

國立交通大學  
工業工程與管理學系

碩士論文

離子植入機台最適氣體類型配置與工件排程

Gas-type Allocation and Job Scheduling for  
Ion Implanters

研究生：凌金傳

指導教授：巫木誠教授

中華民國九十九年六月

離子植入機台最適氣體類型配置與工件排程

Gas-type Allocation and Job Scheduling for Ion Implanters

研究生：凌金傳

Student : Chin-Chuan Ling

指導教授：巫木誠 博士

Advisor : Dr. Muh-Cherng Wu

國立交通大學

工業工程與管理學系

碩士論文



Submitted to Department of Industrial Engineering and Management

College of Management

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

in

Industrial Engineering

June 2010

Hsin-chu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

# 離子植入機台最適氣體類型配置與工件排程

研究生：凌金傳

指導教授：巫木誠博士

國立交通大學工業工程與管理研究所

## 中文摘要

本研究探討半導體廠中離子植入機的二個生產規劃問題，離子植入機的主要功能為對晶圓進行離子摻雜的動作，一部典型的離子植入機最多可安裝三種不同的氣體，且設置時間發生在工件使用不同氣體進行加工時，因此當機台安裝的氣體種類越多時，其功能也越多，但相反地機台則需花費更多的時間在測試氣體每年所產生的新配方是否合格，如此才可作為工件加工時所用，故本研究第一個子題即為探討機台最適氣體類型配置決策，在此決策下假設有  $m$  部機台和  $k$  種氣體，則氣體應該如何配置與配置幾種的情況下，利用混合整數規劃法可使得機台利用率最大化。之後假設機台最適氣體類型配置已知下，探討工件最佳指派加工和工件最佳排序加工決策，我們利用三種巨集演算法，分別為基因演算法(GA)、模擬退火法(SA)和禁忌搜尋法(TS)來求解問題，並執行大量實驗，結果顯示混合整數規劃法(MIP)可在合理時間內求出最佳的氣體類型配置，而基因演算法求解結果均優於其他二種演算法，可求出工件最佳加工順序與工件最佳指派加工組合。

關鍵詞：離子植入機、混合整數規劃、基因演算法、模擬退火法、禁忌搜尋法

# Abstract

This research examines two production planning problems for ion implanters, which are a type of machines in semiconductor manufacturing. The function of an ion implanter is to inject various chemical ions (also called chemical gases) into the surface of a silicon wafer. Each type of chemical gas is fed to an ion implanter through a distinct gas pipe. A typical ion implanter in practice can be installed at most with three different types of chemical gases, and a setup time is needed while changing gas types. The more number of gas-types is installed on a machine, the more versatile is the machine—yet at the expense of taking more time to qualify (or tune) the machine while introducing new recipes. Such a trade-off characteristic leads to our first research problem—the *gas-type allocation problem*. That is, suppose there are  $m$  ion implanters and  $k$  gas types, how many and which gas-types should be installed on each machine in order to maximize the utilization of the ion implanters for a forecasted demand scenario. We develop a mixed integer program (MIP) to solve the gas-type allocation problem. Assuming the gas-type allocation decision has been made, our next effort is to examine a job allocation and sequence problem. That is, suppose there are  $n$  jobs and  $m$  machines with pre-defined gas-type patterns, how to allocate jobs to machines and how to sequence the jobs allocated to each machine. We develop three meta-heuristic algorithms, genetic algorithm (GA), simulated annealing (SA), and tabu search (TS), to solve the problem. Extensive numerical experiments have been carried out. Results indicate that the MIP model can find the optimal gas-type allocation problem in reasonable CPU time, and the GA outperforms the other two heuristic algorithms in dealing with the job allocation and scheduling problem.

Keywords: ion implanter, mixed integer programming, genetic algorithm, simulated annealing, tabu search

## 誌謝

本論文要感謝的是恩師巫木誠教授的悉心指導與教誨才得以順利完成。巫老師讓我可以同時兼顧家庭與學業，在老師的敦敦教誨下，使我在學術研究上獲益良多，並且教導我許多人生中做人處事的道理，得以終身受用。同時也感謝許錫美教授、彭德保教授在論文口試時，所給予的寶貴意見與指導，讓本論文更臻完備。

在研究所的兩年中，要感謝同窗的曉嚴、浩翰、邦豪與佩芸，陪我度過修課與撰寫論文的日期，時常打氣與討論，特別是碩二下擔任線性代數霹靂碩期間，大家的幫忙，有你們使我在交大的生活變的愉快且充實。並在此特別感謝邱志文學長的幫助，指導我程式的撰寫，並時常解決在研究中遇到的困難，使我能精實的地完成研究。

除了學校指導教授、學長與同學們的幫忙與協助，特別感謝我最愛的家人，在論文撰寫期間給我無數的關愛與鼓勵。特別是母親張素祝女士與身為警察保母的弟弟金億，感謝你們多年來的辛勞與關懷，對我總是無怨無悔的付出，對於你們的感謝，實非筆墨可以形容。最後，還有成功的男人，背後總有個默默支持的女人，感謝一路支持我的女友-于倫，總是再我喪氣時，給我加油與打氣，更重要的是對我的包容與體諒，最後謹以此論文獻給我最敬愛的家人、師長與朋友。

金傳 于 新竹交大

2010.6

# 目 錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌 謝.....	iii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的與方法.....	2
1.3 研究議題.....	3
1.4 論文章節介紹.....	5
第二章 文獻探討.....	6
2.1 離子植入機的機台結構及製程.....	6
2.2 研究離子植入機台派工相關文獻.....	9
2.3 附屬資源相關研究分類.....	10
2.4 非等效平行機台相關文獻(Unrelated parallel machine).....	14
2.5 OPL 數學規劃軟體.....	16
2.6 巨集演算法 (meta-heuristic algorithm).....	17
2.6.1 基因演算法 (Genetic algorithm).....	17
2.6.2 模擬退火法 (Simulated annealing).....	20
2.6.3 禁忌搜尋法 (Tabu search).....	22
第三章 以混合整數規劃求解機台最適氣體類型配置.....	24
3.1 研究問題描述.....	24
3.2 研究方法.....	25
3.2.1 相關符號、參數說明.....	26
3.2.2 數學模式.....	27
3.2.3 ILOG OPL Studio軟體求解.....	28
第四章 求解工件指派加工.....	29
4.1 研究問題描述.....	29
4.2 複雜度分析.....	30

4.3 研究方法.....	30
4.4 數學模式構建.....	30
4.4.1 相關符號、參數說明.....	31
4.4.2 數學模式.....	32
4.5 演算法之設計.....	33
4.5.1 染色體設計與編碼.....	33
4.5.2 染色體解讀.....	34
4.5.3 適應度函數計算模式.....	34
4.5.4 基因演算法求解流程.....	36
4.5.5 模擬退火法求解流程.....	41
4.5.6 禁忌搜尋法求解流程.....	42
第五章 實例驗證.....	43
5.1 測試情境的設計-長期規劃.....	43
5.2 實驗結果分析-長期規劃.....	45
5.3 測試情境的設計-短期規劃.....	47
5.4 演算法的參數設定.....	47
5.5 實驗結果與分析.....	48
5.5.1 比較不同情境下GA、SA與TS的Makespan.....	48
5.5.2 比較不同情境下GA、SA與TS的求解速度.....	50
5.6 實驗結論.....	52
第六章 結論與未來研究方向.....	53
6.1 研究的結論.....	53
6.2 未來研究方向.....	54
附錄 工件總延遲時間最小化.....	55
參考文獻.....	59

## 表目錄

表 1.1 工件加工所需氣體.....	5
表 2.1 附屬資源之相關研究文獻.....	12
表 2.2 附屬資源限制之相關研究文獻.....	13
表 2.3 非等效平行機台相關文獻.....	15
表 4.1 氣體屬性代碼資訊.....	34
表 4.2 工件加工時間資訊.....	35
表 5.1 各產品加工製程所需氣體.....	44
表 5.2 機台最適氣體類型配置.....	45
表 5.3 氣體配置模式績效比較.....	46
表 5.4 各演算法相關參數之設定值.....	48
表 5.5 比較在 5 台機台下不同JOB數 $R$ 的平均數.....	49
表 5.6 比較在 10 台機台下不同JOB數 $R$ 的平均數.....	49
表 5.7 比較在 5 台機台下不同JOB數的求解時間差異（單位：秒）.....	50
表 5.8 比較在 10 台機台下不同JOB數的求解時間差異（單位：秒）.....	51

## 圖目錄

圖 1.1 離子植入機機台組態示意圖.....	3
圖 1.2 離子植入機問題示意圖.....	4
圖 1.3 平行機台製造系統示意圖.....	4
圖 1.4 工件指派加工示意圖.....	5
圖 2.1 離子植入機台示意圖.....	6
圖 2.2 離子植入機台鋼瓶管路構造圖，黃國益(2006).....	8
圖 2.3 ILOG OPL STUDIO數學規劃套裝軟體使用介面.....	16
圖 2.4 基因演算法執行流程.....	17
圖 2.5 模擬退火法執行流程.....	21
圖 2.6 禁忌搜尋法執行流程.....	23
圖 3.1 專工型機台與多工型機台示意圖.....	24
圖 3.2 混合整數規劃研究流程.....	25
圖 4.1 研究問題示意圖.....	29
圖 4.2 研究方法.....	30
圖 4.3 染色體設計與編碼.....	34
圖 4.4 工件加工順序示意圖.....	34
圖 4.5 離子植入機台氣體配置示意圖.....	35
圖 4.6 工件指派加工示意圖.....	36
圖 4.7 基因演算法求解流程示意圖.....	37
圖 4.8 CROSSOVER C1 運算.....	38
圖 4.9 MUTATION SWAP運算.....	39
圖 4.10 模擬退火法求解流程示意圖.....	41
圖 4.11 禁忌搜尋法求解流程示意圖.....	42
圖 5.1 比較在 5 台機台下不同JOB數之改善率.....	49

圖 5.2 比較在 10 台機台下不同JOB數之改善率 .....	50
圖 5.3 比較在 5 台機台下不同JOB數的求解時間 .....	51
圖 5.4 比較在 10 台機台下不同JOB數的求解時間 .....	52



# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景與動機

隨著晶圓廠越蓋越大，各家業者相繼投入大尺寸晶圓的專業代工。現實中，建置 12 吋晶圓廠已成為目前全球半導體廠商加速提昇競爭力最重要的發展策略，12 吋晶圓廠所需投入資金高達 40 至 50 億美元，其中高價的機台設備更導致半導體廠的固定成本高達製造成本的 60% 到 70%，所以各家廠商莫不希望提高產能利用率以提高投資報酬率和競爭力。因此，必須使高價機台發揮最大的功效(也就是最小化產能損失)，才能達到最大的產出，進而減少購置多餘的機台設備。在機台設備投資中，離子植入機的單價是僅次於曝光機，高階製品單價可高達一億台幣以上，故在機台配置與生產排程的策略上，高單價離子植入機台的產能分配成為一般晶圓廠所重視的議題。

本研究所探討的議題，分別為子題一為長期規劃問題，子題二為短期規劃問題。離子植入機台最適氣體類型配置為一種長期的規劃問題，決策者依據未來的產品需求，來決定工廠應提供多少產能來符合需求，對離子植入機而言，一部典型的離子植入機最多配置三種氣體，有三氯化砷( $AsH_3$ )、四氟化硅( $SiF_4$ )、腐蝕性的氣體如三氟化硼( $BF_3$ )、還有從固態材料轉換而來的有毒蒸氣如磷(P)，四種氣體可供配置，因此機台如果配置多種氣體，機台的功能增多便比較不會缺料而閒置，如此一來，可提高機台利用率，增加產出，相對地機台功能多可加工的工件種類也會變多，會使得整備時間驟增且隨著產品生命週期越來越短，伴隨而來的新製程導入也會越來越多，這些因素都會使具有多功能的機台造成產能損失；相反地，機台如果配置較少種氣體，機台就可專攻某些工件種類，減少整備時間，增加可用產能，相對地，機台功能少，工件等候加工的時間會拉長，而產品生產週期相對地也會增加。因此我們假定需求環境確定下，求解機台最適氣體類型配置與各機台氣體產能分配問題。

子題二所探討的背景為機台最適氣體類型配置已知下，針對平行機台中非等效平行機台(Unrelated Parallel Machine)之生產型態加以討論，在此生產環境中需考慮指派工件至機台加工的派工問題，目標為最大完工時間最小化。所謂非等效平行機台是指機

台的型態對於其相同的加工作業並沒有相對的關係，即相同的工件在任一機台的加工時間都無相關且皆不成比例。在以往研究中，針對非等效平行機台求解工件加工指派問題，雖可利用數學規劃軟體如 LINGO、ILOG 等套裝軟體求出最佳解，但在 Garey 與 Johnson(1978)提出在非等效平行機台中，若要求取最大完工時間最小化的排程為一 NP-hard 的問題，因此隨著問題規模增大，需加工工件與機台的數量增加時，求解時間將呈指數成長，傳統的數學規劃或套裝軟體將無法在合理時間內求得最佳解，因此針對非等效平行機台排程問題，本研究利用巨集演算法(meta-heuristic algorithm)-基因演算法、模擬退火法和禁忌搜尋法分別來進行求解，求解機台最大完工時間最小化，接著再比較各個演算法之差異。

## 1.2 研究目的與方法

本研究之目的分為長期規劃與短期規劃兩種，長期規劃為利用模擬離子植入機的真实情況，藉此求出機台最適氣體類型配置，本研究利用混合整數規劃(Mixed Integer Programming, MIP)的方法，建構模式以進行求解離子植入機最適氣體類型配置問題。決策變數為：

1. 決定各機台最適氣體類型配置(Gas-type Allocation)。

在短期規劃方面，當求解生產晶圓批件超過 30 批的指派加工問題時，由於變數太多，求解範圍太大，利用一般線性規劃或整數規劃方法進行求解，會造求解時間過長，導致求解沒有效率，而無法應用於實際的製造現場，因此本研究利用巨集演算法求解，希望可以藉由演算法快速求出近似的最佳解，求得一個最佳的工件加工順序與工件指派加工。

決策變數為：

1. 工件加工順序(Job sequencing)。
2. 工件指派加工(Job assignment)。

### 1.3 研究議題

圖 1.1 為離子植入機的機台組態，分別由 Port、Chamber 和離子源所構成，而整備時間發生在工件使用不同加工氣體時，當有不同產品或是相同產品不同加工層時，在作業上會有氣體更換(Gas change)所產生之整備時間，氣體更換為加工氣體不同時，機台則需使用氬氣(Ar)進行槽內清洗，大約耗時 10 分鐘，之後才會開始進行生產下一批產品。

機台的傳輸單位有兩種，Implanter 內的加工單位為 Wafer，而 Port 之間的傳輸單位為 Lot，Lot 是以滿批 Full-lot(25 片/Wafer)為一生產單位，在機台的配置中，一般埠區共有 4 個埠，機台內的反應室共有 13 個，在正常的狀況下，每一個埠可容納一個晶舟盒(Cassette)，每一晶舟盒最多可裝 25 片晶圓，本研究假設為滿批(25 片)來進行生產。

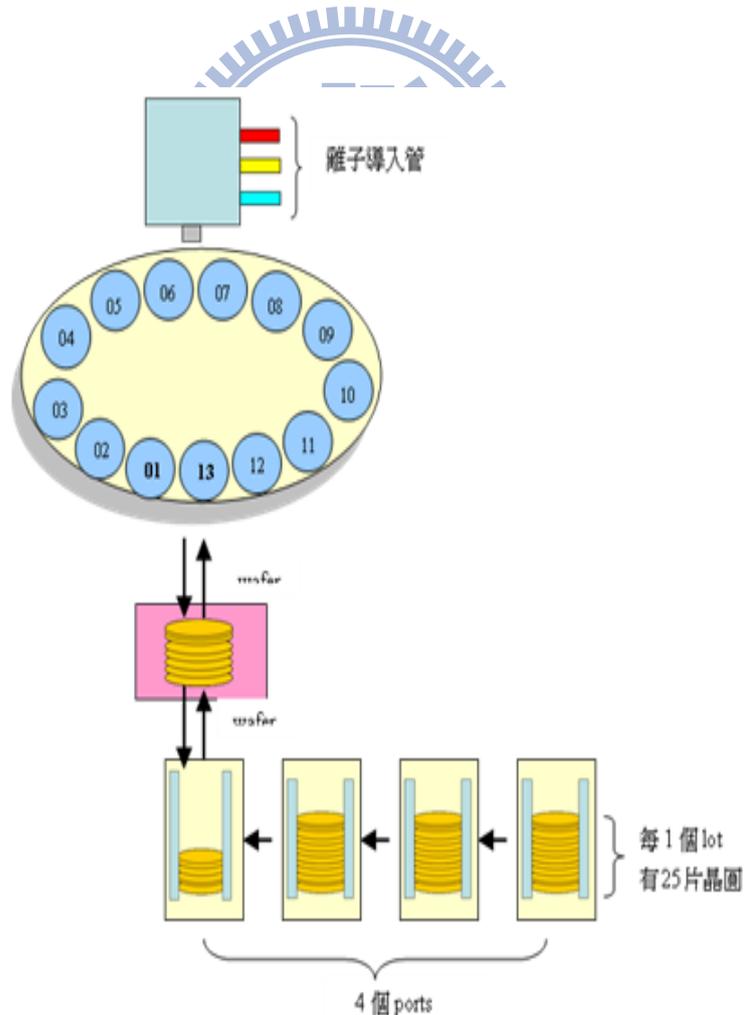


圖 1.1 離子植入機機台組態示意圖

本研究議題所探討為半導體廠中的離子植入機台，就產能規劃問題，分為長期與短期規劃兩個子題，如圖 1.2 所示。

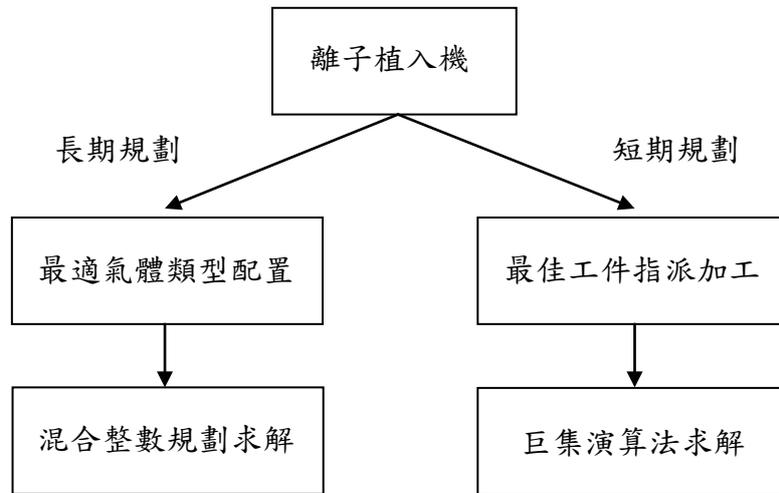


圖 1.2 離子植入機問題示意圖

長期規劃部分針對離子植入機氣體如何配置之下，機台為專工型或多工型之間進行取捨，求出最佳氣體配置，可以使最大機台完工時間最小化。短期規劃為機台最適氣體類型配置已知的情況下，工件指派到哪一部機台加工的指派問題，如下圖 1.3，等待加工的工件需指派到離子植入機台群中的一部機台進行加工，績效指標為使最大機台完工時間最小化。

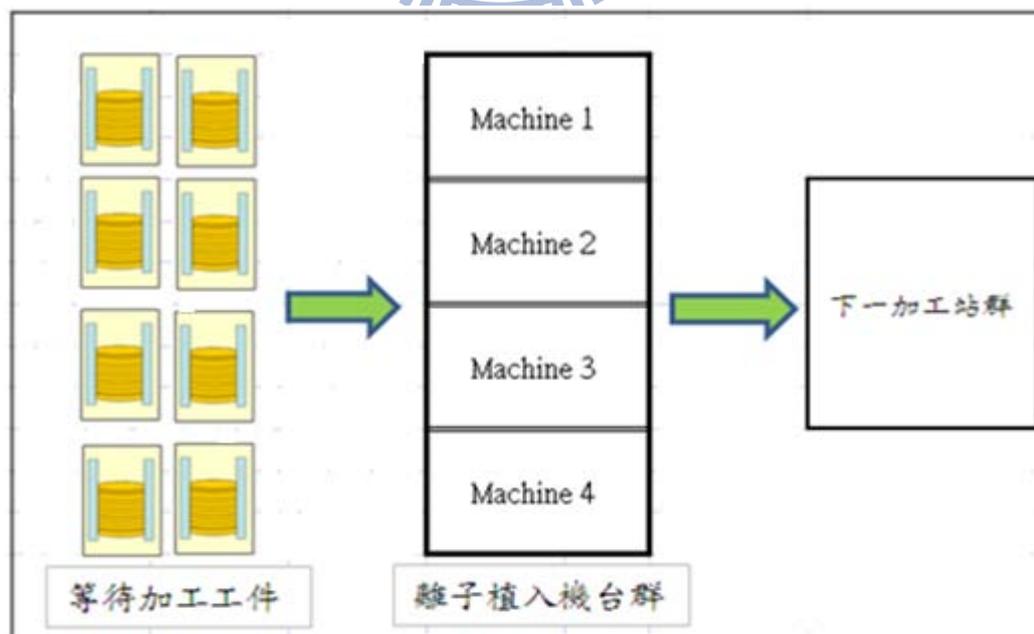


圖 1.3 平行機台製造系統示意圖

若今有 10 個工件等待加工，離子植入機台群中有 3 部機台可進行加工，假設工件排序為 1→8→6→4→2→9→3→5→7→10，且各工件加工所需氣體如下表 1.1 所示。

表 1.1 工件加工所需氣體

工件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
加工氣體	AsH3	BF3	SiF4	AsH3	BF3	AsH3	P	BF3	AsH3	SiF4

並假設機台一配置有氣體 AsH3、BF3，機台二配置有氣體 BF3、SiF4 和機台三配置有氣體 AsH3、P，則所指派到各機台進行加工的甘特圖如下圖 1.4 所示。

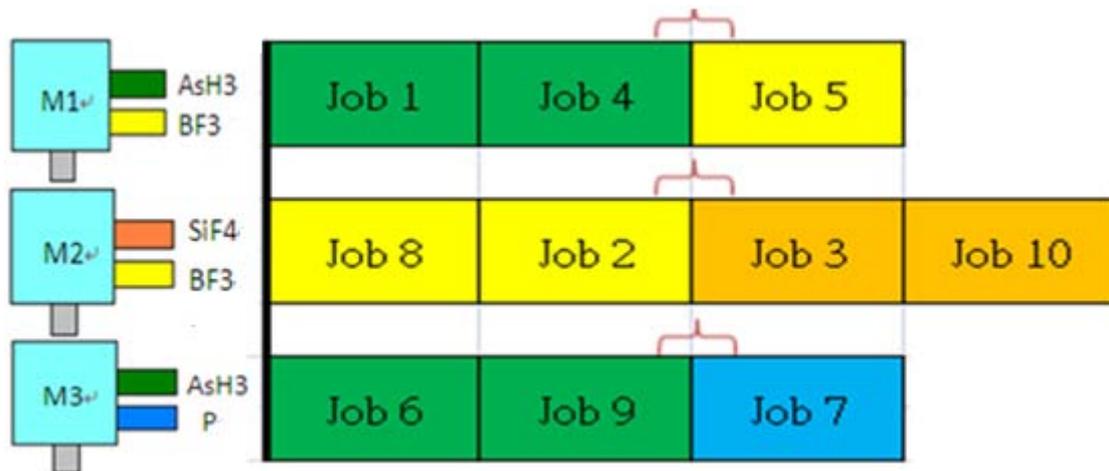


圖 1.4 工件指派加工示意圖

#### 1.4 論文章節介紹

本論文研究內容共含六個章節，第一章節闡述離子植入機台產能配置的研究內容、研究背景與動機、研究議題等。第二章節介紹有關離子植入機的機台結構與製程，並回顧探討平行機台相關研究文獻及目前研究的議題，最後針對本文所利用的演算法之相關研究進行探討。第三章節為針對長期策略-機台最佳氣體配置進行詳細介紹，並利用混合整數規劃(Mixed Integer Programming, MIP)的方法，建構模式以進行求解離子植入機最適氣體類型配置問題。第四章節為針對短期規劃-工件指派加工問題進行詳細介紹，並利用巨集演算法 (meta-heuristic algorithm)的方法，以進行求解離子植入機加工工件的排程問題。第五章為實驗分析與結果，利用半導體廠實際數據進行求解驗證。最後，第六章節說明本論文之結論及建議。

## 第二章 文獻探討

本章為探討相關文獻，首先先介紹離子植入機台設備及其製程，其次探討離子植入機和副資源限制排程、非等效平行機台相關研究的議題，最後針對子題一與子題二所使用的求解工具，ILOG OPL Studio 數學規劃套裝軟體與巨集演算法進行相關研究探討。

### 2.1 離子植入機的機台結構及製程

在半導體製程中，離子植入製程屬於晶圓前段製程中極為複雜的製程，除了具備大量的控制電子電路外，精密的機械結構及高真空度的需求，均使離子植入機的複雜性提高許多。因此，離子植入機台設備相當昂貴，離子植入機的單價只僅次於曝光機台，高階製品單價可高達一億台幣以上。

離子植入機台不僅設備龐大，相對地，也是非常複雜的一套系統。一部典型的離子植入機台，主要由埠(Port)、氣體系統、真空系統、電機系統、控制系統、射束線系統和晶圓處理系統七個部分所組成，其如圖 2.1 所示。離子植入機共有 12~14 個反應室 (Chamber)，主要透過晶圓處理器(Wafer Handler)來使離子束在整個晶圓表面達到均勻的離子佈植。

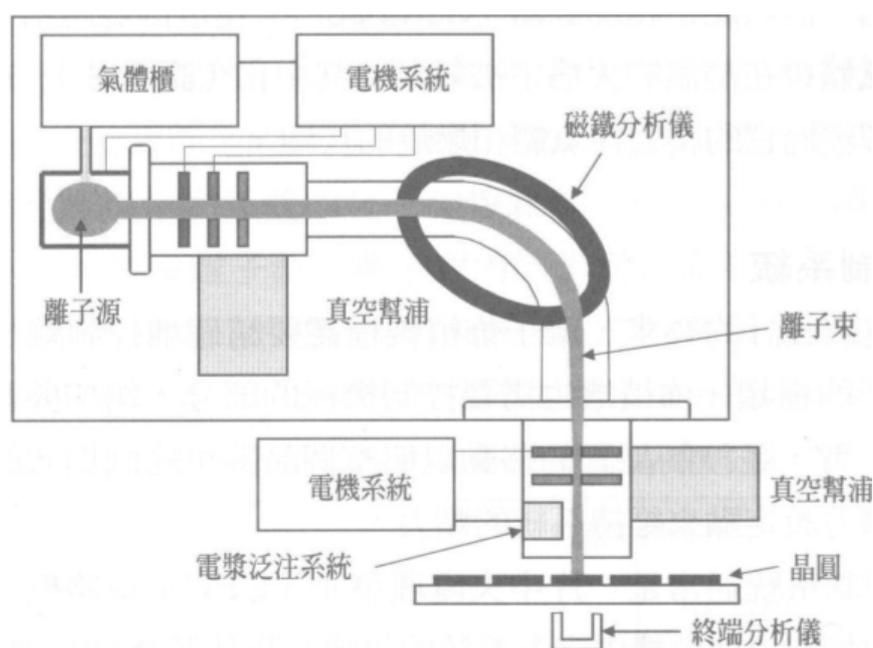


圖 2.1 離子植入機台示意圖

離子植入機的硬體設備其功能描述如下:

**氣體系統：**

氣體的摻雜源常被使用在離子植入的製程中，因這些氣體本身具有相當大的危險性，因此為了降低工安事件發生的風險，一個特別設計的氣體櫃被封在離子植入機的內部以儲存這些非常靠近離子源的化學氣體。

**電機系統：**

為了加速離子，我們使用高壓的直流電(DC)來進行，所以大至 200kv 的直流電電源供應系統會配置在離子植入機內。

**控制系統：**

由於晶圓的製造屬於非常精密的製程，因此為了達到晶圓設計的要求，離子植入製程需準確地控制離子束的能量、電流和離子的種類。



**射束線系統：**

離子射束線系統(Beam Line System)是離子植入機最重要的一個部分，可以使摻雜物離子在一個離子源中藉著摻雜物的蒸氣或是氣態摻雜物的化學合成物之原子或分子的游離放電而產生。

**晶圓處理器：**

晶圓處理器(Wafer Handler)最重要的功用，在於使整個晶圓表面達到均勻的離子佈值。

離子佈值為一添加的製程，晶圓片(Wafer)在完成光阻覆蓋後，會進行離子佈值，而離子佈值主要以高能量帶電離子束注入的形式將摻雜物原子強力地加入半導體中，目的是為了改變積體電路元件局部區域之電阻值，以獲得所需要的導電行為。而離子植入製程具有三種功能:

1. 摻雜物質形態，主要由離子種類所決定
2. 摻雜物濃度，主要由離子電流與佈植時間的組合所控制
3. 摻雜物輪廓(dopant profile)與深度，主要由離子的能量所決定

一部典型離子植入機台可以最多可安裝三種氣體作為摻雜原子源的材料來源，氣體種類則有  $\text{AsH}_3$ 、 $\text{BF}_3$ 、 $\text{P}$ 、 $\text{SiF}_4$  四種氣體可供選擇，通常氣體被封入一相當小的鋼瓶(0.4~2.2L 大小)之中。離子植入機使用相當多危險且具有毒性的氣體來進行離子佈植製程，易燃和有毒的氣體如三氫化砷( $\text{AsH}_3$ )和四氟化硅( $\text{SiF}_4$ )，腐蝕性的氣體如三氟化硼( $\text{BF}_3$ )，還有從固態材料轉換而來的有毒蒸氣如磷( $\text{P}$ )，為了避免這些有害氣體滲入廠房之中，危害生產人員性命，離子植入機台內特別設計了氣體櫃，統一管理與存放有毒的氣體鋼瓶，氣體鋼瓶主要藉由質流控制器(MFC)來控制此氣態摻雜原料，如圖 2.2 所示，其品質及穩定性將直接影響製程結果，再者於機台維修、緊急狀況時也能隔絕氣體供應室的供氣。

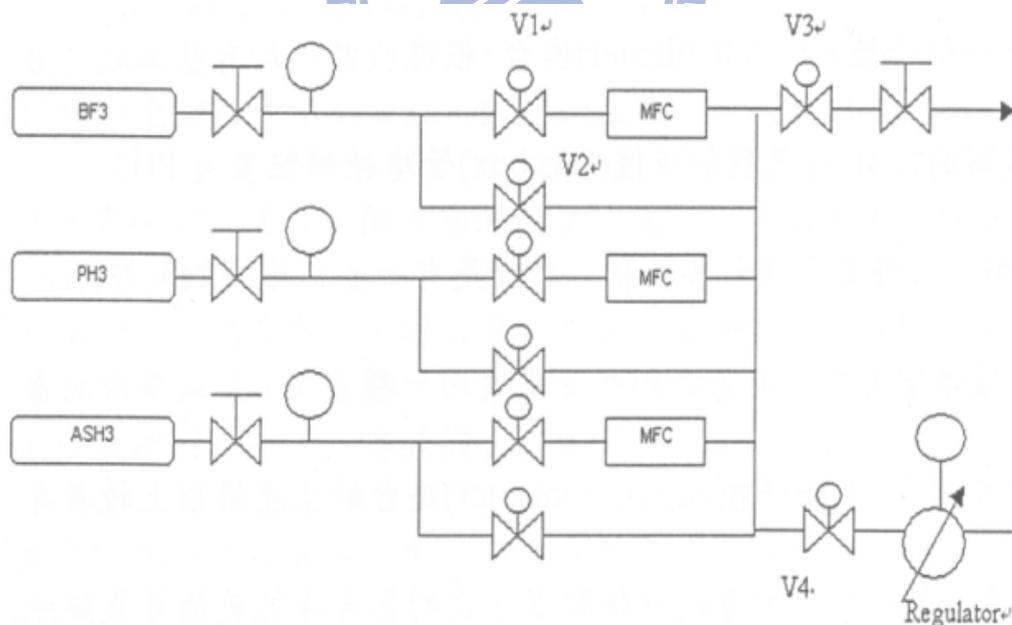


圖 2.2 離子植入機台鋼瓶管路構造圖，黃國益(2006)

目前半導體前段生產設備離子植入機台的主要供應商，包括美商應用材料（Applied Material）、美商瓦里安(Varian)、美商亞舍立(Axcelis)和住友伊藤（Sumitomo Iaton）等四家離子植入設備製造廠商。

## 2.2 研究離子植入機台派工相關文獻

離子植入機其功能為對晶圓進行離子佈植的製程，在以往文獻中，總在機台組態完備下進行派工，並無考量其附屬資源-氣體種類和機台配置管線多寡所導致產能損失的問題，故在以往的文獻中，將多部離子植入機台看成多部功能相同的機台，在此情境下進行工件排序。

在離子植入機的派工問題中，大致上可以將問題分成兩大類：第一，機台功能一致，研究的問題為針對多部功能一致的離子植入機進行工件排序生產，近期文獻的目標有 Setup Time、Tardiness、Delivery Rate...等（Sunkara, R., and Ramesh, R.,(2004)；Duwayri *et al.*,(2006)；Mason, S.J., and Fowler, J. W.,(2000)）；第二，機台功能不一致，研究的問題為針對離子植入機其附屬資源-氣體進行配置的問題，如黃氏(2006)，但並不探討工件排序問題。本研究則在探討氣體種類與機台氣體管線配置的最適情境與多部離子植入機台功能不一致的情境下，進行工件排序生產問題。

## 2.3 附屬資源相關研究分類

排程是一種對生產系統進行資源分配的決策，工廠常見的排程問題通常為機台與工件之間的安排，然而在製造業中，工廠內的機台要完成某些產品的製程步驟，需搭配額外的附屬資源才能順利加工完成，例如在半導體產業內的離子植入製程，機台需搭配氣體 (gas) 才能進行加工。在有關於機台與工件之排程相關文獻中，若考慮生產環境中具有副資源此項因素，大多數學者在發表研究時皆忽略工件在加工時需要副資源，或是作些假設降低副資源在加工時影響的程度，而只考慮了機器的加工限制，然而實際上為了讓機台能發揮更大的效益，必須要將副資源這項因素一起考慮進去，如此才能有效的利用機台產能。

針對彈性製造系統(FMS)環境中，探討選取附屬資源的問題，大致上可以將問題分成兩大類：第一，同時決定零件指派加工(Part assignment)和刀具配置(Tool allocation)問題，Sarin and Chen(1987)研究在刀具生命週期(Tool life)、刀具大小(Tool size)和刀具數量(Magazine capacity)限制下，發展一混整數規劃模型，求出零件指派加工和刀具配置。Leung *et al.*(1993)則假設所有刀具生命週期與大小都相同的前提下，發展一整數規劃模型，求出零件指派加工和刀具的配置。Buyurgan *et al.*(2004)利用刀具的生命週期和刀具大小的比值(tool life/tool size; L/S)，進行刀具與機台的配置和零件的指派加工，考量刀具的可用數量與一個產品需使用多種刀具才可完成加工作業的限制下，發展一個啟發式演算法，以機台利用率最大化為目標，進行選取零件及配置刀具在機台上加工。Whitney and Shin(1985)發展一序列演算法(Sequential heuristic)來決定零件型態的選擇與刀具的配置。Rau and Chetty(1996)發展一動態規劃模型，求解零件指派加工和刀具的配置；第二，決定刀具配置(Tool allocation)問題，過去已有許多文獻針對此問題進行求解，如(Stecke(1983)；Atan and Pandit(1996)；Amoalo and Meredith(1996))。

在製造業裡，電腦數值控制機(Computer Numerical Control, CNC)在彈性製造系統環境中應用的非常廣泛，產品在 CNC 機台上加工時需要有附屬資源—各種不同的刀具協助，才可完成加工，因此如何配置刀具與機台為非常重要的一項工作。Avci *et al.*(1996)

針對 CNC 機台刀具管理的議題，考量機台內放置刀具的刀具盒具有容量的限制、每一刀具需擺放在刀具盒的專屬位置和刀具具有生命週期等限制下，提出以最小化製造產品之總成本為目標，求解刀具與機台的最佳配置與工件加工的最佳順序。Akturk(1999)考量產品加工時需利用刀具此項條件，在刀具與機台搭配的限制和機台只能放置一定數量刀具等限制下，發展一個混整數規劃模型，以最小化加工的總成本為目標進行求解。Akturk and Onen(1999)發展一啟發式演算法，以最小化製造產品總成本為目標下，來求解工件批數量大小與刀具的最佳配置。Akturk and Ozkan(2001)發展一多階段演算法，在最小化總製造成本下，求解刀具與機台的配置及作業指派加工。Bilgin and Azizoglu(2009)則發展兩種啟發式演算法與禁忌搜尋法(Tabu search)進行比較，考量刀具利用率與刀具盒具有容量的限制下，求解刀具的最佳配置與作業指派加工。

在半導體晶圓測試階段中，Wang and Hou(2003)研究在預算及附屬資源限制下，測試機台產能擴充與配置問題。在已知需求、預算與針測機台 (prober) 之數量限制下發展一整數規劃模型，並以最大利潤為目標，求解測試機台的最佳配置量。Zhang *et al.*(2006)提出過去在 IC 測試環境進行產能規劃時，通常單就瓶頸資源進行規劃，而將其他成本甚高之附屬資源視為產能無限，此規劃方法的實務性受到質疑。因此，作者在進行產能規劃時，不僅針對測試機台的產能進行評估，亦針對高成本之關鍵資源進行數量推估，以節省企業在進行產能配置與擴充時所耗費的資金成本。作者建構混合整數規劃模式，以最小化高等級工單未能滿足的成本與未能滿足的機台工程時間為目標，另行建構 High Buffer Formulation 與 Tight Workload Formulation 以改進原數學規劃模式的缺點，讓測試機台與附屬資源數量的規劃數量更為精確。

在離子植入機氣體配置相關研究中，黃氏(2006)針對離子植入機台做整體規劃來配置各機台毒氣鋼瓶種類，提出成對組合的概念，在同一部離子植入機台的氣體鋼瓶櫃內，配置兩瓶或兩瓶以上相同種類毒氣氣體的鋼瓶，藉此提升機台生產績效。針對附屬資源之相關文獻整理如表 2.1 和表 2.2 所示。

表 2.1 附屬資源之相關研究文獻

文獻	附屬資源	使用之求解方法	目標式
Sarin & Chen(1987)	FMS 之刀具	MIP 模式	最小化總生產成本
Leung <i>et al.</i> (1993)	FMS 之刀具	IP 模式	最小化總生產成本
Buyurgan <i>et al.</i> (2004)	FMS 之刀具	tool life / tool size 之比值	最大化機台利用率
Rau & Chetty(1996)	FMS 之刀具	dynamic programming	最小化機台負荷差異
Whitney & Shin(1985)	FMS 之刀具	sequential heuristic	最大化機台利用率、 最大化刀具槽利用 率、最小化刀具數量
Stecke(1983)	FMS 之刀具	nonlinear programming	最大化零件被連續製 造的次數、最大化刀 具槽利用率
Atan & Pandit(1996)	FMS 之刀具	IP 模式	最小化刀具數量
Amoako & Meredith(1996)	FMS 之刀具	tool and part batching、 tool sharing、flexible tooling heuristic	最小化刀具更換次 數、最大化刀具槽利 用率
Akturk(1999)	CNC 刀具	MIP 模式、啟發式解法	最小化總生產成本
Avci & Akturk(1996)	CNC 刀具	兩階段式求解方法	最小化總生產成本
Akturk & Onen(1996)	CNC 刀具	MIP 模式	最小化總生產成本
Akturk & Ozkan(2001)	CNC 刀具	multistage algorithm	最小化總生產成本
Bilgin & Azizoglu(2009)	CNC 刀具	啟發式解法、TS	最大化總權重值
Wang & Hou(2003)	針測卡	IP 模式、GA	最大化利潤
Zhang <i>et al.</i> (2006)	針測卡	MIP 模式、High Buffer Formulation、Tight Workload Formulation	最小化高等級工單未 能滿足的成本、未能 滿足的機台工程時間
本研究	氣體	MIP 模式、GA、SA、TS	最小化總完工時間

表 2.2 附屬資源限制之相關研究文獻

		Part assignment	Tool allocation	Cost constraint	Tool life	Tool size	Magazine capacity	New process introduction
FMS	Sarin & Chen(1987)	•	•	•	•	•	•	
	Leung <i>et al.</i> (1993)	•	•		•	•	•	
	Buyurgan <i>et al.</i> (2004)	•	•		•	•		
	Rau & Chetty(1996)	•	•					
	Whitney & Shin(1985)	•	•					
	Stecke(1983)		•					
	Atan & Pandit(1996)		•				•	
	Amoako & Meredith(1996)		•				•	
CNC	Akturk(1999)	•	•	•	•	•		
	Avci & Akturk(1996)	•	•	•	•	•	•	
	Akturk & Onen(1996)	•	•	•	•			
	Akturk & Ozkan(2001)	•	•	•	•			
	Bilgin & Azizoglu(2009)	•	•					
Semiconductor test	Wang & Hou(2003)		•	•				
	Zhang <i>et al.</i> (2006)		•	•				
Ion implanter	本研究	•	•				•	•

## 2.4 非等效平行機台相關文獻(Unrelated parallel machine)

在半導體廠中，相同功能之機台由於機台設備型號不同或是機台設備的新舊，導致相同工件在不同機台上的加工時間不一致，造成決策者必須考量如何有效的將工件指派給機台加工，以降低各工件在機台上的處理時間，進而提昇機台利用率，此類型的排程問題即所謂的非等效平行機台排程問題。由於將工件指派給機台加工，尚需考量機台的製程能力，也就是工件只能指派給那些能加工這個工件的機台，因此本研究將機台的製程能力納入研究，在最小化最大機台總加工時間之目標下，建構以基因演算法為主架構並結合菁英政策來進行最佳化工件指派決策。

工件加工製程的排程，若以機台數量與工件生產型態可區分為單機排程(Single Machine Scheduling)、流線型生產排程(Flow Shop)、零工式生產排程(Job Shop)、平行機台排程(Parallel Machine Scheduling)。平行機台排程指的是以多部相同或不完全相同之機台進行加工作業，使工件可於不同機台進行加工，以提升機台利用率之生產模式。在 Allahverdi(1994)指出在生產環境中，平行機台依照機器的性質可分成下列三類：

1. 完全相同機台(Identical Machine)：完成相同機台表示在平行機台之中的每一部機器不論是功能或製造速度都完全相同，亦即代表每一相同之工件於任一機台上所需加工時間相同，一般探討平行機台之研究文獻大多探討此類問題，此類生產型態以函數表示如下：

$$P_{ij} = P_{i1} \quad \forall i, j, \quad P_{ij} : \text{工件 } i \text{ 於機台 } j \text{ 之加工時間}$$

2. 等效機台(Uniform Machine)：等效平行機台表示相同工件於每一平行機台上之加工時間，會因機台不同而有所變化，亦即表示不同之平行機台處理相同工件之加工時間會呈現比例關係。實際半導體廠中，機台會因新舊機型同時進行加工，產生成比例的加工時間，而此比例是固定的，此類生產型態以函數表示如下：

$$P_{ij} = \frac{P_i}{V_j} \quad \forall i, j, \quad P_{ij} : \text{表示訂單 } i \text{ 在機台 } j \text{ 的加工時間}$$

$$V_j : \text{在機台 } j \text{ 的加工速率比例值}, \quad P_i : \text{訂單 } i \text{ 之標準加工時間}$$

3. 非等效平行機台(Unrelated Parallel Machine)：此類型生產型態之平行機台間具功能上之差異，且工件與機台並無一相對之關係，亦即不同之工件於各一機台上加工的時間均不相關且成不均勻比例，此類生產型態以函數表示如下：

$P_{ij}$ ：為一不確定值  $\forall i, j$

$P_{ij}$ ：表示訂單  $i$  在機台  $j$  的加工時間

探討非等效平行機台相關文獻時，績效指標通常以最小總完工 (Makespan)、交期延遲(Tardiness)和整備時間(Setup Time)等三方面最常被探討，其中又以最小總完工時間 (Makespan) 的研究最為熱門，如下表 2.3 所示。

表 2.3 非等效平行機台相關文獻

作者	工具	目標	內容
Chen & Chen(2009)	啟發式演算法	Makespan	以 bottleneck-based heuristic (BBFFL) 求解 flexible flow line problem，機台型態為非等效平行機台
Fatima(1999)	基因演算法	Makespan	以基因演算法求解零工式生產排程(job shop)問題
Ruiz & Maroto(2006)	基因演算法	Makespan	以基因演算法求解流線型生產型態，並考慮相依整備時間。
Ghirardi & Potts(2005)	改良式分枝界限法	Makespan	以改良式分枝界限法，解決最小化最大完工時間的問題，得到品質佳的近似解。
Mokotoff & Jimeno(2002)	混合整數規劃法	Makespan	以混合式整數規劃法(mixed integer linear programming ,MIP)，求解非等效平行機台問題，並分析其測試結果與傳統的解法的比較。

## 2.5 OPL 數學規劃軟體

OPL 軟體為 ILOG 產品之一，OPL 是一種專門求解組合最佳化問題的模式化語言，應用在如規畫(Planning)、排程(Scheduling)、資源配置(Resource Allocation)等進行求解，屬於模式化工具，其兩種解題核心分別為 CPLEX 與 Solver。對於線性規劃問題，OPL 使用高效率之 CPLEX 來進行求解，而對於混合整數規劃問題，使用者可自行選擇使用 CPLEX 或 Solver 來進行求解。

與一般命令式語言不同，如 C，OPL 是一種宣告式語言(Declarative Language)，其特性在於使用者可隨時地針對限制式加以修改、刪除，且限制式在模式中的順序並不會影響模式的求解結果，且 OPL 亦結合線性規劃、整數規劃和限制規劃功能，可大幅縮短求解時間，提高求解效率，其模式化語言的特性，更可以讓使用者降低建構模式的時間，快速上手並解決問題。ILOG OPL Studio 數學規劃套裝軟體的使用介面如圖 2.3 所示。

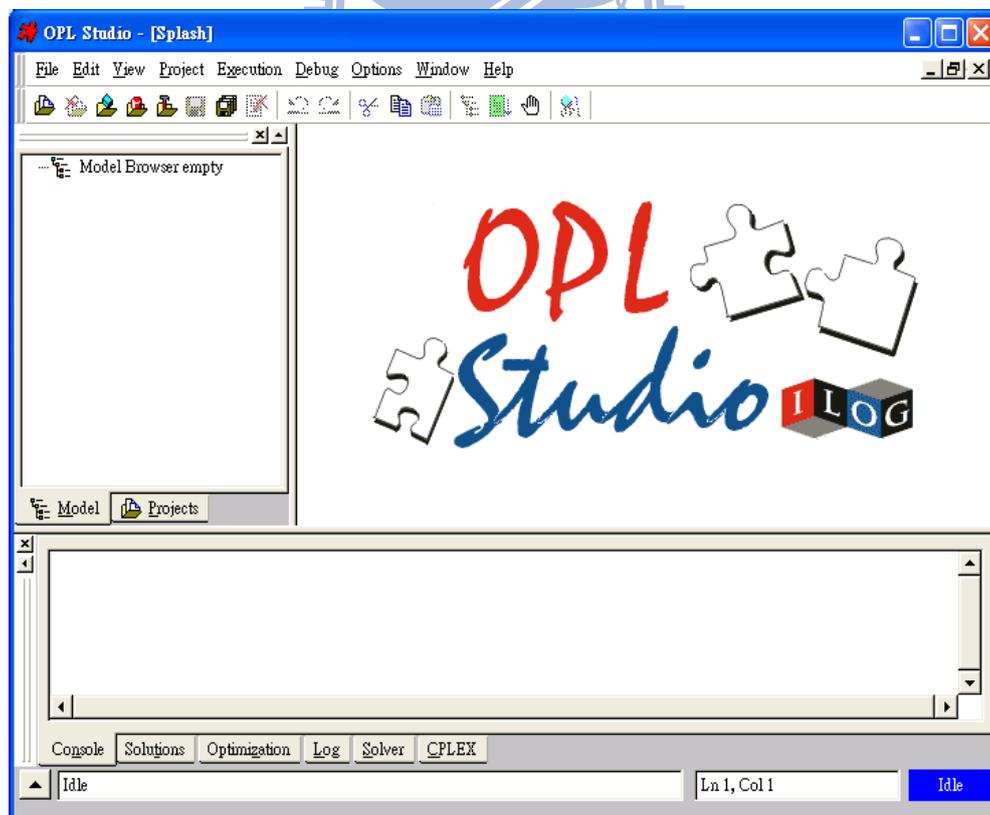


圖 2.3 ILOG OPL Studio 數學規劃套裝軟體使用介面

## 2.6 巨集演算法 (meta-heuristic algorithm)

### 2.6.1 基因演算法 (Genetic algorithm)

基因演算法是由 Holland(1975)提出，基因演算法 (Genetic Algorithms) 是一種啟發組合式 (heuristic combinatorial) 的最佳化搜尋方法，主要依據生物學家查理·達爾文 (Charles Oarwin) 的「進化論」為基礎，模仿生物界「物競天擇、適者生存」的自然演化過程，以求得問題最終穩定且最佳的結果。基因演算法與傳統搜尋法最大不同之處在於它是採多點搜尋的方式，在參數空間中同時尋求問題最佳解，在尋找過程中僅需藉由所定義的適應度函數值 (Fitness function) 作為演化過程中的指標依據，並透過複製(Reproduction)、交配(Crossover)、突變(Mutation)等演化方式產生下一代的物種。而整個基因演算法的執行流程如圖 2.4 所示。

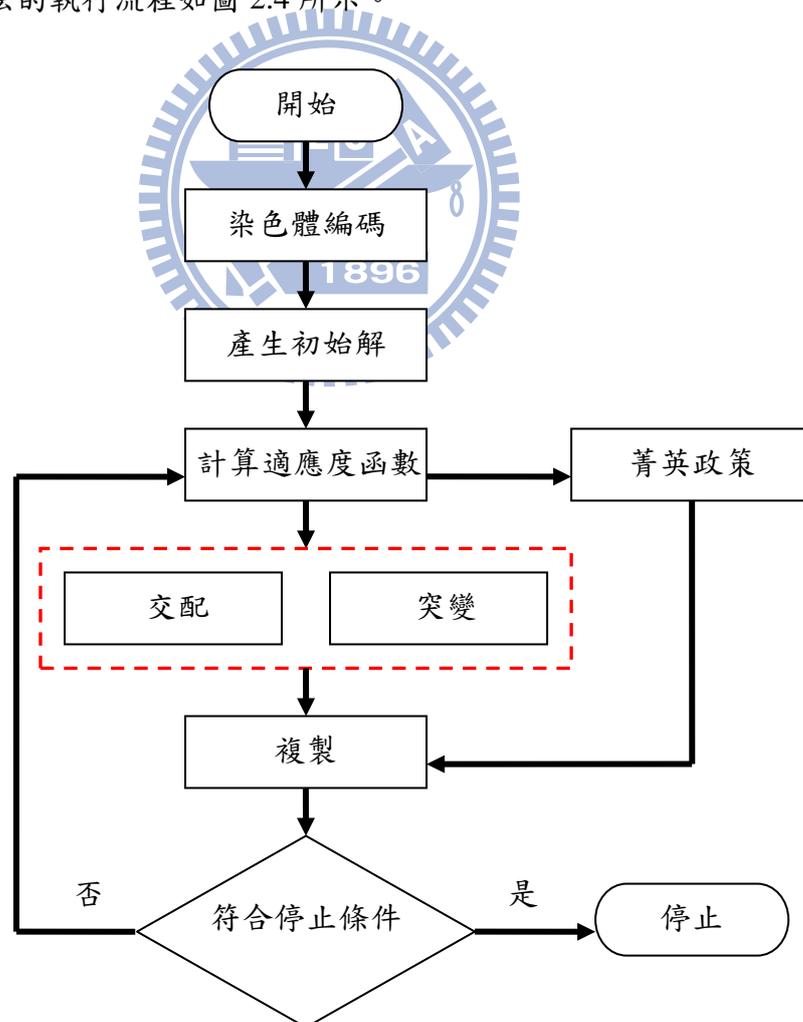


圖 2.4 基因演算法執行流程

基因演算法各功能之簡介如下:

### 1. 染色體編碼

透過編碼程序，將決策變數轉換成可以代表可行解的字串，而此字串型態稱之為染色體，染色體中每一個字元稱之為基因，常見編碼方式可分二進位編碼 (binary)、實數 (real number) 編碼及順序 (order) 編碼方式，本研究以實數編碼方式，將決策變數以工件編號來代表。

### 2. 初始解

在進行汰弱扶強之前，需隨機產生 $n$ 個染色體作為起始解，稱之為初始母代，而母代中染色體的多寡與好壞往往對於子代的收斂與求解品質有一定程度的影響，即母代群體太小，則容易造成快速收斂且求解的品質可能比較不好，若母代群體太大，則使得求解時間拉長，而若產生的起始解越好時，則越容易找到最佳解。

### 3. 適應度函數值

為了衡量母代中染色體的好壞，我們將染色體帶入適應度函數中進行運算，其值越高的代表染色體適應能力較佳，因此存活的機率也較高，反之較差的染色體則代表適應能力較弱，存活機率也較低。

### 4. 交配

交配方式是由母代中隨機挑選兩條染色體來進行交換彼此內部的基因，由於交配點的選擇一般都是使用隨機的方式決定，因此通常皆可保有母代染色體的較佳的特性且可經由與母代染色體交配的過程中，有可能繁衍出更佳的下一代，一般交配的方式有單點交配(One-Point Crossover)、線性順序交配(LOX: Linear Order Crossover Operator)、部分相應交配(PMX: Partially Matched Crossover Operator)等。

## 5. 突變

由於子代染色體並不一定繼承上一代之所有特性，而以隨機的方式使得子代染色體的某一基因值隨意的變換成另一值的情形，稱為突變。經由突變可開發新的搜尋領域，防止收斂於問題的局部最佳解(local optimum)，而較容易搜尋到全域最佳解(global optimum)。一般突變的方式有交換(Swap)、插入(Insert)和反轉(Inverse)。

## 6. 複製

當交配與突變之後，交配池中共有母代加上子代的染色體，此時需依據各個染色體的適應度函數值大小，來決定是否進入下一代，本研究利用菁英政策(Elitism Strategy)在每一世代群體中保留較佳的個體進化演化，在經過交配、突變的運算過程後其結構都有可能被改變破壞，而我們通常都希望較佳的染色體能夠繼續生存至下一代，因此演算流程將會篩選保留每一世代中適應度較佳的染色體，以避免於交配、突變運算過程中遭到破壞。

而其餘的染色體選擇方式則透過輪盤法(Roulette wheel) Goldberg(1989)來選取。其主要概念就是將各染色體之適合度依照比率計算後，繪製成一個圓形的輪盤。藉此可知，適應度愈大的則其所佔的部分相對就愈大。而此時以隨機的方式產生一介於 0~1 之間的隨機值，用以與累積機率比較。因此，適應度大的染色體將比適應度小的容易被選到，但此並不保證適應度大的就一定會被選到。反複進行同樣的步驟，直到足夠產生下一代的染色體為止。

## 7. 演化停止條件

當基因演算法滿足所設定的終止條件時，將停止演化循環，一般常用的停止條件有演化代數達到所設定的最大演化代數、演化代數達到所設定的最佳解持續代數、演化代數超過 1000 世代後，最佳適應度函數值改善率未超過 1% 和適應度函數值達到預先設定的目標函數值。

## 2.6.2 模擬退火法 (Simulated annealing)

模擬退火法最早是由 Metropolis N.(1958)等人於 1958 年所提出，但直到 1983 年由 Kirkpatrick(1983)等人應用於求解組合最佳化問題時，才使此演算法開始受到重視。模擬退火法的核心觀念在於模擬固體從高能量狀態下降到低能量狀態時的整個降溫的過程，SA 在求解過程中，由於波滋曼函數 (Boltzmann) 的關係，在溫度高的時候，即使是較差的目標值，仍有機率被接受當作目前的現行解，但隨著溫度慢慢地降低，接受較差目標值的機率也逐漸下降，此外透過結合隨機的過程，使其有跳躍區域最佳解的能力，而獲得整體的最佳解。

SA 演算法的架構包含 Metropolis 演算法與退火程序，詳述如下：

步驟 1: 在迭代  $t = 0$  時，隨機產生一初始解  $S(0)$ 。

步驟 2: 以 Metropolis 演算法，判斷是否接受鄰近解取代現行解。

- 根據現行染色體  $S(t)$ ，透過 SWAP 方式產生一組新的鄰近解  $S'(t)$ 。
- 設定  $\Delta E' = C(S') - C(S)$ 。  
 $C(S)$ : 代表現行解的總完工時間 (makespan)。  
 $C(S')$ : 代表鄰近解的總完工時間 (makespan)。
- 若  $\Delta E' < 0$ ，表示鄰近解較佳，則將鄰近解取代現行解；若  $\Delta E' > 0$ ，表示鄰近解沒有比現行解好，則以機率  $\exp(-\Delta E' / \alpha T)$  來判斷是否接受  $S'$  作為現行解。其作法為產生一個亂數  $u$  介於  $[0,1]$ ，若  $u < \exp(-\Delta E' / \alpha T)$ ，則接受鄰近解當作現行解，反之則否。此處的  $\alpha$  為 Boltzmann 常數， $T$  則為目前溫度。
- $T(t+1) = \alpha T(t)$ 。

步驟 3: 當  $T(t+1) < 1$  時則停止。

而整個模擬退火法的執行流程如圖 2.5 所示。

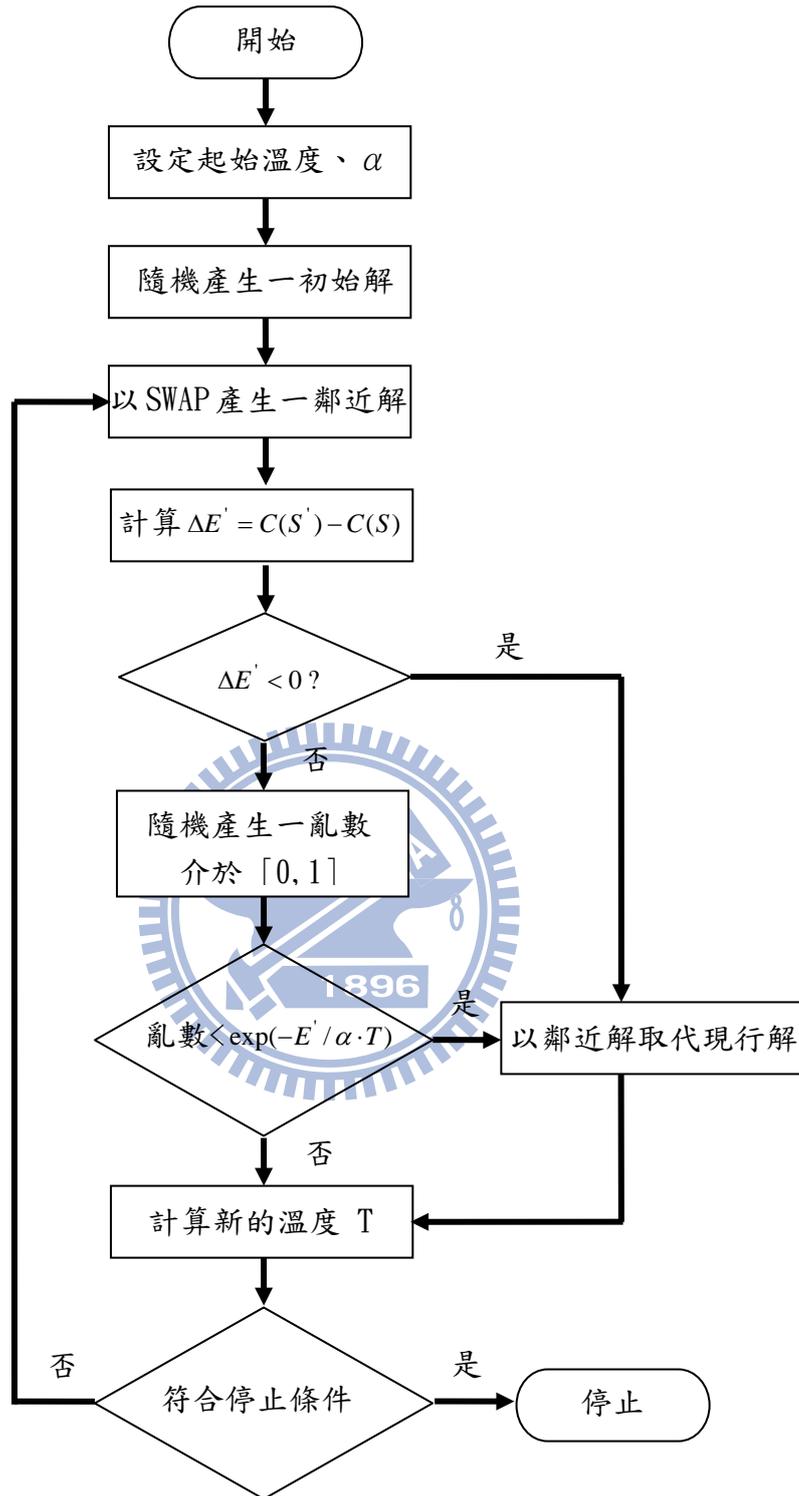


圖 2.5 模擬退火法執行流程

### 2.6.3 禁忌搜尋法 (Tabu search)

禁忌搜尋法是由 Glover(1990)於 1990 年所提出，其核心概念主要為利用禁忌名單 (Tabu list)來記錄過去一段時間內所選取移步之屬性，且該屬性在一定迭代次數內，將不再被重複選取，直到該屬性被釋出禁忌名單後始得選取，如此一來可避免不必要的搜尋。

搜尋停止準則常用方式如下:

1. 達到設定最大迭代次數後即停止。
2. 最佳解在一定迭代次數內未獲得改善即停止。
3. 達到設定 CPU 最長執行時間即停止。
4. 達到設定之可接受目標值即停止搜尋。

禁忌搜尋法其演算流程，詳述如下:

步驟 1: 在迭代  $t = 0$  時，隨機產生一初始解。

步驟 2: 根據現行染色體，透過 SWAP 方式產生新的鄰近解並記錄於候選名單 (Candidate list)中，之後從候選名單之中找出鄰近最佳解。

步驟 3: 將此鄰近最佳解與禁忌名單比對是否有相同之解，若無則將此鄰近最佳解放入禁忌名單之中，同時比對鄰近最佳解是否優於現行解，若有則將之取代，之後更新禁忌名單。

步驟 4: 比對現行解是否優於最佳解，若有則將之取代。

步驟 5: 當  $T(t+1) < 5000$  代或連續 1000 代未改善最佳解時則停止。

而整個禁忌搜尋法的執行流程如圖 2.6 所示。

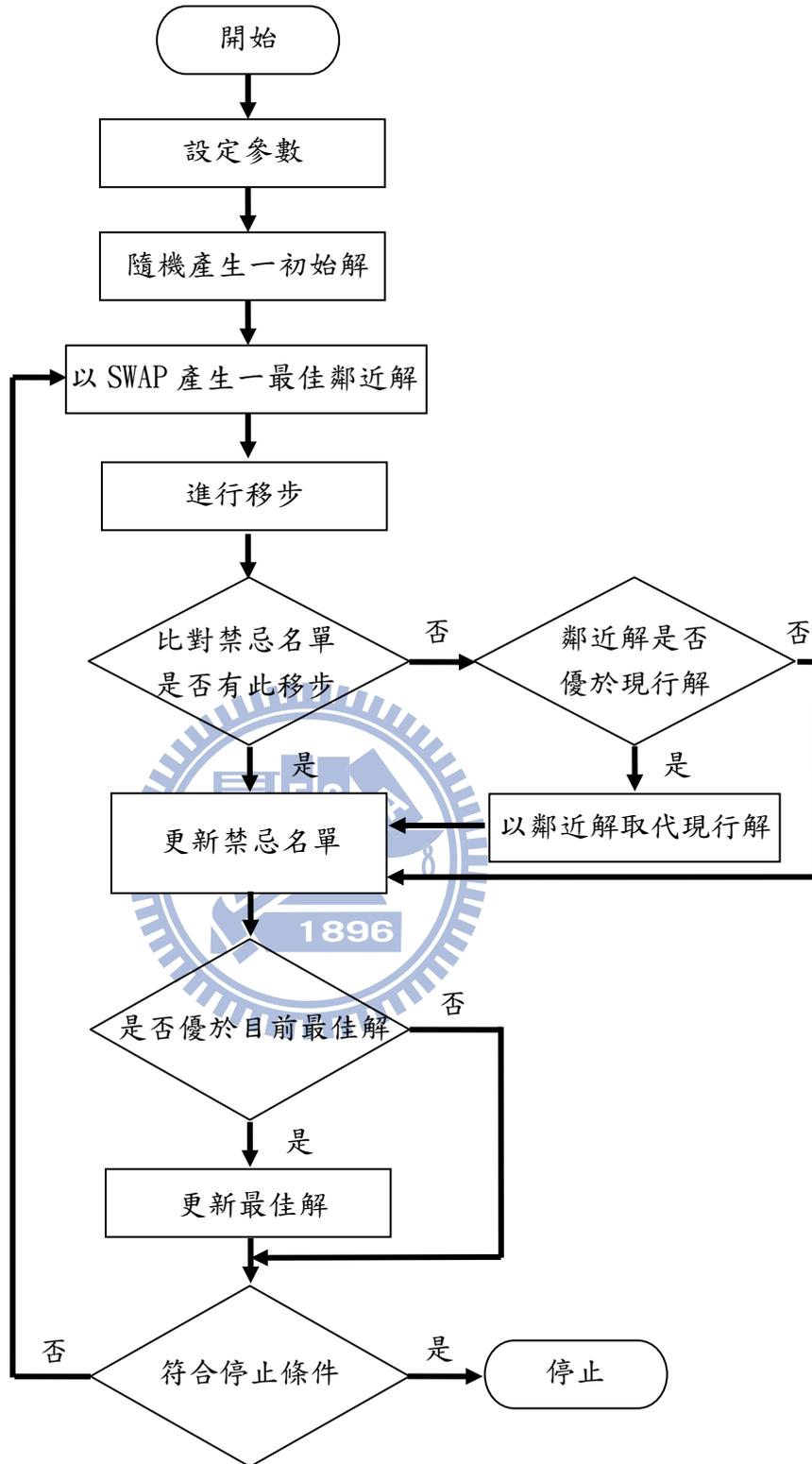


圖 2.6 禁忌搜尋法執行流程

### 第三章 以混合整數規劃求解機台最適氣體類型配置

在本章探討如何利用混合整數規劃(Mixed Integer Programming, MIP)的方法，建構模式以進行求解離子植入機最適氣體類型配置問題，本章分成數學模式建構，相關參數定義，再以半導體廠公司提供實際上之原始數據做為實驗背景，並將於第五章分析實驗結果。本章求解模式主要以ILOG OPL Studio數學規劃套裝軟體求解。

#### 3.1 研究問題描述

本研究探討的機台最適氣體類型配置是一種長期規劃問題，必須以產品未來的需求為依據，因此我們的決策(Decision Making)必須在機台多工型與機台專工型之間進行取捨(Trade off)，如圖 3.1 所示。

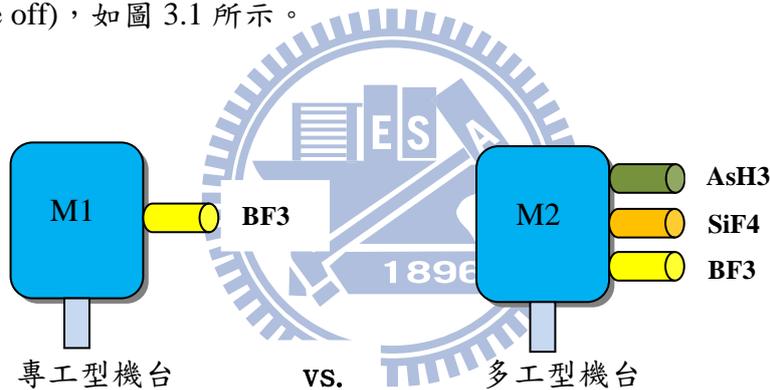


圖 3.1 專工型機台與多工型機台示意圖

機台如果配置多種氣體，機台的功能增多便比較不會缺料而閒置，如此一來可提高機台利用率，增加產出，相對地機台功能多可加工的工件種類也會變多，會使的整備時間驟增且隨著產品生命週期越來越短，伴隨而來的新製程導入的工件也會越來越多，這些因素都會使具有多功能的機台造成產能損失；相反地，機台如果配置較少種氣體，機台就可專攻某些工件種類，減少整備時間，增加可用產能，相對地，機台功能少，工件等候加工的時間會拉長，而產品生產週期相對地也會增加。

因此，依據未來所預測出的產品需求來決定多少部離子植入機為專工型、多少部離子植入機為多工型，以離子植入機為例，預測的需求情境可以以使用的產能來表示，

例如， $(A, B, C)=(100, 200, 400)$ ，表示產品未來需求 A 產品為 100 單位、產品 B 為 200 單位、產品 C 為 400 單位。之後我們在將產品未來的需求轉換為所需加工氣體的產能需求，如上例，將產品 A、產品 B、產品 C 的需求總量為 700 單位，轉換為需求氣體的生產小時，為 $(AsH_3, BF_3, SiF_4, P) = (480HR, 250HR, 340HR, 100HR)$ ，依此需求氣體的生產小時來作為決策時的依據，而本研究背景即為在需求確定環境 (deterministic demand model) 之下，求解機台最適氣體類型配置。

在此模型中，我們亦考慮了新製程導入，由於科技不斷進步，製程技術的提升成為工廠中極為重要的議題，本研究即假設每一種氣體都需進行新製程導入，即為機台都需通過合格測試(Qualify)過後，新製程所導入的工件才可以進行加工，藉以因應未來多樣性產品製程能有足夠的產能供給生產，而不會造成機台因製程能力不足而無工件可加工，導致機台有產能閒置的情況發生。

我們描述的機台最適氣體類型配置規劃模型，是在確定總需求環境下有氣體管線的限制之機台最適氣體類型配置問題，機台最適氣體類型配置規劃的目標是使機台最大完工時間最小化。藉此求出機台長期規劃下，最佳的氣體配置問題。

### 3.2 研究方法

此節將說明本研究應用混合整數規劃來求解離子植入機最適氣體類型配置規劃問題，即以混合整數規劃來構建問題的數學模式，混合整數規劃法的規劃與流程，如圖 3.2 所示。



圖 3.2 混合整數規劃研究流程

### 3.2.1 相關符號、參數說明

#### 符號

$i$ : 機台指標 ( $1 \leq i \leq I$ )

$j$ : 氣體種類指標 ( $1 \leq j \leq J$ )

#### 參數

$U$ : 每一部機台最多可配置的氣體種類數量

$S$ : 當機台需轉換不同加工氣體所產生之整備時間(小時)

$W_i$ : 機台  $i$  的產能負荷(小時)

$t_j$ : 氣體  $j$  跨配方所需耗用的時間(小時)

$D_j$ : 氣體  $j$  的總需求加工小時

$Q$ : 極大常數

$r_j$ : 氣體配方  $r_j$ ,  $r_j=1、0$ (1 代表配置有氣體  $j$  的機台需導入新製程, 0 代表不用)

$n_j$ : 氣體  $j$  每年需導入新製程的次數



#### 決策變數

$x_{ij}$ : 氣體配置  $x_{ij}$ ,  $x_{ij}=1、0$ (1 代表機台  $i$  配置有  $j$  氣體, 0 代表沒有配置)

$d_{ij}$ : 機台所分配到氣體  $j$  可用於加工工件  $i$  的產能(小時)

我們將確定性需求的機台最適氣體類型配置問題(Gas-type allocation problem for deterministic demand)規劃成下列數學模型：

### 3.2.2 數學模式

Minimize  $C_{\max}$

s.t.

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq U, 1 \leq i \leq I \quad (1)$$

限制式(1)為機台組態的限制(Machine Configuration)，每部機台最多可裝  $U$  種氣體。

$$\sum_{i=1}^I d_{ij} = D_j, 1 \leq j \leq J \quad (2)$$

限制式(2)為氣體可用產能限制，每一種氣體在任一機台所加工的時間加總需小於等於氣體可使用時間。

$$d_{ij} \leq x_{ij} \cdot Q, 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J \quad (3)$$

限制式(3)為每一種氣體只能指派給那些能加工這個氣體的機台。

$$x_{ij} \leq d_{ij}, 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J \quad (4)$$

限制式(4)為判斷氣體  $j$  是否有指派到機台  $i$ 。

$$\sum_{j=1}^J d_{ij} + \left( \sum_{j=1}^J x_{ij} - 1 \right) \cdot S + \sum_{j=1}^J r_j \cdot x_{ij} \cdot t_j \cdot n_j \leq C_{\max}, 1 \leq i \leq I \quad (5)$$

限制式(5)為每一部機台的完工時間會小於或等於最晚完工那部機台的完工時間。

$$\sum_{j=1}^J d_{ij} + \left( \sum_{j=1}^J x_{ij} - 1 \right) \cdot S + \sum_{j=1}^J r_j \cdot x_{ij} \cdot t_j \cdot n_j \leq W_i, 1 \leq i \leq I \quad (6)$$

限制式(6)為每一部機台的負荷含加工、整備和機台導入新製程所需的時間加總需小於或等於機台的產能負荷。

目標式 Minimize  $C_{\max}$  :  $C_{\max}$  為機台完工時間中的最大值，亦即為求機台完成加工時間最長的。目標式和限制式(5)的目的為除了找出最大完工時間也要求其最小化，在此目標式和限制式(5)的限制之下，可使各機台的完工時間平均化。

### 3.2.3 ILOG OPL Studio 軟體求解

本研究利用 ILOG OPL Studio 軟體求解離子植入機台最適氣體類型配置問題，OPL 執行撰寫限制式產生器的模型，大概介於 AMPL 和 C++之間，寫法有點近似 C++。在決策模型中，決策者依據未來的產品需求，來決定工廠應提供多少氣體產能來符合需求，對離子植入機而言，一部典型的離子植入機最多配置三種氣體，有三氯化砷( $AsH_3$ )、四氯化矽( $SiF_4$ )、腐蝕性的氣體如三氟化硼( $BF_3$ )、還有從固態材料轉換而來的有毒蒸氣如磷(P)，四種氣體可供配置，不過一部離子植入機受限於氣體鋼瓶櫃 (Gas box)的空間大小，最多只能配置三種氣體來進行加工。

詳細求解過程將於第五章進行說明，其求解數據將採用半導體廠公司提供實際上之原始數據做為實驗背景，並於第五章分析實驗結果。

## 第四章 求解工件指派加工

在本章探討如何利用巨集搜尋演算法 (meta-heuristic)來進行求解離子植入機工件的指派加工問題，而多個工件在多部機台的排序問題必須面臨兩個決策：即工件需要分配給那一個機台 (job assignment)，以及工件在各別機台內的排序問題 (job sequencing)。工件排序為一 NP-hard 的問題，因此隨著問題規模增大，傳統的數學規劃或套裝軟體將無法在合理時間內求得最佳解，因此以巨集搜尋演算法-基因演算法、模擬退火法和禁忌搜尋法分別來進行求解。本章分成數學模式建構、相關參數定義、染色體設計與解讀、適應度函數建構、演算法求解過程定義及相關參數定義，接著再比較各個演算法之差異。

### 4.1 研究問題描述

本研究所探討的工件指派是一種短期的現場派工規劃，在機台最適氣體類型配置已知下，探討內容為離子植入機台工件指派加工問題，如圖 4.1 所示。針對非等效平行機台指派問題，本研究則利用演算法來求出最佳之工件分配組合，績效指標為使最大機台完工時間最小化。

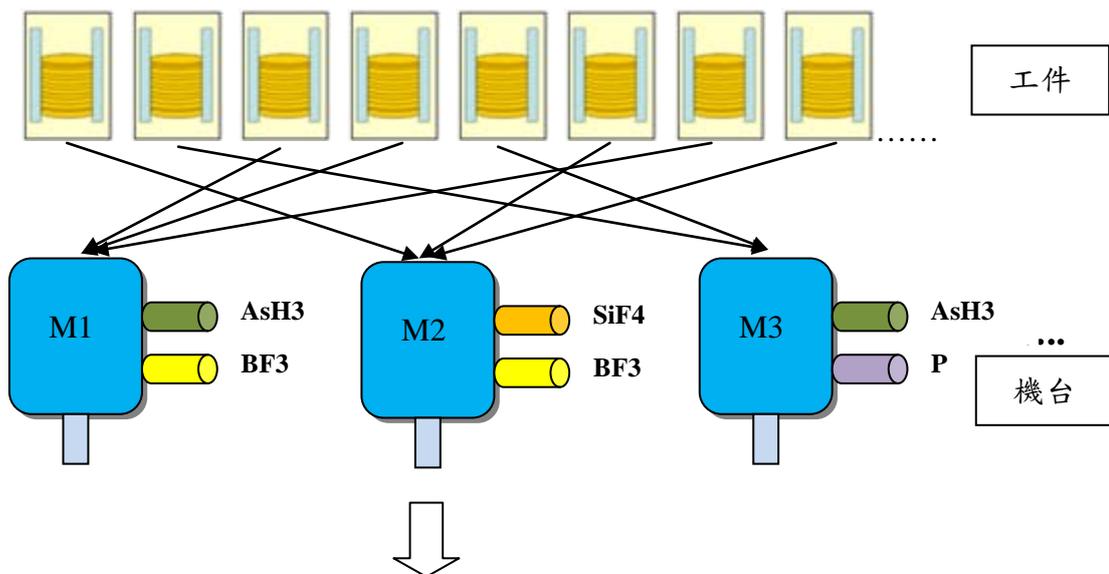


圖 4.1 研究問題示意圖

## 4.2 複雜度分析

本研究之目的為求出最佳之工件指派組合，對於非等效平行機台若要求取最大完工時間最小化的排程為一個 NP-hard 的問題，因此當訂單與機台的數量增加時，求解空間非常龐大，故求解會非常複雜且時間過長，若使用最佳化方法將難以求得最佳解，因此本研究擬用演算法來求解此問題，可在較短的時間下求得一個績效良好的解。

## 4.3 研究方法

研究方法部份，首先以混合整數規劃構建問題的數學模式，之後再以演算法來針對離子植入機最適工件指派加工問題進行求解，演算法的規劃與演算流程，如圖4.2所示。

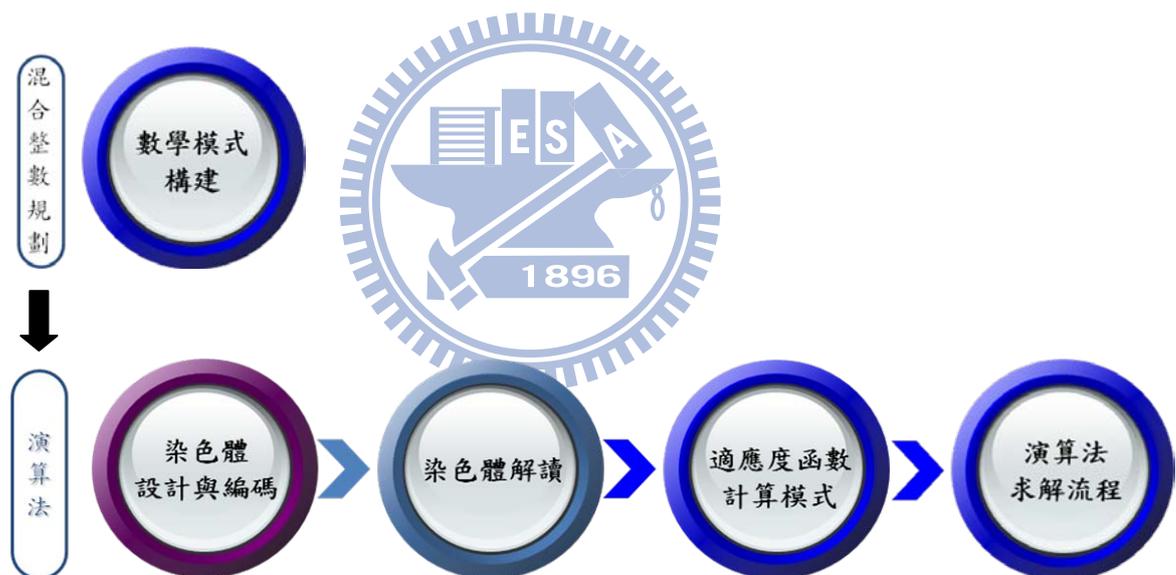


圖 4.2 研究方法

## 4.4 數學模式構建

此離子植入機工件指派加工問題，先以混合整數規劃(Mixed Integer Programming, MIP)的方法，建構模式以進行求解離子植入機最佳工件指派問題，4.4 小節分成相關符號、參數定義和數學模式建構。

#### 4.4.1 相關符號、參數說明

##### 符號

$i$ : 機台指標 ( $1 \leq i \leq I$ )

$j$ : 氣體種類指標 ( $1 \leq j \leq J$ )

$k$ : 工件指標 ( $1 \leq k \leq K$ )

##### 參數

$S$ : 當機台轉換不同加工氣體所產生之整備時間(分鐘)

$P_{ik}$ : 工件  $k$  在機台  $i$  的加工時間(分鐘)

$W_i$ : 機台  $i$  的產能負荷(分鐘)

$Q$ : 極大常數

$G_{jk}$ :  $G_{jk}=1, 0$  (1 代表工件  $k$  使用氣體  $j$  進行加工作業, 0 代表沒有)

$P_r$ : 新製程導入的工件生產所需佔用機台產能的百分比

$x_{ij}$ : 氣體配置  $x_{ij}$ ,  $x_{ij} = 1, 0$  (1 代表機台  $i$  配置有  $j$  氣體, 0 代表沒有配置)

##### 決策變數

$y_{ik}$ : 工件指派  $y_{ik}$ ,  $y_{ik}=1, 0$  (1 代表工件  $k$  在機台  $i$  上進行加工, 0 代表沒有)

##### 導出變數

$\phi_{ij}$ : 使用氣體  $j$  在機台  $i$  上進行加工的工件總數

$C_{\max}$ : 最大機台完工時間(分鐘)

#### 4.4.2 數學模式

Minimize  $C_{\max}$

s.t.

$$\sum_{i=1}^I y_{ik} = 1, 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

限制式(1)工件指派的數目限制，每個工件(job)一定要指派到一部機台，而且只能一部。

$$y_{ik} \leq \sum_{j=1}^J G_{jk} \cdot x_{ij}, 1 \leq k \leq K, 1 \leq i \leq I \quad (2)$$

限制式(2)為工件的功能限制，每一個工件(job)只能指派給那些能加工這個工件(job)的機台。

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} \cdot G_{jk} = \phi_{ij}, 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J \quad (3)$$

限制式(3)為依據工件指派決策，計算指派到機台  $i$  且需要氣體  $j$  的工件總數。

$$\phi_{ij} \leq x_{ij} \cdot Q, 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J \quad (4)$$

限制式(4)為判斷需要氣體  $j$  的工件是否有指派到機台  $i$ 。

$$\left( \sum_{j=1}^J x_{ij} - 1 \right) \cdot S + \sum_{k=1}^K y_{ik} \cdot P_{ik} \leq C_{\max}, 1 \leq i \leq I \quad (5)$$

限制式(5)為每一部機台的完工時間會小於或等於最晚完工那部機台的完工時間。

$$\left( \sum_{j=1}^J x_{ij} - 1 \right) \cdot S + \sum_{k=1}^K y_{ik} \cdot P_{ik} \leq W_i \cdot (1 - P_r), 1 \leq i \leq I \quad (6)$$

限制式(6)為依據工件指派決策，計算機台  $i$  的產能負荷，負荷含加工和整備，另外

由於新製程導入的工件生產所佔機台的產能約為  $P_r$ ，因此機台加工正常工件的產能為機台可用產能的  $(1-P_r)$ 。

目標式: Minimize  $C_{\max}$  :  $C_{\max}$  為機台完工時間中的最大值，亦即在所有工件皆指派完加工後，分別計算各機台的總完工時間，之後取機台完成加工時間最長的。目標式和限制式(5)的目的為除了找出最大完工時間也要求其最小化，在此目標式和限制式(5)的限制之下，可使各機台的完工時間平均化。

對於非等效平行機台若要求取最大完工時間最小化的排程為一個 NP-hard 的問題，因此當訂單與機台的數量增加時，求解空間非常龐大，故求解會非常複雜且時間過長，如本研究短期規劃模式(MIP 模式)在工件數目為 152、機台數目為 10 台和電腦設備為 Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E7500 @ 2.93GHz, 3.49GB 的 RAM 情境下，ILOG OPL Studio 軟體求解至 4378.42 秒時，電腦記憶體已經佔滿即發生 Out of Memory，電腦已無法在執行程式，故在大規模情境下本研究混合整數規劃無法執行，因此發展三種巨集演算法來進行大規模情境下的求解。



## 4.5 演算法之設計

混合整數規劃在求解生產晶圓批件超過 30 批的指派加工問題時，由於變數太多，求解範圍太大，會造求解時間過長，導致求解沒有效率，而無法應用於實際的製造現場，因此利用演算法求解，希望可以藉由演算法快速求出近似的最佳解，求得一個最佳的工件指派加工。各演算法如基因演算法、禁忌搜尋法、模擬退火法的邏輯演算流程，如第二章所述。4.5小節分成染色體設計與編碼、染色體解讀、適應度函數計算模式和演算法求解流程。

### 4.5.1 染色體設計與編碼

在求解多部離子植入機台最佳工件指派加工問題時，我們使用一條染色體 (Chromosome) 來代表工件加工的順序，染色體中基因的數量代表所需加工的工件數 (Job numbers)，而每個工件皆會歸屬到一個屬性，稱之為氣體別，如圖 4.3 所示。

染色體中有十個基因代表有十個工件需指派被加工，工件的排序則為隨機產生，而加工的優序則如染色體的基因排列順序，染色體下方則為每個工件的加工氣體屬性，其屬性代碼，如表 4.1 所示，如工件 5 的加工氣體屬性為 G1。

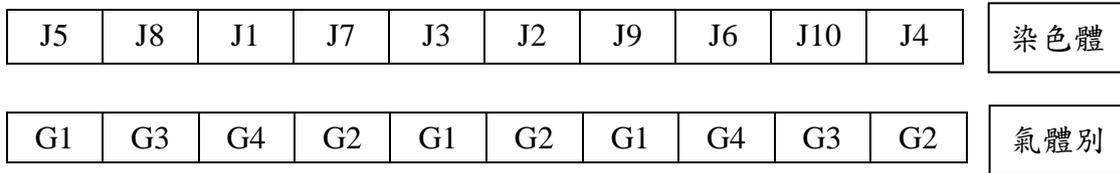


圖 4.3 染色體設計與編碼

表 4.1 氣體屬性代碼資訊

G1	G2	G3	G4
AsH3	BF3	SiF4	P

#### 4.5.2 染色體解讀

經由染色體設計與編碼後，可以隨機產生一條染色體，我們將此染色體的基因順序解讀為工件加工的順序，如圖 4.4 所示，工件加工的順序為 5→8→1→7→3→2→9→6→10→4。

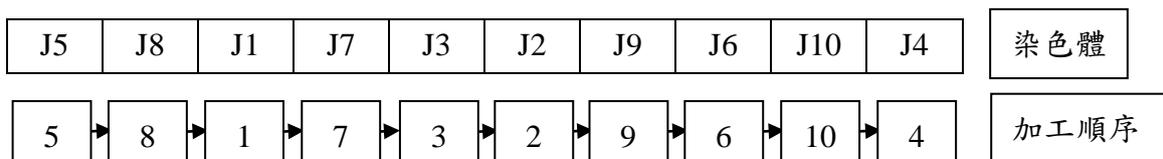


圖 4.4 工件加工順序示意圖

#### 4.5.3 適應度函數計算模式

在本研究中所使用的績效評估指標為機台總完工時間，也就是適應度函數值，而總完工時間是由總加工時間和整備時間所組合而成，定義適應度函數是為了決定每一條染色體適應環境的能力，用來決定染色體是否能夠生存的一個依據，適應度值越高的代表染色體適應能力較佳，因此存活的機率也較高，反之較差的染色體則代表適應能

力較弱，存活機率也較低。工件在指派給機台後，於每一機台內所需加工之工件會依其加工氣體之屬性，將相同屬性的工件，群組在一起進行加工來減少設置時間。

由於本研究所研究的問題為多部離子植入機台，在機台氣體配置已知的前提下，求解最適工件指派加工問題，因此接下來將進行工件指派加工的解讀，我們將透過釋例來加以說明。

釋例:

假設隨機產生一條染色體，其工件數為 10，而可加工離子植入機台 3 部，其配置的氣體種類，如圖 4.5 所示，由於本研究所探討的多部離子植入機台為非等效平行機台，也就是相同的工件在不同機台上的加工時間不一致，而其工件在機台上進行加工的時間，如表 4.2 所示。

J1	J8	J6	J4	J2	J9	J3	J5	J7	J10	染色體
G1	G2	G1	G1	G2	G1	G3	G2	G4	G3	氣體別

氣體屬性代碼：G1→AsH3, G2→BF3, G3→SiF4, G4→P

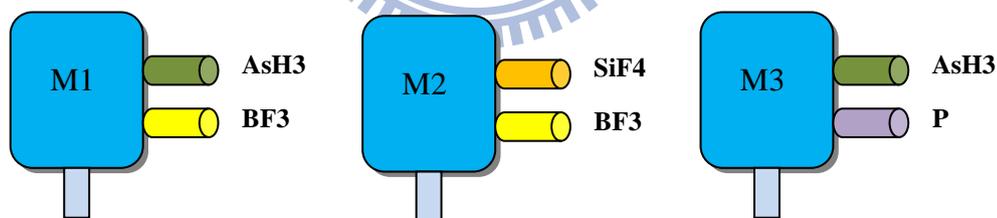


圖 4.5 離子植入機台氣體配置示意圖

表 4.2 工件加工時間資訊

工件 \ 機台	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	G1	G2	G3	G1	G2	G1	G4	G2	G1	G3
M1	10	14		17	10	18		22	16	
M2		10	12		15			20		15
M3	15			20		15	15		14	

單位:分鐘

在指派加工的過程中，受限於機台裝配氣體的限制，因此工件只能指派給那些能加工這個工件的機台，此外當同一機台前後加工工件的氣體屬性不同時，需增加 10 分鐘的整備時間，而我們的目標式為機台最大完工時間最小化，故在指派的流程中，會針對能加工這個工件的機台目前所累計的加工時間來進行比較，之後再將工件指派給累計加工時間最小的機台進行加工，最後使得各機台的完工時間平均化。由釋例的例子，可得其結果，如圖 4.6 所示。

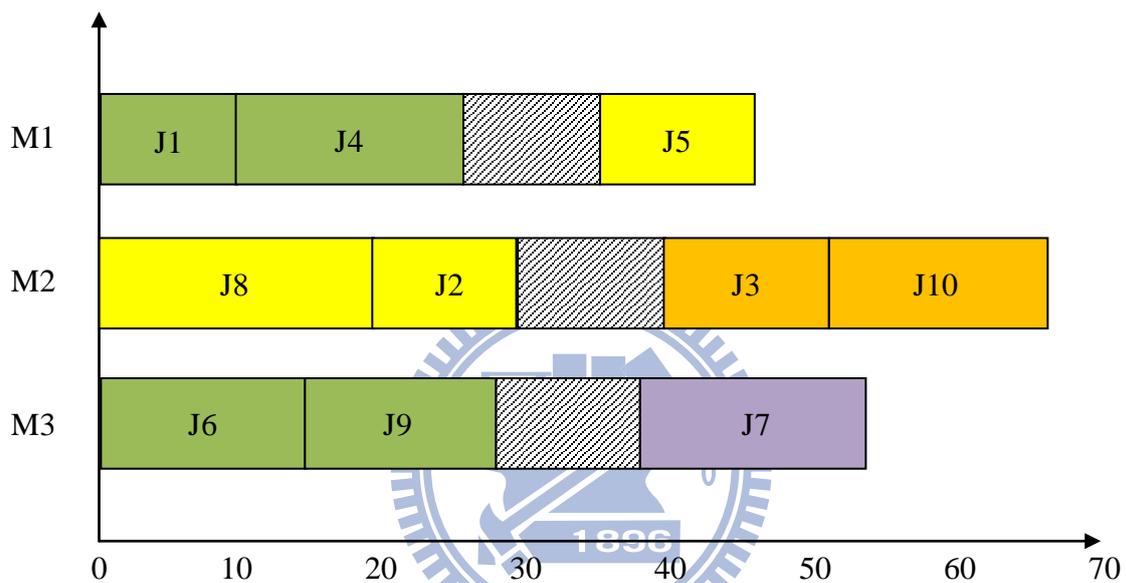


圖 4.6 工件指派加工示意圖

由圖4.6可知，此條染色體的適應度函數值為67，工件指派加工為工件1、4、5分別被指派至機台一進行加工，整備次數1次為10分鐘；工件8、2、3、10分別被指派至機台二進行加工，整備次數1次為10分鐘；工件6、9、7則分別被指派至機台三進行加工，整備次數1次為10分鐘。

#### 4.5.4 基因演算法求解流程

本研究利用基因演算法求解此離子植入機工件指派加工問題。基因演算法是採多點搜尋的方式，在參數空間中同時尋求問題的近似解，而我們就以一條染色體來代表工件加工的排序，染色體中每一個字元則稱之為基因，代表工件，圖 4.7 為基因演算法求解流程示意圖。

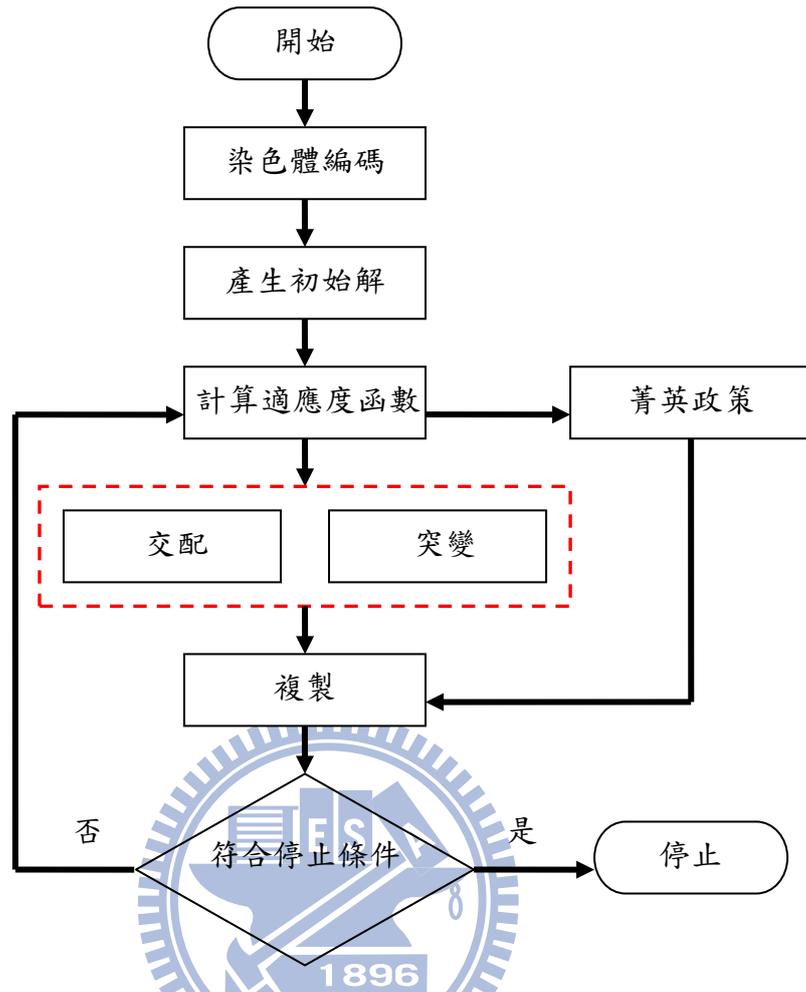
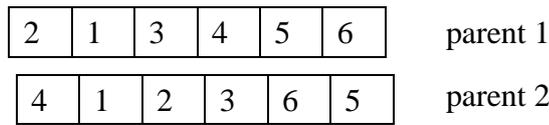


圖 4.7 基因演算法求解流程示意圖

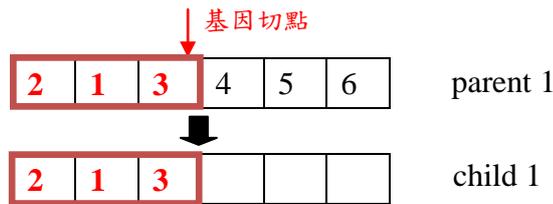
### 交配(Crossover)

在每一次交配的過程，會先從初始群體中隨機挑選兩條染色體，稱為母代(Parents)，經由交配後，會產生兩條新的染色體，稱為子代 (Child)。假設所設定的交配率為  $\beta$ ，初始群體中有  $N$  條染色體，則所經過交配完後的子代數量共有  $\beta \cdot N$  個，本研究基因演算法中使用單點交配 (C1 Operator) 之遺傳法則。如下圖 4.8 所示，分為四個步驟說明如下：

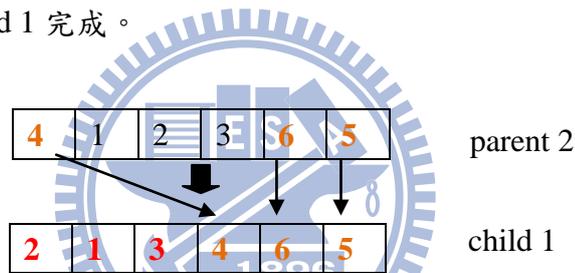
Step1: 從初始群體中隨機挑選出兩組基因解，分別當作母代 parent 1、parent 2。



Step2: 隨機決定 parent1 的基因切點，parent 1 基因切點以前的基因(工件) {2,1,3} 填入子代 child 1。



Step3: child 1 未填滿的基因格，由 parent 2 中再依序補齊 child 1 缺少的基因 {4,6,5}，則 child 1 完成。



Step4: 重覆 Step1~3，而 parent 1、2 角色互換，先決定 parent 2 的基因切點形成 child 2 的前段基因序{4,1,2}，而由 parent 1 依序補齊 child 2 缺少的基因 {3,5,6}，而完成 child 2。兩個母代(初始解)經交配運算過後可產生兩個子代(交配解)。

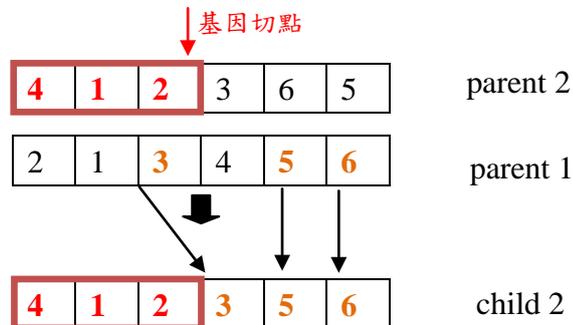


圖 4.8 Crossover C1 運算

## 突變(Mutation)

在每一次突變的過程，會先從初始群體中隨機挑選一條染色體，稱為母代(Parent)，經由突變後，會產生一條新的染色體，稱為子代(Child)。假設所設定的突變率為 $\alpha$ ，初始群體中有 $N$ 條染色體，則所經過突變完後的子代數量共有 $\alpha \cdot N$ 個，突變通常會與交配互相搭配使用，可以避免太早陷入最佳解。而本研究基因演算法中使用交換(Swap)突變法則。如圖 4.9 所示，從初始群體中隨機挑選出一條染色體，並在染色體中隨機選取兩個不同的基因，將其對調產生一條新的子代。

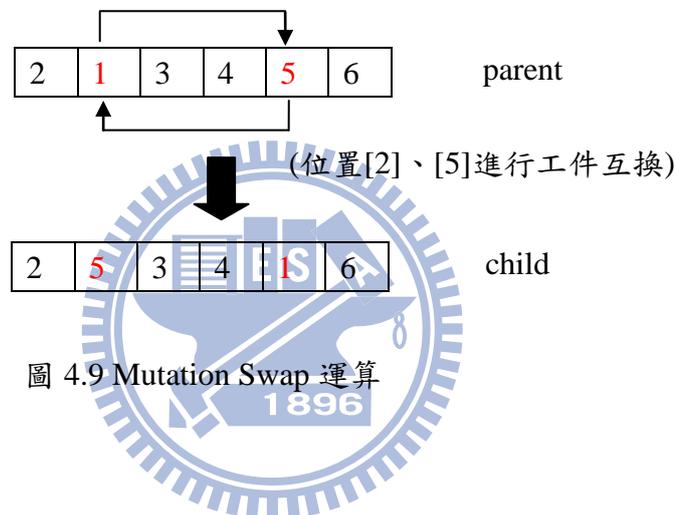


圖 4.9 Mutation Swap 運算

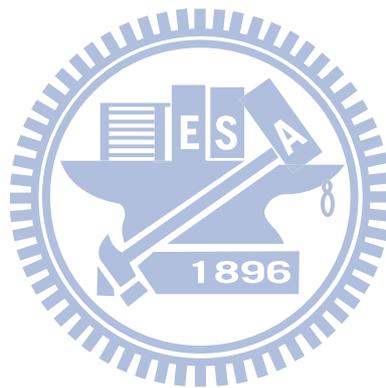
## 染色體複製(Reproduction)

經由交配和突變後，子代和母代加總共有 $Q$ 條染色體，而我們必須保留 $Q/2$ 條染色體當作下一世代的母代，依 $Q$ 條染色體適應度值的優劣，由優至劣依序排列，之後使用菁英政策(Elitism Strategy)在每一世代群體中保留較佳的個體進化演化，以避免於交配、突變運算過程中遭到破壞。而其餘的染色體選擇方式則透過輪盤法(Roulette wheel)來選取。其主要概念就是將各染色體之適合度依照比率計算後，繪製成一個圓形的輪盤。藉此可知，適應度愈大的則其所佔的部分相對就愈大，因此適應度大的染色體將比適應度小的容易被選到，但此並不保證適應度大的就一定會被選到。反複進行同樣的步驟，直到足夠產生下一代的染色體為止。

## 終止條件

本研究使用兩種基因演算之終止條件，亦即達到下列兩種終止條件之其中一種即可停止搜尋最佳解。

1. 達到所設定的最大演化代數，即設定演化代數為  $A$  代，當基因演化到  $A$  代即為停止演化。
2. 達到所設定的最佳解維持代數，即設定最佳解維持代數為  $B$  代，當基因演化最佳解維持  $B$  代仍沒有改變即停止。



#### 4.5.5 模擬退火法求解流程

本研究利用模擬退火法求解此離子植入機工件指派加工問題。模擬退火法包含 Metropolis 演算法與退火程序(annealing procedure)，透過隨機的過程，使其有跳脫區域最佳解的能力，而我們就以一條染色體來代表工件加工的排序，染色體中每一個字元則稱之為基因，代表工件。詳細流程步驟如第二章所述，圖 4.10 為其求解流程示意圖。

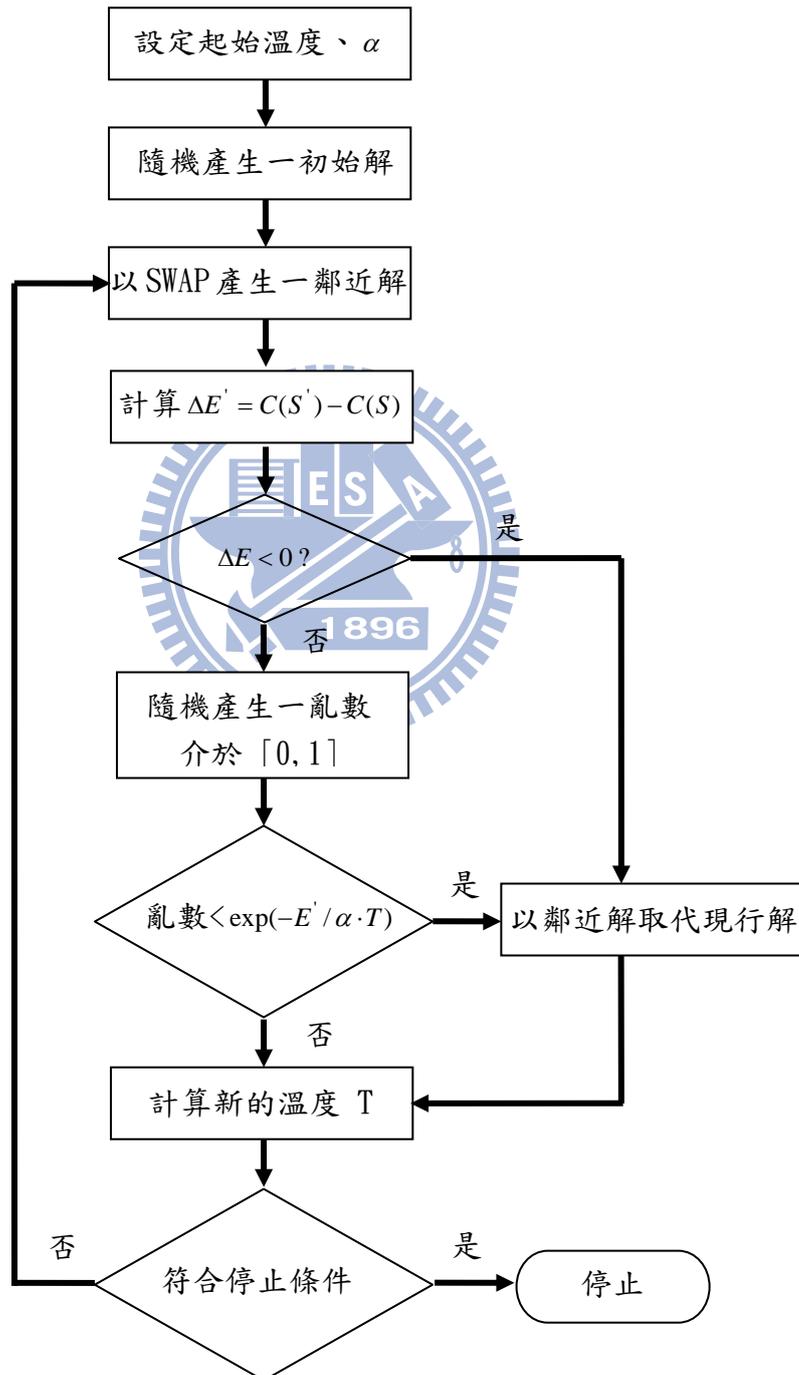


圖 4.10 模擬退火法求解流程示意圖

#### 4.5.6 禁忌搜尋法求解流程

本研究利用禁忌搜尋法求解此離子植入機工件指派加工問題。而我們就以一條染色體來代表工件加工的排序，染色體中每一個字元則稱之為基因，代表工件。詳細流程步驟如第二章所述，圖 4.11 為禁忌搜尋法求解流程示意圖。

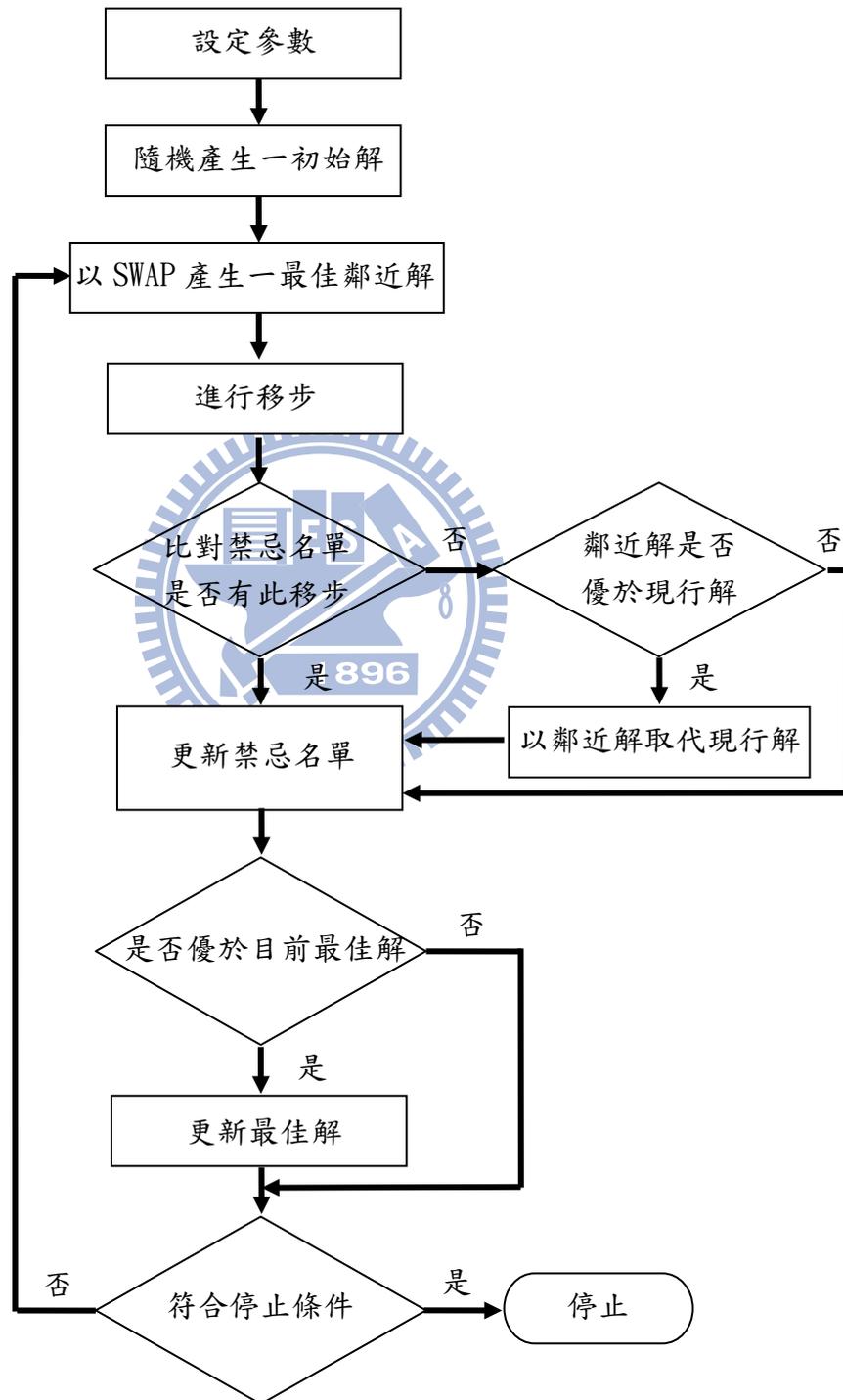


圖 4.11 禁忌搜尋法求解流程示意圖

## 第五章 實例驗證

為了驗證本研究所提出的長期規劃(以混合整數規劃求解機台最適氣體類型配置)與短期規劃(以巨集演算法求解工件指派加工)的有效性，在本章節中將針對不同的情境進行求解，以驗證模式之可行性。

### 5.1 測試情境的設計-長期規劃

對於離子植入機的機台配置與生產作業做如下的假設：

- (1) 機台加工之總產能負荷需小於機台的可用產能。
- (2) 生產規劃週期為 1 年。
- (3) 離子植入機台數為 10 台。
- (4) 加工氣體種類為 4 種，AsH<sub>3</sub>、BF<sub>3</sub>、P and SiF<sub>4</sub>。
- (5) 每一部離子植入機最多可配置的氣體種類數量為 3 種。
- (6) 批量數均為 25 片/批晶圓。
- (7) 離子植入機轉換不同加工氣體的整備時間設定 15 分鐘。
- (8) 氣體跨不同的配方(Recipe)所需耗用的時間設定為 2 小時。
- (9) 各機台產能負荷皆為 8760 小時。
- (10) 產品組合(A:B:C) = (3:2:5)。
- (11) 氣體一年產生的新配方數目：AsH<sub>3</sub>-6、BF<sub>3</sub>-5、P-8、SiF<sub>4</sub>-3。
- (12) 加工時間: AsH<sub>3</sub>-U(20~50)/分鐘；BF<sub>3</sub>-U(15~35)/分鐘；P-U(10~50)/分鐘；  
SiF<sub>4</sub>-U(15~45)/分鐘。

為了建構在不同的需求情境下，混合整數規劃模式的可行性，本研究使用三種不同年需求，分別為年需求 400000 片、500000 片、600000 片晶圓；以及離子植入機台數為 10 台的情境。離子植入機台中，各產品加工製程所需氣體種類如下表 5.1 所示。

表 5.1 各產品加工製程所需氣體

製程	產品 A(加工氣體)	產品 B(加工氣體)	產品 C(加工氣體)
ZERO	AsH3	BF3	AsH3
AA	BF3	AsH3	BF3
AN	P	AsH3	SiF4
AP	P	P	P
AQ	AsH3	BF3	P
HQ	AsH3	SiF4	BF3
P1	SiF4	AsH3	AsH3

在給定一特定的產品組合(A:B:C) = (3:2:5)之下，如何將之轉換為機器小時？我們以年需求 400K 為例，假設氣體加工時間: AsH3 為 35 分鐘、BF3 為 25 分鐘、P 為 30 分鐘、SiF4 為 30 分鐘。

#### A 產品

1. 需求出 A 產品總共有幾批

$$400000 \text{ 片} * 3/10 * 25 = 4800 \text{ Lots}。$$

2. 需求出 4800 Lots 所需各種氣體加工的時數

$$4800 \text{ Lots} * 25 \text{ min} * 1/60 \text{ min} = 8400 \text{ hr-AsH3}$$

$$4800 \text{ Lots} * 35 \text{ min} * 3/60 \text{ min} = 2000 \text{ hr-BF3}$$

$$4800 \text{ Lots} * 30 \text{ min} * 2/60 \text{ min} = 4800 \text{ hr-P}$$

$$4800 \text{ Lots} * 30 \text{ min} * 1/60 \text{ min} = 2400 \text{ hr-SiF4}$$

依此類推，可求出 B 產品共 3200 Lots，所需各種氣體加工的時數: AsH3-5600 hr、BF3-2667 hr、P-1600 hr、SiF4-1600 hr；C 產品共 8000 Lots，所需各種氣體加工的時數: AsH3-9333 hr、BF3-6667 hr、P-8000 hr、SiF4-4000 hr。最後，可知在年需求為 400K 之下，所需各種氣體加工的時數: AsH3 共 23333 hr、BF3 共 11334 hr、P-14400 hr、SiF4-8000 hr。

在給定一特定的產品組合(A:B:C) = (3:2:5)之下，不同的年需求時最適氣體類型配置的關係，如表 5.2 所示。

表 5.2 機台最適氣體類型配置

年需求	400K	500K	600K
最適氣體類型配置	AsH3	AsH3	AsH3
	AsH3	AsH3	AsH3
	AsH3	AsH3	AsH3
	AsH3	AsH3	SiF4
	AsH3	AsH3	P
	SiF4	BF3	P
	P	P	BF3
	AsH3、P	BF3、SiF4	AsH3、P
	AsH3、SiF4	AsH3、P	AsH3、SiF4
	BF3、SiF4	P、SiF4	BF3、SiF4
$C_{max}$	5722 HR	7148 HR	8575 HR
Time	759 秒	36 秒	12 秒

## 5.2 實驗結果分析-長期規劃

由表 5.2 可知，此數學模式可行，如此分配的結果可知，在年需求 400K 之下， $C_{max}$  機台完工時間中的最大值為 5722 小時，共有 7 部機台分別配置一種氣體，屬於專工型機台，3 部機台分別配置二種氣體屬多工型機台；在年需求 500K 之下， $C_{max}$  機台完工時間中的最大值為 7148 小時，共有 7 機台分別配置一種氣體，屬於專工型機台，3 部機台分別配置二種氣體屬多工型機台；在年需求 600K 之下， $C_{max}$  機台完工時間中的

最大值為 8575 小時，共有 7 部機台分別配置一種氣體，屬於專工型機台，3 部機台分別配置二種氣體屬多工型機台。

從結果發現，在年需求 600K 時機台最大完工時間已達 8575 小時，離機台一年可加工時間 8760 小時只剩 125 小時，因此年需求如果不斷往上增加的情況之下，機台可提供的產能將無法負荷年需求所需加工的小時，此時就需藉由增購機台來進行生產，否則工廠內產能將無法滿足訂單的需求。

為了驗證本研究所提出的氣體配置模式之有效性，本研究將針對機台功能完整，亦即各機台均配置有全部氣體來作為標竿進行比較，探討其績效的差異。由於績效指標  $C_{max}$  為最大機台總完工時間最小化，目的為使各機台負荷差異最小化，也就是使各機台完工時間平均化，因此屬於一望小指標。

究竟何種氣體配置模式為最佳呢？是本研究所提出之專工型&多工型機台模式，還是全部為多工型機台模式(機台功能完整)能使績效指標  $C_{max}$  有較佳的表現呢？兩種模式其績效表效整理如表 5.3 所示。

表 5.3 氣體配置模式績效比較

$C_{max}$	400K	500K	600K
標竿	5752HR	7179HR	8605HR
本研究	5722HR	7148HR	8575HR

由表 5.3 可知，本研究不論在年需求為 400K、500K 和 600K 的情境下，其績效指標  $C_{max}$  均優於機台全部為多工型機台的模式，亦即本研究所提出之氣體配置模式可在使較小的加工時間下完成加工，達到所設定的產出。

### 5.3 測試情境的設計-短期規劃

對於離子植入機的機台配置與生產作業做如下的假設：

- (1) 機台加工的所有工件之總產能負荷需小於機台的可用產能。
- (2) 離子植入機台所配置氣體種類已知。
- (3) 工件派工法則為採先進先出法則(FIFO)。
- (4) 機台有空且有能力加工工件就優先給予指派。
- (5) 若為不同氣體的生產批，其使用的氣體會不相同，故換批需要換氣體的整備時間為 10 分鐘。
- (6) 離子植入機台數目為 5 台和 10 台。
- (7) 加工時間: 氣體在各機台加工時間- $U(15\sim55)$ /分鐘。

為了建構在不同的需求情境下，三種演算法的可行性，本研究使用三種不同的批數大小，分別為 200 Jobs、230 Jobs 以及 260 Jobs（共三種）和二種不同的機台數，分別為 5 台及 10 台(共兩種)。對於每一個測試情境，比較基因演算法、模擬退火法與禁忌搜尋法

### 5.4 演算法的參數設定

每一個演算法的值代表實驗 15 次後取其平均值，目的是為了得到更準確的近似最佳解，避免遇到特殊情形發生而影響最佳解之結果。本研究之各演算法相關參數設定如表 5.4 所示。

表 5.4 各演算法相關參數之設定值

演算法	參數項目	設定值
GA	交配率	0.8
	突變率	0.2
	最大代數	50000
	最佳解維持代數	1000
Tabu search	最大代數	10000
	禁忌名單	3 倍工件數
Simulated annealing	初始溫度	1000
	$\alpha$ 值	0.9998

## 5.5 實驗結果與分析

本研究將會進行基因演算法、模擬退火法與禁忌搜尋法之比較，探討在不同工件數和機台數之下，何種演算法的求解品質與求解速度會最好。



### 5.5.1 比較不同情境下 GA、SA 與 TS 的 Makespan

本研究定義  $M_{SA}$  為 SA 的總完工時間、 $M_{TS}$  為 TS 的總完工時間， $M_{GA}$  設為標竿排程指標 GA 的總完工時間。指標為改善率  $r = (A - M_{GA}) / M_{GA}$ ， $A$  為  $M_{SA}$  或  $M_{TS}$ ， $r$  被設定為量測基因演算法的好壞。當  $r$  愈高，代表 GA 的效果愈好。

表 5.5 和圖 5.1 為比較測試情境為 5 台機台下，不同 Job 數  $r$  的改善率，圖 5.1 表現出在不同 Job 數下，改善率  $r$  的平均數 (Average)，由圖可以看出無論在 200 Jobs、230 Jobs 和 260 Jobs 時改善率均為正值，代表在此情境下使用 GA 求解的效果會較好，且由數據可以發現在此情境之下，解品質為  $GA > SA > TS$ ，亦代表當 Job 數越多的時候，GA 的解品質一樣會優於 SA 與 TS。

表 5.5 比較在 5 台機台下不同 Job 數  $r$  的平均數

工件數	200	230	260
SA	0.57 %	1.41 %	1.81 %
TS	1.93 %	1.44 %	2.01 %

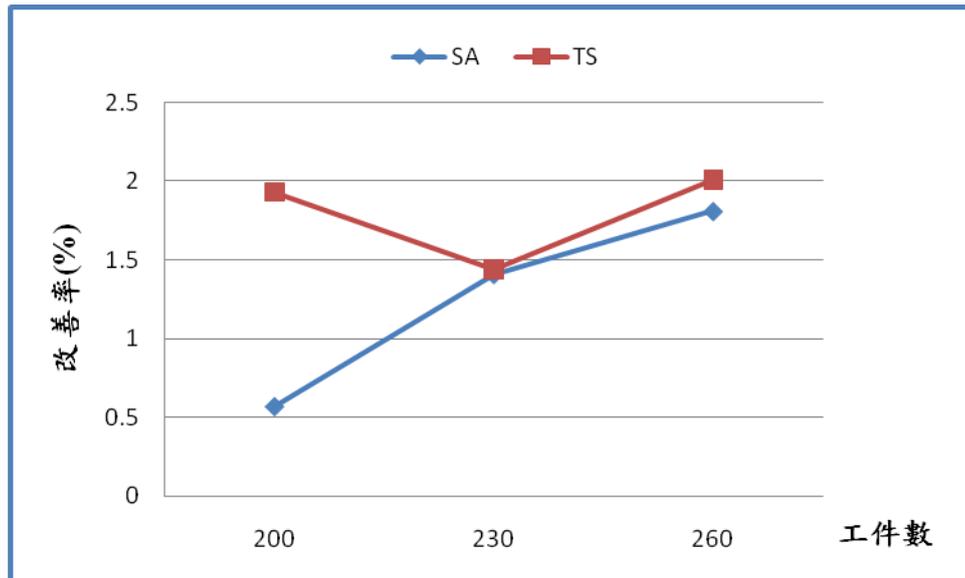


圖 5.1 比較在 5 台機台下不同 Job 數之改善率

表 5.6 和圖 5.2 為比較測試情境為 10 台機台下，不同 Job 數  $r$  的改善率，圖 5.2 表現在不同 Job 數下，改善率  $r$  的平均數 (Average)，由圖可以看出不論在 200 Jobs、230 Jobs 和 260 Jobs 時改善率均為正值，代表在此情境下使用 GA 求解的效果會較好，且由數據可以發現在此情境之下，解品質為  $GA > TS \& SA$ ，亦代表當 Job 數越多的時候，GA 的解品質一樣會優於 SA 與 TS。

表 5.6 比較在 10 台機台下不同 Job 數  $r$  的平均數

工件數	200	230	260
SA	2.89 %	2.51 %	2.25 %
TS	3.13 %	2.00 %	2.83 %

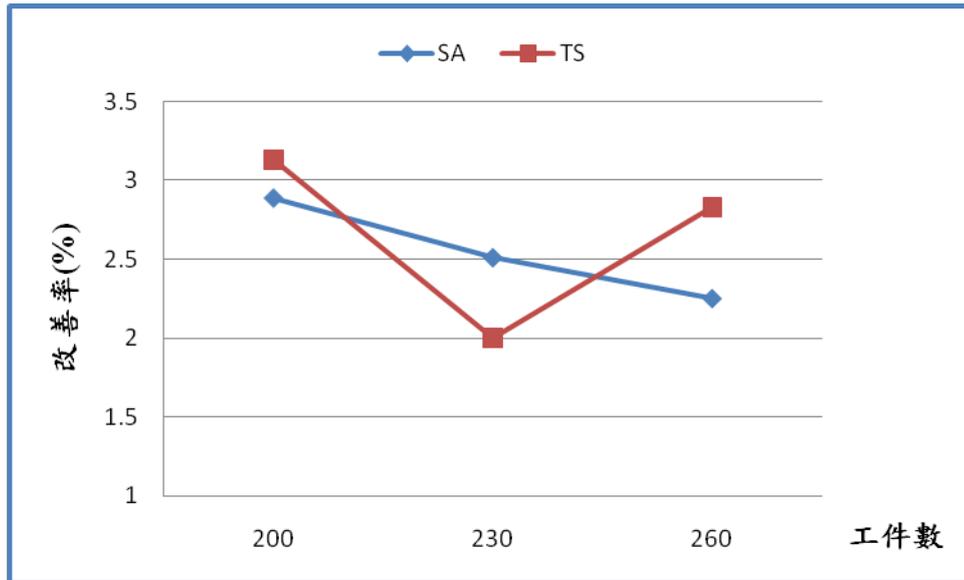


圖 5.2 比較在 10 台機台下不同 Job 數之改善率

### 5.5.2 比較不同情境下 GA、SA 與 TS 的求解速度

本研究定義  $T_{GA}$  為 GA 的求解秒數、 $T_{SA}$  為 SA 的求解秒數，而  $T_{TS}$  為 TS 的求解秒數。指標  $r_T = T_{GA} - T$  被設定為量測 GA 求解速度的快慢， $T$  為  $T_{SA}$  或  $T_{TS}$ 。當  $r_T$  為正值，代表 GA 的求解速度較慢；反過來說，當  $r_T$  為負值，代表 GA 的求解速度較快。

表 5.7 與圖 5.3 為比較測試情境為 5 台機台下，不同 Job 數的求解速度。Average 代表在測試情境中 SA 或 TS 平均比 GA 快的秒數；Max 代表在測試情境中 SA 或 TS 最多比 GA 快的秒數；Min 代表在測試情境中 SA 或 TS 最少比 GA 快的秒數，由表 5.7 可觀察出不論在 200 Jobs、230 Jobs 和 260 Jobs 時，SA 和 TS 的平均求解時間均比 GA 來的快，其中又以 SA 的平均求解時間最快，而 GA 的運算時間平均在 50 分鐘之內，實務上是可以接受的。

表 5.7 比較在 5 台機台下不同 Job 數的求解時間差異（單位：秒）

Jobs	200			230			260		
	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min
$r_T = T_{GA} - T_{SA}$	1505	720	436	1626	1130	781	2724	1680	966
$r_T = T_{GA} - T_{TS}$	1492	708	423	1610	1113	768	2689	1658	947

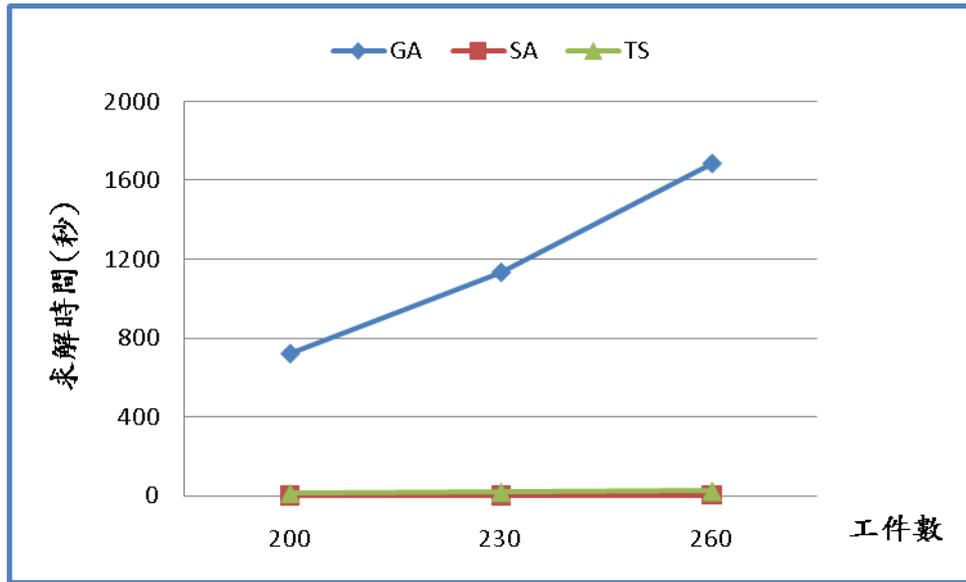


圖 5.3 比較在 5 台機台下不同 Job 數的求解時間

表 5.8 與圖 5.4 為比較測試情境為 10 台機台下，不同 Job 數的求解速度。Average 代表在測試情境中 SA 或 TS 平均比 GA 快的秒數；Max 代表在測試情境中 SA 或 TS 最多比 GA 快的秒數；Min 代表在測試情境中 SA 或 TS 最少比 GA 快的秒數，在 Min 中出現負值則代表 GA 比 SA 或 TS 快的秒數，由表 5.8 可觀察出 SA 和 TS 的平均求解時間均比 GA 來的快，其中又以 SA 的平均求解時間最快，而 GA 的運算時間平均在 50 分鐘之內，實務上是可以接受的。

表 5.8 比較在 10 台機台下不同 Job 數的求解時間差異（單位：秒）

Jobs	200			230			260		
	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min
$r_T = T_{GA} - T_{SA}$	971	644	451	1558	971	695	2689	1642	940
$r_T = T_{GA} - T_{TS}$	944	612	419	1503	926	653	2645	1603	904

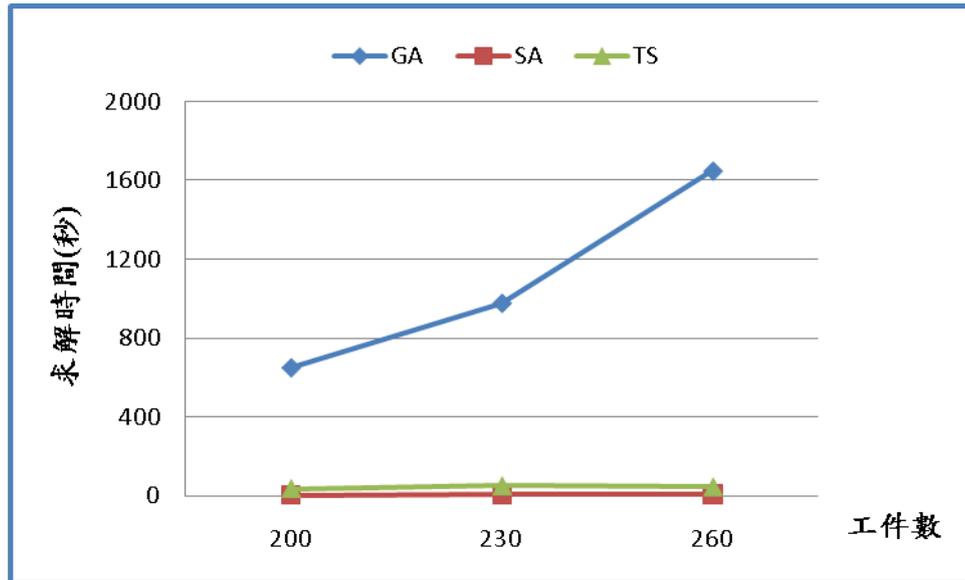


圖 5.4 比較在 10 台機台下不同 Job 數的求解時間

在晶圓廠中，一天為二班，也就是一天必須排序工件兩次，每次皆排序 200 至 260 個工件，雖然 SA 或 TS 的平均求解速度均比 GA 來的快，但在 260 Jobs 的情況下，至多快 2724 秒，不到 50 分鐘，此差異是可以被接受的，因此會將重點放在總完工時間的改善上。

在平均求解品質上，GA 明顯優於 SA 和 TS，特別在 200 Jobs 的情況下，改善率可達 3.13%，即可提升不少效益，故在離子植入機工件指派加工中，會選擇總完工時間較小且求解時間在可接受範圍內的 GA 演算法。

## 5.6 實驗結論

綜合以上實驗結果，可以將結論整理成下列數項：

- (1) GA 可以比 SA 和 TS 求出更好的工件加工順序，並且求解速度差異亦不大。
- (2) 在任何情境下，GA 演算法效果為最佳，會有最小的總完工時間。
- (3) 本研究可以在非等效平行機台情境與氣體限制下求得近似最佳的生產排程組合。

## 第六章 結論與未來研究方向

### 6.1 研究的結論

離子植入機在半導體廠是一種非常重要的機台，由於其單價非常昂貴，因此在工廠的佈置及機台的配置上，往往以離子植入機為主要考量之一。在以往文獻中，總在機台組態完備下進行派工，並無考量其附屬資源-氣體種類和機台配置管線多寡所導致產能損失的問題，即在以往的文獻中，將多部離子植入機台看成多部功能相同的機台，在此情境下進行工件排序加工，故本論文所研究的議題是值得被探討的。

在現實情況中，晶圓廠是具有迴流製程特性的工廠，故工件會重複進入離子植入機中加工，而每次皆為加工不同的離子佈植製程，在加工不同的離子佈植時則需要更換氣體，換句話說，相同的產品在同一加工層時（加工相同的離子佈植），會使用相同氣體，故本研究為在考慮氣體限制下，針對非等效平行機台進行工件指派加工，而本研究利用基因演算法、模擬退火法和禁忌搜尋法分別進行求解，其比較結果以基因演算法為最佳，即可以在合理時間內，得到一組近似最佳解的加工順序與總完工時間。

本研究的結論歸納如下：

1. 透過混合整數規劃，可決定機台最適氣體類型配置與配置幾種氣體。如此一來可使機台有最小化的產能損失，進一步也可減少購置多餘的機台。
2. 依據實驗的結果，在任何情境之下，GA 都可以比 SA 和 TS 求出更好的工件加工順序，並且求解速度差異亦不大。
3. 依據實驗的結果，在任何情境之下，GA 演算法效果為最佳，會有最小的總完工時間。
4. 本研究可以在非等效平行機台情境與氣體限制下求得近似最佳的生產排程組合。

## 6.2 未來研究方向

本研究的未來研究方向，整理如下列數項：

1. 本研究目前只探討單一績效指標(Makespan)的研究，故未來可朝向其他績效指標來進行探討。
2. 本研究目前只探討以基因演算法、模擬退火法和禁忌搜尋法求解離子植入機的排程問題，尚未探討以其他不同的巨集演算法 (Meta-heuristic) 來求解此一問題，故未來可嘗試使用其他有別於本研究三種演算法的巨集演算法來求解離子植入機的排程問題。
3. 本研究目前工件的派工法則為先進先出(FIFO)，故未來可朝向其他不同的派工法則來進行探討。
4. 本研究染色體的表達屬於傳統的表達方式，故在未來的研究可提出新的染色體設計，期望在不增加染色體的大小情況下，減少搜尋空間、增加解題品質及加快求解的速度。



## 附錄 工件總延遲時間最小化

附錄為探討離子植入機台內工件的加工順序，以使得工件的總延遲時間能夠達到最小化，本研究利用巨集演算法中的基因演算法、模擬退火法和禁忌搜尋法來求解工件指派加工的有效性，在本章節中將針對不同的情境進行求解，以驗證模式之可行性。

### 測試情境的設計

每個工件  $i$  具有處理時間  $P_i$  和到期日  $d_i$ ，其中  $P_i$  數據為獨立且服從均勻分配型態，處理時間設定為  $U(15\sim55)$ /分鐘。此外為了使生產有提前或延遲的情況發生，本研究到期時間之設定如下所示。

$$d_i = k_i \times P_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中， $k_i$  為隨機亂數，且  $15 \leq k_i \leq 50$ 。

對於離子植入機的機台配置與生產作業做如下的假設：

- (1) 離子植入機台所配置氣體種類已知。
- (2) 工件派工法則為採先進先出法則(FIFO)。
- (3) 若為不同氣體的生產批，其使用的氣體會不相同，故換批需要換氣體的整備時間為 10 分鐘。
- (4) 離子植入機台數目為 5 台。

為了建構在不同的需求情境下，三種演算法的可行性，本研究使用三種不同的批數大小，分別為 200 Jobs、230 Jobs 以及 260 Jobs（共三種）。對於每一個測試情境，比較基因演算法、模擬退火法與禁忌搜尋法的差異。

## 演算法的參數設定

每一個演算法的值代表實驗 15 次後取其平均值，目的是為了得到更準確的近似最佳解，避免遇到特殊情形發生而影響最佳解之結果。本研究之各演算法相關參數設定如表所示。

各演算法相關參數之設定值

演算法	參數項目	設定值
GA	交配率	0.8
	突變率	0.2
	最大代數	50000
	最佳解維持代數	1000
Tabu search	最大代數	10000
	禁忌名單	3 倍工件數
Simulated annealing	初始溫度	1000
	$\alpha$ 值	0.9998

## 實驗結果與分析

本研究將會進行基因演算法、模擬退火法與禁忌搜尋法之比較，探討在不同工件數之下，何種演算法的求解品質與求解速度會最好。

### 比較不同情境下 GA、SA 與 TS 的 Tardiness

下表為比較測試情境為 5 台機台下，不同 Job 數的三種演算法所求出的平均總延遲時間，由表可以看出無論在 200 Jobs、230 Jobs 和 260 Jobs 時 TS 的平均總延遲時間均為最小，代表在此情境下使用 TS 求解的效果會較好，且由數據可以發現在此情境之下，解品質為  $TS > SA > GA$ ，亦代表當 Job 數越多的時候，TS 的解品質一樣會優於

SA 與 GA。

比較在 5 台機台下不同 Job 數平均總延遲時間表

工件數	200	230	260
GA	1456.6	548.5	2886.5
SA	908.1	301.5	1051.4
TS	265.8	11.6	670

### 比較不同情境下 GA、SA 與 TS 的求解速度

下表為比較測試情境為 5 台機台下，不同 Job 數的求解速度。Average 代表在測試情境中 SA、GA 和 TS 的平均求解秒數，由下表可觀察出不論在 200 Jobs、230 Jobs 和 260 Jobs 時，SA 和 TS 的平均求解時間均比 GA 來的快，其中又以 SA 的平均求解時間最快，而 TS 的運算時間平均在 2 分鐘之內，實務上是可以接受的。

比較在 5 台機台下不同 Job 數的求解時間表（單位：秒）

Jobs	200	230	260
5 台機台	Average	Average	Average
GA	4239	5366	7842
SA	3	4	6
TS	36	40	75

在晶圓廠中，一天為二班，也就是一天必須排序工件兩次，每次皆排序 200 至 260 個工件，雖然 SA 的平均求解速度比 TS 來的快，但在 260 Jobs 的情況下，至多快 69 秒，不到 2 分鐘，此差異是可以被接受的，因此會將重點放在總延遲時間的改善上。

在平均求解品質上，TS 明顯優於 SA 和 GA，故在離子植入機台間最加工件指派加

工和離子植入機台內最佳工件加工順序中，會選擇工件總延遲時間最小且求解時間在可接受範圍內的 TS 演算法。

## 實驗結論

綜合以上實驗結果，可以將結論整理成下列數項：

- (1) TS 可以比 SA 和 GA 求出更好的工件加工順序，並且求解速度差異亦不大。
- (2) 在任何情境下，TS 演算法效果為最佳，會有最小的總延遲時間。
- (3) 本研究可以在非等效平行機台情境與氣體限制下求得近似最佳的生產排程組合。



## 參考文獻

Allahverdi, A. and Mittenthal, J., "Scheduling on M Parallel Machines Subject to Random Breakdowns to Minimize Expected Mean Flow Time", *Naval Research Logistics*, Vol. 41, pp 677-682, 1994.

Akturk, MS., "An exact tool allocation approach for CNC machines", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol.12, No.2, pp.129-140, 1999.

Avic, S. and Akturk, MS., "Tool magazine arrangement and operations sequencing on CNC machines", *Computers Operation Research*, Vol.23, No.11, pp.1069-1081, 1996.

Akturk, MS., and Onen, S., "Joint lot sizing and tool management in a CNC environment", *Computers in Industry*, 40, 61-75, 1999.

Akturk, MS., and Ozkan, S., "Integrated scheduling and tool management in flexible manufacturing systems", *Int J Prod Res*, Vol. 39, No.12, 2697-2722, 2001.

Atan, TS. and Pandit, R., "Auxiliary tool allocation in flexible manufacturing systems", *Eur J Oper Res*, 9(3), 642-59, 1996.

Amoako-Gyampah, K., and Meredith, JR., "A simulation study of FMS tool allocation procedures", *J Manuf Systems*, 15(6), 419-31, 1996.

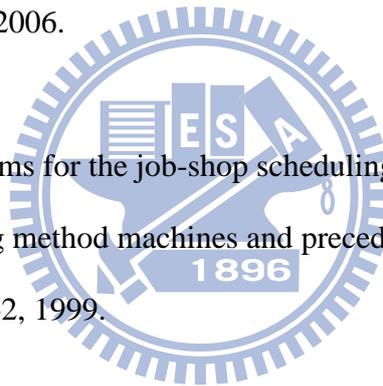
Bilgin, S., and Azizoglu, M., "Operation assignment and capacity allocation problem in automated manufacturing systems", *Computers & Industrial Engineering*, 56, 662-676, 2009.

Buyurgan, N., Saygin, S., and Kilic, S.E., “Tool allocation in flexible manufacturing systems with tool alternatives”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.20, pp.341-349, 2004.

Chen, CL. and Chen, CL., “A bottleneck-based heuristic for minimizing makespan in a flexible flow line with unrelated parallel machines”, *Computers & Operations Research*, 36(11), pp.3073-3081, 2009.

Duwayri, Z., Mollaghasemi, M. and Rabadi, G., “Scheduling setup changes at bottleneck workstations in semiconductor manufacturing”, *Production Planning & Control*, Vol. 17, No. 7, pp 717-727, October 2006.

Fatima, G., “Genetic algorithms for the job-shop scheduling problem with unrelated parallel constraints : heuristic mixing method machines and precedence”, *Computers & Industrial Engineering*, vol.37, issue 1-2, 1999.



Glover, F., “Tabu search-Part I”, *ORSA Journal on Computing*, 1990.

Glover, F., “Tabu search-Part II”, *ORSA Journal on Computing*, 1990.

Goldberg, DE., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, Boston, 1989.

Ghirardi, M., and Potts, CN., “Makespan minimization for scheduling unrelated parallel machines: a recovering beam search approach”, *European Journal of Operational Research*, 165(2), 457-467, 2005.

Garey, M. and Johnson, D.,“Strong NP-completeness results motivation, examples and implications”, *Journal of ACM*, 25, 499-508 ,1978.

Holland, JH., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*.Ann Arbor, MI: Univ. Michigan Press,1975.

Kirkpatrick, S., Gelatt, CD., and Vecchi, MP.,“Optimization by simulated annealing”, *Science*, 220, 671-680, 1983.

Leung, LC., Maheshwari, SK., Miller, WA.,“Concurrent part assignment and tool allocation in FMS with material handling considerations”, *Int J Prod Res* , 31(1), 117–38, 1993.

Mason, SJ., and Fowler, JW.,“Maximizing delivery performance in semiconductor wafer fabrication facilities”, *Processing of the Winter Simulation Conference*, 2000.

Mokotoff, E., and Jimeno, JL.,“Heuristics based on partial enumeration for the unrelated parallel processor scheduling problem”, *Annals Journal of Operational Research*, 117(1-4), 133-150,2002.

Metropolis, N., Rosenbluth, AW., Teller, AH., and Teller, E.,“Equations of state calculations by fast computing machines”, *J. Chem. Phys.*, 21, 1087-1092, 1958.

Rau, KR., and Chetty, OVK.,“Production planning of FMS under tool magazine constraints:a dynamic programming approach”, *Int J Adv Manuf Technol*, 11(5), 366-71, 1996.

Ruiz, R. and Maroto, C.,“A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility”, *European Journal of Operational Research*, vol.169, pp.781-800, 2006.

Stecke, KE.,“Formulation and solution of nonlinear integer production planning for flexible manufacturing systems”, *Manage Sci*, 29, 273-88, 1983.

Sarin, SC., and Chen, CS.,“The machine loading and tool allocation problem in a flexible manufacturing system”, *Int J Prod Res*, 25(7), 1081-94, 1987.

Sunkara, R. and Rao, R.,“A heuristic to determine equipment setup changes based on estimated lot arrivals in a semiconductor fab”, *Processing of the Winter Simulation Conference*, 2004.

Wang, KJ. and Hou, TC.,“Modeling and resolving the joint problem of capacity expansion and allocation with multiple resources and a limited budget in the semiconductor testing industry”, *International Journal of Production Research*, Vol.41, pp.3217-3235, 2003.

Whitney, C., and Shin, H.,“Sequential decision procedure for batching and balancing in FMS”, *Ann Oper Res*, 3, 301-16, 1985.

Zhang, Z., Zhang, MT., Niu, S. and Zheng, L.,“Capacity planning with reconfigurable kits in semiconductor test manufacturing” ,*International Journal of Production Research*, Vol.44, No.13, pp.2625-2644, 2006.

黃國益，“多部離子植入機台內毒氣鋼瓶的最佳化佈置”，國立交通大學工業工程與管理學程，碩士論文，民國 95 年。

羅正忠、張鼎張譯，“半導體製程技術導論”，台北市:台灣培生教育出版，民國 91 年。

王耀陞，“薄膜電晶體陣列廠考量光罩資源限制之主生產排程機制設計”，國立交通大學工業工程與管理學系，碩士論文，民國 96 年。

