

國立交通大學

工學院半導體材料與製程產業研發碩士專班

碩士論文

以卡曼濾波器及最小變異控制器實現微影製程控制

Process Control for Photolithography Using Kalman Filter
and Minimum Variance Controller

研究生：張仲豪

指導教授：李安謙 教授

中華民國九十六年九月

以卡曼濾波器及最小變異控制器實現微影製程控制

Process Control for Photolithography Using Kalman Filter and
Minimum Variance Controller

研 究 生：張仲豪

Student : Chung-Hao Chang

指 導 教 授：李安謙

Advisor : An-Chen Lee

國立交通大學
工學院半導體材料與製程產業研發碩士專班
碩 士 論 文



Submitted to College of Engineering Industrial Technology R & D Master Program
on Semiconductor Materials & Processes
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in

Mechanical Engineering

September 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年九月

以卡曼濾波器及最小變異控制器實現微影製程控制

學生：張仲豪

指導教授：李安謙 博士

國立交通大學工學院半導體材料與製程產業研發碩士專班



本論文主要目的為設計一套應用於微影製程之覆蓋誤差(Overlay, OL)的先進製程控制方法。經由歷史資料的分析找出曝光機覆蓋誤差之輸入變數與輸出變數之間的關係，建立批次控制之預測模型，然後利用卡曼濾波器(Kalman Filter)，做模型截距的動態調變，以適應製程隨時間變化之變異及干擾，再將已調變完成之模型代入最小變異控制器(Minimum Variance Controller, MVC)，使機台的輸入變數可以在改變量最小的限制下，即製程的變動最小的情形下，讓輸出變數快速地到達所設定的目標值，以提升製程之良率。

Process Control for Photolithography Using Kalman Filter and Minimum Variance Controller

Student : Chung-Hao CHANG

Advisor : Dr. An-Chen LEE

College of Engineering
Industrial Technology R & D Master Program
on Semiconductor Materials & Processes
National Chiao Tung University



This thesis presents a new run-to-run (R2R) controller for photolithography process. The controller, termed Kalman minimum variance controller, can act both as a dynamical model optimizer and as a controller for given models. In this thesis, the relationships and run-to-run control model among input recipes and output overlay variables are formed by analyzing the historical data. Then on-line (Recursive) model identification and recipes generation are performed by using Kalman filter and minimum variance controller, respectively. Improvements due to advanced control have been quantified in simulations and actual FAB operations.

目 錄

摘 要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目 錄.....	iii
圖 目 錄.....	v
表 目 錄.....	ix
符號說明.....	x
誌謝.....	xii
第一章 緒論.....	1
1.1. 研究動機與目的.....	1
1.2. 文獻回顧.....	4
1.3. 研究方法.....	6
1.4. 本文組織架構.....	7
第二章 微影製程、機台與覆蓋誤差介紹.....	9
2.1. 微影製程介紹.....	9
2.2. 微影機台介紹.....	15
2.3. 微影覆蓋誤差介紹.....	21
第三章 歷史資料分析與建模.....	28
3.1. 歷史資料分析.....	28
3.2. 建模.....	33
第四章 Run-to-Run 控制器.....	37
4.1. EWMA控制器.....	37
4.2. Double EWMA控制器.....	40
4.3. Pheromone Propagation控制器.....	42

4.4 卡曼濾波器.....	45
4.5 最小變異控制器.....	48
4.6 卡曼最小變異控制器完整架構.....	50
4.7 新卡曼最小變異控制器完整架構.....	53
第五章 模擬.....	56
第六章 實驗驗證.....	74
第七章 結論與未來建議.....	87
參考文獻.....	89



圖目錄

圖 1-1	APC 系統控制流程圖.....	2
圖 1-2	Feedback Model.....	5
圖 1-3	結合 Kalman Filter 與最小變異控制器之控制架構圖.....	6
圖 2-1	晶圓製造流程.....	10
圖 2-2	黃光區微影製程步驟.....	10
圖 2-3	以 HMDS 改變晶圓表面極性.....	11
圖 2-4	正負光阻的特性與光罩的關係.....	12
圖 2-5	駐波效應造成之孔洞邊緣不平整.....	14
圖 2-6	軌徑機內製程分佈及順序.....	15
圖 2-7	TEL(Tokyo Electronic Limited)公司所生產的軌徑機型號 ACT-12.....	16
圖 2-8	照相機構造.....	17
圖 2-9	曝光機台與照相機的比較.....	18
圖 2-10	曝光機示意圖.....	19
圖 2-11	曝光機所提供的解析度須含蓋圖中光阻的 a、b 兩點.....	20
圖 2-12	覆蓋誤差測量記號.....	23
圖 2-13	覆蓋誤差形式.....	23
圖 2-14	覆蓋誤差影響.....	24
圖 2-15	Interfield 與 Intrafield 之座標及誤差係數.....	25
圖 3-1	MA(3)控制架構.....	29
圖 3-2	A3 參數輸入及輸出值對批次分布圖.....	30
圖 3-3	A1 參數輸入及輸出值對批次分布圖.....	30
圖 3-4	X7 參數輸入及輸出值對批次分布圖.....	30
圖 3-5	Tool 5_Product A_Layer C_A1 輸入輸出及 Baseline.....	31

圖 3-6	Tool5_Product A_Layer C_X8 輸入輸出調變.....	32
圖 3-7	半導體廠中某曝光機台所有產品 A1 參數之 Baseline.....	33
圖 3-8	半導體廠中某曝光機台單一產品 A1 參數之 Baseline.....	34
圖 3-9	半導體廠中某曝光機台所有產品前 200 批次 A1 參數之 Baseline.....	34
圖 3-10	半導體廠中某曝光機台 4 種產品 A1 參數之 Baseline.....	36
圖 4-1	製程輸入值及輸出值關係圖.....	38
圖 4-2	EWMA 控制器完整控制架構.....	39
圖 4-3	Double EWMA 控制器完整控制架構.....	41
圖 4-4	費洛蒙傳遞控制法概念.....	42
圖 4-5	Pheromone Propagation Controller 完整控制架構.....	44
圖 4-6	Kalman Filter 運算流程圖.....	47
圖 4-7	卡曼最小變異控制器之完整控制架構圖.....	50
圖 4-8	卡曼最小變異控制器之使用流程圖.....	52
圖 4-9	新卡曼最小變異控制器之完整控制架構圖.....	53
圖 4-10	新卡曼最小變異控制器之使用流程圖.....	54
圖 5-1	模擬流程圖.....	56
圖 5-2	Tool 5、Product A、Layer C 各個參數模擬結果 C_{pk} 值.....	57
圖 5-3	Tool 5_Product A_Layer C_A1 模擬輸出值暫態響應圖.....	59
圖 5-4	Tool 5_Product A_Layer C_A1 模擬輸出值暫態響應圖(第 30-40 批次).....	59
圖 5-5	Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖.....	60
圖 5-6	Tool 5_Product A_Layer C_B5 模擬輸入輸出值暫態響應圖.....	60
圖 5-7	Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖(70-82 批次).....	61
圖 5-8	Tool 5_Product A_Layer C_B5 模擬輸入輸出值暫態響應圖(95-120 批次).....	62
圖 5-9	Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖.....	62
圖 5-10	Tool 5_Product A_Layer C_X7 模擬輸入輸出值暫態響應圖.....	63
圖 5-11	Tool 5_Product A_Layer C_X7 模擬輸入輸出值暫態響應圖(50-60 批次).....	63

圖 5-12	Tool 5_Product A_Layer C_A1 卡曼增益變化.....	64
圖 5-13	Tool 5_Product A_Layer C_A2 卡曼增益變化.....	65
圖 5-14	Tool 5_Product A_Layer C_A3 卡曼增益變化.....	65
圖 5-15	Tool 5_Product A_Layer C_A4 卡曼增益變化.....	65
圖 5-16	Tool 5_Product A_Layer C_A5 卡曼增益變化.....	66
圖 5-17	Tool 5_Product A_Layer C_B5 卡曼增益變化.....	66
圖 5-18	Tool 5_Product A_Layer C_X7 卡曼增益變化.....	66
圖 5-19	Tool 5_Product A_Layer C_Y7 卡曼增益變化.....	67
圖 5-20	Tool 5_Product A_Layer C_X8 卡曼增益變化.....	67
圖 5-21	Tool 5_Product A_Layer C_Y8 卡曼增益變化.....	67
圖 5-22	Tool 5_Product A_Layer C_A1 盒鬚圖.....	68
圖 5-23	Tool 5_Product A_Layer C_A2 盒鬚圖.....	69
圖 5-24	Tool 5_Product A_Layer C_A3 盒鬚圖.....	69
圖 5-25	Tool 5_Product A_Layer C_A4 盒鬚圖.....	70
圖 5-26	Tool 5_Product A_Layer C_A5 盒鬚圖.....	70
圖 5-27	Tool 5_Product A_Layer C_B5 盒鬚圖.....	71
圖 5-28	Tool 5_Product A_Layer C_X7 盒鬚圖.....	71
圖 5-29	Tool 5_Product A_Layer C_Y7 盒鬚圖.....	72
圖 5-30	Tool 5_Product A_Layer C_X8 盒鬚圖.....	72
圖 5-31	Tool 5_Product A_Layer C_Y8 盒鬚圖.....	73
圖 6-1	Tool 6_Product E_Layer M實驗：歷史資料 vs. KMVC實驗結果之 C_{pk}	75
圖 6-2	Tool 6_Product E_Layer M_A1, A2 輸出值 Trend Chart.....	76
圖 6-3	Tool 6_Product E_Layer M_A1, A2 輸出值盒鬚圖.....	76
圖 6-4	Tool 6_Product E_Layer M_A3, A4 輸出值 Trend Chart.....	78
圖 6-5	Tool 6_Product E_Layer M_A3, A4 輸出值盒鬚圖.....	78
圖 6-6	Tool 6_Product E_Layer M_A5, B5 輸出值 Trend Chart.....	79

圖 6-7	Tool 6_Product E_Layer M_A5, B5 輸出值盒鬚圖	79
圖 6-8	Tool 6_Product E_Layer M_X7, Y7 輸出值 Trend Chart.....	80
圖 6-9	Tool 6_Product E_Layer M_X7, Y7 輸出值盒鬚圖	80
圖 6-10	Tool 6_Product E_Layer M_X8, Y8 輸出值 Trend Chart.....	81
圖 6-11	Tool 6_Product E_Layer M_X8, Y8 輸出值盒鬚圖	81
圖 6-12	Tool 6_Product E_Layer M_A1 卡曼增益變化.....	82
圖 6-13	Tool 6_Product E_Layer M_A2 卡曼增益變化.....	82
圖 6-14	Tool 6_Product E_Layer M_A3 卡曼增益變化.....	83
圖 6-15	Tool 6_Product E_Layer M_A4 卡曼增益變化.....	83
圖 6-16	Tool 6_Product E_Layer M_A5 卡曼增益變化.....	84
圖 6-17	Tool 6_Product E_Layer M_B5 卡曼增益變化.....	84
圖 6-18	Tool 6_Product E_Layer M_X7 卡曼增益變化.....	85
圖 6-19	Tool 6_Product E_Layer M_Y7 卡曼增益變化.....	85
圖 6-20	Tool 6_Product E_Layer M_X8 卡曼增益變化.....	86
圖 6-21	Tool 6_Product E_Layer M_Y8 卡曼增益變化.....	86

表 目 錄

表 2-1	曝光機台參數與相機參數的比較.....	18
表 2-2	覆蓋誤差原因.....	22
表 3-1	Tool_Product A_Layer C 各項參數增益值.....	35
表 5-1	估測器相關設定.....	57



符號說明

A1	: 晶圓平台 X 方向之偏移係數
A2	: 晶圓平台 Y 方向之偏移係數
A3	: 晶圓 X 方向之擴張係數
A4	: 晶圓 Y 方向之擴張係數
A5	: 晶圓 X 方向之旋轉係數
B5	: 晶圓 Y 方向之旋轉係數
X7	: 曝光影像場 x 方向之擴張係數
Y7	: 曝光影像場 y 方向之擴張係數
X8	: 曝光影像場 x 方向之旋轉係數
Y8	: 曝光影像場 y 方向之旋轉係數
B	: 後移運算子
k	: 第 k 批次
u	: 製程機台的參數輸入值
y	: 量測機台的參數量測值
b	: 定義 u - y 所得到的值稱為 Baseline
C	: $y=Cu+p$ 線性模型中之斜率項
p	: $y=Cu+p$ 線性模型中之截距項
x	: 狀態空間模型中之系統狀態向量
y	: 狀態空間模型中之系統輸出向量
A	: 狀態空間模型中之狀態轉移矩陣
B	: 狀態空間模型中之控制輸入矩陣
C	: 狀態空間模型中之觀測矩陣
w	: 狀態空間模型中之系統干擾向量

\mathbf{v}	: 狀態空間模型中之量測干擾向量
Q_w	: \mathbf{w} 之共變異數
R_v	: \mathbf{v} 之共變異數
\tilde{L}	: 卡曼增益
Σ	: 狀態變異矩陣
$\hat{\mathbf{y}}_{k+1 k}$: 為預測之輸出值
\mathbf{T}	: 為輸出的目標值
\mathbf{W}	: 為相對於 $\hat{\mathbf{y}}_{k+1 k}$ 之權重
$\mathbf{\Gamma}$: 為相對於 \mathbf{u}_k 之權重
γ	: 真實製程線性模型之斜率項
ρ	: 真實製程線性模型之截距項
ε	: 線性模型之白噪音
Φ_0	: 初始偏差
w	: EWMA 之折扣因子
d	: 截距漂移量
w_1 、 w_2	: DEWMA 之折扣因子
F	: 費洛蒙擴散係數
M	: 費洛蒙框大小
USL	: Upper Specification Limit
LSL	: Lower Specification Limit
\mathbf{D}	: 利用歷史資料所得模擬製程偏差矩陣
C_{pk}	: 製程能力指標

誌謝

能夠順利完成這篇論文並取得碩士學位，首先要感謝我的指導教授，李安謙博士。謝謝老師兩年半來的指導，總是不辭辛勞地與同學們開會、討論問題，時常都忙到三更半夜才回家，想對老師說聲：「老師，您辛苦了！」，希望老師在致力研究之餘，能多多照顧自己的身體健康。老師常提到『做人、做事、做學問』，強調最重要的是先學會做人做事，才去追求做學問，這些話至今都深深地烙印在我的心中。

感謝諸位口試委員的建議與指導，得以讓本論文更臻完整。感謝陳俊宏博士、黃淵勇學長、李德修學長、潘怡仁學長、吳建峰學長、郭子瑋學長及黎仁滄學長，謝謝你們在這兩年半提供的幫助，無論是學業上還是生活上，對我都有莫大的助益。同時也感謝已畢業的黃柏壽學長、詹昆樺學長、洪志明學長以及徐嘉星、雷仕全、柯璟銘、林峰龍、吳仲明以及倪席琳等同學們，不論是認識兩年甚至是六年，與你們共渡這段研究所的時光是我一生的回憶。

感謝與我共同奮鬥的同學們，双偉、文凱、明宗、昶佑、大維及忠聖，謝謝你們的幫助，在研究的路上能互相扶持成長。感謝學弟鼎凱、正廉、文煜及宣宏，謝謝你們的協助與鼓勵。感謝力晶半導體黎湘鄂廠長、郭宗銘經理、林柏青課長、王宣權及薛朝澤等同仁的幫忙，幫助我解決許多製程方面的疑問，以及提供豐富的資源使本論文的實驗能得以順利進行。

最後感謝我的家人，祖父、父親、母親和妹妹，謝謝你們這兩年半來對我的支持及打氣，讓我得以在生活上無後顧之憂，使得我能在新竹專心求學。感謝許多未提及的朋友們，參與我人生最榮耀的時刻。

祝福所有的師長、學長、同學、學弟、家人及朋友，希望大家未來能身體健康，一切順利，再次感謝你們。

第一章 緒論

1.1. 研究動機與目的

半導體製造是一項需要高度知識的產業，而台灣在半導體產業所投入的人力物力甚鉅。在半導體製程中，有幾百個製程步驟的情況下，穩定的製程就顯得格外重要。任一製程控制過程的不穩定，可能影響接下來的多個製程，造成非常可觀的損失。而良率的提升，不但可以減少檢測成本，及重工、修復等不必要成本，更重要的是品質的提升，增加了產品形象及競爭優勢。所以，當半導體的市場愈形激烈時，如何改善製程的品質，以提高晶圓的良率，已成為晶圓廠最重要的課題之一，而製程控制技術即提昇品質的關鍵因素之一。而在所有製程之中，微影製程佔了舉足輕重的地位，因為IC的關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)能越做越小，全仰賴於微影技術的日新月異。所謂的微影技術，即是將光罩上已定義好的圖案(Pattern)，精準的轉移到晶圓的表面，一般元件的製作，至少需要十次以上的微影才可完成，目前微影部門的經費往往佔整個元件製作成本的約三分之一，而且這個比例有逐年增加的趨勢。微影的疊對是非常重要的，若上一層與下一層曝光成像圖案層間有定位誤差時，就會產生覆蓋誤差(Overlay Error)，將會導致元件短路或斷路，甚至影響到整個生產的良率。所以，在每一層曝光前須做好記號的對準，目前記號對準的方式，乃是利用一些標記”+“以及”□“[1]，來定位出晶圓座標與曝光場的相對位置，而其覆蓋誤差則透過機台的量測，以得到量測點在X 軸及Y 軸方向的誤差值，進而求出疊對誤差的各項參數。

過去統計製程管制(Statistical Process Control, SPC)是國內外發展製程控制最常用的一項技術，在半導體製程錯誤偵測上的應用相當普遍。但因為在任何產業製程中，總會存在一些不可避免的變異，例如機台的振動、溫度濕度的變化等，因此單變量(Uni-Variate)SPC 基於統計的方法，以管制圖(Control Chart)的管制上

限(Upper Control Limit, UCL)和管制下限(Lower Control Limit, LCL)來分析製程。然而，單變量 SPC 基本上只允許檢測一個常態分佈的變數(Variable)，但大部分半導體製程設備的運轉狀況通常具有非平穩性(Non-stationary)、自關聯性(Auto-correlated)及交互關聯性(Cross-correlated)的特質。例如，微影製程中，曝光前烘烤的時間及溫度、曝光光源的強度、焦距以及顯影的時間和溫度等皆有高度相互關聯的關係，而非個別獨立的製程參數，若同時考慮這些相互關聯的變數，落在管制界限內的機率不等於個別使用管制圖時的結果，因此單變量 SPC 分析法可能會發生誤導的作用，甚至會有許多錯誤無法偵測，因此引入先進製程控制(Advanced Process Control, APC)來改善過去的 SPC 的一些缺失。APC 包含即時機台狀態監控、即時製程工程資料分析進行錯誤診斷與分類、Feedback/Feedforward Run-to-Run Control 及預知保養(PM-Predictive Maintenance)提醒等功能，APC 概念及流程如圖 1-1 所示。透過 APC 可以協助設備相關工程人員降低非工作預定的設備停機次數，適時偵測排除發生問題的機台，減少不良品或廢片的發生機率並進而線上調整製程配方確保產品品質不因機台特性漂移影響，對於產出良率和品質的提升有很大的幫助。

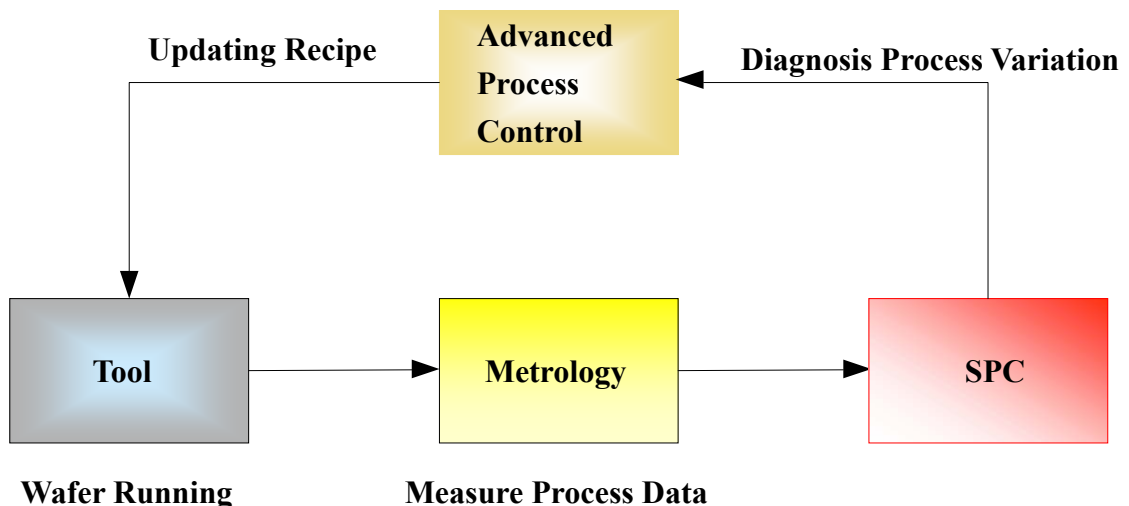


圖 1-1 APC 系統控制流程圖

因此本文主要目的是參考微影製程疊對誤差的模型並設計一套適用於微影製程之覆蓋誤差(Overlay ; OL)的先進製程控制方法(Advanced Process Control , APC),及時調整製程參數藉以改善並增進微影製程之穩定性,更可進一步提供下一世代之微影製程的控制基礎。



1.2. 文獻回顧

微影技術在半導體廠是非常重要的環，再加上近年來由於先進半導體製程控制技術(Advanced Process Control, APC)的提倡，使得國內外對製程控制的研究掀起一股研究熱潮，尤其是微影技術。Pattern Overlay(OL)和 Critical Dimension(CD)[2]在微影中影響非常大，當曝光成像的圖案層與前一次曝光成像圖案層有定位誤差時，就會產生疊對誤差。在1978年 Perioff [3]以 Vander Pauw 電阻結構分析疊對誤差之模式，提出採用六個參數模式來評估 X 軸及 Y 軸平移(Translation)、放大(Expansion)、旋轉(Rotation)的誤差；1999年 Zone-Ching Lin 和 Wen-Jan Wu[4]分別探討疊對誤差與獨立參數之間的關係，從中瞭解到疊對誤差的幾何特徵。

2001年 Christopher Gould [5]提出一個完整的微影製程的批次控制的理論(Run by Run Control)架構，包含 FB(Feedback)、FF(Feed-forward)與 FB/FF Combination 三種控制模組，其中 FB(Feedback)控制模組之架構如下圖 1-2 所示，分別由四個區塊所組成；Wafer 進入微影製程，經 Process 完成後，由量測機台(Measurement tool)量取後測結果，再將後測結果傳入 Controller 中，計算實際結果與目標值之差異，並得到最佳輸入參數，最後將所得到的參數 Feedback 至下一批次之 Process Recipe 中，此即為 FB(Feedback)控制模組。2002年 Christopher Gould [6]再提出一個結合 Fault Detection Classification (FDC) 及 Run-to-Run (R2R) 先進微影製程管制方法。2003年，Scott[7]提出一套以 Model Predictive Control 為理論基礎進而對微影覆蓋誤差進行控制。2004年，Bode *et al.* [8]將 Linear Model Predictive Control 的理論架構，實現於 AMD Fab25 及 Fab 30 的微影覆蓋誤差製程控制，證實了其可行性。2005年，Park *et al.* [9]從歷史資料分析，將原來的覆蓋誤差拆成 Overlay Bias 項以及 Dynamic 項，按照不同產品計算出不同的 Overlay Bias，並結合類神經網路計算所得的 Dynamic 項，來估測並控制微影覆蓋誤差。

關於製程控制演算法的理論與研究。1990年，An-Chen Lee [10]提出一個以

時間序列為主的非線性系統模式(Non-linear system model)、k-step ahead predictor 及最小變異控制演算法(Minimum-variance control algorithm)，用以處理輸出入之間的非線性時間序列關係

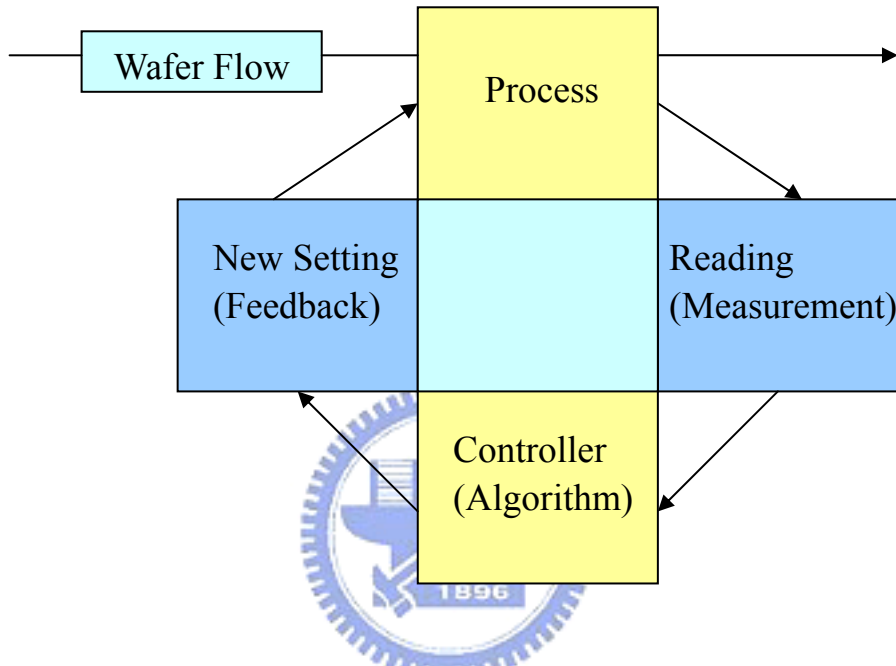


圖 1-2 Feedback Model

1.3. 研究方法

本文所提出之研究方法為結合歷史資料分析、卡曼濾波器(Kalman Filter)與最小變異控制器 Minimum Variance Controller, MVC)三者,來對曝光機之 Overlay 輸入變數(機台參數)與輸出變數(量測結果)間之關係做分析,及建立模型,並利用更新模型達成批次控制,以濾除製程所受到的干擾,維持製程的穩定。如圖 1-3 所示,即為本論文之批次控制架構圖。最後經由模擬與微影製程的實例驗證,更進一步的來證明此控制方法的控制能力及其效益。

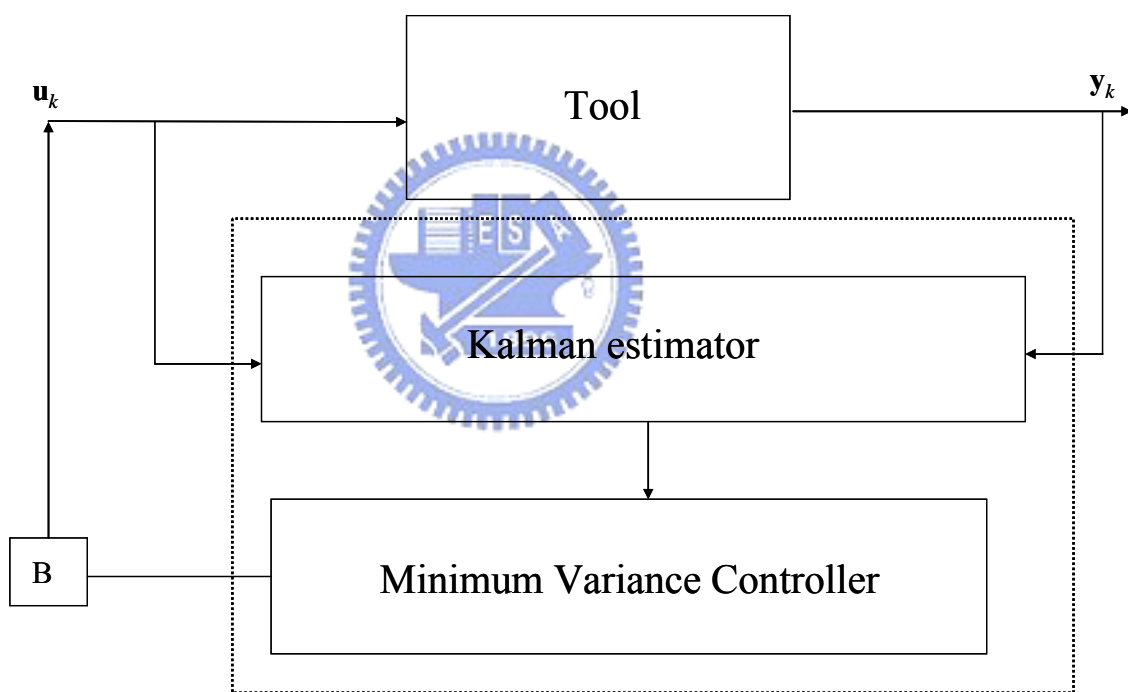


圖 1-3 結合 Kalman Filter 與最小變異控制器之控制架構圖

1.4. 本文組織架構

在本文中各章節的內容及架構如下：

第 1 章 緒論

敘述本文之研究動機與目的、相關文獻之探討與回顧、及研究方法與本文組織架構。

第二章 微影製程、機台及覆蓋誤差之介紹

本章介紹半導體製程中的微影製程、機台及覆蓋誤差。

第三章 歷史資料分析與建模

分析歷史資料並建構出適合的製程模型。

第四章 Run-to-Run 控制器

本章主要在介紹各式 Run-to-Run 控制器：EWMA 控制器、Double EWMA 控制器及費洛蒙控制器之基本概念及架構；接著介紹卡曼濾波器(Kalman Filter)與最小變異控制器(Minimum Variance Controller)的基本概念，進而設計出結合兩者優點卡曼最小變異控制架構以用於微影製程 Overlay。

第五章 模擬

本章主要參考半導體廠內的歷史資料，針對微影製程 Overlay 所產生的干擾進行模擬，以檢驗控制架構的可行性。

第六章 實驗驗證

本章主要透過實際半導體廠微影機台的控制，驗證控制架構的可行

性，並將其控制結果與廠內歷史資料做一比較。

第七章 結論與未來建議



第二章 微影製程、機台與覆蓋誤差介紹

2.1. 微影製程介紹

IC 的設計，會隨著產品規格的不同，而所設計的邏輯電路也會有不同的需求。因此在設計 IC 規格前，必須先依其功能，設計出 IC 電路圖，並製作光罩。目前一般 MOS 元件製作，至少需要三十幾道的製程方可完成。一般半導體的製程可區分為前製程作業、晶圓片長成、前段製程及後段製程。前製程作業包括 IC 的設計與光罩的製作。光罩的作用有如印刷的網版一樣，經過光線的曝光，將光罩上的圖案轉移到晶片上，接著再利用蝕刻的方式，將晶圓上曝光的部分去除，而得到所需的電路。晶圓片乃是由二氧化矽經由電弧爐提煉，還原成冶煉級的矽，再經由鹽酸氯化，產生三氧化矽，蒸餾純化後，經過慢速分解過程，形成棒狀或粒狀多晶矽。之後，將其放入石英鉗鍋裡，置於長晶爐並以高溫溶解，然後慢慢往上拉出(Necking)頸部有 3mm 的寬度後，再拉出晶冠就是晶體的本身，可拉到直徑 8 吋或 12 吋，然後再拉出本體，便製成所謂的晶體柱，最後經過研磨、拋光、切片而成為晶圓片。前段製程是將清洗好的晶圓，送到爐管，在含氧的環境下，加以熱氧化，進而在晶圓表面長成所需的薄膜，一般多為二氧化矽。之後在晶圓表塗上光阻液，以做為在未來曝光時，保護無須曝光部分，接下來就是做光罩校準的動作，將光罩與晶圓對準，進行曝光，再以顯影劑進行顯影，之後以化學蝕刻或物理蝕刻的方式，去除不需要的部分，並將晶圓清洗，最後便在晶圓上留下所需的電路。然而，目前現在的電路設計都非常大，因此要在晶片上印上電路，一層的面積並不足以包含所有的電路，須一層一層的轉印到晶片上，這種方式類似蓋大樓建築，因此需要反覆氧化、曝光、微影、蝕刻等步驟。後段製程是將晶片封裝及測試。測試的目的是將依照設計的電路特性，真實的表現出來，而封裝的目的，除了保護易脆的晶片外，更提供機械強度與適當的保護，避免積體電路受到污染。上述晶圓製造的流程如圖 2-1 所示：

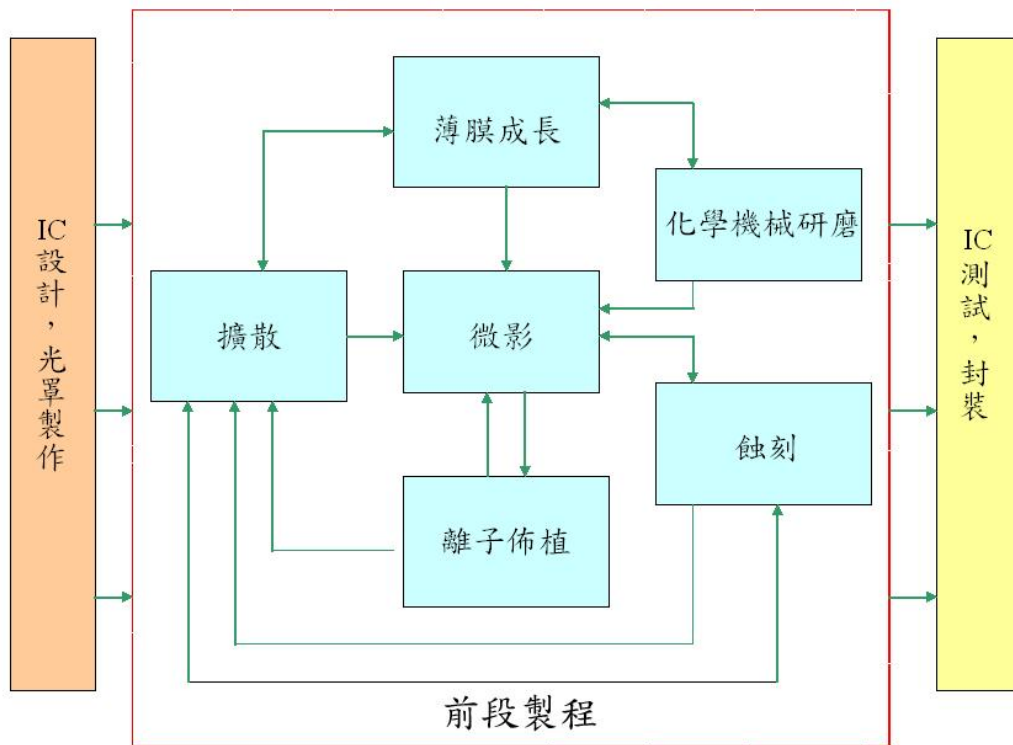


圖2-1 晶圓製造流程

而微影製程步驟如圖 2-2 所示：

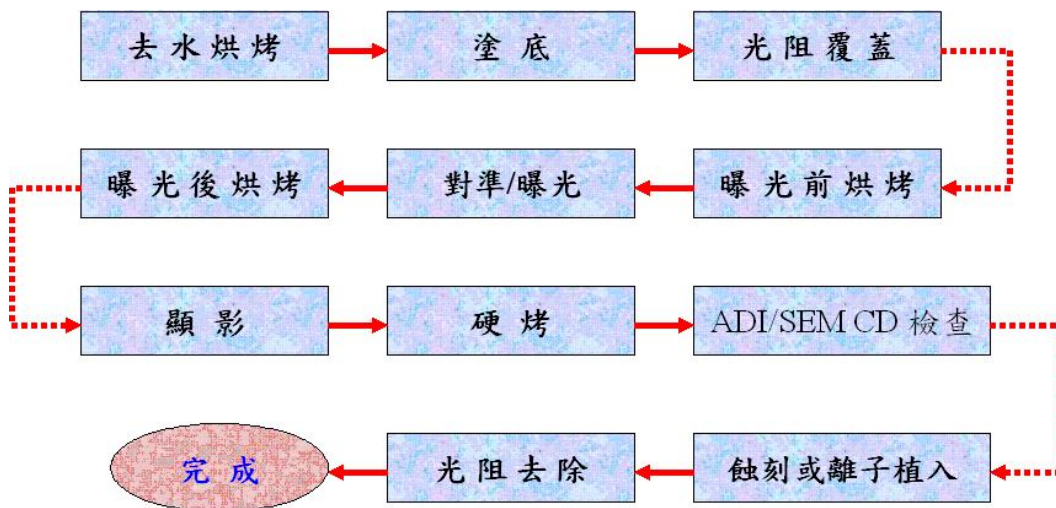


圖2-2 黃光區微影製程步驟

步驟1、表面清洗

在進入微影製程前，需要將表面清以去除晶片表面氧化物、雜質、油質及水分子。

步驟2、去水烘烤

去水烘烤要的目的是主要在晶片表面上做處理以提昇光阻與晶片表面間的附著力，約需加熱至150°C~250°C，由於晶圓表面是氧化矽容易吸附水份，有機光阻則是斥水性，做光阻和晶圓表面不易附著，所以必須去水烘烤的步驟。去水烘烤的處理步驟是在高溫烤盤下烘烤，將晶圓表面的水氣去除，接著進行下一步驟即是塗底，塗上一層HMDS(Hexamethyldisilazane)材料，做為晶圓與光阻的界面活性劑。

步驟3、塗底

塗底主要的目的是要提昇光阻與晶片表面間的附著力。晶片表面經過去水烘烤的步驟去除水氣後，加上一層底材以改善光阻與晶片的附著力。通常使用的底材為六甲基乙矽氮烷HMDS(Hexamethyldisilazane)，HMDS有如界面活性劑，使得晶片與晶圓附著力增加。HMDS有兩個作用：

- (1) 脫水：HMDS與水發生反應產生氨氣，去除因與晶圓表面形成化學鍵而無法烘除的水份。
- (2) 增強晶圓與光阻間附著力：HMDS的矽原子與晶片表面產生化學鍵，而使有機物的官能基裸露在外，可增進晶圓與光阻間的界面活性劑。HMDS與晶圓表面反應的機制如圖2-3所示：

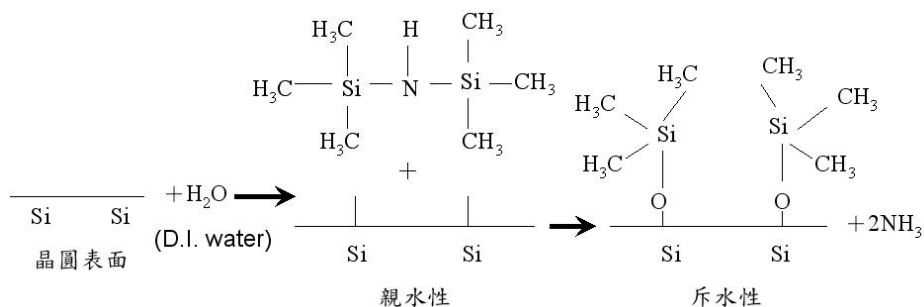


圖2-3 以HMDS改變晶圓表面極性

步驟4、光阻塗佈(Resist coating)

光阻通常是以液態的形式存在，一般主要是由樹脂，感光劑及溶劑等三種不同成分所組成，其中樹脂的功能是做為黏合劑，感光劑則是一種光活性極強的化合物，兩者一起溶於溶劑內，光阻可依其顯影(Developer)後之圖形與光罩上圖形呈相同或明暗互補之差別，而分為「正光阻」(Positive Resist)與「負光阻」(Negative Resist)兩種，如圖2-4所示。光阻的塗佈(Spin Coating)是利用真空吸附原理，先將晶圓置於塗佈機的托盤上，此時光阻液便滴在晶圓上，藉著離心力的作用，讓光阻往外圍移動，均勻地佈滿整片晶圓，而且多餘的光阻也會因為旋轉的關係被甩出，透過旋轉的轉速平方根與光阻的厚度成反比關係，來控制光阻的厚度。由於光阻的厚度直接影響到線寬，所以光阻塗佈需要嚴格控制其厚度及均勻度影響光阻塗佈的品質因素:馬達的轉速、光阻的溫度、溼度及抽風量，同時要防止高速旋轉的光阻回濺到晶圓上。光阻的優劣:優質的光阻與製程的良率有非常密切的關係，優質的光阻應該還具備良好的感光度、附著性、抗蝕刻性(Etch Resistance)及解析度(Resolution)。

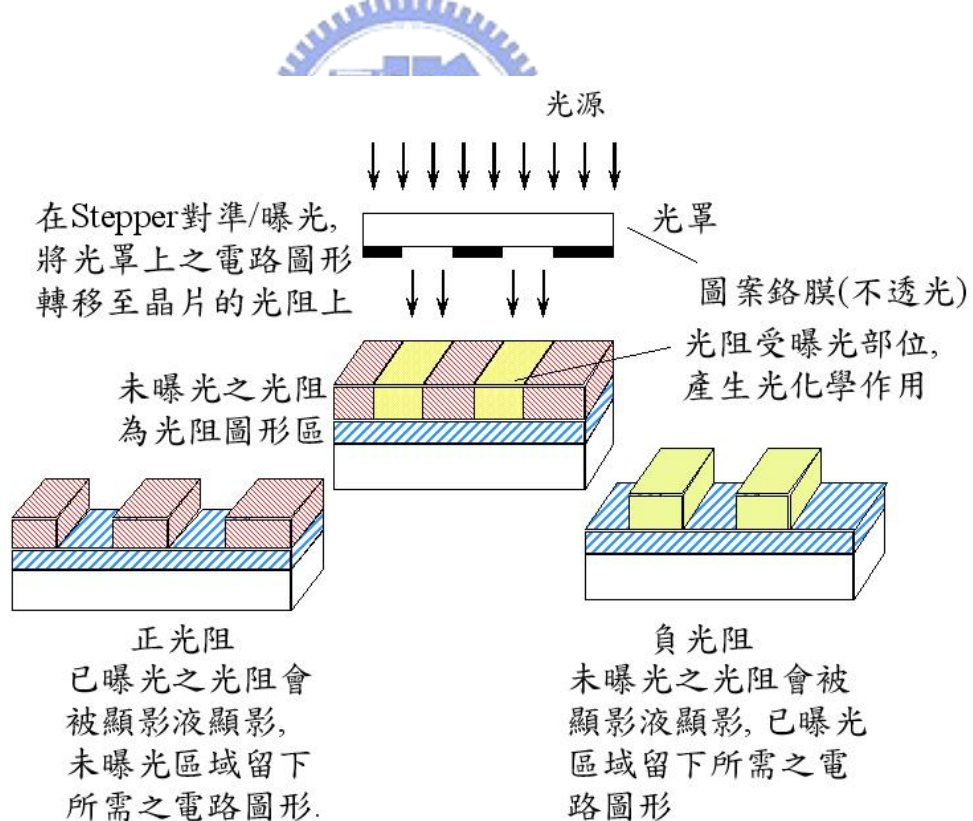


圖2-4 正負光阻的特性與光罩的關係

步驟5、曝光前烘烤(Pre-Exposure bake)

曝光前的烘烤，又稱為軟烤(Soft Bake)，主要目的是移去光阻覆蓋後，光阻內殘留的溶劑，使其硬化成型，以提昇光阻顯影速率比、防上光阻層龜裂及增加光阻劑對晶圓的附著力，所以軟烤此步驟對光阻的附著力、溶解速率、線寬控制及光阻圖形的定義具有舉足輕重的地位。

軟烤的主要參數是溫度及時間。軟烤會影響到光阻的厚度與活性，同時會影響光阻層的固化及光阻經曝光及顯影後的結果。

步驟6、對準與曝光(Alignment and Exposure)

對準：在執行曝光之前，必須將光罩上的線路圖一層層的對準，以作正確的圖形移轉，否則將導致晶圓報廢。

曝光即是圖案之轉移，將光罩上定義好的圖案，完全轉移至光阻上。故黃光微影成像的基本原理有如沖洗照片，必需在暗房內進行，微影成像亦必須在黃光下進行，光罩有如底片，而晶圓則是相紙，光線經過光罩，透鏡而成像在晶圓上，晶圓塗有感光的光阻，光阻與光線作用後，即可將光罩的圖形移轉到晶圓上。微影成像的必備條件:要有光源、光罩、光阻、光阻塗佈顯影設備及對準曝光光學系統。曝光主要控制的條件是曝光光源強度、曝光的時間、光阻的厚度、軟烤的程度、顯影的條件以及光阻線寬容許誤差。

步驟7、曝光後烘烤(Post Exposure Bake , PEB)

以90°C到130°C的溫度烘烤晶圓，此時容易有駐波效應的產生，駐波效應是指光阻局部有輕微的曝光過度或曝光不足的現象，其產生的原因是在曝光時，光波在不同厚度的光阻會有不同的干涉效應產生，在入射光與反射光之處產生建設性干涉與破壞性干涉之故。駐波效應使得光阻曝光強度不均勻，使得光阻線寬經顯影之後變成鋸齒狀，不利後續製程。在顯影之前進行曝光後烘烤，乃是利用烘烤晶圓所產生的熱能，中和曝光過度與曝光不足的光阻，使曝光過的光阻重新排列，可以消除駐波效應。此一方法主要應用於I-line光阻。曝光後烘烤其主要控制的參數和軟烤相同，主要在溫度與時間。駐波效應造成的孔洞如圖2-5所示：

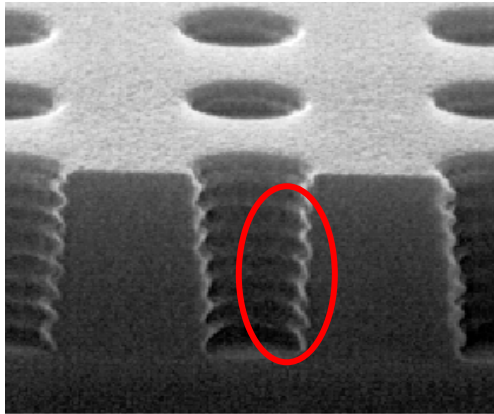


圖 2-5 駐波效應造成之孔洞邊緣不平整

PEB溫度及時間均會影響到光酸在光阻內的擴散速度及距離，因此其必須與曝光前烘烤溫度互相搭配，並考慮製程需求才可取得最佳之烘烤溫度。

步驟8、顯影(Develop)

經過曝光、及曝光後烘烤的光阻，即可進行顯影，顯影的目的主要除去不必要的光阻，並將光阻經由照射後定義出的圖顯現在矽晶片上，主要的顯影法是濕顯影法。負光阻顯影液：已曝光的部份因分子聚合而留下圖形，未曝光的部份以溶劑洗去。正光阻顯影液：與負光阻相反，未曝光的部份留下圖形，已曝光的部份以溶劑洗去。

步驟9、硬烤(Hard Bake)

在光阻顯影成像後，最後仍會經過一道烘烤，其目的在除去剩餘之溶劑及水氣，使光阻內未溶解之感光化合物和樹脂間之結合更緊密，以增加光阻對熱之穩定性及底層物質之附著力，在將來之蝕刻或離子植入製程中，能確實發揮保護圖形之功能。

2.2. 微影機台介紹

2.2.1 軌徑機

現今半導體廠中的微影製程設備，分為兩部機台，連接在一起。微影製程大部分的程序都是由連接在前端的機台完成的，包括了去水烘烤、氣相塗底、旋轉塗佈、各種軟硬烤以維持晶圓上的光阻在一定的濃度和溫度以及最後的顯影過程，此機台由於是將 COT、DEV、Hot/Cool plate 及傳輸系統整合在一個密閉的機構內，並嚴格控制溼度及濾除空氣中的不純物，避免晶圓在製作的過程中，遭到污染而造成品質上的缺陷，其晶圓傳送的軌跡像是以一條彎曲的軌徑，因而稱為軌徑機(Track)，圖 2-6 為軌徑機內部製程程序的分佈及順序；而圖 2-7 為 TEL 公司的產品軌徑機之外觀。

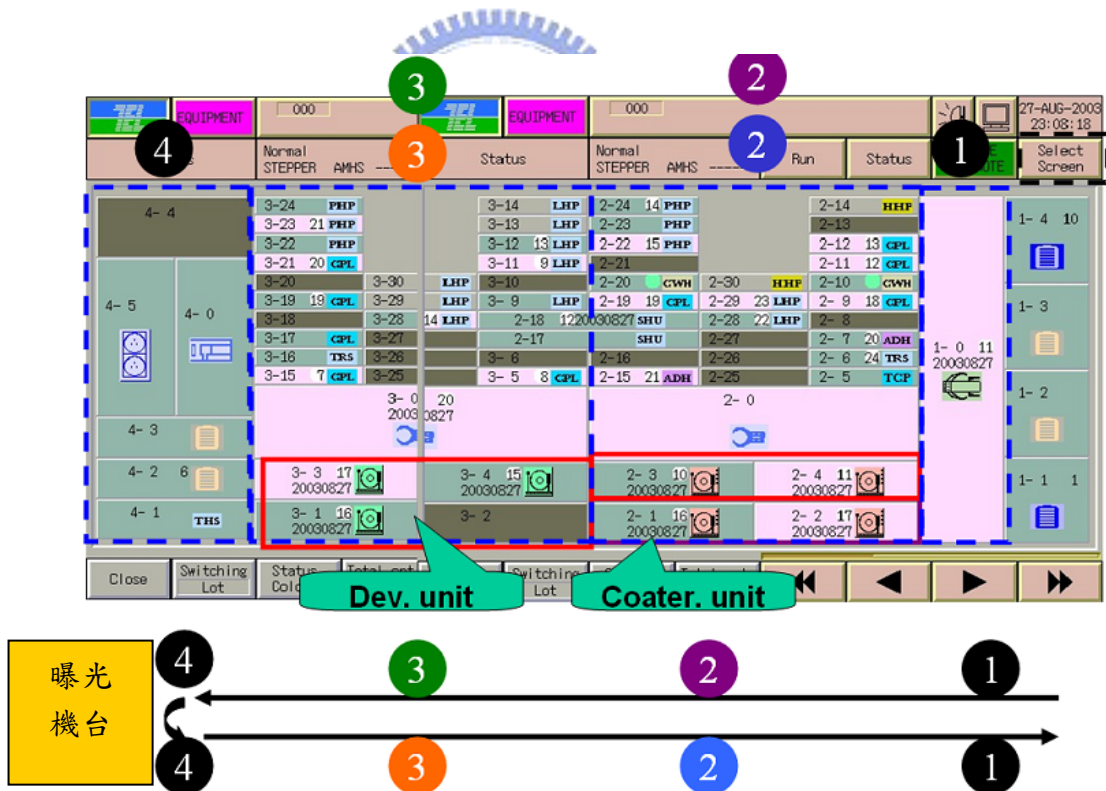


圖 2-6 軌徑機內製程分佈及順序

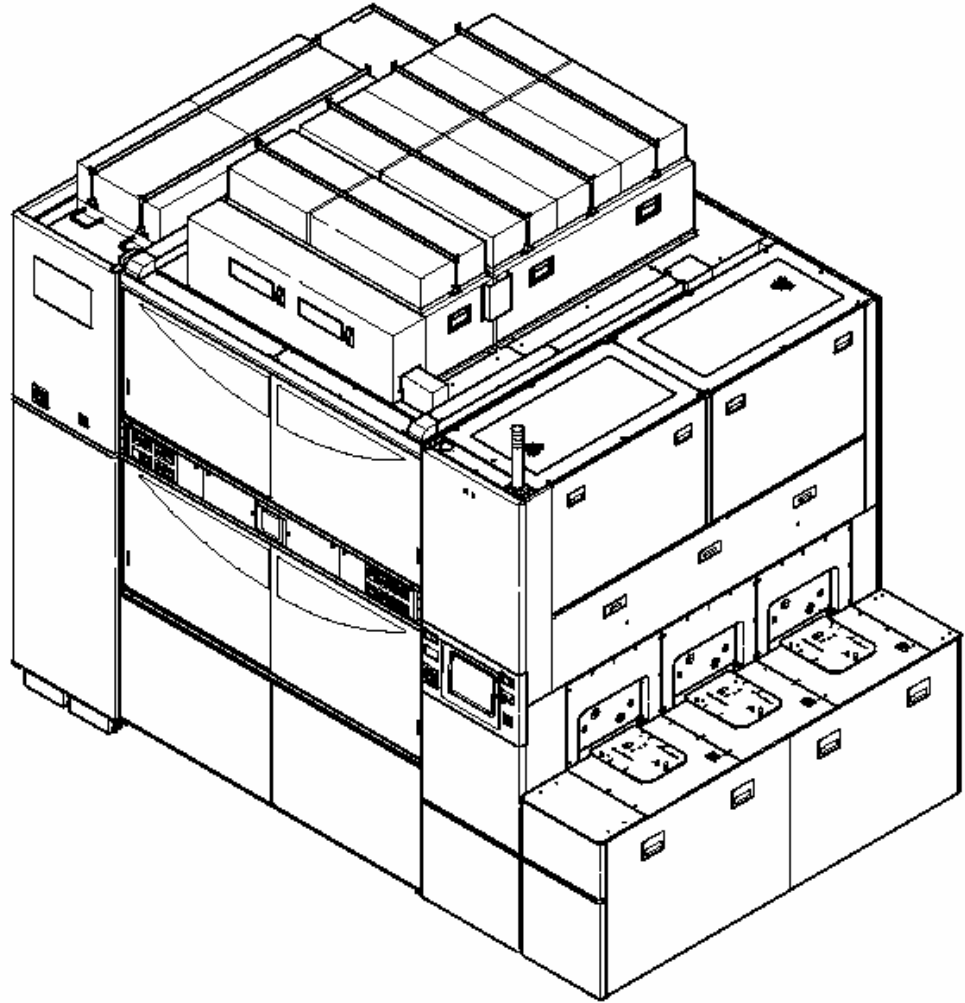


圖 2-7 TEL(Tokyo Electronic Limited)公司所生產的軌徑機型號 ACT-12

2.2.2 曝光機

在介紹後端機台曝光機前，先介紹照相機的功能，因為曝光機功能類似照相機，能將積體電路的圖案精準的定義在晶圓上。

一般相機由相機(圖 2-8)本身加上鏡頭組合而成，裝上感光的底片後，攝影師對準目標取景，調整焦距，設定光圈，再按下快門，即完成照相曝光的動作，當然現代的相機幾乎都可在按一下快門時，全自動完成一連串的對焦距及調整光圈及快門時間的動作，等完成所有的照相工作後，攝影師回到暗房將底片取出(因為怕底片曝光)，開始以顯影劑及定影劑顯影底片，完成顯影後的底片，再經過沖印，就成了照片。

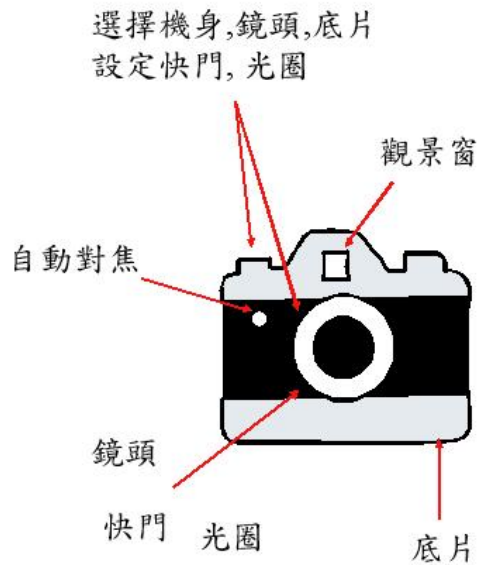


圖 2-8 照相機構造

曝光的技術很複雜，但基本的原理很簡單，與照相的原理很類似：首先先在晶片上塗上一層光阻(感光材料，作用如同底片)來自光源的平行光，經過光罩後，便投射在光阻上。因為光罩上有圖案(由鉻膜形成的不透光區域)，而沒有鉻膜的地方，光線就會穿透玻璃到達晶片上的光阻，這就是曝光(Exposure)，曝光後被光照到光阻會產生化學變化，再來就是顯影，藉由顯影的過程，將不要的光阻去除，只留下所需的圖形。光阻可分二種：一種為正光阻、一種為負光阻，正光阻在曝光後被光照射的部份可以被顯影液給去除，而其他的光阻將不會被顯影液給去除。而負光阻則相反,是被光照射的部份不會被顯影液給去除，而其餘不被光所照射的區域將會被顯影液所移除。簡單說正光阻為分解反應，負光阻為聚合反應，而圖 2-9 與表 2-1 為曝光機台與照相機構造的比較。

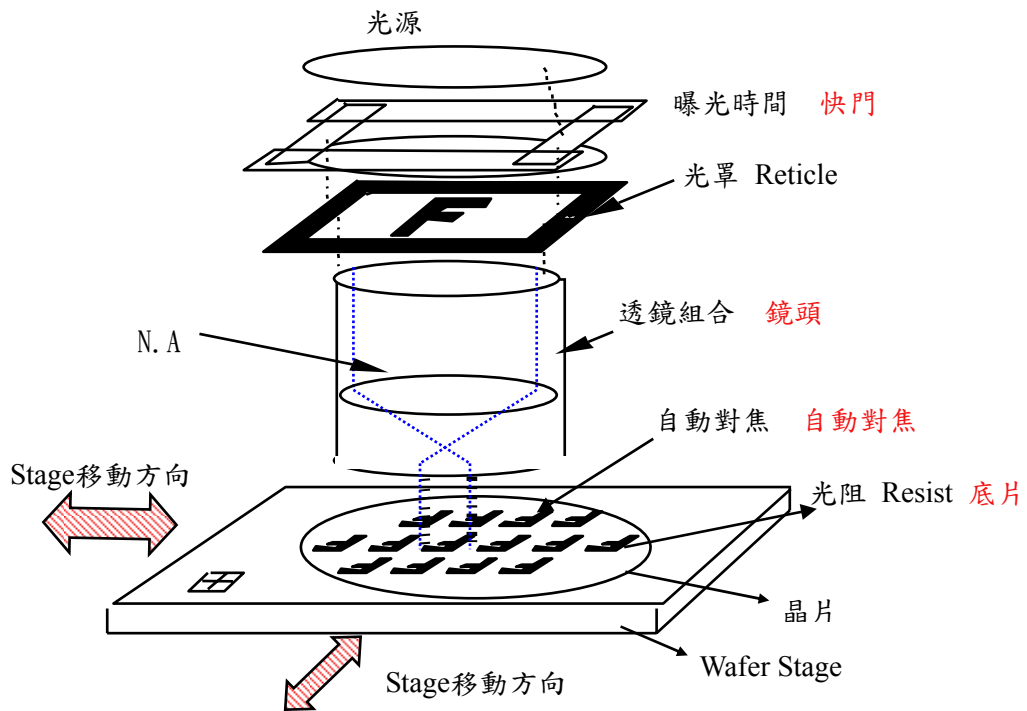


圖 2-9 曝光機台與照相機的比較

表 2-1 曝光機台參數與相機參數的比較

攝影	微影工程
Photo	Photolithography
鏡頭	透鏡(Lens)
底片	光阻(Photo Resist)
焦距	焦距(Focus)
快門	曝光量(exposure time)
光圈	數值孔徑(NA)
攝影	曝光(exposure)
顯影	顯影(Develop)
風景	光罩(Reticle)
瞄準景物	對準(Alignment)
檢查	Overlay
	ADI
	CD-SEM
重工	Rework
景深	DOF(Depth Of Focus)
解析度	Resolution

曝光機台是由光源(Light Source)、光學照度系統(Illumination System)、對準系統(Alignment System)、光罩承接平台(Reticle Stage)及晶圓承接平台(Wafer Stage) 等五個部份所組合而成。首先，透過對準系統將晶圓定位好，當光源經過光罩後，再利用光學照度系統投影至晶圓的曝光場上，因為經過投影系統的倍縮(現今多數機台設計為四倍)才照射在晶圓上，因此無法進行一次整片的曝光(Exposure)，必須一步一步的位移曝光，以完成整片晶圓之曝光步驟，所以整個曝光流程是經過對準、曝光、位移，之後便一直重覆此動作，如圖 2-10 所示。

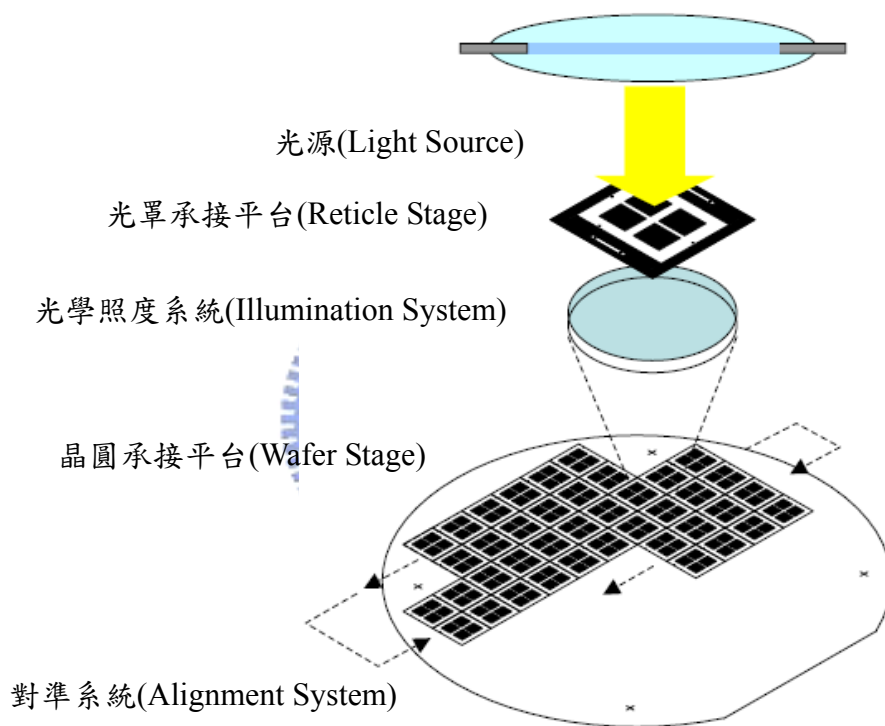


圖 2-10 曝光機示意圖

對於曝光系統而言，當所使用的光源之波長 λ 愈短，整個曝光機所提供的最低解析度也就愈小，亦即所能處理的最小線寬也就愈小。不過因光阻具有一定的厚度(通常在 $1\mu\text{m}$ 左右)，為了使圖案的轉移能夠完全且精確，步進機投射在光阻上的圖案，應該具備一定的”聚焦深度(Depth of Focus, DOF)”才行，以便使整個光阻分子，不論是在接近光阻的表面端或是接近晶片端，如圖 2-11 所示，都能有相同的聚焦(Focus)。

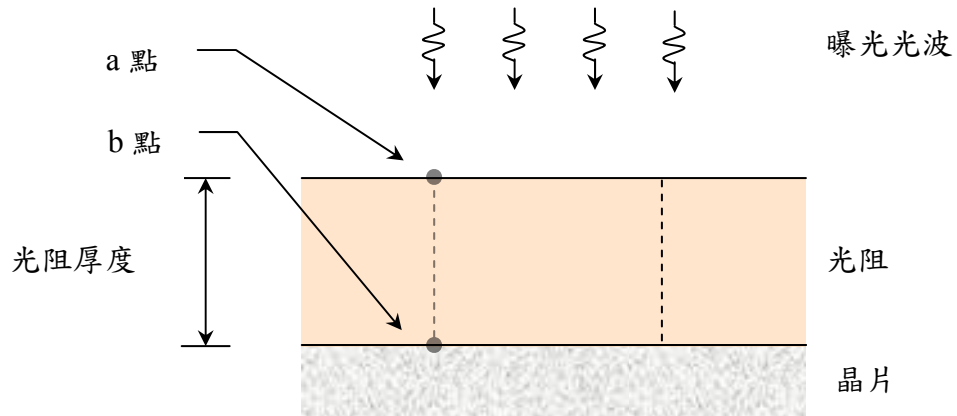


圖 2-11 曝光機所提供的解析度須含蓋圖中光阻的 a，b 兩點

顯影後檢視(After Develop Inspection)，簡稱 ADI。這個品管步驟的目的是用來確保微影製程的正確性，使任何異常都能在進行下一站的製程前被發覺，而藉著重工(Rework)來補救，以避免整片或整批的晶圓報廢。對微影製程而言，最主要的兩個 ADI 項目如下：

1. 覆蓋誤差(Overlay Tolerance)：覆蓋查驗是使用覆蓋(Overlay)的檢驗設備，也是本論文所研究、探討及所欲控制的製程良率變數。這種覆蓋測試結構，為盒內盒(Box-in-Box)結構，其中，位於外圍的盒框，是已完成在晶片上的前層組織，而內盒框則是當層的工作層，其成份為光阻。藉由這兩個盒框的相對位置來量測當層與前層的覆蓋誤差，此製程項目為本文主要探討及控制的對象。
2. 關鍵尺寸(Critical Dimension, 通常簡稱為 CD)：即是由光罩所轉移至晶圓上的圖案之線寬。其量測的方式是使用電子顯微鏡(CDSEM)來進行量測的。由工程師的經驗得知，針對曝光機而言，影響 CD 值之精確度最大的兩個因素為：曝光能量(Exposure Dose) 與聚焦(Focus)。

2.3. 微影覆蓋誤差介紹

對準的目的是使得光罩圖案能正確的轉移到光阻層，因為晶片是由許多結構層疊堆而成，所以若是曝光位置對準不正確，層與層之間的圖形就無法按照原先電路設計的圖形密切配合，而造成短路、斷路及電性不良等等缺陷，使得產品良率降低，增加生產成本，這種層與層圖形覆蓋位置上的誤差稱為覆蓋誤差。


2.3.1 覆蓋誤差之原因

覆蓋誤差可能來自光罩、晶圓、曝光機本身以及系統環境所造成的誤差(表2-2)，以光罩而言會因為其圖案變形，或是比例不正確而產生誤差。晶圓因為前熱製程或是光阻塗佈的不均勻，導致晶圓表面不平坦，致使圖案轉移扭曲失真，這種因為晶圓變形或不平整的影響，而產生的覆蓋誤差程度將隨著晶圓尺寸的放大而提高。曝光機本身則可能因為投影透鏡失真、晶圓平台傾斜、晶圓或光罩夾具鬆動使晶圓或光罩產生位移誤差，以及定位與對準系統精度等問題而產生誤差。此外，曝光機所在之作業環境因為溫度與震動的關係也會導致曝光機產生誤差。量產過程中，在整批或數批晶圓進行曝光之前，會先以一兩片試片進行試曝(Pilot)的動作，檢查其缺陷率與覆蓋誤差是否在容忍範圍內，確認環境條件符合要求後才放行整批晶圓，以避免機台不必要的消耗與時間的浪費。

表2-2 覆蓋誤差原因

覆蓋誤差來源	造成原因
曝光機	定位對準系統誤差 晶圓或光罩滑動 晶圓放置平台傾斜 透鏡組失真
晶圓	晶圓本身變形(受熱影響) 光阻塗佈膜厚不平整
光罩	光罩變形 光罩圖案比例失真
系統環境	震動 溫度 潔淨度

2.3.2 覆蓋誤差之測量與影響

覆蓋誤差依賴Overlay機台的量測，其測量方法是每次曝光中在晶圓切割道上做兩種覆蓋標記符號“■”與“□”，分別與前一次層留下的記號重合成為“”(Box-In-Box)的樣式，再以影像處理技術測量兩個標記的位移量(圖 2-12)，通常在每個曝光場內放置4組覆蓋標記符號，而量測記號的偏移量需要花費相當的時間，因此雖然每個曝光場都有誤差記號，為了不讓測量機台成為產能的瓶頸，通常一片晶圓只選取4至9個曝光場作覆蓋誤差的測量，Overlay機台的測量步驟是先以晶圓全域對準記號及區域對準記號定出整片晶圓的座標，再依照所選取要測量的曝光場找出覆蓋標記位置並量測符號間x-y方向之位移量，最後便可得到16至36個點的位移數據，作為覆蓋誤差分析的依據。

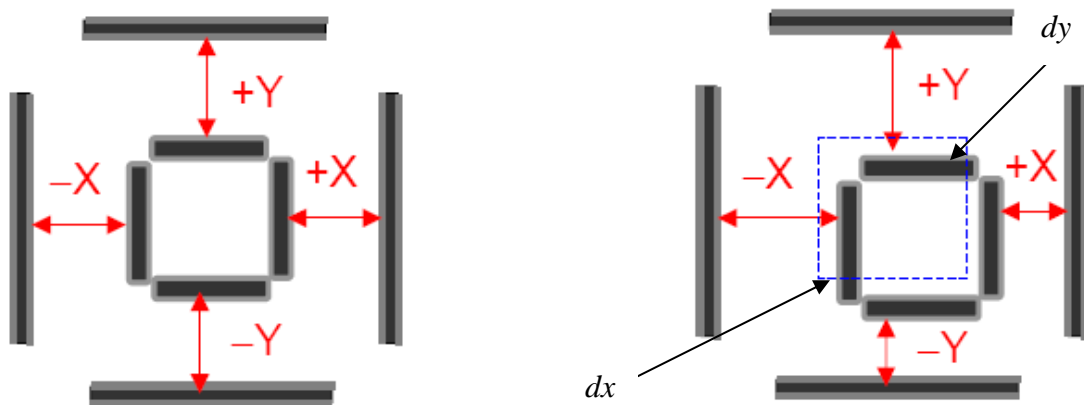


圖 2-12 覆蓋誤差測量記號

覆蓋誤差包含的幾何特徵很多，包括平移、旋轉、擴張等形式(圖2-13)，而誤差的各種形式對曝光位置的偏移會造成不同的影響(圖2-14)，覆蓋誤差必須控制在設計法則 (Design Rule) 的30%以下[1]，並且針對每片晶圓覆蓋誤差的歷史資料作追蹤與修正，避免持續偏向性的覆蓋誤差，使晶片產生電性不良或結構脆弱等問題。

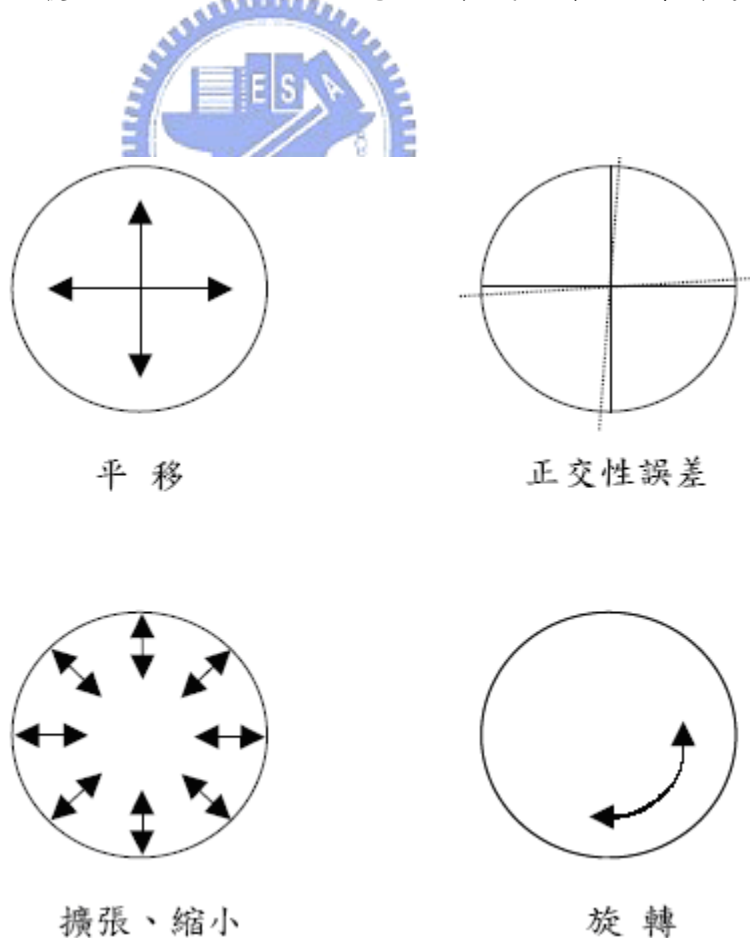


圖 2-13 覆蓋誤差形式

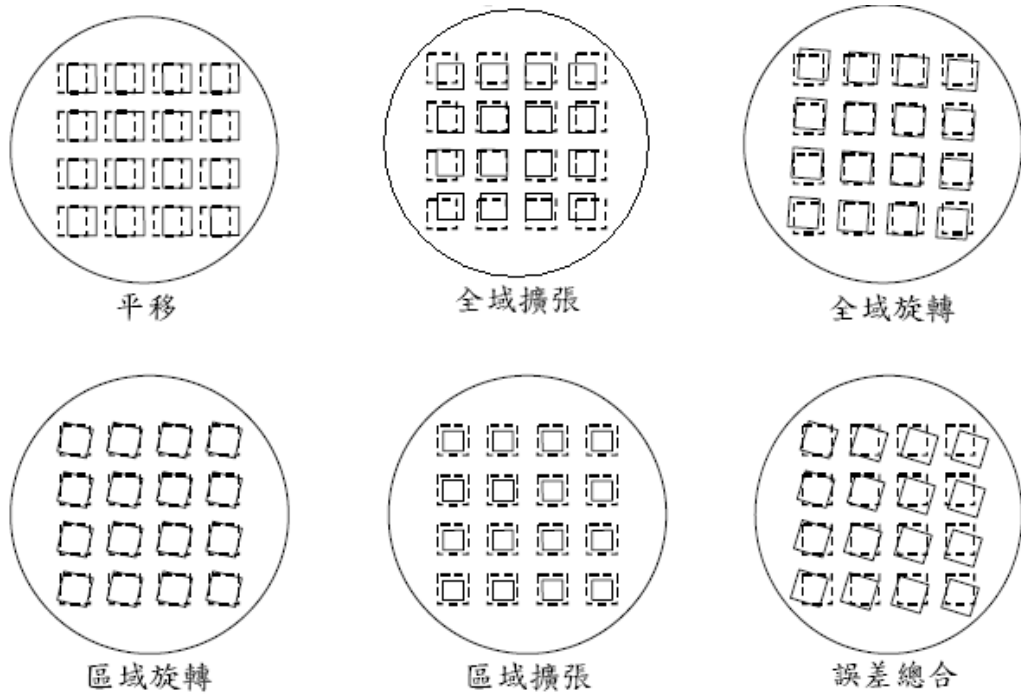
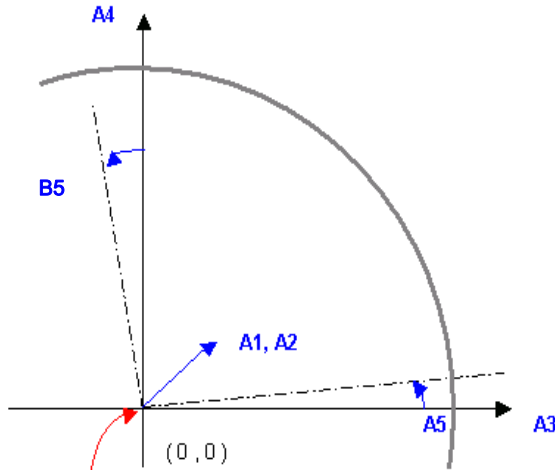


圖 2-14 覆蓋誤差影響

2.3.3 覆蓋誤差模型

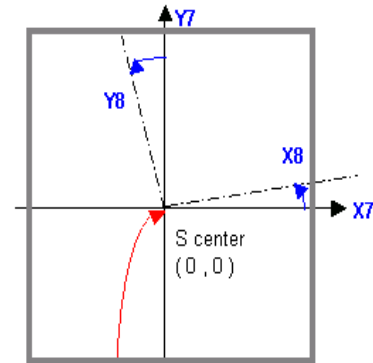
分析覆蓋誤差是將誤差產生之影響經過線性迴歸後，來建立其數學模型，影響包括平移、旋轉、擴張與縮小和正交誤差，在建立模型時會將誤差產生原因分為兩個部份來討論，一個是表示晶圓整體誤差(Interfield)的情形，與表示每個曝光場誤差(Intrafield)的情形，這兩種情形須分別以兩個座標系統來討論， (X,Y) 座標系統代表Interfield部分，而 (x,y) 座標系統表示Intrafield部分， (X,Y) 座標系統是以晶圓中心點為原點，而 (x,y) 座標系統則是以每次曝光區域的中心點為原點，圖2-15表示了覆蓋誤差模型的座標與誤差係數：

Interfield(Wafer) term



There are on scaling , rotating influence at original point

Intrafield(Shot) term



There are on scaling , rotating influence at original point

圖 2-15 Interfield 與 Intrafield 之座標及誤差係數

一般文獻的探討將這些誤差分成 Intrafield 與 Interfield，前者是在探討光源透鏡與光罩間所產生的誤差，Interfield 則探討光罩與晶圓之間的定位誤差。Interfield 的誤差來自校準誤差和晶圓機座定位之誤差，其數學誤差模式如下[4]:

$$d_{wX} = T_{wX} + E_{wX} X - R_{wX} Y + B_{wX} Y^2 \quad (2-1)$$

$$d_{wY} = T_{wY} + E_{wY} Y + R_{wY} X + B_{wY} X^2 \quad (2-2)$$

上式X、Y代表曝光場在晶圓座標系統的位置，下標w、X、Y分別表示Interfield的誤差源、該誤差源對X方向與Y方向所造成的影響； d_{wX} 、 d_{wY} 則表示在X軸及Y軸所造成的總疊對誤差， T_{wX} 、 T_{wY} 代表晶圓平台的偏移(Translation)係數，由晶圓平台的移動所造成， R_{wX} 、 R_{wY} 為晶圓的旋轉(Rotation)係數，由晶圓平台的轉動所造成， E_{wX} 、 E_{wY} 為晶圓的擴張(Expansion)係數，由晶圓平台高度定位誤差所造成， B_{wX} 、 B_{wY} 為晶圓的彎曲(Bow)係數，由於晶圓平台的不平整所造成

Intrafield 的誤差來自光源透鏡與光罩，其數學誤差模式如下：

$$d_{fx} = T_{fx} + M_{fx} x - R_{fx} y - T_{xx} x^2 - T_{yx} xy + W_{fx} y^2 + D_{3x} x(x^2 + y^2) + D_{5x} x(x^2 + y^2)^2 \quad (2-3)$$

$$d_{fy} = T_{fy} + M_{fy} y + R_{fy} x - T_{yy} y^2 - T_{xy} xy + W_{fy} x^2 + D_{3y} y(x^2 + y^2) + D_{5y} y(x^2 + y^2)^2 \quad (2-4)$$

上式中 x 、 y 代表曝光影像場的位置，即Intrafield的座標系統，下標 f 、 x 、 y 分別表示Intrafield的誤差源、該誤差源對 x 方向與 y 方向的影响； d_{fx} 、 d_{fy} 分別表示在 x 軸及 y 軸所造成的總疊對誤差， T_{fx} 、 T_{fy} 代表曝光影像場的偏移(Translation)係數，由光罩平台的精確度所造成， R_{fx} 、 R_{fy} 為曝光影像場的旋轉(Rotation)係數，由光罩的旋轉所造成， M_{fx} 、 M_{fy} 為曝光影像場的放大(Magnification)係數，由光罩與鏡片間的距離所造成， T_{xx} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 為光罩的傾斜(Trapezoid)係數，由光罩平面未垂直投影所造成， W_{fx} 、 W_{fy} 為楔形(Wedge)失真係數，由光學透鏡中心的偏差所造成， D_{3x} 、 D_{5x} 、 D_{3y} 、 D_{5y} 為透鏡變形(Distortion)係數，為濾鏡設計對稱性的轉動所造成，以上低階Overlay誤差的幾何形狀如圖2-16所示。

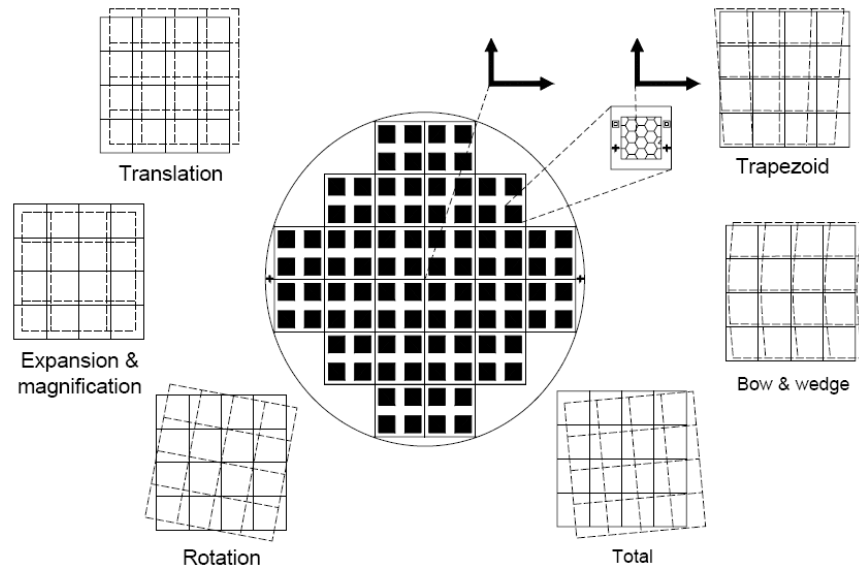


圖2-16 Overlay 各種低階誤差圖示

覆蓋誤差的實際模型具有高度非線性，多數高階誤差的來源，來自於透鏡系統，以致於在製程的過程中無法針對這些高階誤差作 Run-to-Run 的補償，一般的曝光機僅對平移、旋轉、擴張與縮小及晶圓平台傾斜具備補償能力，因此曝光機台的製造廠商，如：Canon 便針對可做 Run-to-Run 補償的相關誤差項目，設計與其誤差相對應的製程參數於製程機台端，以下為其建構的 simple model 形式：

Interfield term 的 simple error model :

$$dX=A1+A3X-A5Y \quad (2-5)$$

$$dY=A2+A4Y+B5X$$

Intrafield term simple error model :

$$dx=X7x-X8y \quad (2-6)$$

$$dy=Y7y+Y8x$$

其中A1、A2為 T_{wX} 、 T_{wY} 於Canon的簡稱，其常用單位為 μm ，A3、A4為 E_{wX} 、 E_{wY} 於Canon的簡稱，其常用單位為ppm(parts-per-millon)，A5、B5為 R_{wX} 、 R_{wY} 於Canon的簡稱，其常用單位為 μrad ，X7、Y7為 M_{fx} 、 M_{fy} 於Canon的簡稱，其常用單位為ppm(parts-per-millon)，而X8、Y8為 R_{fx} 、 R_{fy} 於Canon的簡稱，其常用單位為 μrad 。

由於許多覆蓋誤差原因是隨機產生，例如晶圓彎曲、環境震動等，此類覆蓋誤差必須持續追蹤晶圓並做適當修正，以維持該晶圓後續製程上設計圖案的轉移品質，但這些誤差產生原因並不會影響曝光機本身的對準能力，而針對持續超出容忍度的偏移、旋轉、擴張與縮小等機台對準與定位上的誤差，則是必須對機台作調整，以維持機台本身的精確度，確保後續在該機台曝光的晶圓都能有良好的圖形轉移，因此依照需要選取適當的誤差項，濾除隨機與無法調整之誤差影響，以便得到更正確的補償參數，這是分析微影覆蓋誤差數學模型的主要目的，也是補償覆蓋誤差時的重要參考依據。

第三章 歷史資料分析與建模

3.1. 歷史資料分析

根據上一章所述，可知欲使微影 Overlay 製程達到 Run-to-Run Control，必須針對 A1、A2、A3、A4、A5、B5、X7、Y7、X8 與 Y8，10 項製程參數做控制；為了達到控制的目的，必須先根據上述 10 項製程參數的輸入輸出值，建立合適的製程模型，即用數學模型描述其製程行為，才能進而設計適當的估測器及控制器。

實驗設計是目前半導體廠最常使用的建模方法，利用事前有計劃及考慮周詳的資料蒐集程序來進行實驗，而使得實驗結果的再現性很高、配置實驗的伸縮性大、實驗次數較少、實驗配置容易與解析方法較為簡便的方法；然而微影製程是半導體製程中，成本耗費最高的製程，微影設備除了定期保養 PM(Periodic Maintenance) 之外，幾乎都用於生產，無法配合實驗設計的進行。再者，根據 Bode、Ko 與 Edgar [8]指出，微影 Overlay 製程 10 項線性參數可視為獨立的 10 個 SISO(Single-Input Single-Output)模型，如要進行實驗設計，必須大幅增加實驗的次數，如此會嚴重影響半導體廠設備的使用率，使實驗成本提高甚多。

在實際的考量之下，只能從歷史資料的分析進行微影 Overlay 製程的建模，然而現今多數半導體廠早已使用的 MA(3)法對 Overlay 進行控制。

所謂MA(3)法，是針對單一機台的單一產品，將每一批次微影製程機台的參數輸入值(u_k)以及量測機台的參數量測值(y_k)相減，定義為該批次的Baseline($b_k = u_k - y_k$)，計算前三個批次Baseline的平均值，令此平均值為下一批次的製程機台參數輸入值，作為控制方法其控制架構如下圖 3-1 所示。

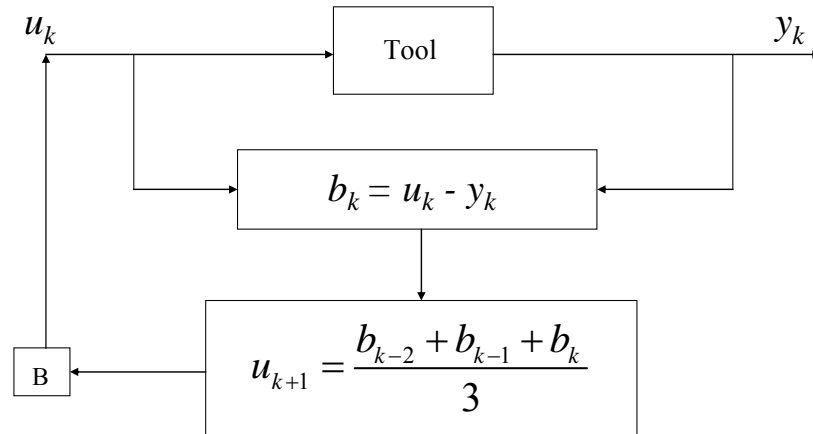


圖 3-1 MA(3)控制架構

因此從半導體廠所獲得的歷史資料輸入值及輸出值，皆是在此方法控制下所得到的輸入輸出值，而非完全未經控制的輸入輸出值。

又根據 Park *etal.*[9] 觀察半導體廠微影製程的 Overlay 參數的歷史資料，現今半導體廠的微影機台，為了增加機台的使用率，通常都必須混 Run 不同的產品及不同的 Layer，因此在不同機台、不同產品及不同 Layer 的情況下，將歷史資料混在一起觀察無法看出任何的關連，若假設機台在短期內漂移不明顯的情況下，針對單一機台、單一產品及單一 Layer 的歷史資料，將這些批次的歷史資料從連續時間的歷史資料中挑出後，連接在一起觀察，可以發現各參數的輸入輸出有各種相關性。

吾人收集了半導體廠內連續 140 天的歷史資料，經由觀察歷史資料，發現 Overlay 製程同一產品的輸入輸出值資料分布，根據參數的特性，可分為三種類型：

- (1) 輸入值為穩定值的數列：A3、A4、A5 及 B5 為此類型，如下圖 3-2 所示，其輸入輸出值在製程過程中保持平穩的關係。
- (2) 輸入值有漂移傾向的數列：A1、A2 為此類型，如下圖 3-3 所示，其輸入輸出值在製程過程中有漂移
- (3) 輸入值為 Step 及 Drift 混合的數列：X7、Y7、X8 及 Y8 為此類型，如下圖 3-4 所示。

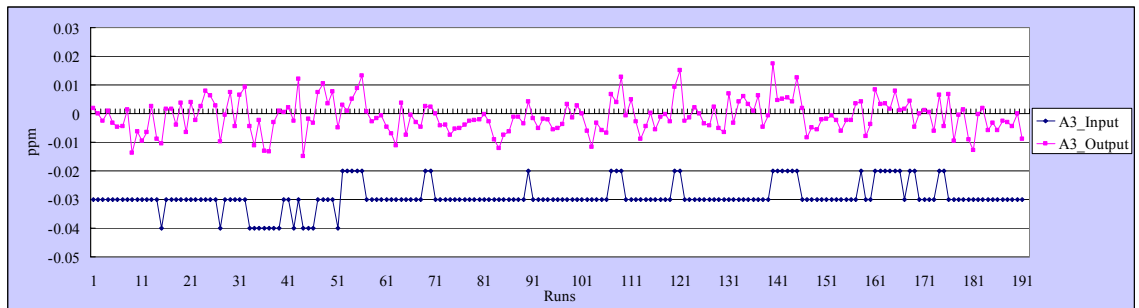


圖 3-2 A3 參數輸入及輸出值對批次分布圖

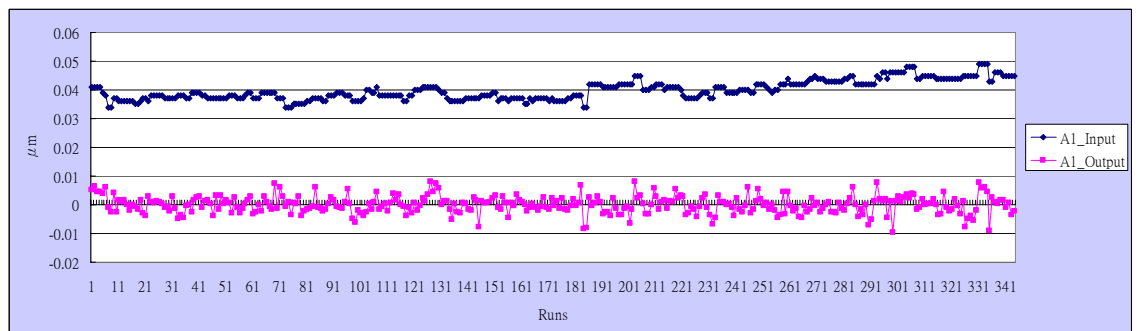


圖 3-3 A1 參數輸入及輸出值對批次分布圖

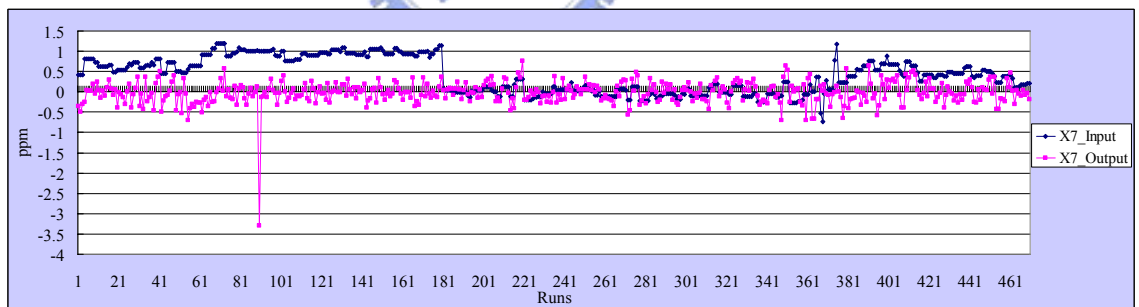


圖 3-4 X7 參數輸入及輸出值對批次分布圖

而目前半導體廠內，採用 MA(3)方法控制製程時，常會有下列情形產生：

- (1) 單點異常：當量測值有單點異常的情形發生時，所算出的最佳補值 (Baseline) 也會隨之異常，使下一批次原本正常的貨用異常的補值去 run，造成連續的製程量測結果異常；下圖 3-5 為一機台某產品中 A1 參數在一段時間內的變動，在第 30-33 個批次前，量測值(Output)

處於一穩定區間，而在第 34 個批次，量測值突然異常下降 $0.004 \mu\text{m}$ ，造成該批次的 Baseline 異常上升，但由於控制法是採取前三批次 Baseline 平均的概念，暫態響應較慢，因此曝光機台製程輸入值 (Input) 無法立即反應收斂，造成第 35-38 批次的量測值距離目標值 $0 \mu\text{m}$ 過遠。

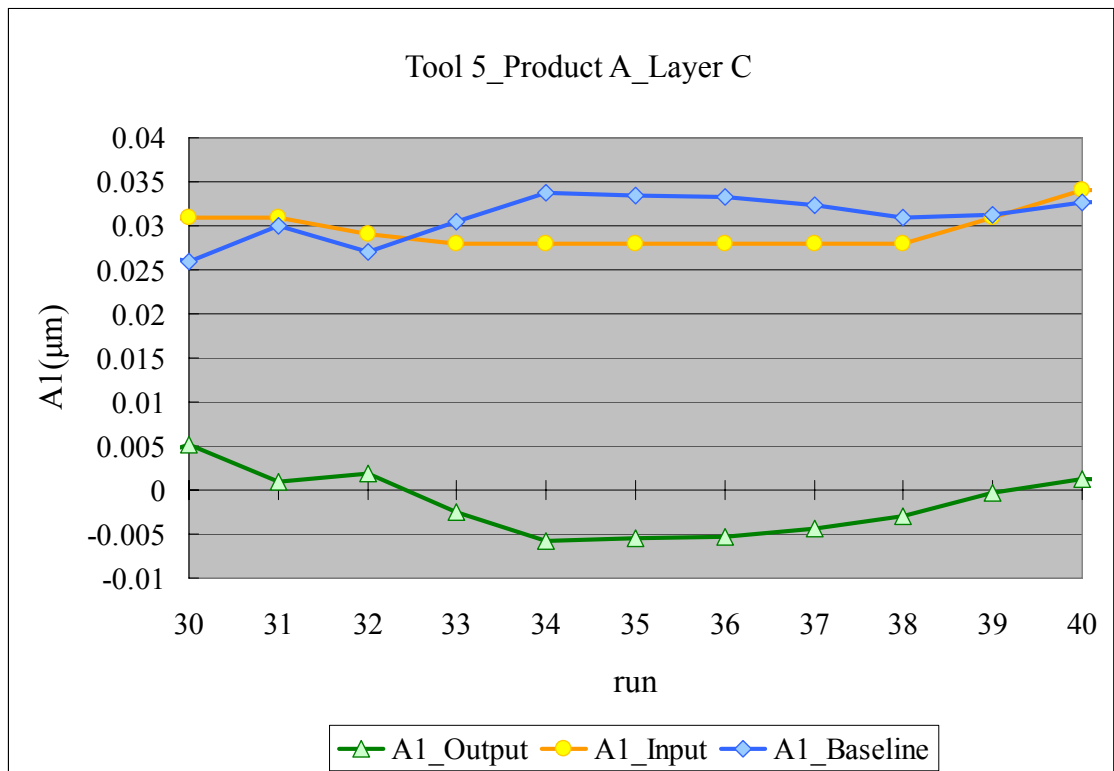


圖 3-5 Tool 5_Product A_Layer C_A1 輸入輸出及 Baseline

- (2) 跳點：對於同一機台而言，當某產品的某 Layer 很久都沒 Run 貨，造成 SPC Chart 上兩點批次間隔時間過長，此時則會因為長時間機台狀態漂移未列入考慮，而在利用原控制法補值時，造成誤判；圖 3-6 為 Tool 5_Product A_Layer C 中 X8 參數在一段時間內的變動，第 51 與 52 批次間虛線，代表間隔 64 天，期間都未 Run 此項產品，以半導體廠現行機制，則會在 Run 此產品前先進行 Pilot，而得到第 52

批次的輸入值(方形),若未進行 Pilot 而採用過期的最佳補值 Run 貨,則會算出機台輸入值(圓形),而造成輸出值(三角形),造成第 52、53 批次的量測值異常。

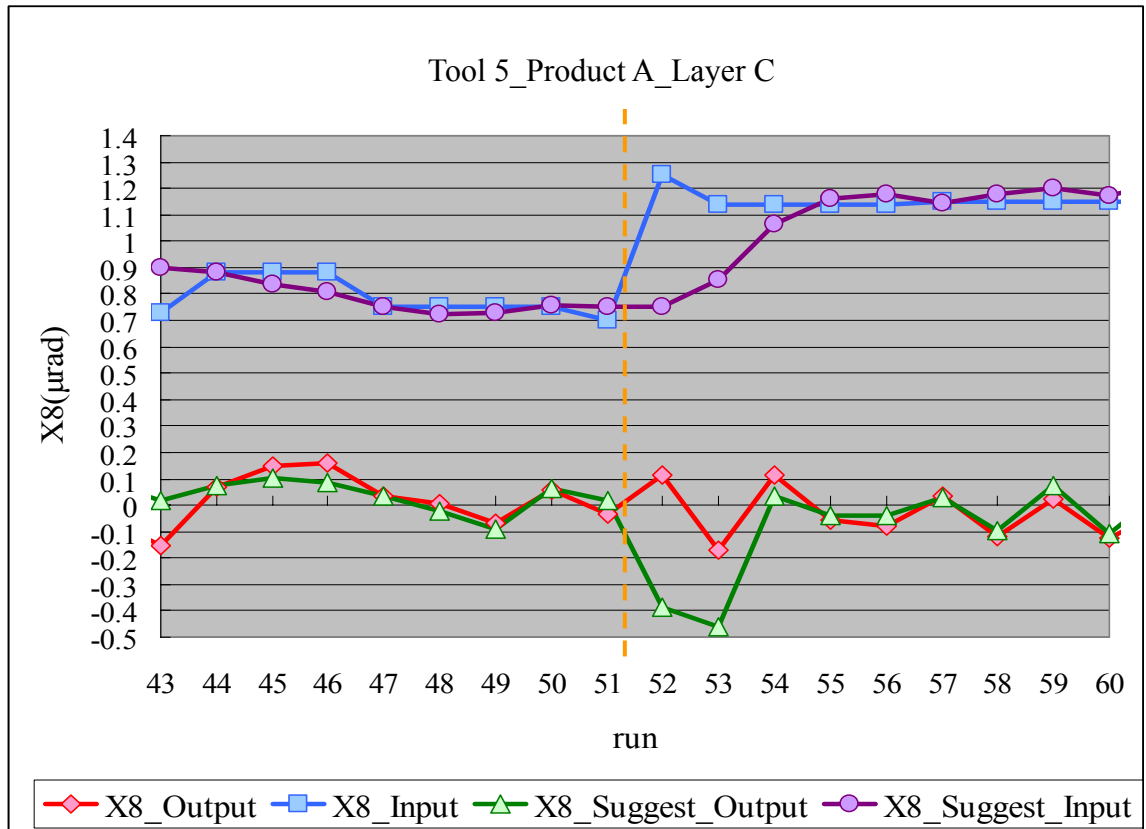


圖 3-6 Tool 5_Product A_Layer C_X8 輸入輸出調變

吾人將根據以上兩種製程的異常行為，設計出：

- (1) 觀察到單點異常並快速使量測值收斂。
- (2) 觀察到因 APC 資料長期未更新，所造成的步階干擾量測值後，使量測值能迅速拉回目標值。

將此兩種行為的製程干擾消除的控制器；然而在設計控制器之前，必須先找出能充分描述製程輸入輸出行為的數學模型，因此接下來將針對微影 Overlay 製程參數建立模型。

3.2. 建模

根據 Bode、Ko 與 Edgar [8]所提出，Overlay 的 10 項製程參數，除參數彼此互相獨立外，機台設計的系統的增益為 1，由此可以推論調控的多寡與量測結果的改變在多數的微影系統中為相等的。

從觀察歷史資料，亦可看出以下現象：就一台機台期間所有產品而言，每種產品的Baseline($b_k = u_k - y_k$)皆有其本身的特性，因此吾人將Baseline視為一重要狀態，圖 3-7 擷取自半導體廠某曝光機台連續 140 天所有產品A1 參數之Baseline，圖 3-8 為該機台其中 1 種產品的Baseline，以長期觀察而言，可以很清楚看出漂移趨勢的存在；而圖 3-9 為圖 3-7 前 200 筆所有產品狀態的改變，以短期機台的行為可看出狀態近似乎穩。

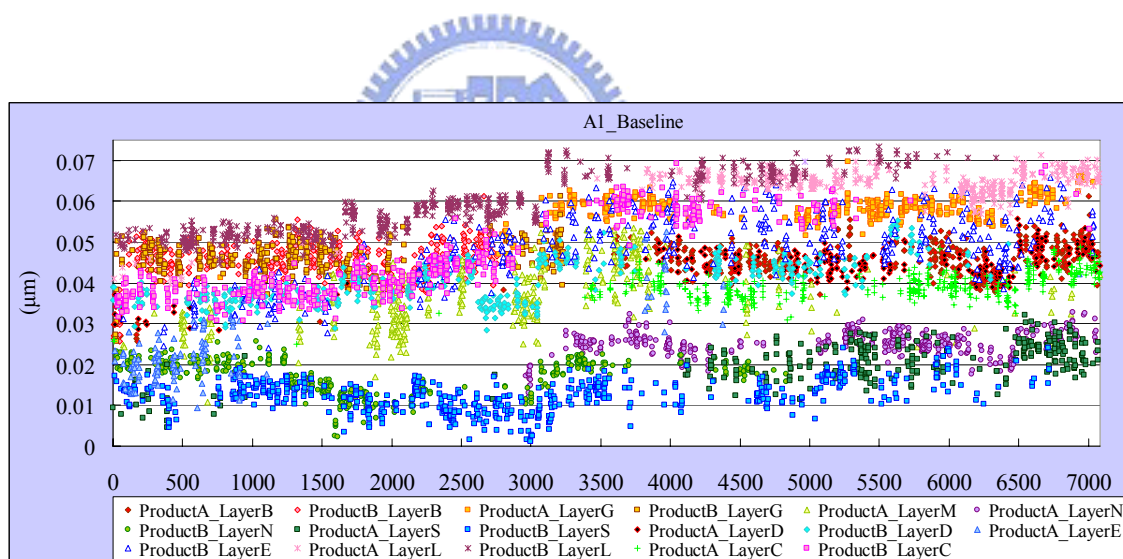


圖 3-7 半導體廠中某曝光機台所有產品 A1 參數之 Baseline

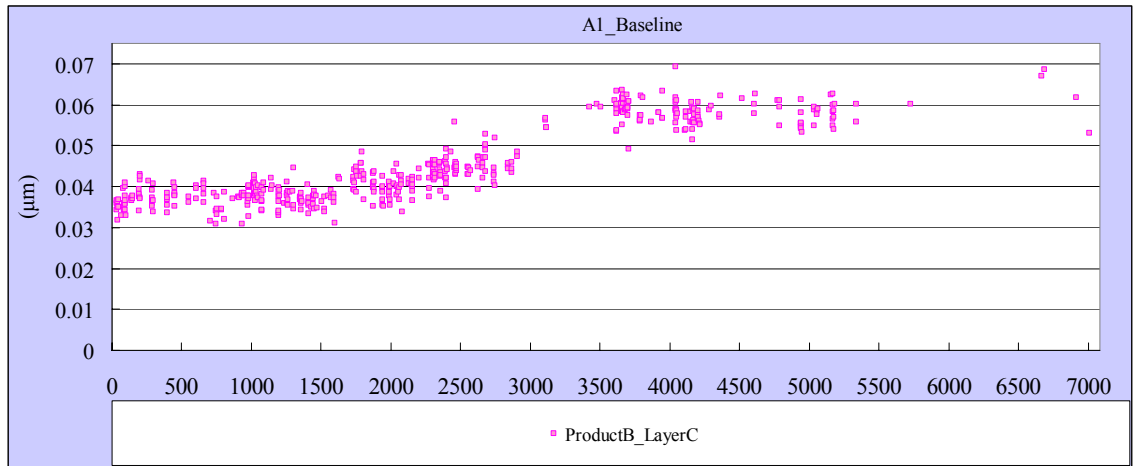


圖 3-8 半導體廠中某曝光機台單一產品 A1 參數之 Baseline

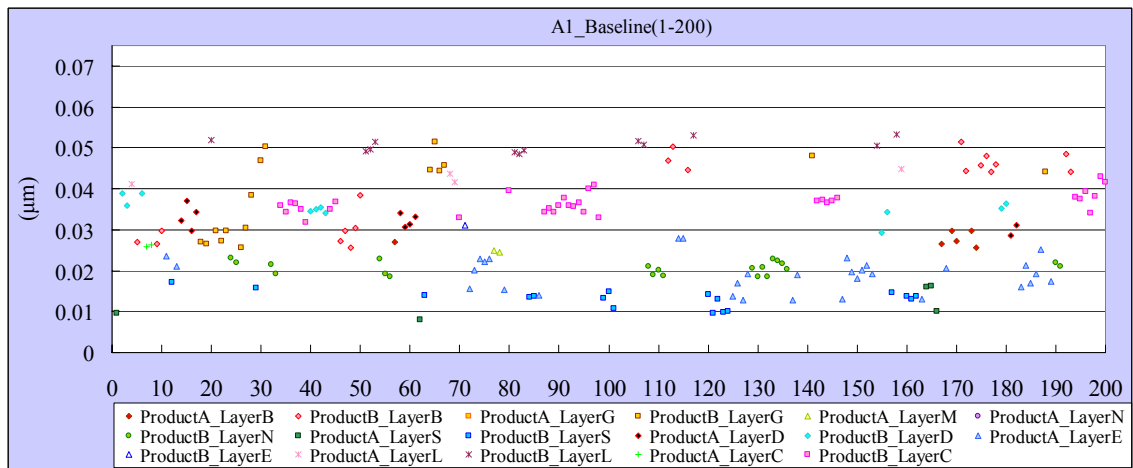


圖 3-9 半導體廠中某曝光機台所有產品前 200 批次 A1 參數之 Baseline

根據以上分析吾人可將 10 組參數輸入輸出值的關係用一線型模型來表示：

$$\mathbf{y}_{k_{10 \times 1}} = \mathbf{C}_{10 \times 10} \mathbf{u}_{k_{10 \times 1}} + \mathbf{p}_{k_{10 \times 1}} \quad (3-1)$$

$$\mathbf{p}_{k+1_{10 \times 1}} = \mathbf{p}_{k_{10 \times 1}} + \boldsymbol{\varepsilon}_{k_{10 \times 1}} \quad (3-2)$$

其中 \mathbf{y}_k 為 Overlay 參數量測值， \mathbf{u}_k 為相對於 \mathbf{y}_k 的曝光機台端操縱變數， \mathbf{C} 為製程模型的斜率項，而根據[8]，將 \mathbf{C} 暫且設為單位矩陣，而 \mathbf{p}_k 為模型的截距項，代表每一批次的狀態，與半導體廠內所定義的 Baseline (\mathbf{b}_k) 差了一個負號的關係， $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ 為白噪音。

為了求證製程模型斜率值為 1 假設的正確性，挑選連續時間內且筆數最多的歷史資料作為觀察對象較能算出正確的斜率，在選定一台機台一組產品歷史資料

的輸入輸出值後，利用線性迴歸找出線性模型的斜率項。

以 Tool 5、Product A、Layer C 的歷史資料為例，透過迴歸所得到的 A1~Y8 之斜率值如下表 3-1 所示。

根據結果得知，由於量測值可能含有製程及量測的干擾，使得並非所有製程參數的增益值皆為 1，而只能說接近 1，因此往後在進行建模的過程，若系統斜率與 1 差距過大，可考慮將 C 矩陣中對角線上各元素做適當的調整。接著，只要能事先估計出每一批次的 p_k ，便能適配出更合適的輸入輸出關係，進而設計出最佳的控制器。

表 3-1 Tool 5_Product A_Layer C 各項參數斜率值

Tool 5 ProductA Layer C	斜率
A1	1.0646
A2	1.0136
A3	0.9445
A4	0.8295
A5	0.945
B5	1.1554
X7	0.835
Y7	0.8645
X8	0.5844
Y8	0.5951

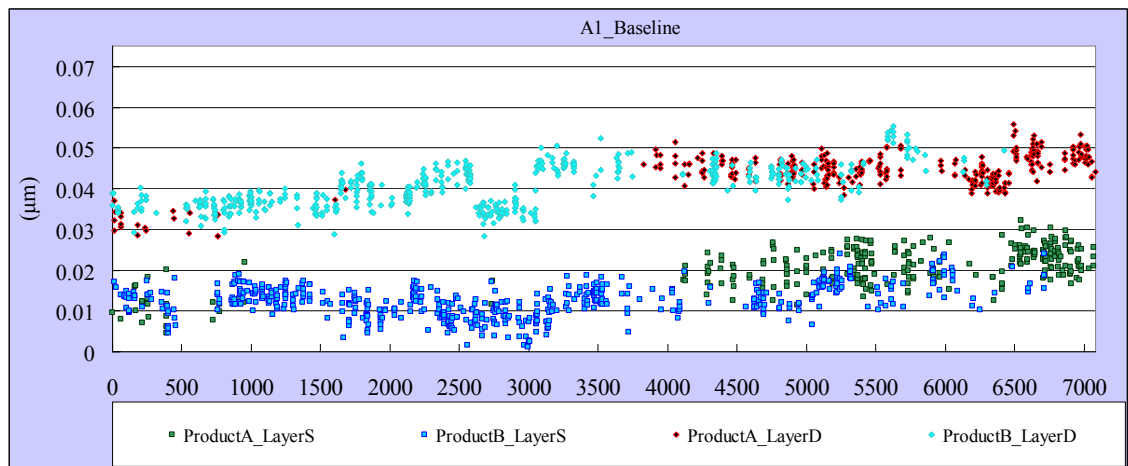


圖 3-10 半導體廠中某曝光機台 4 種產品 A1 參數之 Baseline

另外對不同 Product、不同 Layer 的歷史資料觀察，圖 3-10 為從圖 3-7 中，挑選出 2 種 Product、2 種 Layer 組合出 4 組 Baseline 的歷史資料，吾人可以看出同 Layer 不同 Product 的製程特性較同 Product 不同 Layer 的製程特性為相近，也可以說 Layer 的變異較 Product 為大。

從圖 3-7 亦可觀察到[9]：

$$\text{Baseline}_{\text{ProductA_LayerS}} + \text{Baseline}_{\text{ProductB_LayerD}} = \text{Baseline}_{\text{ProductA_LayerD}} + \text{Baseline}_{\text{ProductB_LayerS}} \quad (3-3)$$

半導體廠內常利用式(3-3)作為 Pilot 的機制，透過近期內的三組歷史資料，去粗估久未 Run 貨的另一組 Baseline 值，再將輸出的期望值設為 0，去反推最佳輸入值。

第四章 Run-to-Run 控制器

針對上述微影製程，採用先進製程控制的 Run-to-Run 控制器進行製程監控，而 Run-to-Run 控制器種類甚繁，針對線性模型，吾人將介紹下列各種 Run-to-Run 控制器的基本概念與控制架構，並於後續模擬比較各種控制器。

4.1. EWMA 控制器

首先介紹Ingolfsson與Sachs[11]對EWMA控制器的分析。假設製程在時間 k 的輸出值(y_k)可表示為輸入值(u_k)的線性關係[12]：

$$y_k = \gamma u_k + \rho_k + \varepsilon_k \quad (4-1)$$

其中 γ 為真實製程的斜率， ρ_k 為真實製程於時間 k 的截距， ε_k 為時間 k 的製程干擾 (Process Disturbance)，假設為 $\varepsilon_k \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。

由於 γ 、 ρ 皆未知，因此經由實驗設計(Design of Experiment)或歷史資料迴歸，可以建立製程預測模型為：

$$\hat{y}_k = C u_k + p_k \quad (4-2)$$

假設輸出之目標值為 T ，若依預測模型調整製程輸入值為 $u = (T - p)/C$ ，則會造成製程之期望輸出值和目標值 T 間有

$$\Phi_0 = \rho + \frac{\gamma}{C}(T - p) - T \quad (4-3)$$

的偏差，其中 Φ_0 稱為初始偏差(Initial Bias)。為了消除此偏差使製程輸出接近目標值及減少輸出之變異，必須調整製程輸入設定。EWMA 控制器是利用不斷地調整預測模型截距項 p 的觀念，更改製程輸入值，若能將截距項調整至

$$p^* = T - \frac{C}{\gamma}(T - \rho) \quad (4-4)$$

則期望之製程輸出值會達到目標值 T 。

其原理可由圖 4-1 表示，假設 y_k 為真實製程在第 k 個批次的輸出，而 \hat{y}_k 為預測

模型的輸出，為了使輸出值達到目標值，製程輸入值設定為 u_0 ，得到第一批製程輸出值為 y_1 ， y_1 與目標值 T 的差距就是初始偏差 Φ_0 。為了消除此偏差，必須將預測模型 \hat{y}_k 的截距項從實線與Y軸的交點 p 修正至虛線與Y軸的交點 p^* ，並算出建議輸入值 u^* ，才能使得輸出達到目標值。

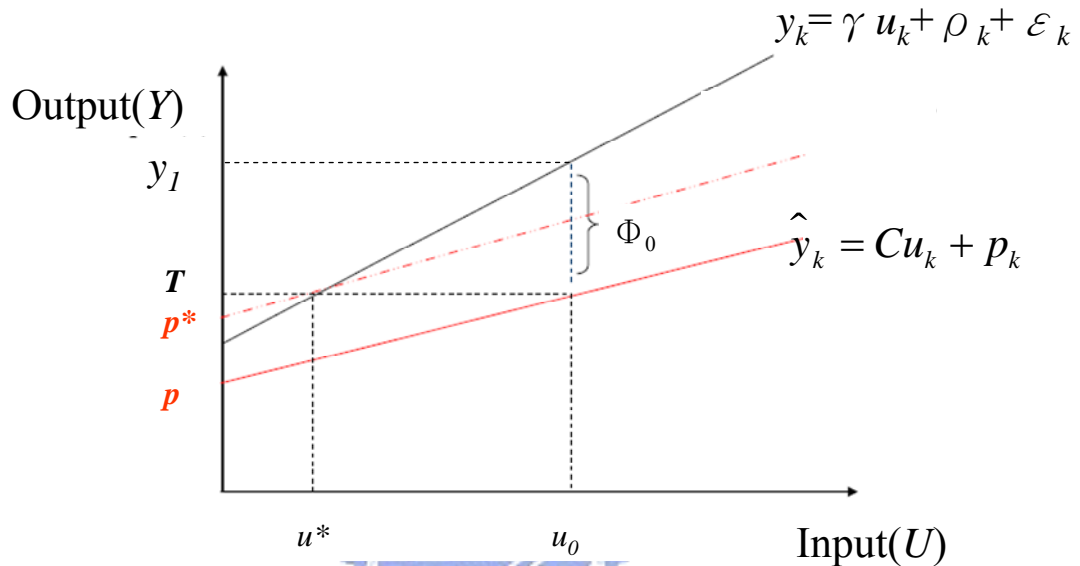


圖 4-1 製程輸入值及輸出值關係圖

EWMA 控制器是採用下列方式調整模型的截距項：

$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

$$\hat{p}_{k+1|k} = w(y_k - Cu_k) + (1-w)\hat{p}_{k|k-1} \quad (4-5)$$

而控制器則採用：

$$u_{k+1} = \frac{T - \hat{p}_{k+1|k}}{C} \quad (4-6)$$

其中 $p_0 = p$ ， p 為經由實驗設計或歷史資料迴歸得到的初始截距項， w 稱為折扣因子 (Discount Factor)， $0 \leq w \leq 1$ ，下圖 4-2 為EWMA控制器之流程圖。

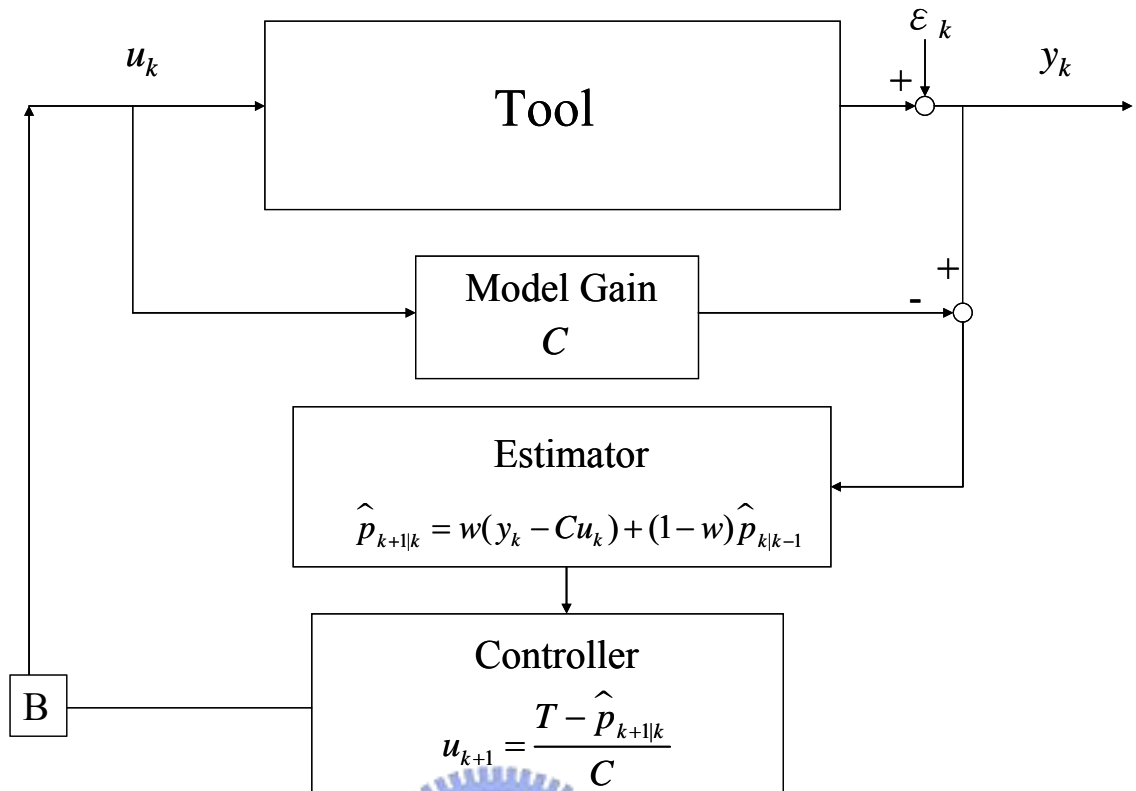


圖 4-2 EWMA 控制器完整控制架構



4.2. Double EWMA 控制器

在半導體製程中，常會有製程隨著時間增加而產生漂移的現象，例如消耗性的器材逐漸磨損老化[13]、金屬濺鍍過程中會產生隨著靶材使用時間增加而造成沉積率逐漸減緩[14]，以及上述微影 Overlay 製程中 Baseline 的漂移等。吾人可以利用下列關係來表示上述情況：

$$y_k = \gamma u_k + \rho_k + dk + \varepsilon_k \quad (4-7)$$

其中 d 稱為漂移率(Drift Rate)， ε_k 為時間 k 的製程干擾(Process Disturbance)，假設為 $\varepsilon_k \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 。

利用前述之 EWMA 控制器來控制此類型製程，雖然可使得製程輸出不致於偏離目標值，但製程之期望輸出和目標值會有 $dC/w\gamma$ 的偏差[15]，於是 Bulter 與 Stefani 利用 Double EWMA 控制器來克服製程漂移的影響。Double EWMA 控制器是由兩個 EWMA 控制器所組成，利用下列關係式得到截距項 p 及截距漂移量 d ：

$$\forall k = 1, 2, \dots, n$$

$$\hat{p}_{k+1|k} = w_1(y_k - Cu_k) + (1-w_1)(\hat{p}_{k|k-1} + \hat{d}_{k|k-1}) \quad (4-8)$$

$$\hat{d}_{k+1|k} = w_2(y_k - Cu_k - \hat{p}_{k|k-1}) + (1-w_2)\hat{d}_{k|k-1} \quad (4-9)$$

而控制器為：

$$u_{k+1} = \frac{T - \hat{p}_{k+1|k} - \hat{d}_{k+1|k}}{C} \quad (4-10)$$

其中 $p_0 = p$ ， p 為經由實驗設計或歷史資料迴歸得到的初始截距項， $d_0=0$ ，而 w_1 、 w_2 稱為 Double EWMA 控制器之折扣因子， $0 \leq w_1 \leq 1$ ， $0 \leq w_2 \leq 1$ 。其完整控制架構如下圖 4-3 所示。

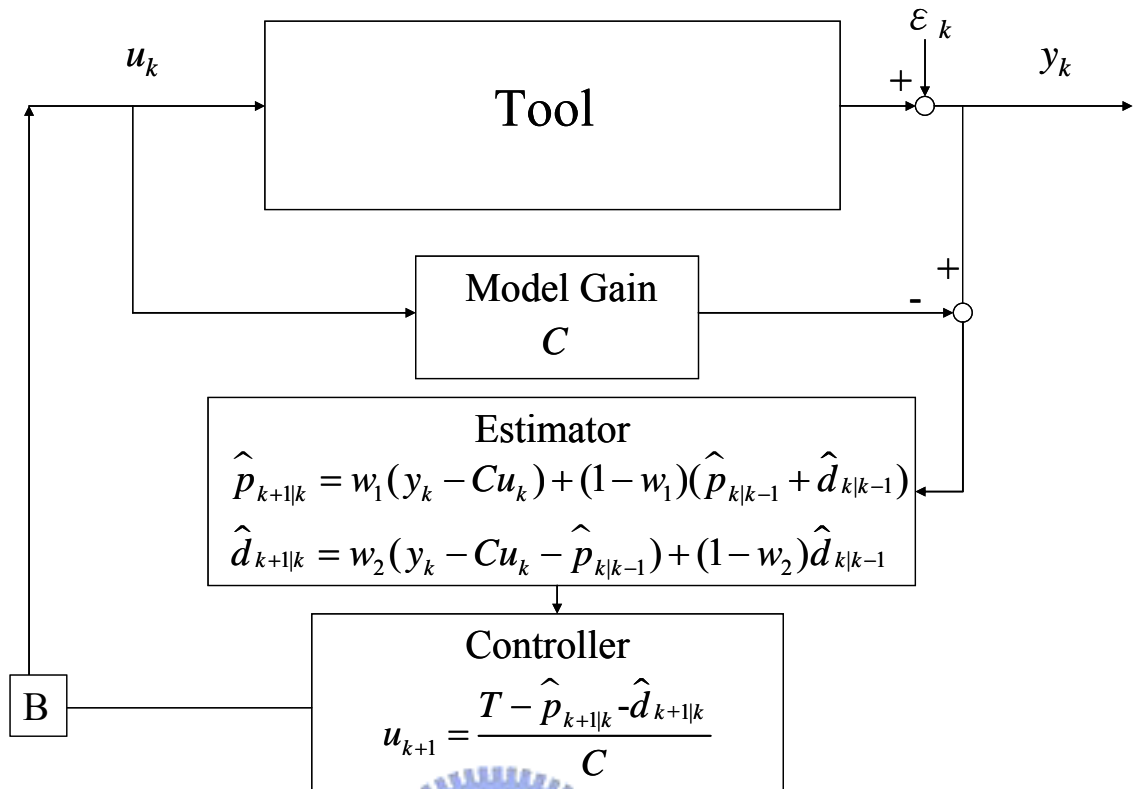
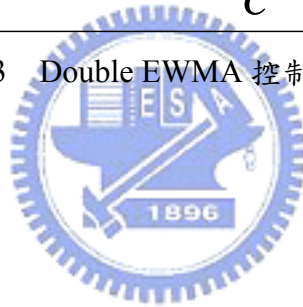


圖 4-3 Double EWMA 控制器完整控制架構



4.3. Pheromone Propagation 控制器

半導體製程上，前後批製程通常有自關聯性(Autocorrelation)，此關聯性之確切形式不得而知，但可推論製程批次間之誤差具一定之延續性，而費洛蒙傳遞控制法之概念即類似於此種延續性，假設製程模型的製程偏差 p_k 有如螞蟻之費洛蒙，此製程狀態將依數位費洛蒙控制理論擴散，當擴散完成時，可由費洛蒙框之飽和狀態來估算下一批之製程截距項 \hat{p}_{k+1} ，其示意圖如圖 4-4 所示[16][17][18]。

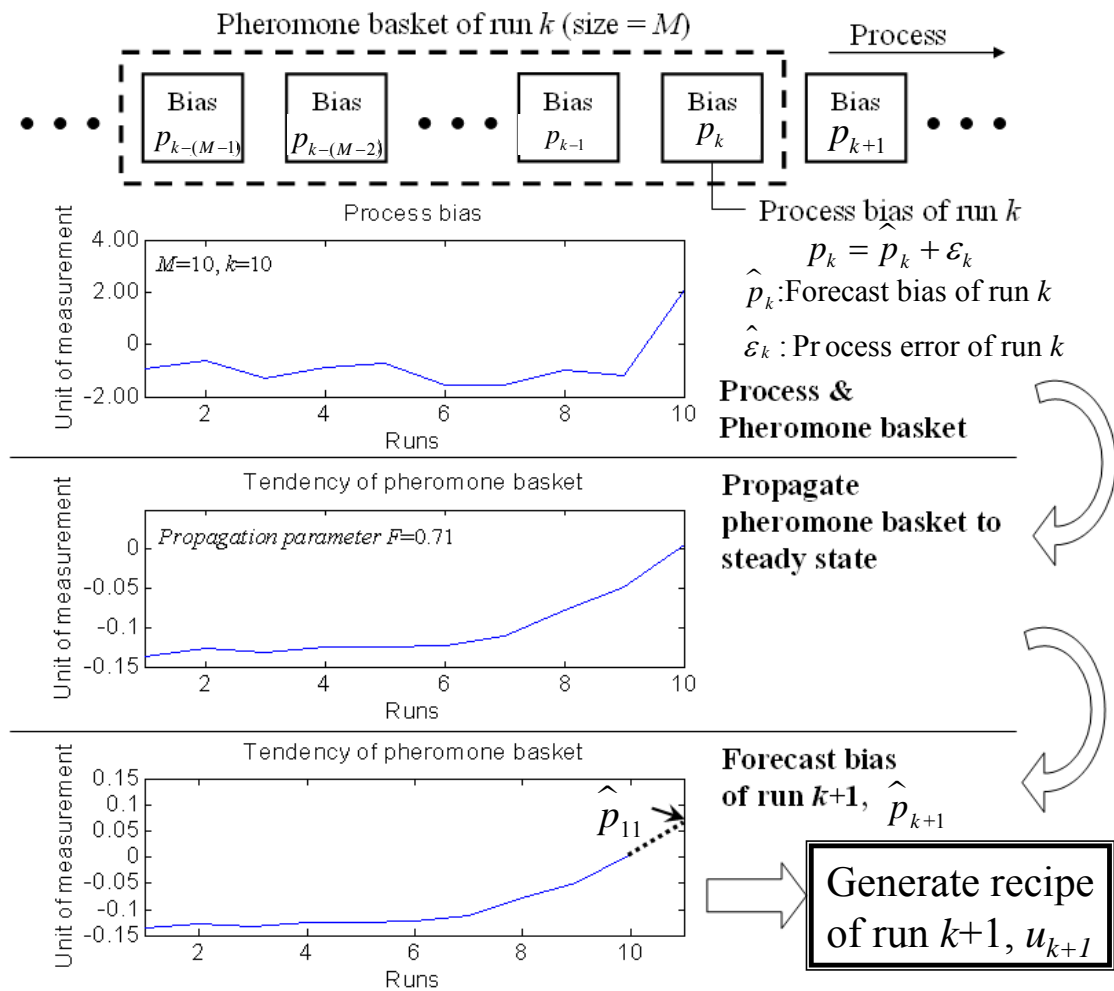


圖 4-4 費洛蒙傳遞控制法概念

假設製程在時間 k 時，輸出值(y_k)與輸入值(u_k)的預測模型為：

$$\hat{y}_k = Cu_k + \hat{p}_k \quad (4-12)$$

為了要更新預測模型中的截距項 \hat{p}_k ，因此設計了費洛蒙框來記憶前 M 個批次的製程偏差，即 p_{k-9} 、 p_{k-8} 、...、 p_k ，可利用每一批次量測值減去每一批次的輸入值乘以斜率得之：

$$p_k = y_k - Cu_k = y_k - (\hat{y}_k - \hat{p}_k) = \varepsilon_k + \hat{p}_k \quad (4-13)$$

利用費洛蒙框中的 M 個製程偏差，可以計算出最佳的擴散係數 F 。傳遞係數 F 的值介於零至一之間，傳遞係數越小，代表傳遞越快；傳遞係數越大，傳遞越慢；依製程特性，傳遞係數可再最佳化。在得到實際量測值之時，亦可伴隨擴散係數 F 值之更新。

接著利用最佳的擴散係數 F 與費洛蒙框中的各值，經由擴散計算得到擴散後的各值，再經由外插法得到下一批次的製程截距 \hat{p}_{k+1} 。

最後利用製程截距 \hat{p}_{k+1} 及控制器，計算得到下一批次的最佳配方 \hat{u}_{k+1} 。完整的PPC控制架構如圖4-5所示。

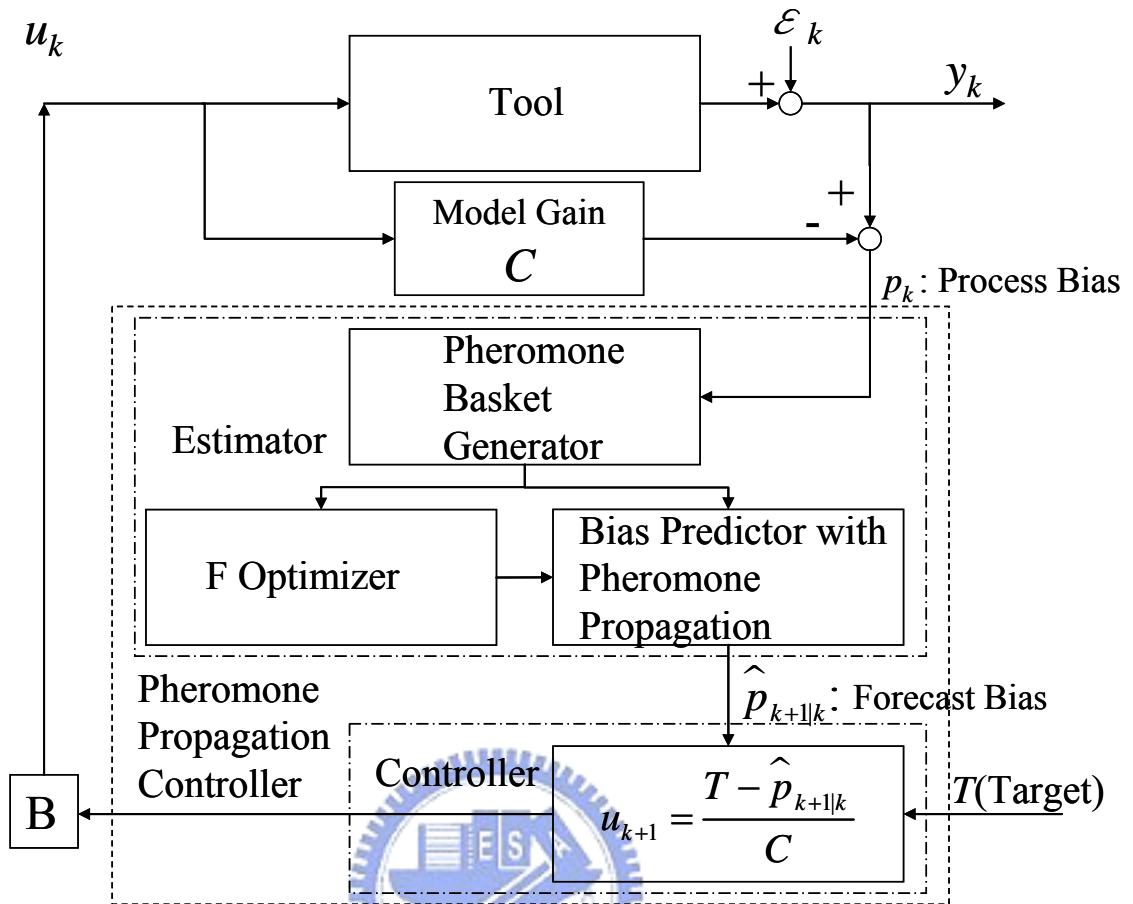


圖 4-5 Pheromone Propagation Controller 完整控制架構

4.4 卡曼濾波器

雖然吾人可以很容易的在完成一個批次後，得到狀態 \mathbf{p}_k ，但如何能在事先估計出狀態，作為下一個批次更新製程參數輸入值的依據則是很大的挑戰。利用控制理論中的卡曼濾波器(Kalman Filter)作為遞迴估計系統狀態的方法，為本論文所採用的主要研究方法。

卡曼濾波器最早是1960年Kalman [19]所提出，其利用狀態空間方程式(State Space Equation)之特性所發展出的遞迴估計系統狀態方法。整體而言，卡曼濾波器具有以下之特點[20]：

- (1) 卡曼濾波器之解是一個適合在電腦上計算的遞迴方程式。
- (2) 對於數據可以逐一的即時處理，並基於目前與前一刻計算出的狀態估計值運用遞迴方式算出下一個狀態的估計值。
- (3) 系統方程可以是時變的動態系統，輸入之訊號或數據之型態可以是非平穩的。
- (4) 可應用於各種線性(Linear)或非線性(Non-Linear)問題。

以下將介紹狀態空間方程式及卡曼濾波器之架構：

一個線性離散時間系統之狀態空間方程式可由狀態方程式與輸出方程式之組合來表示：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (4-14)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (4-15)$$

(4-14)式為狀態方程式，代表系統中狀態的變化，(4-15)式為輸出方程式，代表由系統狀態產生變化後系統的輸出。其中 \mathbf{x} 代表系統狀態向量($n \times 1$)， \mathbf{y} 為系統輸出向量($m \times 1$)， \mathbf{u} 為系統輸入(1×1)， \mathbf{A} 為 k 到 $k+1$ 時期之狀態轉移矩陣($n \times n$)， \mathbf{B} 為控制輸入矩陣($n \times 1$)， \mathbf{C} 為觀測矩陣($m \times n$)； \mathbf{w} 與 \mathbf{v} 分別為系統干擾向量($n \times 1$)以及量測干擾向量($m \times 1$)，並且為 White-Noise，且與系統狀態 \mathbf{x} 三者互相獨立，並具有以下性質：

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{w}_k \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_k & \mathbf{v}_k \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} Q_w & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$E[\mathbf{x}_0 \mathbf{w}_k^T] = 0, E[\mathbf{x}_0 \mathbf{v}_k^T] = 0 \quad \forall k \geq 0 \quad (4-17)$$

其中 Q_w 及 R_v 分別為 w 及 v 之共變異數；模擬與實驗中的 Q_w 是利用每一個參數歷史資料的輸入值與Baseline計算出其共變異數，而 R_v 則是參考機台手冊所提供的量測誤差得知，以A1為例，其量測誤差為 $\pm 1\text{nm}$ ，將誤差上下限視為6個標準差的分布，把上下限差值2nm除以6，得到其標準差為0.33nm，再將標準差平方，得到量測共變異數。

為了使用卡曼濾波器，則必須將(3-1)式與(3-2)式中的線性模型轉換成狀態空間模型的形式，因此多加入一個狀態 \mathbf{p}_k ，並稱之為輸出干擾模型(Output Disturbance Model)：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (4-18)$$

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k \quad (4-19)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k + \mathbf{v}_k \quad (4-20)$$

又為了方便運算，並同時考慮10個Overlay參數，可將(4-18)至(4-20)式合併成：

$$\mathbf{X}_{k+1} = \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{X}_k + \tilde{\mathbf{B}}\mathbf{U}_k + \tilde{\mathbf{w}}_k \quad (4-21)$$

$$\mathbf{Y}_k = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (4-22)$$

$$\text{其中 } \mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_k \\ \mathbf{p}_k \end{bmatrix}_{20 \times 1}, \quad \mathbf{Y}_k = \mathbf{y}_{k_{10 \times 1}}, \quad \mathbf{U}_k = \mathbf{u}_{k_{10 \times 1}}, \quad \tilde{\mathbf{w}}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_k \\ \boldsymbol{\varepsilon}_k \end{bmatrix}_{20 \times 1}$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}_{20 \times 20}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}_{20 \times 10}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{I}]_{10 \times 20}$$

則與(4-21)式與(4-22)式相對應之卡曼濾波器形式為

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \hat{\mathbf{p}}_{k+1|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \\ \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_k + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \end{bmatrix} (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1}) \quad (4-23)$$

令(4-23)式中 $\tilde{\mathbf{L}}_{k+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \end{bmatrix}_{20 \times 10}$ ，則

$$\tilde{\mathbf{L}}_{k+1} = \tilde{\mathbf{A}} \boldsymbol{\Sigma}_{k+1|k} \tilde{\mathbf{C}}^T (\tilde{\mathbf{C}} \boldsymbol{\Sigma}_{k+1|k} \tilde{\mathbf{C}}^T + R_v)^{-1} \quad (4-24)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{k+1|k} = \tilde{\mathbf{A}} \boldsymbol{\Sigma}_k \tilde{\mathbf{A}}^T + Q_w - \tilde{\mathbf{A}} \boldsymbol{\Sigma}_k \tilde{\mathbf{C}}^T (\tilde{\mathbf{C}} \boldsymbol{\Sigma}_k \tilde{\mathbf{C}}^T + R_v)^{-1} \tilde{\mathbf{C}} \boldsymbol{\Sigma}_k \tilde{\mathbf{A}}^T \quad (4-25)$$

初始值設定為

$$\hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0] = \bar{\mathbf{X}}_0, \quad \boldsymbol{\Sigma}_0 = \text{var } \mathbf{X}_0 \quad \forall k \geq 0 \quad (4-26)$$

式(4-24)中， $\tilde{\mathbf{L}}$ 稱為卡曼增益(Kalman Gain)，遞迴計算流程如下圖 4-6，利用已給定之初始值預測下一個批次狀態變異矩陣 $\boldsymbol{\Sigma}_{k+1|k}$ ，接著計算卡曼增益，利用這些已知數據去預測下一個批次 $k+1$ 之系統狀態 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1|k}$ 。此時新的量測值 \mathbf{y}_{k+1} 進入後，就可以更新目前在 $k+1$ 批次的狀態估計向量 $\hat{\mathbf{X}}_{k+1}$ 以及狀態變異矩陣 $\boldsymbol{\Sigma}_{k+1}$ ，如此可計算下一個狀態變異矩陣 $\boldsymbol{\Sigma}_{k+2|k+1}$ 之預測值，依此類推。

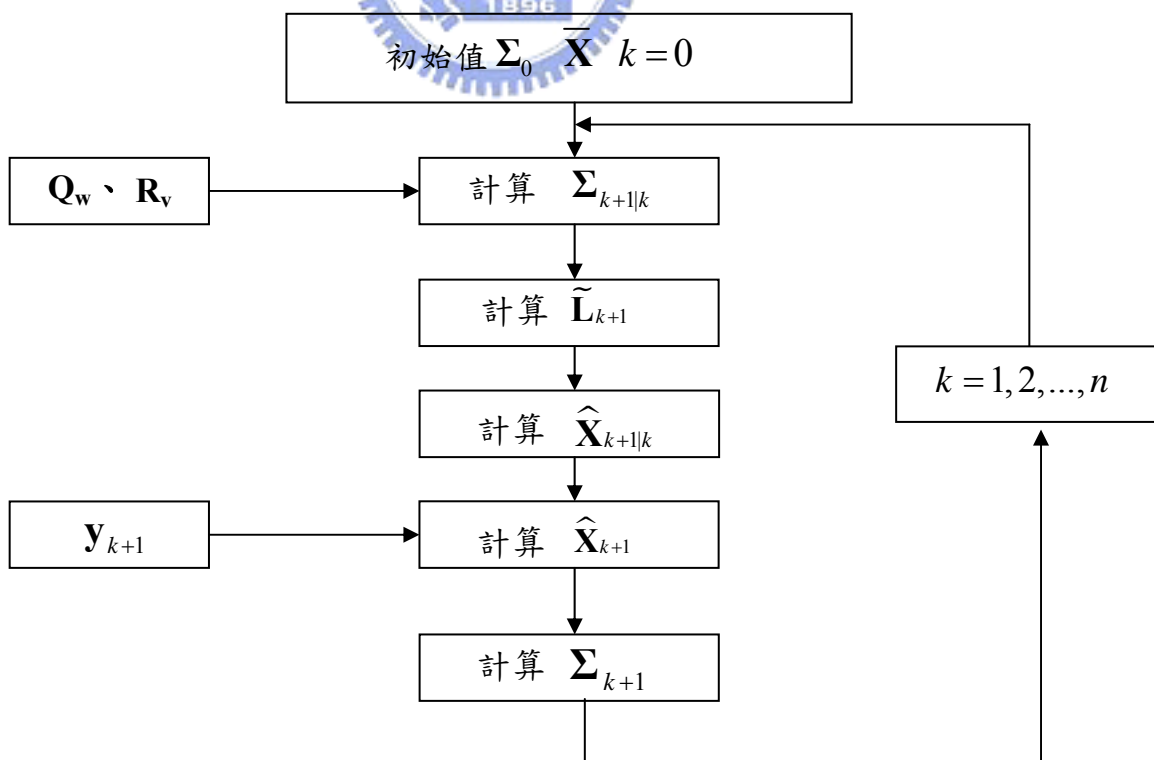


圖 4-6 Kalman Filter 運算流程圖

4.5 最小變異控制器

完成狀態的估計之後，接下來就必須設計一個控制器，利用卡曼濾波器所提供的資訊，帶出下一批次建議的製程參數輸入值，以達到製程控制的目的，下列式子為一目標函數(Objective Function)：

$$\mathbf{J} = (\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} - \mathbf{T})^T \mathbf{W}(\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} - \mathbf{T}) + (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1})^T \mathbf{\Gamma}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \quad (4-27)$$

其中

$\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k}$ ：為預測之輸出值

\mathbf{T} ：為輸出的目標值

\mathbf{W} ：為相對於 $\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k}$ 之權重

\mathbf{u}_k ：為欲求出之最佳輸入值

$\mathbf{\Gamma}$ ：為相對於 \mathbf{u}_k 之權重



根據式(3-1)線性模型，利用 one-step ahead predictor 的觀念，可以得到：

$$\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} = \mathbf{C}\mathbf{u}_k + \mathbf{p}_k \quad (4-28)$$

將(4-28)式帶入(4-27)中，則

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= (\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} - \mathbf{T})^T \mathbf{W}(\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} - \mathbf{T}) + (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1})^T \mathbf{\Gamma}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \\ &= (\mathbf{C}\mathbf{u}_k + \mathbf{p}_k - \mathbf{T})^T \mathbf{W}(\mathbf{C}\mathbf{u}_k + \mathbf{p}_k - \mathbf{T}) + (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1})^T \mathbf{\Gamma}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \end{aligned} \quad (4-29)$$

將(4-29)式對 \mathbf{u}_k 做偏微分並令其為零；

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{u}_k} = \frac{\partial \left[(\mathbf{C}\mathbf{u}_k + \mathbf{p}_k - \mathbf{T})^T \mathbf{W}(\mathbf{C}\mathbf{u}_k + \mathbf{p}_k - \mathbf{T}) + (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1})^T \mathbf{\Gamma}(\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \right]}{\partial \mathbf{u}_k} = 0 \quad (4-30)$$

經過移項整理後可得：

$$\mathbf{u}_k = (\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C} + \mathbf{\Gamma})^{-1} \left[\mathbf{C}^T \mathbf{W}(\mathbf{T} - \mathbf{p}_k) + \mathbf{\Gamma} \mathbf{u}_{k-1} \right] \quad (4-31)$$

由於 \mathbf{p}_k 是當期批次時間為 k 因而無法獲得，故可利用One-step Ahead Predictor的方法預測 \mathbf{p}_k ：

$$\mathbf{p}_k = \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1} \quad (4-32)$$

將(4-32)式代入(4-31)式可得：

$$\mathbf{u}_k = (\mathbf{C}^T \mathbf{W} \mathbf{C} + \mathbf{\Gamma})^{-1} \left[\mathbf{C}^T \mathbf{W} (\mathbf{T} - \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1}) + \mathbf{\Gamma} \mathbf{u}_{k-1} \right] \quad (4-33)$$

此方法即為最小變異控制器(Minimum Variance Controller)之最佳輸入值調變法。



4.6 卡曼最小變異控制器完整架構

整合前述所提出之卡曼濾波器用以更新製程狀態以及最小變異控制器而成之完整控制架構，稱之為“卡曼最小變異控制器”(Kalman-Based Minimum Variance Controller; KMVC)，其控制架構如下圖 4-7 所示。

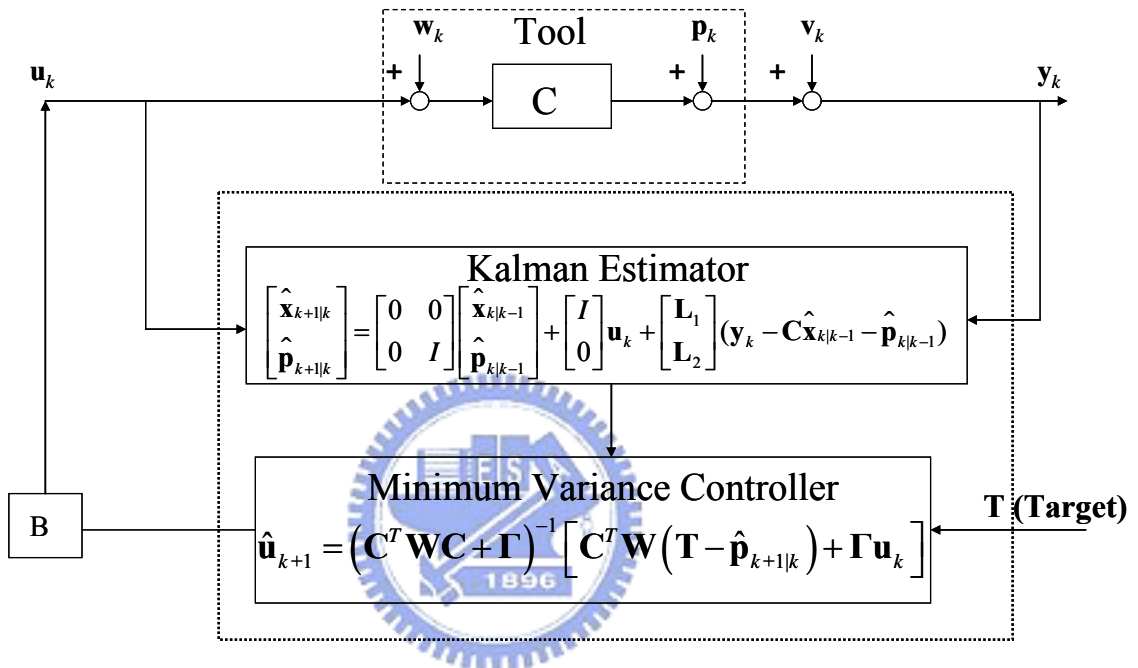


圖 4-7 卡曼最小變異控制器之完整控制架構圖

在 k 時期的製程輸入值 u_k 進入機台後，產出的產品所得到的製程量測值 y_k ，將輸入輸出傳送給卡曼濾波器以進行製程狀態的估計，將估出的狀態傳給最小變異控制器以算出下一時期 $k+1$ 最佳輸入值，以此閉迴路系統作為控制架構。

卡曼濾波器具有遞迴調變模型狀態的功能，能提高控制模型的精確度，並且加上最小變異控制器，使輸入值在變動量最小的條件下，快速的使輸出值接近目標值，並得到下一批次最佳的輸入值。

為了使卡曼最小變異控制架構能更適合於黃光微影 Overlay 製程使用，因此針對微影製程現況將控制架構做些許修正：

從第三章的歷史資料分析，可以發現若單一產品在單一機台上長期未 Run，

其 Baseline 會有顯著的漂移趨勢，在時間間隔過久的情況下，前一批次估測出的截距值($\hat{\mathbf{p}}_{k|k-1}$)與根據量測結果計算得到的截距值($\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\mathbf{u}_k$)會相差甚多，因為原卡曼估測器的形式為：

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} \\ \hat{\mathbf{p}}_{k+1|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \\ \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{u}_k + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \end{bmatrix} (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} - \hat{\mathbf{p}}_{k|k-1}) \quad (4-34)$$

而針對狀態 $\hat{\mathbf{p}}_{k+1|k}$ ，可將其簡化為以下形式：

$$\hat{\mathbf{p}}_{k+1|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_2)\hat{\mathbf{p}}_{k|k-1} + \mathbf{L}_2(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (4-35)$$

由(4-35)可看出 \mathbf{L}_2 所扮演的角色實為估測值與量測值的權重，若 \mathbf{L}_2 仍沿用時間間隔過久前一批次遞迴計算所得之 Kalman Gain，則會造成估測器不準，需要較多的批次才能收斂，使暫態響應之效能下降；因此按照原半導體廠內的規定增設一判別式，若時間間隔超過 14 天，則 \mathbf{L}_2 之值將令其為單位矩陣，亦即在時間間隔過久的情形下，完全相信量測值，立刻找出正確的狀態 $\hat{\mathbf{p}}_{k+1|k}$ ，以增加控制器的收斂速度；此一功能等同於原半導體廠因同一產品因 Run 貨間隔時間過長，而需要進行實驗 (Pilot) 以尋找其最新的 Baseline。

為了搭配估測器的使用，最小變異控制器中的權重亦須有所修正：

- (1) 在兩個批次間隔時間過久的情況下，式(4-27)相對於 $(\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k} - \mathbf{T})$ 項的權重 W ，應修正為 1，使 $\hat{\mathbf{y}}_{k+1|k}$ 迅速達到 \mathbf{T} (目標值)，另外一項參考輸入值與前一批次輸入值的權重 Γ 則令其為 0，在完全相信量測結果的情況下，使輸出值能迅速地收斂到目標值。

另外根據由歷史資料觀察的結果，針對各項 Overlay 參數有下列修正：

- (2) 針對 A1、A2 兩項，由於其狀態 \mathbf{p} 隨著時間持續且緩慢的遞增或遞減，因此將其權重 W 及 Γ 皆設為 0.5。
- (3) 針對 A3、A4、A5 及 B5 四項參數，由於其狀態 \mathbf{p} 幾乎不隨著時間有所改變而趨近平穩，但其輸出值經常會發生超過歷史輸出值 3σ 的情

形，吾人將其視為可能因量測誤差所造成 Outlier，因此除在一般情況下權重 W 及 Γ 設為 0.5 之外，若其輸出值大於歷史輸出值 3σ ，則將權重 W 及 Γ 分別設為 0.3 與 0.7。

(4) 針對 X7、Y7、X8 及 Y8 四項參數，由於其狀態 \mathbf{p} 隨著時間持續且顯著的遞增或遞減，且常伴隨著上述 2. 中 Outlier 的發生，因此除在一般情況下權重 W 及 Γ 設為 0.5 之外，若其輸出值大於歷史輸出值 3σ ，則將權重 W 及 Γ 分別設為 0.4 與 0.6，如此設計與(3)比較起來，其暫態響應較快。

將上述所有控制器使用之流程整理於下圖 4-8 中：

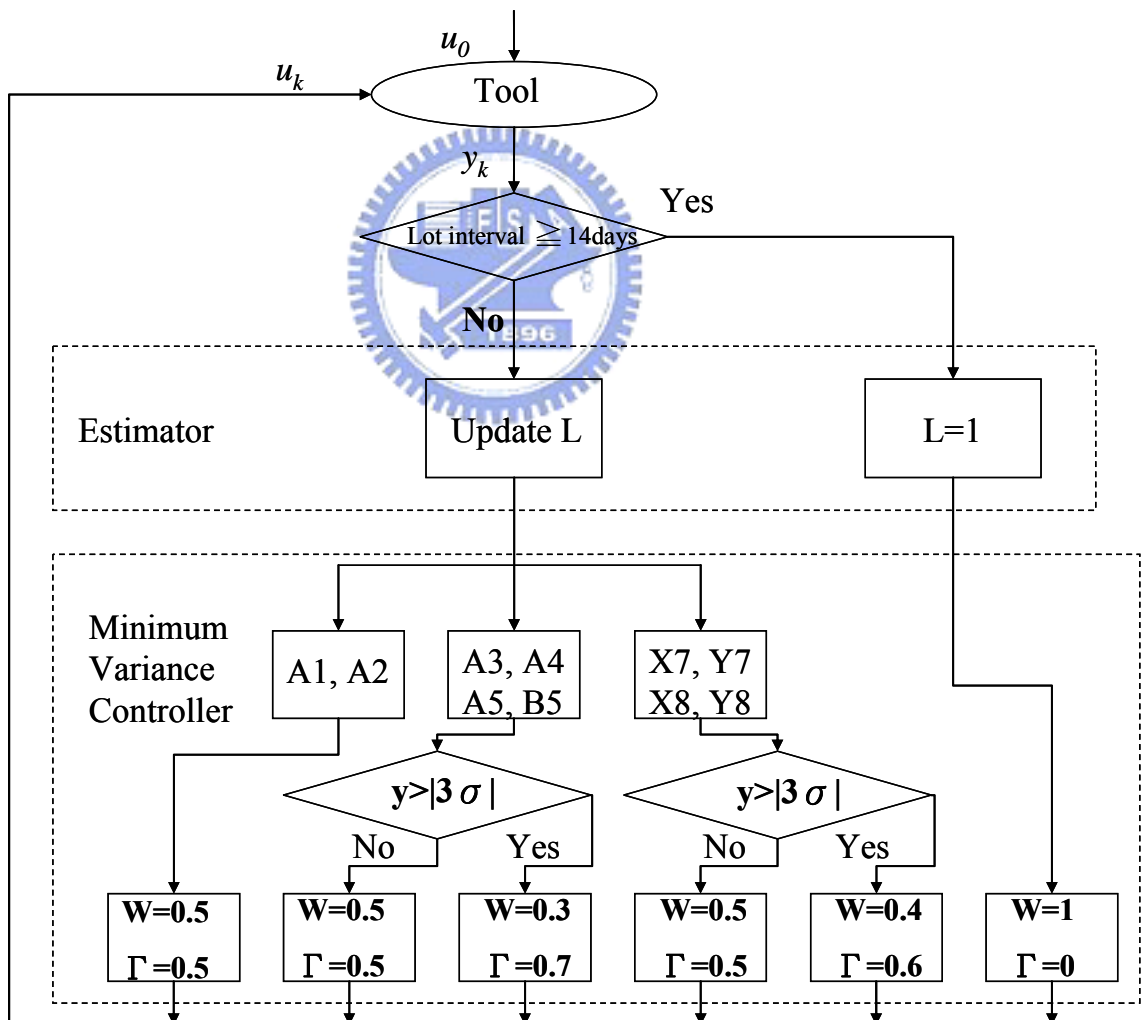


圖 4-8 卡曼最小變異控制器之使用流程圖

4.7 新卡曼最小變異控制器完整架構

若將線性模型的斜率項視為時變的係數，在每一批次的斜率亦會隨著時間而改變，在此情況下便需要一套遞迴更新斜率的的機制，利用 EWMA 的觀念更新斜率以期模型能更符合真實製程為新卡曼最小變異控制器與前述卡曼最小變異控制器的不同之處。

新卡曼最小變異控制器的結構如下圖 4-9 所示：

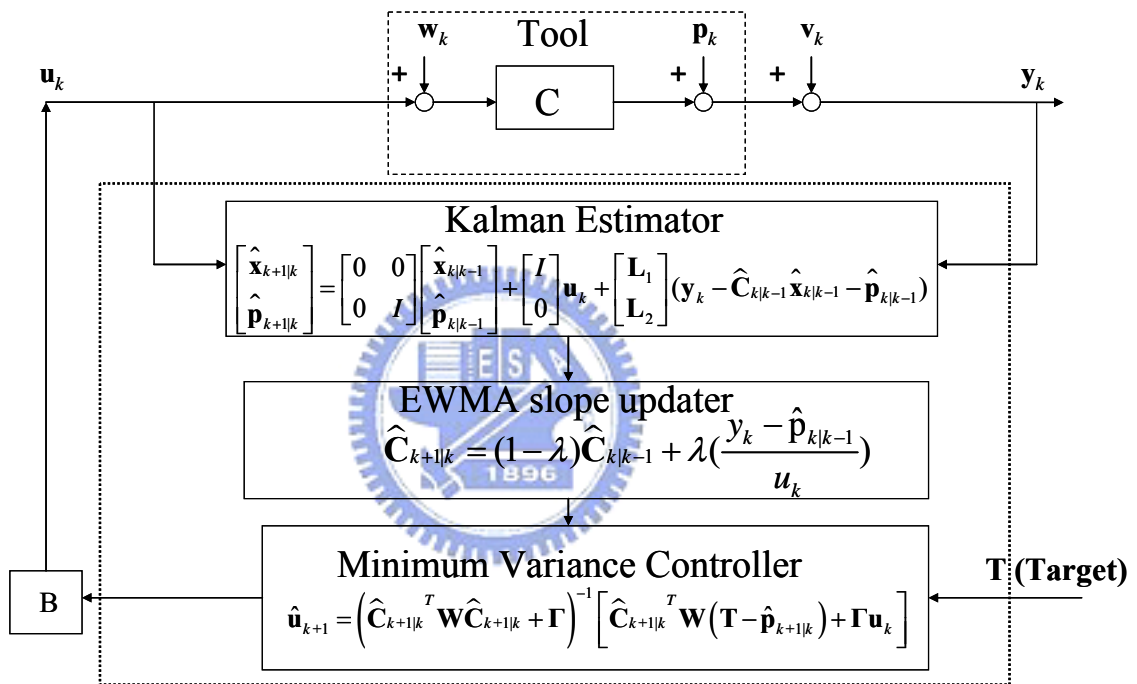


圖 4-9 新卡曼最小變異控制器之完整控制架構圖

與原來卡曼最小變異控制器架構最大的不同就是在估測器後，多加入一個更新模型斜率用的斜率更新器，其更新方法採用 EWMA 的概念，EWMA 是將斜率的估測值與量測值，按照過去時間點與現今時間點的不同，給予不同的權重，此權重是呈現一遞減的指數分配，亦即，離現今時間點越近的資料，所給予的該資料的權重就越大。

然而在使用 EWMA 更新斜率時，其量測項中的輸入值 (u_k) 會有等於零的情況發生，若除數為零，則無法計算出下一個批次估計的斜率，因此當發生此類情形

時，則令斜率 $C=1$ 。

當初始輸入值決定後，得到該批次的量測值，再確認此批次是否為超過 14 天未 Run 的產品，如果是的話，則令卡曼增益為 1，完全相信量測值，並令製程模型斜率為 1，再經由最小變異控制器決定下一批次的最佳輸入值；若該批次的產品並非超過 14 天未 Run，則採用卡曼濾波器的機制所計算出的卡曼增益，再判別該批次的輸入值是否為 0，若為 0，則令製程模型斜率為 1，若不為 0，則利用 EWMA 機制更新製程的斜率，最後再經由最小變異控制器決定下一批次的最佳輸入值。

配合前述卡曼最小變異控制法使用的流程如下圖 4-10：

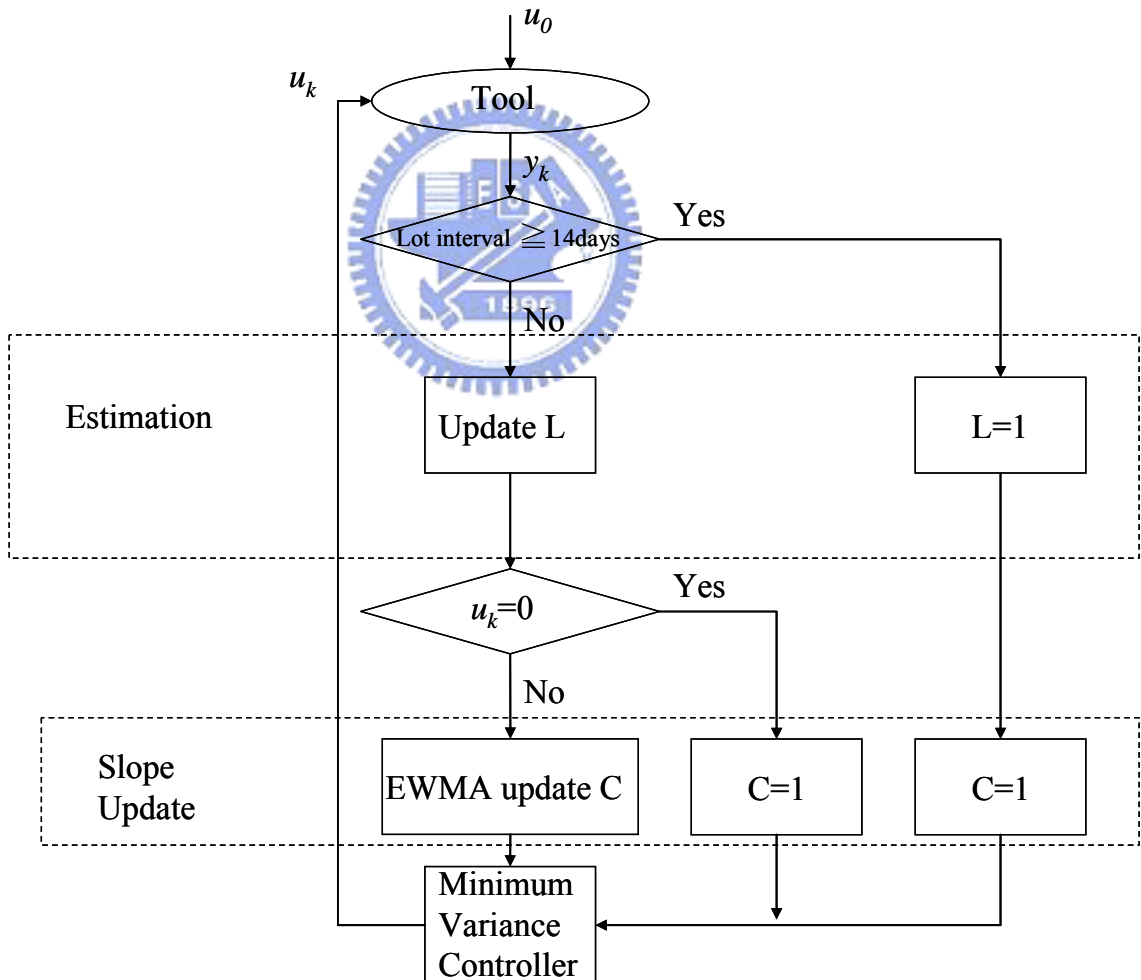


圖 4-10 新卡曼最小變異控制器之使用流程圖

以上控制方法根據半導體廠內微影曝光機台 Overlay 歷史資料量身訂做，理應能達到極佳的控制效能，為了驗證卡曼最小變異控制器與新卡曼最小變異控制器的效能，將針對此控制方法來進行模擬的工作。而為了突顯以上介紹製程控制器的效能，下面的章節將針對前述半導體廠中，常用的各式製程控制器，進行模擬，來比較各控制架構的效能。



第五章 模擬

為了要比較模擬的結果，吾人採用業界常用的 C_{pk} 作為各個參數製程能力的指標來判斷製程的精確性， C_{pk} 的計算方式如(5-1)所示：

$$C_{pk} = \min\left(\frac{\mu - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \mu}{3\sigma}\right) \quad (5-1)$$

其中 USL 及 LSL 代表製程上下限， μ 及 σ 代表觀測值的平均數與標準差。

另外吾人也從控制的觀點直接觀察各個參數對時間軸的響應來判斷系統的暫態反應，最後採用統計常使用的盒鬚圖來觀察模擬數據的分布與變異情形。

根據 Park *et al.* [9] 及 Martinez [21] 所使用的模擬機制如圖 5-1 所示，在多數微影曝光機台參數相對於量測值斜率值(C)為 1 的情況下，利用從半導體廠所收集的歷史資料，定義歷史資料中輸入參數為 \mathbf{u}_{HIS} ，輸出量測值為 \mathbf{y}_{HIS} ，將每一批次 $\mathbf{y}_{HIS} - \mathbf{u}_{HIS}$ 所得到的值視為該批次的製程偏差值 \mathbf{D}_{HIS} ，因此可以得到從第 1 批次開始到第 k 批次的偏差值 $\mathbf{D}_{HIS,1}, \mathbf{D}_{HIS,2}, \dots, \mathbf{D}_{HIS,k}$ ，再將這些偏差值依批次加入各種控制架構的系統內，而初始值則設定為與歷史資料第 1 批次相同的輸入值，若每一批次 $\mathbf{C}\mathbf{u}_k$ 可將模擬製程環境中每一批次所遭受的製程偏差值 $\mathbf{D}_{HIS,k}$ 消除，則輸出值即可達到理想的目標值，以此來檢驗各種類型之控制架構。

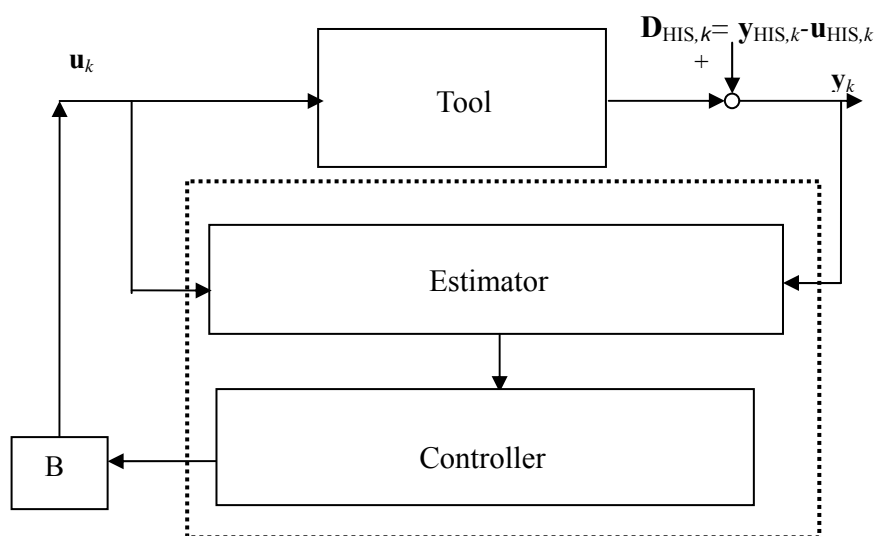


圖 5-1 模擬流程圖

吾人選定利用 Tool 5 機台、Product A、Layer C 的歷史資料，經由前述分析方法檢驗該組產品 10 項製程參數的系統斜率皆接近 1，因此在假設製程模型斜率為 1 的情況下，針對 Tool 5 機台、Product A、Layer C 進行模擬。

各模擬架構估測器相關設定如下表所示：

表 5-1 估測器相關設定

	w	w_1	w_2	F	L	C
EWMA	0.3	/	/	/	/	1
DEWMA	/	0.4	0.01	/	/	1
PPC	/	/	/	self-tuning	/	1
KMVC	/	/	/	/	self-tuning	1
NKMVC	/	/	/	/	self-tuning	self-tuning

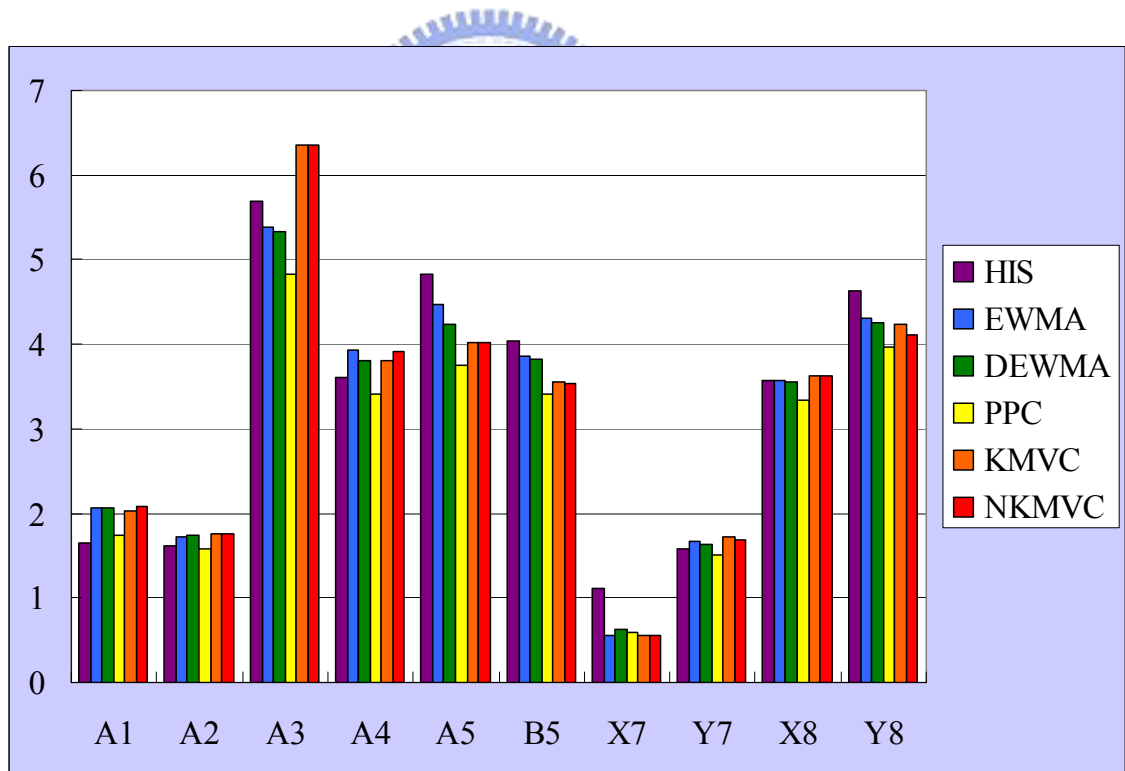


圖 5-2 Tool 5、Product A、Layer C 各個參數模擬結果 C_{pk} 值

圖 5-2 為各個參數在相同於歷史資料製程環境的干擾下進行模擬，得到的 C_{pk} 值所繪成的長條圖，圖中由左而右依序為紫色代表歷史資料計算得到的長條，以

HIS(History)簡稱；藍色代表EWMA模擬結果所計算得到的長條，以EWMA簡稱；綠色代表Double EWMA模擬結果所計算得到的長條，以DEWMA簡稱；黃色代表Pheromone Propagation Controller模擬結果所計算得到的長條，以PPC簡稱；橘色代表卡曼最小變異控制器模擬結果所計算得到的長條，以KMVC簡稱；紅色代表新卡曼最小變異控制器模擬結果所計算得到的長條，以NKMVC簡稱。其中A1、A2、A3、A4、Y7及X8參數， C_{pk} 值各控制器除PPC外，相較於歷史資料都有明顯的提升；而A5、B5、X7與Y8等參數 C_{pk} 較低的現象將在後續暫態分析時進行討論。

由 C_{pk} 值可以看出EWMA及DEWMA的控制效果頗佳，但此兩種估測器所設定的權重乃經由試誤法，嘗試各種組合的權重，再從其中挑選出最佳的權重來進行模擬所得到的結果，相較於PPC、KMVC及NKMVC的估測器有自我調變(Self Tuning)的功能，EWMA及DEWMA於權重的決定上較不便利，且DEWMA漂移項的權重 w_2 只有0.01，表示微影Overlay製程漂移的現象並不顯著。

PPC於 C_{pk} 值的表現較不佳，最主要的原因是微影製程輸入值所含的干擾過大，使得經由外插法所得到下一個時刻的估計值，往往會超估真實的訊號，造成過度調整的現象，使製程於穩態時的穩定度較差，然而遇到製程有較大的變異時，其暫態響應優於所有的控制方法，由於微影製程本身過程相當穩定，故PPC於微影製程控制上較不利，若將PPC用於製程變異較大的製程控制會得到較佳的成效。

KMVC與NKMVC的 C_{pk} 值於各參數皆很相近，其主要原因是系統本身相當的穩定，用固定斜率的線性模型便足以描述製程的行為，在NKMVC假設斜率為時變的情況下進行調變，亦可描述製程行為，但根據歷史資料顯示，微影製程本身過程相當穩定，故對於微影製程採用KMVC即可，而NKMVC則較適合於有顯著漂移的製程；相較於其他控制架構，KMVC能自我調適，較其他控制器需要找出合適的權重方便許多，且其效能亦有良好的表現。

接著從暫態響應圖來比較各控制器的效能：

圖 5-3 為 Tool 5、Product A、Layer C，A1 參數模擬輸出值的暫態響應圖，可以從圖中明顯地看出，歷史資料的變異是所有控制方法中最大的， C_{pk} 值最低。除此之外，PPC輸出值震盪的程度較其他控制器激烈，因此反應在 C_{pk} 值都較其他控制器低。

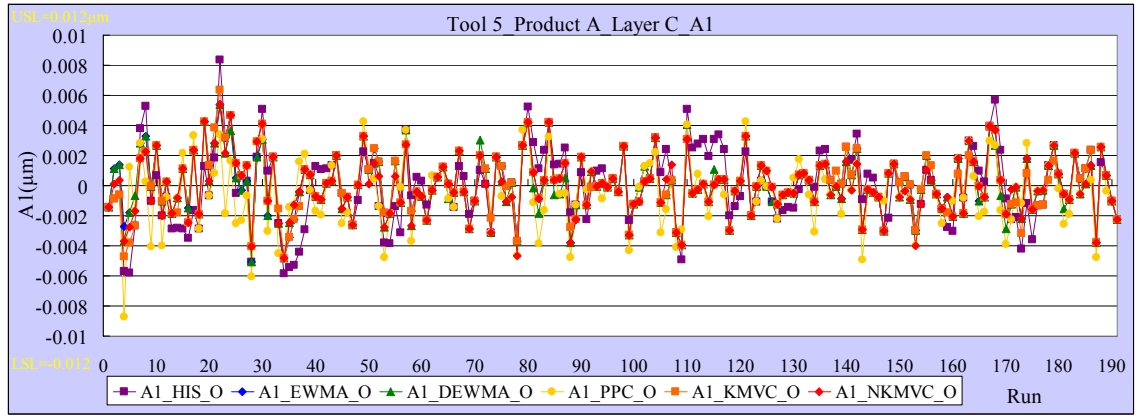


圖 5-3 Tool 5_Product A_Layer C_A1 模擬輸出值暫態響應圖

而將圖 5-3 第 30-40 批次放大成圖 5-4，針對前述單點異常的行為，可以從圖中看出，各控制器除了歷史資料外，在第 34 批次單點異常之後，皆可隨即在 35 批次快速收斂而趨近目標值 $0\mu\text{m}$ ，而 PPC 控制器收斂的速度較其他控制器為快。

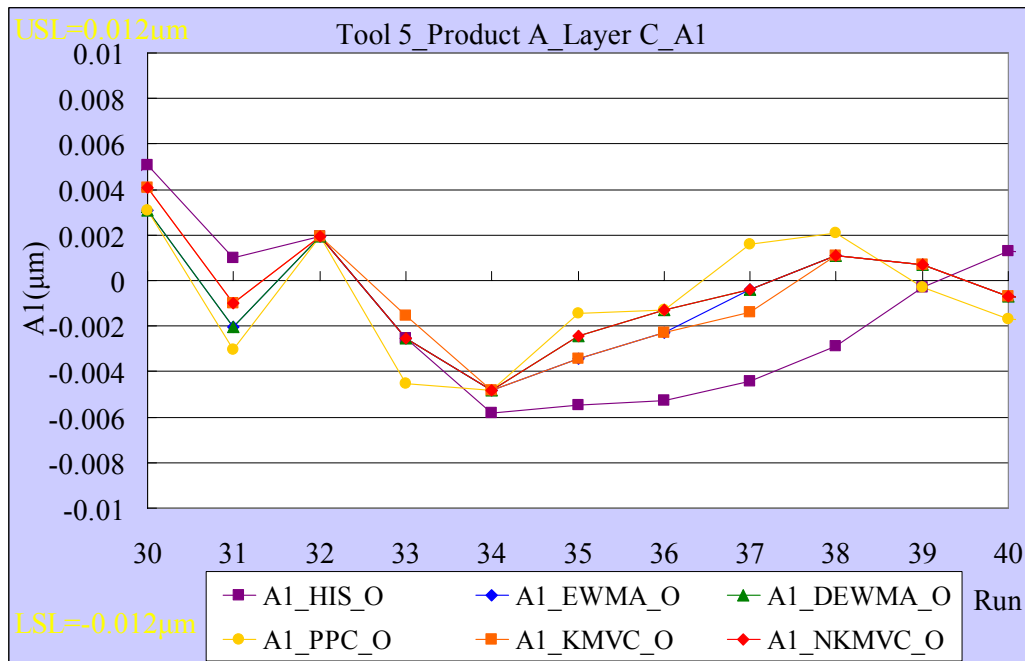


圖 5-4 Tool 5_Product A_Layer C_A1 模擬輸出值暫態響應圖(第 30-40 批次)

以下針對A5、B5、X7及Y8等參數 C_{pk} 較低的現象進行討論。

A5及B5參數模擬的結果 C_{pk} 值偏低，原因可從圖5-5及圖5-6看出，在歷史資料的初期，系統就呈現不穩定的狀態，所以造成前半段量測值的變異過大；根據判斷，為來自前層的變異過大，現有半導體廠內APC系統未將產品在CMP(Cheical Mechanical Polishing)因研磨造成Alignment Mark旋轉及Etch前後Mark位置偏移等效應的資料作為前饋，使各控制器缺少了前饋的資訊；且歷史資料中，經由分析得知有許多人為因素的介入調變，造成半導體廠內APC系統本身並非從頭至尾都是以MA(3)的方法進行補值，而是利用pilot的實驗結果重新reset APC系統，使各控制器遺漏了pilot的資訊。

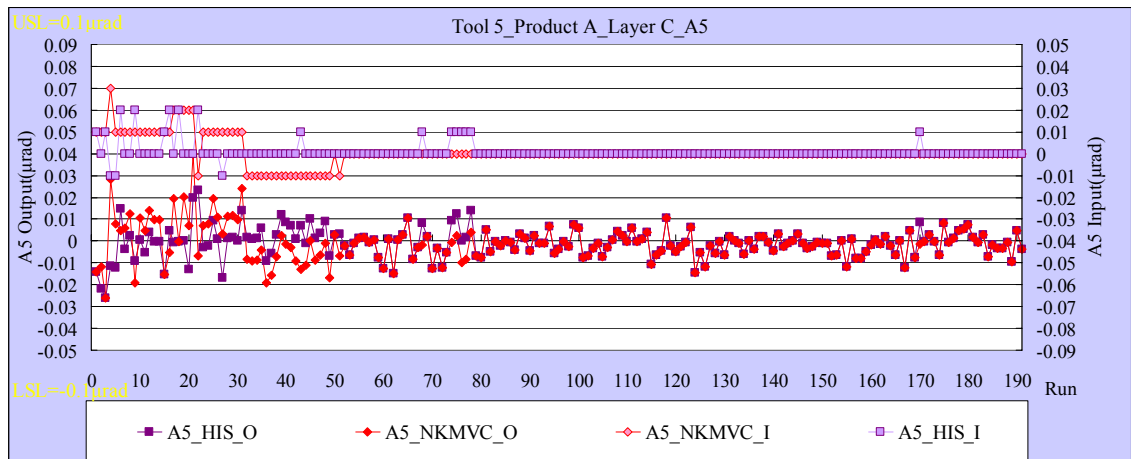


圖 5-5 Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖

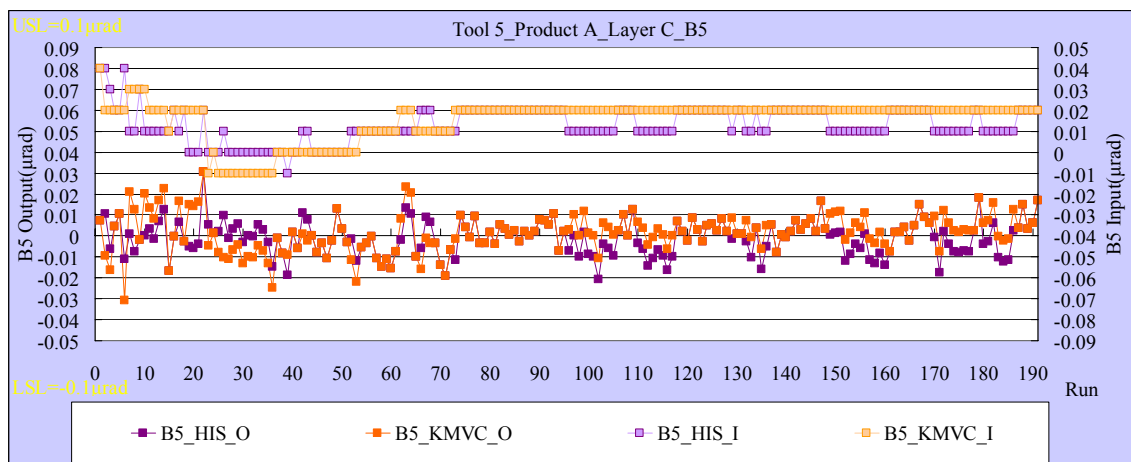


圖 5-6 Tool 5_Product A_Layer C_B5 模擬輸入輸出值暫態響應圖

KMVC 控制器及 NKMVC 控制器的權重會依據最新批次的量測值與歷史量

測值的分布，判斷新的量測值是否大於歷史量測值的 $\pm 3\sigma$ ，以決定控制器的權重為相信量測值的 W 做大幅的調變，或者相信歷史資料的 Γ 而不將較小的干擾列入調變的考慮。

KMVC 控制器及 NKMVC 控制器於前半段製程不穩定時，相信了新的量測值偏大而造成調變的幅度過大使輸出值多次偏離了目標值，若能獲得批次間隔時間的資訊並列入權重調變的機制中，相信能更進一步提升控制器的效能；而圖 5-5 及圖 5-6 的批次放大圖，圖 5-7、圖 5-8 看出，後半段製程穩定時，KMVC 控制器及 NKMVC 控制器則保持輸入值的穩定，不考慮量測誤差所造成的震盪，因此製程輸出值也都較歷史資料接近於目標值。

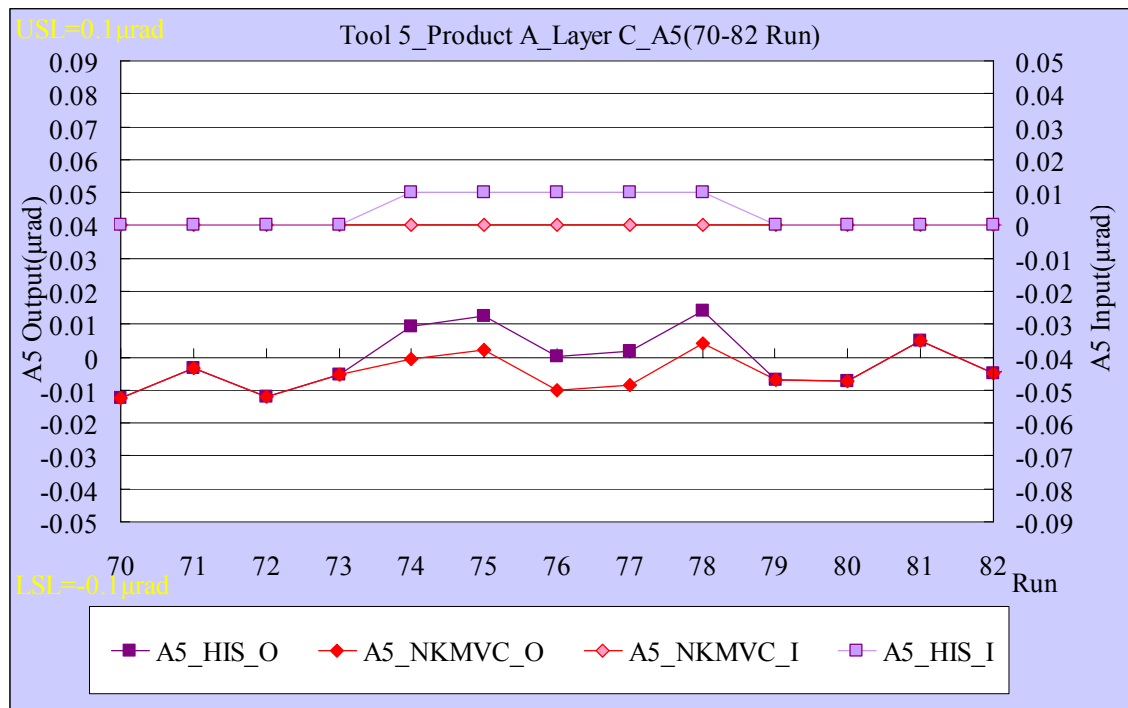


圖 5-7 Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖(70-82 批次)

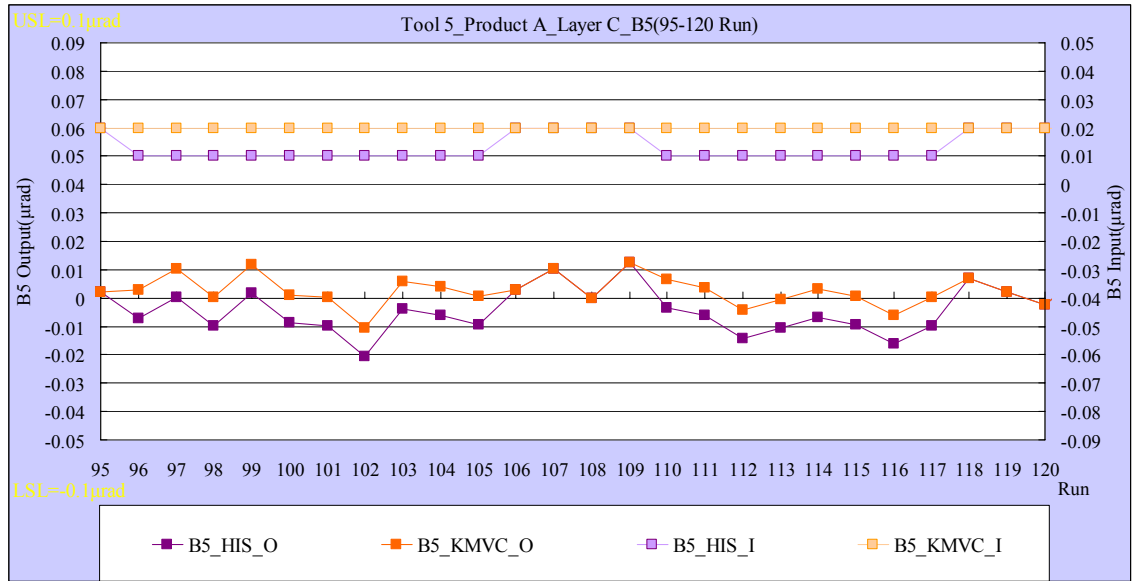


圖 5-8 Tool 5_Product A_Layer C_B5 模擬輸入輸出值暫態響應圖(95-120 批次)

另外可由圖 5-9，A5 參數所有控制器模擬結果看出，由於 PPC 控制器所使用之外插法較不適切於微影製程，造成其更新之截距項於暫態的輸出值的變異較其他控制架構大，使得 C_{pk} 值偏低。

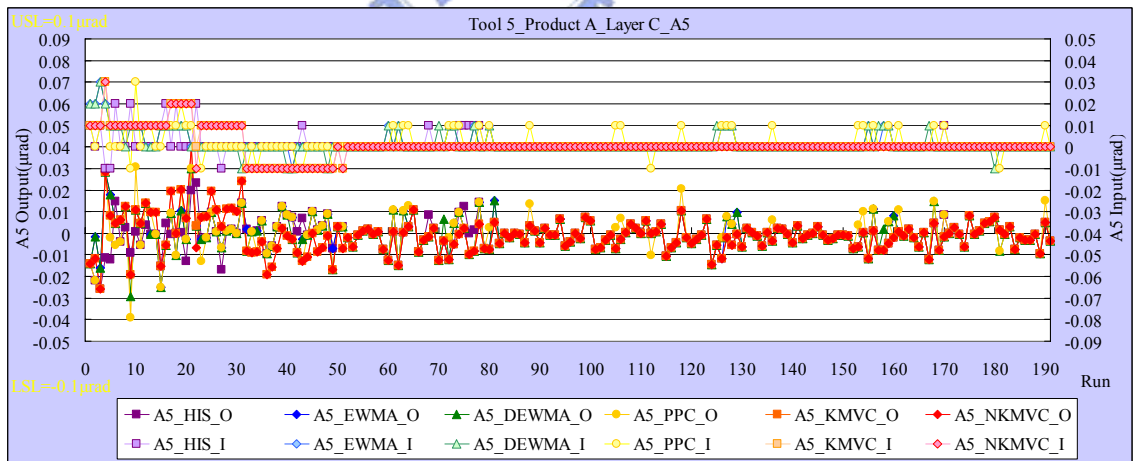


圖 5-9 Tool 5_Product A_Layer C_A5 模擬輸入輸出值暫態響應圖

X7 參數模擬結果 C_{pk} 值偏低的原因可從圖 5-10 看出，由於第 52 批次與第 51 批次間隔時間超過 2 個月，期間機台的漂移，造成製程參數有很大的變化。

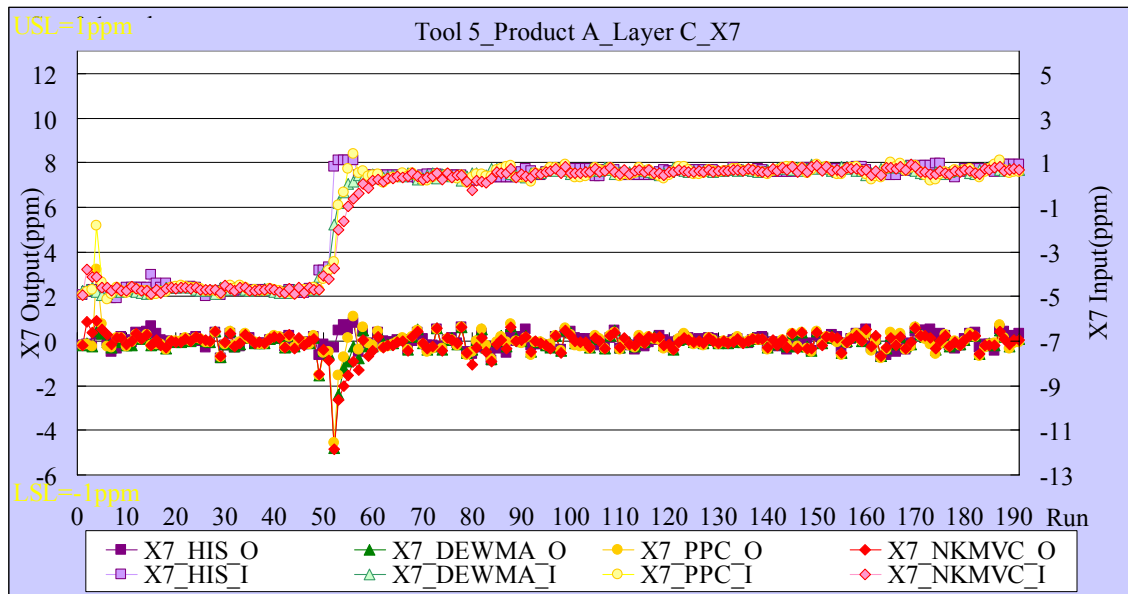


圖 5-10 Tool 5_Product A_Layer C_X7 模擬輸入輸出值暫態響應圖

圖 5-11 為圖 5-10 第 50 至第 60 批次的放大圖，如圖中虛線所示，第 52 批次的輸入值(正方形)，是半導體廠內根據Off-line進行Pilot的結果，所重新給定的輸入初始值，因而未採用歷史資料庫中過期的資訊所帶出的輸入值，廠內未將 Pilot後的較差的輸出值紀錄於歷史資料中，因此計算所得到的 C_{pk} 較其他方法為佳。

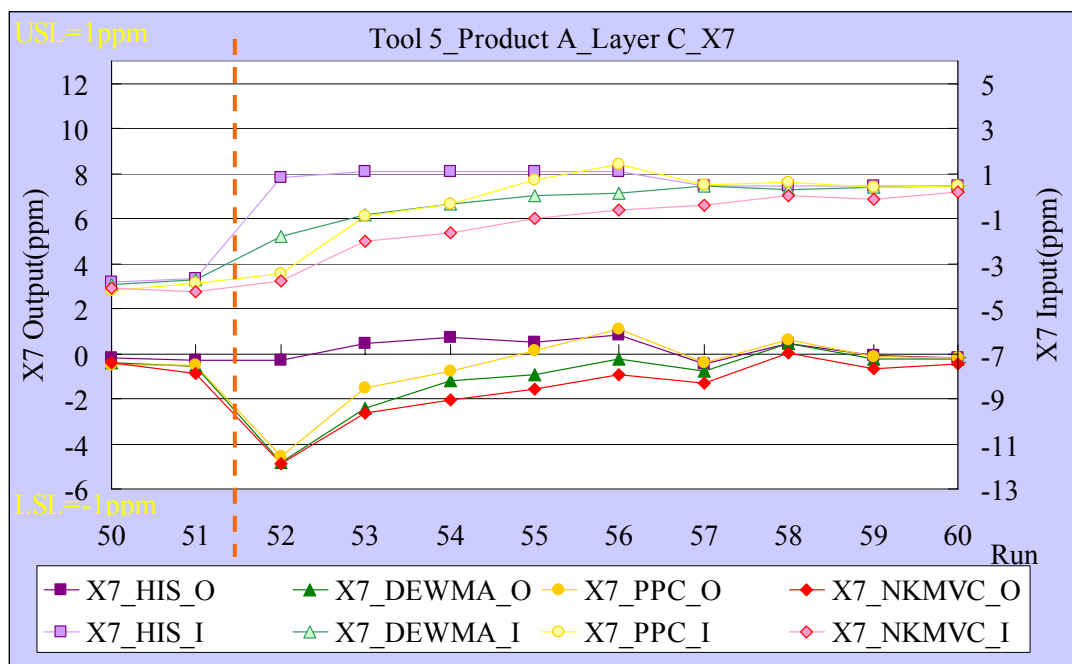


圖 5-11 Tool 5_Product A_Layer C_X7 模擬輸入輸出值暫態響應圖(50-60 批次)

NKMVC在第 52 批次觀察到量測值偏離目標值過遠後，加重了控制器中 W 的權重，因此能隨即在第 53 批次做出立即的補值，使第 53 批次的量測值趨近目標值，不需要讓機台Off-line做Pilot，減少機台的Downtime；然而以此模擬資料的結果所計算出的 C_{pk} ，已經將第 51、52 批次間NKMVC所觀察到的平移干擾也考慮進去，所以造成 C_{pk} 值不如預期。

另外由圖 5-11 可看出經過 Fine Tune 後的 DEWMA 及 PPC 控制器亦能使有極大變異的製程快速的收斂至目標值，在此暫態的表現甚至優於 NKMVC 的收斂速度。

至於Y8 參數模擬結果 C_{pk} 值偏低的原因與X7 相同，故不在此贅述。

另外 KMVC 與 NKMVC 於模擬過程中 10 項製程參數卡曼增益值的變化如圖 5-12 至圖 5-21 所示，KMVC 的卡曼增益約在第五個批次後便會收斂至一定值，而 NKMVC 的卡曼增益則會因為更新斜率矩陣 C 的關係而有微幅的改變。

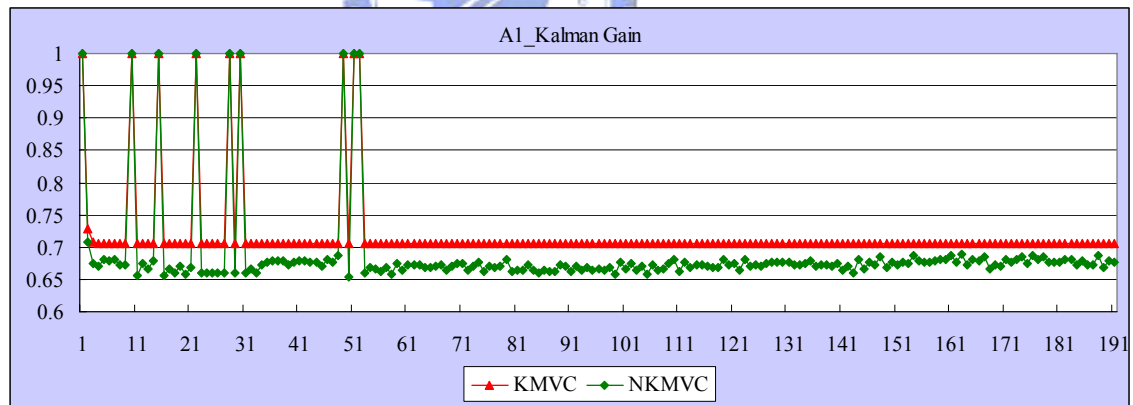


圖 5-12 Tool 5_Product A_Layer C_A1 卡曼增益變化

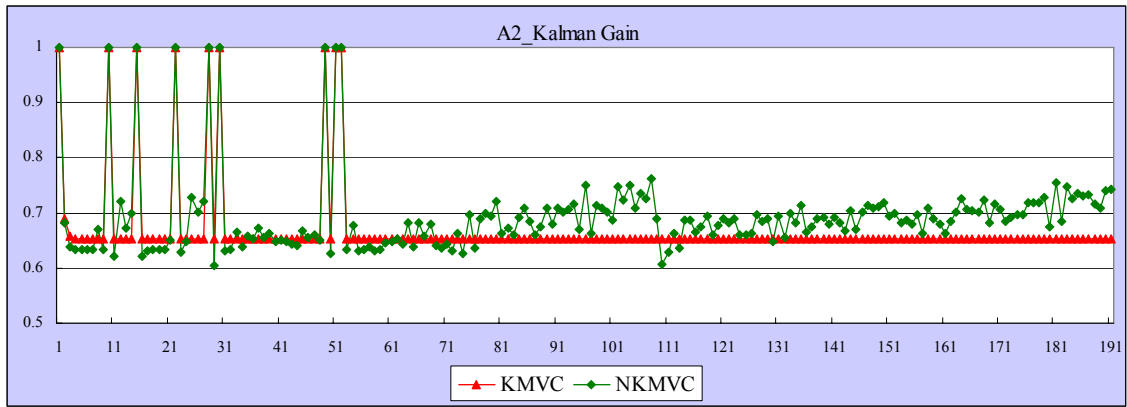


圖 5-13 Tool 5_Product A_Layer C_A2 卡曼增益變化

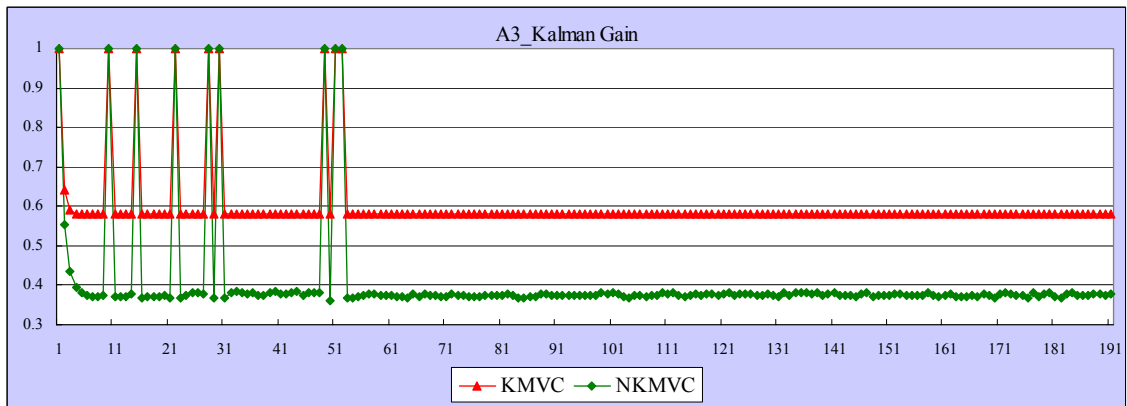


圖 5-14 Tool 5_Product A_Layer C_A3 卡曼增益變化

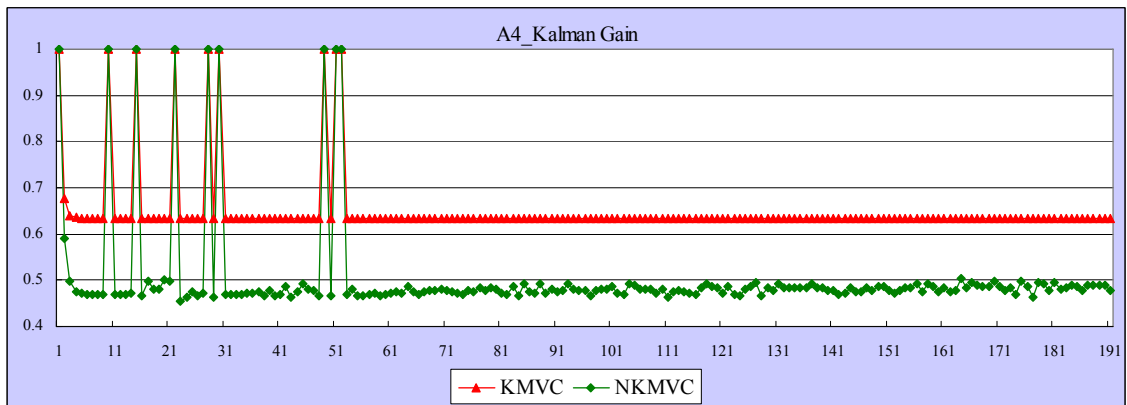


圖 5-15 Tool 5_Product A_Layer C_A4 卡曼增益變化

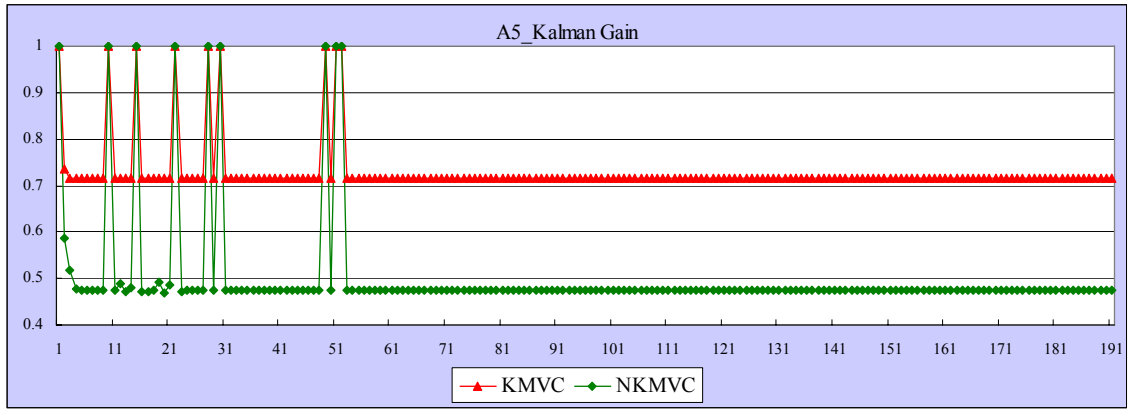


圖 5-16 Tool 5_Product A_Layer C_A5 卡曼增益變化

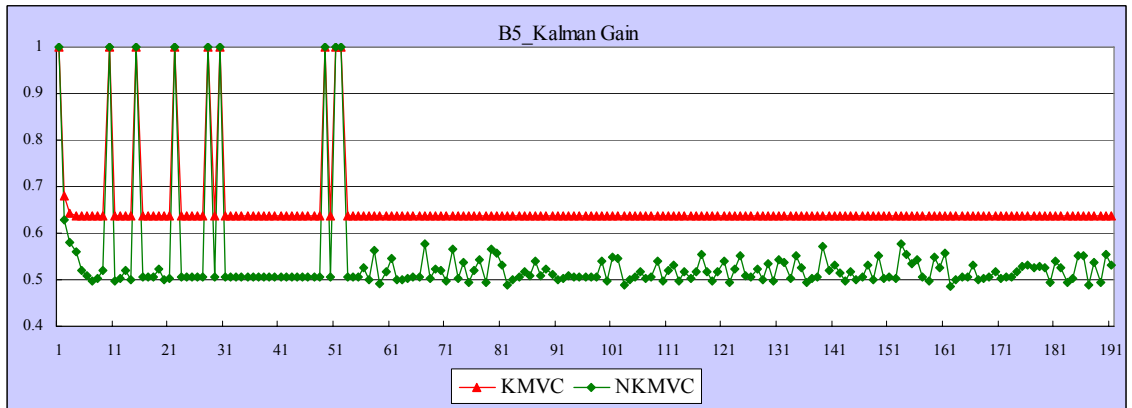


圖 5-17 Tool 5_Product A_Layer C_B5 卡曼增益變化

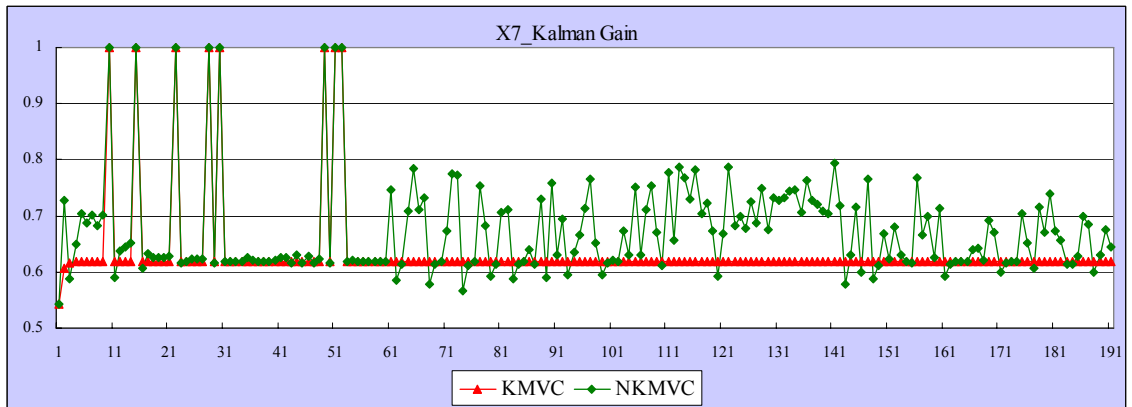


圖 5-18 Tool 5_Product A_Layer C_X7 卡曼增益變化

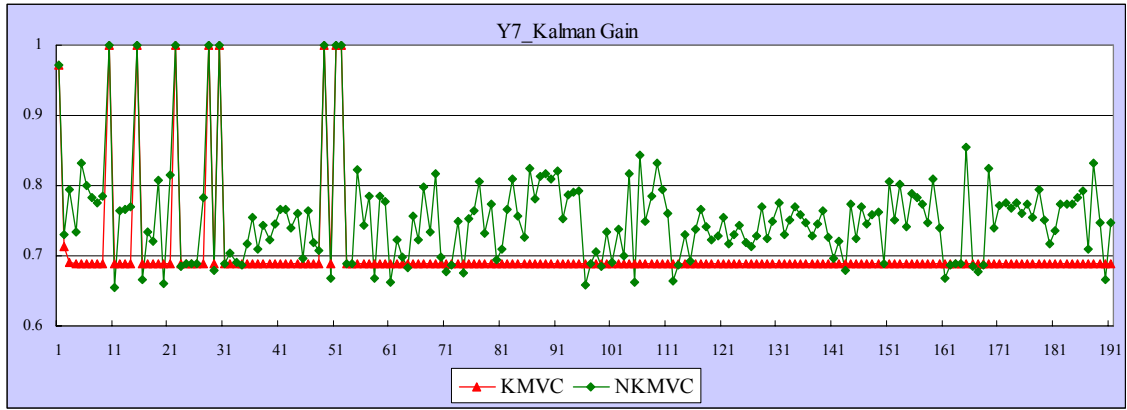


圖 5-19 Tool 5_Product A_Layer C_Y7 卡曼增益變化

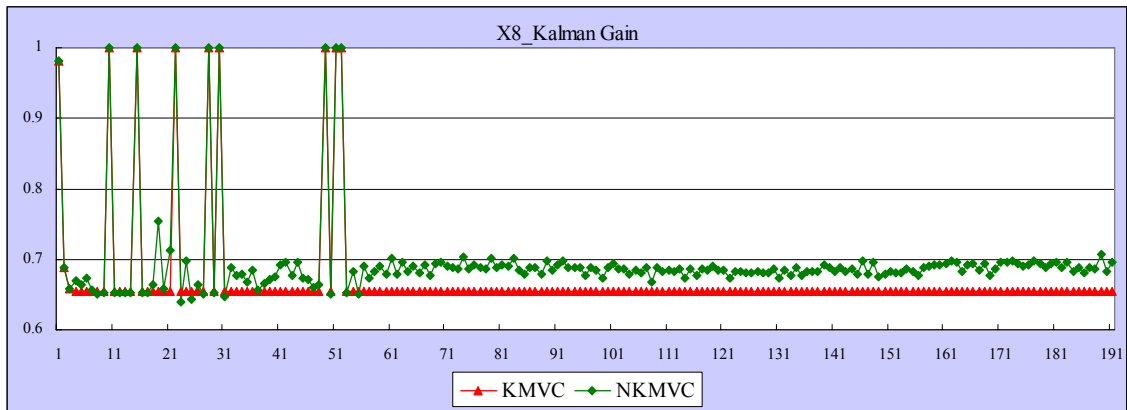


圖 5-20 Tool 5_Product A_Layer C_X8 卡曼增益變化

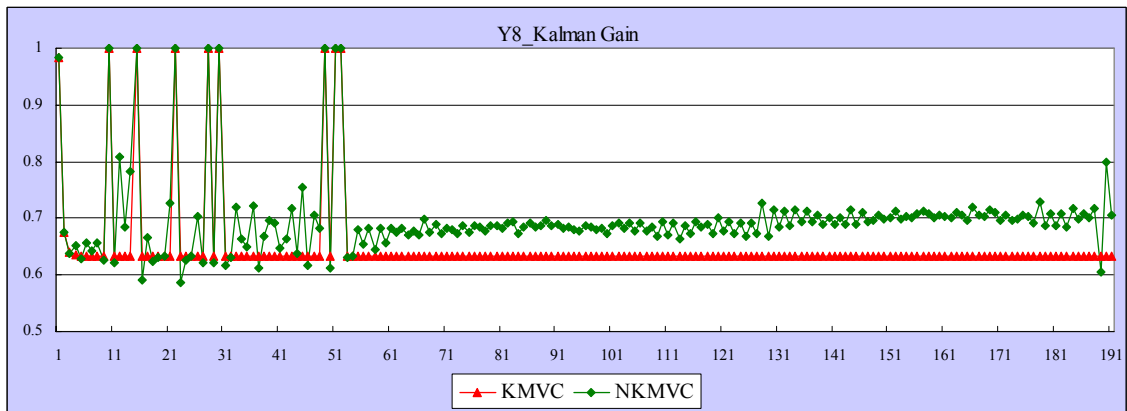


圖 5-21 Tool 5_Product A_Layer C_Y8 卡曼增益變化

除了利用 C_{pk} 作為製程能力表現外，觀察模擬輸入輸出的趨勢可以看出系統暫態響應；另外吾人採用盒鬚圖來觀察各個參數輸出值的變異以及分布情形；圖 5-22 至圖 5-31 為 Tool 5、Product A、Layer C 所有參數歷史資料量測值相對於利用各種控制架構所得到量測值的盒鬚圖，盒中的方點為中位數，盒子的上下蓋代表 $Q3$ 、 $Q1$ 的四分位數，而上下兩條延伸的鬚鬚為非Outlier的最大最小值，如此可看出量測值的變異及分布。由圖中可看出，大多數參數利用KMVC控制器及NKMVC控制器所得到輸出值的變異較原來MA(3)輸出值的變異為小，並且較接近於目標值。以上模擬結果證明KMVC控制架構及NKMVC控制架構的可行性極高

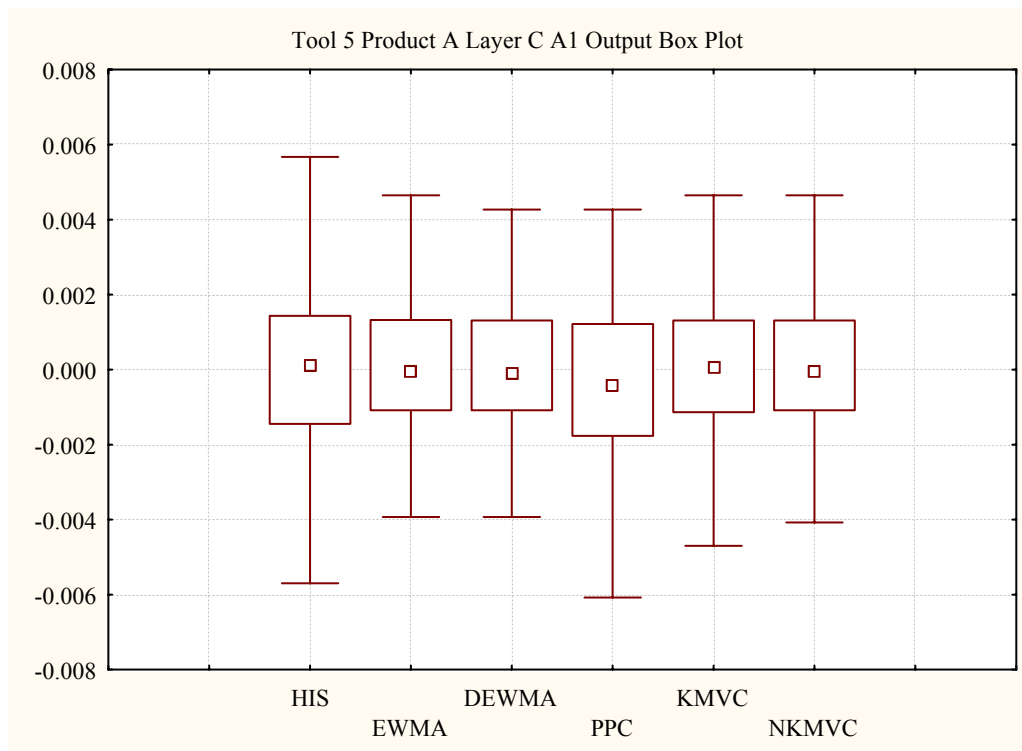


圖 5-22 Tool 5_Product A_Layer C_A1 盒鬚圖

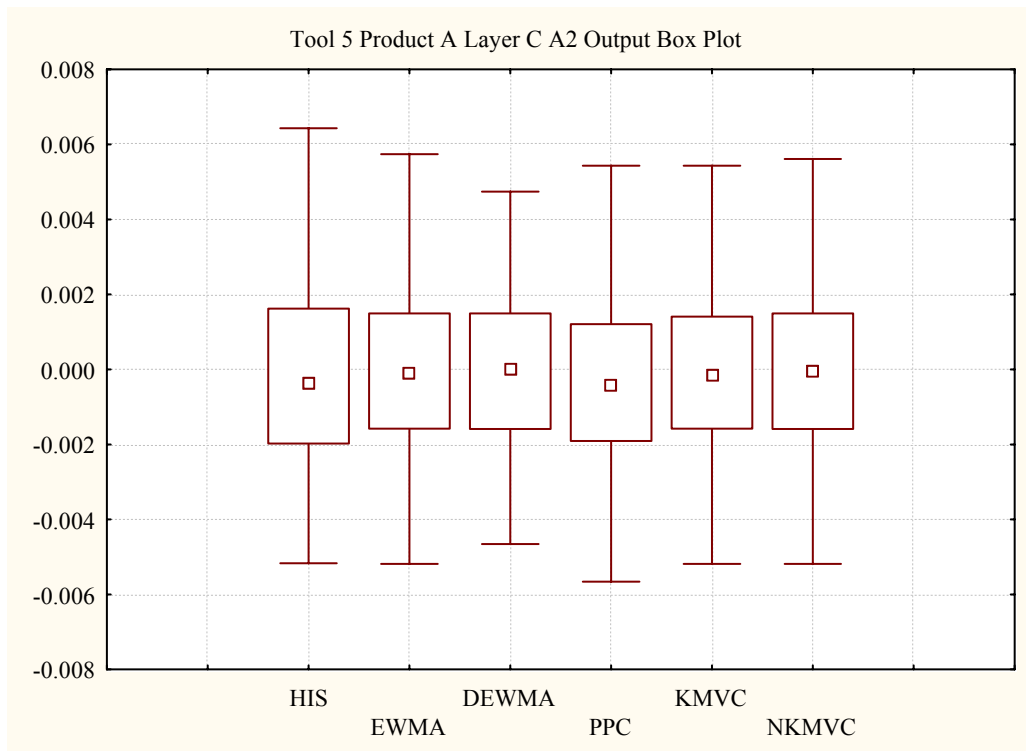


圖 5-23 Tool 5_Product A_Layer C_A2 盒鬚圖

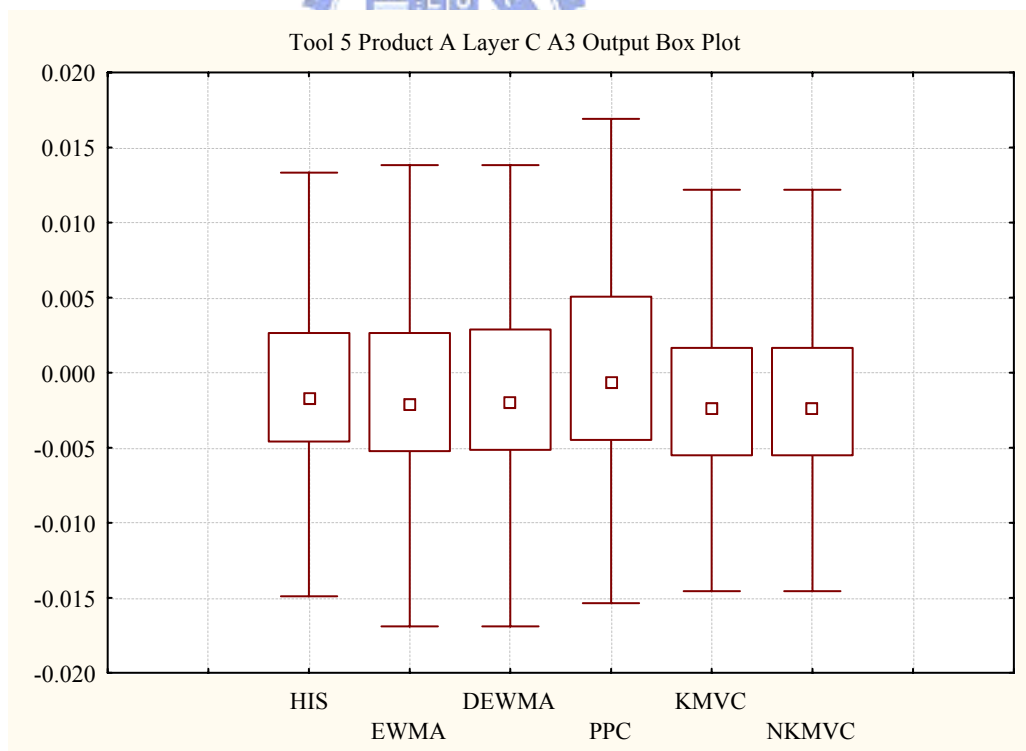


圖 5-24 Tool 5_Product A_Layer C_A3 盒鬚圖

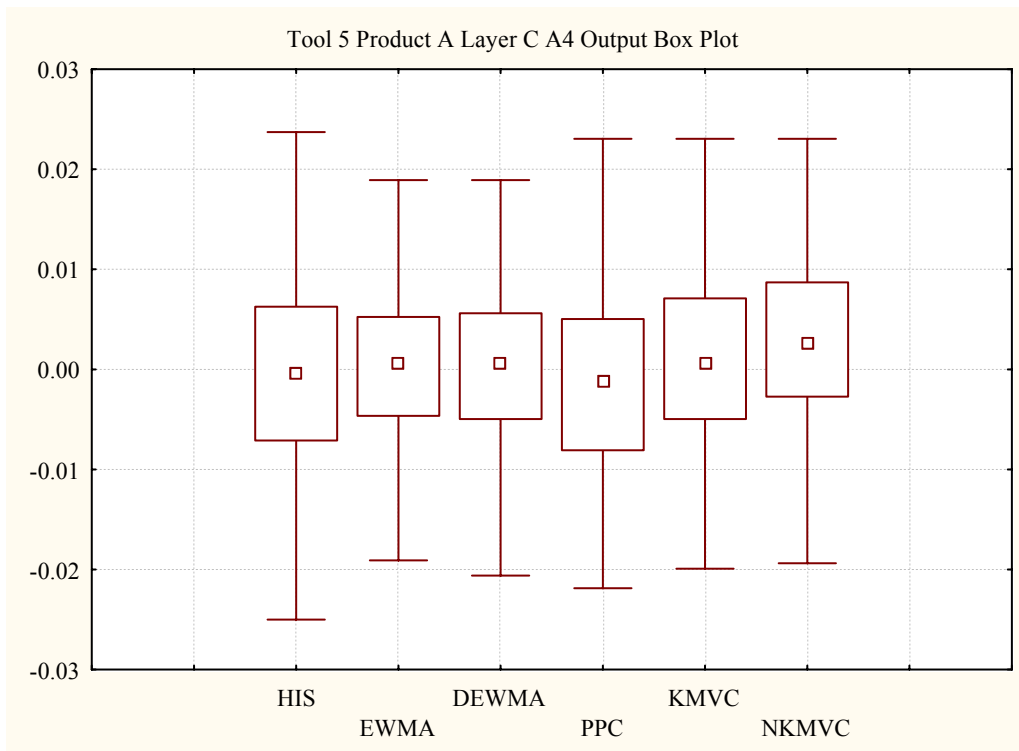


圖 5-25 Tool 5_Product A_Layer C_A4 盒鬚圖

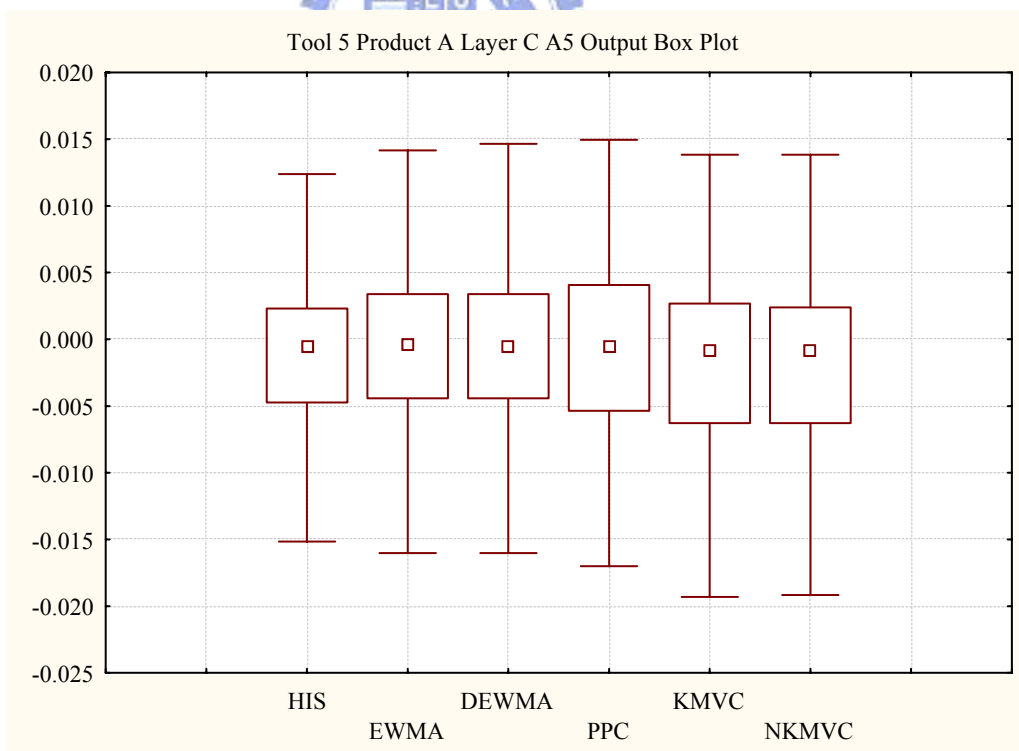


圖 5-26 Tool 5_Product A_Layer C_A5 盒鬚圖

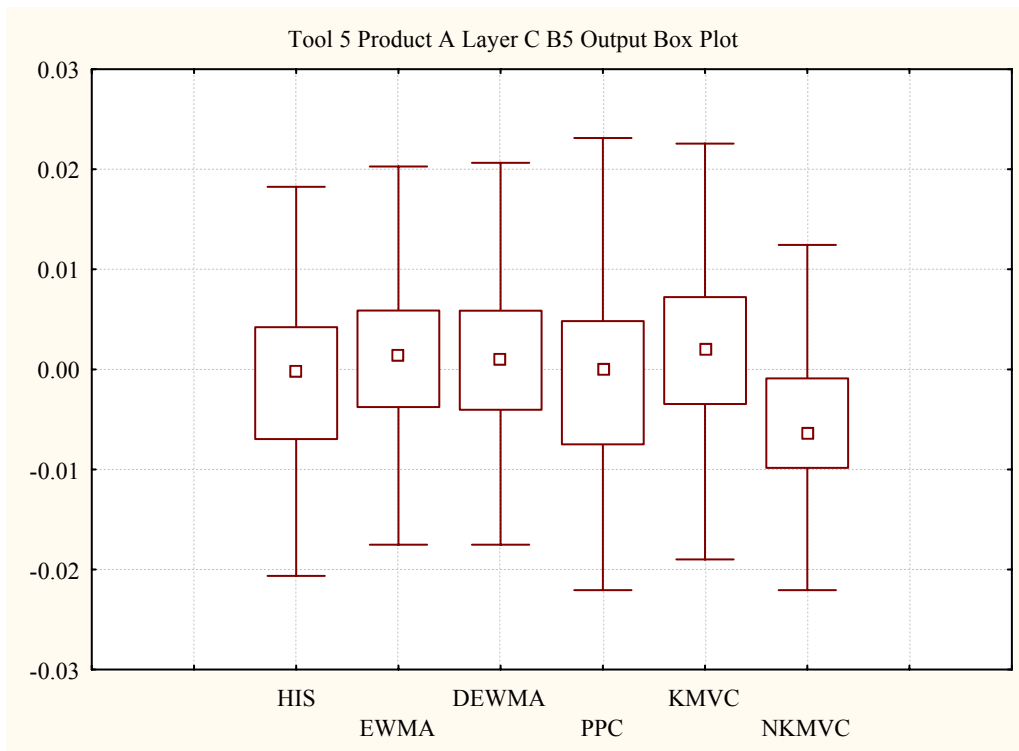


圖 5-27 Tool 5_Product A_Layer C_B5 盒鬚圖

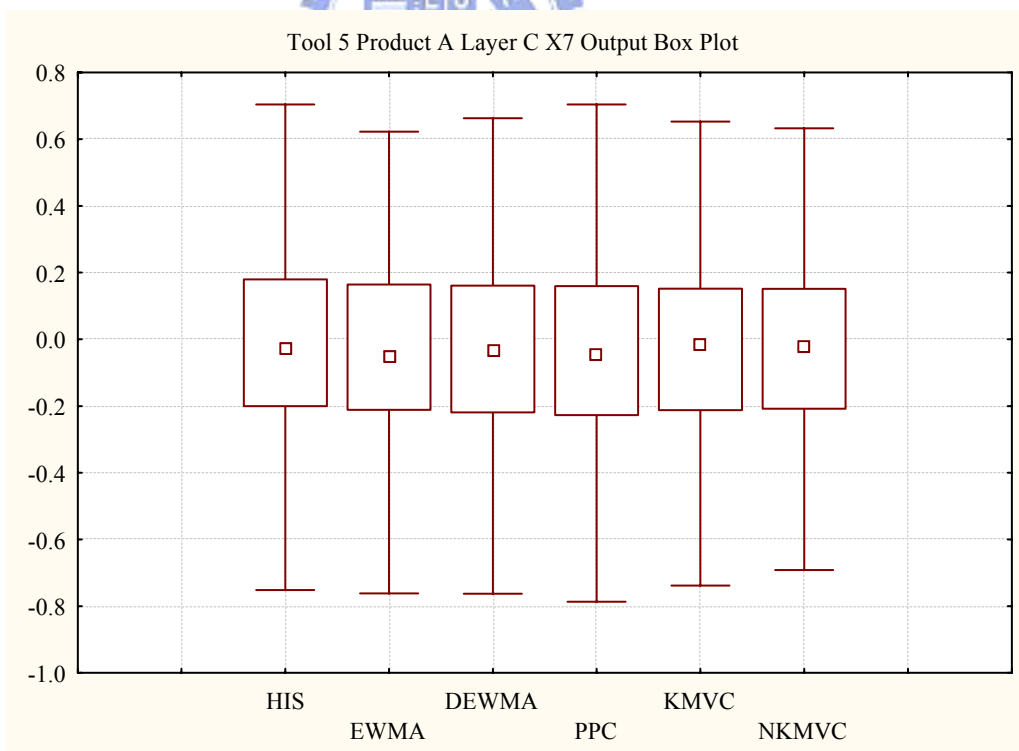


圖 5-28 Tool 5_Product A_Layer C_X7 盒鬚圖

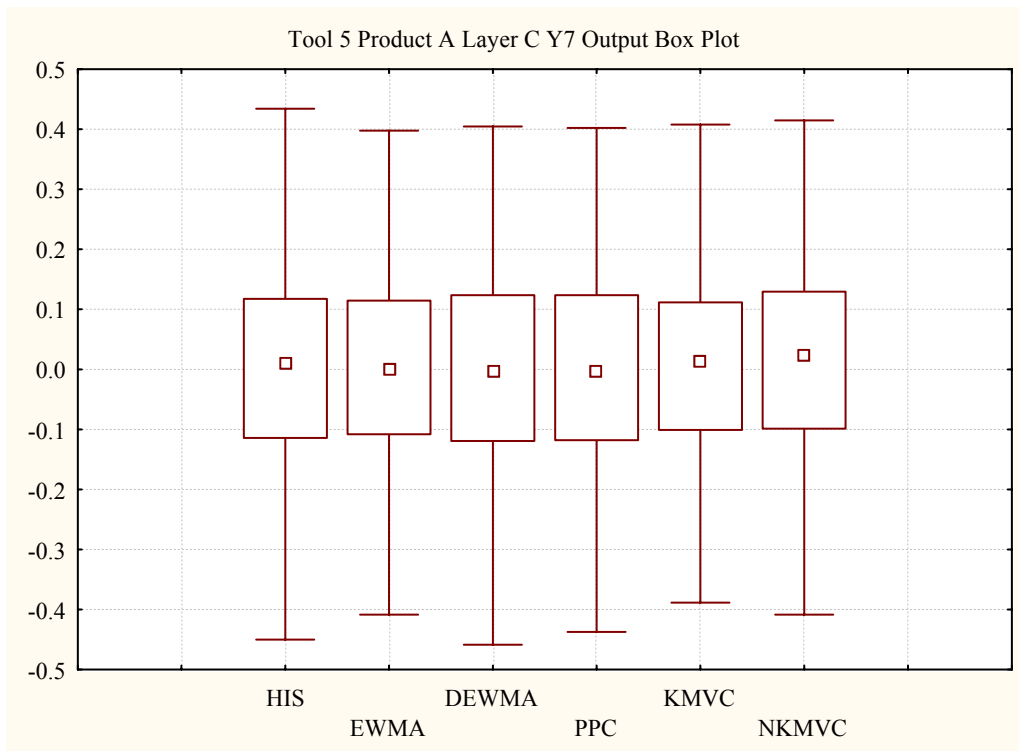


圖 5-29 Tool 5_Product A_Layer C_Y7 盒鬚圖

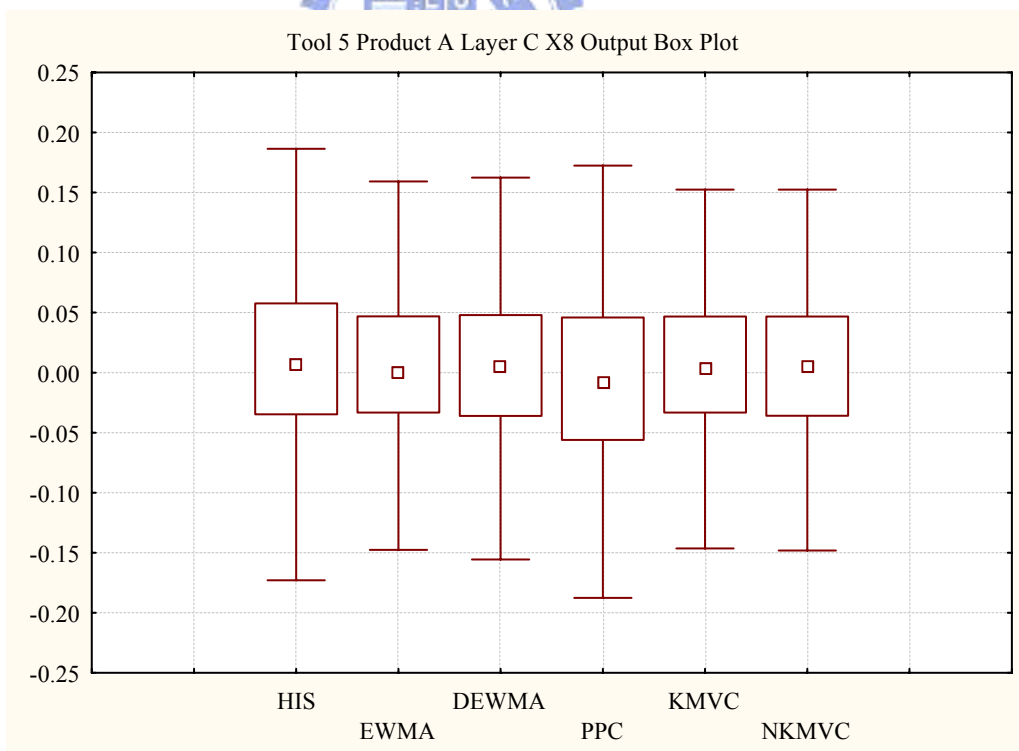


圖 5-30 Tool 5_Product A_Layer C_X8 盒鬚圖

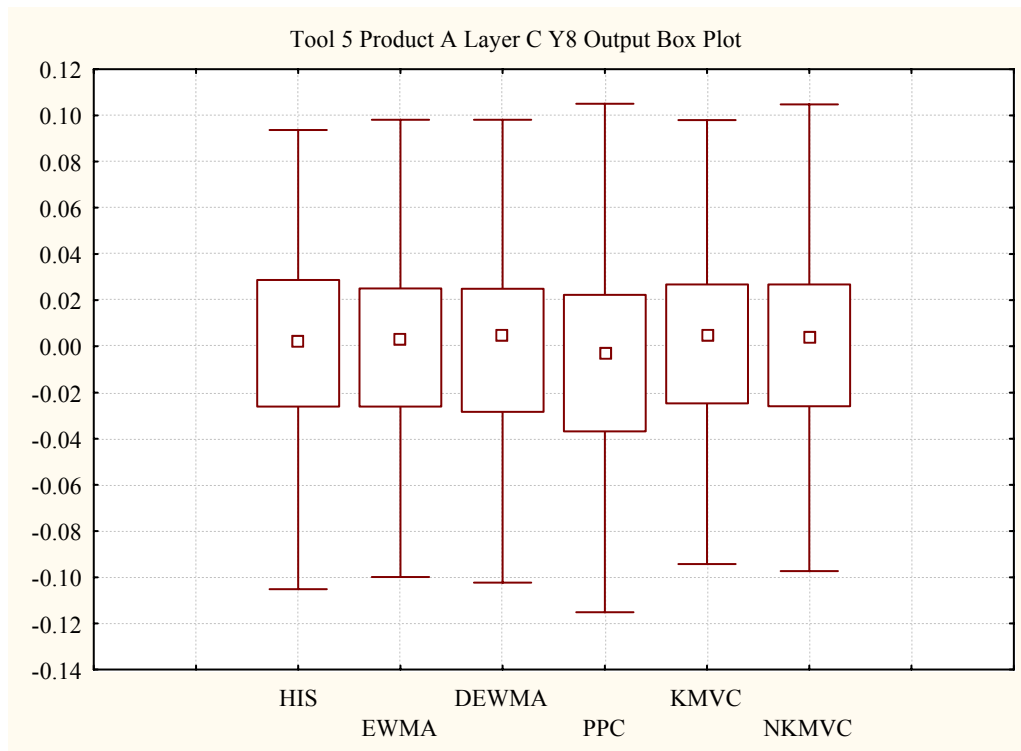


圖 5-31 Tool 5_Product A_Layer C_Y8 盒鬚圖



第六章 實驗驗證

為了驗證 KMVC 控制架構及 NKMVC 控制架構於現行半導體廠內微影製程環境 Overlay 控制確實可行，因此計畫在機台 Off-line 的狀態下，利用 MATLAB 軟體寫成的 KMVC、NKMVC 控制器以及半導體廠 Overlay 量測機台所量測的輸出資料，計算出下一批次建議的機台輸入值後，將所得的建議值輸進機台端，進行 Off-line 的 Run-to-Run 實驗。

由於考慮能不在影響正常生產的情況下進行實驗，與半導體廠內生產部門及黃光工程部協調後達成共識如下：

- (1) 利用廠內線上的產品進行實驗。
- (2) 實驗選用的機台以 A 廠為對象，如果利用 B 廠較新式的機台進行實驗，會影響到的產能較大。
- (3) 考量廠內產能吃緊的緣故，實驗只有 10 個批次，因此只能針對 KMVC 或 NKMVC 其中一種控制架構進行驗證。

基於以上共識，實驗機台改以 A 廠為主，工程部門又建議以 Tool 4，Tool 5 以及 Tool 6 機台為優先對象，因此，吾人便針對這三台機台最近一段時間 Run 貨的情形做了調查。

考量最近機台的 WIP (Wafer In Progress)，以及歷史資料的充足性，方便控制器能精確地掌握實驗的初始狀態，因此選擇下列：

- (1) Tool 4 機台、A 產品的高密度絕緣層；
- (2) Tool 6 機台、A 產品的金屬(Metal)層；
- (3) Tool 6 機台、E 產品的金屬層，為實驗用的優先對象。

在實驗前一天確認各機台 WIP 後，決定以 Tool 6 機台、E 產品的金屬層當

作正式的實驗對象，接著針對該機台產品進行歷史資料模擬結果的分析，得知製程模型 10 項參數的增益皆接近 1；且利用歷史資料模擬 KMVC 及 NKMVC，分析結果為 KMVC 之效能較佳，因此決定採用 KMVC 架構，亦即假設製程模型斜率為單位矩陣來進行實驗。利用 Tool 6 機台、E 產品、金屬層的歷史資料，經由 KMVC 控制機制先計算得到所需要的初始值後，便正式開始執行實驗。

實驗執行日期為 2007 年 6 月 11 日及 6 月 12 日，在半導體廠黃光工程部的大力配合，以及考量廠內實際產能的情況下，順利的完成了 10 個批次的實驗。

為了能清楚地呈現實驗的成效，吾人將 Tool 6 機台前 40 筆產品 E，金屬層的歷史資料作為比對的基準，藉由 Trend Chart、Box Plot 以及 C_{pk} 值，做為指標來比較實驗結果與歷史資料。

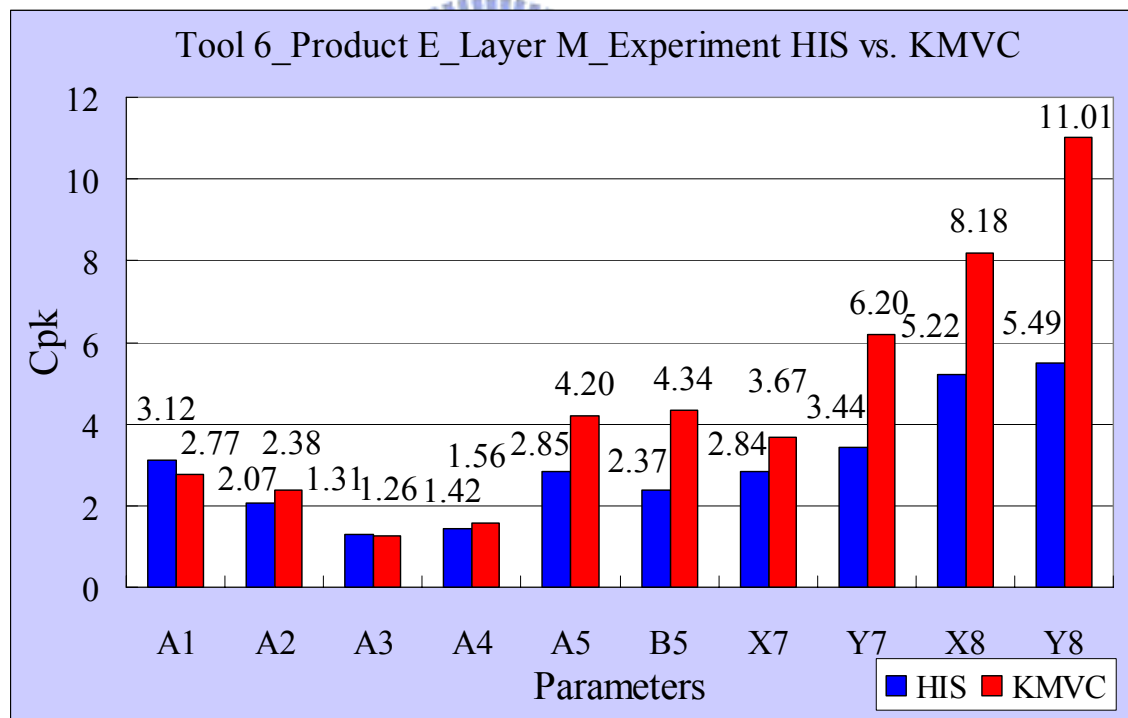


圖 6-1 Tool 6_Product E_Layer M實驗：歷史資料 vs. KMVC 實驗結果之 C_{pk}

圖 6-1 為經由歷史資料與實驗數據計算所得繪製成的 C_{pk} 圖，可以從圖中很明顯的看出，除了A1 及A3 參數，實驗所得 C_{pk} 值略低於歷史資料的 C_{pk} 值外，其餘參數實驗所得 C_{pk} 值遠高於歷史資料的 C_{pk} 值，表示KMVC控制架構於半導體廠內黃光微影Overlay製程確實有效且成效非凡。

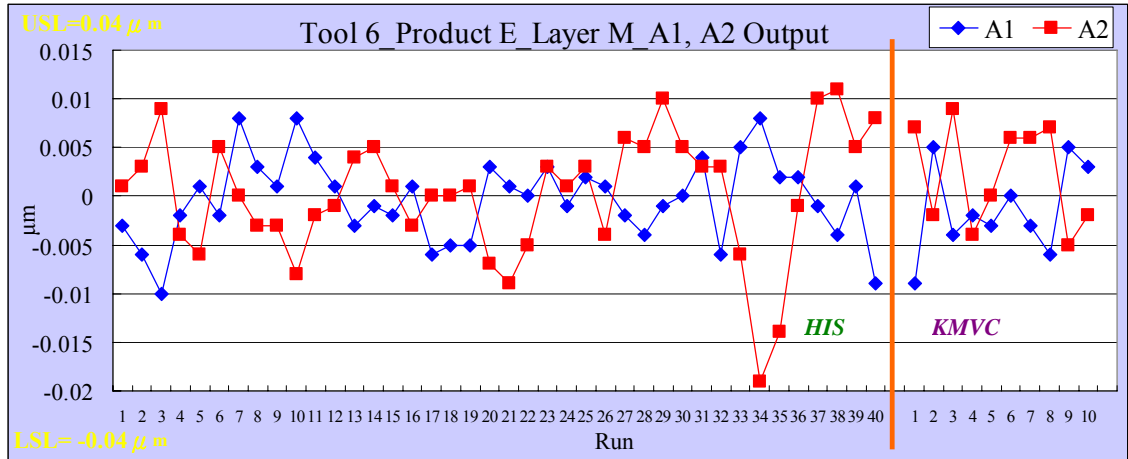


圖 6-2 Tool 6_Product E_Layer M_A1, A2 輸出值 Trend Chart

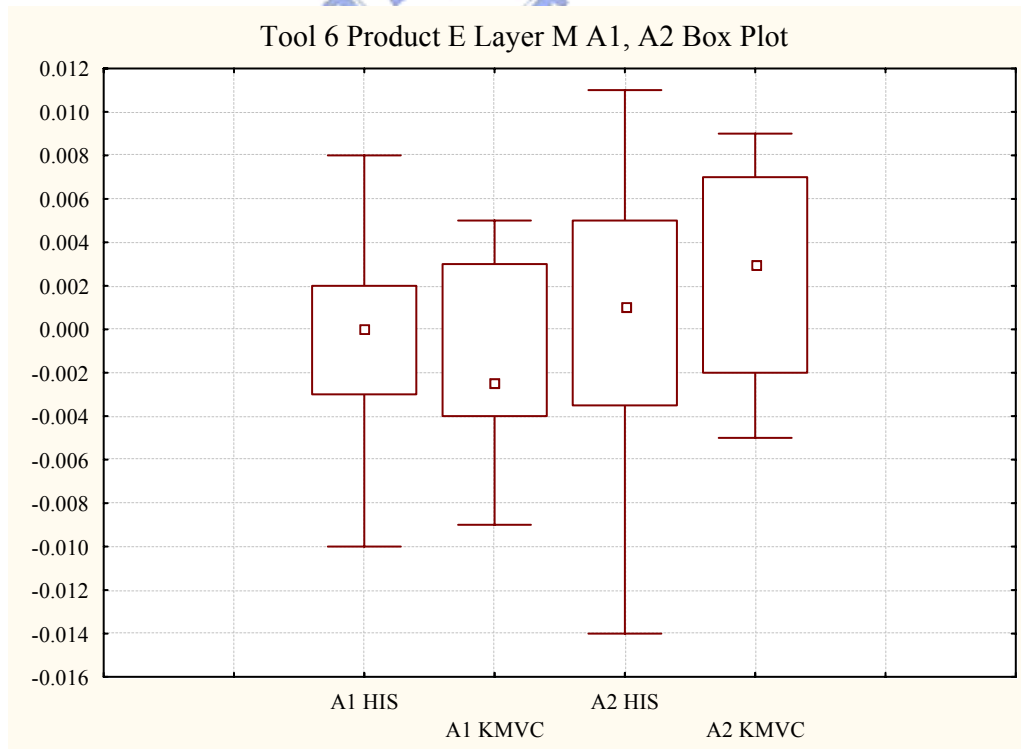


圖 6-3 Tool 6_Product E_Layer M_A1, A2 輸出值盒鬚圖

接著用 Trend Chart 及盒鬚圖來呈現實驗的結果：圖 6-2 為 A1、A2 輸出值的 Trend Chart，分隔線前 40 個批次為歷史資料，分隔線後 10 個批次為實驗數據，菱形代表 A1 的輸出值，方形代表 A2 的輸出值；圖 6-3 為根據 Trend Chart 中歷史資料以及實驗數據所繪製的盒鬚圖，盒中的方點為中位數，盒子的上下蓋代表 Q3、Q1 的四分位數，而上下兩條延伸的鬚鬚為非 Outlier 的最大最小值，如此可看出量測值的分布。

由圖 6-3 可以很明顯的看出 KMVC 的最大最小值的分布都比歷史資料的分布為小，然而因實驗次數不足，導致 A1、A2 實驗所得的四分位數較歷史資料所得四分位數小，但仍能證明 KMVC 控制架構對於半導體廠黃光微影 Overlay 製程的控制效果。

圖 6-4、6-6、6-8 及 6-10 分別為 A3-A4、A5-B5、X7-Y7 及 X8-Y8 的 Trend Chart，而圖 6-5、6-7、6-9 及 6-11 分別為 A3-A4、A5-B5、X7-Y7 及 X8-Y8 的盒鬚圖；從圖 6-4，A3 及 A4 的 Trend Chart 無法看出明顯的改善，但從圖 6-5，A3 及 A4 的盒鬚圖可以看出實驗結果的最大最小值與四分位數，皆優於歷史資料的結果；至於 A5、B5、X7、Y7、X8 及 Y8 更可清楚地從 Trend Chart 看出實驗結果的輸出值較歷史資料結果好，另外從盒鬚圖亦可看出 KMVC 控制架構所得實驗輸出的最大最小值，以及四分位數之分布，較歷史資料輸出值分布集中，且皆有顯著的改善。

圖 6-12 至圖 6-21 為 10 次 KMVC 實驗中卡曼增益的變化，由圖中可以看出，卡曼增益在第五個批次便收斂至一定值。

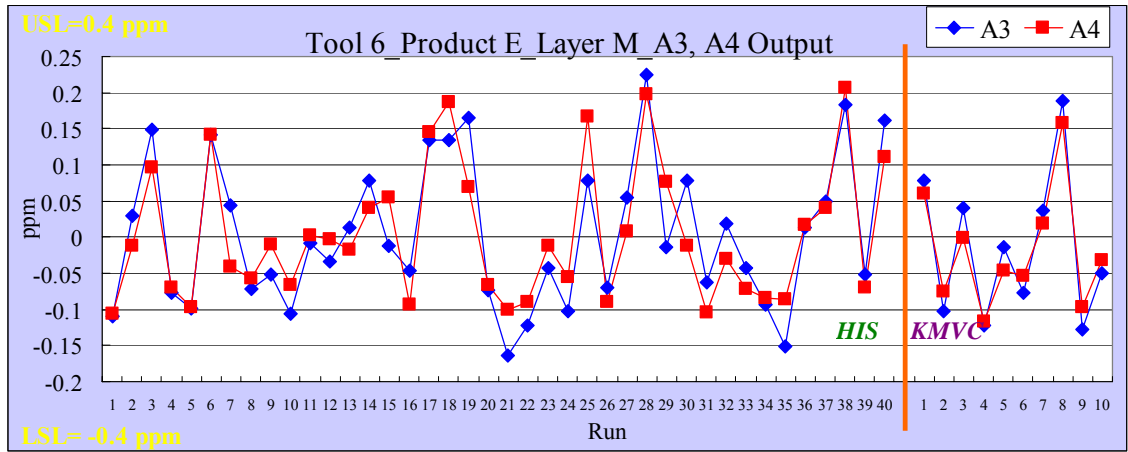


圖 6-4 Tool 6_Product E_Layer M_A3, A4 輸出值 Trend Chart

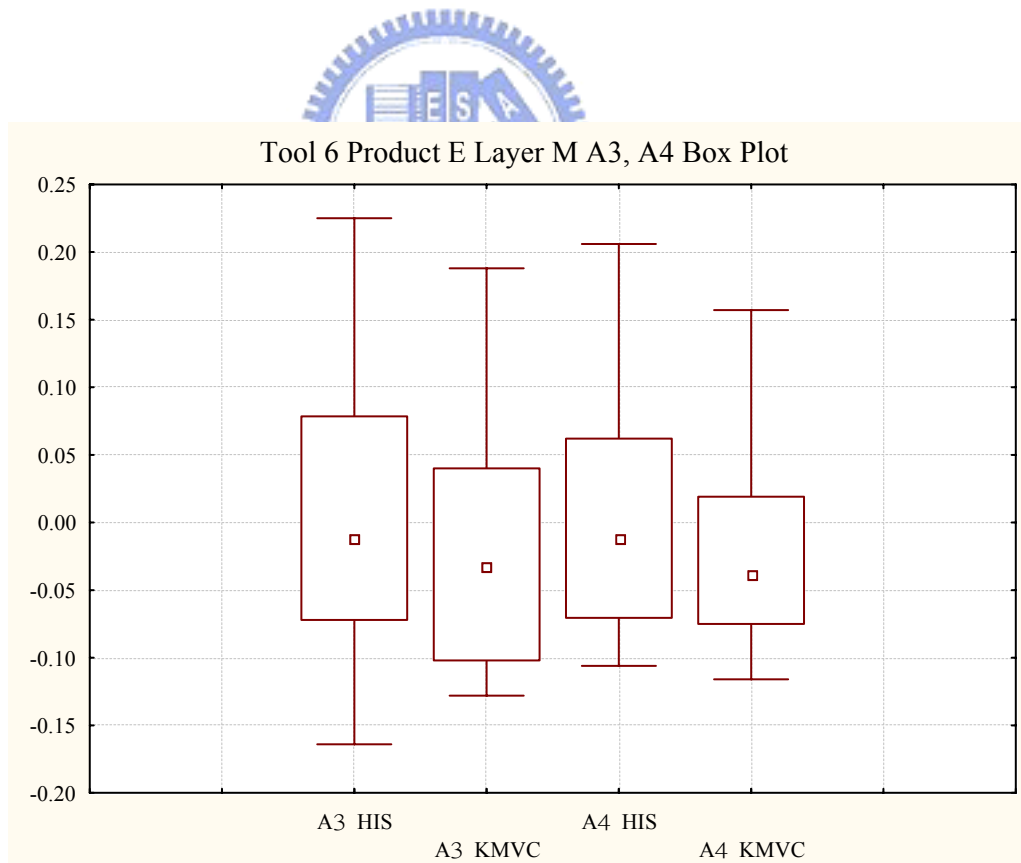


圖 6-5 Tool 6_Product E_Layer M_A3, A4 輸出值盒鬚圖

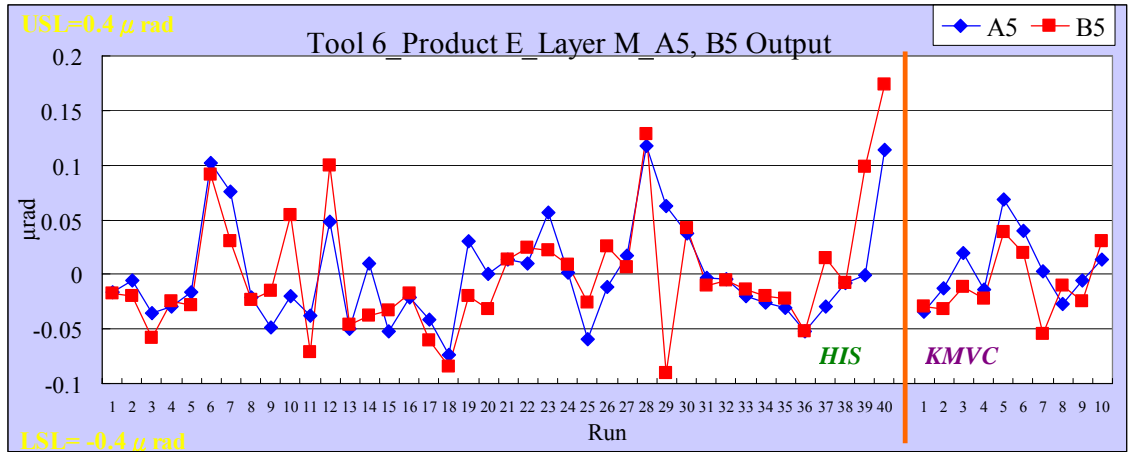


圖 6-6 Tool 6_Product E_Layer M_A5, B5 輸出值 Trend Chart

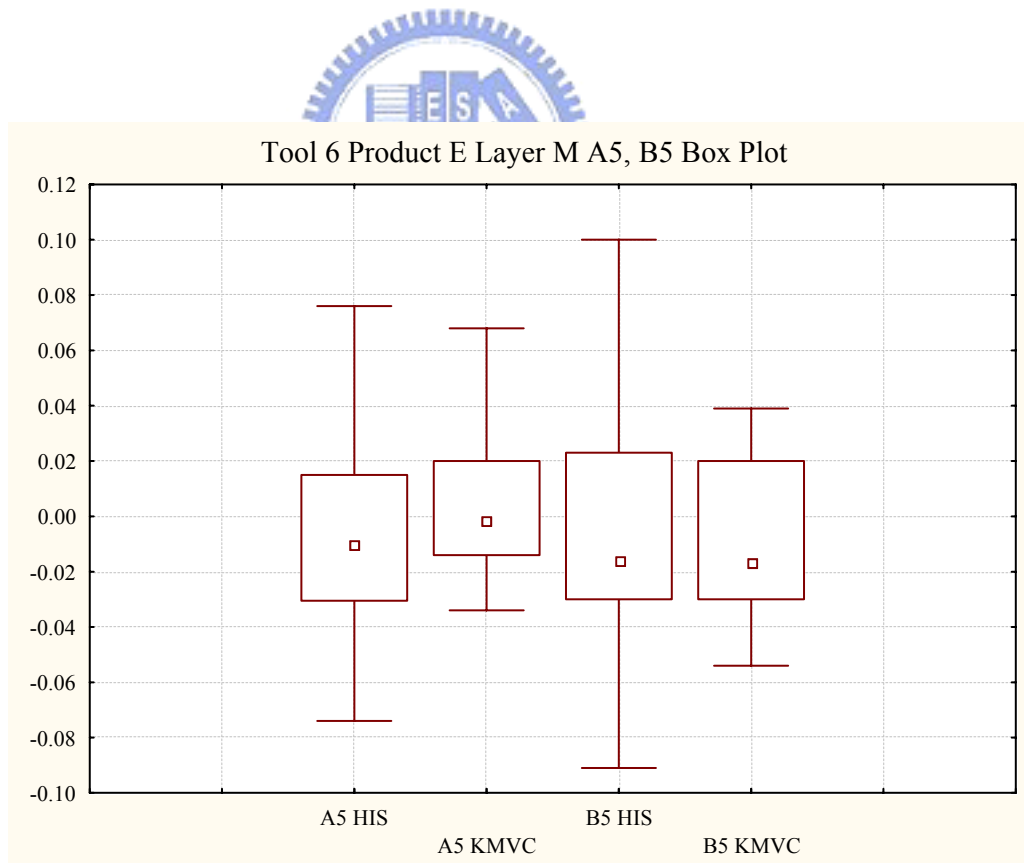


圖 6-7 Tool 6_Product E_Layer M_A5, B5 輸出值盒鬚圖

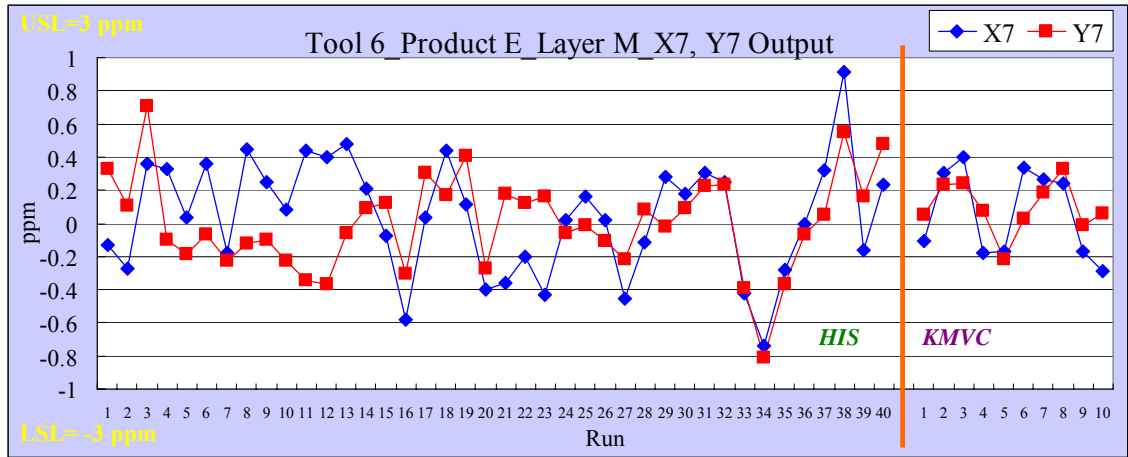


圖 6-8 Tool 6_Product E_Layer M_X7, Y7 輸出值 Trend Chart

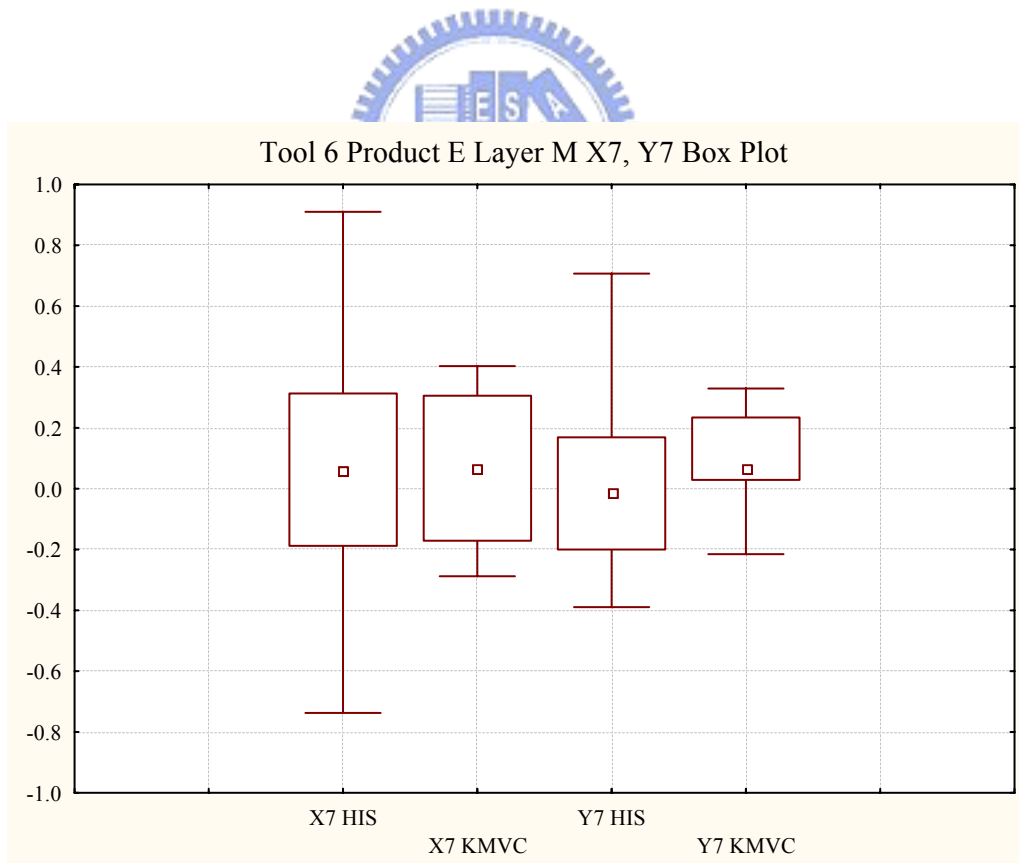


圖 6-9 Tool 6_Product E_Layer M_X7, Y7 輸出值盒鬚圖

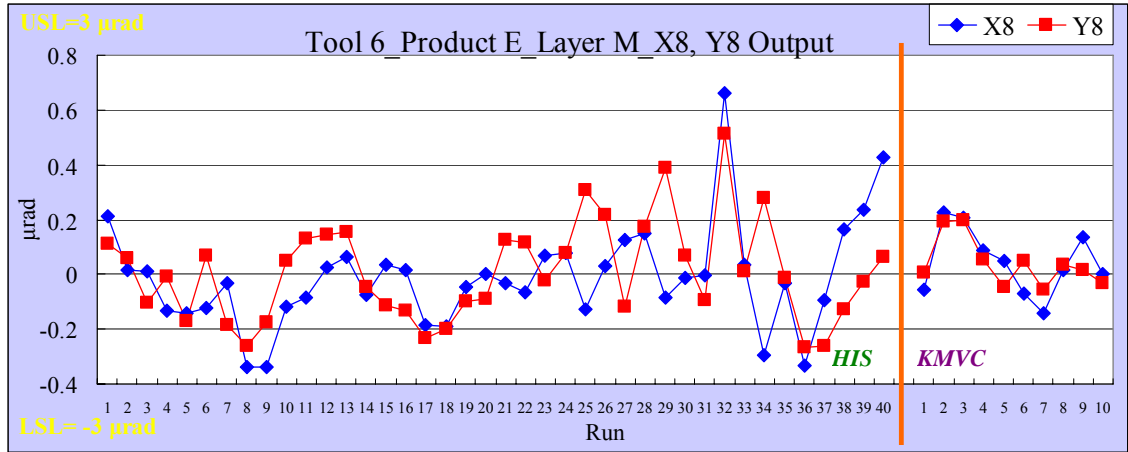


圖 6-10 Tool 6_Product E_Layer M_X8, Y8 輸出值 Trend Chart

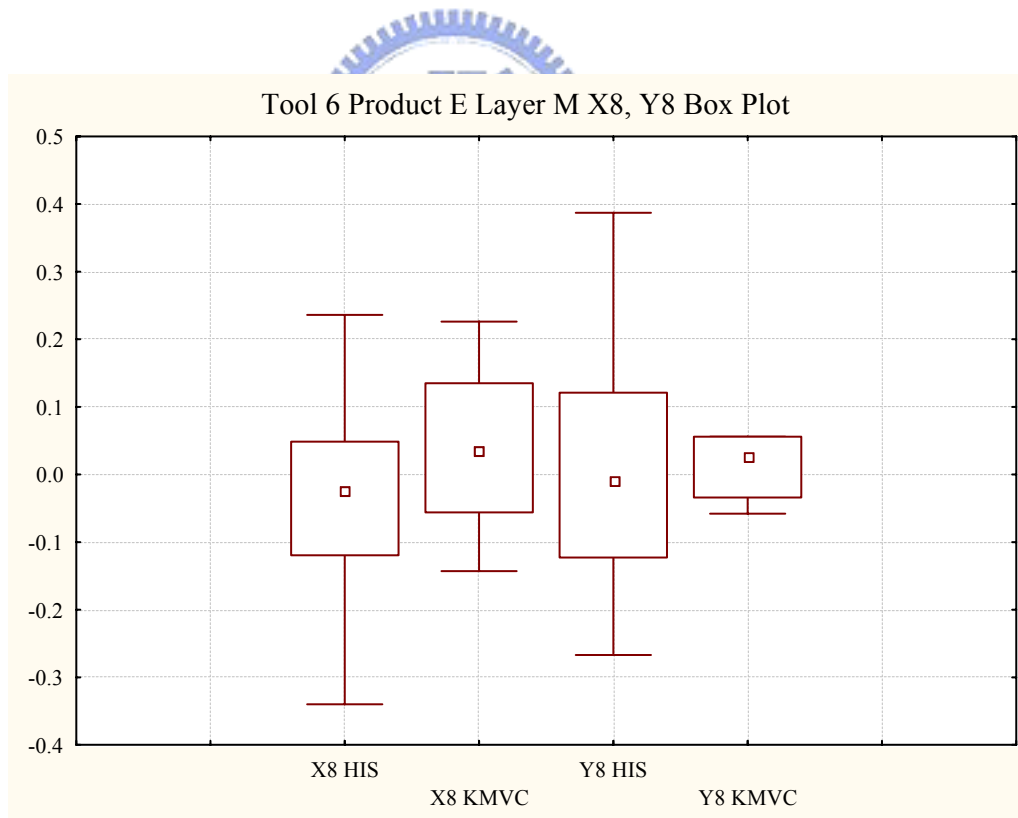


圖 6-11 Tool 6_Product E_Layer M_X8, Y8 輸出值盒鬚圖

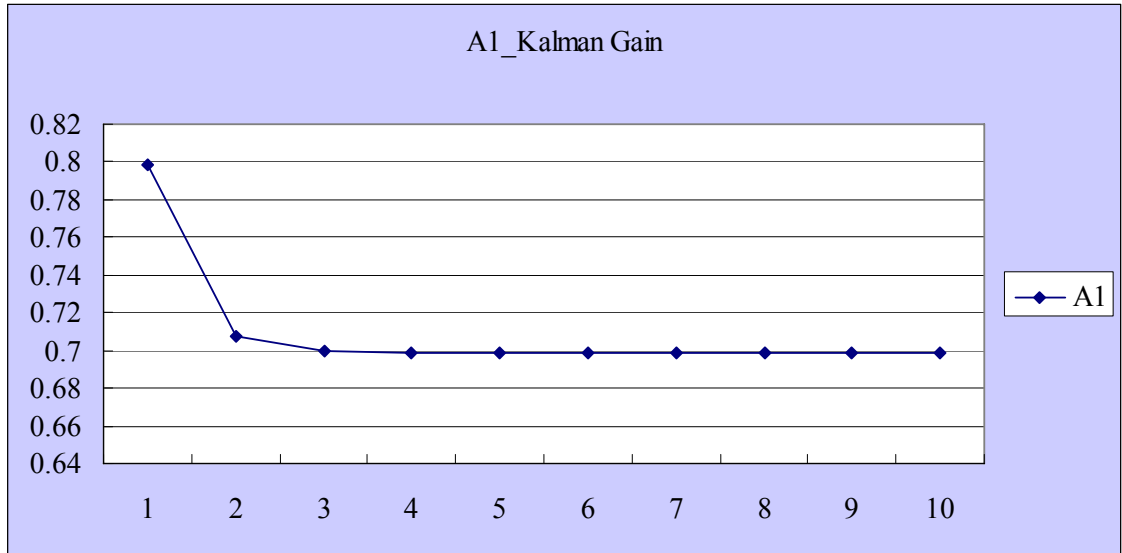


圖 6-12 Tool 6_Product E_Layer M_A1 卡曼增益變化

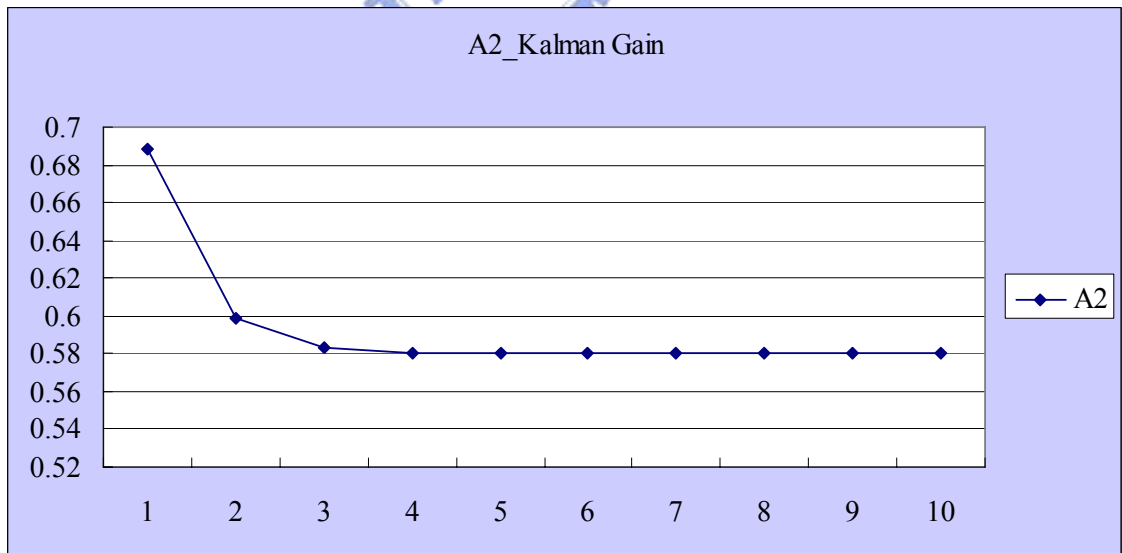


圖 6-13 Tool 6_Product E_Layer M_A2 卡曼增益變化

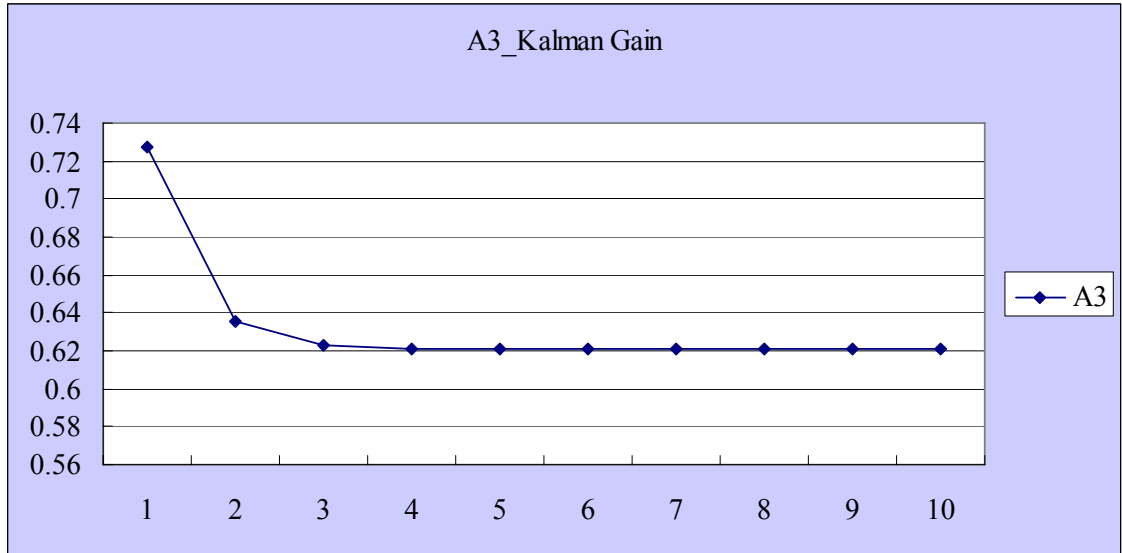


圖 6-14 Tool 6_Product E_Layer M_A3 卡曼增益變化

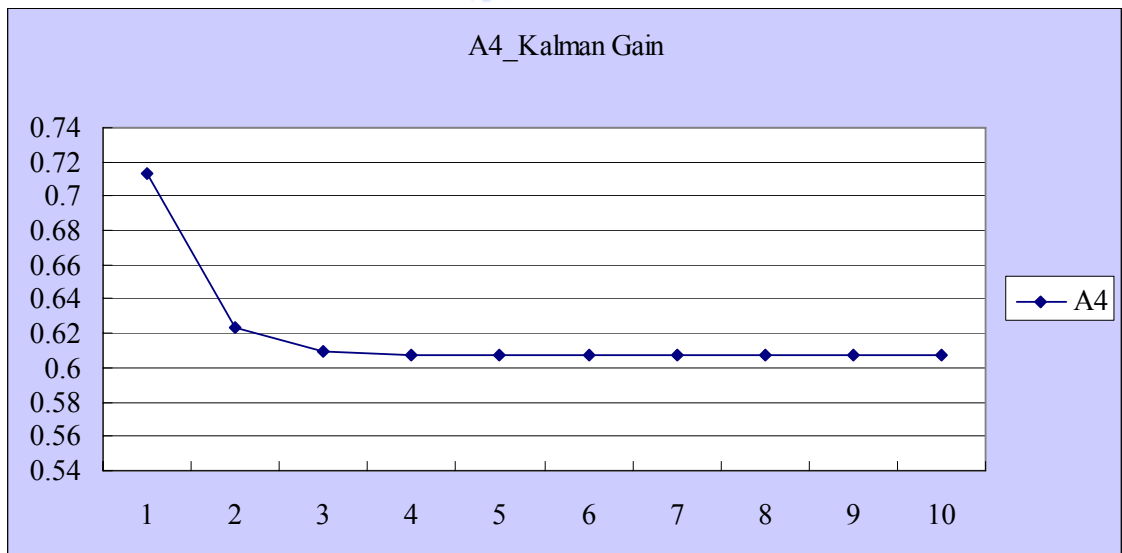


圖 6-15 Tool 6_Product E_Layer M_A4 卡曼增益變化

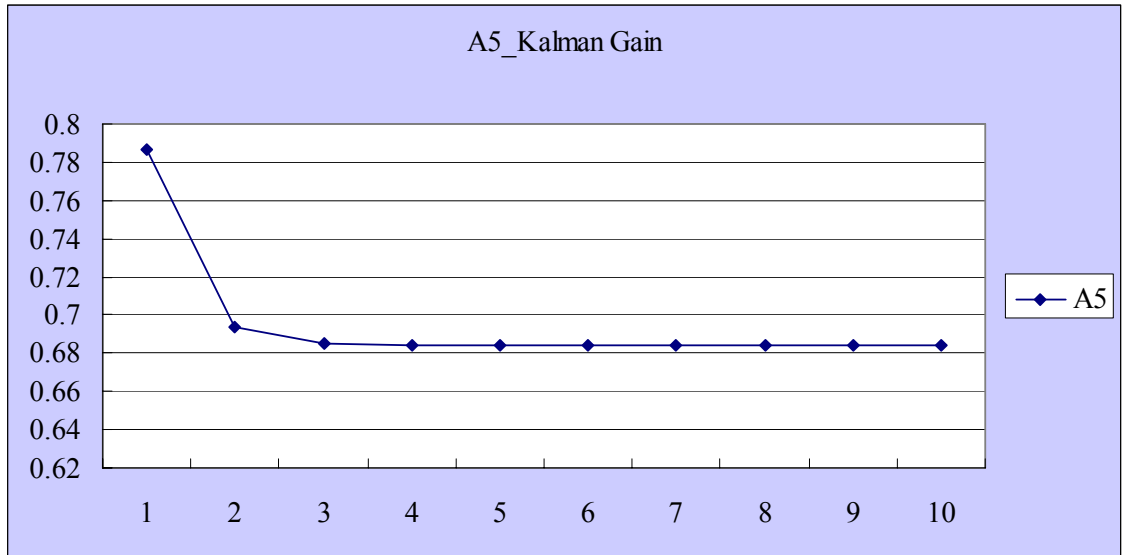


圖 6-16 Tool 6_Product E_Layer M_A5 卡曼增益變化

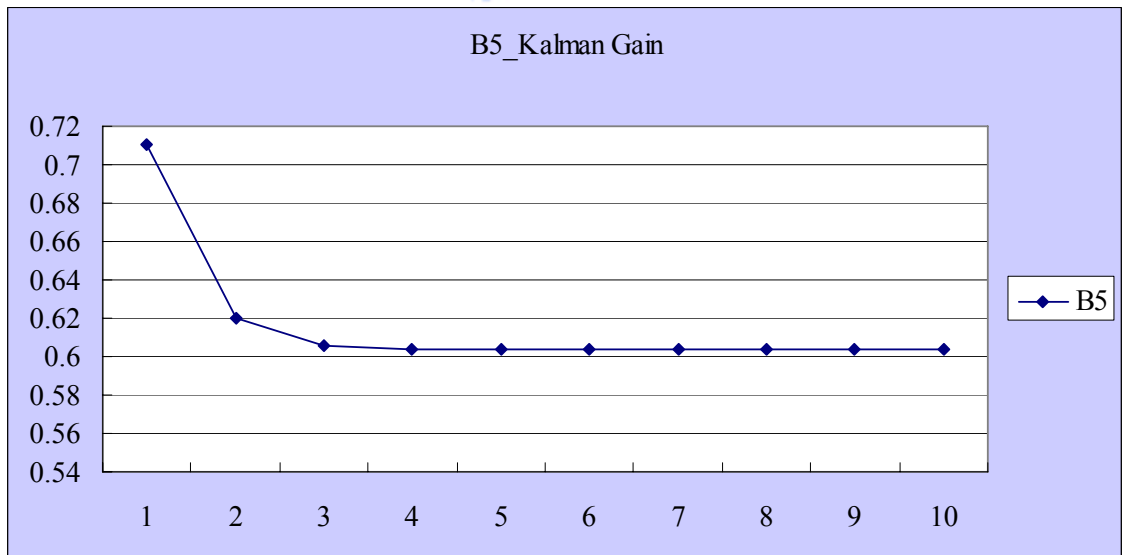


圖 6-17 Tool 6_Product E_Layer M_B5 卡曼增益變化

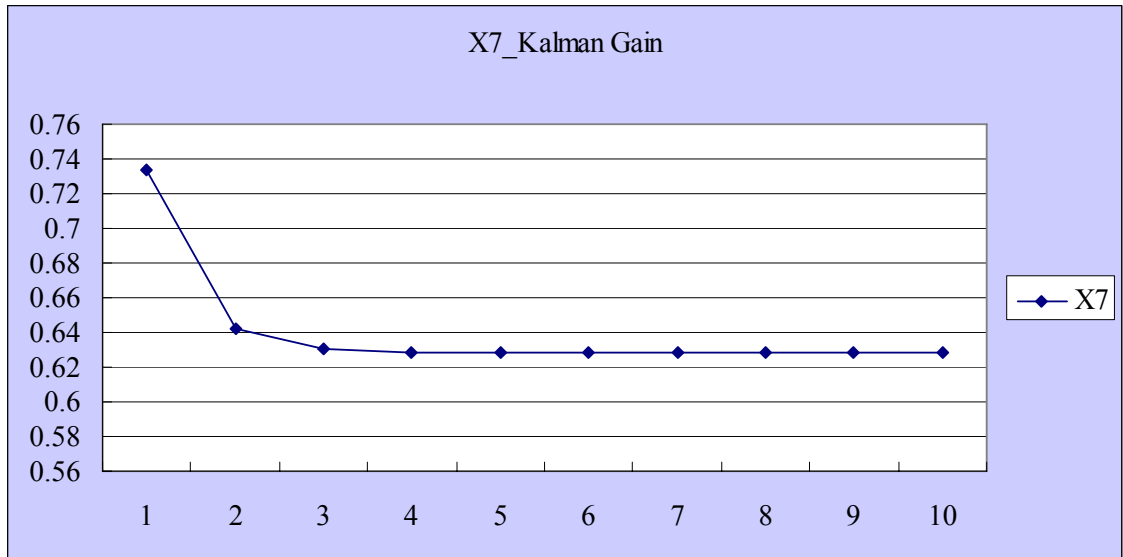


圖 6-18 Tool 6_Product E_Layer M_X7 卡曼增益變化

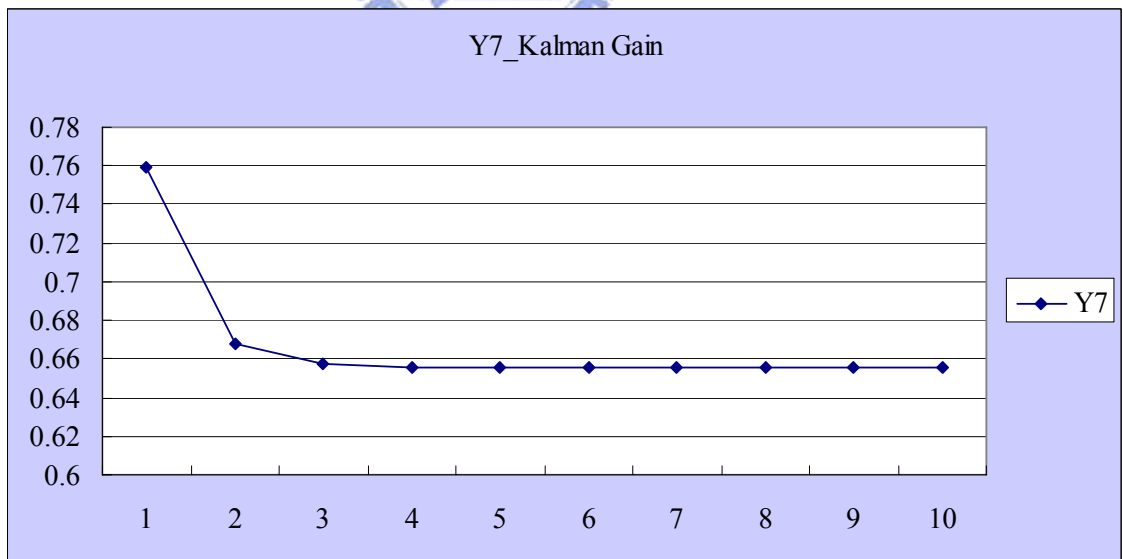
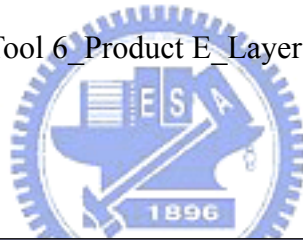


圖 6-19 Tool 6_Product E_Layer M_Y7 卡曼增益變化

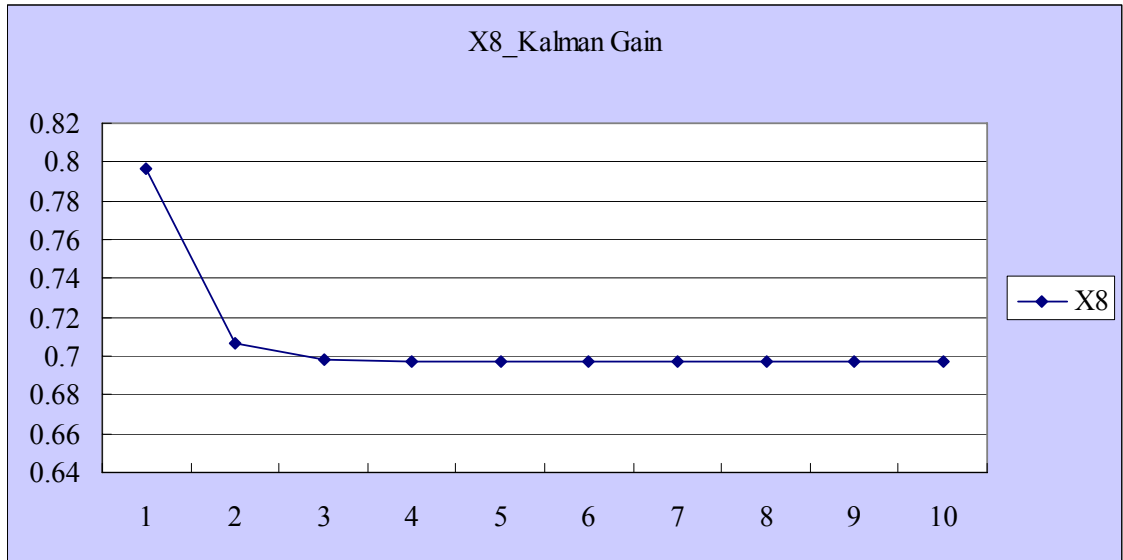


圖 6-20 Tool 6_Product E_Layer M_X8 卡曼增益變化

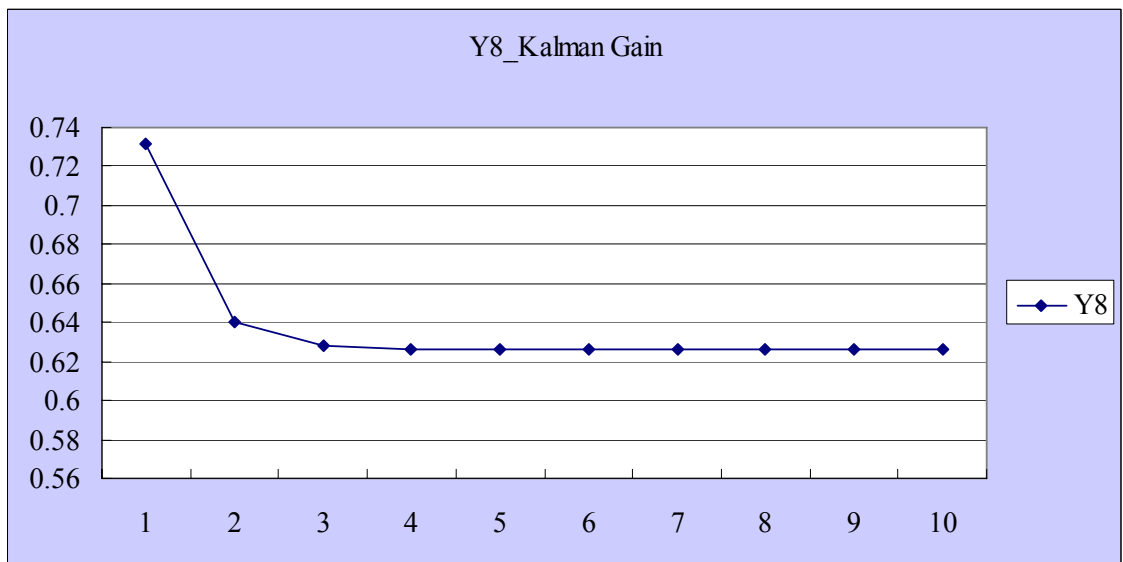


圖 6-21 Tool 6_Product E_Layer M_X8 卡曼增益變化

第七章 結論與未來建議

本論文已將卡曼濾波器與最小變異控制器結合而成的 KMVC 控制架構實現於半導體廠黃光微影製程 Overlay 控制上，經由前面章節的理論推導，模擬以及於半導體廠內實驗驗證後，可歸納出以下結論：

- (1) KMVC 控制架構確實可以有效的改善半導體廠內黃光微影製程之 Overlay。
- (2) 由於真實的製程機台有一定程度的變動與干擾，利用 KMVC 控制架構做動態模型的調變來適時地調整預測模型，可以準確地估測出製程機台的變動，修正製程模型，使其能更接近真實的製程機台。
- (3) KMVC 控制架構，可以依據 Run 貨時間間隔的長短，決定適合的權重，設計出最佳的最小變異控制器，達成最佳的控制效能。
- (4) KMVC 架構對於半導體廠內黃光製程 Overlay 控制的提升，可以間接降低產品晶圓的重工數目，使成本下降。

針對半導體製程控制現況，未來研究方向有：

- (1) 現今黃光微影製程，存在混貨(Mix Product)的情形，使得單一產品單一 Layer 的 Run 貨時間間隔過久，造成 Pilot 不易，針對此一情況需要結合 Multiple Product Control [22][23][24]的機制加以改善。
- (2) 現今黃光微影製程，常因缺乏上一層製程資訊，如：蝕刻後 Overlay 量測值、CMP 後 Overlay 量測值…等，在未將此類製程誤差 Feedforward 給製程模型的情況下進行曝光，會造成 Overlay 誤差過大。因此如何結合前層製程資訊並將其前饋給製程模型加以修正，亦為研究方向之一。

- (3) 現今多數半導體製程，其製程機台與量測機台分別為不同的機台，而為了增加製程量測的效率以及考慮量測機台的使用率，往往從同一製程機台的生產出來的產品，會經過不同的量測機台而得到量測值，如此會造成產品間量測誤差過大，使得量測值含有過多的雜訊而增加分析的困難。因此如何克服此一問題亦可為未來研究方向之一。
- (4) 可將 KMVC 控制架構推廣至不同製程的控制，或模型為非線性的製程控制上。



參考文獻

- [1] M. Quirk and J. Serda, Semiconductor Manufacturing Technology, Prentice Hall, 2001.
- [2] H. J. Levinson, Lithography Process Control, SPIE Press Tutorial Text Vol. TT28, 1999.
- [3] D. S. Perloff, “A Four-Point Electrical Measurement Technique for Characterizing Mask Superposition Errors on Semiconductor Wafer,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.SC-13, No.4, pp. 436-444, Aug 1978.
- [4] Z. C. Lin and W. J. Wu, “Multiple Linear Regression Analysis of the Overlay Accuracy Model,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 229-237, May 1999.
- [5] C. Gould, “Advanced Process Control : Basic Functionality Requirements for Lithography,” *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 49-53, April 2001.
- [6] C. Gould, “Advanced Process Control: Benefits For Photolithography Process Control,” *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, pp. 98-100, April 2002.
- [7] S. A. Middlebrooks, “Optical Model-Predictive Control of Overlay Lithography Implemented in an ASIC FAB,” *Proc. SPIE, Advanced Process Control and Automation*, Vol. 5044, pp. 12–23, 2003.

- [8] C. A. Bode, B. S. Ko, and T. F. Edgar, "Run-to-run control and performance monitoring of overlay in semiconductor manufacturing," *Control Engineering Practice*, Vol. 12, pp. 893-900, 2004.
- [9] S. J. Park, M. S. Lee, S. Y. Shun, K. H. Cho, J. T. Lim, B. S. Cho, Y. H. Jei, M. K. Kim, and C. H. Park, "Run-to-Run Overlay Control Steppers in Semiconductor Manufacturing Systems Based on History Data Analysis and Neural Network Modeling," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 18, No. 4, pp. 605-613, Nov 2005.
- [10] A. C. Lee, "Minimum-variance controller for a class of non-linear systems," *Int. J. Systems Science*, Vol. 21, No. 11, pp. 2091-2101, 1990.
- [11] A. Ingolfsson and E. Sachs, "Stability and Sensitivity of an EWMA Controller," *Journal of Quality Technology*, Vol. 25, pp. 271-287, 1993.
- [12] 何人杰, *EWMA 控制器非固定折扣因子之研究*, 國立清華大學統計學研究所碩士論文, 2000。
- [13] 柯璟銘, *化學機械研磨之虛擬量測與製程控制*, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2006。
- [14] J. H. Chen, T. W. Kuo, and A. C. Lee, "Run-by-Run Process Control of Metal Sputter Deposition: Combining Time Series and Extended Kalman Filter," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 20, No. 3, Aug 2007.
- [15] S. W. Bulter and J. A. Stefani, "Supervisory Run-to-run Control of a Polysilicon Gate Etch Using *In Situ* Ellipsometry," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 7, No. 2, pp. 193-201, May 1994.
- [16] 李德修, *費洛蒙擴散控制器—結合群體制能與先進製程控制的控制器*, 國立交通大學機械工程學系博士論文計畫書, 2007。
- [17] 黎湘鄂, *使用費洛蒙傳遞控制器改善關鍵尺寸之變異*, 國立交通大學機械工程學系碩士論文計畫書, 2007。
- [18] H. V. D. Parunak, M. Purcell, and R. O'Connell, "Digital Pheromones for Autonomous Coordination of Swarming UAV's," *Proceedings of First AIAA*

Unmanned Aerospace Vehicles, Systems, Technologies, and Operations Conference, 2002.

- [19] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filter and Prediction Problems," *Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering*, pp. 35-44, 1960.
- [20] 李樹英、許茂增，*隨機系統的濾波與控制*，新華書店，北京 1991。
- [21] V. M. Martinez, "Adaptive Run-to-Run Control of Overlay in Semiconductor Manufacturing," University of Texas at Austin, Degree of Doctor of Philosophy, Dec 2002.
- [22] S. T. Tseng, W. Song, and Y. C. Chang, "An Initial Intercept Iteratively Adjusted (IIIA) Controller: An Enhanced Double EWMA Feedback Control Scheme," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 18, No. 3, pp. 448-457, Aug 2005.
- [23] S. K. Firth, W. J. Campbell, A. Toprac, and T. F. Edgar, "Just-in-Time Adaptive Disturbance Estimation for Run-to-Run Control of Semiconductor Processes," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 19, No. 3, pp. 298-315, Aug 2006.
- [24] A. J. Pasadyn and T. F. Edgar, "Observability and State Estimation for Multiple Product Control in Semiconductor Manufacturing," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 18, No. 4, pp.592-604, Nov 2005.