

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

探討半導體微影製程中步進機之不同製程不良率下最佳檢測法則與機台派工法則的研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-002-056-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：謝淑華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 8 日

摘要

半導體微影製程在關鍵層級的加工，必須格外注重機台曝光的重複性及穩定性。藉由晶圓試作並檢測的程序，可以有效提高機台的重複性及穩定性。Akcalt 等人[2001]曾針對微影製程提出三種檢測法則的實驗研究，實驗結果顯示在某一生產條件下以同時進行檢測與加工的法則的績效表現為最佳。文中並未進一步指出當不同生產條件時最佳檢測法則是否有所變化。因此，本研究將進一步觀察最佳檢測法則是否隨生產條件不同而改變。其次，經由實驗設計，規劃一連串的模擬實驗，建構階段性生產績效模式。本著所建立的模式，在生產條件改變時，可快速評估決定最佳的檢測法則。

關鍵詞：微影製程、關鍵層級、晶圓試作、檢測法則

Abstract

In semiconductor manufacturing, photolithography (PL) is a critical process because of meeting tolerance on critical dimensions and alignment with the previous layers. In order to check conformance to process specifications, test runs are made regularly. Akcalt et al. [2001] proposed three test run policies for experimental study. The study revealed that the parallel testing policy performed the best under a production condition they specified. It is a question whether the test run policy they suggested might not be the optimal one under another production condition. The main purpose of this study is, firstly, to investigate that the optimal test run policy may change under different production conditions. Secondly, by experiment design method, a series of experiments are performed by simulations. And a threshold performance model can thus be established. It is expected to determine the optimal test run policy in no time based on the threshold model for any different production conditions.

Keyword: photolithography, critical layer, test run, test run policy

一、前言

一般而言，生產一件半導體產品，通常需要數十層級光罩，其中部分層級的圖案線寬尺寸要求特別精細，可稱為關鍵層，需格外的注重機台穩定性。藉由晶圓試作並檢測的程序，可以有效的提高製程的良率。檢測未通過的晶圓，可經由光阻去除及重加工處理，降低報廢率。晶圓試作檢測的程序相當費時(約十到二十分鐘)，當試作晶圓檢測時是否應持續加工後續來到的晶圓，以確保製程的流暢，而晶圓重加工的時間往往會造成晶圓批的等待，Zargar[1]對此提出四種策略。而這四種重加工策略分別為：1.母批等待子批重加工完成並合併成原晶圓批，當子批重加工時，須設為緊急批量優先加工。2.母批不等待子批重加工，繼續前往後續製程加工，而子批則成為一批獨立批量加入製程，以一般加工批量加入等候線等待加工。3.母批不等待子批重加工，而子批則必須累積至一批的數量後，才合併成獨立批量加入製程。4.母批不等待子批重加工，當子批重加工完成後，則加入下批到達微影製程的同層級母批。

陳氏[2]則對於黃光區重加工策略的研究，提出第五種方法，即母批不等待子批而在後續機台與子批會合，合併成原來批量，子批須設為緊急批量。徐氏 [3]則針對機台加工特性，考慮加工條件及優先值條件，提出黃光區機台派工演算法(Photolithography Area Dispatching Rule, PADR)，配合固定在製品投料法(Fixed-Wip, FW)，及均勻投料法(Uniform Loading, UL)探討 PADR 各因子對系統績效之影響。

Akcalit 等人[4]以生產週期時間作為績效評量，利用模擬實驗與變異數分析，提出並探討三種不同的檢測法則，分別為等待檢測結果再進入加工的檢測法則 P1，等待檢測結果但不等待未通過檢測晶圓重加工的檢測法則 P2，以及同時進行檢測與加工的檢測法則 P3。雖然實驗結果顯示 P3 為最佳檢測法則，他們的研究只是針對某特定的作業環境，並不適應所有案例。

本研究的主要目的為探討在不同生產條件下最佳生產績效的檢測法則是否將隨著生產條件而改變，而根據作業環境下的重要因子的變化，建立微影製程因子的相互作用的生產績效階段性數學模型，使得在不同生產條件下，可以快速評估出何者為最佳檢測法則。本研究將利用模擬的方式進行，建構以 eM-Plant 軟體之半導體製程模擬模型，作為本研究模擬平台，執行模擬實驗。

二、模擬實驗系統

在此研究中，Akcalit 的生產 DRAM 案例將被沿用。

晶圓製造系統具有複雜及回流的特性，為了建構正確的實驗平台，在本研究中以晶圓製造流程的角度分析，依序建立物件庫、物件關聯階層表，並依此組合成實驗所需的模擬模型。晶圓製程大致包括了加工、運輸、檢測等三大動作，針對微影製程做主要探討對象，根據系統分析物件的屬性，可分為兩大類；實體物件 - 包含機台、晶圓批、檢驗機台等，另一類物件屬性則為非實體物件 - 包括了搬運系統、機台派工、檢測法則、資料統計、資料分析等。系統流程圖。共 36 道製程，9 層級光罩的流程，當完成 36 道製程，晶圓批即離開。以晶圓模擬製造系統來說，各種不同的製程加工，差異在於各製程機台的加工時間、批量型加工機台的容量以及加工晶圓工序層級的不同，比較不同的是微影製程，該製程機

台的特點有不同層級晶圓所需光罩的選擇與更換時間的異，因此必須經由機台派工法則加以分派至各機台加工，此外，由於光罩需配合精密的對準系統，因此必須由更換光罩或該批為檢測批量，決定晶圓是否必須接受檢測。

各物件之階層關係，依特性可分為三層。Inter-bay 的部分為系統層，該層主要以各不同屬性的機台群或製程分類。Intra-bay 的部分則屬各機台群屬，個別物件則包括了晶圓批、晶圓。此外非實體物件，如機台派工、派工法則、檢測法則、資料統計等則分別規劃至各物件階層並執行。

在個別物件晶圓批及晶圓中，則是依機台加工性質不同而有所改變，在本系統中，大部分製程的加工視為單一晶圓批加工，部分如微影製程中，為表現出檢測機制，必須以晶圓批卸載為 25 片晶圓進入加工視之。

檢測法則的程序邏輯如下：

```
if 檢測頻率 or 該批光罩層級/ = 機台光罩層級 then
```

```
    檢測法則 = true ;
```

```
    for i = 1 to 該批晶圓量 n loop
```

```
        物件 wafer create ;
```

```
    next ;
```

```
if 檢測法則 = 1 then
```

```
    wafer 進入機台加工並檢測；
```

```
    waituntil 檢測結果=true prio 1；
```

```
    for i = 1 to ( n-檢測片數 ) loop
```

```
        wafer 進入加工；
```

```
    next;
```

```
if 檢測結果=false then
```

```
    第 ( 1 + 檢測片數 ) wafer 進入機台加工並檢測；
```

```
    waituntil 檢測結果=true prio 1；
```

```
    for i = 1 to ( n-檢測片數 ) loop
```

```
        wafer 進入加工；
```

```
    next;
```

```
    for i = 1 to ( 檢測片數 ) loop
```

```
        wafer 返回重加工並回流製程
```

```
    next;
```

```
end ;
```

```
waituntil 加工完成片數 = n prio 1;
```

```
晶圓批離開製程；
```

```
end ;
```

```
if 檢測法則 = 2 then
```

```
    第一片 wafer 進入機台加工並檢測；
```

```

waituntil 檢測結果=true ;
for i = 1 to ( n-檢測片數 ) loop
    wafer 進入加工 ;
next;
if 檢測結果=false then
    第 ( 1 + 檢測片數 ) wafer 進入機台加工並檢測 ;
    waituntil 檢測結果=true ;
    for i = 1 to ( n-檢測片數 ) loop
        wafer 進入加工 ;
    next ;
    for i = 1 to ( 檢測片數 ) loop
        wafer 依加工層級分流暫存等待集成一晶圓批 ;
        該新晶圓批返回重加工並回流製程 ;
    next ;
end ;
waituntil 加工完成片數 = ( n-檢測片數 ) prio 1;
晶圓批離開製程 ;
end ;

if 檢測法則 = 3 then
    第一片 wafer 進入機台加工並檢測 ;
    for i = 1 to ( n-檢測片數 ) loop
        wafer 進入加工 ;
    next;
    if 檢測結果=false then
        該批晶圓重加工 = true ;
        該批晶圓離開製程重加工並回流 ;
    elseif 檢測結果=true then
        該批晶圓重加工 = false ;
        該批晶圓離開製程 ;
    end ;
end ;
end ;

```

本研究中上線機台數量以暫存區數量最多的機台當作瓶頸機台，增加瓶頸機台數量，再次執行模擬，尋找下一個瓶頸機台，增加瓶頸機台數量，直到系統達到平穩狀態，即完成上線機台數量的估算。

本研究中建立的模型將做以下的假設：

- 1.系統中人力資源充足，不影響生產績效。
- 2.不考慮物料搬運時間，以批（lot）為搬運單位，單一晶舟最多承載 25 片晶圓。
- 3.除微影製程機台外，其餘製程機台均採用先進先出派工法則，且各工作站前僅有一暫存區。
- 4.微影製程步進機台平均當機時間、平均修復時間均為已知且可調整，其餘製程將不考慮當機時間以及修復時間。
- 5.批量型加工機台，需到達滿載才進行加工。
- 6.投料策略為固定時間投料法。
- 7.各步進機台均有一獨立的檢測機台，且不考慮檢測機台當機時間、修復時間，檢測時間為已知且可調整。
- 8.黃光區機台僅考慮步進機台、光罩及檢測機台對系統的影響，其餘如硬烤、顯影、塗佈等製程不列入探討。
- 9.步進機台配有各層級光罩，僅考慮光罩更換時間。
- 10.晶圓重加工率為已知。
- 11.各製程暫存區容量皆為無限。
- 12.模擬範圍自投料至產出，不包括光罩設計、製作等前段製程以及晶圓切割、封裝等後段製程。

在進行各項討論之前首先必須對所建構的模擬模型予以驗證。各項設定將以進行 910 天的模擬（扣除穩態時間前 180 天不計），重複進行五次取平均。表一為 eM-Plant 模擬模型與 Akcalt 等人[2001]的文獻中模擬的結果比較，其中生產週期時間為包括系統設定檢測時間 10 分鐘/片與 20 分鐘/片、製程不良率 0.5%與 2.0%的平均值。

比較表一模擬實驗的結果，可以發現 P1 法則配合 DED 機台派工比起文獻中的生產週期時間差異為最大，由於在 Akcalt 等人 [2001]文獻中對於 P1 法則並未提到處理重加工批量在光阻去除製程的過程，因此本模型的建構將重加工批量為緊急批量，不經過等待加工區而直接進入機台加工，以減少原批量等候時間，因此可以預期將造成生產週期時間的減少。此外比較 P2、P3 法則各項數據樣本的差異，可能為隨機亂數取得不同所造成的誤差。本模擬模型與文獻中的模擬數據雖不盡相同，但比較檢測法則與機台派工的效果，其結論卻是有一致性的，足以驗證本研究所建構模擬平台的正確性。

三、不同生產條件下尋求最佳檢測法則實驗分析

本節將利用實驗設計的方法，規劃在不同投料率配合製程不良率的實驗，建構不同的生產條件，以探討不同生產條件下最佳檢測法則是否有所變化。實驗將規劃以三個檢測法則（P1、P2、P3）配合彈性派工（FLX）在不同的製程不良率下，執行在兩種投料率（36 分鐘/批、72 分鐘/批）的環境下，觀察系統績效。在實驗中將採用三個製程因子，各有兩個水準（見表二）。實驗結果將以生產週期時間為主要的績效指標。

實驗結果比較三種檢測法則在 3 個製程因子水準下取 8 種生產績效表現平均值，觀測績效表現與製程不良率的關係變化。圖一為以製程不良率為橫座標，平均生產績效為縱座

標，觀察最佳檢測法則變化的現象。當製程不良率超過 3.5 % 時採用 P3 法則生產週期時間明顯上升，而到達 4.0% 之後 P1 法則績效更優於 P3，P2 法則則由於晶圓批分批的原因，不受製程不良率提高的影響。因此可發現生產週期時間的最佳檢測法則由初期的 P3 法則轉變為 P2 法則。惟 P2 法則在製程不良率提高時，晶圓分批的情況將增加，造成追蹤管理困難，及批量加工機台產能的浪費。因此在製程不良率提高究竟是否採用 P2 法則還得配合良好生產追蹤管理，否則 P1 法則可能更適合。此實驗驗證了不同生產條件時最佳檢測法則有所變化。

四、架構階段性生產績效模式

根據實驗結果，當製程不良率為 3.5 % 時，針對三種檢測法則，生產績效有大的改變，因此建議將生產條件以製程不良率與投料率區分為 4 階段，架構階段性生產績效模式。首先將以檢測法則 P1、P2、和 P3 分別在 72 分/批與 36 分/批投料率下，二階段製程不良率，其中第一階段製程不良率將定義低水準 (-) 0.5 % 及高水準 (+) 3.5 %，第二階段製程不良率將定義低水準 (-) 3.5 % 及高水準 (+) 5.0 %，和檢測時間、當機模式、檢測取樣批量四種控制因子，進行模擬實驗(見表三)，並利用 Design Expert 軟體進行 2⁴ 因子設計變異數分析(部分結果見表四)，並求得各檢測法則下系統績效之模式。實驗結果如表五所示，於是針對三種檢測法則的階段性生產績效模式因此構建完成。

五、階段性檢測法則模式的驗證與最佳檢測法則的評估

為了確保檢測法則模式的正確，舉二案例與模擬比較驗證。案例一投料率為 72 分鐘/批，案例二投料率為 36 分鐘/批，其餘條件為檢測時間(A)為 15 分鐘/片、製程不良率(B)為 1.5 %、當機模式(C)為 LS、檢測批量(D)為每 6 批。表六為模式計算的結果與 eM-Plant 模擬結果。

此外在不同生產條件下，利用檢測法則的生產績效模式得以快速評估最佳檢測法則，並依生產環境選擇最適宜的檢測法則，以二案例說明。假設此二案例檢測時間為 15 分鐘/片、製程不良率分別為 0.5 % 及 1.5 %、當機模式為 LS、檢測批量為每 6 批為例，則案例一適宜的檢測法則為 P3，案例二則為 P2(見表七說明)。

不同投料率與製程不良率對不同微影製程的檢測法則表現出不同的績效，由各模擬實驗的結果及分析，可以得到以下結論。當投料率為 72 分鐘/批的環境，在製程不良率 0.5 % 至 3.5 % 階段，P3 法則維持最佳的生產績效，但在製程不良率超過 3.5 % 階段，由變異數分析可發現，製程不良率的因子效應對 P3 法則為最大，此時將是以 P2 法則為最佳，但為了避免晶圓批管理的問題，建議採用以 P1 法則。當投料率為 36 分鐘/批的環境，為維持系統穩定，雖然機台數必須增加，且在製品數量也增加，然而對 P1 耗時的檢測過程，反而有利，尤其當製程不良率對各檢測法則的效應逐漸增加時，P1 法則則有利於系統的績效。若在機台穩定的情況下，亦可於初期採用 P3 法則，製程不良率超過 3.5 % 時，或者在機台不穩定的情況下，應重新評估是否改採用 P1 法則，以得到最佳的績效。

六、 結論

本研究首先探討並驗證在不同製程不良率與投料率下最佳檢視法則將會隨著生產條件而改變，非自始自終維持同一法則。其次，企圖利用模擬的方式，根據模擬實驗結果，本研究建立了不同檢測法則的階段性生產績效模式。最後，並根據所建立的階段性模式在生產條件改變時，可以快速評估各個檢測法則所產生的生產績效，及快速決定該生產條件下的最佳檢測法則，本研究並以案例說明。

本研究模型的建構主要為探討固定檢測法則下的績效探討，未來對此可建立一動態的檢測模型，隨生產條件更改檢測法則，以得到最佳的績效表現。此外本著此三種檢測法則的制訂，若兼顧檢測及加工的進行，可建議發展出較機動性的檢測法則，為一可行的研究方向。

七、參考文獻

1. Zargar, A., Effect Of Rework Strategies On Cycle Time, 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Vol. 29, No.1-4, pp. 239-243, 1995.
2. 陳冠任, “晶圓製造廠黃光區再加工策略之探討”, 國立交通大學工業工程研究所碩士論文, 新竹, 1998.
3. 徐光宏, 晶圓製造廠黃光區派工法則之探討, 國立交通大學工業工程研究所碩士論文, 新竹, 1996.
4. Akcalt, E., K. Nemoto, and R. Uzsoy, Cycle-TimeImprovementsforPhotolithography Process in Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol.14, No.1, Feb. pp.48-56, 2001.

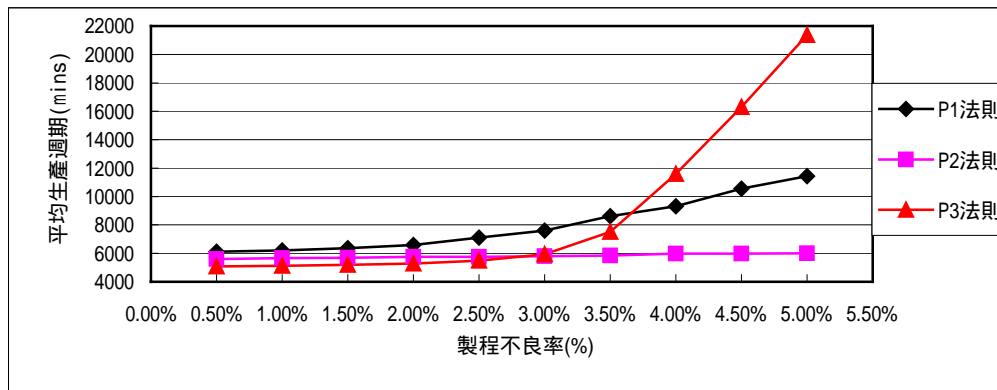
表一、 模型驗證(DED 為 DEDICATED, FLX 為 FLEXIBLE)

當機模式	檢測取樣	系統設定	生產週期 (分)	
			Akcalt	eM-Palnt
Short. Frequent Breakdown s (SF)	每 4 批	DED-P1	8178	7367
		DED-P2	6179	6680
		DED-P3	5485	5444
		FLX-P1	6783	6313
		FLX-P2	5745	5668
		FLX-P3	5297	5178
	每 8 批	DED-P1	7601	7180
		DED-P2	6234	6496
		DED-P3	5561	5420
		FLX-P1	6514	6272
		FLX-P2	5746	5591
		FLX-P3	5279	5166
Long Seldom Breakdown s (LS)	每 4 批	DED-P1	8437	7584
		DED-P2	6252	6789
		DED-P3	5540	5566
		FLX-P1	6824	6479
		FLX-P2	5759	5783
		FLX-P3	5321	5218
	每 8 批	DED-P1	7505	7312

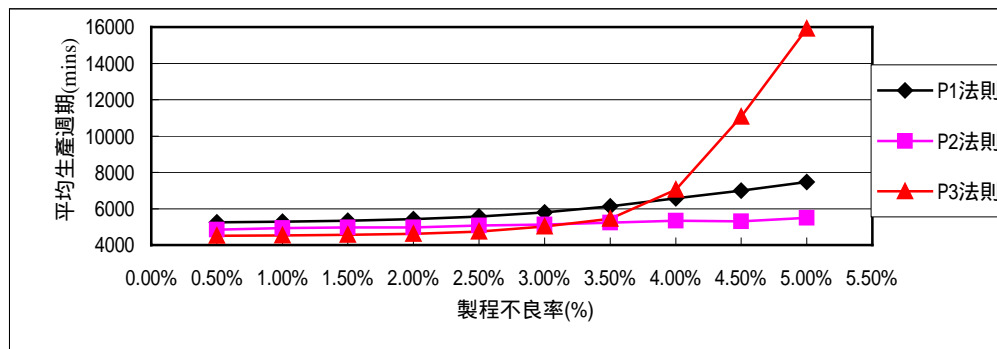
	DED-P2	6180	6662
	DED-P3	5493	5527
	FLX-P1	6453	6375
	FLX-P2	5751	5678
	FLX-P3	5326	5207

表二、製程因子水準

控制因子	範圍	因子水準
檢測時間	10 分鐘/片	-
	20 分鐘/片	+
當機模式	LS	-
	SF	+
檢測取樣	每 4 批	-
	每 8 批	+



(a) 投料率 72 分鐘/批



(b) 投料率 36 分鐘/批

圖一、不同檢測法則平均生產週期時間與製程不良率的關係變化比較

表三、架構階段性生產績效模式實驗設計

控制因子	第一階段		第二階段	
	範圍	水準	範圍	水準
A：檢測時間	10 分鐘/片	-	10 分鐘/片	-
	20 分鐘/片	+	20 分鐘/片	+
B：製程不良率	0.5%	-	3.5%	-
	3.5%	+	5.0%	+
C：當機模式	LS	-	LS	-
	SF	+	SF	+
D：檢測批量	每 4 批	-	每 4 批	-
	每 8 批	+	每 8 批	+

表四 實驗部分結果變異數分析表

(a) P1 法則-製程不良率 0.5%及 3.5%

投料率 72 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
檢測時間	763439.0625	1	763439.0	11.28	0.0057
製程不良	24857703.06	1	24857703	367.41	< 0.0001
(A)*(B)	2758090.563	1	2758090.	40.77	< 0.0001
誤差	811881.75	12	67656.81		
總和	29191114.44	15			
投料率 36 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
檢測時間	1722.25	1	1722.25	0.87	0.3740
製程不良	3083536	1	3083536	1550.45	< 0.0001
檢測批量	100806.25	1	100806.2	50.69	< 0.0001
(A)*(B)	211140.25	1	211140.2	106.16	< 0.0001
(B)*(D)	62250.25	1	62250.25	31.30	0.0002
誤差	19888	10	1988.8		
總和	3479343	15			

(b) P2 法則-製程不良率 0.5%及 3.5%

投料率 72 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
檢測時間	670761	1	670761	56.96	< 0.0001
製程不良率	227529	1	227529	19.32	0.0007
誤差	153089	13	11776.07692		
總和	1051379	15			
投料率 36 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
檢測時間	204078.0625	1	204078.0625	30.99	< 0.0001
製程不良率	559878.0625	1	559878.0625	85.03	< 0.0001
誤差	85595.3125	13	6584.254808		
總和	849551.4375	15			

(c) P3 法則-製程不良率 0.5%及 3.5%

投料率 72 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
製程不良	23391732.25	1	23391732	331.60	< 0.0001
檢測批量	1065024	1	1065024	15.10	0.0022
(B)*(D)	997002.25	1	997002.25	14.13	0.0027
誤差	846510.5	12	70542.54		
總和	26300269	15			
投料率 36 分鐘/批					
變異來源	平方和	自由度	均方和	F 值	Prob > F
製程不良	3535340.063	1	3535340.063	3679.85	< 0.0001
檢測批量	59414.0625	1	59414.0625	61.84	< 0.0001
(B)*(D)	54639.0625	1	54639.0625	56.87	< 0.0001
誤差	11528.75	12	960.7291667		
總和	3660921.938	15			

表五、採用 P1、P2 和 P3 檢測法則的階段性生產週期模式

投料率	製程不良率範圍	法則	生產績效模式
72 分/批	0.5 % 3.5 %	P1	$CT=+4701.83+67.02A+1661.33B-55.35AB$
		P2	$CT=+4946.50+40.95A+79.50B$
		P3	$CT=+4465.08+1305.33B+37.41D-83.20BD$
	3.5 % 5.0 %	P1	$CT=-588.65+-130.06A+339817B+767.25D+25437.5BD$
		P2	For SF case $CT=+4509.15+78.11A+11508.33B+18.13D-3.21AD$
			For LS case $CT=+4605.65+63.04A+11508.33B+18.13D-3.21AD$
P3	$CT= -23007.40+923642B-301.53D$		
36 分/批	0.5 % 3.5 %	P1	$CT=+4659.66+28.55A+647.16B+1.89D-15.31AB-20.79BD$
		P2	$CT=+4453.08+22.58A+124.70B$
		P3	$CT=+4294.87+430.25B+8.48D-19.47BD$
	3.5 % 5.0 %	P1	$CT=-452.96+185.24A+210792B+106.60-6008.33AB-5070.83BD$
		P2	$CT= +4581.46 +18483.33B$
		P3	$CT= -28426.92+9.77933B+1570.29D-46570.83BD$

表六、由模式與系統模擬案例所得生產週期值的比較

投料率	系統	分析值	模擬值
72 分鐘/ 批	P1	6952	6621
	P2	5680	5709
	P3	5898	5723
36 分鐘/ 批	P1	5538	5612
	P2	4978	5056
	P3	4815	4750

表七、利用生產績效模式快速評估最佳檢測法則(檢測時間為 15 分鐘/片、當機模式為 LS、檢測批量為每 6 批)

案例	系統設定	CT/分鐘
製程不良率為 0.5 % , 投料率為 72 分/ 批	P1	6122
	P2	5600
	P3	5092
	最佳檢測法則	P3
製程不良率為 1.5 % , 投料率為 72 分/ 批	P1	6952
	P2	5680
	P3	5898
	最佳檢測法則	P2