

晶圓測試廠產能規劃研究

陳建良* 蕭俊彥 孫正儒

中原大學工業工程學系
中壢市 32023 中北路 200 號

呂春美

瀚宇彩晶股份有限公司
台南縣新市鄉台南科學工業園區南科 2 路 35 號

(Received: May 12, 2005; Accepted: September 29, 2005)

摘要

積體電路製造包括四大主製程：晶圓生產、晶圓測試、積體電路封裝與成品測試，本研究針對晶圓測試廠提出一套無限產能規劃系統。本系統可分為四個模組：(1)在製品指派模組、(2)批量投料模組、(3)產能堆疊模組、(4)產能平衡模組。在製品指派模組首先收集在製品之資訊，包含測試批目前加工站別、批量數量…等。而後針對主生產排程所設定之需求，依產品之週期時間預估測試批於各加工站開工及完工時間。當在製品之數量能滿足主生產排程所設定之需求時，則使用在製品來滿足需求。反之，若無法滿足時則使用批量投料模組進行投料。測試批之開工及完工時間計算完成後，利用產能堆疊模組堆疊機台與治具於各日之產能。若生產資源每日產能堆疊狀況在可接受的範圍內則可依此劇本進行生產。若生產資源每日產能堆疊狀況不盡理想時，可使用產能平衡模組來修改測試批之開工時間，以平衡生產資源之產能。

本研究以 Visual Basic 發展產能規劃軟體的雛型，並根據實際之晶圓測試廠資料加以驗證本產能規劃系統。藉由實驗設計檢驗產能規劃系統之績效，實驗的結果顯示所發展之產能規劃系統可有效平衡機台與治具負荷不均的現象。

關鍵詞：積體電路製造，晶圓測試，產能規劃，無限產能。

壹、前言

由於半導體生產設備非常昂貴，為增加積體電路(Integrated Circuit, IC)產品的競爭力，國內的半導體產業漸漸形成高度專業化分工的生產型態。隨著分工的專業化，台灣半導體產業結構可分為九個主要部份(參見圖1)。除了新產品的研發及製造技術的突破外，生產管理技術如產能規劃亦是整個半導

體業增加市場競爭力的一有效途徑。

IC 設計公司在接到客戶送達的訂單後，由 IC 設計公司設計 IC 佈線圖，設計完成之佈線圖送至光罩製造公司製成光罩，完成之光罩再送回 IC 設計公司，由 IC 設計公司送至晶圓廠於晶圓製造時顯影至晶圓(Wafer)上。晶圓製造時需使用晶柱廠生產的空白晶圓與化學品生產公司生產的多種化學品，完成之晶圓即送回 IC 設計公司。經過晶圓製造廠加工後之晶圓需在測試廠進行晶圓測試，於封裝前則需配合導線架之生產，以導引晶圓切割後晶粒(Die)上之

* 通聯作者：陳建良 E-mail: jamesc@cycu.edu.tw



電路，再由 IC 設計公司送至封裝廠進行封裝與組裝，再回測試廠進行成品測試。

超大型積體電路(Ultra Large Scale Integration, ULSI)體積小且附加價值高，其設計與製造皆非常複雜。其主要製造程序包括四個步驟，如圖 2 所示：晶圓製造、晶圓測試、積體電路封裝及成品測試。其中晶圓測試包含了五個主要加工步驟：第一道測試(Circuit Probe 1, CP1)、雷射修補(Laser Repair)、第二道測試(Circuit Probe 2, CP2)、墨水打印(Ink)及烘烤(Bake)。

半導體的產業結構中，最特殊的莫過於測試業(包含晶圓測試及成品測試)。其原因在於測試業並沒有一般製造廠的生產模式，而是一個以出售測試機台產能牟利的服務業。從測試的過程來看，其輸入為客戶之委測品，而輸出為原委測品與一份測試

報告，可能再加上部份之修補。測試業並沒有原物料購入的考量，亦即考慮要素與傳統物料需求規劃步驟不同。上游廠商的產出即為測試廠的原料，一方面須吸收因上游廠商延誤所產生之緊急訂單，另一方面又必須吸收某些客戶測試完畢後放置於倉庫中的暫存品，加上測試批工程暫停的現象及後續加工途程未定之情形，除了增加現場的變動性外，也增加了產能規劃的困難性。

在圖 3 的生產計劃架構中，首先應先發展主生產排程(Master Production Schedule, MPS)，而後以粗略產能規劃(Rough-Cut Capacity Planning, RCCP)來評估主生產排程之產能需求，並確定沒有顯著的產能限制存在。接著可由物料需求規劃(Material Requirements Planning, MRP)確認物料可否滿足主生產排程的需求，為使物料需求規劃與規劃範圍內之生產部門的人工及機器產能一致，則必須經由產能需求規劃(Capacity Requirements Planning, CRP)[8]來確認機台產能是否可滿足，必須不斷地協調及調整後方可確保生產計劃實施的可行性。晶圓測試也是依循此生產計劃架構，在物料需求規劃方面如前段所述「測試業並沒有原物料購入的考量」，並不像電子組裝業有成百上千種類的原物料需求，其輸入與輸出皆是晶圓。且半導體產業有別於一般傳統產業，設備昂貴且生產時間冗長，故產能是否有效率地利用與控制往往決定了其競爭力。因此產能規劃實為半導體產業生產管理中一個非常重要的課題，值得作深入的研究及探討，本研究即針對晶圓測試廠產能需求規劃部份進行研究。

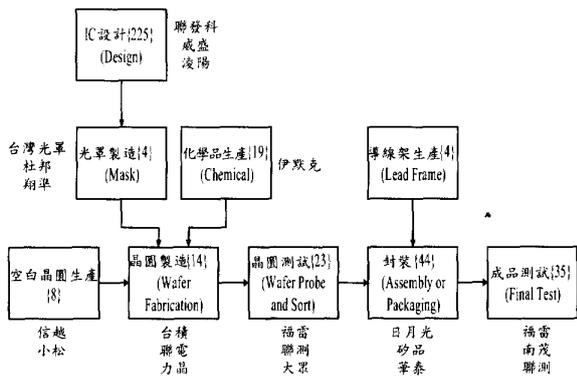


圖 1 我國 IC 產業結構[19][24]({}內之數字表公司數)

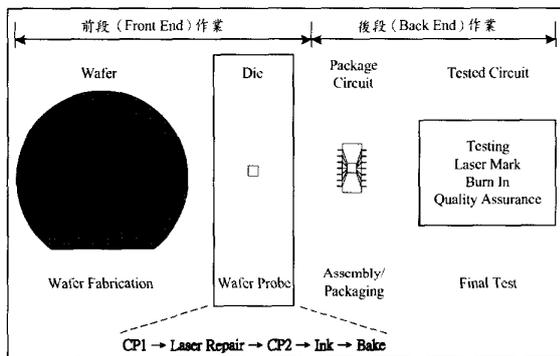


圖 2 ULSI 的主要製程，修改自[17]

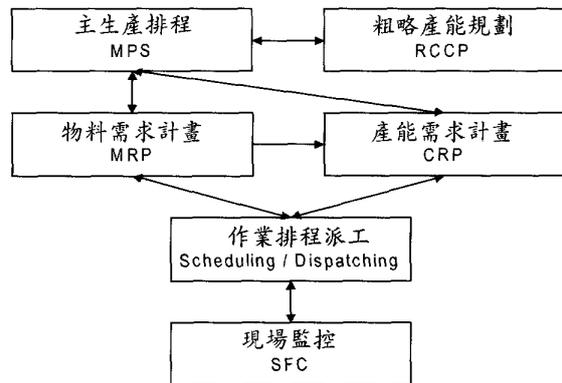


圖 3 生產計畫架構圖[14]



貳、文獻探討

文獻探討分為三大部份，第一部份介紹晶圓測試製程，第二部分探討晶圓測試廠生產管理與產能規劃的特性，第三部份探討產能規劃相關文獻。

一、晶圓測試製程

晶圓測試主要的功能是要測試出晶圓內之元件是否符合設計之功能，進而分出良品與不良品，作為切割封裝時之依據。晶圓大致可分為三種：Logic IC，Memory IC-Flash，Memory IC-DRAM/SRAM。晶圓測試的主要測試流程，可分為五個步驟：第一道測試(Circuit Probe 1, CP1)、雷射修補(Laser Repair)、第二道測試(Circuit Probe 2, CP2)、墨水打印(Ink)及烘烤(Bake)等。以下分別介紹五個測試步驟[20]。

(一) 第一道測試

晶圓測試中所需使用到的設備有測試機(Tester)、針測機(Prober)、載板(Load Board)及針測卡(Probe Card)，參考圖4。其中測試機是屬於較為昂貴且關鍵性的機台。測試機的主要功能就像人的大腦。主要目的在發出測試的訊號與接收測試的結果，並對測試的結果做分析與判斷。所需要的測試程式可由網路上的伺服器讀取。針測機則彷彿人的兩隻手，負責的功能包括晶圓的放置、抓取與定位等。載板的功能則是藉由Pogo Pins來連接測試機與針測卡。針測卡則是測試機與針測機的介面，用來傳送測試訊號。

當進行晶圓的測試時，針測機的機構會至晶舟

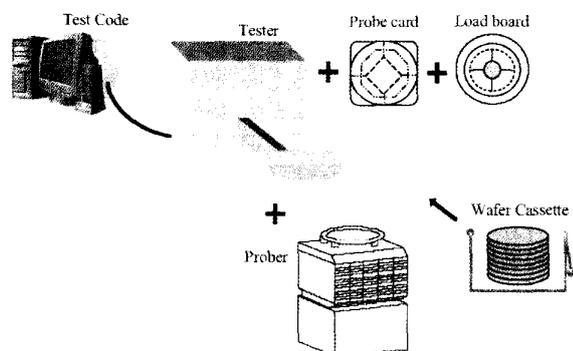


圖4 測試作業站之生產資源[25]

盒內抓取晶圓，移動晶圓上的晶粒到針測卡的下方與針測卡上的針相連接後進行測試。進行測試時是由測試機發出訊號至針測機，再將測試的結果傳回測試機，由測試機判斷晶粒是良品或不良品，最後可將不良品經由針測機標記打上墨水印字。

(二) 雷射修補

藉由第一道測試，可測出良品及不良品，並判斷是否可經雷射修補機台，以進行修補。雷射修補完成後便必須抽測幾片晶圓，以顯微鏡檢查雷射修補是否完成。

(三) 第二道測試

第二道測試之目的在判斷經由雷射修補之晶粒是否修補成功。第二道測試之過程是以不同的測試條件再次抽測晶圓。一般我們依據客戶的規範決定抽測的片數，且選擇須雷射修補最多的晶圓進行抽測。

(四) 墨水打印

完成測試步驟之後，不良的晶粒會在電腦資料庫中備註記有記號，如此在封裝之前可與以丟棄，標示不良晶粒的方法是採用噴墨註記(Ink Mark)。

(五) 烘烤

烘烤主要的目的是烘乾打印在晶圓上的墨水，並對晶圓的表面作清潔的動作。一般一個烘烤爐可同時烘烤數批測試晶圓，若測試批要求的烘烤溫度相同時，便可同時烘烤，通常會等到滿載後才開始運作，烘烤爐一但開始運作，便不可中斷。烘烤爐的產能倚賴於爐具的大小。

二、晶圓測試廠生產管理與產能規劃的特性

由於晶圓測試廠有著服務業的特質，因此，對於晶圓測試廠的生管人員來說，一方面須顧及因機台設置不當或產能不足而引發的生管問題；另一方面又須應付顧客的需求，如臨時更改測試品流程的問題，加深了生產管理的困難程度。常見的晶圓測試廠生產管理有著以下幾點特性：

(一) 測試批的工程暫停現象，造成測試流程相依於測試結果

當測試批之良率不符合顧客所要求時，此測試批便會發生工程暫停的情況。一般在集結相關單位及知會客戶後，晶圓測試廠與客戶必須共同協議此測試批之後續處理方式，這段時間便稱為“停留時



間(Hold Time)”。而此測試批其後之測試流程便可能因此而變動。測試流程相依於測試結果之情形，將增加生產管理的困難度。測試批測試流程之不定性，以產能規劃方面來說，將造成機台產能推估之誤差。

(二) 多變化的測試流程

委測晶圓在進行測試時，現場會發生非正常測試流程中會發生的現象，如：熱批(hot lot)的出現、測試批發生工程暫停、測試批被拆解、新委測批進行機台測試、定期保養及機台故障[22]。

(三) 委測產品測試流程的多樣性

由於晶圓測試廠客戶的多樣性，造成委測晶圓測試流程的多樣性。每個客戶對其委測之產品皆有一指定之流程，如有些產品須經過二道測試(CP1、CP2)，有些產品則只須經過一道測試(CP1)即可。

(四) 測試機台的跨機問題

於CP1及CP2步驟中，可視為測試機、針測機、針測卡及載板的組合。此四者不但彼此存在著多對多的對應關係，而與受測產品間又存在著多對多的對應關係。從產品的角度來看，有彈性途程的現象存在。亦即委測批同一時間可選擇多種測試機、針測機、針測卡及載板組合來達到相同的測試效果，但不相同的測試效率。以生產管理的角度來看便產生了跨機問題。

(五) 機台間存在設置程序相依問題(Setup Sequence Dependence)

由於不同的受測產品其測試時的參數(如：測試溫度、測試機台、測試程式…等)設定不一定相同，因此便產生設置程序相依問題。若工作順序上相鄰的測試批為同種類之產品，當前一測試批結束測試時，由於後一測試批之測試環境與前一測試批相同，將可減少其設置時間[25]。

三、產能規劃文獻

生產計劃的制訂必須與產能規劃間相協調，方可確保排定的生產計劃能如預定的方式及日程完成。無限產能及有限產能同為產能規劃的重要觀念及技巧[1][18]，此兩種觀念於輸出及輸入的資料不盡相同，其觀念的比較可見圖5。無限產能產能規劃適用對象為生管部門，其允許機台的使用率高於

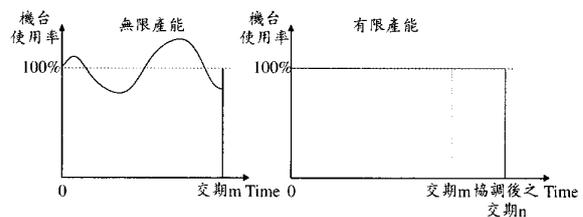


圖5 無限產能與有限產能觀念之比較

可用產能且訂單無優先序、訂單之交期不可改變，由此可估算出機台的負荷程度，作為製造部門或生管部門安排機台間互相備用、機台預防保養、外包或加班之依據。有限負荷產能規劃適用對象為業務部門，其特性包括機台的使用率不得高於可用產能、訂單具優先序、訂單之交期未知等，因此可藉由產能規劃模組考量生產線之限制，求得合理之交期，並作為業務人員對外協調交期之參考。

Matsuura[12]等人對有限負荷及無限負荷的方法，於不確定性高的零工式工廠環境下作一比較，其模擬的結果指出，預先考慮機台負荷的無限負荷技巧能得到較佳的績效並且能即時反應現場的狀況。

於無限負荷中，訂單的流程時間(Flow Time)決定了訂單抵達機台的時間，並進一步的決定了訂單於機台上的開始加工時間。因此流程時間的預估，決定了無限負荷產能規劃的準確度。Fisher[7]歸納了一些流程時間預估的方法，這些方法依據生產線上的在製品數量、動態的現場負荷、工作的特性、訂單生產途程上機台的負荷等狀況，並且提供了一些參數，用以估計訂單的流程時間。

Cigolini[5]等人將機台的負荷區分為兩類，一為目前的負荷(Load on Hand)，即在製品給予機台的負荷；另一為移轉的負荷(Load on Transit)，可視為目前上游機台的訂單或者是未來的投料訂單。計算目前的負荷是較為容易，只需掌握訂單途程的基本資料即可，但計算移轉的負荷則較為困難，因為我們必須掌握未來可能經過機台的訂單，以及它們將來抵達機台的時間。目前用以預估移轉負荷較精確的方法如有限負荷的時間桶(Time Bucket)及一些機率性的模式。

Guide[9]等人將經由修正後的粗估產能規劃方法用於再製造(Remufacturing)的生產環境中，並



且對這些方法和傳統的粗估產能規劃方法的績效作一評估。並指出修正後方法，較合乎此特殊製造環境的需要，並且對於產能的控制及預估較傳統的方法為佳。

Swaminathan[15]利用鬆弛基礎啟發式方法(Slack Based Heuristic)及貪食態度啟發式方法(Greedy Heuristic)，求解在需求不確定情況下的總產能規劃。將產能規劃分成四季進行預測，再利用兩種方式進行規劃需要購買的機器數量，以滿足顧客需求。鬆弛基礎啟發法是以機器成本資料為基礎，貪食啟發法則以貪時法去尋找購買機台數。而以鬆弛法得到較佳的效能。其將產能擴充問題，由只考慮經多位有經驗的規劃人員發展之最有可能發生的單一方案(Coordinated Planning)修正為同時考慮多個發生機率不同(給定權重)的方案(Scenario Based Planning)。

Çatay[2]等人發展一個適用於晶圓廠之多階混合整數法(Multi-Period Mixed-Integer Programming Model)，使操作成本、設備採購成本及存貨持有成本最小化。由於一典型的晶圓代工製造廠，同時在廠內生產之產品多達數百種，且晶圓加工製程共需經過300餘加工步驟，設備及機台具有多種功能，可相互備用(Backup)。此外，由於半導體之生產環境變異性高，實務上較偏好求解速度快之方法。因此，Çatay等人提出以Lagrangean-Based Relaxation Heuristic來求解此複雜的產能規劃問題。

Damodaran和Melouk[6]在多產品、多站及多生產線工作下，將拉(Pull)系統與推(Push)系統的作比較，所得結果拉系統的機器使用率變異明顯小於推系統的機器使用率，這顯示出拉系統有較佳的平衡效果。Lin[11]等人針對某一已存在或構想中之操作性系統行為，建構一個以電腦為基礎之數學或邏輯模式，然後在此模式上評估各不同組合之決策，並透過模擬運作的過程瞭解整體系統的操作行為。Hung[10]等人利用模擬得到每種晶圓產品每片帶給各工作區的負荷，此即為每日需求模式(Daily-Demand Method)，並利用此資訊進行線性規劃求得產出最大的產品組合。

Chen[4]等人在考慮設備之製程規格能力下，發展一套適用於多晶圓廠之產能規劃系統。根據拉引理論與無限產能的方法，產能規劃系統可決定訂單的投料時點、開始生產之晶圓廠與所需設備之製程

規格能力。此系統的目的為平衡各晶圓廠之負荷，不只考慮訂單製程需求、交期與生產流程，且考慮設備之製程規格能力及產能限制。此系統可平衡在不同期間不同晶圓廠之設備負荷。Toba[16]等人提出一平衡負荷的方法應用於多晶圓廠中，其特色是能有有效的降低製程中等待時間與前置時間，結果顯示該方法能有效改善多晶圓廠的負荷。

Chen[3]等人發展Dynamic State-Dependent Dispatching(DSDD)Heuristic應用於晶圓製造廠，能動態使用不同的派工法則於生產系統中。模擬結果證明在生產週期時間與在製品數量上，該方法比其他的派工法則擁有較佳的績效。

為因應半導體業界上中下游整合之趨勢，李瓊英[21]針對晶圓製造及針測流程之生產特性，發展一生產規劃模式，用以規劃各階段各廠最適宜生產之產品等級別及數量。楊明賢[25]對晶圓針測排程問題提出一整數規劃模式，以數學規劃軟體CPLEX，結合有效的運算策略，求解實務的晶圓針測排程問題。羅湘君[26]對晶圓製造廠之內部針測區設計粗略產能規劃模組，可快速地估算各工作站所需分配之最適產能負荷，並輔助主生產排程模組之生產週期時間之估算及各項規劃值之制訂，使系統達到有效性及可行性之規劃結果。許世洲[23]對於IC設計公司特殊的產能外包特性，提出一套外包產能規劃(Outsourcing Capacity Planning, OCP)機制，用以協助外包產能的分配決策。實驗結果發現，藉由OCP可得到較實務為佳的解。

本研究以啟發法則(Heuristics)發展一模組化功能執行與整合來進行晶圓測試無限產能規劃，藉由實驗設計來觀察、評估效率。

參、晶圓測試廠產能規劃

由於測試廠的競爭利基在於準確地提供客戶在交期內的產能，但機台的產能有限，且機台的購置成本高、折舊迅速。故藉由產能規劃模組的建立，可充分地掌握生產資源於各日之產能負荷狀況，並適度地分配廠內生產資源之有限產能。

一、問題定義與假設

本研究使用產能規劃的手法來預測計劃時間範



圍內機台的負荷程度，並適當地調整產能負載情形。產能規劃模組的輸出結果，可作為生產排程之參考，而決策人員亦可依據此結果，迅速有效地決定各期間內的最適之投入及產出水準，以因應產能不足或過剩的狀況發生，作為協助生管人員之決策支援工具。研究中所考慮之生產資源與製程間關係，如圖 6 所示。其中生產資源包含了一組機台 (Machine) 及二組治具 (Jig I、Jig II)。

有限產能規劃中，等候時間與停留時間是規劃後或執行後之結果，優先序高的批量其時間較短，而優先序低的批量其時間就相對較長。在無限產能規劃中，等候時間與停留時間是輸入參數，用以規劃產能需求所發生之時段，以估計生產資源在各時段內之產能需求 (可能超出最大可用產能)。

由於晶圓測試流程中所須考慮的因素相當多，故在進行本研究時，俾使其符合晶圓測試產業之生產特性，亦兼備學術及實用上的價值，吾人設定若干研究假設條件，茲列舉如下：

- (一) 產能規劃只考慮機台類型，具相同加工特性之機台，視為同一機台類型。
- (二) 一種產品只遵循一種生產途程，測試流程中的每個步驟只對應一特定機台類型進行測試。
- (三) 測試流程中，每個步驟加工單位為一批量。

- (四) 測試機台功能穩定，無誤判情況發生。
- (五) 主生產排程之設定以日為最小單位。
- (六) 投料時點依主生產排程需求而定。
- (七) 生產資源產能堆疊以日為最小單位，亦即產能堆疊之時間週期 (Time Period) 為日。
- (八) 機台每日可用產能為 24 小時，共 1,440 分鐘。
- (九) 以批量 (Lot) 為最小加工單位，每個批量有 25 片晶圓。
- (十) 測試批量之產能負荷堆疊於計畫設置時間所屬時段內。
- (十一) 測試批於測試流程中各站之等候時間 (Wait Time)、設置時間 (Setup Time)、加工時間 (Process Time)、停留時間 (Hold Time) 已知。
- (十二) 使用 MPX-SC 軟體 [13] 求得本研究所需之等候時間、設置時間、加工時間及停留時間。MPX-SC 軟體為一建構在穩態假設 (Steady State Assumption) 下的生產評估工具，其理論基礎為等候線理論。

二、產能規劃演算法

本研究採用模組化設計發展測試廠產能規劃演

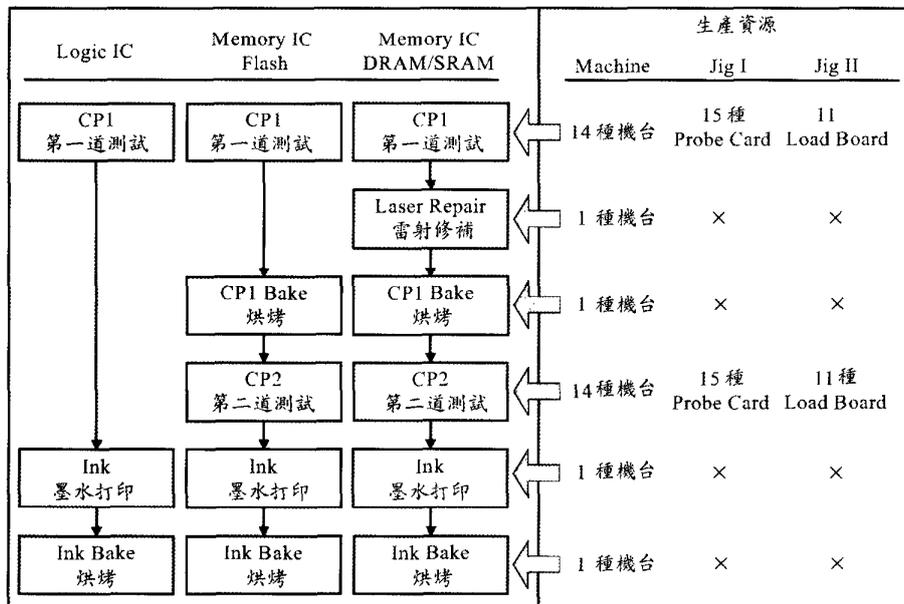


圖 6 晶圓測試流程與生產資源



算法，以利於未來演算法擴充及程式撰寫。由於晶圓測試廠產能規劃問題相當複雜，於架構上分為四個模組：在製品指派模組、批量投料模組、產能堆疊模組、產能平衡模組，分述如下。

(一) 在製品指派模組

在製品指派模組主要目的在根據各產品的主生產排程，於每個時間週期內，由產品的製程末端逐一指派線上的在製品數量以滿足生產計劃。模組中之演算法概念，以示意圖方式呈現。包括：以「拉引」的方式滿足主生產排程、週期時間之組成、在製品之後推與前推架構、欠貨處理之方式等，分述如下。

1. 以「拉引」的方式滿足主生產排程

本研究採用類似及時性生產(Just-In-Time, JIT)中拉(Pull)的觀念，以主生產排程為中心指派生產線上之在製品。使用此觀念之優點，除了更接近測試廠的運作邏輯外，將有效減少在製品之庫存成本。根據主生產排程各日之需求，從生產線末端尋找在製品滿足主生產排程之需求數量。如果此作業站沒有在製品或在製品數量不足以滿足主生產排程時，便往前一作業站進行指派之動作。不斷地往前一作業站尋找，直到滿足主生產排程所要求之數量方才停止。若生產線上之在製品不足以滿足主生產排程時，便執行批量投料模組以採行投料之動作。

如圖7所示，假設於第一天(D1)有70批量之需求，必須由最後一個作業站逐一往第一個作業站指派在製品以滿足日生產計畫之需求。於此圖中首先指派最後一個作業站50的在製品數量給D1，但不足以滿足D1的需求，於是往前一個作業站指派20的在製品數量以滿足D1的需求。第二天(D2)有100

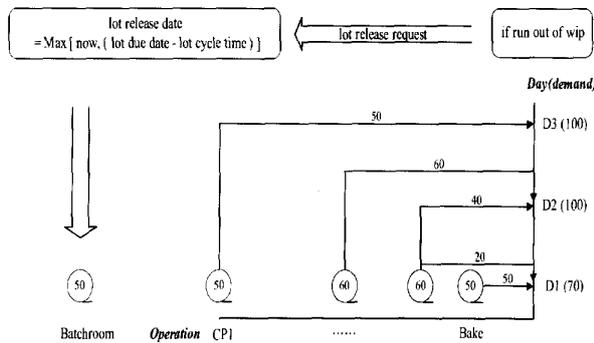


圖7 以拉引的方式滿足主生產排程

批量之需求，將目前作業站剩餘40的在製品數量指派給D2，但數量未滿足D2的需求，需在往前一個作業站，指派60的在製品數量給D2，恰好滿足D2的需求。第三天(D3)有100批量之需求，往前一個作業站將50的在製品數量指派給D3，但數量尚未滿足D3的需求，而生產線上的在製品數量已耗用完，於是需要執行投料的動作，投料50的數量以滿足D3的需求。

2. 週期時間之組成

週期時間之定義為測試批離開上一作業站，與離開目前作業站之時間差。如圖8所示，測試批之週期時間分四個部份：等候時間、設置時間、加工時間與停留時間。等候時間起始點為上一作業站之停留時間結束點；設置時間起始點為計劃設置開始時間(Scheduled Setup Time, SUT)；加工時間起始點為計劃加工開始時間(Scheduled Start Time, SST)；停留時間起始點為計劃停留開始時間(Scheduled Hold Time, SHT)；停留時間結束點為計劃完工時間(Scheduled Finish Time, SFT)。而作業站n-1之Cycle Time結束點，與作業站n之Cycle Time起始點，視為同一時間點，同為SFT_{n-1}。

考量測試批之特性，等候時間定義為測試批從上一作業站移動至下一作業站之搬運時間，及測試批進入作業站內等待上一測試批完成測試並離開之時間總合。設置時間為測試批進行測試時，準備測試程式及更換機台配件之時間總合。加工時間為測試批進行測試之時間。由於測試批因測試結果而發生工程暫停之現象極為特殊，故於週期時間內考量停留時間。但實際上並非每一作業站皆有工程暫停之現象，於產能規劃執行之初亦難以預估測試批未來於那一作業站會發生工程暫停，且停留時間也難以預估。故測試批之停留時間，於測試流程上之各站分別設定，以平均分擔於各站之方式，預估測試

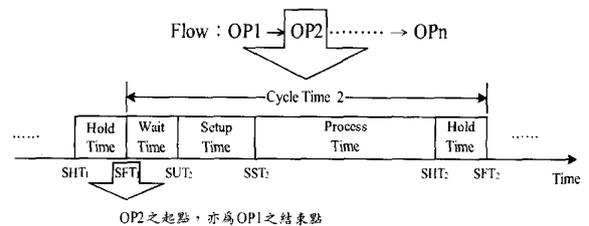


圖8 週期時間之拆解



批工程暫停之情形。

3. 在製品之後推與前推架構

後推與前推之架構普遍應用於生產排程演算法之開發。本研究應用後推與前推之觀念於演算法之發展，參見圖9。當一測試批被指派以滿足某日主生產排程之需求時，系統便指定此測試批之交期(Due Date)，接著以後推之方式預推測試批於目前作業站之Cycle Time 起始點(SFT_{k-1})，並與現在時間(Time Now)做比較。如圖9上半部份，若所推估之Cycle Time 起始點未超過現在時間，則此一測試批可滿足交期。而如圖9下半部份，若所推估之Cycle Time 起始點已超過現在時間，則此測試批便無法滿足交期。則從現在時間點推估測試批於流程終站之Cycle Time 結束點(SFT_n)。無論此一測試批是否可滿足交期，皆須以前推方式推算其終站之Cycle Time 結束點。而對於無法滿足交期之測試批，系統除了顯示警告訊息告知使用者外，並以壓縮週期時間之方式(壓縮百分比由使用者自定)進行測試批之Cycle Time 結束點推算。

無限產能的概念是在一段時間內產能有超出負荷的可能，在這段時間內針對超出產能負荷的部分進行產能平衡的調整，當超出產能負荷不多時此完

工時間會是有參考價值的。當MPS需求大時，超出產能負荷部分如果過多，會降低此推算時間的參考價值。

本研究週期時間壓縮百分比之設定依產品別區分，不同產品可設定不同之壓縮百分比，參見圖9下半部份。由於測試批之等候時間及停留時間可藉由生產管理的技巧進行改善，故只針對等候時間及停留時間壓縮，而設置時間及加工時間則不壓縮。

4. 欠貨處理之方式

假設於月初執行產能規劃模組，除主生產排程所規定數量必須達成外，亦須考慮上個月主生產排程規定出貨，但實際上卻延遲至本月份出貨之訂單。這種情形於演算法中稱之為欠貨。產能規劃模組於執行之初必須優先處理欠貨之情形。

(二) 批量投料模組

當在製品不足以滿足當日主生產排程需求時，系統便必須執行批量投料模組以模擬投料之情形。此模組內所應用之想法大致與在製品指派模組相同，其不同點為投料之後推與前推架構在於批量投料後，系統指定測試批交期，以後推之方式推算測試批於流程中第一個作業站之計劃開工時間(SFT_0)。如圖10上半部份，若所推估之計劃開工時

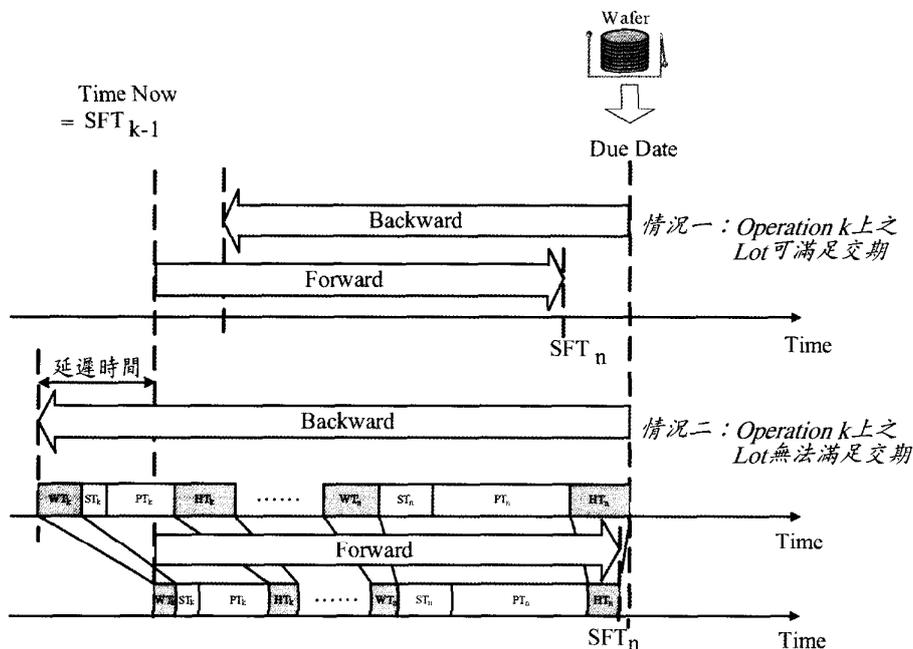


圖9 在製品之後推與前推架構圖



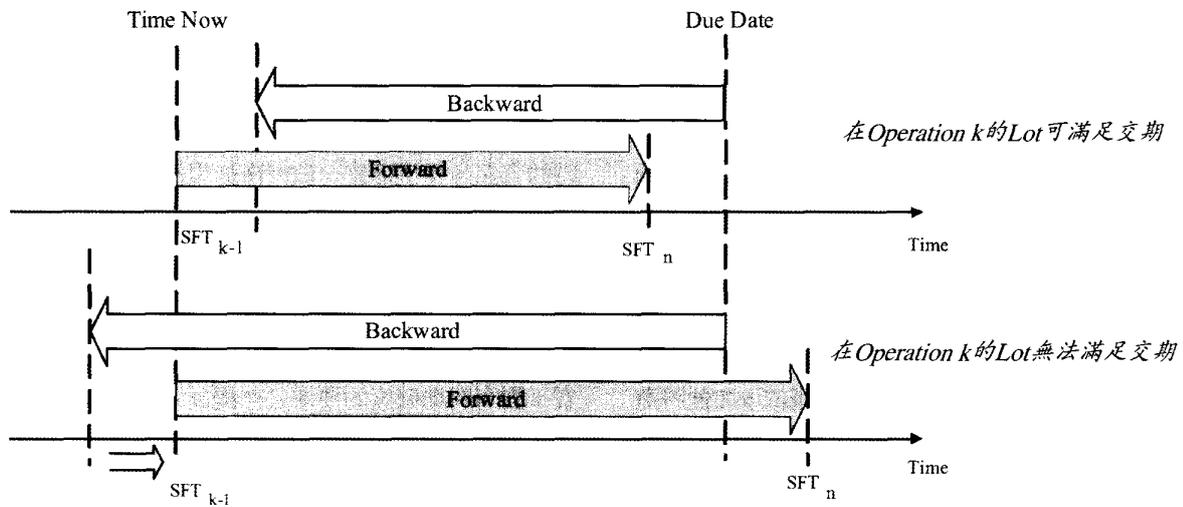


圖 10 投料之後推與前推架構圖

間未超過現在時間(Time Now), 則採行後推所建議之計劃開工時間即可。如圖10下半部份, 若所推估之計劃開工時間已超過現在時間(Time Now)時, 其作法與在製品相同。

(三) 產能堆疊模組

當測試批已完成指派動作、計劃開工時間及計劃完工時間之推估時, 便須執行產能堆疊模組以累計生產資源之產能。本研究之生產資源為一組機台 (包含 Tester、Laser Repair、Bake...等) 及二組治具 (治具 I、治具 II)。計算生產資源產能之時間週期為日, 時間單位為分。亦即產能堆疊模組的輸

出結果為某類型生產資源於某日的工作量。

不論機台或治具, 產能堆疊構成時間僅考量測試批於生產資源上之設置時間及加工時間, 如圖 11。

不論機台或治具, 產能堆疊時間的方式也相同。於圖 12 中, 以機台為例, 產品流程的作業站 1 (OP1) 及作業站 2 (OP2) 站中, 分別有測試批 A 及 B, 而 X 與 Y 分別為機台 a 及機台 b 之已分配產能, 在計算測試批之計劃設置開始時間後, 便將此時間值轉換為日, 並累計至對應之機台於該日之產能。

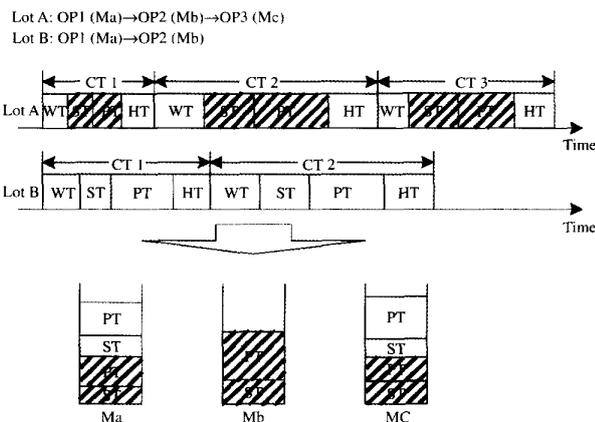


圖 11 產能堆疊構成時間

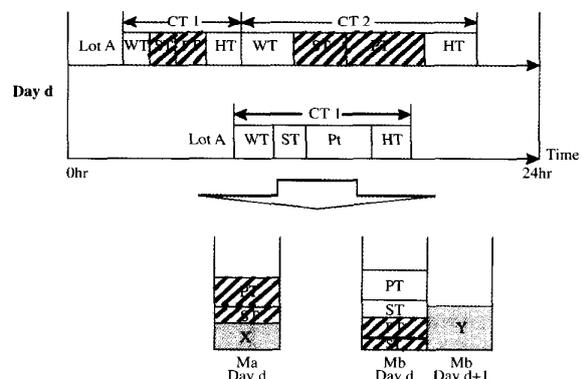


圖 12 產能堆疊時間



(四) 產能平衡模組

產能平衡之想法，主要為針對生產資源各日產能不平衡之情形所作之改善。在產能平衡的過程中，找出超出機台使用率的產品批量來進行移動，且考量其於各加工步驟之移動，詳細流程如圖13的流程圖所示。

執行產能規劃系統時，如發生主生產排程每日之需求數量變化過大之情形，便可能造成某類型生產資源各日產能不平均之現象。當生產資源各日產能不平衡情形發生時，生管人員必須不斷地協調各生產資源，以確保測試批如期完成測試，如此將造成管理上之困擾。而本研究採行將測試批開工時間提早之方式，避開產能使用率之尖峰期，以達平衡各日產能之效。平衡各日生產資源之產能於模組中可依機台類型個別設定。其觀念如圖 14 所示，Machine M於d-2日及d-1日之產能負荷超過平均產能，此時採用先進先出之概念，將批量之投料日提前，直到 Machine M 之產能獲得平衡為止。

肆、實驗設計

本研究之無限產能規劃系統，以 Visual Basic 程式語言依照演算法的觀念構建。並參考晶圓測試廠之資料，建立一個Access關連性資料庫以供此系統的輸入資料及輸出報表之存取。以程式語言取代

了模擬軟體乃因其較能完整的表達演算法的觀念，且具有彈性大、執行速度快等優點。而資料庫建構可提供使用者一系統化的輸入資料來源，更能讓多位使用者分享及共用資料，並獲得晶圓測試廠內即時的資訊。舉例而言，執行產能規劃系統時的晶圓測試廠在製品分佈，即為非常重要的即時資訊。

此產能規劃系統由於使用靜態(Deterministic)的資料，故可視為一靜態的模擬。相較於模擬模式而言，可提供快速的試算環境，並方便使用者快速擷取重要資訊並評估因應的方案。但由於其靜態的性質，對資料準確度的要求必然提高，例如產品的加工步驟週期時間等資訊即需具有較高準確性，方能進一步確保產能規劃結果的可靠性。因此，若晶圓廠生產環境變異性過大時，則必須審慎地預測及評估相關的輸入項目，若需要時則需加以修正。

本研究使用MPX-SC軟體建立演算法所需之週期時間、在製品數量及分佈等資料。如前所述，MPX-SC 軟體為一建構在穩態假設下的生產評估工具，其理論基礎為等候線理論。主要輸入資料為加工時間、產品加工流程、機台種類與數量等資料，利用其來預估產品的週期時間與初始狀態的在製品資料。產品的週期時間由等候時間、設置時間、加工時間、停留時間所組成，而加工時間為已知的實際資料，則可預估其餘項目的時間。MPX-SC的產出再加上產品資料、產品加工途程等資料作為晶圓測試廠產能規劃模組(Wafer Probe Capacity Planning, WPCP)模組的輸入資料，透過模組化系統運算可得到生產資源使用率，瞭解系統之負荷情形，如圖15的系統模組架構圖。

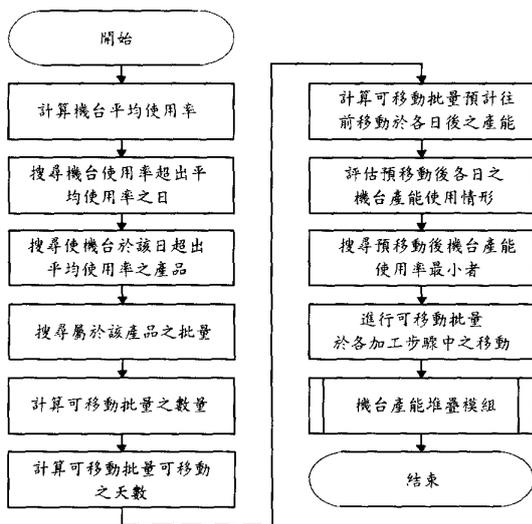


圖 13 機台產能平衡演算法流程圖

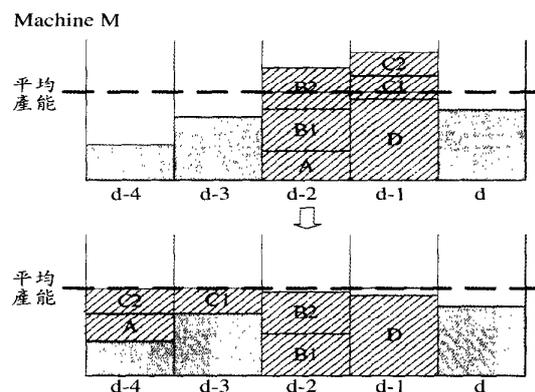


圖 14 測試批為平衡產能提前開工



196 個治具。以瓶頸治具區分，治具 I 中瓶頸治具之數量共 89 個，非瓶頸治具之數量共 73 個。治具 II 中瓶頸治具之數量共 56 個，非瓶頸治具之數量共 140 個，由於治具須配合機台使用，不同種產品使用同一種治具時之時間亦不相同。故於系統中，治具產能堆疊時間可由使用者自行訂定。關於治具產能之設定，由於測試廠通常為 24 小時運轉。故於本系統中設定治具每日可用產能為 24 小時，共 1440 分鐘。

二、績效衡量指標

除了預估未來設備的使用率外，本實驗比較重要的是無限產能規劃演算法是否具有平衡設備負荷的能力。因此為測驗產能平衡模組之績效，績效指標多為考量平衡效果所設計。在績效衡量指標的設計方面，由於生產線不平衡之情形所在意的是瓶頸生產資源的負荷程度，故針對瓶頸生產資源設計績效指標。本系統設定生產資源平均使用率超過 80% 以上者為瓶頸生產資源。而不同實驗組合(run)中，瓶頸生產資源之設定隨著生產資源平均使用率的不同而變動。本實驗所設計的績效衡量指標包括：

瓶頸生產資源各日使用率之平均標準差，瓶頸生產資源使用率超過 100% 之累計日數，瓶頸生產資源使用率超過 100% 之累計超額量(Extra Utilization)，其特性都為望小。

本研究於同一作業站所考慮的生產資源計有：一組機台及二組治具。

(一) 瓶頸生產資源各日使用率之平均標準差

生產資源的日使用率變異性越小，代表生產資源各日負荷的變動程度也越小，反之則越大。故減少日使用率的變異性亦為產能規劃的重要目的。假使能達到妥善的負荷分配，必定能縮小設備日使用率的變異性，進一步達到平滑的設備負荷程度。產能規劃模組的輸出結果為生產資源各日產能之使用率。瓶頸生產資源各日使用率之平均標準差的計算方式，在於收集生產資源各日使用率後，計算其標準差，而後針對瓶頸生產資源部份平均。

(二) 瓶頸生產資源使用率超過 100% 之累計日數

凡生產資源之日使用率超過 100% 即累計一次，最後針對瓶頸生產資源部份累計加總。累計日

數之意義在於檢驗產能堆疊超過生產資源可用產能之日數，此日數應愈少愈好。若此日數愈多，代表生產資源產能不足的次數愈多。此指標在於表示資源發生瓶頸的次數多寡。

(三) 瓶頸生產資源使用率超過 100% 之累計超額量

當生產資源各日使用率超過 100% 時便累計超過的部份，最後針對瓶頸生產資源部份加總。對本研究而言即為計劃時間範圍內所有“生產資源日使用率超過 100% 的超額量”的加總值。累計超額量之意義在於檢驗當產能堆疊超過生產資源可用產能時，超過的程度。此累計值應愈小愈好。若此值愈大，代表生產資源產能不足的程度愈大。

三、模擬實驗

本研究產能規劃的時幅為二個月，共六十日。實驗共考慮四個因子，分別為產能規劃方法、主生產排程變化幅度、主生產排程變化間隔及產品比例等。產能規劃方法中包含三種無限產能規劃方法：無限產能規劃、無限產能規劃配合機台產能平衡、無限產能規劃配合治具產能平衡。主生產排程方面包含四種變化幅度（無、±10%、±20%、±30%）及二種變化間隔（3日、7日）。產品比例方面則包含二種產品混和比例。希望藉由主生產排程之變化加上產品比例之不同，測試無限產能規劃系統在不同環境下表現是否穩定。實驗次數為 3×4×2×2 共 48 次。

本研究以 2 個月（共 60 日）為規劃週期時間，分別計算各生產資源之產能使用率，而後再進行各項績效指標值之收集。實驗結果使用 SPSS 統計軟體進行變異數分析(Analysis Of Variance, ANOVA)，顯著水準 α 設定為 0.05。進行實驗之目的在衡量無限產能規劃、無限產能規劃配合產能平衡於各種指標下之績效。

四、實驗結果

探討相關績效指標之前，須對產能規劃系統之正確性進行驗證。吾人以 MPX-SC 軟體的輸出結果為基準，將相同之資料，分別輸入至晶圓測試廠產能規劃模組(WPCP)及 MPX-SC 軟體中進行比較。如圖 16 所示，吾人將 19 種機台類型在主生產排程



表 1 瓶頸機台各日使用率之平均標準差分析表

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
產品比例	1	317.70	317.70	317.70	40.99	0.000
MPS 變化幅度	3	9178.61	9178.61	3059.54	394.75	0.000
MPS 變化間隔	1	352.14	352.14	352.14	45.43	0.000
產能規劃方法	2	1863.90	1863.90	931.95	120.24	0.000
產品比例 *MPS 變化幅度	3	109.73	109.73	36.58	4.72	0.010
產品比例 *MPS 變化間隔	1	11.95	11.95	11.95	1.54	0.227
產品比例 * 產能規劃方法	2	10.62	10.62	5.31	0.69	0.514
MPS 變化幅度 *MPS 變化間隔	3	213.22	213.22	71.07	9.17	0.000
MPS 變化幅度 * 產能規劃方法	6	1476.79	1476.79	246.13	31.76	0.000
MPS 變化間隔 * 產能規劃方法	2	140.05	140.05	70.02	9.03	0.001
Error	23	178.27	178.27	7.75		
Total	47	13852.97				

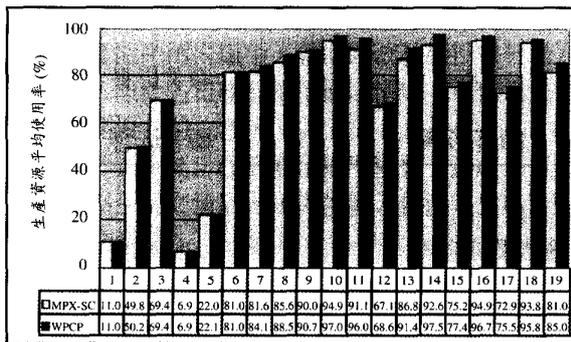


圖 16 MPX-SC 與 WPCP 生產資源平均使用率比較

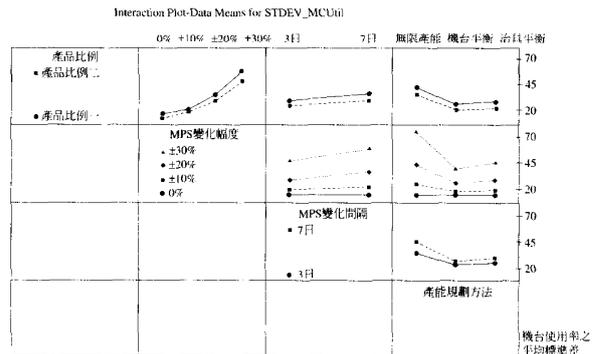


圖 17 瓶頸機台各日使用率之平均標準差交互作用圖

需求數量相同之情形下，分別執行 MPX-SC 及 WPCP，求得月平均機台使用率。從圖中可知，兩者所求得穩態下機台的產能使用率雖有些微誤差，但可說相當接近。依據此項結果將能證明本演算法邏輯之正確性。

以瓶頸生產資源各天使用率之平均標準差為例，表 1 為其 ANOVA 分析結果，其交互作用圖如圖 17 所示。四個因子對此績效值皆有顯著的影響。主生產排程的變化為影響產能不平衡現象之主要原因。而產品比例的不同亦可能造成某些機台的產能負荷過重，某些機台產能負荷過輕，引發產能不平衡之現象。各種產能規劃方法，由於考量的角度不

同，對此績效值而言亦造成影響。

各因子間之交作用亦相當顯著，主生產排程變化幅度因子與其他因子間皆存在交互作用，代表主生產排程之變化幅度為影響各日產能平衡與否之重要因子。而在不同變化幅度下，產能規劃方法的改善程度便不相同，由圖 17 主生產排程變化幅度因子與產能規劃方法之交作用中，可以觀察出無限產能規劃模組配合產能平衡模組在變化幅度愈大的情況下，無限產能規劃配合產能平衡模組有不錯的改善效果。由圖中可看出產能平衡中機台產能平衡、治具產能平衡在其他因子下皆有較佳的績效，尤以機台產能平衡之效果最佳。



表 2 瓶頸機台實驗結果綜合表

	瓶頸機台各日使用率之平均標準差	瓶頸機台使用率超過 100% 之累計日數	瓶頸機台使用率超過 100% 之累計超額量
產品比例	顯著影響	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化幅度	顯著影響	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化間隔	顯著影響	×	顯著影響
產能規劃方法	顯著影響	顯著影響	×

表 3 瓶頸治具 I 實驗結果綜合表

	瓶頸治具 I 各日使用率之平均標準差	瓶頸治具 I 使用率超過 100% 之累計日數	瓶頸治具 I 使用率超過 100% 之累計超額量
產品比例	顯著影響	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化幅度	顯著影響	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化間隔	顯著影響	×	顯著影響
產能規劃方法	顯著影響	顯著影響	顯著影響

表 4 瓶頸治具 II 實驗結果綜合表

	瓶頸治具 II 各日使用率之平均標準差	瓶頸治具 II 使用率超過 100% 之累計日數	瓶頸治具 II 使用率超過 100% 之累計超額量
產品比例	×	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化幅度	顯著影響	顯著影響	顯著影響
主生產排程變化間隔	×	×	×
產能規劃方法	×	×	×

表 2, 3, 4 為實驗設計中 ANOVA 所分析的綜合結果。其中直列為績效評估標準，橫列為實驗設計的因子。表中「×」代表因子不顯著。實驗設計中之績效，皆是針對瓶頸生產資源作評估，而生產資源平均使用率超過 80% 以上者，視為瓶頸生產資源。若生產資源平均負荷過低（如治具 II）者，其實驗結果則較為不顯著。

伍、結論與未來研究方向

根據以上各章所述與實驗結果，本研究首先針對半導體測試廠發展產能規劃演算法，而後對測試廠所面臨之產能不平衡情形進行改善。最後利用實驗設計之技巧，測驗在不同產品比例、主生產排程變化幅度、主生產排程變化間隔的條件下，產能規



劃方法之績效。由本研究演算法開發的過程及實驗分析的結果可獲致以下的結論：

- 一、使用無限產能規劃配合產能平衡方法可有效平衡機台各日產能不平均之情形。對瓶頸機台各日使用率之平均標準差、瓶頸機台使用率超過100%之累計日數、瓶頸機台使用率超過100%之累計超額量等指標而言，不論主生產排程變化幅度大或小之情形下，產能平衡方法皆能得到不錯的績效。
- 二、主生產排程變化幅度愈大時，機台產能平衡模組的改善績效愈好。
- 三、由實驗的過程可知，產品的週期時間、等候時間、設置時間、加工時間與停留時間之估計，將影響測試批完工時間及機台產能堆疊情形之精確度。
- 四、發展無限產能規劃系統，可快速且有效反應測試廠產能堆疊之狀況，以利於相關決策之訂定。
- 五、於產能平衡模組中，藉由修改計劃投料日之方式，改善各日產能不平衡之情形，可作為生產計劃擬定時之參考。
- 六、由於主生產排程的變化幅度變大，造成各日產能不平衡之情形，值得生管人員擬定生產計劃時注意。
由於晶圓測試流程中所須考慮的因素相當多，某些項目在本研究中並未考慮，在此提出供日後研究的參考，分述如下：
- 七、為提高測試批完工時間及機台產能堆疊情形估計之精確度，對於時間之估計，可發展一週期時間推估系統改善。針對不同產品比例、主生產排程變化程度…等外在環境變化時，進行時間方面之推估。
- 八、目前機台規劃之對象為機台類型，未來可考量機台之產能規劃。機台規劃之對象為機台，將可更詳細地得知機台產能堆疊之情形。配合選機決策之使用，更可準確地推估機台的產能負荷。
- 九、發展在製品收集系統。於產能規劃系統執行之初，藉由準確地掌握在製品狀態，可加強機台產能堆疊之精確度，提高產能規劃系統之績效。
- 十、可針對當測試批發生工程暫停時測試流程相依

於測試結果之情形進行改善。由於測試流程的不定性將影響機台產能堆疊之準確性。故可先於系統中設定以機率選擇可能之產品流程，再進行產能堆疊。如此將能提高產能規劃準確性及實用性。

- 十一、對於測試機台的跨機問題及測試機台間互相支援之情形進行研究。
- 十二、考量測試批於測試流程中之併批、拆批問題。
- 十三、考量測試批之良率、重加工情形。

致謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會補助研究經費（編號 NSC 92-2212-E-033-005，NSC 93-2212-E-033-003），謹此誌謝。

參考文獻

1. Bobrowski, P. M., "Implementing a Loading Heuristic in a Discrete Release Job Shop", *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 11, pp. 1935-1948, 1989.
2. Çatay, B., Erengüç, S. S. and Vakharia, A. J., "Tool capacity planning in semiconductor manufacturing", *Computers & Operations Research*, Vol.30, pp. 1349-1366, 2003.
3. Chen, J.C., Chen, C.W., Dai, J.Y. and Tyan, J.C., "Dynamic state-dependent dispatching for wafer fab", *International Journal of Production Research*, 42(21), pp. 4547-4562, 2004.
4. Chen, J.C., Chen, C.W., Lin, C.J. and Rau, H., "Capacity planning with capability for multiple semiconductor manufacturing fabs", *International Journal of Computers and Industrial Engineering*, 48(4), pp. 709-732, 2005.
5. Cigolini, R., Perona, M. and Portioli, A., "Comparison of Order Review Techniques in a Dynamic and Uncertain Job Shop Environment", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 11, pp. 2931-2951, 1998.
6. Damodaran, P. and Melouk, S., "Comparison of Push and Pull Systems with Transporters: A Metamodelling Approach", *International Journal of Production Re-*



- search, Vol. 40, No. 12, pp. 2923-2936, 2002.
7. Fisher, W. W. and Ahmed, I., "Due Date Assignment, Job Order Release, and Sequencing Interaction in Job Shop Scheduling", *Decision Sciences*, Vol. 23, pp. 633-647, 1992.
 8. Gaither, N. and Frazier, G., *Production and Operation Management*, 8th edition, Cincinnati, Ohio: South-Western College, p. 421, 1999.
 9. Guide, V. D. R., Srivastava, R. and Spencer, M. S., "An Evaluation of Capacity Planning Techniques in a Remanufacturing Environment", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 67-82, 1997.
 10. Hung, M. H., Wang, E. and Wang, I., "Using Simulation and Daily-Demand Method to Analyze the Capacity Utilization for Product-Mix in Semiconductor Fabrication", In the Proceedings of Semiconductor Manufacturing Technology Workshop, Hsinchu, Taiwan, pp. 302-306, December, 2002.
 11. Lin, J. T., Wang, F. K. and Wu, C. K., "Connecting Transport of Automated Material Handling System in Wafer Fab", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 529-544, 2003.
 12. Matsuura, H., Tsubone, H. and Kataoka, K., "Comparison between Simple Infinite Loading Considering a Workload Status under Uncertainty in Job Operation Times", *International Journal of Production Economics*, Vol. 40, pp. 45-55, 1995.
 13. *Network Dynamics, MPX-SC User Manual First Edition*, June 1996.
 14. Stevenson, W. J., *Production/Operations Management*, Seventh edition, New York: McGraw-Hill, 2002.
 15. Swaminathan, J. M., "Tool Capacity Planning for Semiconductor Fabrication Facilities Under Demand Uncertainty", *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, pp. 545-558, 2000.
 16. Toba, H., Izumi, H., Hatada, H. and Chikushima, T., "Dynamic load balancing among multiple fabrication lines through estimation of minimum inter-operation time", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 18(1), pp. 202-213, 2005.
 17. Uzsoy, R., Lee, C. Y. and Martin-Vega, L. A., "A Review of Production Planning and Scheduling Models in Semiconductor Industry. Part I: System Characteristics, Performance Evaluation and Production Planning", *IIE Transactions*, Vol. 24, No. 4, pp. 47-60, 1992.
 18. Wortman, J. C., Euwe, M. J., Taal, M. and Wiers, V. C. S., "A Review of Capacity Planning Techniques within Standard Software Package", *Production Planning and Control*, Vol. 7, No. 2, pp. 117-128, 1996.
 19. 王興毅、陳梧桐、王建華，"2003 半導體工業年鑑"，工研院IEK中心，電子資訊研究組，2003。
 20. 何宗憲、陳建良、張進群、陳俊杰、曾淑美、何土城、鄧玉春，"IC測試製程與設備簡介"，*機械工業雜誌*，pp. 189-203，1998。
 21. 李瓊英，"整合晶圓製造與針測流程之生產規劃系統建構"，交通大學工業工程與管理所碩士論文，2003。
 22. 林訓宇，"應用斐氏網路與遺傳演算法於晶圓測試廠之模型建構與排程"，台灣大學資訊工程所，2002。
 23. 許世洲，"IC設計公司的外包產能規劃"，交通大學工業工程與管理所博士論文，2003。
 24. 陳建良、項衛中、陳俊杰、孫正儒，"半導體成品測試廠產能規劃研究"，*中原學報*，Vol. 33, No. 2, pp. 57-70，2005。
 25. 楊明賢，"晶圓針測廠等效平行機台排程問題之研究：模式、演算法與應用"，交通大學工業工程與管理所博士論文，2001。
 26. 羅湘君，"晶圓廠針測區多工單等級生產規劃系統之設計"，交通大學工業工程與管理所碩士論文，2002。



Capacity Planning for Wafer Probe Plant

JAMES C. CHEN, JIUN-YAN SHIAU
AND CHENG-JU SUN

*Department of Industrial Engineering
Chung Yuan Christian University
200, Chung Pei Rd., Chung Li, Taiwan 32023, R.O.C.*

CHUN-MI LU

*HannStar Display Corporation
No.35, Nanke 2nd Road, Tainan Science Park,
Sin-shih Township, Tainan County 741, Taiwan, R.O.C*

ABSTRACT

The manufacturing of integrated circuit (IC) includes four major phases: wafer fabrication, wafer probe, IC packaging, and final test. In this study, an infinite capacity planning system is proposed for wafer probe plants. Four modules are developed: the WIP-Pulling Module, Lot Release Module, Workload Accumulation Module, and the Workload Balance Module. The WIP-Pulling Module is used to calculate lot start time and finish time to meet master production schedule (MPS), using WIP information such as the current operation station and batch size. When the WIP quantity is insufficient, the Lot Release Module is called. After calculating the lot start time and finish time, the Workload Accumulation Module is employed to accumulate the everyday workload of machine and jig. If the workload of machine and jig are unbalanced, the Workload Balance Module is exploited to balance these manufacturing resources. A prototype capacity planning software is developed using Microsoft Visual Basic and industrial data are used to test the performance of the capacity planning system. Based on the design of experiments, simulation results show that the capacity planning system is effective and efficient to balance the workload of manufacturing resources including machine and jig.

Key words: *IC Manufacturing, Wafer Probe, Capacity Planning, Infinite Capacity.*

