

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

混貨化學機械研磨製程批次控制之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 100-2221-E-216-004-
執行期間：100年08月01日至101年07月31日
執行單位：中華大學機械工程學系

計畫主持人：陳俊宏

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：董子儀

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 10 月 03 日

中文摘要：本計畫探討化學機械研磨(CMP)製程的各種批次控制方法，包括 d-EWMA 控制器、時變 d-EWMA 控制器、時間序列控制器與時間序列結合卡曼濾波控制器，將上述傳統單機、單產品的批次控制方法，提升為成多機、多產品之批次控制。首先假設產品對製程的干擾為常數，機台的干擾則隨著時間作批次變化且為具有相關性的隨機程序(correlated stochastic process)，針對個別機台的製程歷史資料可利用動態變異數分析(dynamic ANOVA)建立變異數分析模型，獲得產品與機台對製程模型截距的貢獻，而模型中隨著時間作批次變化的干擾項則可利用上述之控制方法進行預測與控制。由模擬和實驗結果得知，本計畫所提出的 4 種批次控制方法皆能達到良好的控制效能，由於擴張卡曼濾波器的模型參數會的自動調整，因此其控制效能比 D-EWMA、時變 D-EWMA 和時間序列控制器更為優異。

中文關鍵詞：化學機械研、批次控制、混貨、d-EWMA 控制器、時間序列、卡曼濾波器

英文摘要：This project developed the new run-to-run controllers for the mixed product chemical mechanical polish (CMP) process, including d-EWMA controller, time-varying d-EWMA controller, time series controller, and time series combining Kalman filter controller. The purpose is to improve the ability of the controllers from a single-tool, single-product controller to a mix-tool, mix-product controllers. The assumptions that the product-induced disturbances are constants and the tool-induced disturbances are correlated stochastic processes are adopted. Firstly, from the history data, the mathematic model of the mixed product CMP process and the contributions on model interrupt caused by products and tools respectively are obtained by using the dynamic analysis of variance (ANOVA). Then, the disturbance can be predicted and compensated by the proposed controllers. From simulation and experimental results we find that the four controllers all have high performance. The performance of the extended Kalman filter is better than the others since it can regulate the model coefficients automatically.

英文關鍵詞：chemical mechanical polish, run-to-run controllers, mixed product, d-EWMA controller, time series, Kalman

filter.

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

混貨化學機械研磨製程批次控制之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2221-E-216-004-

執行期間：2011年8月1日至2012年7月31日

執行機構及系所：中華大學機械工程學系

計畫主持人：陳俊宏

共同主持人：

計畫參與人員：陳正文，董子儀

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

中華民國 101 年 10 月 8 日

中文摘要

本計畫探討化學機械研磨(CMP)製程的各種批次控制方法，包括 d-EWMA 控制器、時變 d-EWMA 控制器、時間序列控制器與時間序列結合卡曼濾波控制器，將上述傳統單機、單產品的批次控制方法，提升為成多機、多產品之批次控制。首先假設產品對製程的干擾為常數，機台的干擾則隨著時間作批次變化且為具有相關性的隨機程序(correlated stochastic process)，針對個別機台的製程歷史資料可利用動態變異數分析(dynamic ANOVA)建立變異數分析模型，獲得產品與機台對製程模型截距的貢獻，而模型中隨著時間作批次變化的干擾項則可利用上述之控制方法進行預測與控制。由模擬和實驗結果得知，本計畫所提出的 4 種批次控制方法皆能達到良好的控制效能，由於擴張卡曼濾波器的模型參數會的自動調整，因此其控制效能比 D-EWMA、時變 D-EWMA 和時間序列控制器更為優異。

關鍵詞：化學機械研、批次控制、混貨、d-EWMA 控制器、時間序列、卡曼濾波器。

英文摘要

This project developed the new run-to-run controllers for the mixed product chemical mechanical polish (CMP) process, including d-EWMA controller, time-varying d-EWMA controller, time series controller, and time series combining Kalman filter controller. The purpose is to improve the ability of the controllers from a single-tool, single-product controller to a mix-tool, mix-product controllers. The assumptions that the product-induced disturbances are constants and the tool-induced disturbances are correlated stochastic processes are adopted. Firstly, from the history data, the mathematic model of the mixed product CMP process and the contributions on model interrupt caused by products and tools respectively are obtained by using the dynamic analysis of variance (ANOVA). Then, the disturbance can be predicted and compensated by the proposed controllers. From simulation and experimental results we find that the four controllers all have high performance. The performance of the extended Kalman filter is better than the others since it can regulate the model coefficients automatically,

Keyword: chemical mechanical polish, run-to-run controllers, mixed product, d-EWMA controller, time series, Kalman filter.

1. 前言

批次 (Run-to-Run, RtR) 控制是一種對於製程與設備的控制方法，利用收集製程資料與即時量測資料修正線上製程配方，用以補償各式各樣的干擾，如製程偏移 (shift)、漂移(drift)與變異 (Variations)，使製程輸出值回歸目標值以降低製程變異而增進製程能力。目前批次控制在半導體已經廣泛的被運用在半導體廠各種關鍵的製程中，如化學機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing, CMP)、黃光製程(Photolithography)、蝕刻製程(etch)、與化學氣相沈積 (Chemical Vapor Deposition, CVD) ...等製程。但目前大部分批次控制之研究與案例，皆假設在單一產品在單一機台上之控制，但在實際之晶圓廠中 (如：台灣積體電路與聯華電子) 同時有數十到數百種產品在同一條生產線上生產，且其主要客戶多為消費性電子產品之廠商，在目前市場短暫的生命週期下，許多的訂單都是以少量多樣的方式下單，甚至會出現在一批貨中有兩到三家客戶之產品混合生產，就算在製程較單調的記憶體廠商 (如：力晶、茂德、華亞...等) 也有 3-10 種產品，每一種產品更是包含了 20-50 層 (layer)，而每一層需要利用用不同的製程步驟堆疊。這種一台機台需針對多產品、多層進行製程的情況被稱為高度混貨生產 (high-mix production)，在高度混貨的情況底下，傳統的單一機台單一產品控制，將會出現控制效能不足甚至控制失敗的情形產生。

2. 研究目的

隨著半導體製造技術對高積集度與微縮化的不斷追求，在目前最尖端的半導體科技中，化學機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 已經成為眾所矚目的關鍵製程。不論在原始矽晶圓的拋光、IC 絕緣層及金屬層的形成、記憶體的電容製作或新一代的鑲嵌法 (Damascene) 及 SOI (Silicon on Insulator) 的相關應用上，化學機械研磨製程不但是目前最直接也最有效的平坦化技術，也是突破下一代半導體元件製造瓶頸不可或缺的利器，而將更高階的製程控制技術導入 CMP 製程以提高控制效能乃成為當務之急。一般半導體廠考量到 CMP 機台價格昂貴，為了提高設備的使用率以降低生產成本，幾乎都採取混貨 (multi-product) 生產，亦即單一 CMP 機台對不同特性研磨層進行研磨，但是目前大部分有關化學機械研磨製程批次控制的研究皆是針對單一機台單一研磨層，因此本計畫探討化學機械研磨製程的各種批次控制方法，包括 D-EWMA 控制器、時變 D-EWMA 控制器、時間序列控制器與時間序列結合卡曼濾波控制器，將上述傳統單機、單產品的批次控制方法，提升為成多機、多產品之膜厚批次控制技術。

3. 文獻探討

近年來，多位學者提出有關製程控制方面研究，MacGregor[1]，Box 和 Kramer[2]，Box 和 Jenkins[3] 提出了 EWMA (Exponentially Weighted Moving Average) 控制器理論。Box 和 Jenkins 所提的 EWMA 控制器是將目標值與輸出值的差距，依其時點與現今時點的不同，給予一呈現遞減幾何分配的權重，也就是說，離現今時點越近的資料點，給予資料點的權重越大。Box 和 Jenkin 也證明當製程擾動呈現 IMA(1,1) (Integrated Moving Average) 型態時，EWMA 控制器是一 MMSE (Minimum Mean Squared Error) 控制器。Tucker 和 Faltin[4]，Vander Wiel 等[5]則應用統計製程控制於半導體製程產業。半導體業界最先提到批次控制的理論係德州儀器公司的 Guildе 等[6]，探

討利用氧化時間來控制氧化層的生長厚度。而後 MIT 研究群提出了批次控制器的理論與實驗結果[7-13]。柏克萊大學[14,15]，密西根大學[16-20]與德州儀器公司[21-25]亦隨後提出這類研究。其中 Butler 與 Stefani[22]所提出的 PCC (Predictor Corrector Control)控制方法應用於具有漂移特性的製程，將製程平均值調整至目標值，隨後亦有相當多的論文針對具飄移特性製程進行研究[26-28]。Chen 等[29]則提出 Age based d-EWMA 控制方法來估計製程真正漂移量，此法能應用於非等間距量測。計畫申請人等針對金屬濺鍍製程的沈積率隨時間衰減的特性，結合時間序列與遞迴式最小平方法(recursive least squares, RLS)[30]，以及時間序列(time series)與卡爾曼濾波器(Kalman Filter)[31]，發展二種控制器來預測與控制金屬沈積率，控制器不僅可有效預測與控制沈積率與應用於等間距與非等間距抽樣量測，同時具有隨著濺鍍靶材的更換自動調整製程模型的功能。

除了單一輸入輸出(SISO)的製程控制，最近有些學者投入多輸入輸出(MIMO)製程控制的研究，例如 multivariate EWMA[32]、multivariate d-EWMA[33]、整合 multivariate EWMA 與 multivariate SPC[34]以及應用類神經於 CMP 的製程控制[35]。計畫申請人等[36]亦曾針對半導體黃光製程，利用能量(Dose)與焦距(Focus)作為製程參數，控制顯影的關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)。文中首先利用實驗設計與反應曲面法建立射出顯影機台之製程模型，並提出兩種非線性估計器(NMEWMA, DMTMV)來估計顯影製程輸出的關鍵尺寸，以及利用最小變異控制器作批次控制。此外，申請人等[37-38]利用實驗設計與反應曲面法建立射出成形機台之製程模型，然後利用動態模型調變控制器(dynamic-model-tuning controller)以及 EWMA 控制器對射出產品的品質指標作批次控制。

上述研究皆是針對單一執行序(single thread)的半導體製程，近年有部分學者針對半導體混貨製程發展各種控制方法，例如 Zheng 等[39]針對以產品為基準(product-based)以及機台為基準(tool-based)的 EWMA 控制器，探討其分別應用於混貨製程的穩定性及效能，Pasadyn[40]等利用卡曼濾波器來控制半導體混貨製程。Firth 等[41]提出 Just-in-time adaptive disturbance estimation (JADE) 這套理論來解決高度混貨的問題，將 SISO 混貨製程干擾視為各個產品、機台和其他可能干擾源的線性組合，模擬的結果雖然比單一執行序 EWMA(single threaded EWMA)控制器更有效能，但因其假設 SISO 混貨製程模型不會隨著時間而漂移，對於漂移製程並不適用。Ai[42]等探討混貨產品在同一機台循環生產的情況，發現在前幾個循環如果使用 d-EWMA 控制器，在更換產品時會產生大誤差，因而提出稱之為「drift-compensatory approach」的方法來解決此種問題。計畫申請人在 96-97 年度研究計畫[43-44]及研討會論文[45,46]，利用兩個品質函數分別尋找各個產品、機台和其他可能干擾源的位移和飄移的最佳預測值來解決製程有大量漂移的情形，並分別就製程量測值未能即時量測或抽樣量測時，如何改良控制器做探討。在 98 年度計畫[47]將用在單機台單產品之傳統 d-EWMA 控制器改良成適合多產品之合作型 d-EWMA 控制器，並將其實現在化學機械研磨製程。在 96-98 年度計畫中，並未探討如何獲得混貨製程模型的初始參數，例如製程模型中各製程執行序的初始截距，且其控制法則基本上皆為 d-EWMA 控制器的改良型，如果製程干擾並未滿足時間序列 IMA(1,1)的形式，控制結果可能未盡理想。因此，本年度將利用動態變異數分析建立混貨化學機械研磨製程的數學模型以及各製程執行序的初始截距，並且假設製程干擾為具相關性的隨機程序，然後利用各種控制法則預測混貨化學機械研磨製程的研磨率。

4. 單產品單機台的批次控制方法

針對單產品在單機台生產的化學機械研磨製程的數學模型可假設為

$$y(k) = bu(k) + a + \varepsilon(k) \quad (1)$$

其中 $y(k)$ 代表第 k 批次研磨率， $u(k)$ 為第 k 批次製程輸入， b 為製程模型斜率， a 為模型截距， $\varepsilon(k)$ 為第 k 批次製程干擾，干擾的來源包括隨著使用時間造成研磨墊退化或其他不確定因素如研磨液流量、研磨頭壓力與轉速以及研磨墊轉速等的變異所造成。也因為研磨墊的持續退化會造成研磨率的持續下降(drift)，為了在製程中持續改變製程配方來對研磨率做補償以達到所需的研磨厚度，因而發展以下幾種常見的批次控制方法：

4.1 d-EWMA 與時變 d-EWMA 控制方法

針對具隨機漂移(drift)與位移(shift)特性的半導體製程，雙指數權重平均移動控制器(double exponential weight moving average controller, d-EWMA controller)[27]為一相當優異的控制器，其效能比已經證實比 EWMA 與 PCC 控制器更為優異。d-EWMA 控制器定義第 $(k-1)$ 至 k 批次的漂移量為

$$p(k-1) = \varepsilon(k) - \varepsilon(k-1). \quad (2)$$

並且透過以下遞迴式修正製程位移與漂移

$$\hat{\varepsilon}(k|k) = w_1 (y(k) - bu(k) - a) + (1 - w_1) (\hat{\varepsilon}(k-1|k-1) + \hat{p}(k-1|k-1)), \quad (3)$$

$$\hat{p}(k|k) = w_2 (y(k) - bu(k) - a - \hat{\varepsilon}(k-1|k-1)) + (1 - w_2) \hat{p}(k-1|k-1), \quad (4)$$

$$\hat{\varepsilon}(k+1|k) = \hat{\varepsilon}(k|k) + \hat{p}(k|k); \quad (5)$$

其中 $y(k)$ 代表第 k 批次研磨率量測值，上標 \wedge 代表估計值， $\hat{\varepsilon}(k+1|k)$ 代表當第 k 批次量測值

$(y(k) - bu(k) - a)$ 獲得時， $(k+1)$ 批次誤差 ε_{k+1} 的估計值。第 $(k+1)$ 批次研磨率的估計值可表示為

$$\hat{y}(k+1|k) = bu(k+1) + a + \hat{\varepsilon}(k+1|k) \quad (6)$$

因一般化學機械研磨製程皆固定機台參數(u 為常數)及利用控制研磨時間來達到一定的移除膜厚，第 $(k+1)$ 批次的研磨時間可利用以下公式計算：

$$\text{Process time } [k+1] = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}(k+1|k)}. \quad (7)$$

在時變 D-EWMA 方面[48]，估計方法與 D-EWMA 一樣，但權重採取時變性權重。其目的在於

利用一折扣因子來加速干擾漂移量的收斂，亦即利用加大權重的方式來使 D-EWMA 能夠快速地收斂至穩態，以降低暫態誤差。其調整模式為：

$$w_1(k) = \max\{w_1, w_2\} \quad (8)$$

$$w_2(k_i) = \min\{w_1, w_2\} + \gamma^k \quad (9)$$

其中 $\gamma(0 \leq \gamma < 1)$ 表示為折扣因子。加入折扣因子，可以使初始暫態得到補償，快速的收斂至穩態。

4.2 時間序列(Time Series) 控制方法

當製程干擾與單位漂移量滿足時間列 IMA(1,1)模型時，D-EWMA 控制器已被證實為最小平方誤差控制器，但當干擾模型不滿足此條件時，預測結果可能不盡理想，因此此處介紹時間序列控制器[3]。所謂時間序列意指隨時間連續觀察所產生有順序的觀測值之集合。對於製程而言，時間序列即為隨時間連續觀測之量測值之集合。在處理時間序列資料時，傳統計量模式所使用的迴歸方法雖然簡便，但對序列資料之自我相關以及誤差項的處理並不夠嚴謹。而 ARIMA 模式，即可針對前述缺失作一改善。而 Box 與 Jenkins[3]所提出的 ARIMA 模式為利用變數本身之落後值，以及當期與過去隨機誤差項，加權後以解釋變數本身之變動。Box 與 Jenkins 所提出之模式建構程式為一種試誤遞迴過程(trial and error iterative process)，將上述 AR、MA 合併後可得一 (p,q) 階整合自我迴歸移動平均過程(mixed autoregressive moving average process of order (p,q))，其形式為：

$$\phi(B)\varepsilon(k) = C + \theta(B)w(k) \quad (10)$$

其中

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (11)$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (12)$$

$w(k)$ 為白噪音(white noise)， B 為後移運算子(back-shift operator)。當 $\phi(B) = 0$ 之根落於單位圓外時，ARMA(p,q) 為平穩型。當 $\phi(B) = 0$ 之根落於單位圓內時，ARMA(p,q) 則具有可逆轉性。

許多時間數列之型態看起來好像沒有固定的平衡水準(level)，即不考慮數列之平均水準，則可窺出數列某一期間之觀測值形狀很相似於另一期間觀測值之形狀，如此之時間數列稱為平衡水準上不同之無定向型時間數列。ARIMA 即指在原始數列所產生之無定向過程，可能經取差分變換後轉變成在水準之上之平穩型過程。即是說，可以將這種過程，經由差分後，以 ARMA 模式來代表。而某些情況下，需要取一次以上之差分，方能將無定向型數列轉換成平穩數列。定義差分運算元(difference operator) ∇ 為

$$\nabla \varepsilon(k) = \varepsilon(k) - \varepsilon(k-1) = (1-B)\varepsilon(k) \quad (13)$$

其中與後移運算元 B 之關係為 $\nabla = 1 - B$ ，所以，高階之差分可以表示為

$$\nabla^2 = (1 - B)^2, \dots, \nabla^d = (1 - B)^d。$$

一般而言，欲獲得無定向性時間數列之模式，係假設原始數列經取第 d 次差分 ($d > 0$) 後可轉為平穩型數列，則可以 ARIMA 模式來表示。如此之模型稱之為 (p, d, q) 階之整合自我迴歸移動平均模型 (autoregressive integrated moving average model of order (p, d, q))。ARIMA (p, d, q) 階模型可表示為

$$\phi(B)(1 - B)^d \varepsilon(k) = C + \theta(B)w(k) \quad (14)$$

或

$$(1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_{p+d} B^{p+d}) \varepsilon(k) = C + (1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) w(k) \quad (15)$$

其中 $\phi(B)$ 與 $\theta(B)$ 如方程式(11)與(12)所示。當模式經修正後被確認足夠符合統計準則時，就可用它來預測未來觀測值。預測公式如下

$$\hat{\varepsilon}(k + 1|k) = C + \phi_1 \varepsilon(k) + \dots + \phi_{p+d} \varepsilon(k - p - d + 1) + \theta_1 w(k) - \dots - \theta_q w(k - q + 1) \quad (16)$$

第 $(k+1)$ 批次研磨率的估計值可表示為

$$\hat{y}(k + 1|k) = bu(k + 1) + a + \hat{\varepsilon}(k + 1|k) \quad (17)$$

第 $(k+1)$ 批次的研磨時間可利用以下公式計算：

$$\text{Process time } [k+1] = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}(k + 1|k)} \quad (18)$$

以下探討如何判定時間序列模型的階數是否適合。假設一組資料可以一個含有 M 個參數的統計模式來擬合，作為評估模式擬合的品質，Akaike 於 1973 年提出一種判定準則，其定義為[49]：

$$\text{AIC} = -2 \ln(ML) + 2M \quad (19)$$

其中 M 是參數的數量， L 是概似函數。

對於 ARMA 模式且還有 n 個有效觀測值之數列，其對數形式之概似函數為

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln 2\pi\sigma_a^2 - \frac{1}{2\sigma_a^2} S(\phi, c, \theta) \quad (20)$$

對參數 ϕ, c, θ 與 σ_a^2 取(20)式為最大，則可得

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln \pi \hat{\sigma}_a^2 - \frac{n}{2} (1 + \ln 2\pi) \quad (21)$$

上式中的第二項為常數，故 AIC 可簡化為

$$AIC = n \ln \hat{\sigma}_a^2 + 2M \quad (22)$$

為了選取模式之最適階次，常會以數組不同之階次作為測試，將這數組階次分別求得 AIC 值後，選擇最為接近 0 的 AIC 值之階次，即為模式之最適階次。

4.3 時間序列結合卡曼濾波器控制方法

卡曼濾波器是利用狀態空間方程式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：

- (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) 可應用於各種線性或非線性問題。

以下介紹如何將時間序列模型轉換成狀態空間方程式及卡曼濾波器之架構。假設時間序列模型為 ARIMA(p, d, q)過程，若令 $m = \max(p+d, q+1)$ ，則可將 ARIMA(p, d, q)模型(方程式 15)改寫為

$$\varepsilon(k) = \varphi_1 \varepsilon(k-1) + \dots + \varphi_m \varepsilon(k-m) + w(k) - \theta_1 w(k-1) - \dots - \theta_{m-1} w(k-m+1) \quad (23)$$

令狀態 $\mathbf{X}(k)$ 表示為

$$X_m(k) = \varphi_m \varepsilon(k-1) - \theta_{m-1} w(k) \quad (24)$$

$$X_j(k) = \varphi_j \varepsilon(k-1) + X_{j+1}(k-1) - \theta_{j-1} w(k) \quad (25)$$

其中 $j < m$ ， $\theta_0 = -1$ ， $X_1(k) = \varepsilon(k)$ 。方程式(23)可改寫成以下狀態方程式：

$$\mathbf{X}(k) = \begin{pmatrix} \varphi_1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{m-1} & 0 & \dots & 1 \\ \varphi_m & 0 & \dots & \varphi_1 \end{pmatrix} \mathbf{X}(k-1) + \begin{pmatrix} 1 \\ -\theta_1 \\ \vdots \\ -\theta_{m-1} \end{pmatrix} w(k) \quad (26)$$

其中狀態向量 $\mathbf{X}(k) = (X_1(k), \dots, X_m(k))^T$ ，而輸出方程可表示為

$$\xi(k) = (1, 0, \dots, 0) \mathbf{X}(k) = \varepsilon(k) \quad (27)$$

或

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k+1, k) \mathbf{X}(k) + \mathbf{\Gamma}(k+1, k) w(k) \quad (28)$$

$$\xi(k+1) = \mathbf{H}(k+1, k) \mathbf{X}(k) + v(k+1) \quad (29)$$

由(26)式與(27)式即為時間序列模型(14)式轉換成狀態空間方程式之形式。(28)式與(29)式相對之卡曼濾波器形式為：

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)[\xi(k+1) - \hat{\xi}(k+1|k)] \quad (30)$$

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \mathbf{F}(k+1, k)\hat{\mathbf{X}}(k) \quad (31)$$

$$\hat{\xi}(k+1|k) = \mathbf{H}(k+1, k)\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) \quad (32)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (33)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \mathbf{F}(k+1, k)\mathbf{P}(k)\mathbf{F}^T(k+1, k) + \mathbf{\Gamma}(k+1, k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k+1, k) \quad (34)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}(k+1|k) \quad (35)$$

擴張卡曼濾波器(extend Kalman filter, EKF)是將卡曼濾波器更進一步的延伸，可將系統未知的參數視為狀態並加以估計，或是處理非線性製程狀態估計。一個狀態空間隨機離散非線性系統可表示為：

$$\mathbf{X}(k+1) = f[\mathbf{X}(k), w(k), k] \quad \forall k_i \geq 0 \quad (36)$$

$$\xi(k+1) = h[\mathbf{X}(k+1), v(k+1), k+1] \quad \forall k_i \geq 0 \quad (37)$$

\mathbf{X} 為系統狀態向量($n \times 1$)， f 與 h 為非線性向量函數， η_i 為第 i 製程之系統輸出向量($m \times 1$)； w 與 v 分別為系統干擾向量($n \times 1$) 以及量測干擾向量($m \times 1$)，並為 white-noise，。所以(36)式與(37)式在每一個時期作泰勒展開後，取其一次項之線性化狀態空間方程可寫為：

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{X}(k) + \mathbf{\Gamma}(k)w(k) \quad (38)$$

$$\xi(k+1) = \mathbf{H}(k+1)\mathbf{X}(k+1) + v(k+1) \quad (39)$$

其中

$$\mathbf{F}(k) = \frac{\partial f[\mathbf{X}(k), w(k), k]}{\partial \mathbf{X}(k)} \quad (40)$$

$$\mathbf{H}(k+1) = \frac{\partial h[\mathbf{X}(k+1), v(k+1), k+1]}{\partial \mathbf{X}(k+1)} \quad (41)$$

$$\mathbf{\Gamma}(k) = \frac{\partial f[\mathbf{X}(k), w(k), k]}{\partial w(k)} \quad (42)$$

則相對應之擴張卡曼濾波器遞迴方程為：

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1) = f[\hat{\mathbf{X}}(k), k] + \mathbf{K}(k+1)[\eta(k+1) - h[\hat{\mathbf{X}}(k+1|k), k+1]] \quad (43)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (44)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{\Gamma}^T(k) \quad (45)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}(k+1|k) \quad (46)$$

當量到第 k 批次的研磨率時，第 $(k+1)$ 批次研磨率的估計值可表示為

$$\hat{y}(k+1|k) = bu(k+1) + a + \hat{\varepsilon}(k+1|k) = bu(k+1) + a + \hat{\xi}(k+1|k) \quad (47)$$

第 $(k+1)$ 批次的研磨時間可利用以下公式計算：

$$\text{Process time } [k+1] = \frac{\text{Desired thickness}}{\text{Estimated rate}} = \frac{\text{Desired thickness}}{\hat{y}(k+1|k)} \quad (48)$$

5. 應用在混貨製程的批次控制方法

以上三種控制方法皆假設製程模型滿足方程式(1)，如果要將其應用在混貨化學機械研磨製程，製程模型必須做適當的修正。考慮有 m 種產品在 n 個機台上生產的混貨半導體製程，製程進行到 k 批次時，第 i 個機台製程模型可假設為

$$y_i(k_i) = b_i u_i(k_i) + t_i + p_{j(k_i)} + \varepsilon_i(k_i) \quad (49)$$

其中 y 為製程的輸出， b 為製程模型的斜率， u 為製程的輸入， t 為機台的截距， p 為產品的截距， $\varepsilon_i(k_i)$ 為製程干擾。其中 k_i 為針對第 i 種機台抽樣後重新排序的批次序號， $j(k_i)$ 為第 k_i 批次時所生產的產品序號。為了獲得製程模型的截距，可利用歷史資料作動態變異數分析 (ANOVA)，求得機台 i 的變異數分析模型。

$$y_i(k_i) = b_i u_i(k_i) + \mu + \tau_i + \beta_{j(k_i)} + \varepsilon_i(k_i) \quad (50)$$

其中 μ 為各種產品與機台組合截距的總平均值， $\tau_i, i=1, \dots, n$ ，為所有產品在第 i 機台生產平均值與總平均的差， $\beta_j, j=1, \dots, m$ ，為所有機台生產第 j 產品平均值與總平均的差，且滿足

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 0, \quad \sum_{j=1}^m \beta_j = 0 \quad \circ \quad t_i + p_{j(k_i)} = \mu + \tau_i + \beta_{j(k_i)} \quad (51)$$

在實際情形，干擾來源不僅只有目前使用的機台與產品，還包括其他影響因子如上一道製程使用的機台等，此處為簡化製程模型，將這些因子皆包括在 $\varepsilon(k)$ 。如果製程干擾為具有相關性的隨機程序 (correlated stochastic process)，並假設產品對製程的干擾為常數，機台的干擾則隨著時間作批次變化，則可將上述三種批次控制方法做適當的修改以應用在混貨製程。比較單機產品製程模型 (方程式 1) 與混貨製程模型 (方程式 50)，其間的差異在混貨製程模型的截距 ($\mu + \tau_i + \beta_{j(k_i)}$) 會隨著執行序而改變。因此，如果在混貨製程控制時，能利用混貨的資訊 (使用

的機臺、生產的產品)獲得當批次的製程截距,便能將上述4種批次控制方法應用在混貨製程。

5.1 d-EWMA 與時變 d-EWMA 控制方法

D-EWMA 控制器使用兩個 EWMA 演算法,一個用來估計製程干擾所造成的變異,另一個用來估計批次與批次間的漂移,當獲得第 k_i 批次的機台輸出時,可利用下式更新第 k_i 批次的製程干擾與干擾的單位漂移量以及預測第 $k_i + 1$ 批次的製程干擾:

$$\hat{\varepsilon}_i[k_i|k_i] = w_{i1}\eta_i(k_i) + (1 - w_{i1})(\hat{\varepsilon}_i[k_i - 1|k_i - 1] + \hat{p}_i[k_i - 1|k_i - 1]) \quad (52)$$

$$\hat{p}_i[k_i|k_i] = w_{i2}(\varepsilon_i[k_i] - \hat{\varepsilon}_i[k_i - 1|k_i - 1]) + (1 - w_{i2})\hat{p}_i[k_i - 1|k_i - 1] \quad (53)$$

$$\hat{\varepsilon}_i[k_i + 1|k_i] = \hat{\varepsilon}_i[k_i|k_i] + \hat{p}_i[k_i|k_i] \quad (54)$$

其中 \hat{p}_i 為干擾單位漂移量的估計值, w_i 為權重, $\hat{\varepsilon}_i[k_i + 1|k_i]$ 為當獲得第 k_i 批次的輸出時,第 $k_i + 1$ 批次 ε_i 的預測值。 $\varepsilon_i(k_i)$ 可利用方程式(50)求得:

$$\varepsilon_i(k_i) = y_i(k_i) - b_i u_i(k_i) - \mu - \tau_i - \beta_{j(k_i)} \quad (55)$$

在時變 D-EWMA 方面,估計方法與 D-EWMA 一樣,但權重採取時變性權重。其目的在於利用一折扣因子來加速干擾漂移量的收斂,亦即利用加大權重的方式來使 D-EWMA 能夠快速地收斂至穩態,以降低暫態誤差。其調整模式為:

$$w_{i1}(k_i) = \max\{w_{i1}, w_{i2}\} \quad (56)$$

$$w_{i2}(k_i) = \min\{w_{i1}, w_{i2}\} + \gamma_i^k \quad (57)$$

其中 $\gamma_i (0 \leq \gamma_i < 1)$ 表示為折扣因子。加入折扣因子,可以使初始暫態得到補償,快速的收斂至穩態。

5.2 時間序列(Time Series)控制方法

當製程干擾與單位漂移量滿足時間序列 IMA(1,1)模型時,D-EWMA 控制器已被證實為最小平方誤差控制器,但當干擾模型不滿足此條件時,預測結果可能不盡理想,因此必須使用時間序列控制器。當利用 ANOVA 分析出截距後,使用方程式(55)計算干擾值,再將這些干擾值擬合為 ARIMA(p, d, q)的隨機程序

$$\begin{aligned} \phi_i(B)\varepsilon_i(k_i) &\equiv (1 - \phi_{i1}B - \dots - \phi_{ip}B^p)(1 - B)^d \varepsilon_i(k_i) \\ &= (1 - \theta_{i1}B - \dots - \theta_{iq}B^q)w_i(k_i) \equiv \theta_i(B)w_i(k_i) \end{aligned} \quad (58)$$

其中 B 為後移運算元， $w_i(k_i) \in N(0, \sigma_i^2)$ 為變異數 σ_i^2 ，均值為 0 的白噪音， $1, \phi_{i1} \cdots \phi_{ip}$ 和 $\theta_{i1}, \dots, \theta_{ip}$ 為多項式 $\phi_i(B)$ 和 $\theta_i(B)$ 的係數。

當模式經修正後被確認足夠符合統計準則時，就可用它來預測未來觀測值。 $\eta_i(k_i)$ 之預測值可利用估計出來的 ARIMA 求得。首先計算超前一時期 $(k_i + 1)$ 的預測值，當 $(k_i + 1)$ 時的實際值得到後，根據實際值與預測值之間的誤差使用遞迴方法來修正模型參數，在用新模型做下一時間點的量測值預測。預測公式如下

$$\begin{aligned} \varepsilon_i(k_i + 1) = & C + \varphi_{i1}\varepsilon_i(k_i) + \cdots + \varphi_{im}\varepsilon_i(k_i - m + 1) \\ & + w(k_i + 1) - \theta_{i1}w_i(k_i) - \cdots - \theta_{im-1}w_i(k_i - m + 2) \end{aligned} \quad (59)$$

其中 $m = \max(p + q, q + 1)$ 下一個時期的預測值(one-step-ahead forecasts)，對(59)式取期望值得

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_i(k_i + 1) = & E[\varepsilon_i(k_i) | \varepsilon_i(k_i - 1), \dots] = C + \varphi_{i1}\varepsilon_i(k_i - 1) + \cdots \\ & + \varphi_{im}\varepsilon_i(k_i - m) - E(w_i(k_i + 1)) - \theta_{i1}w_i(k_i) - \cdots - \theta_{im-1}w_i(k_i - m + 2) \end{aligned} \quad (60)$$

其中 $E(w_i(k_i + 1)) = 0$ ，藉由(60)式，即可算出在 k_i 時間的下一個時間點 $(k_i + 1)$ 之預測值。

5.3 時間序列結合擴張卡曼濾波器控制方法

在此小節中，本文進一步的將時間序列轉換成狀態空間方程式，並以擴張卡曼濾波器作預測。在(58)式中，令 $m = \max(p + d, q + 1)$ ，狀態空間方程式可表示為

$$X_{im}(k_i) = \varphi_{im}\varepsilon_i(k_i - 1) - \theta_{im-1}w_i(k_i) \quad (61)$$

$$X_{ij}(k_i) = \varphi_{ij}\varepsilon_i(k_i - 1) + X_{j+1}(k_i - 1) - \theta_{ij-1}w_i(k_i) \quad (62)$$

其中 $1 \leq j < m$ ， $\theta_0 = -1$ 。狀態向量 $\mathbf{X}_i(k_i)$ 可表示為下面的形式：

$$\mathbf{X}_i(k_i) = \begin{pmatrix} \varphi_{i1} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{im-1} & 0 & \cdots & 1 \\ \varphi_{im} & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \mathbf{X}_i(k_i - 1) + \begin{pmatrix} 1 \\ -\theta_{i1} \\ \vdots \\ -\theta_{im-1} \end{pmatrix} w_i(k_i) \quad (63)$$

而輸出方程可表示為

$$\xi_i(k_i) = (1, 0, \dots, 0) \mathbf{X}_i(k_i) \quad (64)$$

由(63)式與(64)式即為時間序列模型(50)式轉換成狀態空間方程式之形式。

擴張卡曼濾波器(extend Kalman filter, EKF)是將卡曼濾波器更進一步的延伸，可將系統未知的參數視為狀態並加以估計，或是處理非線性製程狀態估計。一個狀態空間隨機離散非線性系統可表示為：

$$\mathbf{X}_i(k_i + 1) = \mathbf{f}_i[\mathbf{X}_i(k_i), w_i(k_i), k_i] \quad \forall k_i \geq 0 \quad (65)$$

$$\xi_i(k_i+1) = h_i[\mathbf{X}_i(k_i+1), v_i(k_i+1), k_i+1] \quad \forall k_i \geq 0 \quad (66)$$

\mathbf{X}_i 為系統狀態向量 ($n \times 1$)， f_i 與 h_i 為非線性向量函數， ξ_i 為第 i 製程之系統輸出； w_i 與 v_i 分別為系統干擾以及量測干擾，並為 white-noise，。所以(65)式與(66)式在每一個時期作泰勒展開後，取其一次項之線性化狀態空間方程可寫為：

$$\mathbf{X}_i(k_i+1) = \mathbf{F}_i(k_i)\mathbf{X}_i(k_i) + \mathbf{\Gamma}_i(k_i)w_i(k_i) \quad (67)$$

$$\eta_i(k_i+1) = \mathbf{H}(k_i+1)\mathbf{X}_i(k_i+1) + v_i(k_i+1) \quad (68)$$

其中

$$\mathbf{F}_i(k_i) = \frac{\partial \mathbf{f}_i[\mathbf{X}_i(k_i), w_i(k_i), k_i]}{\partial \mathbf{X}_i(k_i)} \quad (69)$$

$$\mathbf{H}_i(k_i+1) = \frac{\partial h_i[\mathbf{X}_i(k_i+1), v_i(k_i+1), k_i+1]}{\partial \mathbf{X}_i(k_i+1)} \quad (70)$$

$$\mathbf{\Gamma}_i(k_i) = \frac{\partial \mathbf{f}_i[\mathbf{X}_i(k_i), w_i(k_i), k_i]}{\partial w_i(k_i)} \quad (71)$$

則相對應之擴張卡曼濾波器遞迴方程為：

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k_i+1) = f_i[\hat{\mathbf{X}}_i(k_i), k_i] + \mathbf{K}_i(k_i+1)[\xi_i(k_i+1) - h_i[\hat{\mathbf{X}}_i(k_i+1|k_i), k_i+1]] \quad (72)$$

$$\mathbf{K}_i(k_i+1) = \mathbf{P}(k_i+1|k_i)\mathbf{H}_i^T(k_i+1)[\mathbf{H}_i(k_i+1)\mathbf{P}_i(k_i+1|k_i)\mathbf{H}_i^T(k_i+1) + R_i(k_i+1)]^{-1} \quad (73)$$

$$\mathbf{P}_i(k_i+1|k_i) = \mathbf{F}_i(k_i)\mathbf{P}_i(k_i)\mathbf{F}_i^T(k_i) + \mathbf{\Gamma}_i(k_i)\mathbf{Q}_i(k_i)\mathbf{\Gamma}_i^T(k_i) \quad (74)$$

$$\mathbf{P}_i(k_i+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_i(k_i+1)\mathbf{H}_i(k_i+1)]\mathbf{P}_i(k_i+1|k_i) \quad (75)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_i(0) = 0, \mathbf{P}_i(0) = \text{var } \mathbf{X}_i(0) \quad (76)$$

式中 \mathbf{K}_i 為卡曼增益(Kalman gain)。計算過程為利用已給定之初始值預測下一個時點狀態變異矩陣 $\mathbf{P}_i(k_i+1|k_i)$ ，接著計算卡曼增益，然後利用這些已知數據去預測下一個時點 (k_i+1) 之系統狀態 $\hat{\mathbf{X}}_i(k_i+1|k_i)$ 及輸出觀測值 $\hat{\xi}_i(k_i+1|k_i)$ 。當新的觀測值 $\xi_i(k_i+1)$ 進入後，就可以更新目前在 (k_i+1) 時點的狀態估計向量 $\hat{\mathbf{X}}_i(k_i+1)$ 以及 $\mathbf{P}_i(k_i+1)$ 。如此可計算下一個狀態變異矩陣 $\mathbf{P}_i(k_i+2|k_i+1)$ 之預測值，依此類推。

6 電腦模擬

為了驗證動態變異數分析搭配各種控制器的效能，本計畫先針對其進行電腦模擬。假設有 3 個產品在 2 個機台生產，為了驗證 ANOVA 模型搭配各種控制器之效能，故本文以(49)式作為基本模型，假設混貨製程為兩個機台，每個機台生產三種產品，並加入機台製程干擾 $\eta_i(k_i)$ 滿足於 ARIMA(1,1,1)，即下二式：

$$y_i(k_i) - b_i u_i(k_i) = t_i + p_{j(k_i)} + \varepsilon_i(k_i), \quad i = 1, 2, \quad j(k_i) = 1, 2, 3 \quad (77)$$

$$(1 - \phi_{i1} B)(1 - B)\varepsilon_i(k_i) = (1 - \theta_{i1} B)w_i(k_i) \quad (78)$$

其中 $w_i(k_i) \in N(0, 0.2^2)$ 。

二個機台使用機率皆為 0.5，截距為 $[t_1, t_2] = [5, 7]$ ，三個產品使用機率分別為 0.3, 0.3, 0.4，截距為 $[p_1, p_2, p_3] = [6, 10, 17]$ 。以此設定產生 500 個批次的輸出作為歷史資料，並預測後 100 個批次的輸出值。利用歷史資料進行動態變異數分析求得機台和產品的因子效果如表 1 所示，製程模型截距，以及利用機台和產品的因子效果計算執行序的截距以及平均誤差亦如表 2 所示。

表 1 機台和產品的因子之效果

A 因子效果(機台)： τ	τ_1	τ_2	τ_3
	-4.91129	-1.02495	5.93624
B 因子效果(產品)： β	β_1	β_2	
	-1.11029	1.11029	
處理總平均值： μ	17.53468		

表 2. 製程原始截距和動態變異數分析求得截距

分析截距	產品 1			產品 2			產品 3		
	分析	原始	誤差	分析	原始	誤差	分析	原始	誤差
機台 1	11.51	11	4.6%	15.39	15	2.6%	22.36	22	1.6%
機台 2	13.73	13	5.6%	17.62	17	3.6%	24.58	24	2.4%

由表 2 可發現利用動態變異數分析確實可對混貨製程各執行序的截距獲得良好的估計，4 種控制器所預測的製程干擾與原來模擬的干擾比較如圖 1 和 2 所示，其均方誤差值列於表 3。

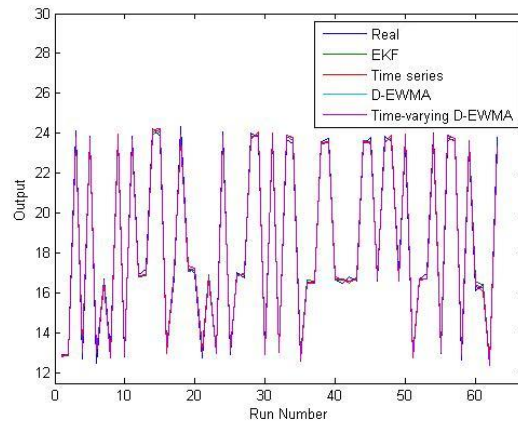


圖 1.四種預測方法與原始資料之預測結果比較圖(機台一)

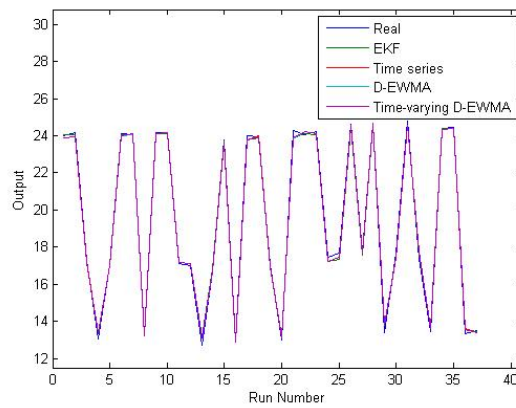


圖 2.四種預測方法與原始資料之預測結果比較圖(機台二)

表 3 四種預測方法均方誤差值

	MSE (機台 1)	MSE (機台 2)
EKF	0.049369	0.040039
time series	0.071010	0.040426
D-EWMA	0.053389	0.040204
time-varying D-EWMA	0.053389	0.040364

由表 3 得知，4 種控制方法對製程干擾的估計皆有良好的效能，其中以擴張卡曼濾波器的預測效能為最佳。

7 實驗驗證

為了驗證 ANOVA 模型搭配各種控制器之效能，本文以一實際 CMP 機台製程資料，作為驗證本研究之資料來源。本計畫所分析的資料為某半導體廠 CMP 製程的製程資料，機台為應材 (applied materials) 所製造，機型為 Reflexion，研磨對象為 300mm 晶圓，研磨層材質為 PE-TEOS oxide。機台有 4 個晶圓承載具(carrier)，同時有 3 個晶圓進行研磨，另一個承載具負責填充或移出品圓。每一待研磨晶圓必須通過 3 個研磨平台進行研磨。研磨墊固定在研磨平台上，和晶圓承載具以相反方向旋轉。圖 3 為固定配方(constant recipe)即研磨液流量、壓力、晶圓承載具轉速和平台轉速等為固定值時磨研磨率變化的製程資料，橫軸為批次數，當更換研磨墊時即重新計數。觀察圖 3 可知隨著研磨墊的鈍化研磨率亦隨之下降，此外，不同的研磨層研磨率下降的速度亦不同。在更換研磨層時，研磨率會產生跳動。因此，傳統的 d- EWMA 控制器將混貨 CMP 製程視為單一製程並不合適。因為圖 3 的資料包括 7 個研磨層，為了提高控制效能，參考工程師的意見，將性質相近的研磨層合併為一群組，即視為同一產品，因此本製程簡化為 4 種產品，1 個機台，利用第一個研磨墊共 69 個批次的量測資料進行動態變異數分析，求得混貨製程的數學模型，然後應用前述四種控制方法，對後面三個研磨墊共 143 批次的研磨率進行預測其，並比較其控制效能。

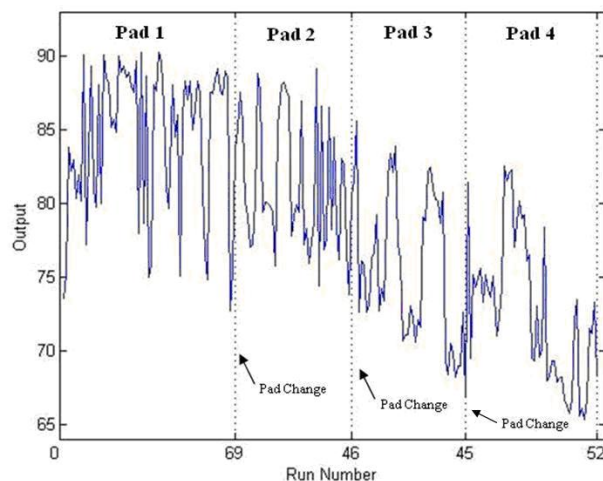


圖 3. 研磨率變化圖

將第一個研磨墊的研磨率作 ANOVA 分析後所獲得的截距列於表 4。在分析出截距後，即可知 CMP 製程的製程干擾數列，分析並擬合此數列，以求得製程干擾數列擬合階次、係數與 AIC 值。擬合之各數值如表 5 所示

表 4 CMP 製程截距表

分析截距	產品 1	產品 2	產品 3	產品 4
機台 1	72.767	76.135	85.283	81.143

表 5 CMP 機台製程干擾數列擬合階次、係數與 AIC 值

機台 1	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_{i1}	AIC
(1,1,1)	0.075			0.846	282.005
(2,1,1)	-0.030	-0.106		0.792	276.758
(3,1,1)	-0.011	-0.075	-0.041	0.79	275.057
資料批次數：69					

由表 5 可知，擬合後最為合適之階次為 ARIMA(3,1,1)，因此此數列可以表示為：

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \phi_3 B^3)(1 - B)^1 \eta_i(k_i) = (1 - \theta_{i1} B^1) \varepsilon_i(k_i - 1) \quad (79)$$

四種控制方法之均方誤差值列於表 6。CMP 機台預測結果如圖 4 所示。

表 6 四種預測方法比較值(CMP 機台)

	EKF	Time Series	D-EWMA	Time-variant-EWMA
MSE	3.8012	4.2104	3.9558	3.9558

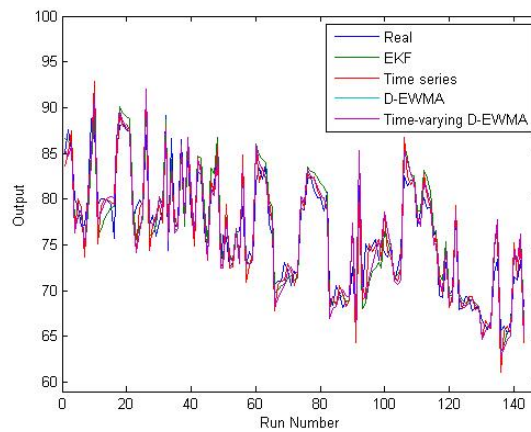


圖 4 四種預測方法與原始資料之預測結果比較圖(CMP 機台)

由表 6 之比較值可以得知，在 CMP 機台中，擴張卡曼濾波器之效能確實比其他控制器之效能還要好。

8 結論

本計畫利用動態變異數分析建立混貨化學機械研磨製程的數學模型以及各製程執行序的初始截距，並且假設製程干擾為具相關性的隨機程序，開發各種適用於混貨半導體製程的批次控制器，提高其控制效能。由模擬與實驗結果可知，擴張卡曼濾波器比之其他控制器有著更好的效能表現。本計畫執行結果可以得知以下結論：

1. 利用 AVONA 分析截距，搭配執行序的使用，可以將應用於半導體製程單機台單產品的批次控制方法擴展至混貨生產的批次控制，並且可以減少預測的誤差率，使預測值更具有可信度。
2. 由模擬和實驗結果得知，本計畫所提出的 4 種批次控制方法皆能達到良好的控制效能。
3. 由於擴張卡曼濾波器的模型參數會自動調整，因此其控制效能比 D-EWMA、時變 D-EWMA 和時間序列控制器更為優異。

9 計畫成果自評

本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。本計畫順利達成以下目標：

1. 完成推導混貨 D-EWMA 控制器、時變 D-EWMA 控制器、時間序列控制器與時間序列結合卡曼濾波控制器。
2. 完成撰寫模擬混貨製程相關程式。
3. 完成撰寫擬合(fit)動態變異數分析模型相關程式。
4. 完成撰寫擬合 ARIMA(p,d,q)模型相關程式。
5. 完成撰寫卡曼濾波器相關程式。
6. 完成模擬混貨化學機械研磨製程，驗證所開發的混貨控制器的控制效能。
7. 完成實驗驗證所開發的混貨控制器的控制效能

實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨半導體製程控制。計畫成果已發表 2 篇論文在國際學術研討會[50-51]，並培養一位碩士生[52]。

參考文獻

1. J. F. MacGregor, 1988, "On-line Statistical Process Control," *Chemical Engineering Process*, **84**, pp. 21-31.
2. G. E. Box and T. Kramer, 1992, "Statistical Process Control and Feedback Adjustment-A Discussion," *Technometrics*, **34**(3), pp. 251-267.
3. G. E. Box and M. Jenkins, 1976, *Time Series Analysis-Forecasting and Control*, Oakland, CA: Holden-Day.
4. W. T. Tuckers and F. W. Faltin, 1991, "Algorithmic Statistical Process Control: An Elaboration," *Technometrics*, **35**(4), pp. 363-389.
5. S. Vander Wiel, W. T. Tucker, F. W. Faltin, and N. Doganaksoy, 1992, "Algorithmic Statistical Process Control: Concepts and an Application," *Technometrics*, **34**(3), pp. 268-297.
6. R. L. Guilde, C. D. Jenkins, G. M. Damming, T. A. Baum, and T. A. Foster, 1989, "Process Optimization

- Tweaking Tool (POTT) and its Application in Controlling Oxidation Thickness,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **2**, pp. 54-59.
7. E. Sachs, R. Guo, S Ha, and A. Hu, 1991, “Process Control System for VLSI Fabrication,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **4**(2), pp. 134-143.
 8. R. Guo and E Sachs, 1993, “Modeling, Optimization and Control of Spatial Uniformity in Manufacturing Processes,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **6**(1), pp. 41-47.
 9. A. Ingolfsson and E. Sachs, 1993, “Stability and Sensitivity of an EWMA Controller,” Journal of Quality Technology, **25**(4), pp. 271-287.
 10. D. Boning, W. Moyne, T. Smith, J. Moyne, A. Hurwitz, S. Shellman, J. Moyne, R. Trefeyan, and J. Taylor, 1996, “Run by Run Process Control of Chemical-Mechanical Polishing ,” IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-part C, **19**(4), pp. 307-313.
 11. E. Sachs, A. Hu, and A. Ingolfsson, 1995, “Run by Run Process Control; Combining SPC and Feedback Control,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **8**(1), pp. 26-43.
 12. D. Boning, W. Moyne, T. Smith, J. Moyne, and A. Hurwitz, 1995, “Practical Issues in Run by Run Process Control,” IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 201-208.
 13. T. Smith and D. Boning, 1997, “A Self- Tuning EWMA Controller Utilizing Artificial Neural Network Function Approximation Techniques,” IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, pp. 121-132.
 14. C. Spanos and S. Leang, 1992 “Statistically Based Feedback Control of Photoresist Application,” International Electronics Manufacturing Symposium, pp. 185-190.
 15. S. Leang, S. Ma, J. Thomson, B. J. Bombay, and C. Spanos, 1996, “A Control for Photolithographic Sequences,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **9**(2), pp. 191-206.
 16. J. Moyne, H. L. McAfee, and Jr., 1996, “A Generic Cell Controller for the Automated VLSI Manufacturing Facility,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **5**(2), pp. 77-87.
 17. J. Moyne, H. Etemed, and M. Elta, 1994, “A Run-to-Run Framework for VLSI Manufacturing,” Proc. Microelectronics Process Sensors and Controls, SPIE, **2091**, pp. 379-390.
 18. R. Telfeyan, J. Moyne, A. Hurwitz, and J. Taylor, 1995, “Demonstration of a Process-Independent Run-to-Run Controller,” 187th Meeting of the Electrochemical Society.
 19. J. Moyne, R. Telfeyan, A. Hurwitz, and J. Taylor, 1995, “A Process-Independent Run-to-Run Controller and its Application to Chemical-Mechanical Planarization,” SEMI/IEEE Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, pp. 1787-1791.
 20. J. Moyne, N. Chaudhry, and R. Telfeyan, 1995, “Multi-Branch Run-to-Run Controller for Plasma Etching,” Journal of Vacuum Science and Technology, pp. 1-12.
 21. P. Mozumder and G. G. Barna, 1994, “Statistical Feedback Control of a Plasma Etch Process,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **7**(1), pp. 1-44.
 22. S. Bulter and J. Stefani, 1994, “Supervisory Run-to-Run Control of Polysilicon Gate Etch Using In Situ Ellipsometry,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **7**(2), pp. 193-201.
 23. M. Sullivan, S. Butler, J. Hirsch, C. Wang, 1994, “A Control to Target Architecture for Process Control,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **7**(2), pp. 134-148.
 24. P. Mozumder, S. Saxena, and D. Collins, 1994, “A Monitor Wafer Based Controller for Semiconductor Processes,” IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, **7**(3), pp. 400-411.

25. J. Stefani, S. Poarch, S. Saxena, and P. Mozumder, 1996, "Advanced Process Control of a CVD Tungsten Reactor," *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, **9**(3), pp. 366-382.
26. L. Sattler and P.E. Hecher, 1998, "Reducing Cost and Increasing Throughput Using Model-Based Process Control on Sputtering System," *IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, Austin, USA, pp. 409-414.
27. R.S. Kou, A. Chen, and J.J. Chen, 2000, "Run-to-Run Control Schemes for CMP Process subject to Deterministic Drifts," *Semiconductor Manufacturing Technology Workshop*, Hsinchu, Taiwan, ROC, pp. 251-258.
28. S.T. Tseng, W. Song, and Y.C. Chang, 2005, "An Initial Intercept Iteratively Adjust (IIIA) Controller: an Enhanced Double EWMA Feedback Control Scheme," *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing* **18**, pp. 448-457.
29. A. Chen, R. Guo, Y. L. Chou, C. L. Lin, J. Dun, and S. A. Wu, 1999, "Run-to Run Control of CMP Process Considering Aging Effects of Pad and Disc," *International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, pp. 229-232.
30. J.H. Chen, T.W. Kou, and T.C. Chen, 2008, "Advanced Process Control of Metal Sputter Deposition Using a Time Series Analysis," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **36**(5), pp. 501-508. (SCI) (NSC-94-2212-E-216-003)
31. J.H. Chen, T.W. Kou, and A.C. Lee, 2007, "Run by Run Process Control of Metal Sputter Deposition: Combining Time Series and Extended Kaman Filter," *IEEE Semiconductor Manufacturing*, **20**(3), pp. 278-285. (SCI)
32. S.T. Tseng, R.J. Chou, and S.P. Lee, 2002, "A Study on a Multivariate EWMA Controller," *IIE Transaction* **34**, pp. 541-549.
33. E. Del Castillo and R. Rajagopal, 2002, "A Multivariate Double EWMA Process Adjustment Scheme for Drifting Process," *IIE Transaction* **34**, pp. 1055-1068.
34. L. Yang and S.H. Sheu, 2006, "Integrating Multivariate Engineering Process Control and Multivariate Statistical Control," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **29**, 129-136.
35. G.J. Wang and C.H. Wu, 2006, "Developing a Neural Network-based Run-to-Run Process Controller for Chemical-Mechanical Planarization," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **28**, pp. 899-908.
36. C.F. Wu, C.M. Hung, J.H. Chen. and A.C. Lee, 2008, "Advanced Process Control of the Critical Dimension in Photolithography," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **9**(1), pp. 12-18. (SCI)
37. C.H. Sun, J.H. Chen, and L.J. Sheu, 2008, "A Quality Control of the Injection Molding Process Using EWMA Predictor and Minimum-Variance Controller," *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, Beijing, China. (EI) (NSC 95-2622- E-216-013-CC3)
38. C. H. Sun, J. H. Chen, and L. J. Sheu, 2010, "A Quality Control of the Injection Molding Process Using EWMA Predictor and Minimum-Variance Controller," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **48**(1), pp 63-79. (SCI) (NSC 95-2622-E-216-013-CC3)
39. Y. Zhen, Q.H. Lin, D.S.H. Wang, S.S. Jang, and K. Hui, 2006, "Stability and Performance Analysis of Mixed Product Run-to-Run Control," *Journal of Process Control* **16**, pp. 431-443.
40. A.J. Pasadyn and T.F. Edgar, 2005, "Observability and State Estimation for Multiple Product Control in

- Semiconductor Manufacturing,” IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing, 18(4), P592-604.
41. S. K. Firth, W. J. Campbell, A. Toprac, and T. F. Edgar, 2006, “Just-in-Time Adaptive Disturbance Estimation for Run-to-Run Control of Semiconductor Processes,” IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 19(3), P298-315.
 42. B. Ai, Y. Zheng, S.S. Jang, Y. Wang, L. Ye, and C. Zhou, 2009, “The Optimal Drift-Compensatory and Fault Tolerant Approach for Mix-Product Run-to-Run Control,” Journal of Process Control, 19, P1401-1412.
 43. 2007/8/1-2008/7/31 國科會研究計畫 「半導體混貨製程之干擾預測與控制(I)」 (NSC-96-2221-E-216-005)
 44. 2008/8/1-2009/7/31 國科會研究計畫 「半導體混貨製程之干擾預測與控制(II)」 (NSC-97-2221-E-216-024)
 45. H.K. Chen, L.J. Sheu, C.F. Wu, J.H. Chen, S.A. Tsai, 2010, “Sampling Run-to-Run Control of Mix-Product Semiconductor Processes, 2010,” International Conference on Engineering and Business Management, Chengdu, China. (EI) (NSC-96-2221-E-216-005, NSC-97-2221-E-216-024)
 46. J.H. Chen, H.S. Chiou, W.T. Weng, S.A. Tsai, 2010, “Advanced Process Control of Mix-Product Semiconductor Processes,” International Conference on Engineering and Business Management, Chengdu, China. (EI) (NSC-96-2221-E-216-005, NSC-97-2221-E-216-024)
 47. 2009/8/1-2010/7/31 國科會研究計畫 「應用先進製程控制於混貨化學機械研磨製程」 (NSC 98-2221-E-216 -019)
 48. C. T. Su and C. C. Hsu, 2003, “A Time-Varying Weights Tuning Method of the Double EWMA Controller”, Omega-International Journal of Management Science, 32(6), pp. 473-480.
 49. H. Akaike, 1973, "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle," Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory, pp. 267-281, Budapest: Akademiai Kiado
 50. H.K. Chen, J.H. Chen*, C.F. Wu, C.W. Chen, and S.R. Lee, 2011, “Advanced Process Control of Mix-Product Semiconductor Processes,” International Conference on Engineering and Business Management, Wuhan, China. (EI) (NSC 98-2221-E-216 -019)
 51. C.F. Wu, J.H. Chen*, H.K. Chen, and C.W. Chen, 2011, “Application of Advanced Process Control on Mix-Product Chemical Mechanical Polishing Processes,” International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT 2011), P2116-2119, Harbin, China. (EI) (NSC 98-2221-E-216 -019)
 52. 陳正文，2011，結合時間序列分析與卡曼濾波器之混貨製程控制，中華大學機械系碩士論文。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/09/26

國科會補助計畫	計畫名稱: 混貨化學機械研磨製程批次控制之研究
	計畫主持人: 陳俊宏
	計畫編號: 100-2221-E-216-004- 學門領域: 自動化製程技術
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：陳俊宏

計畫編號：100-2221-E-216-004-

計畫名稱：混貨化學機械研磨製程批次控制之研究

成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	2	2	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 （本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力 （外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

已發表二篇論文在國際學術研討會

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫針對混貨化學機械研磨製程的批次膜厚控制技術進行設計、分析以及應用，利用預測-修正型態的控制法則來調整化學機械研磨製程的研磨時間。本計畫順利達成以下目標：

1. 完成推導混貨 D-EWMA 控制器、時變 D-EWMA 控制器、時間序列控制器與時間序列結合卡慢濾波控制器。

2. 完成撰寫模擬混貨製程相關程式。

3. 完成撰寫擬合(fit)動態變異數分析模型相關程式。

4. 完成撰寫擬合 ARIMA(p, d, q)模型相關程式。

5. 完成撰寫卡曼濾波器相關程式。

6. 完成模擬混貨化學機械研磨製程，驗證所開發的混貨控制器的控制效能。

7. 完成實驗驗證所開發的混貨控制器的控制效能

實驗成果顯示，本計畫所開發之混貨控制器能對 CMP 混貨製程做有效控制，將來也能用在其他混貨半導體製程控制。計畫成果已發表 2 篇論文在國際學術研討會，並培養一位碩士生。