# 多產品組合情境下之機台組合規劃

NSC92－2213－E－009－106

巫木誠
交通大學工業工程與管理學系

## 摘要

機台組合問題是探討建新廠時每類型機台應採購多少台，以符合最大效益。過去文獻大多不考慮晶圓廠對生產週期時間(manufacturing cycle time)的要求，生產週期時間的要求對我國晶圓廠極為重要。因此本研究計畫擬探討「多廠情境下」，考慮「生產週期時間」的機台規劃決策。研究主題有二，其一是不考慮舊廠資訊，做單一新廠的規劃，其二是考慮已有舊廠的資訊，進行擴建新廠的規劃。本研究結合等候理論(Queueing Theory)與基因演算法(Genetic Algorithm)求解此兩問題。

關鍵詞：機台組合規劃；基因演算法；等候理論

## Abstract

The tool planning problem in semiconductor industry is to determine how many tools should be allocated to each tool group in establishing a new factory. Most previous studies did not include the modeling of cycle time constraint. The cycle time, a key performance index in Taiwan semiconductor manufacturing company, should not be neglected. This research project aims to formulate a tool planning model in a scenario of multiple product mixes for semiconductor manufacturing, in which a predefined target mean cycle time should be met. Two research issues have been investigated, which include the tool planning of a new factory with/without considering the existing factories. The proposed solution method is by the integration of queueing models and genetic algorithms.

Keywords: Tool planning, Genetic Algorithm, Queueing Theory

（一）緒論

機台組合決策是探討興建新廠時，各類型機台應該採購多少台，才能符合最大的效益、並且滿足公司所要求的各種限制條件。晶圓廠的機台組合決策問題過去已有頗多文獻，但大多假設單一產品組合的情境，而且不考慮晶圓廠對「生產週期時間」(manufacturing cycle time)的要求。

「短生產週期時間」是我國晶圓代工廠極為重要的競爭利器，否則，規劃的結果可能不切實際所需. 因此本計畫發展一機台組合的決策模式，期能適用於「多廠」、「短生產週期時間」的半導體廠生產情境。本研究探討兩個主題，第一、不考慮舊廠資訊的情況下，如何規劃新廠的機台。第二、考慮舊廠資訊的情況下，如何規劃新廠的機台。

本計畫主要的研究方法有兩個主要模組。第一、先以等候模型(Queuing Model)來做晶圓廠的績效評估，亦即在某一機台組合之下，利用等候模型求解該機台組合的績效。第二、以基因演算法，來產生績效可能較佳的機台組合。此兩個模組的整合，是將基因演算法產生的機台組合解，送到等候模型評估績效，然後將評估結果送到基因演算法模組，作為篩選解的參考。

本報告章節安排如下：第二節是文獻回顧。第三節討論「不考慮舊廠資訊」的情況下，如何規劃新廠的機台。第四節討論「考慮舊廠資訊」的情況下，如何規劃新廠的機台。第五節是結論與建議。

（二）文獻回顧

過去機台組合的文獻很多，本研究以表 1 所列示的四個面向來本研究的特色，丙比較過去文獻的差異。此四個面向分別是：(1)工廠環境、(2) 需求模式、(3) 週期時間、(4)求解方法 [1]。

「工廠環境」是指該研究是否考慮「舊廠資訊」，如果不考慮舊廠資訊，本研究稱之為「單廠」問題。如果考慮舊廠資訊，本研究稱之為「多廠」問題。「需求模式」是指未來的需求是否確定，因此分為「確定需求」、「不確定需求」兩類。「週期時間」是指工廠績效是否考慮生產的週期時間，因此分為考慮與不考慮兩

類。第四個面向是分析過去相關文獻的求解方法。

本計畫有兩個研究主題。第一個主題是探討「單廠」、「不確定需求」、「週期時間限制」的機台規劃問題。第二個主題是探討「多廠」、「確定需求」、「週期時間限制」的機台規劃問題。由表 1 的分析可知，上述兩主題，過去的研究並未探討。

表 1 機台規劃相關文獻整理

| 文獻 | 工廠環境 | | 需求模式 | | 週期時間 | | 求解方法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 單廠 | 多廠 | 確定 | 不確定 | 有 | 無 | |
| 本研究主題一 | ● | | | ● | ● | | 基因演算法 等候模型 |
| 本研究主題二 | | ● | ● | | ● | | 基因演算法 等候模型 |
| Conners [2] | ● | | ● | | ● | | 邊際貢獻法 等候模型 |
| Grewal [3] | ● | | ● | | ● | | 靜態法、電腦模擬法 |
| Mollaghasemi [4] | ● | | ● | | ● | | 多目標法 電腦模擬法 |
| Chen [5] | ● | | ● | | ● | | 實驗設計法、模擬法 |
| Donohue [6] | ● | | ● | | ● | | 啟發式法、等候模型 |
| Chou [7] | ● | | ● | | ● | | 靜態法、等候模型 |
| Bard [8] | ● | | ● | | ● | | 啟發式法、等候模型 |
| Swaminathan [9] | ● | | | ● | | ● | 數學解析法 |
| Swaminathan [10] | ● | | | ● | | ● | 數學解析法 |
| Barahona [11] | ● | | | ● | | ● | 數學解析法 |
| Hood [12] | ● | | | ● | | ● | 數學解析法 |
| Hsieh [13] | | ● | ● | | | ● | 啟發式法 |
| Papageorgiou [14] | | ● | | ● | | ● | 啟發式法 |

（三）單廠的機台規劃問題

本研究的第一個主題主要是探討「單廠」的機台規劃問題。茲以釋例說明此問題。有一晶圓廠目前計畫增購新機台。該廠生產三種產品 A, B, C，因為業者的客源很穩定，所以未來的產品需求比例變化不大，目前需求比例為(A: B: C) = (0.4: 0.3: 0.3)。但客戶未來的需求總量無法確定。假設未來的需求總量有可能為四種情境$(d_1, d_2, d_3, d_4) = (24, 21, 18, 16)$，而這四種情境會發生的機率分別為$(r_1, r_2, r_3, r_4) = (0.4, 0.3, 0.2, 0.1)$。假設生產的週期時間不能超過 30 天，新機台採購預算為美金 4 億元。則工廠應該如何決定增購的機台種類與數量，才能使期望利潤最大。

(A) 數學模型

本研究發展一數學模型分析此問題。相關數學符號說明如下：

<u>參數與指標</u>

$i$ 產品種類$(1 \le i \le n)$。

$j$ 機台群類別$(1 \le j \le m)$。

$k$ 需求量情境$(1 \le k \le l)$。

$d_k$ 需求情境 $k$ 的總需求量。

$r_k$ 需求情境 $k$ 可能出現的機率。

$PX_0$ 產品的生產比例，$PX_0 = (b_1 : \ldots : b_i : \ldots : b_n)$，其中 $b_i$ 為產品 $i$ 的生產比值，$\sum_{i=1}^{n} b_i = 1$。

$X^0$ 晶圓廠現有的機台組合，$X^0 = (x_1^0, \ldots, x_j^0, \ldots, x_m^0)^T$，其中 $x_j^0$ 代表機台群 $j$ 的機台個數。

$C$ 機台群的成本向量，$C = (c_1, \ldots, c_j, \ldots, c_m)$，其中 $c_j$ 為第 $j$ 種機台群的機台單位成本。

$s_k$ 在需求情境 $k$ 中，所允許最大的缺貨量。

$B$　　機台採購的預算金額。

$CT_0$　　目標平均週期時間。

$p_{ik}$　　在需求情境 $k$ 中，第 $i$ 種產品的單位售價。

$v_{ik}$　　在需求情境 $k$ 中，第 $i$ 種產品的單位變動成本。

$e_{ik}$　　在需求情境 $k$ 中，第 $i$ 種產品的單位缺貨成本。

$\bar{p}_k$　　在需求情境 $k$ 中，產品比例為 $PX_0$ 時的每單位產品平均售價，

$\bar{p}_k = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot p_{ik}$。

$\bar{v}_k$　　在需求情境 $k$ 中，產品比例為 $PX_0$ 時的每單位產品平均變動成本，

$\bar{v}_k = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot v_{ik}$。

$\bar{e}_k$　　在需求情境 $k$ 中，產品比例為 $PX_0$ 時的每單位產品平均缺貨成本，

$\bar{e}_k = \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot e_{ik}$。

$N$　　機台折舊攤提的期數。

<u>決策變數</u>

$X^f$　　加上新機台後工廠最後的機台組合， $X^f = (x_1^f, \ldots, x_j^f, \ldots, x_m^f)^T$ 其中 $x_j^f$ 代表最後機台組合中第 $j$ 種機台群的機台個數。

$X^1$　　決定購買的新的機台群， $X^1 = X^f - X^0 = (x_1^1, \ldots, x_j^1, \ldots x_m^1)^T$，其中 $x_j^1$ 代表所購買的新機台群中第 $j$ 種機台群的機台個數。

$n_k(X^f)$　在需求情境 $k$ 中，工廠使用機台組合 $X^f$ 生產的最佳產量。

<u>數學模式</u>

Maximize $F(X^f) - F(X^0)$

s.t.

$$n_k(X^f) \le Q(X^f) \qquad \forall k \tag{1}$$

$$n_k(X^f) \le d_k \qquad \forall k \tag{2}$$

$$d_k - n_k(X^f) \le s_k \qquad \forall k \tag{3}$$

$$CX^1 \le B \tag{4}$$

$$x_j^f,\ x_j^1,\ n_k(x_j^f) \quad \text{為非負整數} \tag{5}$$

目標式是使機台採購前後的利潤差距極大化，其中 $F(X^f)$ 代表最終的機台組合 $X^f$ 所產生的利潤，而 $F(X^0)$ 則代表現有的機台組合 $X^0$ 所產生的利潤。$F(X)$ = $\sum_{k=1}^{l}[r_k \cdot n_k(X)\cdot(\bar{p}_k - \bar{v}_k)] - \sum_{k=1}^{l}[r_k \cdot (d_k - n_k(X))\cdot \bar{e}_k] - \frac{C\cdot X}{N}$. 。第一項代表期望邊際貢獻收入，第二項為期望缺貨成本，第三項為單一期間機台的折舊費用。$Q(X)$ 代表在 $(PX_0, CT_0)$ 情境下，機台組合 $X$ 的最大產量，本研究是應用等候網路模型[2]求解 $Q(X)$。

限制式(1)代表在需求情境 $k$ 中的產量不能超過機台最大產能。限制式(2)代表需求情境 $k$ 中的產量需小於等於該情境的需求量。而限制式(3)是使需求情境 $k$ 中的缺貨量不能超過業者既定的上限值。至於限制式(4)表示機台採購成本需控制在採購預算下。限制式(5)使問題的決策變數為整數解。

(B) 基因演算法

上述的數學模型是一複雜的非線性整數規劃問題，其中 $Q(X^f)$ 和 $n_k(X^f)$ 為變數 $X^f$ 的非線性函數方程組。而且解空間非常大。一座典型的晶圓廠約有 100 種機台群，若只單純的考慮機台群 $j$ ($j$ = 1, … , 100)是否須增購一台時，其答案的組合便有 $2^{100}$。此問題以一般解析法不易求解，因此我們提出基因演算法來解決此問題。

本研究以一條染色體來代表採購機台後晶圓廠最終的機台組合，在我們設計

下一條染色體 $X^f$ 由 $m$ 個正整數所組成。讓 $X^f = [x_1^f, ..., x_j^f, ..., x_m^f]$，其中 $x_j^f$ 為一條染色體中的一個基因，代表第 $j$ 種機台群最終的機台個數。讓 $N_p$ 代表一個母體 $P(t)$ 的母體大小數量。我們以以隨機法來產生起始母體，其詳細做法是每一條染色體以隨機的方式從區間 $[LB(x_j^f), UB(x_j^f)]$ 來決定每一個基因值 $x_j^f$，其中 $LB(x_j^f)$ 和 $UB(x_j^f)$ 分別代表 $x_j^f$ 值的上界與下界。本研究以懲罰法(penalty method)[15]來定義適應函數（fitness function）。並以排序-空間法(rank-space method)法[16]來篩選解。此基因演算法之詳細步驟請參閱[1]。

(C ) 結果比較

本研究將模型應用於以下案例。此案例的假設資料描述如下：此晶圓廠共生產四種產品，產品比例 $PX_0$ = (0.3, 0.2, 0.3, 0.2)。目標平均週期時間 $CT_0$ = 4 $PT_0$。晶圓廠目前可生產 18 萬片晶圓。未來有三種可能的需求情境 $(d_1, r_1)$ = (210K, 0.5), $(d_2, r_2)$ = (238K, 0.3), and $(d_3, r_3)$ = (189K, 0.2)。

我們比較本研究方法與「單一需求情境解法」之求解結果。所謂「單一需求情境解法」是以確定的某一需求情境求解機台組合，然後以不確定的多需求情境來驗證其績效。表 2 是求解結果的比較。由該表可知，本研究所提方法的期望利潤績效最佳。

表 2：本研究與確定需求規劃法的利潤比較 (單位：美金千元)

| 實際發生情境 | 需求情境機率 $r_k$ | 本研究 | 確定性法-情境 1 | 確定性法-情境 2 | 確定性法-情境 3 |
|---|---|---|---|---|---|
| 情境 1 | 0.5 | 23,549 | 25,020 | 9,796 | 7,446 |
| 情境 2 | 0.3 | 47,076 | 38,894 | 73,493 | 12,112 |
| 情境 3 | 0.2 | -9,164 | -7,499 | -22,918 | 2,779 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 期望利潤 | | 24,065 | 22,678 | 22,363 | 7,913 |

（四）多廠的機台規劃問題

本研究的第二個主題主要是探討「多廠的」機台規劃問題。茲以釋例說明此問題。一晶圓代工業者目前擁有兩座晶圓廠，計畫增建一座新廠，該業者目前生產三種家族產品 A, B, C。兩座舊廠建廠時的最佳月產出片數(A, B, C)分別為(300, 500, 400)與(500, 300, 400)。假設 C 產品即將停產，因而需求量大減，但一新產品 D 需求大增。假設未來的需求量為(A, B, C, D) = (1200, 1200, 200, 800)，吾人當如何規劃新廠的機台種類與數量。此研究包括兩個子問題，第一、決定各廠的產品比例、第二、根據新廠的產品比例進行機台規劃。

(A) 數學模型

本節討論上述決策問題之數學模型。一晶圓代工業者共生產 $k$ 種家族產品，產品加工所需要的機台群種類有 $m$ 種。此業者目前已擁有 $n$-$1$ 座晶圓廠，$F_i$ ($i$ = 1, .., $n$-$1$)。假設業者預測下一個期間內未來每一個月的需求為 $D = (d_1, \ldots, d_j, \ldots, d_k)$，其中 $d_j$ 代表第 $j$ 種產品的每月需求量。因為未來的產品需求量大幅的增加，所以業者覺得有增建一座晶圓廠的需要。

業者目前已有 $n$-$1$ 座舊廠，每一座分廠 $F_i$ 當初是根據一特定的產品產出比例加以建構的，且舊廠目前仍生產此產出比例。讓此產品產出比例為 $P_i = (p_{i1},\ldots, p_{ij}, \ldots, p_{ik})$，其中 $p_{ij}$ 代表分廠 $F_i$ 目前的第 $j$ 種產品的每月的產量。如前述所言，因為產品市場的變化，當業者建新廠時為了使新廠的機台成本最低，其他舊廠的產品產量可能無法維持之前的產出比例 $P_i$，而須重新配置。設若 $Q_i = (q_{i1}, \ldots, q_{ij}, \ldots, q_{ik})$代表分廠 $F_i$ 重新配置後所應生產的產量，其中 $D$ 為公司所預測的總需求量，$D = \sum_{i=1}^{n} Q_i$，且 $d_j = \sum_{i=1}^{n} q_{ij}$ ($j$ = 1, …$k$)。

設若 $C = (c_1, \ldots, c_g, \ldots, c_m)$代表機台單位成本向量，$c_g$ 其中為第 $g$ 種機台群的單位機台成本。$X_i = (x_{i1}, \ldots, x_{ig}, \ldots, x_{im})^T$ 代表分廠 $F_i$ 的機台組合，其中 $x_{ig}$ 其中為

分廠 $F_i$ 中第 $g$ 種機台群的機台數量。為了競爭優勢的考量，業者希望每一座分廠的生產週期時間不能超過其目標週期時間 $CT_0$。

本主題的機台決策問題，是如何將總需求量 $D$ 分配至各分廠生產，讓各分廠有一產量配置 $Q_i$ ($i$ = 1, …, $n$)，目標是使新廠的機台組合 $X_n$ 的機台成本最低並符合週期時間的限制。

因此「多廠的機台規劃」問題可使用數學式表達如下。

$$Min\ \ C\cdot X_n$$

s. t.

$$D=\sum_{i=1}^{n}Q_i \tag{6}$$

$$CT_i \le CT_0\,;\ i = 1, \dots, n \tag{7}$$

$$CT_i = f_q(X_i, Q_i)\,;\ i = 1, \dots, n \tag{8}$$

$$x_{ng}\ \ \text{為非負整數}\,;\ g = 1, \dots, m \tag{9}$$

以上的數學式中，數學式(6)表示各分廠的產量配置總合須等於總需求，數學式(7)表示每一個分廠的生產週期時間不能超過目標週期時間。數學式(8)代表一組機台組合 $X_i$ 產量為 $Q_i$ 時之週期時間。預測的總需求 $D$ 與舊廠的機台組合 $X_i$ ($i$ = 1, …$n$-1)均假設為已知；但新廠的機台組合 $X_n$ 及各分廠的生產量配置 $Q_i$ ($i$ = 1, …, $n$)則為問題的決策變數。讓 $Q = [Q_1, \dots, Q_n]^T$ 代表分配至各分廠產量的一組候選解，其中 $Q$ 為為 $n \times k$ 的矩陣，而矩陣中第 $i$ 列 $Q_i = [q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ik}]$則代表分廠 $F_i$ 所分配的生產產量。對於每一個候選解 $Q$，根據新廠的生產量配置 $Q_n$ 來決定新廠的機台組合 $X_n$。以上的數學規劃目標是使新廠機台組合 $X_n$ 的成本最低。

(B) 求解構想

以上的機台規劃問題不僅要決定新廠的機台數量，並且需將總需求量 $D$ 分

配至各分廠加以生產, 此外還需考慮週期時間的限制, 比起單廠的機台規劃問題更顯得複雜難解, 因此需要一個有效率的解法。我們建立了基因演算法來解決多廠的機台規劃問題，我們的解法包含以下兩個程序，各程序之詳細步驟請參閱[1]。

第一個程序：選出 $M$ 個好的 $Q$(矩陣)，我們並且將這些 $Q$ 矩陣存放在一個稱之為 *X-空間* 的集合中。

上述所謂好的 $Q$ 向量必須符合以下兩個性質。第一個性質，每一個舊廠 $F_i$ ($i$ = 1, …$n$-1)所分配到的產量 $Q_i$，必須滿足週期時間限制。第二個性質, 暫不考慮新廠的週期時間限制，針對新廠所分配到的產量 $Q_n$，規劃一個成本很低的機台組合 $Y_n$ 使得 $Y_n$ 可產出 $Q_n$。因 $Y_n$ 是暫不考慮滿足週期時間限制所規劃的機台組合, 所以其週期時間可能比目標週期時間長。我們使用一個啟發式方法來產生 $Y_n$。

第二個程序：從 *X-空間* 的集合中決定最好的產量配置 $Q^*$。

對於每一個 $Q$ 矩陣均包含一 $Q_n$ 向量，而根據 Connor 等作者在文獻[2]的機台決策模型，每一個 $Q_n$ 向量可以使用邊際分配(marginal allocation procedure)的方法，來決定一組成本最低且滿足週期時間限制之機台組合 $X_n$。因為在 *X-空間* 中有 $M$ 個 $Q$ 矩陣，所以也表示可以找到 $M$ 個機台組合 $X_n$。在這 $M$ 個機台組合當中，最小成本的機台組合 $X_n^*$即是新廠 $F_n$ 的最好機台組合，而此時 $X_n^*$所對應的產量配置 $Q^*$即為各分廠最好的產量配置。

(D) 數值範例

我們以案例檢驗本研究之機台規劃模型的有效性。茲將期中一案例結果說明如下：某晶圓業者目前已有兩座廠 *Fab_1* 和 *Fab_2*，預計增建一座新廠 *Fab_3*。該公司未來預計生產四種家族產品：*U*、*V*、*W* 和 *Z*。*Fab_1* 的建廠最佳產出比

例為 (*U*: *V*: *W*: *Z*) = (360, 340, 480, 0)， *Fab_2* 的建廠最佳產出比例為 (*U*: *V*: *W*: *Z*) = (600, 360, 240, 0)。未來每個月的產品需求為(*U*: *V*: *W*: *Z*) = (1200, 1200, 0, 1200)。業者希望每一廠的平均週期時間不能超過 $CT_0$，此情境下，*Fab_3* 應如何規劃其機台組合。

本文所提出的方法較業界常用的一啟發式方法為佳。此啟發式方法是使舊廠的所分配的產品產出比例配置盡可能的接近其建廠的最佳產品比例。如表 3 所示，本研究所提出的方法，可讓新廠的機台成本節省約$76 百萬美元，差距比例約為 5.2%。

表 3: 本研究的方法與其他方法之比較結果

| | 本研究所提出的方法 | 啟發式規劃法 |
|---|---|---|
| *Fab_1: (U, V, W, Z)* | (383, 393, 0, 98) | (360, 340, 0, 110) |
| *Fab_2: (U, V, W, Z)* | (606, 394, 0, 108) | (600, 360, 0, 115) |
| *Fab_3: (U, V, W, Z)* | (211, 413, 0, 994) | (240, 500, 0, 975) |
| *Fab_3* 的機台成本 | $1,461 百萬美元 | $1,537 百萬美元 |
| 成本差距 | 0 | $76 百萬美元 |
| 成本差距百分比% | 0 % | 5.2% |
| *Fab_3* 的機台數量 | 517 | 548 |

（五）結論與建議

本研究完成兩項研究主題。第一是單廠的機台規劃問題，其主要特色是需求不確定，且有生產週期時間限制。第二是多廠規劃問題，其主要特色是考慮舊廠的資訊，因此需考慮各廠產品比例的分配，然根據新廠所分的產品比例來規劃其機台組合。此兩主題的主要研究工具是利用基因演算法、等候網路模型。

未來尚可研究的方向，包括「多廠、需求不確定」的情境下，如何進行機台規劃。在不確定需求的情境下，吾人亦可探討各種不同的機台規劃策略，譬如產逐步擴充或一次擴充策略。

參考文獻

[1] 熊雅意,「晶圓代工廠考慮週期時間限制之機台規劃研究」,國立交通大學工業工程與管理學系博士論文,2004 年 6 月。

[2] D. P. Connors, G. E. Feigin, and D. Yao, "A Queueing Network Model for Semiconductor Manufacturing", IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 9, No. 3, pp. 412-427, 1996.

[3] N. S. Grewal, A. C. Bruska, T. M. Wulf, and J. K. Robinson, "Integrating Targeted Cycle-Time Reduction into the Capital Planning Process", Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference, pp. 1005-1010, 1998.

[4] Mollaghsemi and G. W. Evans, "Multicriteria design of manufacturing systems through simulation optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 24, No. 9, pp. 1407-1411, 1994.

[5] 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 & Industrial Engineering, Vol. 30, No. 1, pp. 1-12, 1996.

[6] K. L. Donohue, W. J. Hopp and M. L. Spearman, "Optimal Design of Stochastic Production Lines: A Dynamic Programming Approach", IIE Transactions, Vol. 34, pp. 891-903, 2002.

[7] Y.-C. Chou, "Configuration Design of Complex Integrated Manufacturing Systems", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 907-913,1999.

[8] J. F. Bard, K. Srinivasan, and D. Tirupati, "An Optimization Approach to Capacity Expansion in Semiconductor Manufacturing Facilities", International Journal of Production Research, Vol. 37, No. 15, pp. 3359-3382, 1999.

[9] J. M. Swaminathan, “Tool Capacity planning for Semiconductor Fabrication Facilities under Demand Uncertainty”, European of Operational Research, Vol, 120, pp. 545-558,2000.

[10] J. M. Swaminathan, “Tool Capacity planning for Semiconductor Fabrication Facilities under Demand Uncertainty”, European of Operational Research, Vol, 120, pp. 545-558,2000.

[11] F. Barahona, S. Bermon,O. Gunluk and S. J. Hood, “Robust Capacity Planning in Semiconductor Manufacturing”, IBM Res. Division, Research Report, RC22196, 2001.

[12] S. Hood, S. Bermon, and F. Barahona, “Capacity Planning Under Demand Uncertainty for Semiconductor Manufacturing”, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.16, No. 2, pp. 273-280, 2003

[13] M. H. Hsieh and T. K. Lin, “MFE Practice: Manufacturing Flexibility Enhancement for Multi-Site Fab Production”, *IEEE /SEMI*, pp. 193-194, 2002.

[14] A. A. Levis and L. G. Papageorgiou, “A Hierarchical Solution Appoach for Multi-Site Capacity Planning under Uncertainty in the Pharmaceutical Industry”, Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 707-725, 2004.

[15] G. Levitin, “Multistate Series-Parallel System Expansion-Scheduling Subject to Availability Constraints”, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 49, No. 1, pp. 71-79, 2000.

[16] P. H. Winston, Artificial Intelligence, Addison-Wesley, USA, 1992, p 520-52