由機台兩兩相互比較，計算每部機台的評估值  $w(a)$ 。 $w(a)$  的計算公式如下：

$$\Pi(a, b) = \sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b)$$

$$w(a) = w^+(a) - w^-(a)$$

$$w^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(a, x)$$

$$w^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \Pi(x, a)$$

其中， $\Pi(a, b)$  為對所有評估準則而言，機台  $a$  比機台  $b$  優先刪除的加權評估值總和； $w_j$  為決策準則  $j$  的權重； $w^+(a)$  為對所有機台來說，機台  $a$  比其他機台優先刪除的程度； $w^-(a)$  為其他所有機台比機台  $a$  優先刪除的程度； $n$  為總機台數。

為了避免機台在刪除之後造成嚴重的瓶頸，若某一部機台刪除後，預估使用率大於 0.9，則此機台不予刪除。

由此，可以找出對應未來第  $i$  種可能的產品組合  $PX_i$  之單一產品組合最佳機台組合  $M^*(PX_i)$ ， $i=1, \dots, n$ 。以此最佳機台組合  $M^*(PX_i)$  生產產品組合  $PX_i$ ，可以滿足產出及生產週期時間之限制，且機台購置總成本會最低。

(6) 找到近似最佳解，停止搜尋。

### 3.2 【步驟二】起始解產生模組

由 3.1 節所產生的各種產品組合所對應的最佳機台組合  $M^*(PX_i)$ ， $i=1, \dots, n$ ，其同一工作站中所需的機台數不盡相同。定義最小機台組合  $M^{\min} = (m_1^{\min}, \dots, m_N^{\min})$ ，其中  $m_k^{\min} = \min(m_k^{*(1)}, \dots, m_k^{*(i)}, \dots, m_k^{*(n)})$ ， $m_k^{*(i)}$  表示產品組合  $PX_i$  之最佳機台組合  $M^*(PX_i)$  中之第  $k$  種機台數， $k=1, \dots, N$ ；最大機台組合  $M^{\max} = (m_1^{\max}, \dots, m_N^{\max})$ ，其中  $m_k^{\max} = \max(m_k^{*(1)}, \dots, m_k^{*(i)}, \dots, m_k^{*(n)})$ 。因此，搜尋多種產品組合之最佳機台組合，將介於最大機台組合  $M^{\max}$  和最小機台組合  $M^{\min}$  之間。此模組將以  $M^{\max}$  當作起始解  $M^0 = (m_1^0, \dots, m_N^0)$ 。

### 3.3 【步驟三】產出績效計算模組

吾人利用 Pacemaker MCP 軟體作為產出績效計算工具，快速的計算出系統在週期時間限制下的最大產出。

### 3.4 【步驟四】成本函數計算模組

將第  $k$  次搜尋所找出的機台組合  $M^k$ 、步驟一所找出之產品組合  $PX_i$  之最佳機台組合  $M^*(PX_i)$ ，和經由步驟三產出績效計算模組所求得之產出  $g_j(PX_i, M^k)$ 、 $g_j(PX_i, M^*(PX_i))$ ，輸入此成本函數計算模組，可求得第  $k$  次搜尋之機台組合  $M^k$  的機台組合期望總成本

### 3.5 【步驟六】改善解產生模組

起始解產生模組中所產生的起始解  $M^0 = M^{\max}$ ，介於  $M^{\max}$  和  $M^{\min}$  間的機台數即為可能刪除的機台數。

一個好的刪除順序會先刪除對系統產出績效影響不大，同時可以快速降低機台成本的機台。決定機台刪除順序需考慮：

(1) 產品組合發生機率：各產品組合發生機率不盡相同，連帶的會影響到機台刪除後系統整體績效的好壞；優先刪除的應該是對發生機率高的產品組合影響較小的機台。

(2) 機台成本的考量：刪除機台成本高的機台，可以使機台成本降得較快，因此機台成本越高者，越應該優先刪除。

(3) 使用率的考量：使用率可以說是影響整個系統績效的重要關鍵，其影響方式應該分為兩個方向來討論：(a) 使用率...：一般而言，使用率太高的機台容易造成瓶頸，使產出量無法提升。因此，不要變動使用率已經很高的機台，而使用率較低的機台應該優先刪除。

(b) 邊際使用率...：邊際使用率指的是減少一部機台所造成使用率增加的幅度；也就是減少一部機台後對系統影響的幅度。...越大的表示對系統造成的影響也越大。因此，擁有邊際使用率低的機台應該優先刪除。

同時考慮使用率及邊際使用率，決策者希望刪除的機台應該是原來對系統影響不大，且減少一部後，對系統影響也很小的機台。因此吾人將利用  $I$  值的觀念來衡量機台減少一部後所造成的影響。

$$I = \frac{\Delta U}{U} \times \frac{C}{C_0}$$

其中， $\frac{\Delta U}{U}$ ：目前機台使用率。

$\frac{C}{C_0}$ ：機台減少一部後增加的使用率。

在面對  $n$  種產品組合的情況下，同

一種機台會存在  $n$  種  $I$  值,利用 min-max 的概念,在第  $k$  種機台中,取最大的  $I$  值,記為  $Max(I_{...})_k$ ,  $k=1, \dots, N$ , 接著再比較各  $Max(I_{...})_k$  的大小, 越小者越優先刪除。

基於上述考量刪除步驟如下：

#### 步驟一：分類別刪除

【第一類別】考慮機台刪除後,對任一產品組合而言,刪除後的機台利用率皆同時小於 0.9 者。

【第二類別】考慮機台刪除後,對某些產品組合而言,刪除後的機台利用率小於 0.9 者,且這些產品組合發生機率總和要超過 0.5 者。

【第三類別】考慮機台刪除後,對某些產品組合而言,刪除後的機台利用率小於 0.9 者,且這些產品組合發生機率總和要小於 0.5 者。

【注意】每刪除一部機台後,需要重新計算機台利用率。

將機台刪除分為三類別後,刪除第二類別中的機台前,必須先刪除第一類別中的機台;也就是必須先刪除前一類別中的機台才能刪除後一類別中的機台

#### 步驟二：各類別內的排序

步驟一已將機台刪除分為三個類別,則在步驟二中將針對各類別內的機台做排序。同時考慮機台成本及  $Max(I_{...})$  值,以這兩個參數來決定刪除順序。面對此一多目標問題,吾人利用 PROMETHEE II 之評估法,來決定各類別內的機台刪除順序。

如此,可以快速的找到在多種產品組合下機台組合期望總成本最低之最佳機台組合。

### 四、結果與討論

本研究以科學工業園區某一晶圓代工廠為例

(1) 機台資料：本實例工廠中,共有 101 種不同的機台 (M001 至 M101), 包

括順序加工機台、批量加工機台。其中有部分機台為較先進之銅製程機台 (M82 至 M101)。同時給定機台成本、平均當機間隔時間 (MTBF) 及平均修復時間 (MTTR)。

(2) 產品資料：本實例工廠中,共生產 A、B、C、D 四種產品,其中 A 產品為記憶體; B、C、D 產品為邏輯電路。各製程步驟所使用的機台及其加工時間均為已知。

(3) 機台設置時間：本實例工廠中,均將機台之設置時間併入加工時間。

(4) 給定未來三年市場需求的三種產品組合,及其發生的機率。

利用本研究所提的機台決策機制,在滿足產品生產週期時間限制,以機台購置成本及三年期望產出損失成本最小化的目標下,搜尋最佳機台組合及其數量。並由模擬軟體 simple++ 驗證本機制所決定的機台組合及其數量,在面對未來需求不確定的情況下,有穩定良好的生產績效。本研究提供一個系統化的機台決策機制,可輔助規劃者在建廠時決定機台組合及其數量。

### 5、計畫成果自評

本研究內容與原計畫書內容相符,該研究成果提供晶圓代工廠一個系統化的機台決策機制,本研究已達成計畫書預定目標。本研究成果已撰寫成論文,在國際會議上發表。

### 6、參考文獻

- [1] L. H. Chen and Y. H. Chen. A design procedure for a robust job shop manufacturing system under a constraint using computer simulation experiments. *Computers and Industrial Engineering* Vol. 30. No. 1, pp. 1-12, 1996.
- [2] D. P. Connors and G. E. Feigin and D. D. Yao. A queueing network model for semiconductor manufacturing. *IEEE Transaction on Semiconductor Manufac-*

- turing*, Vol. 9, No. 3, pp. 412-427, 1996.
- [3] M. Mollaghasemi and G. W. Eavns. Multicriteria design of manufacturing systems through simulation optimization. *IEEE Transactions on Systems Manufacturing and Cybernetics*, Vol. 24, No. 9, pp. 1407-1411, 1994.
- [4] E. Neacy and N. Abt and S. Brown and M. McDavid and J. Robinson and S. Srodes and T. Stanley. Cost analysis for a multiple product / multiple process factory: Application of SEMATECH's future factory design methodology. *1993 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 212-219.