

明新科技大學 97 校內專題研究計畫成果報告

電氣－液壓伺服系統智慧型補償器之設計研究 Design on Intelligent Compensator of Electro-Hydraulic Servo System

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫編號： MUST-97 機械-09

執行期間： 97 年 01 月 01 日至 97 年 09 月 30 日

計畫主持人：楊永光

共同主持人：

計畫參與人員：林建良

可立即對外提供參考

(請打√) 一年後可對外提供參考

兩年後可對外提供參考

處理方式：完整報告內容因涉及專利、技術移轉案或其他智慧財產權，不予公開。

執行單位：明新科技大學 機械工程系

中 華 民 國 97 年 9 月 30 日

摘 要

本文係針對電氣—液壓伺服控制系統應用傳統PID控制器與智慧型控制器之設計技術，以MATLAB/Simulink建構控制系統程式並進行動態模擬；藉由實驗計劃法之統計方法、變異數分析與迴歸分析技術，探討控制器參數對系統行為之影響程度，同時可以獲得最佳控制器參數組合，藉此進行定位及追蹤控制性能的改善，並推算控制器參數與系統行為的數學模式。經由本研究，發現智慧型模糊PID控制器與類神經網路控制器有較佳的系統行為，同時實驗計劃法之應用則具有簡化控制器參數調整的試誤過程之功效，並且可以預測控制器參數與系統行為之相關性。

關鍵字：電氣—液壓伺服系統、智慧型控制器、實驗計劃法、
MATLAB/Simulink軟體。

Abstract

This research focused on utilizing MATLAB/ Simulink to simulate and compare the electro-hydraulic servo control system based on three different design approaches, which are a traditional PID controller design method and a fuzzy logic PID controller. Through a design of experiments method, analysis of variance (ANOVA) and regression analysis, how the controlled parameters impacts the controller can be evaluated and an optimal parameter setting can be obtained. Furthermore, not only the tracking or positioning performance of a controller can be greatly improved, but also mathematical models are established using the proposed method. Based on the findings, the found fuzzy logic PID controller utilizing the new designing method yields a better performance than that from the traditional PID controller design technique. In addition, a trial-and-error tuning approach can be eliminated.

Keywords: Electro-Hydraulic Servo System, Intelligent Control, Taguchi Experimental Method, Matlab/Simulink

目 錄

摘 要	i
Abstract	ii
目 錄	iii
表目錄	v
圖目錄	vi
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻探討	2
第二章 電氣—液壓定位控制系統	5
2.1 伺服系統特性與架構	5
2.2 電氣—液壓伺服系統數學模式建立	5
2.2.1 系統的基本方程式	6
2.2.2 流量伺服閥之數學模式	8
2.2.3 液壓缸之數學模式	8
2.4 電液伺服閥之選用	9
2.5 系統參數數據	10
第三章 控制理論	12
3.1 PID控制器理論	12
3.2 模糊控制器架構	12
3.3 類神經網路控制器	13
3.3.1 類神經網路控制系統	14
第四章 實驗分析規劃	16
4.1 實驗設計相關理論	16
4.2 變異數分析	17
4.3 迴歸分析	19
4.4 殘差分析	20
第五章 實驗結果與討論	21
5.1 PID控制實驗結果	21
5.1.1 ANOVA分析	24
5.1.2 建構迴歸模型	30
5.1.3 殘差分析	31
5.1.4 PID最佳參數組合	38
5.2 模糊控制實驗結果	39
5.2.1 模糊控制實驗設計	40
5.2.2 PD-PI模糊控制最佳參數	41
5.3 類神經網路控制實驗結果	42
5.4 結果比較	43
第六章 實 結 論	45
6.1 結 論	45
參考文獻	46

符號彙編.....	49
附錄一 工作進度表.....	51

表目錄

表 1 電氣液壓系統參數表	11
表 2 Ziegler-Nichols 調整法之 PID 參數	21
表 3 控制實驗結果	22
表 4 實驗計劃法之 PID 控制	23
表 5 最大超越量 ANOVA 分析結果	26
表 6 上升時間 ANOVA 分析結果	26
表 7 穩定時間 ANOVA 分析結果	27
表 8 誤差量 ANOVA 分析結果	27
表 9 最大超越量因子貢獻度	28
表 10 上升時間因子貢獻度	28
表 11 穩定時間因子貢獻度	29
表 12 誤差量因子貢獻度	29
表 13 最大超越量殘差值結果	32
表 14 上升時間殘差值結果	33
表 15 穩定時間殘差值結果	34
表 16 誤差量殘差值結果	35
表 17 PID 控制最佳參數組合與驗證	38
表 18 實驗計劃法之 PD-PI 模糊控制	40
表 19 PD-PI 模糊控制最佳參數組合與驗證	41
表 20 類神經網路控制性能指標	42
表 21 綜合控制實驗最佳結果之比較	43

圖目錄

圖 1 位置控制系統圖	5
圖 2 伺服閥控液壓系統示意圖	6
圖 3 位置控制系統圖	8
圖 4 轉換後位置控制系統圖	9
圖 5 伺服閥流量選用表	10
圖 6 等效系統方塊圖	11
圖 7 模糊控制器架構圖	13
圖 8 簡單線性迴歸	20
圖 9 Ziegler-Nichols 調整之 PID 控制圖	22
圖 10 最大超越量殘差的常態機率圖	36
圖 11 上升時間殘差的常態機率圖	36
圖 12 穩定時間殘差的常態機率圖	37
圖 13 誤差量殘差的常態機率圖	37
圖 14 PID 最佳參數與 Ziegler-Nichols 調整之控制圖	38
圖 15 控制規則推論部歸屬函數圖	39
圖 16 PD-PI 模糊控制最佳參數之控制圖	41
圖 17 類神經網路控制之響應圖	42
圖 18 綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖	44

第一章 緒論

1.1 前言

近年來國內產業技術朝向微小化及精密化的方向發展，對於控制精度的要求也相對的提高。所以在傳統的油壓控制系統已不能滿足工業需求；因此，能達到更精確控制的電氣—液壓伺服控制(Electro-Hydraulic Servo Control)已在自動化領域佔有重要地位。在一般的工業機械應用中，凡是需要大功率、響應快、震動小、動作滑順、精確反應的控制系統，電氣—液壓伺服系統是最佳的選擇；例如：萬能材料試驗機、運輸機械、精密壓床、元件測試機等；所以，電氣—液壓系統之應用與設計技術就成為系統工程師不可獲缺的知識。但是，由於電氣—液壓伺服系統具有非線性特性，如伺服閥對負載的非線性特性、比例線圈的遲滯現象、零點飄移及閥軸的內漏等，所以實際的電氣—液壓伺服系統為一高度非線性的時變系統；由於非線性系統之數學模式較為複雜且不易分析，所以，在控制理論上，常以線性化系統表示之。如魏榮輝和洪至謙[1,2]以Moog公司30型流量控制伺服閥作模擬分析，利用MATLAB/Simulink軟體繪出流量控制伺服閥系統數學方塊圖，並進行各項動態模擬分析，結果顯示與實際參數值有相同的結果。而後提出以伺服閥控制射出成型機之射出速度為主，在Matlab/Simulink分析環境下，探討射出速度伺服控制器的頻寬特性，並加以分析。

控制系統的時域響應，在以往有相當多的研究致力於如何減少選擇最佳PID控制器參數所花的時間，在現有的調整技術之中，以Ziegler-Nichols調整法[3]最為著名，且在相當多的實際應用中表現相當優異，但是調整PID控制器參數過程中，實驗次數過多為其主要缺點。因此，以用較少的實驗做出較好的控制器設定便是一門學問。

統計實驗計劃法(Statistical Design of Experiment,DOE)[4,5]，意指規劃實驗的過程可以蒐集到合宜的資料，經過統計方法的分析可得到正確、客觀的結論。傳統的實驗設計策略就是實務界最常用的一次一因子法，此種方法是在進行一次實驗時，只改變一個因子的水準，而將其他因子都固定在同一水準上，以觀察該因子在實驗範圍內對反應變數

的影響，雖然此方法可以輕易的觀察各因子反應變數之間的關係，但主要缺點就是未能考慮介於因子間任何可能的交互作用，為其美中不足之處。為了改善上述的缺點，於是有了全因子設計(Full Factorial Design)的出現，此種實驗設計方法，研究所有因子水準排列組合，可以了解所有因子的主效應(Main Effect)及所有交互作用的影響。至今已經廣泛的利用在各種工程設計，以及各種領域。

本文針對電氣—液壓伺服控制系統，做定位及追蹤控制性能的研究。建構系統之轉移函數及方塊圖，再以 Matlab/Simulink 進行電腦模擬，其中以比例—積分—微分三個控制參數，利用實驗計畫法(DOE)進行控制因子之參數設計。研究中以 PID 控制器、模糊 PID 控制器、類神經網路控制器進行分析與比較，並應用變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)探討影響系統行為的重要因子，最後進行實驗確認預測的結果。

1.2 文獻探討

電氣—液壓伺服控制系統的應用產品，已經有許多廠商及研究者開發完成。關於電氣—液壓伺服控制系統的研究報告甚多，因此相關之文獻相當廣泛。例如：

1. 近年國內學術上對電氣—液壓伺服控制系統也有一些的研究：

(1) 許朝勝[6]及葉國安[7]運用了模糊理論及類神經模糊控制法則，以控制液壓缸之位置，並比較兩種控制器之效果，發現類神經模糊控制對於系統不確定性有良好的適應能力，且在穩態誤差上較傳統PID 控制器為佳；此類控制法則不需數學模式，只需根據觀察上的語言性法則進行推論。類神經網路雖故可自行學習，但在收尋資料點時，需要龐大記憶體，且未必一次就可以完成，需要多次的收集資料，才能有完美的響應。

(2) Yun及Cho[8][9]、許毅然[10]應用模式參考型適應性控制(MRAC)法則，來設計伺服閥控制油壓致動器系統；由於伺服油壓控制系統是高階的非線性系統，當系統受到變動的負荷時，系統參數也會受到影響而有所改變。本研究提出對伺服油壓控制系統參數的求法，而由模擬分析與實驗結果顯示本文所提出的方

法，可增進模擬分析的正確性。但系統受到變動的負荷不定，每一次變動負荷，就要重新設計參數，此為研究中不足之地方。

- (3) 陳秉州[11]應用傳統模糊控制器、灰預測模糊控制器對伺服系統控制性能作一系列的評估，可有效的改善使用傳統控制器的控制性能，並且使用者可依據不同的需求，選擇不同的系統控制目標，作為控制器的輸入變數，如壓力，位置等。但此實驗次數過於繁多，且響應未達最佳化，此為不足之地方。

2. 國外學者對於控制器設計有許多研究：

- (1) 控制系統的時域響應，在現有的調整技術之中，以 Ziegler-Nichols 調整法[3]最為著名，且在相當多的實際應用中表現相當優異，但是調整 PID 控制器參數過程中，實驗次數過多為其主要缺點。Bevrani[12]等以自動增益控制為主，設計一個強健的 PI 控制器，與 H_{∞} 電動輸出回應控制相比較，以反覆線矩陣不平等運算法則的到一個最佳的性能表現。Chen 和 Hwang[13]以 PD 反覆的學習控制氣動的 X-Y 移動平台系統。實驗結果顯示在控制期間系統易受到外部的負荷干擾，利用反覆的學習控制，可以拒絕干擾，並有效的追蹤軌跡。
- (2) 模糊理論(Fuzzy)自 1965 年 Zadeh 教授[14]首次發表的模糊集合論文，至今已有四十二年的歷史，爾後在 1974 年 Mamdani 教授提出以 if-then 語意形式的推論邏輯，這期間不斷有許多學者投入相關理論與應用的研究，使模糊理論的應用迅速擴展至許多領域。模糊規則利用設計者(專家)本身所給予的知識或邏輯規則去描述複雜的非線性系統，換言之，控制方法是建立在直覺和經驗上，就是以專家經驗法則的控制方法。然而模糊理論用於控制上也有相當多的缺點，例如：(1)專家經驗所架構的規則，是不易取得的。(2)使用精密度要求較高控制系統時，模糊系統需要龐大的資料庫，但實際系統的硬體並非能滿足需求。
- (3) 近年來，隨著科技的進步，具有自我學習能力的智慧型控制器興起，以此方法解決專家經驗不足的問題；如 Procyk 和 Mamdani[15]提出具有學習能力的自組織控制器(Self-organizing fuzzy controller)。之後 Shao[16]及 Zhang[17]提出修正

意見，以及不同學習方式之自組織控制器提出[18]。Lee[19]也應用自調式適應控制，對液壓系統作線上識別，並將液壓缸之位移及負荷回授，形成閉迴路之閥控液壓系統，再配合適當的控制法則進行適應控制，自調適應控制器與極點安置控制相較有較好的控制效果。模糊理論另一個問題，模糊資料庫的龐大，有學者[20、21、22]以模糊滑動平面 S 取代傳統模糊資料以誤差 e 及誤差變量為輸入規則，以改善此問題。Barai 和 Nonami[23]利用模糊預測與遺傳基因運算法為控制法則，以設計最佳化，結果顯示，在電磁比例的控制活瓣劃分區域有較好的追蹤性能。Yamamoto[24]等利用模糊控制器對氣壓伺服系統做適應性控制。Huang 和 Chen[25]提出模糊規則線上學習能力增加補償近似值錯誤，利用滑動模式控制，以改善控制性能。

- (4) 類神經網路(Neural Network, NN) 最先由 McCulloch 和 Pitts 在 1943 年所提出 [26]，NN 有平行處理及自我學習能力之優點，而其學習的過程也是最佳化的過程。因此許多研究將 FLC 以 NN 的架構來實現，稱為 FNNC[27、28、29]。FNNC 中最廣泛被採用的學習法則之一即是倒傳遞(Backpropagation Algorithm, 簡 BP)[30]。Shibata[31]等提出以一個伺服系統控制，利用 σ 修正方法來改善類神經網路控制的學習能力，並消除外部干擾，調整出強健的參數控制。

第二章 電氣—液壓定位控制系統

2.1 伺服系統特性與架構

用伺服閥作控制的方式有很多，如力量、速度、位置等，本文以位置控制系統為主。圖 1 所示的系統圖為位置控制系統，對伺服系統輸入信號時，經過伺服放大器將信號放大再送至伺服閥。伺服閥根據信號的大小，成比例將液壓油量輸送到油壓缸而驅動活塞。因此與油壓缸連接的負荷其位移與輸入信號成比例。如果負荷之位移不與輸入信號成比例，則可用位置檢出器檢出其位置，並將電壓信號回授用以修正活塞的位置。

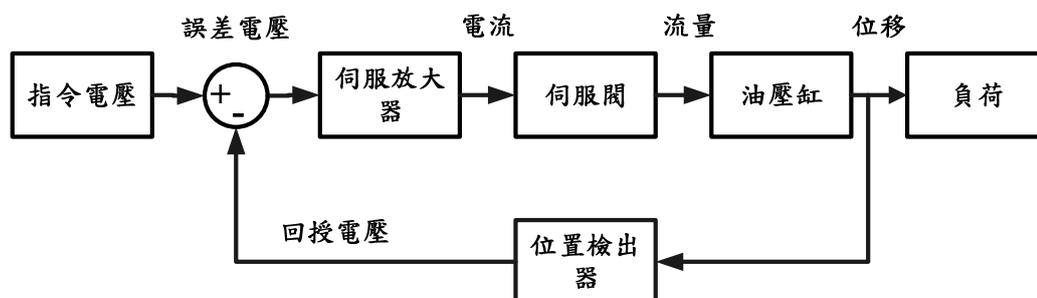


圖 1 位置控制系統圖

2.2 電氣—液壓伺服系統數學模式建立

為了理論分析之需要，將實際的電氣—液壓伺服系統簡化如圖 2 所示，系統中主要元件為伺服閥及液壓缸。

為了解受控系統的特性以便於控制的設計，將油壓系統作了以下的基本假設：

- (1) 定壓源操作($P_s = const.$)，回油壓力等於大氣壓力。
- (2) 工作流體流經各閥口的流量係數(C_d)為一定。
- (3) 忽略控制閥與液壓缸的洩漏情形。
- (4) 忽略溫度效應對反應特性之影響。

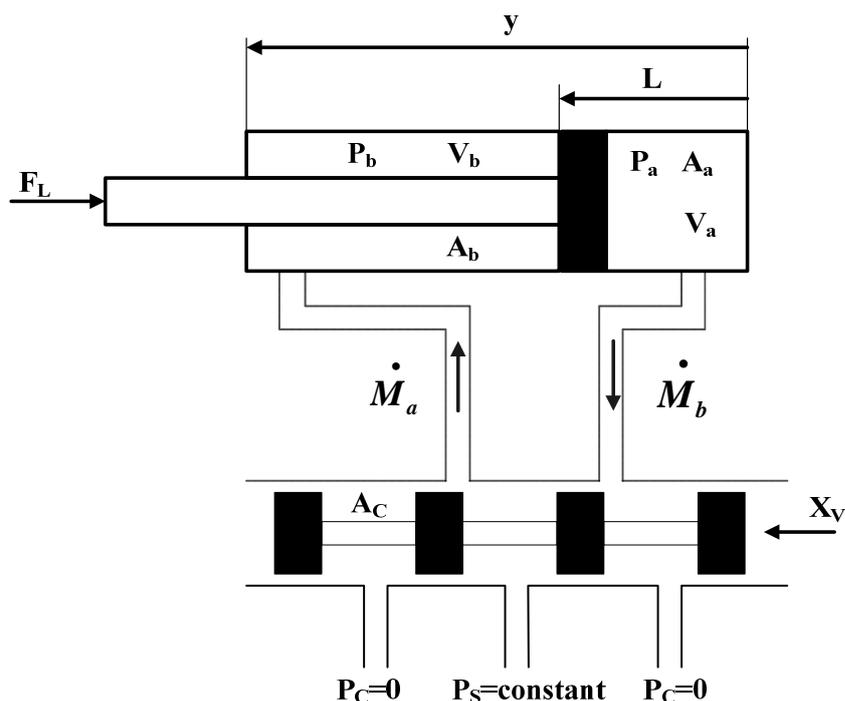


圖 2 伺服閥控液壓系統示意圖

2.2.1 系統的基本方程式

建立系統轉移函數時，先列出各元件的方程式或轉移函數[32]，如下：

1. 放大器增益：

$$\Delta V = V_i - V_f$$

$$K_A = \frac{i_c}{\Delta V} \quad (2.1)$$

2. 伺服閥滑軸線性化的流量方程式：

流進液壓缸進油孔流量與從液壓缸回油孔流出的流量分別為：

$$Q_1 = C_d W X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (2.2)$$

$$Q_2 = C_d W X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \quad (2.3)$$

動態分析考慮到洩漏量， $Q_1 \neq Q_2$ ，故定義負載流量為：

$$Q_f = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{C_d W X_v}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (\sqrt{P_s + P_1} + \sqrt{P_2}) \quad (2.4)$$

以條件所知 $P_f = P_1 - P_2$ 、 $P_s = P_1 + P_2$ 得 $P_1 = (P_s + P_f)/2$ 、 $P_2 = (P_s - P_f)/2$ 。並對(2.4)式線性化得(2.5)：

$$Q_L = K_o X_v - K_c P_L = Q_{NL} - Q_{LF} \quad (2.5)$$

3. 液壓缸的流量連續方程式：

從閥進入液壓缸的流量 Q_I 除了推動活塞運動外，還要補償缸內的各種洩漏，補償液體的壓縮量及管壁與缸體的機械膨脹量。當液體壓力增大時，液體本身及液體中所含的氣體會受到壓縮，盛裝液體的容器也會發生膨脹，此時流量連續方程式的轉移函數為：

$$Q_L(S) = A_p S Y(S) + C_l P_L(S) + \frac{VS}{4E} P_L(S) \quad (2.6)$$

4. 液壓缸的負載力平衡方程式：

液壓缸的輸出力與負載力相平衡，負載力一般包括活塞與負載的慣性力、粘性阻尼力、彈性負載力以及其他外干擾力等。

$$p_f A_t = M_c S^2 X_t + B_c S X_t + K_t X_t + F_f \quad (2.7)$$

5. 回饋增益：

$$V_f = K_{fb} X(S) \quad (2.8)$$

將以上各元件的傳遞函數關係以結構圖型式表示，並且按傳遞關係連成閉迴路系統的方塊圖如圖 3。

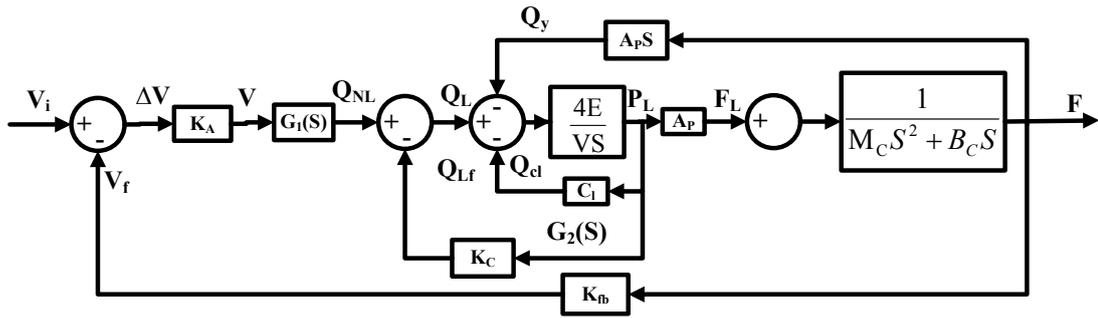


圖 3 位置控制系統圖

其中 $G_2(S)$ 為圖 2.6 所示局部迴路的傳遞函數。

$$G_2(S) = \frac{4E}{VS + 4EK_C} = \frac{K_N}{T_C S + 1} \quad (2.9)$$

式中， $T_C = \frac{V}{4EK_C}$ 、 $K_N = \frac{1}{K_C}$

2.2.2 流量伺服閥之數學模式

伺服閥在固定的供油壓力與固定的負荷壓力下，閥的響應可以一階的狀態函數近似。

$$G_1(S) = \frac{K_V}{T_V S + 1} i(S) \quad (2.10)$$

2.2.3 液壓缸之數學模式

$$G_3(S) = \frac{K_1(T_c S + 1)}{(T_1^2 S^2 + 2\xi_1 T_1 S + 1)S} \quad (2.11)$$

式中， $T_1 = \sqrt{\frac{T_c(M_C/B_C)}{B_1}}$ 、 $B_1 = 1 + \frac{A_p^2 K_N}{B_C}$ 、 $K_1 = \frac{1}{B_C B_1}$ 、 $\xi_1 = \frac{T_c + M_C/B_C}{2\sqrt{B_1 T_c (M_C/B_C)}}$

$$G_4(S) = \frac{(T_c S + 1)}{C_3 S^3 + C_2 S^2 + C_1 S + 1} \quad (2.12)$$

式中， $C_1 = T_c + \frac{1}{K_1}$ 、 $C_2 = \frac{1}{K_1}(2T_1 \xi_1)$ 、 $C_3 = \frac{1}{K_1}(T_1^2)$

簡化後的系統方塊圖，如圖 4 所示。

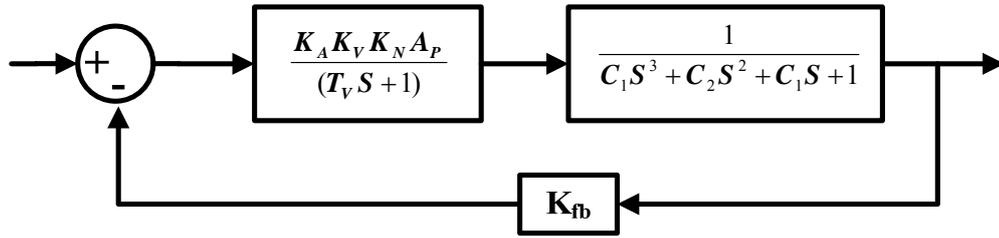


圖 4 轉換後位置控制系統圖

2.4 電液伺服閥之選用

電液伺服閥為依照電動及其他輸入信號控制流量或壓力的閥門，故電液伺服閥計有電傳信號作動之電動液壓伺服閥及機械信號作動之機構伺服閥。伺服閥一般是應用在一般產業機械之自動控制，及需要位置控制、速度控制等高精度和高響應之作業上。本研究之電液伺服閥選用如下：

1. 定位時間為 3 秒以內、加速時間為 0.4 秒、減速時間為 0.4 秒，故最大速度 $V_{MAX} = S/t = 24/3 - (0.4 + 0.4) = 10.9(cm/sec)$ 。
2. 供給壓力 $P_S = 1000(psi)$ ，面積 $5(cm^2)$ 。
3. 其流量 Q 為油壓缸面積及所需速度決定，所以 $Q_l = A \cdot V_{max} = 5 \times 10.9 = 54.54(cm^3/sec) = 3.28(l/min) = 0.867(gpm)$ 。
4. 研究中使用 MOOG G631-3001A 伺服閥，由圖 5 伺服閥流量選用表可知，流量 $0.867(gpm)$ 適合選用 G631-3001A 伺服閥。

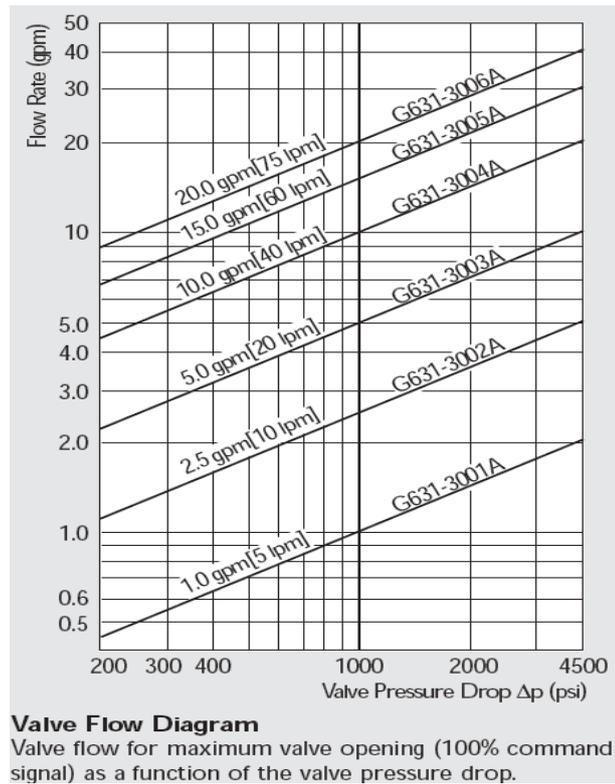


圖 5 伺服閥流量選用表

2.5 系統參數數據

電氣—液壓伺服系統，若要達到一定的性能要求，需要利用油壓迴路間相關參數的匹配，此參數包括：液壓缸的尺寸、液壓管路的直徑大小、油壓管路的長度、油壓缸的有效截面積大小、油壓缸的行程長度、控制閥的特性、所使用的壓力大小及油路之間的设计問題等。本研究將根據推導出的電氣—液壓伺服系統數學模式，進行電腦模擬控制，以驗證相關參數間的變化，並加以改善。

藉著電腦模擬可事先預測系統之性能，客觀評估各參數間互相的影響，本研究以 Matlab/Simulink 軟體建構控制系統，並進行動態模擬分析。

系統模擬分析時，電氣—液壓伺服系統之各項參數的決定，將由實際元件規格或廠商提供之型錄而得，將此參數列於表 1 中。

表 1 電氣液壓系統參數表

伺服閥	最大流量 Q_{max}	3	L/min
	時間常數 T_v	0.025	s
	閥軸直徑 d_v	1.25	cm
	閥口流量係數 C_d	0.61	
液壓缸	活塞桿質量 M	$8.67 \cdot 10^{-4}$	kgf·s ² /cm
	活塞直徑 D_a	1.5	cm
	活塞受力面積 A_p	$A_p = 5$	cm ²
	活塞行程 L	24	cm
	黏滯阻尼係數 B_c	0.12	kgf · s/cm
	供給壓力 P_s	70	kgf/cm ²
	回由壓力 P_r	5	kgf/cm ²
液壓油	液壓油密度 ρ	870	kg/m ³
	液壓油彈性模數 E_{oil}	14280	kgf/cm ²

將參數係數代入圖 6 並整理，可得等效系統方塊圖，如圖 2.11 所示。

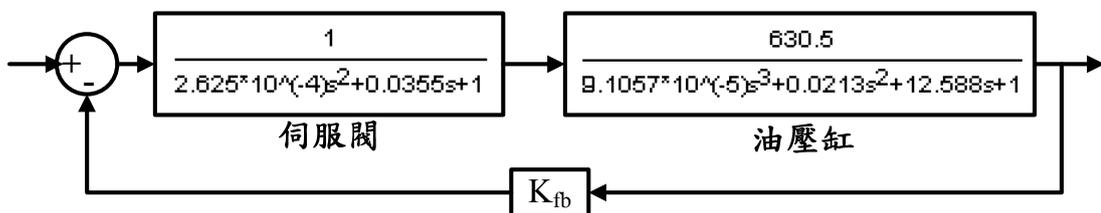


圖 6 等效系統方塊圖

第三章 控制理論

3.1 PID 控制器理論

將PID 控制器視為輸入誤差、輸出操作量的系統，則它的轉移函數(transfer function) 為(3.1)式：

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3.1)$$

式中提供了比例、積分、微分控制動作，這些動作影響控制系統為：

1. 比例動作 K_p ：為一個可調整增益的放大器，可提高精確度但卻降低系統的穩定性。
2. 積分動作 T_I ：增加一個在原點的極點，可改善穩態誤差，卻使系統變不穩定。
3. 微分動作 T_D ：增加零點數，可改善系統的穩定性，卻使系統反應變慢。

3.2 模糊控制器架構

當設計者要設計一個模糊控制器時，一般需考慮參數的設計（即控制器本身的輸入及輸出參數設計）、歸屬函數設計、規則設計以及模糊控制器的四個子系統—模糊化界面（Fuzzification Interface）、決策邏輯（Decision Making Logic）、解模糊化界面（Defuzzification Interface）、知識庫(Knowledge Base)。這些因素都會影響模糊控制器的運作邏輯，亦即會影響控制系統的控制品質。如圖7為模糊控制器的基本架構。

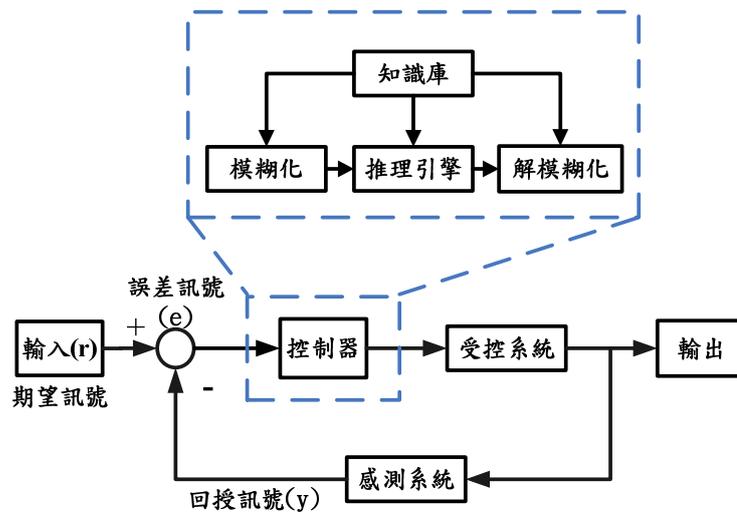


圖7 模糊控制器架構圖

3.3 類神經網路控制器

類神經網路的型態與大小會影響系統的學習能力，神經元太少則無法處理複雜的問題，神經元太多則效率不佳。類神經網路的大小如何決定，可依問題的複雜程度、訓練類神經網路的範例個數及所需的精密度來決定。透過經驗的累積與試誤法 (Trial and Error) 一般可得最佳的網路大小。

類神經網路的連結架構，以不同處理資訊的能力可分類為很多架構，以下以最常見的前饋式 (Feedforward) 類神經網路與回饋式 (Feedback) 類神經網路二種進行介紹。

1. 前饋式類神經網路：

前饋式類神經網路架構，其連結方式以單方向向前傳遞方式連結。前饋式類神經網路有可細分為：單層前饋式類神經網路(Single-Layer Feedforward Networks)、多層前饋式類神經網路(Multilayer Feedforward Networks)。

(1) 單層前饋式類神經網路：

單層的前饋式類神經網路是一種最簡單的網路架構，訊號由輸入層(Input Layer)進入，經過加權後進入神經元中處理，再由神經元輸出。通常此種網路的功能較差，只能處理線性的問題。

(2) 多層前饋式類神經網路：

多層前饋式類神經網路與單層前饋式類神經網路最大的區別為，網路中至少有包含一層隱藏層，其功能為調節網路內部輸入值與網路整體輸出值。運算方式由輸入層之輸入訊號，經過加權後送入隱藏層中處理，隱藏層的輸出加權後，再進入輸出層做處理，最後輸出層的輸出為類神經網路的輸出。此種多層前饋式類神經網路可以處理複雜性高的問題。

2. 回饋式類神經網路：

回饋式類神經網路與前饋式類神經網路最大的不同為，至少包含一個迴授迴圈，神經元會將其輸出訊號回傳至同一層的其他神經元，或是輸出層透過另一組權重值，迴授連接於網路的某處(如輸入層、隱藏層)。回饋式類神經網路架構常用於處理動態現象，對於非線性現象的動態系統，回饋式類神經網路會比其他類型網路有更好的學習能力。

3.3.1 類神經網路控制系統

類神經網路成功的應用在動態系統的識別和控制，以多層感知器的逼近能力，使它成為建立非線性系統與實現一般目的非線性控制器的一種受歡迎的選擇。本節將介紹三種用於預測和控制的類神經網路架構：

1. 模式預測控制(Model Predictive Control,MPC)：

模式預測控制使用一個非線性受控體的類神經網路模式，對有可能預測未來受控體的響應訊號，並指定未來時間範圍，以控制器所計算出的控制量，藉由最佳化演算法算出最佳化未來受控體的控制訊號。在模式預測控制的第一個階段就是要決定類神經網路受控體模式，亦即進行系統識別。類神經網路受控體模式的輸入 U 和受控體輸出 y_p 來預測受控體未來輸出值。並在指定範圍內，藉由數值最佳化程式找出可極小化性能準則(式 3.2)的控制訊號。

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2)) \quad (3.2)$$

式中， U' ：是暫時的控制訊號

y_r ：期望的響應

y_m ：類神經網路模式的響應

ρ ：控制增加量的平方和在性能指標上的貢獻

2. NARMA-L2(Nonlinear Autoregressive Moving Average,NARMA)：

當受控體藉由伴隨的形式(Companion Form)近似化時，此神經元控制器稱為 NARMA-L2 控制。此控制系統藉由消除非線性來將非線性系統動態模式轉成線性系統動態模式。對 NARMA-L2 模式的識別階段，能訓練一個類神經網路來近似非線性函數 N ，這是為了 NN 預測控制器所使用的識別步驟。如果此系統輸出會跟隨著某種參考軌跡，則最終控制器具有式(3.3)形式。

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \quad (3.3)$$

3. 模式參考控制(Nodel Reference Control,MRC)：

此控制器的線上計算量與 NARMA-L2 一樣為極少。而模式參考架構除了類神經網路受控體模式之外，還要一個獨立的離線訓練出的類神經網路控制器。首先識別出受控體模式，接著訓練控制器使得受控體輸出跟隨著參考模式的輸出。

第四章 實驗分析規劃

實驗設計的最主要目的惟在既有的設備之下，以最經濟有效的方法取得最多有用的數據，然後進一步透過統計分析以建構出一個受外來變異影響最小的製程，即所謂的穩健製程以及符合生產目標之最佳生產條件組合。本節主要是介紹利用實驗設計法分析的相關理論，包括迴歸分析、殘差分析、統計檢定及描述應用期望函數來解決多重品質特性的問題。在實驗的規劃與分析部份，本文主要採用實驗計劃法來進行參數最佳化的探討。因此本章主要針對實驗計劃法相關理論等，進行詳細的介紹與應用公式的列舉說明。

4.1 統計檢定理論

統計假設(Statistical Hypothesis)就是有關機率分配的參數或者模型參數的一個敘述，假設反映欲解決問題的一些猜測。以下便針對統計檢定所使用到假設的種類、顯著水準與p-value判斷方法作一介紹：

(1) 假設的種類：

虛無假設(Null Hypothesis)：係指研究者希望放棄、否定的假設，以 H_0 表示之。

對立假設(Alternative Hypothesis)：係指對立於虛無假設以外之其他可能假設，以 H_1 表示之。兩種假設為互斥集合之關係。

上述的兩種假設中，以虛無假設為主，對立假設為次。當檢定結果為放棄(Reject，棄卻、否定) H_0 時，才會決定接受(Accept) H_1 ；而當接受 H_0 時，便放棄(即用不到了) H_1 。

(2) 顯著水準 (Significance Level)：虛無假設與對立假設建立以後，要選定一個衡量的標準以拒絕或接受虛無假設，這個衡量的標準(機率值)就稱為顯著水準，以希臘字母 α 表示。可被接受的顯著水準標準因人而異，一般統計上常用的有： $\alpha=0.1$ 、 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ ，但最常使用的為 $\alpha=0.05$ 。所以當 $\alpha=0.05$ ，即表示有 0.95 的信賴係數，或犯錯的機率為 5%； $\alpha=0.01$ ，即表示有 0.99 的信賴係數，或犯錯的機率為 1%。

(3) p-value (Probability Value)：在什麼樣的顯著水準(α)下，精確的算出棄卻域的臨界點剛好是樣本統計量，以提供決策者更多資訊。p-value 的判斷：一般統計檢定是給定顯著水準後查表來決定棄卻域，再計算資料是否落入棄卻域來判斷虛無假設是否顯

著。但由於電腦的發達，一般電腦統計套裝軟體都會直接算出 p-value，一旦知道 P-value 是多少，決策者就可以瞭解到資料是有多顯著。例如：當顯著水準 α 設定為 0.05，棄卻域為：p-value < 0.05 時，則拒絕 H_0 ，表示資料不服從常態分配；在常態檢定方面若要為常態分配，則 p-value 要大於 0.05 才能滿足常態分配。

4.2 變異數分析

變異數分析的主要目的是利用統計檢定的方法來評估實驗誤差，由於實驗數據或資料常會受到各種不同外在的因素所干擾，又必須同時考慮實驗的結果有一定精確度；因此，常會利用變異數分析來探討各因素所造成之影響效果，進而瞭解各控制因子的貢獻度，來彌補田口式實驗中無法研判各實驗參數對品質特性之影響的差異程度及誤差程序等方面的缺陷；藉此，得知如何改善變換何種控制因子，以得到最佳的品質效益。

變異數分析利用各實驗數據之間的差異程度，以統計分析的觀念將數據的變動分解成各因子、交互作用及誤差項等平方和，並檢定因子本身和交互作用之影響是否顯著 (Significance)。其分析內容包含了如下所示：

(1) 變異源(Source of Variation)

影響品質特性的對象，其中包含有可控因子 A, B, C, \dots ，與誤差因子(Error Factor, e) 及總變異(Total Variation, T)。

(2) 平方和(Sum of Squares, SS)

主要有各設計參數之變異平方和，其中包含有 $SS_A, SS_B, SS_{factor}, \dots$ ，與 SS_e 及 SS_T 。平方和計算式如下：

$$SS_T = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r y_{ij}^2 \right) - n \times r \times \bar{y}^2 \quad (5)$$

其中，上式總平方和表示為有 n 組實驗，而每組實驗有 r 個重複次數， \bar{y} 為所有品質特性量測值的平均值。

$$SS_{factor} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$SS_e = SS_T - \sum SS_{factor} \quad (7)$$

其中，各因子平方和表示為在 a 水準下所得平均值 \bar{y}_i ，減去總實驗平均值後之平方和相加。

(3) 自由度(Degrees of Freedom, DOF)

所謂自由度即為各獨立資料之個數，在ANOVA表中，各因子自由度等於其設計水準數減一；總自由度個數則等於全體實驗次數減 1；誤差自由度為總自由度減去所有因子自由度之和。

(4) 均方(Mean Squares, MS)

均方即為變異數，是各因子平方和除以其自由度。

$$MS_{factor} = \frac{SS_{factor}}{DOF_{factor}} \quad (8)$$

(5) F 值(F value)

為因子的變異數和誤差的變異數兩者之比值。在統計學上會利用 F 值來判斷特定因子是否顯著，當 F 值大於臨界 F 值時，且值愈大則表示該因子效果與誤差變異量差異越大；亦即，影響製程愈強烈。即下式：

$$F_{factor} = \frac{MS_{factor}}{MS_e} \quad (9)$$

(6) 純變動(The Excepted Sum of Squares, SS')

定義為各因子的平方和減去其自由度乘以誤差變異項。即：

$$SS'_{factor} = SS_{factor} - MS_{error} \times DOF_{factor} \quad (10)$$

(7) 貢獻度(Percentage of the Contribution to the Total Variation, ρ)

即為各因子的純變動佔總變動之百分比。經 F 值來判斷因子是否顯著後，在使用貢獻度來進行評估。

$$\rho_i = \frac{SS'_{factor}}{SS_T} \times 100\% \quad (11)$$

(8) 合併誤差

當使用某些直交表進行實驗情況下，會造成沒有誤差項，因此會結合一些平方和較小的因子以進行變異數的分析，另外田口也建議使用統合的方法，合併平方和較小的因子，以避免過度評估因子效果。

4.3 迴歸分析

實驗者經常有興趣於發展一個內插方程式給反應變數，此方程式就是所研究問題的一個經驗模型(Empirical Model)，迴歸分析(Regression Analysis)就是一般常用來適配經驗模型的方法，以計量的形式來呈現一個設計實驗的結果，並可透過迴歸模型來進行預測，製程最佳化，或製程管制[33]。

圖 8 為一個簡單線性迴歸的例子，採用最小平方法(Least Squares Method)配適出一條最適當且最能代表各點的迴歸直線，來描述兩個變數 X 與 Y 之間的關係，簡單線性迴歸方程式，可定義如下：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (12)$$

其中 Y 是因變數(Dependent Variable)或反應變數(Response Variable)，一個想試著解釋或預測的變數， X 是自變數(Independent Variable)，也被稱為預測變數(Predictor Variable)， ε 是隨機誤差項(Random Error Term)， β_0 為截距， β_k 是迴歸係數。此迴歸方程式解釋為當自變數 X 改變時，相對因變數 Y 會如何改變。

在適配出迴歸模型後，應給予適當的檢查，以保證它能提供一個真實系統的近似和，否則將會帶來粗劣的或是誤導整個結論。

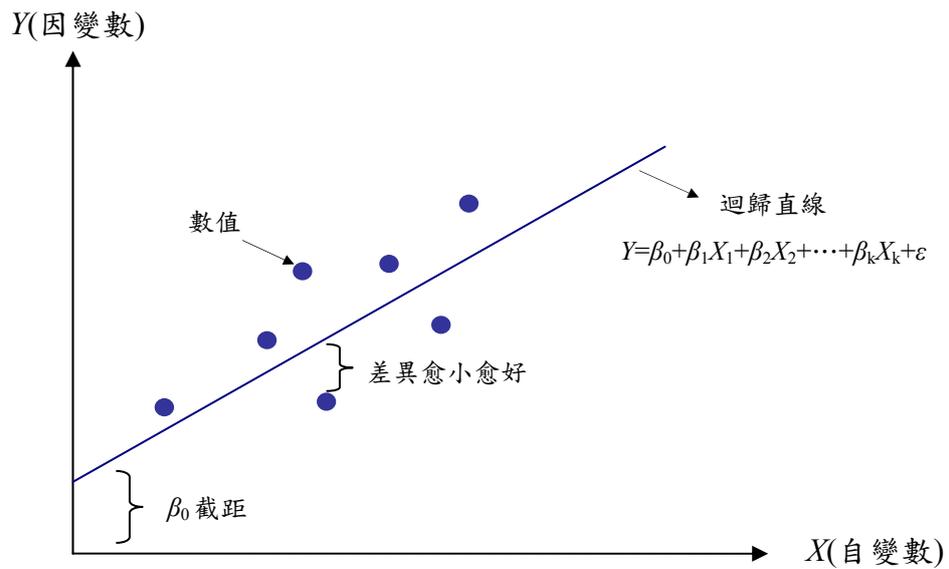


圖 8 簡單線性迴歸

4.4 殘差分析

在實務上完全仰賴變異數分析和迴歸方程式是不夠的，除非這些假定的有效性已經被檢驗過，所以模型適當性檢驗(Model Adequacy Checking)是資料分析過程裡的一個重要部分。殘差分析為首要診斷工具[34]，殘差(Residual)定義為個別實驗結果的實際值(Actual)，減去迴歸方程式配適出的預測值(Predicted)。透過對殘差的研究，許多有關基本假定的違反和模型不適當的型態都可以被發現，對於本實驗的正確性有檢驗效用。

常態機率圖是一種縱座標軸以標準常態分佈 Z 值為刻度的圖表，可以用來判定殘差數據是否呈現常態分佈。其作法如下[35]：

- (1) 排序：殘差由小到大排序。
- (2) 繪點：將殘差數據依下列座標軸繪於圖上，縱座標為 $Z = \Phi^{-1}((j-0.5)/n)$ ，其中 Φ^{-1} 為標準常態分佈累積機率函數之反函數； n =殘差值數據數目； j =數據排序後之序號，最小序號為 1，最大序號為 n 。橫座標為殘差數據值。
- (3) 繪線：繪出一條能通過多數正常點之直線。
- (4) 判讀：如點均在直線附近，則殘差數據呈現常態分佈

第五章 實驗結果與討論

本研究對電氣—液壓伺服控制系統作位置控制，藉由液壓缸之位置控制，即可對系統作靜態或動態之模擬，得到其系統之響應，進而分析各參數間的變化；亦可藉由實驗的結果，評估各控制器參數應用於電氣—液壓伺服控制系統之效益。

5.1 PID控制實驗結果

在控制領域中定位控制的應用非常普遍，且控制上大部份會從步階定位開始，本研究步階的大小為100mm，作為液壓缸的步階定位控制之參考輸入目標值並以最大誤差量(Overshoot, O_S)、上升時間(Rise Time, R_T)、穩定時間(Setting Time, S_T)、穩態誤(Error, E_{SS})差作為評估系統之考量。

根據Ziegler-Nichols 的調整準則，得到 $K_{CP}=2.1645$ ，會產生一定振幅維持在連續振動狀態，並得到此連續振動之週期為 $T_{CP}=0.112$ ，我們將P、PI、PID 控制器之參數值設如表2。本實驗所使用的控制器參數增益，PID控制器分別為 $K_P=1.298$ 、 $K_I=0.056$ 、 $K_D=0.014$ ，此時系統為圖9。

表2 Ziegler-Nichols調整法之PID參數

	K_P	T_I	T_D
P	1.082	0	
PI	0.974	0.093	
PID	1.298	0.056	0.014

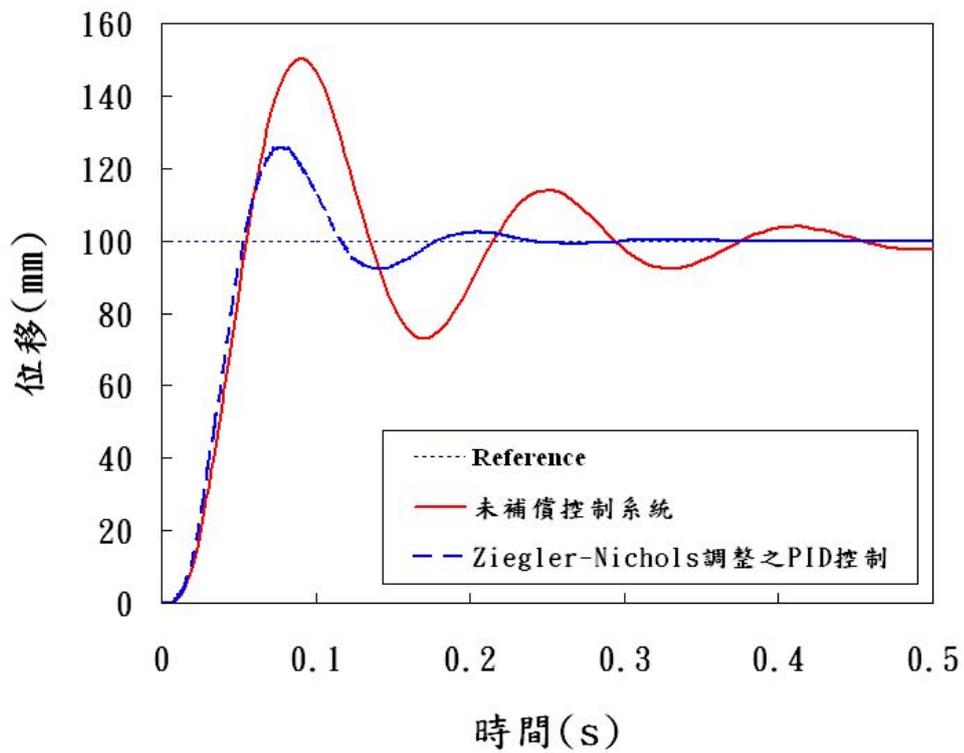


圖9 Ziegler-Nichols調整之PID控制圖

由圖9中，在實線部份所代表之未受補償器控制之系統與虛線所代表的是Ziegler-Nichols調整後之PID控制系統之比較，由表3，經過Ziegler-Nichols調整PID參數後有明顯的正確改變，最大超越量及穩定時間變小，但此系統經調整後的響應並未達到所設定之目標值，因此利用實驗計劃法規劃實驗再次做比較。

表3 控制實驗結果

	$O_s(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{ss}(mm)$
未補償系統	50.2856	0.033	0.3446	0.1771
Ziegler-Nichols 調整之 PID	25.5313	0.0325	0.1535	0.0141

依據Ziegler-Nichols調整PID參數之範圍，將針對其範圍上下調整尋求最佳參數，藉由實驗設計來進行實驗的規劃與分析，三個因子皆為三個水準，並進行全因子實驗，亦即總共進行27次實驗，如表4所列。

表4 實驗計劃法之PID控制

Std \ 參數	P	I	D	O _S (%)	R _T (s)	S _T (s)	E _{SS} (mm)
1	0.5	0.025	0.018	0.0476	0.1201	0.1831	0.0476
2	1	0.025	0.018	6.3912	0.042	0.1025	0.0629
3	1.5	0.025	0.018	24.6086	0.0286	0.1449	0.0606
4	0.5	0.035	0.018	0.1958	0.1191	0.1756	0.1958
5	1	0.035	0.018	6.4283	0.0419	0.1025	0.0246
6	1.5	0.035	0.018	24.6303	0.028	0.1448	0.0456
7	0.5	0.045	0.018	0.3426	0.1201	0.1755	0.3426
8	1	0.045	0.018	6.4654	0.0411	0.1027	0.0124
9	1.5	0.045	0.018	24.652	0.0286	0.1445	0.0274
10	0.5	0.025	0.022	0.0349	0.1433	0.2112	0.0349
11	1	0.025	0.022	0.4622	0.0474	0.0735	0.0519
12	1.5	0.025	0.022	16.8708	0.0273	0.0932	0.0577
13	0.5	0.035	0.022	0.1982	0.143	0.211	0.1982
14	1	0.035	0.022	0.5001	0.0471	0.0732	0.0103
15	1.5	0.035	0.022	16.8923	0.0272	0.0932	0.0379
16	0.5	0.045	0.022	0.3599	0.1435	0.2025	0.3599
17	1	0.045	0.022	0.5379	0.0475	0.0734	0.0319
18	1.5	0.045	0.022	16.9138	0.0269	0.0932	0.0203
19	0.5	0.025	0.026	0.0356	0.162	0.2397	0.0356
20	1	0.025	0.026	0.0417	0.0554	0.0886	0.0419
21	1.5	0.025	0.026	10.1697	0.0304	0.0842	0.0535
22	0.5	0.035	0.026	0.1429	0.1653	0.2331	0.1429
23	1	0.035	0.026	0.004	0.0553	0.0887	0.0038
24	1.5	0.035	0.026	10.1893	0.0304	0.0841	0.0334
25	0.5	0.045	0.026	0.3192	0.1641	0.2338	0.3192
26	1	0.045	0.026	0.0495	0.0554	0.0887	0.0473
27	1.5	0.045	0.026	10.209	0.0304	0.0843	0.0144

5.1.1 ANOVA分析

變異數分析係導自總變量對它的組成份的一個分割，應用統計檢定的方法，來辨識個別因子對製程之影響效果，而非依人為主觀判定。首要目的是評估實驗誤差，必須在因子效應與實驗誤差比較起來足夠大時才認定此因子效應為「有意義的」或是「重要的」；反之，若該因子的重要性不夠大，則只能視為是實驗誤差所造成的「偶發效應」。

本實驗選定之因子為P(比例增益)，I(積分時間)，D(微分時間)，依據表5.4計算出變異數分析表如表5.6~5.9所示，目的為檢驗迴歸方程式 $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+L+\beta_kX_k+\varepsilon$ 中，自變數(X)是否為影響顯著之因子。所對應的適當假設如下：

虛無假設 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

對立假設 $H_1: \beta_j \neq 0$ 至少有一個j

針對位置控制統中的最大超越量百分比、上升時間、穩定時間、誤差量做為ANOVA分析依據，如表至表所列。實驗結果的初步模式是以迴歸模型顯著性檢定來進行，利用變異數分析來確認主效應和交互作用效應的顯著程度，排除不重要的因子及檢驗初步模型的合適性，以下便分別探討各因子間對最大超越量百分比、上升時間、穩定時間、誤差量的影響：

1. 最大超越量：

在表5中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = 30.599 > F0.05(9,17)=2.49，和顯示一極小的P值(<0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.01%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D、 P^2 、 D^2 ，和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響最大超越量為顯著的，並將各因子對最大超越量影響貢獻程度，整理成表9。

2. 上升時間：

在表6中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = 71.7489 > F0.05(9,17)=2.49，和顯示一極小的P值(<0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.01%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D、 P^2 、 D^2 ，

和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響上升時間為顯著的，並將各因子對上升時間影響貢獻程度，整理成表10。

3. 穩定時間：

在表7中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = $5.239 > F_{0.05}(9,17) = 2.49$ ，和顯示一極小的P值(0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.219%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D，和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響穩定時間為顯著的，並將各因子對穩定時間影響貢獻程度，整理成表11。

4. 誤差量：

在表8中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = $6.674 > F_{0.05}(9,17) = 2.49$ ，和顯示一極小的P值(0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.05403%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，1個交互作用效應PI的值小於 α 值(0.05)，表示所選交互作用效應影響誤差量為顯著的，並將各因子對誤差量影響貢獻程度，整理成表12。依據階層原理(hierarchy principle)[39]，一個高階項(PI)應包含由高階項組成的所有低階項，階層為促進一個模型內部一致的形式，多數統計模型的建構都嚴守階層原理。表中I(積分時間)、D(微分時間)即為低階層，故顯著的變因為I、D及ID。

表5 最大超越量ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	1934.0160	9	214.8907	396.8724	< 0.0001
P	1308.3164	1	1308.3164	2416.2735	< 0.0001
I	0.0783	1	0.0783	0.1446	0.7085
D	217.7151	1	217.7151	402.0888	< 0.0001
P ²	245.1285	1	245.1285	452.7173	< 0.0001
I ²	0.0004	1	0.0004	0.0008	0.9783
D ²	6.9571	1	6.9571	12.8487	0.002284
PI	0.0504	1	0.0504	0.0931	0.7639
PD	155.7692	1	155.7692	287.6835	< 0.0001
ID	0.0006	1	0.0006	0.0010	0.9747
Residual	9.2048	17	0.5415	-	-
Total	1943.2209	26	-	-	-

表6 上升時間ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.0696	9	0.0077	1222.1191	< 0.0001
P	0.0581	1	0.0581	9184.7270	< 0.0001
I	0.0000	1	0.0000	0.0106	0.9191
D	0.0018	1	0.0018	281.9978	< 0.0001
P ²	0.0084	1	0.0084	1322.2582	< 0.0001
I ²	0.0000	1	0.0000	0.0007	0.9787
D ²	0.0000	1	0.0000	0.4076	0.5317
PI	0.0000	1	0.0000	0.0960	0.7604
PD	0.0013	1	0.0013	209.4552	< 0.0001
ID	0.0000	1	0.0000	0.1186	0.7348
Residual	0.0001	17	0.0000	-	-
Total	0.0697	26	-	-	-

表7 穩定時間ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.085418	9	0.009491	176.151446	< 0.0001
P	0.044910	1	0.044910	833.528698	< 0.0001
I	0.000028	1	0.000028	0.512760	0.483700
D	0.000144	1	0.000144	2.671407	0.120500
P ²	0.028672	1	0.028672	532.149317	< 0.0001
I ²	0.000001	1	0.000001	0.017326	0.896800
D ²	0.001181	1	0.001181	21.913214	0.000215
PI	0.000040	1	0.000040	0.741795	0.401100
PD	0.010443	1	0.010443	193.821676	< 0.0001
ID	0.000000	1	0.000000	0.006821	0.935100
Residual	0.000916	17	0.000054	-	-
Total	0.086334	26	-	-	-

表8 誤差量ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.254357849	9	0.028261983	17.64601688	< 0.0001
P	0.097667267	1	0.097667267	60.98079654	< 0.0001
I	0.029508302	1	0.029508302	18.42418474	0.000493
D	0.000903125	1	0.000903125	0.563886791	0.463
P ²	0.039123375	1	0.039123375	24.42757578	0.0001236
I ²	0.001040167	1	0.001040167	0.649451896	0.4314
D ²	0.000165375	1	0.000165375	0.103255671	0.7519
PI	0.085564741	1	0.085564741	53.42430684	< 0.0001
PD	0.000261333	1	0.000261333	0.163169456	0.6913
ID	0.000124163	1	0.000124163	0.077524223	0.784
Residual	0.027227318	17	0.001601607	-	-
Total	0.281585167	26	-	-	-

表9 最大超越量因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	1308.3164	1	1308.3164	2416.2735	1307.7609	67.30
I	0.0783	1	0.0783	0.1446	Pooled	
D	217.7151	1	217.7151	402.0888	217.2706	11.18
P ²	245.1285	1	245.1285	452.7173	244.6840	12.59
I ²	0.0004	1	0.0004	0.0008	Pooled	
D ²	6.9571	1	6.9571	12.8487	6.5126	0.34
PI	0.0504	1	0.0504	0.0931	Pooled	
PD	155.7692	1	155.7692	287.6835	155.3247	7.99
ID	0.0006	1	0.0006	0.0010	Pooled	
Residual	9.2048	17		-		
(Error)	9.3345	21	0.4445	-	11.6680	0.60
Total	1943.2209	26	-	-	1943.2209	100

表10 上升時間因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.05810641	1	0.05810641	9184.727005	0.05810122	83.37
I	0.00000007	1	0.00000007	0.010626	Pooled	
D	0.00178404	1	0.00178404	281.997820	0.00177885	2.55
P ²	0.00836516	1	0.00836516	1322.258223	0.00835997	12.00
I ²	0.00000000	1	0.00000000	0.000732	Pooled	
D ²	0.00000258	1	0.00000258	0.407580	0.00000261	0.00
PI	0.00000061	1	0.00000061	0.096026	Pooled	
PD	0.00132510	1	0.00132510	209.455213	0.00131991	1.89
ID	0.00000075	1	0.00000075	0.118551	Pooled	
Residual	0.00010755	17		-		
(Error)	0.00010898	21	0.00000519	-	0.00012970	0.19
Total	0.06969225	26	-	-	0.06969225	100

表11 穩定時間因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.044910	1	0.044910	833.528698	0.044863148	51.96
I	0.000028	1	0.000028	0.512760	Pooled	
D	0.000144	1	0.000144	2.671407	9.70365E-05	0.11
P ²	0.028672	1	0.028672	532.149317	0.028625001	33.16
I ²	0.000001	1	0.000001	0.017326	Pooled	
D ²	0.001181	1	0.001181	21.913214	0.001133774	1.31
PI	0.000040	1	0.000040	0.741795	Pooled	
PD	0.010443	1	0.010443	193.821676	0.010396103	12.04
ID	0.000000	1	0.000000	0.006821	Pooled	
Residual	0.000916	17		-		
(Error)	0.000985	21	0.000047	-	0.001219	1.41
Total	0.086334	26	-	-	0.086334	100

表12 誤差量因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.097667267	1	0.097667267	60.980797	0.09606566	34.12
I	0.029508302	1	0.029508302	18.424185	0.027906695	9.91
D	0.000903125	1	0.000903125	0.563887	0.000698482	0.25
P ²	0.039123375	1	0.039123375	24.427576	0.037521768	13.33
I ²	0.001040167	1	0.001040167	0.649452	0.00056144	0.20
D ²	0.000165375	1	0.000165375	0.103256	0.001436232	0.51
PI	0.085564741	1	0.085564741	53.424307	0.083963134	29.82
PD	0.000261333	1	0.000261333	0.163169	0.001340274	0.48
ID	0.000124163	1	0.000124163	0.077524	0.001477444	0.52
Residual	0.027227318	17	0.001601607	-	0.030614038	10.87
Total	0.281585167	26	-	-	0.281585167	100

5.1.2 建立迴歸方程式

從表4 之實驗結果，利用變異數分析法可決定對製程影響顯著之變因如表5.6~5.9。再依據(式4.8)改寫成矩陣符號來表示，可導出迴歸方程式的係數，進一步利用Matlab®軟體輔助求解迴歸係數 (β) [48]，並建立迴歸方程式：

$$\begin{aligned} O_s = & 22.18794 + 5.54855 \times P - 2029.23 \times D + 25.56709 \times P^2 \\ & + 67300.35 - 1801.44 \times PD \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} R_T = & 0.160157 - 0.29675 \times P + 5.940278 \times D + 0.149356 \times P^2 \\ & + 40.97222 \times D^2 - 5.25417 \times PD \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} S_T = & 0.570652315 - 0.328422222 \times P - 24.53333333 \times D \\ & + .276511111 \times P^2 + 876.736 \times D^2 - 14.75 \times PD \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} E_{ss} = & -0.0881177778 - 0.253563889 \times P + 9.951388889 \times I \\ & + 7.51875 \times D + 0.323 \times P^2 + 131.6666667 \times I^2 - 328.125 \times D^2 \\ & - 16.88833333 \times PI + 2.33333 \times PD + 80.41666667 \times ID \end{aligned} \quad (5.4)$$

同時，為了瞭解實驗值與迴歸方程式得到的預測值兩者間的線性關係如何，可依據模式與各實驗數據之總偏差來決定。以下為最大超越量方程式(5.1)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{1934.016}{1943.2209} = 99.53\% \quad (5.5)$$

此意謂處理最大超越量的總變異中，有99.53%可由輸入資料自變數 x 來解釋。同理，以下為上升時間方程式(5.2)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.0696}{0.0697} = 99.85\% \quad (5.6)$$

即處理上升時間的總變異中，有99.85%可由輸入資料自變數 x 來解釋。以下為穩定時間方程式(5.3)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.085418}{0.086334} = 98.94\% \quad (5.7)$$

即處理穩定時間的總變異中，有98.94%可由輸入資料自變數 x 來解釋。以下為誤差量方程式(5.4)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.254357849}{0.281585167} = 90.33\% \quad (5.8)$$

即處理誤差量的總變異中，有90.33%可由輸入資料自變數 x 來解釋。

5.1.3 殘差分析

殘差分析可用來探討建構出的迴歸方程式之適當性，殘差定義為實驗值與預測值之間的差異，其中預測值為將表5各組實驗之參數帶入(式5.1~式5.4)中所求得，表13至表16為各控制響應輸出的殘差結果，假如建構出的迴歸模型是適切地，則殘差圖是無結構的(structureless)，亦即圖形是沒有任何明顯的形狀或趨勢。本研究藉由Minitab[®]統計分析軟體[49]，在95%的信心水準內(α 值為0.05)對殘差進行常態檢定，假設如下：

(虛無假設) H_0 ：殘差為常態分配

(對立假設) H_1 ：殘差不為常態分配

圖10至圖13分別為最大超越量、上升時間、穩定時間、誤差量殘差的常態機率圖(Normal Probability Plot)，圖中，X軸為殘差值，Y軸為常態機率；圖的左下角可以得知此筆數據資料的平均值、標準差與樣本數，若殘差為常態分配，則圖形應呈現出一條直線趨向。由圖得知，P值都大過於顯著水準0.05，無足夠證據拒絕虛無假設(H_0)，故所建構迴歸方程式為適當的。

表13 最大超越量殘差值結果

O _s (%)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.0476	0.4202	-0.3726
2	6.3912	6.1568	0.2344
3	24.6086	24.6770	-0.0684
4	0.1958	0.4202	-0.2244
5	6.4283	6.1568	0.2715
6	24.6303	24.6770	-0.0467
7	0.3426	0.4202	-0.0776
8	6.4654	6.1568	0.3086
9	24.6520	24.6770	-0.0250
10	0.0349	-0.5316	0.5665
11	0.4622	1.6022	-1.1400
12	16.8708	16.5194	0.3514
13	0.1982	-0.5316	0.7298
14	0.5001	1.6022	-1.1021
15	16.8923	16.5194	0.3729
16	0.3599	-0.5316	0.8915
17	0.5379	1.6022	-1.0643
18	16.9138	16.5194	0.3944
19	0.0356	0.6703	-0.6347
20	0.0417	-0.7989	0.8406
21	10.1697	10.5155	-0.3458
22	0.1429	0.6703	-0.5274
23	0.0040	-0.7989	0.8029
24	10.1893	10.5155	-0.3262
25	0.3192	0.6703	-0.3511
26	0.0495	-0.7989	0.8484
27	10.2090	10.5155	-0.3065

表14 上升時間殘差值結果

R _T (s)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.1201	0.1220	-0.0019
2	0.0420	0.0384	0.0036
3	0.0286	0.0294	-0.0008
4	0.1191	0.1220	-0.0029
5	0.0419	0.0384	0.0035
6	0.0280	0.0294	-0.0014
7	0.1201	0.1220	-0.0019
8	0.0411	0.0384	0.0027
9	0.0286	0.0294	-0.0008
10	0.1433	0.1418	0.0015
11	0.0474	0.0477	-0.0003
12	0.0273	0.0282	-0.0009
13	0.1430	0.1418	0.0012
14	0.0471	0.0477	-0.0006
15	0.0272	0.0282	-0.0010
16	0.1435	0.1418	0.0017
17	0.0475	0.0477	-0.0002
18	0.0269	0.0282	-0.0013
19	0.1620	0.1630	-0.0010
20	0.0554	0.0583	-0.0029
21	0.0304	0.0283	0.0021
22	0.1653	0.1630	0.0023
23	0.0553	0.0583	-0.0030
24	0.0304	0.0283	0.0021
25	0.1641	0.1630	0.0011
26	0.0554	0.0583	-0.0029
27	0.0304	0.0283	0.0021

表15 穩定時間殘差值結果

$S_T(s)$			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.1831	0.1853	-0.0022
2	0.1025	0.0957	0.0068
3	0.1449	0.1444	0.0005
4	0.1756	0.1853	-0.0097
5	0.1025	0.0957	0.0068
6	0.1448	0.1444	0.0004
7	0.1755	0.1853	-0.0098
8	0.1027	0.0957	0.0070
9	0.1445	0.1444	0.0001
10	0.2112	0.1979	0.0133
11	0.0735	0.0788	-0.0053
12	0.0932	0.0980	-0.0048
13	0.2110	0.1979	0.0131
14	0.0732	0.0788	-0.0056
15	0.0932	0.0980	-0.0048
16	0.2025	0.1979	0.0046
17	0.0734	0.0788	-0.0054
18	0.0932	0.0980	-0.0048
19	0.2397	0.2386	0.0011
20	0.0886	0.0900	-0.0014
21	0.0842	0.0797	0.0045
22	0.2331	0.2386	-0.0055
23	0.0887	0.0900	-0.0013
24	0.0841	0.0797	0.0044
25	0.2338	0.2386	-0.0048
26	0.0887	0.0900	-0.0013
27	0.0843	0.0797	0.0046

表16 誤差量殘差值結果

Ess(mm)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.0103	0.0043	0.0060
2	0.0380	0.0297	0.0083
3	0.0478	0.0551	-0.0073
4	0.0212	0.0232	-0.0020
5	0.0182	0.0269	-0.0087
6	0.0339	0.0305	0.0034
7	0.0519	0.0422	0.0098
8	0.0016	0.0241	-0.0225
9	0.0209	0.0060	0.0149
10	0.0003	0.0065	-0.0062
11	0.0309	0.0259	0.0050
12	0.0442	0.0453	-0.0011
13	0.0327	0.0296	0.0031
14	0.0103	0.0273	-0.0170
15	0.0299	0.0249	0.0050
16	0.0659	0.0527	0.0132
17	0.0108	0.0286	-0.0178
18	0.0164	0.0045	0.0119
19	0.0083	0.0087	-0.0004
20	0.0266	0.0221	0.0045
21	0.0401	0.0356	0.0045
22	0.0423	0.0359	0.0064
23	0.0047	0.0276	-0.0229
24	0.0253	0.0193	0.0060
25	0.0769	0.0632	0.0137
26	0.0170	0.0332	-0.0162
27	0.0095	0.0031	0.0064

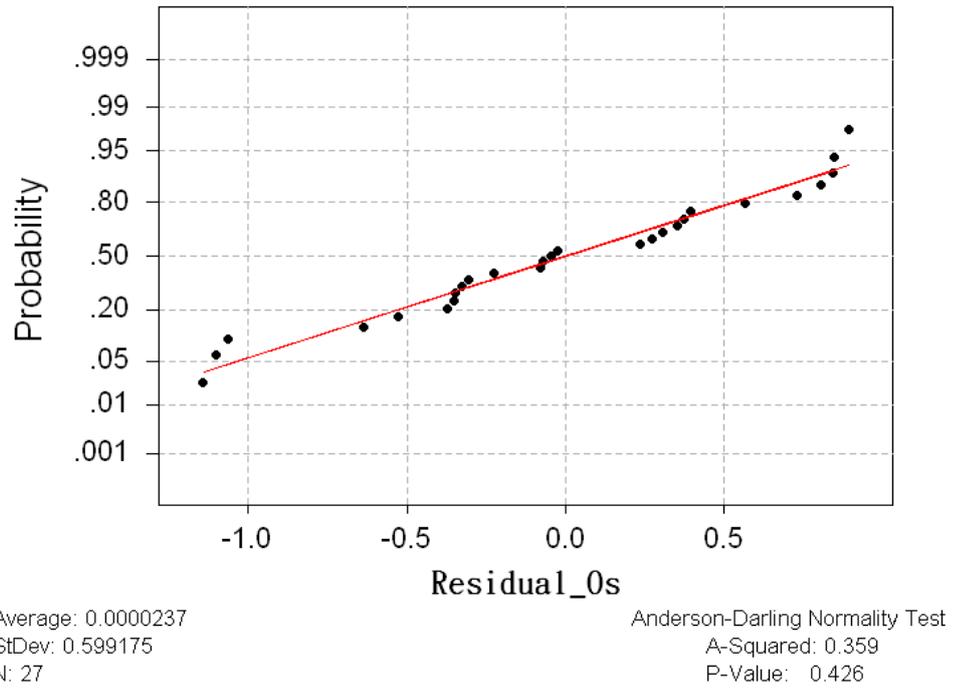


圖10 最大超越量殘差的常態機率圖

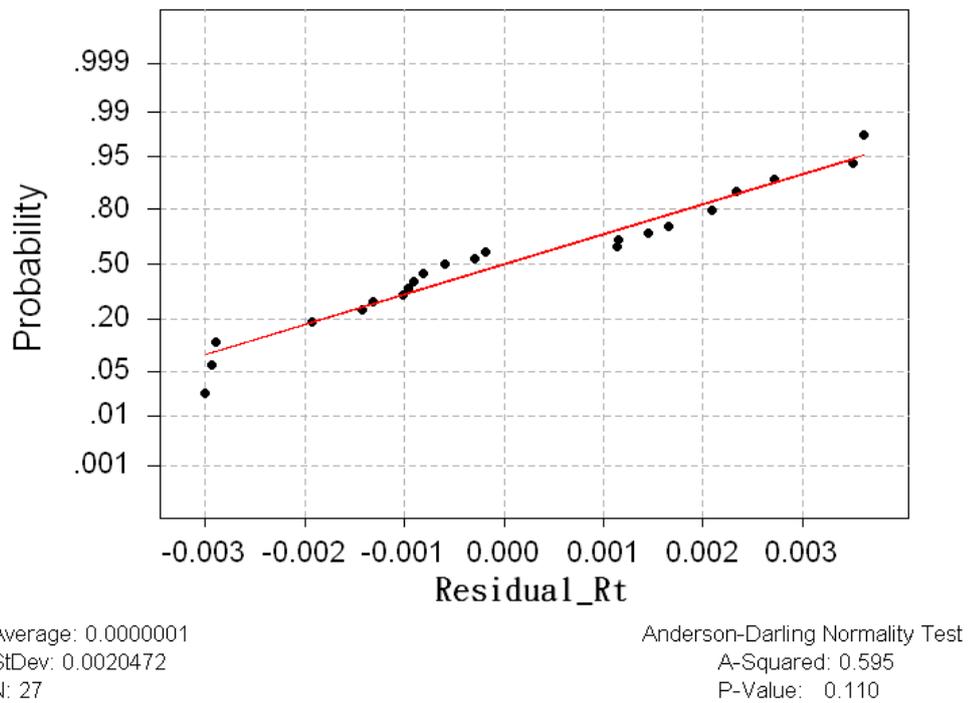


圖11 上升時間殘差的常態機率圖

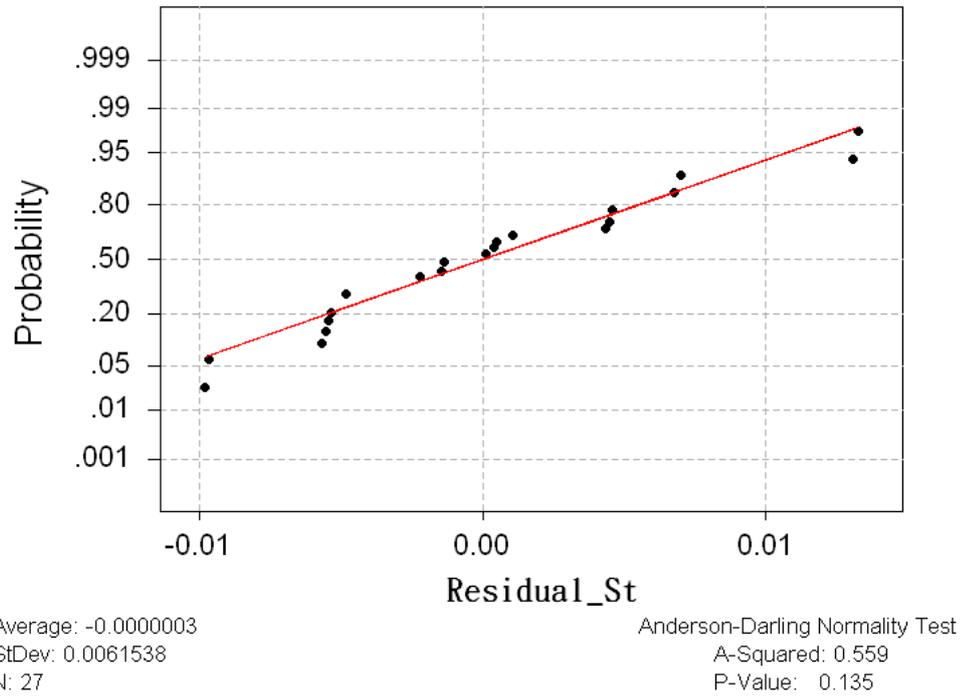


圖12 穩定時間殘差的常態機率圖

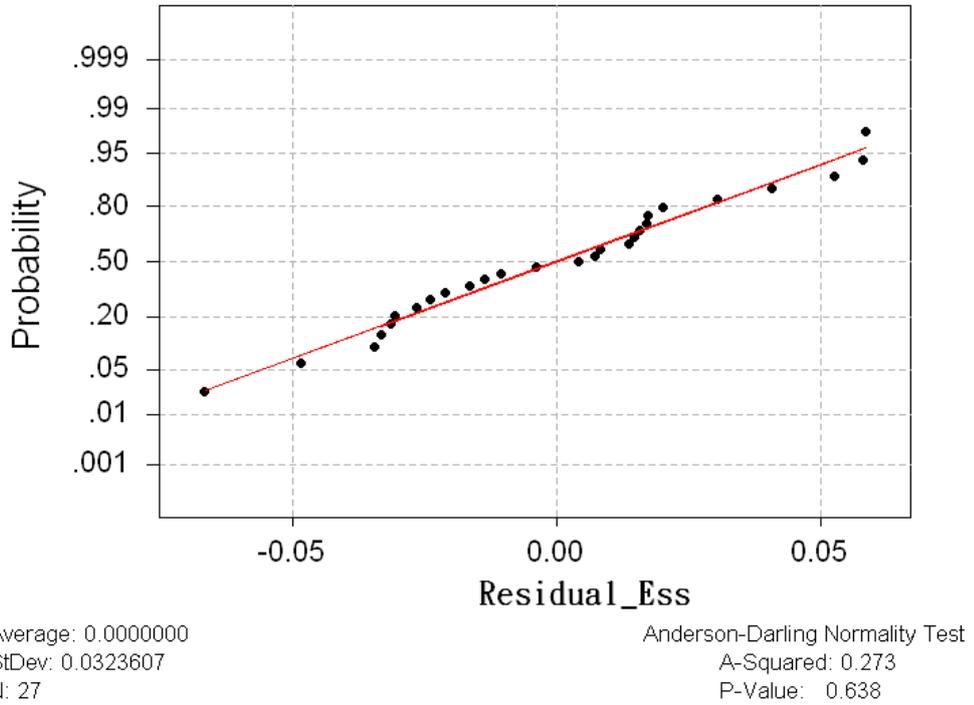


圖13 誤差量殘差的常態機率圖

5.1.4 PID最佳參數組合

在ANOVA分析確認出影響控制響應較顯著的參數後，經由Design-Expert[®]統計分析軟體適配出最佳參數，並計算出個別期望函數，如表17所列。把PID最佳參數帶回Matlab[®]軟體可以得到控制響應實際值，經由比對可以發現，個別的期望函數值與實際值的差異不大，可證明係以實驗計劃法之設計之準確度高。圖14為PID最佳參數與Ziegler-Nichols調整之PID參數之比較，由圖所示，實驗計劃法設計之控制響應有效的提升響應效率。

表17 PID控制最佳參數組合與驗證

P	I	D	O _s (%)	R _T (ms)	S _T (ms)	E _{SS} (mm)
0.97	0.035	0.022	0.5519	0.0509	0.0768	0.0276
實際值			0.1028	0.0474	0.0735	0.0162

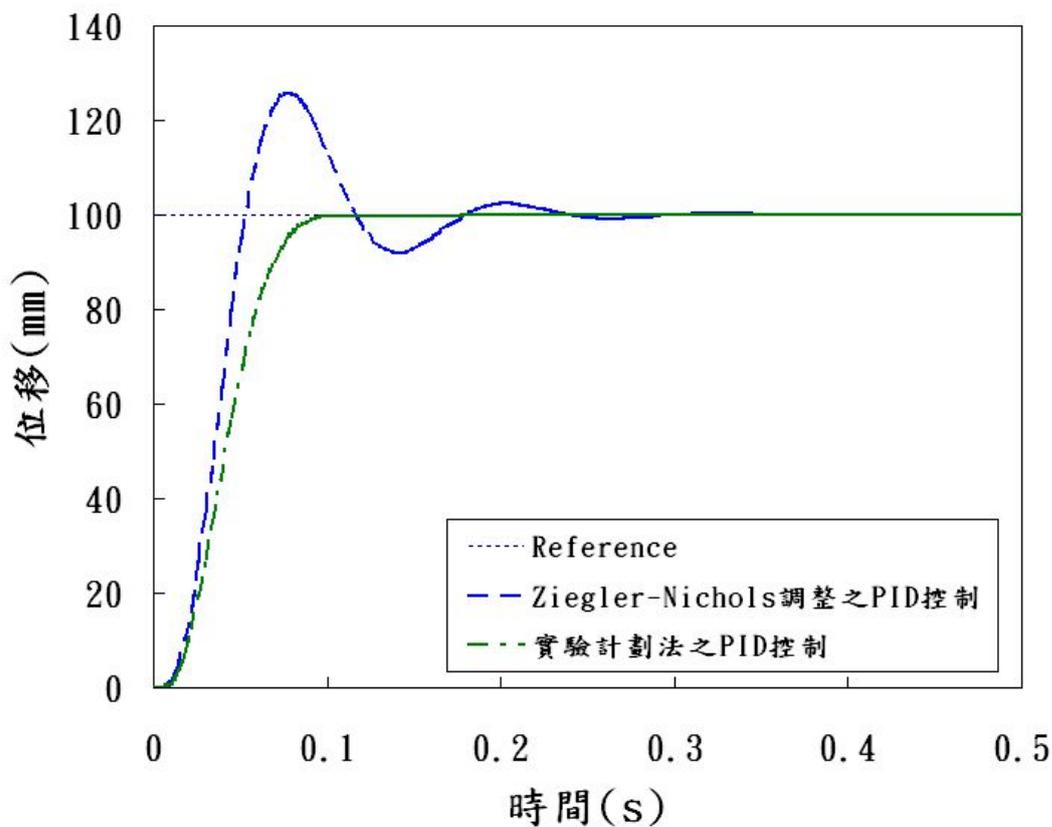


圖14 PID最佳參數與Ziegler-Nichols調整之控制圖

5.2 模糊控制實驗結果

本研究利用相較於PD模糊控制器的精確度，和PI模糊控制器較佳的穩態響應，設計一PD-PI混合模糊控制實驗，此類型之控制器保有PID模糊控制器的特點，在ANOVA分析中，可以找到影響各輸出響應的貢獻度，依照表5.10~表5.13，來規劃模糊規則，如圖15所示，(a)為比例增益歸屬函數圖、(b)積分時間與微分時間歸屬函數圖、(c)輸出之歸屬函數圖。

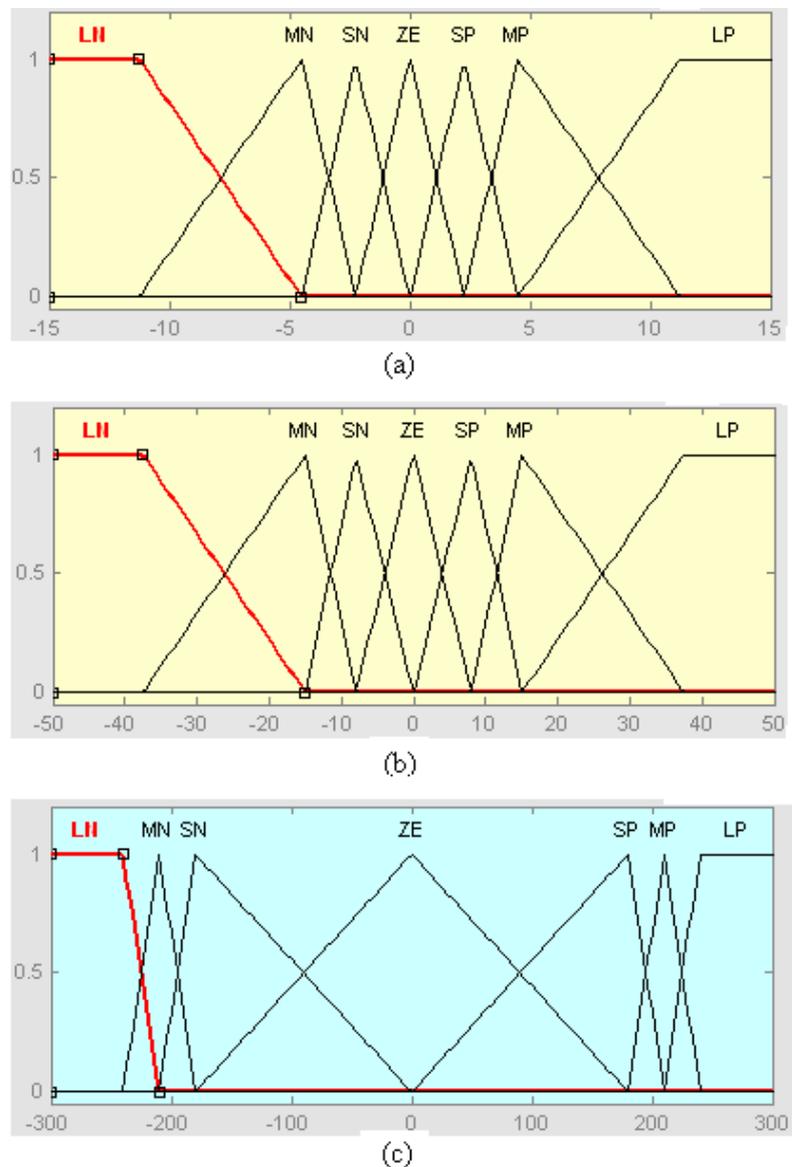


圖15 控制規則推論部歸屬函數圖

5.2.1 模糊控制實驗設計

根據實驗計劃法之設計，將PD-PI模糊控制設計27次實驗，如表18所列，由表比照表5可發現，在模糊控制下有較好的控制性能。

表18 實驗計劃法之PD-PI模糊控制

參數 Std	P	I	D	O _S (%)	R _T (s)	S _T (s)	E _{SS} (mm)
1	2.4	25	0.26	0.463	0.0504	0.0772	0.04637
2	2.6	25	0.26	2.1901	0.0451	0.0689	0.04258
3	2.8	25	0.26	5.1006	0.0421	0.0964	0.03957
4	2.4	30	0.26	0.4629	0.0505	0.0777	0.04629
5	2.6	30	0.26	2.1707	0.045	0.0691	0.0126
6	2.8	30	0.26	5.0756	0.0424	0.0968	0.03939
7	2.4	35	0.26	0.4636	0.0505	0.0765	0.04636
8	2.6	35	0.26	2.154	0.0448	0.0691	0.04245
9	2.8	35	0.26	5.0689	0.0424	0.0974	0.03963
10	2.4	25	0.28	0.4686	0.0522	0.0833	0.04686
11	2.6	25	0.28	0.4845	0.0461	0.0716	0.04271
12	2.8	25	0.28	3.418	0.0433	0.0666	0.03948
13	2.4	30	0.28	0.4639	0.0519	0.0815	0.0464
14	2.6	30	0.28	0.5225	0.0461	0.0713	0.01266
15	2.8	30	0.28	3.4124	0.0434	0.0665	0.03952
16	2.4	35	0.28	0.4639	0.0519	0.0815	0.0464
17	2.6	35	0.28	0.4725	0.0462	0.0715	0.04269
18	2.8	35	0.28	3.407	0.0433	0.655	0.01963
19	2.4	25	0.3	0.473	0.0543	0.0889	0.0473
20	2.6	25	0.3	0.4283	0.047	0.0738	0.04283
21	2.8	25	0.3	2.0348	0.0441	0.0681	0.03958
22	2.4	30	0.3	0.4719	0.0547	0.0895	0.04719
23	2.6	30	0.3	0.4288	0.0476	0.0737	0.0091
24	2.8	30	0.3	1.9985	0.044	0.0678	0.03959
25	2.4	35	0.3	0.4761	0.0546	0.0912	0.04761
26	2.6	35	0.3	0.4291	0.0473	0.0739	0.04292
27	2.8	35	0.3	2.0186	0.044	0.0678	0.01955

5.2.2 PD-PI模糊控制最佳參數

在ANOVA分析確認出影響控制響應較顯著的參數後，經由Design-Expert[®]統計分析軟體適配出最佳參數，如表19所列。把PD-PI模糊控制器最佳參數帶回Matlab[®]軟體可以得到控制響應實際值，經由比對可以發現，個別的期望函數值與實際值的差異不大，可證明係以實驗計劃法之設計之準確度高。圖16為PD-PI模糊控制最佳參數之響應。

表19 PD-PI模糊控制最佳參數組合與驗證

P	I	D	OS(%)	RT (s)	ST(s)	ESS(mm)
2.697	31.66	0.3	0.9271	0.0455	0.0990	0.0234
實際值			0.4236	0.0452	0.0703	0.0092

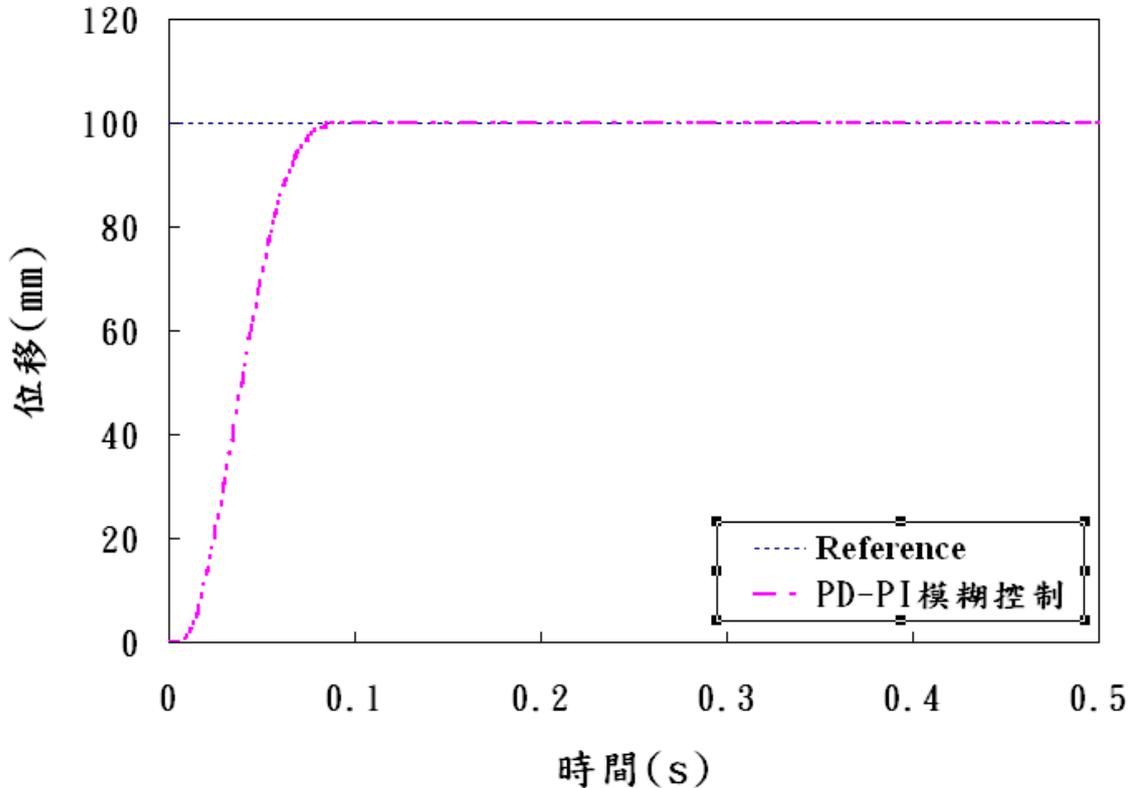


圖16 PD-PI模糊控制最佳參數之控制圖

5.3 類神經網路控制實驗結果

利用位移作回授，定位位置為100mm，以所得到之誤差值輸入給控制器，控制器會輸出一個控制量給伺服閥，而伺服閥會利用開口來控制液壓缸的出力大小及方向。然後將利用類神經網路控制器模擬，並分析其響應，如表20所示。圖17為類神經網路控制之響應圖。

表20 類神經網路控制性能指標

	$O_s(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{SS}(mm)$
類神經控制器	0.0059	0.0282	0.0461	0.006

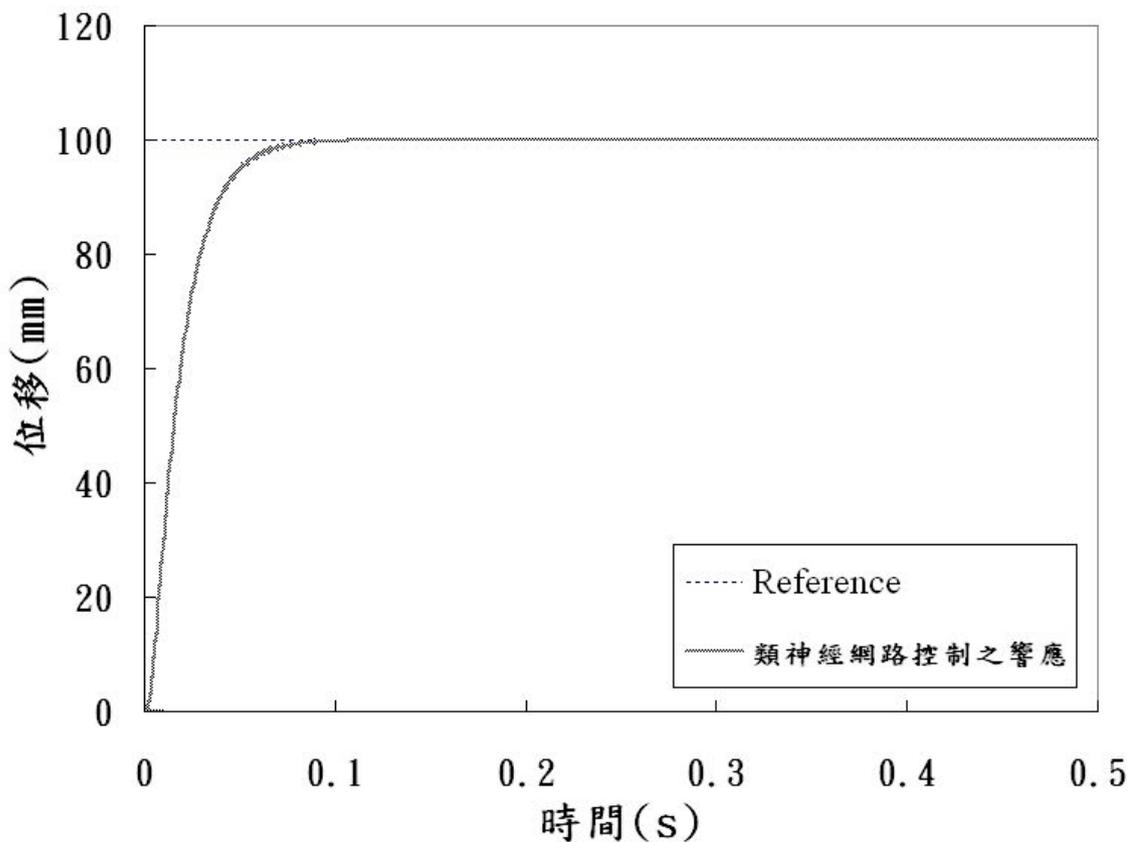


圖17 類神經網路控制之響應圖

5.4 最佳化參數組合結果比較

由表21排列出各種控制器之最佳響應性能，其未補償系統為最大超越量(50.2856%)、上升時間(0.33s)、穩定時間(0.3446s)、穩態誤差(0.1771mm)；Ziegler-Nichols調整之PID為最大超越量(25.5313%)、上升時間(0.0325s)、穩定時間(0.1535s)、穩態誤差(0.0141mm)；實驗計劃法之PID控制為最大超越量(0.1025%)、上升時間(0.0474s)、穩定時間(0.0735s)、穩態誤差(0.0162mm)；PD-PI模糊控制為最大超越量(0.4236%)、上升時間(0.0452s)、穩定時間(0.0703s)、穩態誤差(0.0092mm)；類神經網路控制為最大超越量(0.0059%)、上升時間(0.0282s)、穩定時間(0.0461s)、穩態誤差(0.006mm)；結果發現實驗計劃法的規劃下，可以有好的控制性能，而類神經網路具有較佳的響應曲線。圖18為綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖。

表21 綜合控制實驗最佳結果之比較

控制形式	$O_S(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{SS}(mm)$
未補償系統	50.2856	0.033	0.3446	0.1771
Ziegler-Nichols 調整之 PID	25.5313	0.0325	0.1535	0.0141
實驗計劃法之 PID 控制	0.1028	0.0474	0.0735	0.0162
PD-PI 模糊控制	0.4236	0.0452	0.0703	0.0092
類神經網路控制	0.0059	0.0282	0.0461	0.006

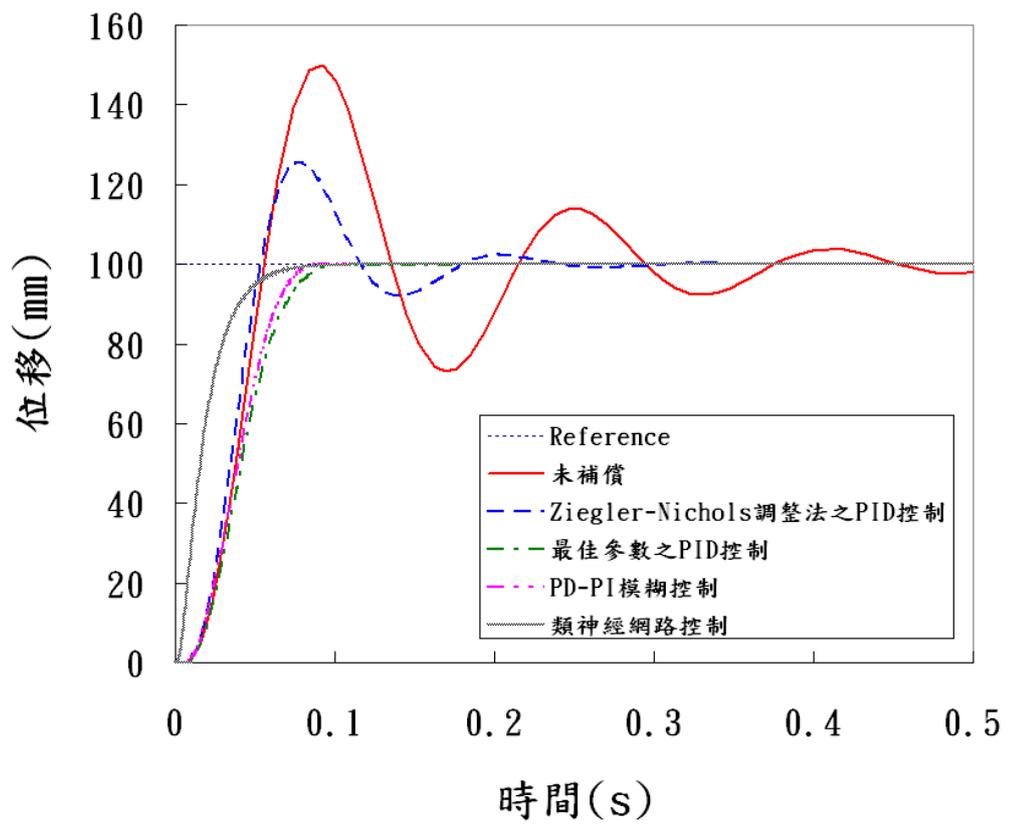


圖18 綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖

第六章 結論

本文利用MATLAB/Simulink軟體來建構控制系統程式並進行動態模擬，並藉由實驗計劃法之統計方法、變異數分析與迴歸分析技術，研討控制器參數對系統行為之影響程度，同時可以獲得最佳控制器參數組合，藉此進行定位及追蹤控制性能的改善，並推算控制器參數與系統行為的數學模式。

在實驗的過程中，分別發展三種控制器：(1) PID 控制器，(2) PD-PI 模糊控制器，(3) 類神經網路控制器，以控制伺服系統，其實驗結果已敘述於前面的章節裡。在此，將智慧型伺服系統的研製及其在量測與控制上之實驗結果作一個總結。

1. 本研究目的在設計最理想的控制參數條件，透過實驗計劃法有效減少時間及成本，並提供效率高且有系統性的統計分析方法，來決定最佳參數條件。並透過變異數分析結果，可以明顯地看出影響行為較大的因子，日後在設計上，將會便利許多。
2. 實驗的結果證實了以實驗計劃法所得到的參數為最佳參數，可以使系統行為達到完美。建構之迴歸模型後，給予模型適當性檢驗是非常重要的，亦即迴歸模型之正確性，對於系統輸出也有很大的幫助。最後，本研究致力於智慧型控制器之設計，結果發現模糊PID控制器與類神經網路控制器具有比PID控制器更好的性能。

誌謝：本專題感謝明新科技大學提供經費，同時欣橋機械股份有限公司以產學合作的方式配合補助部分經費，使本研究得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 魏榮輝、洪至謙“電液伺服閥之動態模擬分析”機械月刊第 32 卷 11 期 pp.30-38，2006。
2. 魏榮輝、洪至謙“射出成型機伺服射膠控制系統之研究”先進工程學刊第 1 卷 2 期 pp.89-94，2006。
3. J.G. Ziegler, and N.B. Nichols, “Optimum Setting for Automatic Controllers,” Transactions on ASME, Vol. 64, 1942, pp. 759-768.
4. 李輝煌，田口方法—品質設計的原理與實務，高立圖書有限公司，台北、台灣，第 44-68 頁，2005。
5. G. Taguchi, “Introduction to Quality Engineering,” Asian Productivity Organization, (1990)。
6. 許朝勝，“長行程單桿液壓缸於垂直負荷之位置伺服控制研究”，成功大學機械所碩士論文，1999。
7. 葉國安，“使用比例閥與伺服閥在液壓伺服定位控制上之比較”，中原大學機械所碩士論文，1995。
8. J. S. Yun and H. S. Cho, “Adaptive Model Follow Control of Electrohydraulic Velocity Control System Subject to Unknown Disturbance”, IEE Proceeding Control Theory and Application, Vol.135, No.2, pp.149-156, 1988.
9. J. S. Yun and H. S. Cho, “Application of an Adaptive Model Follow Control Technique to a Hydraulic Servo System Subject to Unknown Disturbance”, Trans.ASME. J. of Dyn. Syst. Meas.Control, Vol.113 pp.479-486, 1991
10. 許毅然，“伺服油壓制動器位置適應控制研究”，成功大學機械所碩士論文，1988。
11. 陳秉州，“智慧型多功能組合式伺服控制平台之研製”，國立台北科技大學 車輛工程系碩士論文，2005。
12. Hassan Bevrani, Takashi Hiyama, Yasunori mitani, and Kiichiro Tsuji, “Automatic generation control:A decentralized robust approach” Intelligent Automation and Soft Computing(SCI), Vol. 13, No. 3, 2007, pp.273-287.
13. Chih-Keng Chen, and James Hwang, “PD-Type Iterative Learning Control for the Trajectory Tracking of a Pneumatic X-Y Table with Disturbances” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 2, 2006, pp.520-526.
14. L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Information and. Control, vol.8, pp. 338-353,(1965).
15. Procky, T. J.and E. H. Mamdani, “Alinguistic Self-Organizing Process Controller”, Automatica, Vol.5, pp.15-30,(1979).
16. Shao, Shihuang, “Fuzzy self-organizing controller and uts application for dynamic processes”, Fuzzy Sets and System 26, pp.151-164,(1988).
17. Zhang, B. S. and Edmunds ,J. M. “Self-Organizing Fuzzy Logic Controller”, IEE

- Proceedings-D, Vol.139,No.5,pp.460-464,(1992).
18. W. Thomas Miller, Richard S. Sutton and Paul J. Werbos “Neural Networks for Control” CIP, (1990).
 19. S. R. Lee and K. Srinivasan, “Self-Tuning Control Application to Closed-Loop Servohydraulic Material Testing”, Trans.ASME. J. of Dyn. Syst. Meas. Control, Vol.112 pp.681-689, (1990).
 20. Sung-Woo Kim, Ju-Jang Lee, “ Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface ”, Fuzzy Sets & Systems, vol.71, no.3, 12 May 1995,pp.359-67. Netherlands.
 21. Tzafestas SG, Rigatos GG, “A simple robust sliding-mode fuzzy-logic controller of the diagonal type”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol.26, no.3-4, Nov.-Dec. pp.353-88, Netherlands,(1999).
 22. Jiun-Fei Shiu and Chin-Min Lin, “ Decoupled Fuzzy Controller Designed with Fuzzy Sliding Surface”, 2000 Automatic control Conference, pp.463-468.
 23. Ranjit Kumar Barai, and Kenzo Nonami, “Optimal two-degree-of-freedom fuzzy control for locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot.”. Information Sciences, Vol. 177, 2007, pp. 1892-1915.
 24. Satoru Shibata, Tomonori Yamamoto, and Mitsuru Jindai, “A Synchronous Mutual Position Control for Vertical Pneumatic Servo System” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 1, 2006, pp. 197-204.
 25. Shih-Jer Huang, and Hung-Yi Chen, “Functional Based Adaptive and Fuzzy Sliding Controller for Non-Autonomous Active Suspension System” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 4, 2006, pp. 1027-1032.
 26. W. S. McCulloch and W. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,” Bulletin of Mathematical Biophysics, pp. 115-133, 1943.
 27. 林盈宏, 以線上學習之模糊類神經網路發展新的 MRAS 控制器設計法, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1996.
 28. 吳毅剛, 以倒傳遞法設計模糊類神經網路 PID 控制器, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1996.
 29. 林坤志, 實現於 MRAS 的 PI 型模糊類神經網路, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1997.
 30. P. J. Werbos, “Backpropagation : Past and future,” IEEE International conference on neural networks, vol. 1, pp.343-353, July. 1998.
 31. Satoru Shibata, Mitsuru Jindai, Tomonori Yamamoto, and Akira Shimizu, “A Disturbance Estimation Type Control for Pneumatic Servo System Using Neural Network” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 1, 2006, pp. 189-196.
 32. 王占林, 液壓伺服控制, 北京航空學院出版社, 2002。

33. G. Derringer and R. Suich, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, No. 4, 1980, pp. 214–219.
34. Y. K. Yang, "Optimization of a Photo Resist Coating Process for Photolithography in Wafer manufacturing via Design of Experiments Method", *Microelectronics International*, Vol. 23, 2006, pp. 26–32.
35. 葉怡成，實驗計劃法-製程與設備最佳化，五南圖書股份有限公司，2001。

符號彙編

符號	註解
A_P	油壓缸活塞端有效面積(cm^2)
A_R	油壓缸桿端有效面積(cm^2)
B_C	油壓缸黏性阻尼係數($\text{kg}_f\text{-s}/\text{cm}$)
C_l	油壓缸洩漏係數($\text{cm}^5/\text{kg}_f\text{-s}$)
E	液壓油容積彈性係數(kg_f/cm^2)
F	受力體結構所承受油壓缸的出力(kg_f)
F_f	油壓缸來自受力體結構的抵抗力(kg_f)
K_A	伺服放大器增益(mA/v)
K_S	伺服閥流量增益[(cm^3/s)/ mA]
K_C	致動器增益($1/\text{cm}^2$)
K_F	回授檢出器增益(v/cm)
K_O	伺服閥線軸無負荷流量增益($\text{cm}^3/\text{s-v}$)
K_V	伺服閥無負荷流量增益($\text{cm}^3/\text{s-v}$)
K_P	伺服閥的油洩漏係數[(cm^3/s)/(kg_f/cm^2)]
M_C	油壓缸活塞的質量($\text{kg}_f\text{-s}/\text{cm}$)
M_O	系統超越量(%)
P_S	油壓系統供應壓力(kg_f/cm^2)
P_L	油壓缸負荷壓力(kg_f/cm^2)
Q_L	油壓缸負荷流量(cm^3/s)
Q_{L_f}	油壓缸負荷壓力差所引起輸出流量的減少量(cm^3/s)
Q_N	伺服閥無負荷流量(cm^3/s)
T_V	伺服閥時間常數($1/\text{s}$)
T_r	系統的上升時間(s)
T_S	系統的穩定時間(s)
V	伺服閥控制油路和油壓缸控制端的油液容積(cm^3)
V_f	位置回授信號(v)
V_i	輸入信號(v)
X_V	伺服閥線軸位移量(cm)
Y	輸出位移(cm)
B	液壓油的壓縮率(cm^3/kg_f)
L	油壓缸的油洩漏係數[(cm^3/s)/(kg_f/cm^2)]
W	滑軸肩部圓周長(cm)
i	輸入電流信號

P	液壓油的密度
X_v	伺服閥位移量
X_t	活塞位移
E	等效容積彈性模數
C_{ip}	內漏係數
F_f	外干擾力
G_l	伺服閥位移

附錄一 工作進度表

工作項目	月次									備註
	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	
1. 整體規劃、蒐集資料	***	***								
2. 電氣—液壓伺服系統		***	***							
3. 控制器設計			***	***	***					
4. 規畫直交實驗表					***					
5. 分析與討論					***	***	***			
6. 驗證重要因子							***	***		
7. 資料整理、報告撰寫								***	***	
預定進度累計百分比	10%	20%	32%	45%	58%	68%	80%	90%	100%	

明新科技大學 97 校內專題研究計畫成果報告

電氣－液壓伺服系統智慧型補償器之設計研究 Design on Intelligent Compensator of Electro-Hydraulic Servo System

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫編號： MUST-97 機械-09

執行期間： 97 年 01 月 01 日至 97 年 09 月 30 日

計畫主持人：楊 永 光

共同主持人：

計畫參與人員：林 建 良

可立即對外提供參考

(請打√) 一年後可對外提供參考

兩年後可對外提供參考

處理方式：完整報告內容因涉及專利、技術移轉案或其他智慧財產權，不予公開。

執行單位：明新科技大學 機械工程系

中 華 民 國 97 年 9 月 30 日

摘 要

本文係針對電氣—液壓伺服控制系統應用傳統PID控制器與智慧型控制器之設計技術，以MATLAB/Simulink建構控制系統程式並進行動態模擬；藉由實驗計劃法之統計方法、變異數分析與迴歸分析技術，探討控制器參數對系統行為之影響程度，同時可以獲得最佳控制器參數組合，藉此進行定位及追蹤控制性能的改善，並推算控制器參數與系統行為的數學模式。經由本研究，發現智慧型模糊PID控制器與類神經網路控制器有較佳的系統行為，同時實驗計劃法之應用則具有簡化控制器參數調整的試誤過程之功效，並且可以預測控制器參數與系統行為之相關性。

關鍵字：電氣—液壓伺服系統、智慧型控制器、實驗計劃法、
MATLAB/Simulink軟體。

Abstract

This research focused on utilizing MATLAB/ Simulink to simulate and compare the electro-hydraulic servo control system based on three different design approaches, which are a traditional PID controller design method and a fuzzy logic PID controller. Through a design of experiments method, analysis of variance (ANOVA) and regression analysis, how the controlled parameters impacts the controller can be evaluated and an optimal parameter setting can be obtained. Furthermore, not only the tracking or positioning performance of a controller can be greatly improved, but also mathematical models are established using the proposed method. Based on the findings, the found fuzzy logic PID controller utilizing the new designing method yields a better performance than that from the traditional PID controller design technique. In addition, a trial-and-error tuning approach can be eliminated.

Keywords: Electro-Hydraulic Servo System, Intelligent Control, Taguchi Experimental Method, Matlab/Simulink

目 錄

摘 要	i
Abstract	ii
目 錄	iii
表目錄	v
圖目錄	vi
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 文獻探討	2
第二章 電氣—液壓定位控制系統	5
2.1 伺服系統特性與架構	5
2.2 電氣—液壓伺服系統數學模式建立	5
2.2.1 系統的基本方程式	6
2.2.2 流量伺服閥之數學模式	8
2.2.3 液壓缸之數學模式	8
2.4 電液伺服閥之選用	9
2.5 系統參數數據	10
第三章 控制理論	12
3.1 PID控制器理論	12
3.2 模糊控制器架構	12
3.3 類神經網路控制器	13
3.3.1 類神經網路控制系統	14
第四章 實驗分析規劃	16
4.1 實驗設計相關理論	16
4.2 變異數分析	17
4.3 迴歸分析	19
4.4 殘差分析	20
第五章 實驗結果與討論	21
5.1 PID控制實驗結果	21
5.1.1 ANOVA分析	24
5.1.2 建構迴歸模型	30
5.1.3 殘差分析	31
5.1.4 PID最佳參數組合	38
5.2 模糊控制實驗結果	39
5.2.1 模糊控制實驗設計	40
5.2.2 PD-PI模糊控制最佳參數	41
5.3 類神經網路控制實驗結果	42
5.4 結果比較	43
第六章 實 結 論	45
6.1 結 論	45
參考文獻	46

符號彙編.....	49
附錄一 工作進度表.....	51

表目錄

表 1 電氣液壓系統參數表	11
表 2 Ziegler-Nichols 調整法之 PID 參數	21
表 3 控制實驗結果	22
表 4 實驗計劃法之 PID 控制	23
表 5 最大超越量 ANOVA 分析結果	26
表 6 上升時間 ANOVA 分析結果	26
表 7 穩定時間 ANOVA 分析結果	27
表 8 誤差量 ANOVA 分析結果	27
表 9 最大超越量因子貢獻度	28
表 10 上升時間因子貢獻度	28
表 11 穩定時間因子貢獻度	29
表 12 誤差量因子貢獻度	29
表 13 最大超越量殘差值結果	32
表 14 上升時間殘差值結果	33
表 15 穩定時間殘差值結果	34
表 16 誤差量殘差值結果	35
表 17 PID 控制最佳參數組合與驗證	38
表 18 實驗計劃法之 PD-PI 模糊控制	40
表 19 PD-PI 模糊控制最佳參數組合與驗證	41
表 20 類神經網路控制性能指標	42
表 21 綜合控制實驗最佳結果之比較	43

圖目錄

圖 1 位置控制系統圖	5
圖 2 伺服閥控液壓系統示意圖	6
圖 3 位置控制系統圖	8
圖 4 轉換後位置控制系統圖	9
圖 5 伺服閥流量選用表	10
圖 6 等效系統方塊圖	11
圖 7 模糊控制器架構圖	13
圖 8 簡單線性迴歸	20
圖 9 Ziegler-Nichols 調整之 PID 控制圖	22
圖 10 最大超越量殘差的常態機率圖	36
圖 11 上升時間殘差的常態機率圖	36
圖 12 穩定時間殘差的常態機率圖	37
圖 13 誤差量殘差的常態機率圖	37
圖 14 PID 最佳參數與 Ziegler-Nichols 調整之控制圖	38
圖 15 控制規則推論部歸屬函數圖	39
圖 16 PD-PI 模糊控制最佳參數之控制圖	41
圖 17 類神經網路控制之響應圖	42
圖 18 綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖	44

第一章 緒論

1.1 前言

近年來國內產業技術朝向微小化及精密化的方向發展，對於控制精度的要求也相對的提高。所以在傳統的油壓控制系統已不能滿足工業需求；因此，能達到更精確控制的電氣—液壓伺服控制(Electro-Hydraulic Servo Control)已在自動化領域佔有重要地位。在一般的工業機械應用中，凡是需要大功率、響應快、震動小、動作滑順、精確反應的控制系統，電氣—液壓伺服系統是最佳的選擇；例如：萬能材料試驗機、運輸機械、精密壓床、元件測試機等；所以，電氣—液壓系統之應用與設計技術就成為系統工程師不可獲缺的知識。但是，由於電氣—液壓伺服系統具有非線性特性，如伺服閥對負載的非線性特性、比例線圈的遲滯現象、零點飄移及閥軸的內漏等，所以實際的電氣—液壓伺服系統為一高度非線性的時變系統；由於非線性系統之數學模式較為複雜且不易分析，所以，在控制理論上，常以線性化系統表示之。如魏榮輝和洪至謙[1,2]以Moog公司30型流量控制伺服閥作模擬分析，利用MATLAB/Simulink軟體繪出流量控制伺服閥系統數學方塊圖，並進行各項動態模擬分析，結果顯示與實際參數值有相同的結果。而後提出以伺服閥控制射出成型機之射出速度為主，在Matlab/Simulink分析環境下，探討射出速度伺服控制器的頻寬特性，並加以分析。

控制系統的時域響應，在以往有相當多的研究致力於如何減少選擇最佳PID控制器參數所花的時間，在現有的調整技術之中，以Ziegler-Nichols調整法[3]最為著名，且在相當多的實際應用中表現相當優異，但是調整PID控制器參數過程中，實驗次數過多為其主要缺點。因此，以用較少的實驗做出較好的控制器設定便是一門學問。

統計實驗計劃法(Statistical Design of Experiment,DOE)[4,5]，意指規劃實驗的過程可以蒐集到合宜的資料，經過統計方法的分析可得到正確、客觀的結論。傳統的實驗設計策略就是實務界最常用的一次一因子法，此種方法是在進行一次實驗時，只改變一個因子的水準，而將其他因子都固定在同一水準上，以觀察該因子在實驗範圍內對反應變數

的影響，雖然此方法可以輕易的觀察各因子反應變數之間的關係，但主要缺點就是未能考慮介於因子間任何可能的交互作用，為其美中不足之處。為了改善上述的缺點，於是有了全因子設計(Full Factorial Design)的出現，此種實驗設計方法，研究所有因子水準排列組合，可以了解所有因子的主效應(Main Effect)及所有交互作用的影響。至今已經廣泛的利用在各種工程設計，以及各種領域。

本文針對電氣—液壓伺服控制系統，做定位及追蹤控制性能的研究。建構系統之轉移函數及方塊圖，再以 Matlab/Simulink 進行電腦模擬，其中以比例—積分—微分三個控制參數，利用實驗計畫法(DOE)進行控制因子之參數設計。研究中以 PID 控制器、模糊 PID 控制器、類神經網路控制器進行分析與比較，並應用變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)探討影響系統行為的重要因子，最後進行實驗確認預測的結果。

1.2 文獻探討

電氣—液壓伺服控制系統的應用產品，已經有許多廠商及研究者開發完成。關於電氣—液壓伺服控制系統的研究報告甚多，因此相關之文獻相當廣泛。例如：

1. 近年國內學術上對電氣—液壓伺服控制系統也有一些的研究：

(1) 許朝勝[6]及葉國安[7]運用了模糊理論及類神經模糊控制法則，以控制液壓缸之位置，並比較兩種控制器之效果，發現類神經模糊控制對於系統不確定性有良好的適應能力，且在穩態誤差上較傳統PID 控制器為佳；此類控制法則不需數學模式，只需根據觀察上的語言性法則進行推論。類神經網路雖故可自行學習，但在收尋資料點時，需要龐大記憶體，且未必一次就可以完成，需要多次的收集資料，才能有完美的響應。

(2) Yun及Cho[8][9]、許毅然[10]應用模式參考型適應性控制(MRAC)法則，來設計伺服閥控制油壓致動器系統；由於伺服油壓控制系統是高階的非線性系統，當系統受到變動的負荷時，系統參數也會受到影響而有所改變。本研究提出對伺服油壓控制系統參數的求法，而由模擬分析與實驗結果顯示本文所提出的方

(3) 陳秉州[11]應用傳統模糊控制器、灰預測模糊控制器對伺服系統控制性能作一系列的評估，可有效的改善使用傳統控制器的控制性能，並且使用者可依據不同的需求，選擇不同的系統控制目標，作為控制器的輸入變數，如壓力，位置等。但此實驗次數過於繁多，且響應未達最佳化，此為不足之地方。

2. 國外學者對於控制器設計有許多研究：

(1) 控制系統的時域響應，在現有的調整技術之中，以 Ziegler-Nichols 調整法[3]最為著名，且在相當多的實際應用中表現相當優異，但是調整 PID 控制器參數過程中，實驗次數過多為其主要缺點。Bevrani[12]等以自動增益控制為主，設計一個強健的 PI 控制器，與 H_{∞} 電動輸出回應控制相比較，以反覆線矩陣不平等運算法則的到一個最佳的性能表現。Chen 和 Hwang[13]以 PD 反覆的學習控制氣動的 X-Y 移動平台系統。實驗結果顯示在控制期間系統易受到外部的負荷干擾，利用反覆的學習控制，可以拒絕干擾，並有效的追蹤軌跡。

(2) 模糊理論(Fuzzy)自 1965 年 Zadeh 教授[14]首次發表的模糊集合論文，至今已有四十二年的歷史，爾後在 1974 年 Mamdani 教授提出以 if-then 語意形式的推論邏輯，這期間不斷有許多學者投入相關理論與應用的研究，使模糊理論的應用迅速擴展至許多領域。模糊規則利用設計者(專家)本身所給予的知識或邏輯規則去描述複雜的非線性系統，換言之，控制方法是建立在直覺和經驗上，就是以專家經驗法則的控制方法。然而模糊理論用於控制上也有相當多的缺點，例如：(1)專家經驗所架構的規則，是不易取得的。(2)使用精密度要求較高控制系統時，模糊系統需要龐大的資料庫，但實際系統的硬體並非能滿足需求。

(3) 近年來，隨著科技的進步，具有自我學習能力的智慧型控制器興起，以此方法解決專家經驗不足的問題；如 Procyk 和 Mamdani[15]提出具有學習能力的自組織控制器(Self-organizing fuzzy controller)。之後 Shao[16]及 Zhang[17]提出修正

意見，以及不同學習方式之自組織控制器提出[18]。Lee[19]也應用自調式適應控制，對液壓系統作線上識別，並將液壓缸之位移及負荷回授，形成閉迴路之閥控液壓系統，再配合適當的控制法則進行適應控制，自調適應控制器與極點安置控制相較有較好的控制效果。模糊理論另一個問題，模糊資料庫的龐大，有學者[20、21、22]以模糊滑動平面 S 取代傳統模糊資料以誤差 e 及誤差變量為輸入規則，以改善此問題。Barai 和 Nonami[23]利用模糊預測與遺傳基因運算法為控制法則，以設計最佳化，結果顯示，在電磁比例的控制活瓣劃分區域有較好的追蹤性能。Yamamoto[24]等利用模糊控制器對氣壓伺服系統做適應性控制。Huang 和 Chen[25]提出模糊規則線上學習能力增加補償近似值錯誤，利用滑動模式控制，以改善控制性能。

- (4) 類神經網路(Neural Network, NN) 最先由 McCulloch 和 pitts 在 1943 年所提出 [26]，NN 有平行處理及自我學習能力之優點，而其學習的過程也是最佳化的過程。因此許多研究將 FLC 以 NN 的架構來實現，稱為 FNNC[27、28、29]。FNNC 中最廣泛被採用的學習法則之一即是倒傳遞(Backpropagation Algorithm, 簡 BP)[30]。Shibata[31]等提出以一個伺服系統控制，利用 σ 修正方法來改善類神經網路控制的學習能力，並消除外部干擾，調整出強健的參數控制。

第二章 電氣—液壓定位控制系統

2.1 伺服系統特性與架構

用伺服閥作控制的方式有很多，如力量、速度、位置等，本文以位置控制系統為主。圖 1 所示的系統圖為位置控制系統，對伺服系統輸入信號時，經過伺服放大器將信號放大再送至伺服閥。伺服閥根據信號的大小，成比例將液壓油量輸送到油壓缸而驅動活塞。因此與油壓缸連接的負荷其位移與輸入信號成比例。如果負荷之位移不與輸入信號成比例，則可用位置檢出器檢出其位置，並將電壓信號回授用以修正活塞的位置。

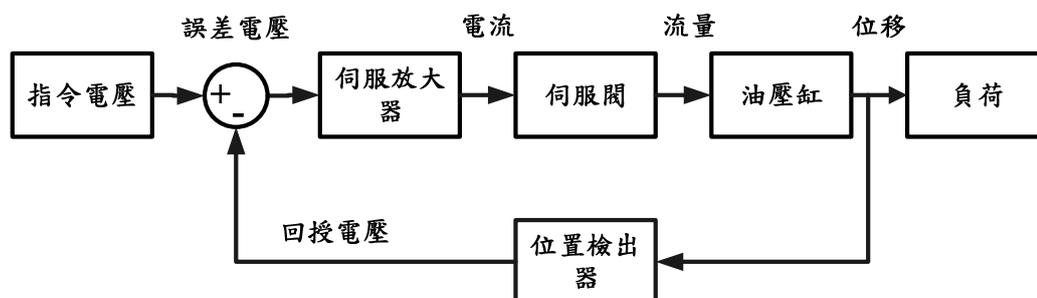


圖 1 位置控制系統圖

2.2 電氣—液壓伺服系統數學模式建立

為了理論分析之需要，將實際的電氣—液壓伺服系統簡化如圖 2 所示，系統中主要元件為伺服閥及液壓缸。

為了解受控系統的特性以便於控制的設計，將油壓系統作了以下的基本假設：

- (1) 定壓源操作($P_s = const.$)，回油壓力等於大氣壓力。
- (2) 工作流體流經各閥口的流量係數(C_d)為一定。
- (3) 忽略控制閥與液壓缸的洩漏情形。
- (4) 忽略溫度效應對反應特性之影響。

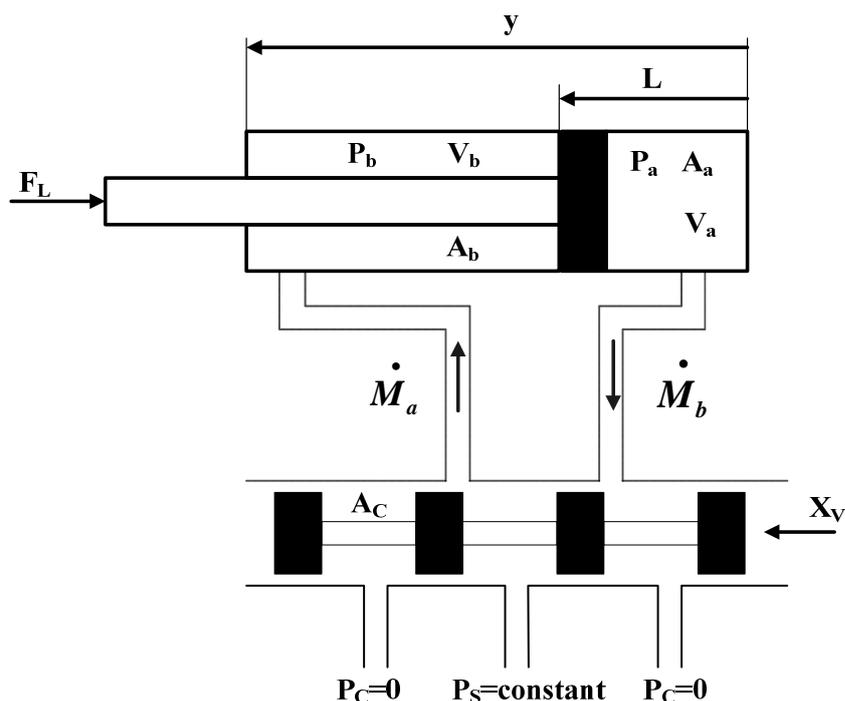


圖 2 伺服閥控液壓系統示意圖

2.2.1 系統的基本方程式

建立系統轉移函數時，先列出各元件的方程式或轉移函數[32]，如下：

1. 放大器增益：

$$\Delta V = V_i - V_f$$

$$K_A = \frac{i_c}{\Delta V} \quad (2.1)$$

2. 伺服閥滑軸線性化的流量方程式：

流進液壓缸進油孔流量與從液壓缸回油孔流出的流量分別為：

$$Q_1 = C_d W X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (2.2)$$

$$Q_2 = C_d W X_v \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} \quad (2.3)$$

動態分析考慮到洩漏量， $Q_1 \neq Q_2$ ，故定義負載流量為：

$$Q_f = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{C_d W X_v}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (\sqrt{P_s + P_1} + \sqrt{P_2}) \quad (2.4)$$

以條件所知 $P_f = P_1 - P_2$ 、 $P_s = P_1 + P_2$ 得 $P_1 = (P_s + P_f)/2$ 、 $P_2 = (P_s - P_f)/2$ 。並對(2.4)式線性化得(2.5)：

$$Q_L = K_o X_v - K_c P_L = Q_{NL} - Q_{LF} \quad (2.5)$$

3. 液壓缸的流量連續方程式：

從閥進入液壓缸的流量 Q_I 除了推動活塞運動外，還要補償缸內的各種洩漏，補償液體的壓縮量及管壁與缸體的機械膨脹量。當液體壓力增大時，液體本身及液體中所含的氣體會受到壓縮，盛裝液體的容器也會發生膨脹，此時流量連續方程式的轉移函數為：

$$Q_L(S) = A_p S Y(S) + C_l P_L(S) + \frac{VS}{4E} P_L(S) \quad (2.6)$$

4. 液壓缸的負載力平衡方程式：

液壓缸的輸出力與負載力相平衡，負載力一般包括活塞與負載的慣性力、粘性阻尼力、彈性負載力以及其他外干擾力等。

$$p_f A_t = M_c S^2 X_t + B_c S X_t + K_t X_t + F_f \quad (2.7)$$

5. 回饋增益：

$$V_f = K_{fb} X(S) \quad (2.8)$$

將以上各元件的傳遞函數關係以結構圖型式表示，並且按傳遞關係連成閉迴路系統的方塊圖如圖 3。

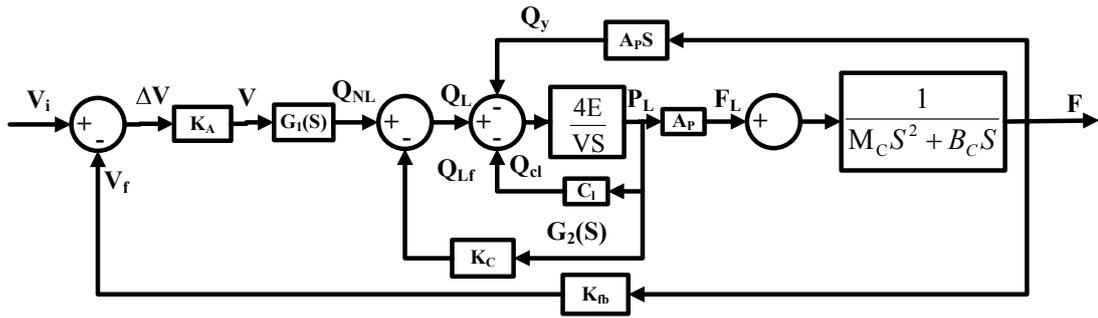


圖 3 位置控制系統圖

其中 $G_2(S)$ 為圖 2.6 所示局部迴路的傳遞函數。

$$G_2(S) = \frac{4E}{VS + 4EK_C} = \frac{K_N}{T_C S + 1} \quad (2.9)$$

式中， $T_C = \frac{V}{4EK_C}$ 、 $K_N = \frac{1}{K_C}$

2.2.2 流量伺服閥之數學模式

伺服閥在固定的供油壓力與固定的負荷壓力下，閥的響應可以一階的狀態函數近似。

$$G_1(S) = \frac{K_V}{T_V S + 1} i(S) \quad (2.10)$$

2.2.3 液壓缸之數學模式

$$G_3(S) = \frac{K_1(T_c S + 1)}{(T_1^2 S^2 + 2\xi_1 T_1 S + 1)S} \quad (2.11)$$

式中， $T_1 = \sqrt{\frac{T_c(M_c/B_c)}{B_1}}$ 、 $B_1 = 1 + \frac{A_p^2 K_N}{B_c}$ 、 $K_1 = \frac{1}{B_c B_1}$ 、 $\xi_1 = \frac{T_c + M_c/B_c}{2\sqrt{B_1 T_c (M_c/B_c)}}$

$$G_4(S) = \frac{(T_c S + 1)}{C_3 S^3 + C_2 S^2 + C_1 S + 1} \quad (2.12)$$

式中， $C_1 = T_c + \frac{1}{K_1}$ 、 $C_2 = \frac{1}{K_1}(2T_1 \xi_1)$ 、 $C_3 = \frac{1}{K_1}(T_1^2)$

簡化後的系統方塊圖，如圖 4 所示。

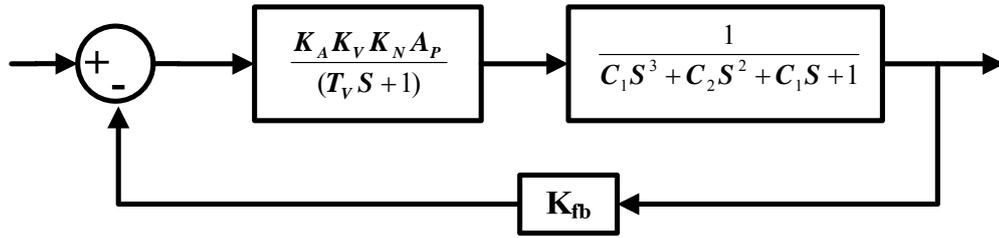


圖 4 轉換後位置控制系統圖

2.4 電液伺服閥之選用

電液伺服閥為依照電動及其他輸入信號控制流量或壓力的閥門，故電液伺服閥計有電傳信號作動之電動液壓伺服閥及機械信號作動之機構伺服閥。伺服閥一般是應用在一般產業機械之自動控制，及需要位置控制、速度控制等高精度和高響應之作業上。本研究之電液伺服閥選用如下：

1. 定位時間為 3 秒以內、加速時間為 0.4 秒、減速時間為 0.4 秒，故最大速度 $V_{MAX} = S/t = 24/3 - (0.4 + 0.4) = 10.9(cm/sec)$ 。
2. 供給壓力 $P_S = 1000(psi)$ ，面積 $5(cm^2)$ 。
3. 其流量 Q 為油壓缸面積及所需速度決定，所以 $Q_l = A \cdot V_{max} = 5 \times 10.9 = 54.54(cm^3/sec) = 3.28(l/min) = 0.867(gpm)$ 。
4. 研究中使用 MOOG G631-3001A 伺服閥，由圖 5 伺服閥流量選用表可知，流量 $0.867(gpm)$ 適合選用 G631-3001A 伺服閥。

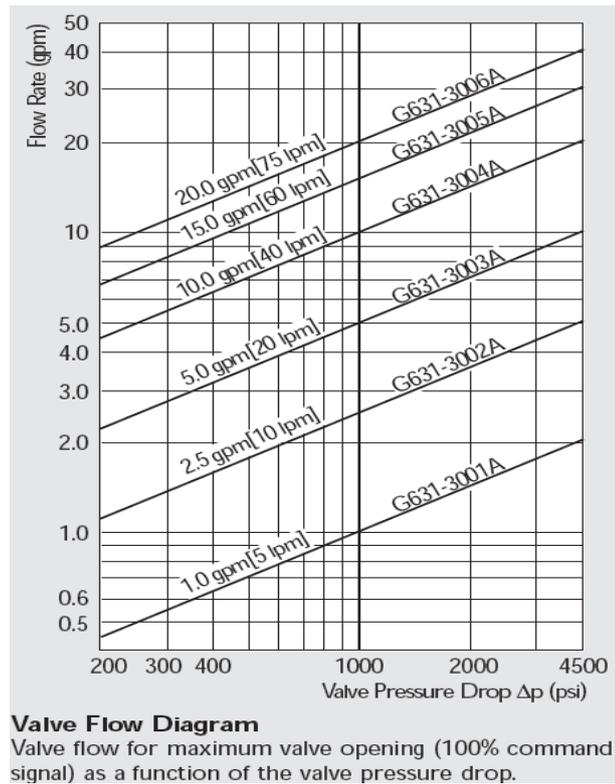


圖 5 伺服閥流量選用表

2.5 系統參數數據

電氣—液壓伺服系統，若要達到一定的性能要求，需要利用油壓迴路間相關參數的匹配，此參數包括：液壓缸的尺寸、液壓管路的直徑大小、油壓管路的長度、油壓缸的有效截面積大小、油壓缸的行程長度、控制閥的特性、所使用的壓力大小及油路之間的设计問題等。本研究將根據推導出的電氣—液壓伺服系統數學模式，進行電腦模擬控制，以驗證相關參數間的變化，並加以改善。

藉著電腦模擬可事先預測系統之性能，客觀評估各參數間互相的影響，本研究以 Matlab/Simulink 軟體建構控制系統，並進行動態模擬分析。

系統模擬分析時，電氣—液壓伺服系統之各項參數的決定，將由實際元件規格或廠商提供之型錄而得，將此參數列於表 1 中。

表 1 電氣液壓系統參數表

伺服閥	最大流量 Q_{\max}	3	L/min
	時間常數 T_v	0.025	s
	閥軸直徑 d_v	1.25	cm
	閥口流量係數 C_d	0.61	
液壓缸	活塞桿質量 M	$8.67 \cdot 10^{-4}$	kgf·s ² /cm
	活塞直徑 D_a	1.5	cm
	活塞受力面積 A_p	$A_p = 5$	cm ²
	活塞行程 L	24	cm
	黏滯阻尼係數 B_c	0.12	kgf · s/cm
	供給壓力 P_s	70	kgf/cm ²
	回由壓力 P_r	5	kgf/cm ²
液壓油	液壓油密度 ρ	870	kg/m ³
	液壓油彈性模數 E_{oil}	14280	kgf/cm ²

將參數係數代入圖 6 並整理，可得等效系統方塊圖，如圖 2.11 所示。

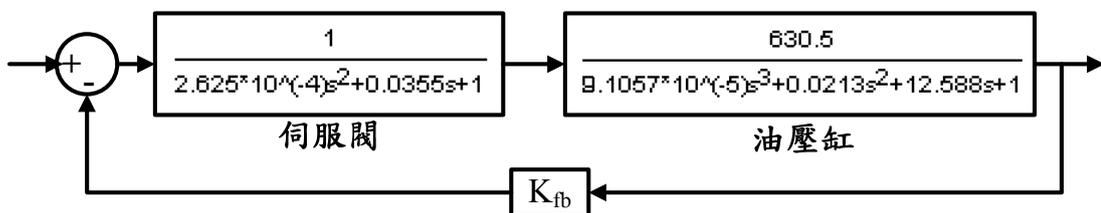


圖 6 等效系統方塊圖

第三章 控制理論

3.1 PID 控制器理論

將PID 控制器視為輸入誤差、輸出操作量的系統，則它的轉移函數(transfer function) 為(3.1)式：

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3.1)$$

式中提供了比例、積分、微分控制動作，這些動作影響控制系統為：

1. 比例動作 K_p ：為一個可調整增益的放大器，可提高精確度但卻降低系統的穩定性。
2. 積分動作 T_I ：增加一個在原點的極點，可改善穩態誤差，卻使系統變不穩定。
3. 微分動作 T_D ：增加零點數，可改善系統的穩定性，卻使系統反應變慢。

3.2 模糊控制器架構

當設計者要設計一個模糊控制器時，一般需考慮參數的設計（即控制器本身的輸入及輸出參數設計）、歸屬函數設計、規則設計以及模糊控制器的四個子系統—模糊化界面（Fuzzification Interface）、決策邏輯（Decision Making Logic）、解模糊化界面（Defuzzification Interface）、知識庫(Knowledge Base)。這些因素都會影響模糊控制器的運作邏輯，亦即會影響控制系統的控制品質。如圖7為模糊控制器的基本架構。

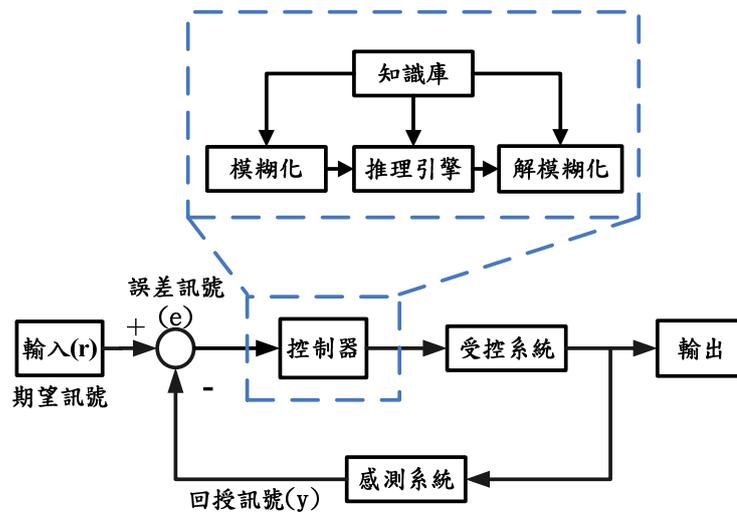


圖7 模糊控制器架構圖

3.3 類神經網路控制器

類神經網路的型態與大小會影響系統的學習能力，神經元太少則無法處理複雜的問題，神經元太多則效率不佳。類神經網路的大小如何決定，可依問題的複雜程度、訓練類神經網路的範例個數及所需的精密度來決定。透過經驗的累積與試誤法 (Trial and Error) 一般可得最佳的網路大小。

類神經網路的連結架構，以不同處理資訊的能力可分類為很多架構，以下以最常見的前饋式 (Feedforward) 類神經網路與回饋式 (Feedback) 類神經網路二種進行介紹。

1. 前饋式類神經網路：

前饋式類神經網路架構，其連結方式以單方向向前傳遞方式連結。前饋式類神經網路有可細分為：單層前饋式類神經網路(Single-Layer Feedforward Networks)、多層前饋式類神經網路(Multilayer Feedforward Networks)。

(1) 單層前饋式類神經網路：

單層的前饋式類神經網路是一種最簡單的網路架構，訊號由輸入層(Input Layer)進入，經過加權後進入神經元中處理，再由神經元輸出。通常此種網路的功能較差，只能處理線性的問題。

(2) 多層前饋式類神經網路：

多層前饋式類神經網路與單層前饋式類神經網路最大的區別為，網路中至少有包含一層隱藏層，其功能為調節網路內部輸入值與網路整體輸出值。運算方式由輸入層之輸入訊號，經過加權後送入隱藏層中處理，隱藏層的輸出加權後，再進入輸出層做處理，最後輸出層的輸出為類神經網路的輸出。此種多層前饋式類神經網路可以處理複雜性高的問題。

2. 回饋式類神經網路：

回饋式類神經網路與前饋式類神經網路最大的不同為，至少包含一個迴授迴圈，神經元會將其輸出訊號回傳至同一層的其他神經元，或是輸出層透過另一組權重值，迴授連接於網路的某處(如輸入層、隱藏層)。回饋式類神經網路架構常用於處理動態現象，對於非線性現象的動態系統，回饋式類神經網路會比其他類型網路有更好的學習能力。

3.3.1 類神經網路控制系統

類神經網路成功的應用在動態系統的識別和控制，以多層感知器的逼近能力，使它成為建立非線性系統與實現一般目的非線性控制器的一種受歡迎的選擇。本節將介紹三種用於預測和控制的類神經網路架構：

1. 模式預測控制(Model Predictive Control,MPC)：

模式預測控制使用一個非線性受控體的類神經網路模式，對有可能預測未來受控體的響應訊號，並指定未來時間範圍，以控制器所計算出的控制量，藉由最佳化演算法算出最佳化未來受控體的控制訊號。在模式預測控制的第一個階段就是要決定類神經網路受控體模式，亦即進行系統識別。類神經網路受控體模式的輸入 U 和受控體輸出 y_p 來預測受控體未來輸出值。並在指定範圍內，藉由數值最佳化程式找出可極小化性能準則(式 3.2)的控制訊號。

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} (y_r(t+j) - y_m(t+j))^2 + \rho \sum_{j=1}^{N_u} (u'(t+j-1) - u'(t+j-2)) \quad (3.2)$$

式中， U' ：是暫時的控制訊號

y_r ：期望的響應

y_m ：類神經網路模式的響應

ρ ：控制增加量的平方和在性能指標上的貢獻

2. NARMA-L2(Nonlinear Autoregressive Moving Average,NARMA)：

當受控體藉由伴隨的形式(Companion Form)近似化時，此神經元控制器稱為 NARMA-L2 控制。此控制系統藉由消除非線性來將非線性系統動態模式轉成線性系統動態模式。對 NARMA-L2 模式的識別階段，能訓練一個類神經網路來近似非線性函數 N ，這是為了 NN 預測控制器所使用的識別步驟。如果此系統輸出會跟隨著某種參考軌跡，則最終控制器具有式(3.3)形式。

$$u(k+1) = \frac{y_r(k+d) - f[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]}{g[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-n+1)]} \quad (3.3)$$

3. 模式參考控制(Nodel Reference Control,MRC)：

此控制器的線上計算量與 NARMA-L2 一樣為極少。而模式參考架構除了類神經網路受控體模式之外，還要一個獨立的離線訓練出的類神經網路控制器。首先識別出受控體模式，接著訓練控制器使得受控體輸出跟隨著參考模式的輸出。

第四章 實驗分析規劃

實驗設計的最主要目的惟在既有的設備之下，以最經濟有效的方法取得最多有用的數據，然後進一步透過統計分析以建構出一個受外來變異影響最小的製程，即所謂的穩健製程以及符合生產目標之最佳生產條件組合。本節主要是介紹利用實驗設計法分析的相關理論，包括迴歸分析、殘差分析、統計檢定及描述應用期望函數來解決多重品質特性的問題。在實驗的規劃與分析部份，本文主要採用實驗計劃法來進行參數最佳化的探討。因此本章主要針對實驗計劃法相關理論等，進行詳細的介紹與應用公式的列舉說明。

4.1 統計檢定理論

統計假設(Statistical Hypothesis)就是有關機率分配的參數或者模型參數的一個敘述，假設反映欲解決問題的一些猜測。以下便針對統計檢定所使用到假設的種類、顯著水準與p-value判斷方法作一介紹：

(1) 假設的種類：

虛無假設(Null Hypothesis)：係指研究者希望放棄、否定的假設，以 H_0 表示之。

對立假設(Alternative Hypothesis)：係指對立於虛無假設以外之其他可能假設，以 H_1 表示之。兩種假設為互斥集合之關係。

上述的兩種假設中，以虛無假設為主，對立假設為次。當檢定結果為放棄(Reject，棄卻、否定) H_0 時，才會決定接受(Accept) H_1 ；而當接受 H_0 時，便放棄(即用不到了) H_1 。

- #### (2) 顯著水準 (Significance Level)：
- 虛無假設與對立假設建立以後，要選定一個衡量的標準以拒絕或接受虛無假設，這個衡量的標準(機率值)就稱為顯著水準，以希臘字母 α 表示。可被接受的顯著水準標準因人而異，一般統計上常用的有： $\alpha=0.1$ 、 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ ，但最常使用的為 $\alpha=0.05$ 。所以當 $\alpha=0.05$ ，即表示有 0.95 的信賴係數，或犯錯的機率為 5%； $\alpha=0.01$ ，即表示有 0.99 的信賴係數，或犯錯的機率為 1%。
- #### (3) p-value (Probability Value)：
- 在什麼樣的顯著水準(α)下，精確的算出棄卻域的臨界點剛好是樣本統計量，以提供決策者更多資訊。p-value 的判斷：一般統計檢定是給定顯著水準後查表來決定棄卻域，再計算資料是否落入棄卻域來判斷虛無假設是否顯

著。但由於電腦的發達，一般電腦統計套裝軟體都會直接算出 p-value，一旦知道 P-value 是多少，決策者就可以瞭解到資料是有多顯著。例如：當顯著水準 α 設定為 0.05，棄卻域為：p-value < 0.05 時，則拒絕 H_0 ，表示資料不服從常態分配；在常態檢定方面若要為常態分配，則 p-value 要大於 0.05 才能滿足常態分配。

4.2 變異數分析

變異數分析的主要目的是利用統計檢定的方法來評估實驗誤差，由於實驗數據或資料常會受到各種不同外在的因素所干擾，又必須同時考慮實驗的結果有一定精確度；因此，常會利用變異數分析來探討各因素所造成之影響效果，進而瞭解各控制因子的貢獻度，來彌補田口式實驗中無法研判各實驗參數對品質特性之影響的差異程度及誤差程序等方面的缺陷；藉此，得知如何改善變換何種控制因子，以得到最佳的品質效益。

變異數分析利用各實驗數據之間的差異程度，以統計分析的觀念將數據的變動分解成各因子、交互作用及誤差項等平方和，並檢定因子本身和交互作用之影響是否顯著 (Significance)。其分析內容包含了如下所示：

(1) 變異源(Source of Variation)

影響品質特性的對象，其中包含有可控因子 A, B, C, \dots ，與誤差因子(Error Factor, e) 及總變異(Total Variation, T)。

(2) 平方和(Sum of Squares, SS)

主要有各設計參數之變異平方和，其中包含有 $SS_A, SS_B, SS_{factor}, \dots$ ，與 SS_e 及 SS_T 。平方和計算式如下：

$$SS_T = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r y_{ij}^2 \right) - n \times r \times \bar{y}^2 \quad (5)$$

其中，上式總平方和表示為有 n 組實驗，而每組實驗有 r 個重複次數， \bar{y} 為所有品質特性量測值的平均值。

$$SS_{factor} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$SS_e = SS_T - \sum SS_{factor} \quad (7)$$

其中，各因子平方和表示為在 a 水準下所得平均值 \bar{y}_i ，減去總實驗平均值後之平方和相加。

(3) 自由度(Degrees of Freedom, DOF)

所謂自由度即為各獨立資料之個數，在ANOVA表中，各因子自由度等於其設計水準數減一；總自由度個數則等於全體實驗次數減 1；誤差自由度為總自由度減去所有因子自由度之和。

(4) 均方(Mean Squares, MS)

均方即為變異數，是各因子平方和除以其自由度。

$$MS_{factor} = \frac{SS_{factor}}{DOF_{factor}} \quad (8)$$

(5) F 值(F value)

為因子的變異數和誤差的變異數兩者之比值。在統計學上會利用 F 值來判斷特定因子是否顯著，當 F 值大於臨界 F 值時，且值愈大則表示該因子效果與誤差變異量差異越大；亦即，影響製程愈強烈。即下式：

$$F_{factor} = \frac{MS_{factor}}{MS_e} \quad (9)$$

(6) 純變動(The Excepted Sum of Squares, SS')

定義為各因子的平方和減去其自由度乘以誤差變異項。即：

$$SS'_{factor} = SS_{factor} - MS_{error} \times DOF_{factor} \quad (10)$$

(7) 貢獻度(Percentage of the Contribution to the Total Variation, ρ)

即為各因子的純變動佔總變動之百分比。經 F 值來判斷因子是否顯著後，在使用貢獻度來進行評估。

$$\rho_i = \frac{SS'_{factor}}{SS_T} \times 100\% \quad (11)$$

(8) 合併誤差

當使用某些直交表進行實驗情況下，會造成沒有誤差項，因此會結合一些平方和較小的因子以進行變異數的分析，另外田口也建議使用統合的方法，合併平方和較小的因子，以避免過度評估因子效果。

4.3 迴歸分析

實驗者經常有興趣於發展一個內插方程式給反應變數，此方程式就是所研究問題的一個經驗模型(Empirical Model)，迴歸分析(Regression Analysis)就是一般常用來適配經驗模型的方法，以計量的形式來呈現一個設計實驗的結果，並可透過迴歸模型來進行預測，製程最佳化，或製程管制[33]。

圖 8 為一個簡單線性迴歸的例子，採用最小平方法(Least Squares Method)配適出一條最適當且最能代表各點的迴歸直線，來描述兩個變數 X 與 Y 之間的關係，簡單線性迴歸方程式，可定義如下：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (12)$$

其中 Y 是因變數(Dependent Variable)或反應變數(Response Variable)，一個想試著解釋或預測的變數， X 是自變數(Independent Variable)，也被稱為預測變數(Predictor Variable)， ε 是隨機誤差項(Random Error Term)， β_0 為截距， β_k 是迴歸係數。此迴歸方程式解釋為當自變數 X 改變時，相對因變數 Y 會如何改變。

在適配出迴歸模型後，應給予適當的檢查，以保證它能提供一個真實系統的近似和，否則將會帶來粗劣的或是誤導整個結論。

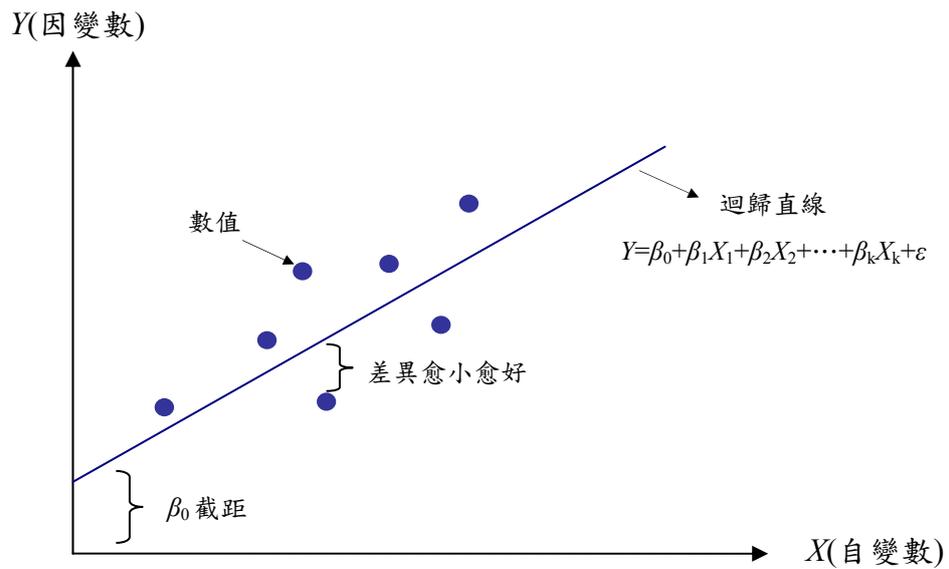


圖 8 簡單線性迴歸

4.4 殘差分析

在實務上完全仰賴變異數分析和迴歸方程式是不夠的，除非這些假定的有效性已經被檢驗過，所以模型適當性檢驗(Model Adequacy Checking)是資料分析過程裡的一個重要部分。殘差分析為首要診斷工具[34]，殘差(Residual)定義為個別實驗結果的實際值(Actual)，減去迴歸方程式配適出的預測值(Predicted)。透過對殘差的研究，許多有關基本假定的違反和模型不適當的型態都可以被發現，對於本實驗的正確性有檢驗效用。

常態機率圖是一種縱座標軸以標準常態分佈 Z 值為刻度的圖表，可以用來判定殘差數據是否呈現常態分佈。其作法如下[35]：

- (1) 排序：殘差由小到大排序。
- (2) 繪點：將殘差數據依下列座標軸繪於圖上，縱座標為 $Z = \Phi^{-1}((j-0.5)/n)$ ，其中 Φ^{-1} 為標準常態分佈累積機率函數之反函數； n =殘差值數據數目； j =數據排序後之序號，最小序號為 1，最大序號為 n 。橫座標為殘差數據值。
- (3) 繪線：繪出一條能通過多數正常點之直線。
- (4) 判讀：如點均在直線附近，則殘差數據呈現常態分佈

第五章 實驗結果與討論

本研究對電氣—液壓伺服控制系統作位置控制，藉由液壓缸之位置控制，即可對系統作靜態或動態之模擬，得到其系統之響應，進而分析各參數間的變化；亦可藉由實驗的結果，評估各控制器參數應用於電氣—液壓伺服控制系統之效益。

5.1 PID控制實驗結果

在控制領域中定位控制的應用非常普遍，且控制上大部份會從步階定位開始，本研究步階的大小為100mm，作為液壓缸的步階定位控制之參考輸入目標值並以最大誤差量(Overshoot, O_S)、上升時間(Rise Time, R_T)、穩定時間(Setting Time, S_T)、穩態誤(Error, E_{SS})差作為評估系統之考量。

根據Ziegler-Nichols 的調整準則，得到 $K_{CP}=2.1645$ ，會產生一定振幅維持在連續振動狀態，並得到此連續振動之週期為 $T_{CP}=0.112$ ，我們將P、PI、PID 控制器之參數值設如表2。本實驗所使用的控制器參數增益，PID控制器分別為 $K_P=1.298$ 、 $K_I=0.056$ 、 $K_D=0.014$ ，此時系統為圖9。

表2 Ziegler-Nichols調整法之PID參數

	K_P	T_I	T_D
P	1.082	0	
PI	0.974	0.093	
PID	1.298	0.056	0.014

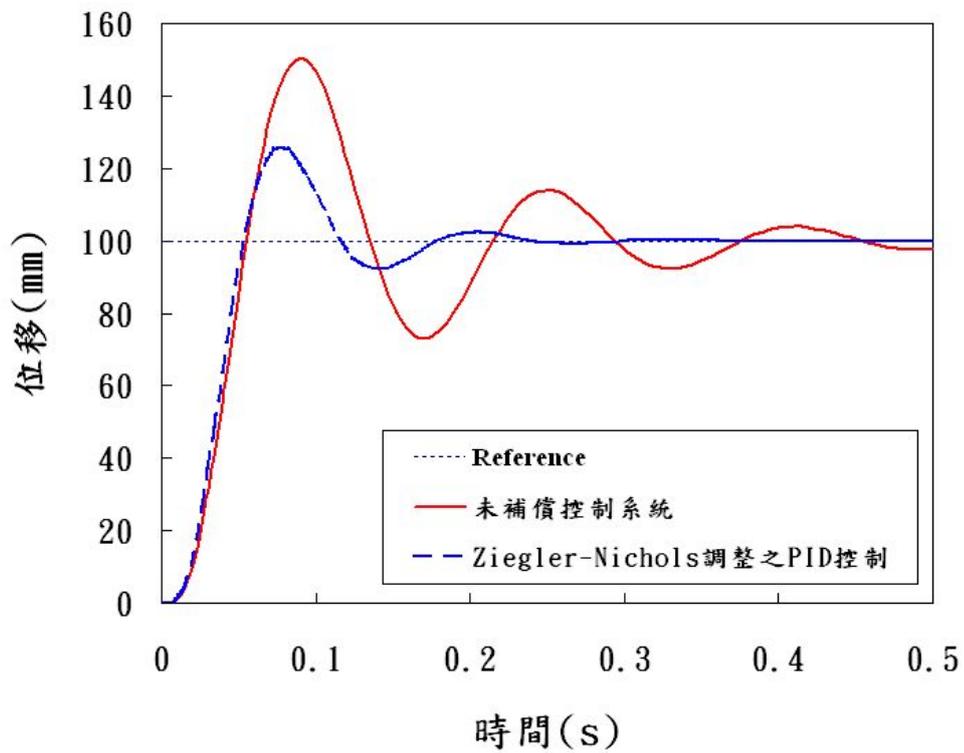


圖9 Ziegler-Nichols調整之PID控制圖

由圖9中，在實線部份所代表之未受補償器控制之系統與虛線所代表的是Ziegler-Nichols調整後之PID控制系統之比較，由表3，經過Ziegler-Nichols調整PID參數後有明顯的正確改變，最大超越量及穩定時間變小，但此系統經調整後的響應並未達到所設定之目標值，因此利用實驗計劃法規劃實驗再次做比較。

表3 控制實驗結果

	$O_s(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{ss}(mm)$
未補償系統	50.2856	0.033	0.3446	0.1771
Ziegler-Nichols 調整之 PID	25.5313	0.0325	0.1535	0.0141

依據Ziegler-Nichols調整PID參數之範圍，將針對其範圍上下調整尋求最佳參數，藉由實驗設計來進行實驗的規劃與分析，三個因子皆為三個水準，並進行全因子實驗，亦即總共進行27次實驗，如表4所列。

表4 實驗計劃法之PID控制

Std \ 參數	P	I	D	O _S (%)	R _T (s)	S _T (s)	E _{SS} (mm)
1	0.5	0.025	0.018	0.0476	0.1201	0.1831	0.0476
2	1	0.025	0.018	6.3912	0.042	0.1025	0.0629
3	1.5	0.025	0.018	24.6086	0.0286	0.1449	0.0606
4	0.5	0.035	0.018	0.1958	0.1191	0.1756	0.1958
5	1	0.035	0.018	6.4283	0.0419	0.1025	0.0246
6	1.5	0.035	0.018	24.6303	0.028	0.1448	0.0456
7	0.5	0.045	0.018	0.3426	0.1201	0.1755	0.3426
8	1	0.045	0.018	6.4654	0.0411	0.1027	0.0124
9	1.5	0.045	0.018	24.652	0.0286	0.1445	0.0274
10	0.5	0.025	0.022	0.0349	0.1433	0.2112	0.0349
11	1	0.025	0.022	0.4622	0.0474	0.0735	0.0519
12	1.5	0.025	0.022	16.8708	0.0273	0.0932	0.0577
13	0.5	0.035	0.022	0.1982	0.143	0.211	0.1982
14	1	0.035	0.022	0.5001	0.0471	0.0732	0.0103
15	1.5	0.035	0.022	16.8923	0.0272	0.0932	0.0379
16	0.5	0.045	0.022	0.3599	0.1435	0.2025	0.3599
17	1	0.045	0.022	0.5379	0.0475	0.0734	0.0319
18	1.5	0.045	0.022	16.9138	0.0269	0.0932	0.0203
19	0.5	0.025	0.026	0.0356	0.162	0.2397	0.0356
20	1	0.025	0.026	0.0417	0.0554	0.0886	0.0419
21	1.5	0.025	0.026	10.1697	0.0304	0.0842	0.0535
22	0.5	0.035	0.026	0.1429	0.1653	0.2331	0.1429
23	1	0.035	0.026	0.004	0.0553	0.0887	0.0038
24	1.5	0.035	0.026	10.1893	0.0304	0.0841	0.0334
25	0.5	0.045	0.026	0.3192	0.1641	0.2338	0.3192
26	1	0.045	0.026	0.0495	0.0554	0.0887	0.0473
27	1.5	0.045	0.026	10.209	0.0304	0.0843	0.0144

5.1.1 ANOVA分析

變異數分析係導自總變量對它的組成份的一個分割，應用統計檢定的方法，來辨識個別因子對製程之影響效果，而非依人為主觀判定。首要目的是評估實驗誤差，必須在因子效應與實驗誤差比較起來足夠大時才認定此因子效應為「有意義的」或是「重要的」；反之，若該因子的重要性不夠大，則只能視為是實驗誤差所造成的「偶發效應」。

本實驗選定之因子為P(比例增益)，I(積分時間)，D(微分時間)，依據表5.4計算出變異數分析表如表5.6~5.9所示，目的為檢驗迴歸方程式 $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+L+\beta_kX_k+\varepsilon$ 中，自變數(X)是否為影響顯著之因子。所對應的適當假設如下：

虛無假設 $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$

對立假設 $H_1: \beta_j \neq 0$ 至少有一個j

針對位置控制統中的最大超越量百分比、上升時間、穩定時間、誤差量做為ANOVA分析依據，如表至表所列。實驗結果的初步模式是以迴歸模型顯著性檢定來進行，利用變異數分析來確認主效應和交互作用效應的顯著程度，排除不重要的因子及檢驗初步模型的合適性，以下便分別探討各因子間對最大超越量百分比、上升時間、穩定時間、誤差量的影響：

1. 最大超越量：

在表5中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = 30.599 > F0.05(9,17)=2.49，和顯示一極小的P值(<0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.01%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D、 P^2 、 D^2 ，和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響最大超越量為顯著的，並將各因子對最大超越量影響貢獻程度，整理成表9。

2. 上升時間：

在表6中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = 71.7489 > F0.05(9,17)=2.49，和顯示一極小的P值(<0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.01%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D、 P^2 、 D^2 ，

和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響上升時間為顯著的，並將各因子對上升時間影響貢獻程度，整理成表10。

3. 穩定時間：

在表7中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = $5.239 > F_{0.05}(9,17) = 2.49$ ，和顯示一極小的P值(0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.219%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，2個主效應P、D，和1個交互作用效應PD的值都小於 α 值(0.05)，表示所選主效應及交互作用效應影響穩定時間為顯著的，並將各因子對穩定時間影響貢獻程度，整理成表11。

4. 誤差量：

在表8中，首先觀察變異數分析來源的“Model F Value”，發現F value = $6.674 > F_{0.05}(9,17) = 2.49$ ，和顯示一極小的P值(0.0001)，即所選的模型是顯著的，且只有小於0.05403%的機率可能跟誤差項相同。藉由P值可以發現，1個交互作用效應PI的值小於 α 值(0.05)，表示所選交互作用效應影響誤差量為顯著的，並將各因子對誤差量影響貢獻程度，整理成表12。依據階層原理(hierarchy principle)[39]，一個高階項(PI)應包含由高階項組成的所有低階項，階層為促進一個模型內部一致的形式，多數統計模型的建構都嚴守階層原理。表中I(積分時間)、D(微分時間)即為低階層，故顯著的變因為I、D及ID。

表5 最大超越量ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	1934.0160	9	214.8907	396.8724	< 0.0001
P	1308.3164	1	1308.3164	2416.2735	< 0.0001
I	0.0783	1	0.0783	0.1446	0.7085
D	217.7151	1	217.7151	402.0888	< 0.0001
P ²	245.1285	1	245.1285	452.7173	< 0.0001
I ²	0.0004	1	0.0004	0.0008	0.9783
D ²	6.9571	1	6.9571	12.8487	0.002284
PI	0.0504	1	0.0504	0.0931	0.7639
PD	155.7692	1	155.7692	287.6835	< 0.0001
ID	0.0006	1	0.0006	0.0010	0.9747
Residual	9.2048	17	0.5415	-	-
Total	1943.2209	26	-	-	-

表6 上升時間ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.0696	9	0.0077	1222.1191	< 0.0001
P	0.0581	1	0.0581	9184.7270	< 0.0001
I	0.0000	1	0.0000	0.0106	0.9191
D	0.0018	1	0.0018	281.9978	< 0.0001
P ²	0.0084	1	0.0084	1322.2582	< 0.0001
I ²	0.0000	1	0.0000	0.0007	0.9787
D ²	0.0000	1	0.0000	0.4076	0.5317
PI	0.0000	1	0.0000	0.0960	0.7604
PD	0.0013	1	0.0013	209.4552	< 0.0001
ID	0.0000	1	0.0000	0.1186	0.7348
Residual	0.0001	17	0.0000	-	-
Total	0.0697	26	-	-	-

表7 穩定時間ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.085418	9	0.009491	176.151446	< 0.0001
P	0.044910	1	0.044910	833.528698	< 0.0001
I	0.000028	1	0.000028	0.512760	0.483700
D	0.000144	1	0.000144	2.671407	0.120500
P ²	0.028672	1	0.028672	532.149317	< 0.0001
I ²	0.000001	1	0.000001	0.017326	0.896800
D ²	0.001181	1	0.001181	21.913214	0.000215
PI	0.000040	1	0.000040	0.741795	0.401100
PD	0.010443	1	0.010443	193.821676	< 0.0001
ID	0.000000	1	0.000000	0.006821	0.935100
Residual	0.000916	17	0.000054	-	-
Total	0.086334	26	-	-	-

表8 誤差量ANOVA分析結果

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.254357849	9	0.028261983	17.64601688	< 0.0001
P	0.097667267	1	0.097667267	60.98079654	< 0.0001
I	0.029508302	1	0.029508302	18.42418474	0.000493
D	0.000903125	1	0.000903125	0.563886791	0.463
P ²	0.039123375	1	0.039123375	24.42757578	0.0001236
I ²	0.001040167	1	0.001040167	0.649451896	0.4314
D ²	0.000165375	1	0.000165375	0.103255671	0.7519
PI	0.085564741	1	0.085564741	53.42430684	< 0.0001
PD	0.000261333	1	0.000261333	0.163169456	0.6913
ID	0.000124163	1	0.000124163	0.077524223	0.784
Residual	0.027227318	17	0.001601607	-	-
Total	0.281585167	26	-	-	-

表9 最大超越量因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	1308.3164	1	1308.3164	2416.2735	1307.7609	67.30
I	0.0783	1	0.0783	0.1446	Pooled	
D	217.7151	1	217.7151	402.0888	217.2706	11.18
P ²	245.1285	1	245.1285	452.7173	244.6840	12.59
I ²	0.0004	1	0.0004	0.0008	Pooled	
D ²	6.9571	1	6.9571	12.8487	6.5126	0.34
PI	0.0504	1	0.0504	0.0931	Pooled	
PD	155.7692	1	155.7692	287.6835	155.3247	7.99
ID	0.0006	1	0.0006	0.0010	Pooled	
Residual	9.2048	17		-		
(Error)	9.3345	21	0.4445	-	11.6680	0.60
Total	1943.2209	26	-	-	1943.2209	100

表10 上升時間因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.05810641	1	0.05810641	9184.727005	0.05810122	83.37
I	0.00000007	1	0.00000007	0.010626	Pooled	
D	0.00178404	1	0.00178404	281.997820	0.00177885	2.55
P ²	0.00836516	1	0.00836516	1322.258223	0.00835997	12.00
I ²	0.00000000	1	0.00000000	0.000732	Pooled	
D ²	0.00000258	1	0.00000258	0.407580	0.00000261	0.00
PI	0.00000061	1	0.00000061	0.096026	Pooled	
PD	0.00132510	1	0.00132510	209.455213	0.00131991	1.89
ID	0.00000075	1	0.00000075	0.118551	Pooled	
Residual	0.00010755	17		-		
(Error)	0.00010898	21	0.00000519	-	0.00012970	0.19
Total	0.06969225	26	-	-	0.06969225	100

表11 穩定時間因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.044910	1	0.044910	833.528698	0.044863148	51.96
I	0.000028	1	0.000028	0.512760	Pooled	
D	0.000144	1	0.000144	2.671407	9.70365E-05	0.11
P ²	0.028672	1	0.028672	532.149317	0.028625001	33.16
I ²	0.000001	1	0.000001	0.017326	Pooled	
D ²	0.001181	1	0.001181	21.913214	0.001133774	1.31
PI	0.000040	1	0.000040	0.741795	Pooled	
PD	0.010443	1	0.010443	193.821676	0.010396103	12.04
ID	0.000000	1	0.000000	0.006821	Pooled	
Residual	0.000916	17		-		
(Error)	0.000985	21	0.000047	-	0.001219	1.41
Total	0.086334	26	-	-	0.086334	100

表12 誤差量因子貢獻度

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	SS'	$\rho\%$
P	0.097667267	1	0.097667267	60.980797	0.09606566	34.12
I	0.029508302	1	0.029508302	18.424185	0.027906695	9.91
D	0.000903125	1	0.000903125	0.563887	0.000698482	0.25
P ²	0.039123375	1	0.039123375	24.427576	0.037521768	13.33
I ²	0.001040167	1	0.001040167	0.649452	0.00056144	0.20
D ²	0.000165375	1	0.000165375	0.103256	0.001436232	0.51
PI	0.085564741	1	0.085564741	53.424307	0.083963134	29.82
PD	0.000261333	1	0.000261333	0.163169	0.001340274	0.48
ID	0.000124163	1	0.000124163	0.077524	0.001477444	0.52
Residual	0.027227318	17	0.001601607	-	0.030614038	10.87
Total	0.281585167	26	-	-	0.281585167	100

5.1.2 建立迴歸方程式

從表4 之實驗結果，利用變異數分析法可決定對製程影響顯著之變因如表5.6~5.9。再依據(式4.8)改寫成矩陣符號來表示，可導出迴歸方程式的係數，進一步利用Matlab®軟體輔助求解迴歸係數 (β) [48]，並建立迴歸方程式：

$$\begin{aligned} O_s = & 22.18794 + 5.54855 \times P - 2029.23 \times D + 25.56709 \times P^2 \\ & + 67300.35 - 1801.44 \times PD \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} R_T = & 0.160157 - 0.29675 \times P + 5.940278 \times D + 0.149356 \times P^2 \\ & + 40.97222 \times D^2 - 5.25417 \times PD \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} S_T = & 0.570652315 - 0.328422222 \times P - 24.53333333 \times D \\ & + .276511111 \times P^2 + 876.736 \times D^2 - 14.75 \times PD \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} E_{ss} = & -0.0881177778 - 0.253563889 \times P + 9.951388889 \times I \\ & + 7.51875 \times D + 0.323 \times P^2 + 131.6666667 \times I^2 - 328.125 \times D^2 \\ & - 16.88833333 \times PI + 2.33333 \times PD + 80.41666667 \times ID \end{aligned} \quad (5.4)$$

同時，為了瞭解實驗值與迴歸方程式得到的預測值兩者間的線性關係如何，可依據模式與各實驗數據之總偏差來決定。以下為最大超越量方程式(5.1)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{1934.016}{1943.2209} = 99.53\% \quad (5.5)$$

此意謂處理最大超越量的總變異中，有99.53%可由輸入資料自變數 x 來解釋。同理，以下為上升時間方程式(5.2)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.0696}{0.0697} = 99.85\% \quad (5.6)$$

即處理上升時間的總變異中，有99.85%可由輸入資料自變數 x 來解釋。以下為穩定時間方程式(5.3)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.085418}{0.086334} = 98.94\% \quad (5.7)$$

即處理穩定時間的總變異中，有98.94%可由輸入資料自變數 x 來解釋。以下為誤差量方程式(5.4)的變異量，佔總變異數模型所解釋掉的比例：

$$R^2 = \frac{SS_{Model}}{SS_{Total}} = \frac{0.254357849}{0.281585167} = 90.33\% \quad (5.8)$$

即處理誤差量的總變異中，有90.33%可由輸入資料自變數 x 來解釋。

5.1.3 殘差分析

殘差分析可用來探討建構出的迴歸方程式之適當性，殘差定義為實驗值與預測值之間的差異，其中預測值為將表5各組實驗之參數帶入(式5.1~式5.4)中所求得，表13至表16為各控制響應輸出的殘差結果，假如建構出的迴歸模型是適切地，則殘差圖是無結構的(structureless)，亦即圖形是沒有任何明顯的形狀或趨勢。本研究藉由Minitab[®]統計分析軟體[49]，在95%的信心水準內(α 值為0.05)對殘差進行常態檢定，假設如下：

(虛無假設) H_0 ：殘差為常態分配

(對立假設) H_1 ：殘差不為常態分配

圖10至圖13分別為最大超越量、上升時間、穩定時間、誤差量殘差的常態機率圖(Normal Probability Plot)，圖中，X軸為殘差值，Y軸為常態機率；圖的左下角可以得知此筆數據資料的平均值、標準差與樣本數，若殘差為常態分配，則圖形應呈現出一條直線趨向。由圖得知，P值都大過於顯著水準0.05，無足夠證據拒絕虛無假設(H_0)，故所建構迴歸方程式為適當的。

表13 最大超越量殘差值結果

O _s (%)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.0476	0.4202	-0.3726
2	6.3912	6.1568	0.2344
3	24.6086	24.6770	-0.0684
4	0.1958	0.4202	-0.2244
5	6.4283	6.1568	0.2715
6	24.6303	24.6770	-0.0467
7	0.3426	0.4202	-0.0776
8	6.4654	6.1568	0.3086
9	24.6520	24.6770	-0.0250
10	0.0349	-0.5316	0.5665
11	0.4622	1.6022	-1.1400
12	16.8708	16.5194	0.3514
13	0.1982	-0.5316	0.7298
14	0.5001	1.6022	-1.1021
15	16.8923	16.5194	0.3729
16	0.3599	-0.5316	0.8915
17	0.5379	1.6022	-1.0643
18	16.9138	16.5194	0.3944
19	0.0356	0.6703	-0.6347
20	0.0417	-0.7989	0.8406
21	10.1697	10.5155	-0.3458
22	0.1429	0.6703	-0.5274
23	0.0040	-0.7989	0.8029
24	10.1893	10.5155	-0.3262
25	0.3192	0.6703	-0.3511
26	0.0495	-0.7989	0.8484
27	10.2090	10.5155	-0.3065

表14 上升時間殘差值結果

R _T (s)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.1201	0.1220	-0.0019
2	0.0420	0.0384	0.0036
3	0.0286	0.0294	-0.0008
4	0.1191	0.1220	-0.0029
5	0.0419	0.0384	0.0035
6	0.0280	0.0294	-0.0014
7	0.1201	0.1220	-0.0019
8	0.0411	0.0384	0.0027
9	0.0286	0.0294	-0.0008
10	0.1433	0.1418	0.0015
11	0.0474	0.0477	-0.0003
12	0.0273	0.0282	-0.0009
13	0.1430	0.1418	0.0012
14	0.0471	0.0477	-0.0006
15	0.0272	0.0282	-0.0010
16	0.1435	0.1418	0.0017
17	0.0475	0.0477	-0.0002
18	0.0269	0.0282	-0.0013
19	0.1620	0.1630	-0.0010
20	0.0554	0.0583	-0.0029
21	0.0304	0.0283	0.0021
22	0.1653	0.1630	0.0023
23	0.0553	0.0583	-0.0030
24	0.0304	0.0283	0.0021
25	0.1641	0.1630	0.0011
26	0.0554	0.0583	-0.0029
27	0.0304	0.0283	0.0021

表15 穩定時間殘差值結果

$S_T(s)$			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.1831	0.1853	-0.0022
2	0.1025	0.0957	0.0068
3	0.1449	0.1444	0.0005
4	0.1756	0.1853	-0.0097
5	0.1025	0.0957	0.0068
6	0.1448	0.1444	0.0004
7	0.1755	0.1853	-0.0098
8	0.1027	0.0957	0.0070
9	0.1445	0.1444	0.0001
10	0.2112	0.1979	0.0133
11	0.0735	0.0788	-0.0053
12	0.0932	0.0980	-0.0048
13	0.2110	0.1979	0.0131
14	0.0732	0.0788	-0.0056
15	0.0932	0.0980	-0.0048
16	0.2025	0.1979	0.0046
17	0.0734	0.0788	-0.0054
18	0.0932	0.0980	-0.0048
19	0.2397	0.2386	0.0011
20	0.0886	0.0900	-0.0014
21	0.0842	0.0797	0.0045
22	0.2331	0.2386	-0.0055
23	0.0887	0.0900	-0.0013
24	0.0841	0.0797	0.0044
25	0.2338	0.2386	-0.0048
26	0.0887	0.0900	-0.0013
27	0.0843	0.0797	0.0046

表16 誤差量殘差值結果

Ess(mm)			
Standard Order	Actual Value	Predicted Value	Residual
1	0.0103	0.0043	0.0060
2	0.0380	0.0297	0.0083
3	0.0478	0.0551	-0.0073
4	0.0212	0.0232	-0.0020
5	0.0182	0.0269	-0.0087
6	0.0339	0.0305	0.0034
7	0.0519	0.0422	0.0098
8	0.0016	0.0241	-0.0225
9	0.0209	0.0060	0.0149
10	0.0003	0.0065	-0.0062
11	0.0309	0.0259	0.0050
12	0.0442	0.0453	-0.0011
13	0.0327	0.0296	0.0031
14	0.0103	0.0273	-0.0170
15	0.0299	0.0249	0.0050
16	0.0659	0.0527	0.0132
17	0.0108	0.0286	-0.0178
18	0.0164	0.0045	0.0119
19	0.0083	0.0087	-0.0004
20	0.0266	0.0221	0.0045
21	0.0401	0.0356	0.0045
22	0.0423	0.0359	0.0064
23	0.0047	0.0276	-0.0229
24	0.0253	0.0193	0.0060
25	0.0769	0.0632	0.0137
26	0.0170	0.0332	-0.0162
27	0.0095	0.0031	0.0064

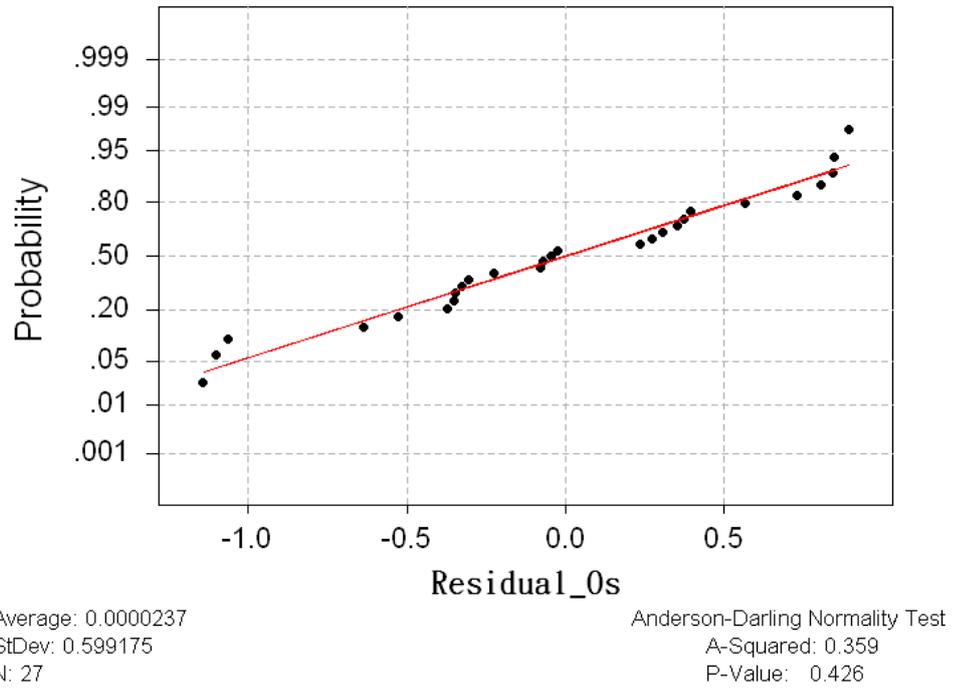


圖10 最大超越量殘差的常態機率圖

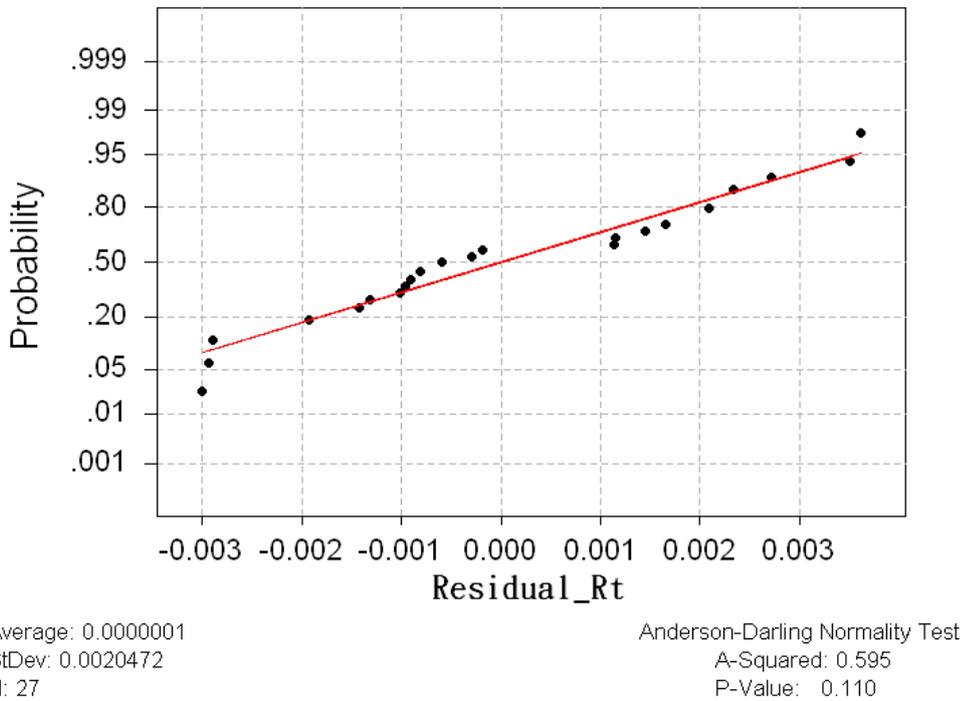


圖11 上升時間殘差的常態機率圖

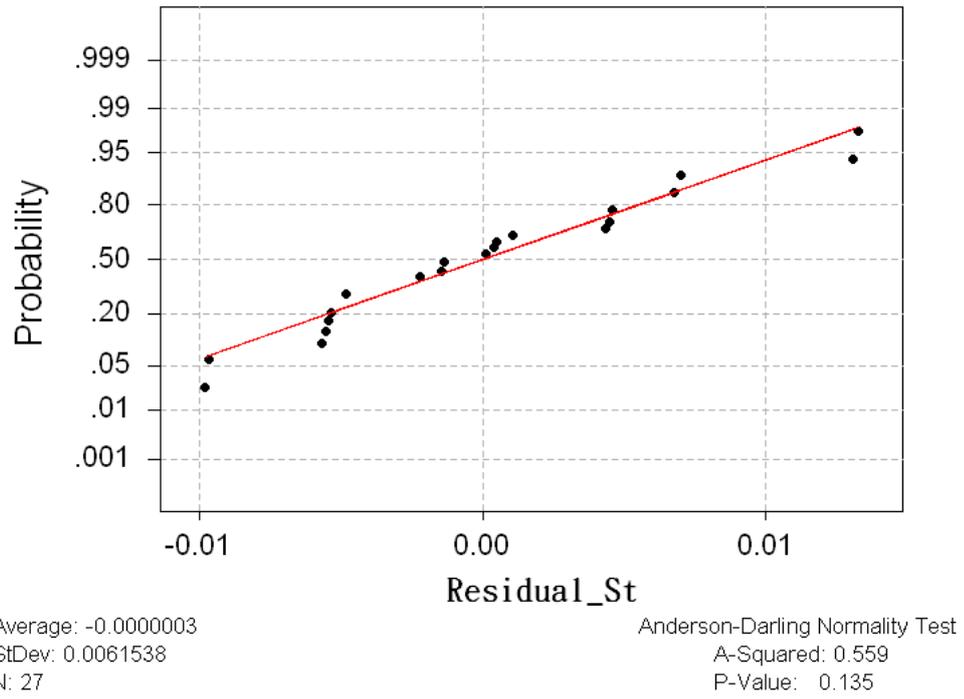


圖12 穩定時間殘差的常態機率圖

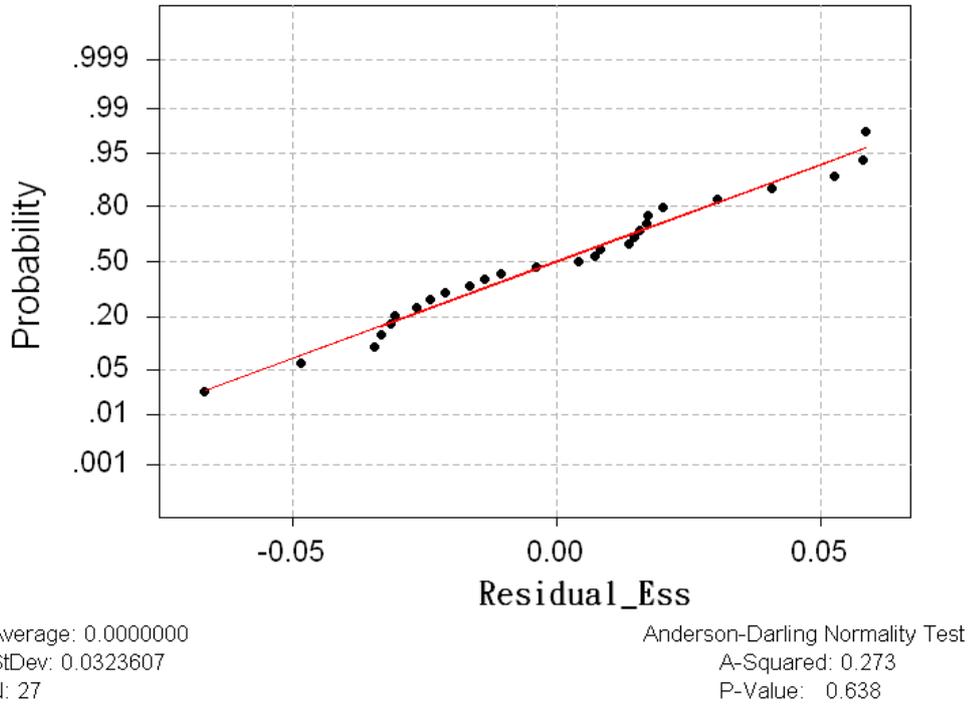


圖13 誤差量殘差的常態機率圖

5.1.4 PID最佳參數組合

在ANOVA分析確認出影響控制響應較顯著的參數後，經由Design-Expert[®]統計分析軟體適配出最佳參數，並計算出個別期望函數，如表17所列。把PID最佳參數帶回Matlab[®]軟體可以得到控制響應實際值，經由比對可以發現，個別的期望函數值與實際值的差異不大，可證明係以實驗計劃法之設計之準確度高。圖14為PID最佳參數與Ziegler-Nichols調整之PID參數之比較，由圖所示，實驗計劃法設計之控制響應有效的提升響應效率。

表17 PID控制最佳參數組合與驗證

P	I	D	O _s (%)	R _T (ms)	S _T (ms)	E _{SS} (mm)
0.97	0.035	0.022	0.5519	0.0509	0.0768	0.0276
實際值			0.1028	0.0474	0.0735	0.0162

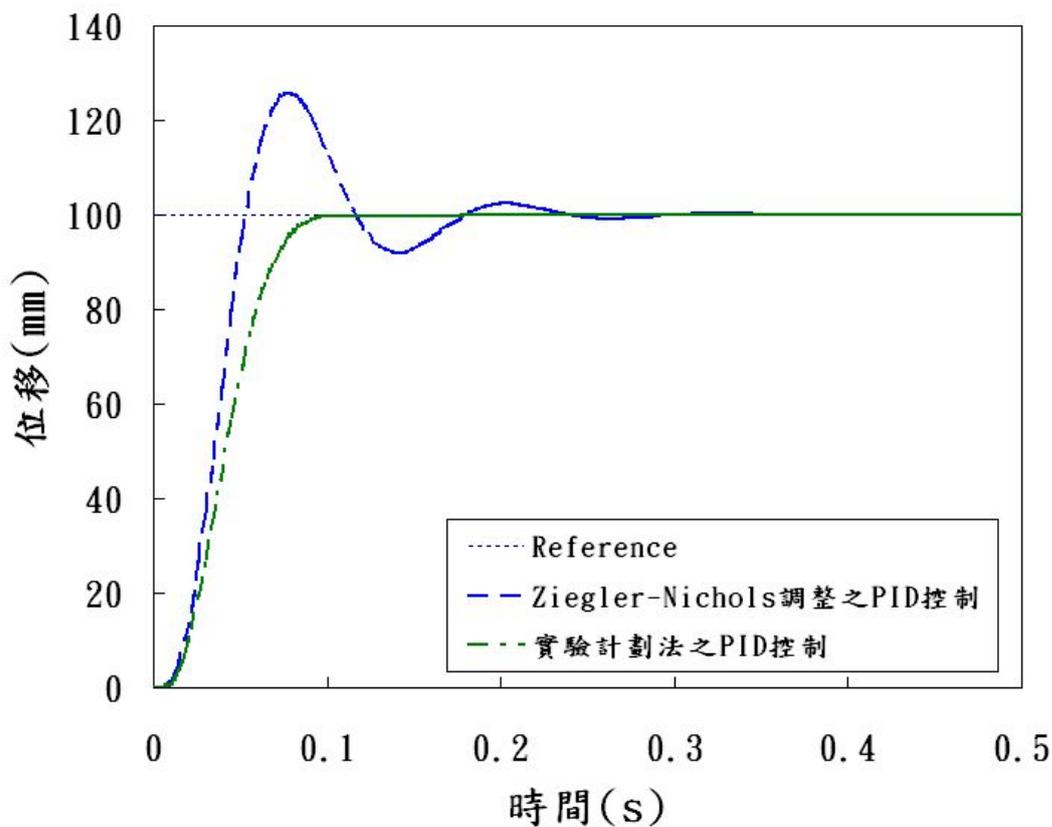


圖14 PID最佳參數與Ziegler-Nichols調整之控制圖

5.2 模糊控制實驗結果

本研究利用相較於PD模糊控制器的精確度，和PI模糊控制器較佳的穩態響應，設計一PD-PI混合模糊控制實驗，此類型之控制器保有PID模糊控制器的特點，在ANOVA分析中，可以找到影響各輸出響應的貢獻度，依照表5.10~表5.13，來規劃模糊規則，如圖15所示，(a)為比例增益歸屬函數圖、(b)積分時間與微分時間歸屬函數圖、(c)輸出之歸屬函數圖。

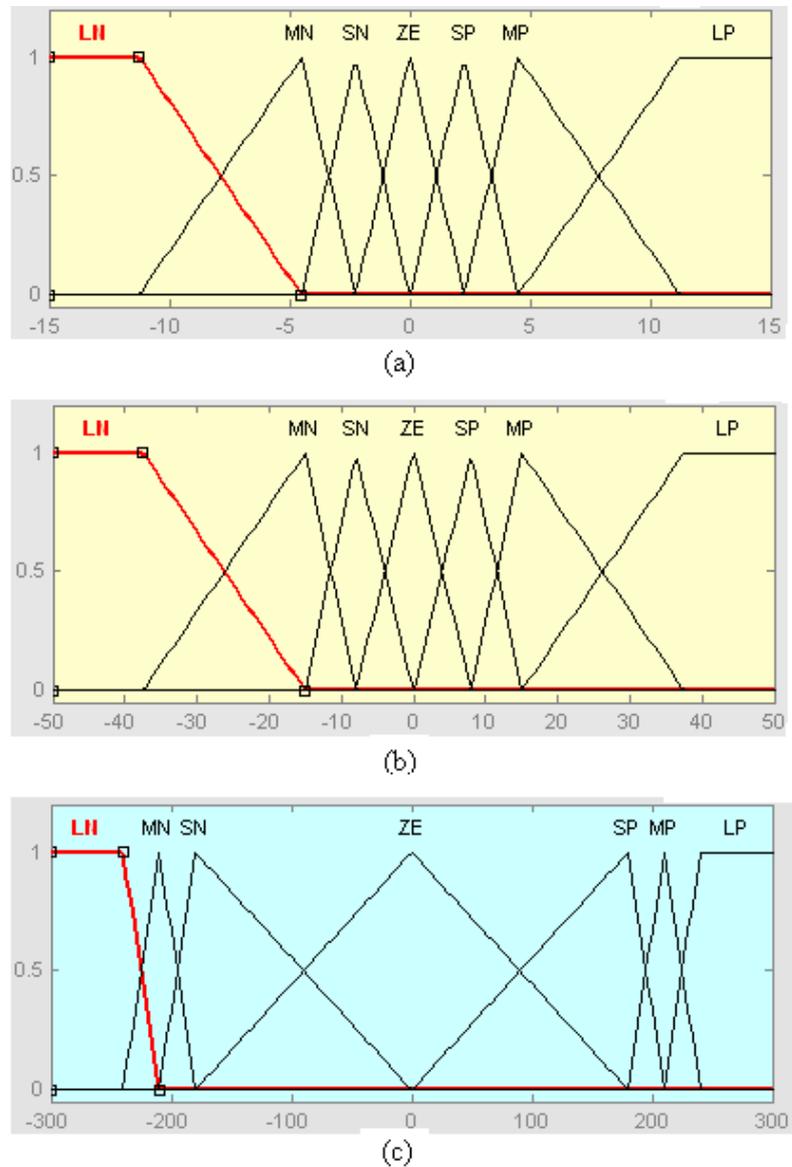


圖15 控制規則推論部歸屬函數圖

5.2.1 模糊控制實驗設計

根據實驗計劃法之設計，將PD-PI模糊控制設計27次實驗，如表18所列，由表比照表5可發現，在模糊控制下有較好的控制性能。

表18 實驗計劃法之PD-PI模糊控制

參數 Std	P	I	D	O _S (%)	R _T (s)	S _T (s)	E _{SS} (mm)
1	2.4	25	0.26	0.463	0.0504	0.0772	0.04637
2	2.6	25	0.26	2.1901	0.0451	0.0689	0.04258
3	2.8	25	0.26	5.1006	0.0421	0.0964	0.03957
4	2.4	30	0.26	0.4629	0.0505	0.0777	0.04629
5	2.6	30	0.26	2.1707	0.045	0.0691	0.0126
6	2.8	30	0.26	5.0756	0.0424	0.0968	0.03939
7	2.4	35	0.26	0.4636	0.0505	0.0765	0.04636
8	2.6	35	0.26	2.154	0.0448	0.0691	0.04245
9	2.8	35	0.26	5.0689	0.0424	0.0974	0.03963
10	2.4	25	0.28	0.4686	0.0522	0.0833	0.04686
11	2.6	25	0.28	0.4845	0.0461	0.0716	0.04271
12	2.8	25	0.28	3.418	0.0433	0.0666	0.03948
13	2.4	30	0.28	0.4639	0.0519	0.0815	0.0464
14	2.6	30	0.28	0.5225	0.0461	0.0713	0.01266
15	2.8	30	0.28	3.4124	0.0434	0.0665	0.03952
16	2.4	35	0.28	0.4639	0.0519	0.0815	0.0464
17	2.6	35	0.28	0.4725	0.0462	0.0715	0.04269
18	2.8	35	0.28	3.407	0.0433	0.655	0.01963
19	2.4	25	0.3	0.473	0.0543	0.0889	0.0473
20	2.6	25	0.3	0.4283	0.047	0.0738	0.04283
21	2.8	25	0.3	2.0348	0.0441	0.0681	0.03958
22	2.4	30	0.3	0.4719	0.0547	0.0895	0.04719
23	2.6	30	0.3	0.4288	0.0476	0.0737	0.0091
24	2.8	30	0.3	1.9985	0.044	0.0678	0.03959
25	2.4	35	0.3	0.4761	0.0546	0.0912	0.04761
26	2.6	35	0.3	0.4291	0.0473	0.0739	0.04292
27	2.8	35	0.3	2.0186	0.044	0.0678	0.01955

5.2.2 PD-PI模糊控制最佳參數

在ANOVA分析確認出影響控制響應較顯著的參數後，經由Design-Expert[®]統計分析軟體適配出最佳參數，如表19所列。把PD-PI模糊控制器最佳參數帶回Matlab[®]軟體可以得到控制響應實際值，經由比對可以發現，個別的期望函數值與實際值的差異不大，可證明係以實驗計劃法之設計之準確度高。圖16為PD-PI模糊控制最佳參數之響應。

表19 PD-PI模糊控制最佳參數組合與驗證

P	I	D	OS(%)	RT (s)	ST(s)	ESS(mm)
2.697	31.66	0.3	0.9271	0.0455	0.0990	0.0234
	實際值		0.4236	0.0452	0.0703	0.0092

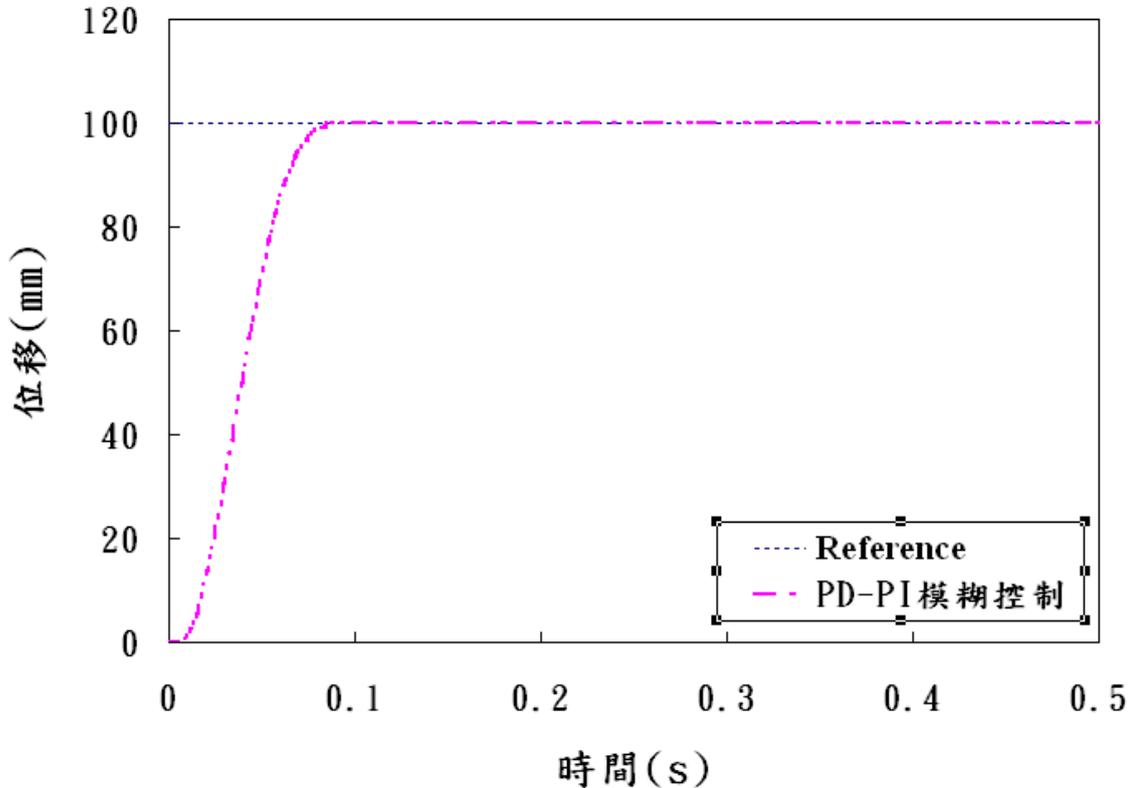


圖16 PD-PI模糊控制最佳參數之控制圖

5.3 類神經網路控制實驗結果

利用位移作回授，定位位置為100mm，以所得到之誤差值輸入給控制器，控制器會輸出一個控制量給伺服閥，而伺服閥會利用開口來控制液壓缸的出力大小及方向。然後將利用類神經網路控制器模擬，並分析其響應，如表20所示。圖17為類神經網路控制之響應圖。

表20 類神經網路控制性能指標

	$O_s(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{SS}(mm)$
類神經控制器	0.0059	0.0282	0.0461	0.006

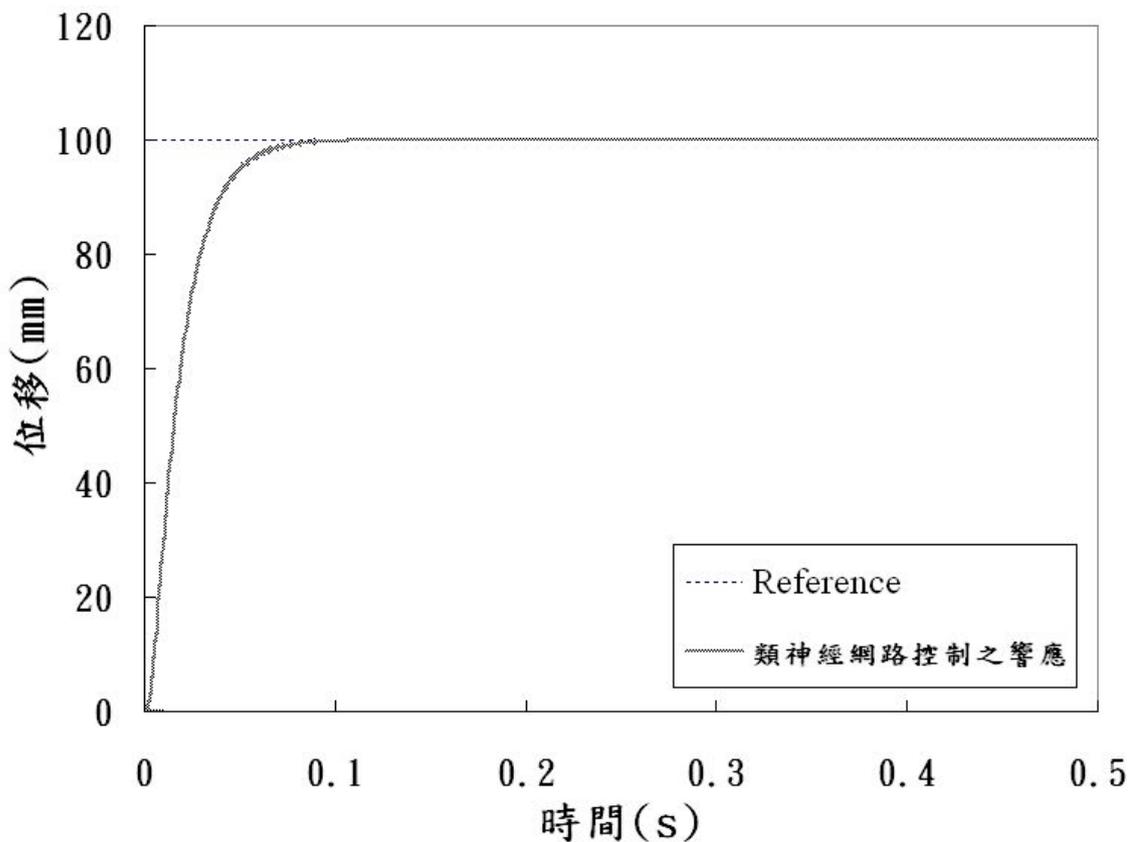


圖17 類神經網路控制之響應圖

5.4 最佳化參數組合結果比較

由表21排列出各種控制器之最佳響應性能，其未補償系統為最大超越量(50.2856%)、上升時間(0.33s)、穩定時間(0.3446s)、穩態誤差(0.1771mm)；Ziegler-Nichols調整之PID為最大超越量(25.5313%)、上升時間(0.0325s)、穩定時間(0.1535s)、穩態誤差(0.0141mm)；實驗計劃法之PID控制為最大超越量(0.1025%)、上升時間(0.0474s)、穩定時間(0.0735s)、穩態誤差(0.0162mm)；PD-PI模糊控制為最大超越量(0.4236%)、上升時間(0.0452s)、穩定時間(0.0703s)、穩態誤差(0.0092mm)；類神經網路控制為最大超越量(0.0059%)、上升時間(0.0282s)、穩定時間(0.0461s)、穩態誤差(0.006mm)；結果發現實驗計劃法的規劃下，可以有好的控制性能，而類神經網路具有較佳的響應曲線。圖18為綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖。

表21 綜合控制實驗最佳結果之比較

控制形式	$O_S(\%)$	$R_T(s)$	$S_T(s)$	$E_{SS}(mm)$
未補償系統	50.2856	0.033	0.3446	0.1771
Ziegler-Nichols 調整之 PID	25.5313	0.0325	0.1535	0.0141
實驗計劃法之 PID 控制	0.1028	0.0474	0.0735	0.0162
PD-PI 模糊控制	0.4236	0.0452	0.0703	0.0092
類神經網路控制	0.0059	0.0282	0.0461	0.006

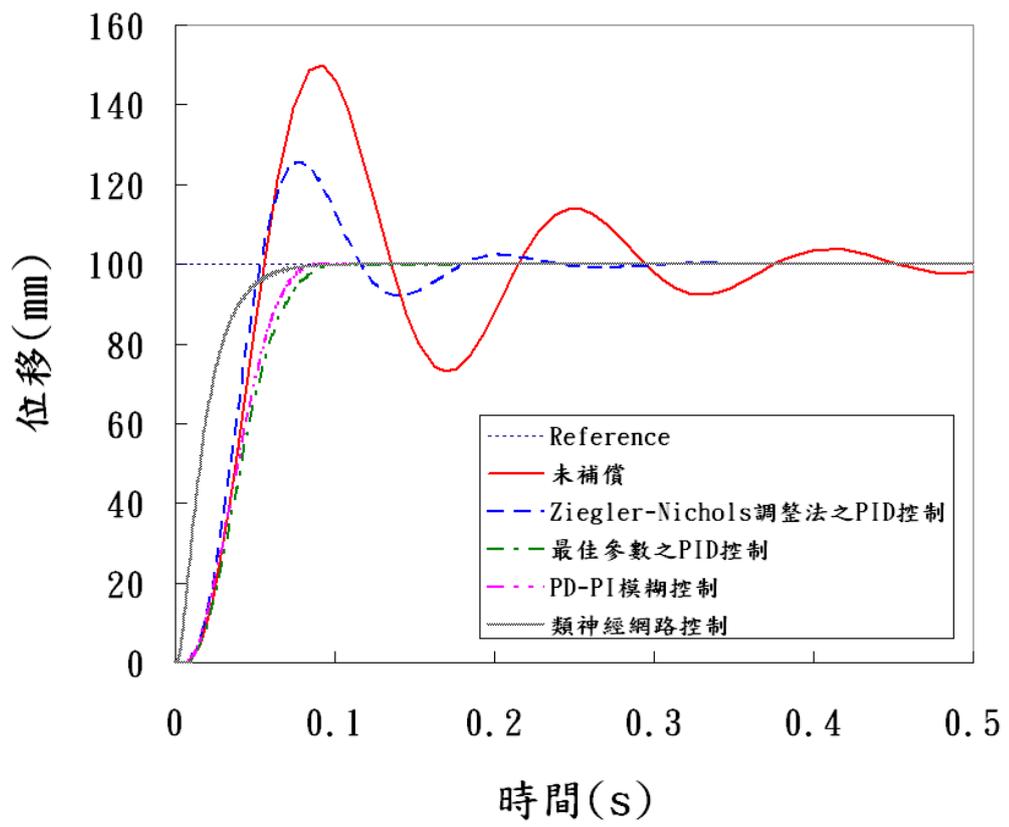


圖18 綜合控制實驗最佳響應結果之比較圖

第六章 結論

本文利用MATLAB/Simulink軟體來建構控制系統程式並進行動態模擬，並藉由實驗計劃法之統計方法、變異數分析與迴歸分析技術，研討控制器參數對系統行為之影響程度，同時可以獲得最佳控制器參數組合，藉此進行定位及追蹤控制性能的改善，並推算控制器參數與系統行為的數學模式。

在實驗的過程中，分別發展三種控制器：(1) PID 控制器，(2) PD-PI 模糊控制器，(3) 類神經網路控制器，以控制伺服系統，其實驗結果已敘述於前面的章節裡。在此，將智慧型伺服系統的研製及其在量測與控制上之實驗結果作一個總結。

1. 本研究目的在設計最理想的控制參數條件，透過實驗計劃法有效減少時間及成本，並提供效率高且有系統性的統計分析方法，來決定最佳參數條件。並透過變異數分析結果，可以明顯地看出影響行為較大的因子，日後在設計上，將會便利許多。
2. 實驗的結果證實了以實驗計劃法所得到的參數為最佳參數，可以使系統行為達到完美。建構之迴歸模型後，給予模型適當性檢驗是非常重要的，亦即迴歸模型之正確性，對於系統輸出也有很大的幫助。最後，本研究致力於智慧型控制器之設計，結果發現模糊PID控制器與類神經網路控制器具有比PID控制器更好的性能。

誌謝：本專題感謝明新科技大學提供經費，同時欣橋機械股份有限公司以產學合作的方式配合補助部分經費，使本研究得以順利完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 魏榮輝、洪至謙“電液伺服閥之動態模擬分析”機械月刊第 32 卷 11 期 pp.30-38，2006。
2. 魏榮輝、洪至謙“射出成型機伺服射膠控制系統之研究”先進工程學刊第 1 卷 2 期 pp.89-94，2006。
3. J.G. Ziegler, and N.B. Nichols, “Optimum Setting for Automatic Controllers,” Transactions on ASME, Vol. 64, 1942, pp. 759-768.
4. 李輝煌，田口方法—品質設計的原理與實務，高立圖書有限公司，台北、台灣，第 44-68 頁，2005。
5. G. Taguchi, “Introduction to Quality Engineering,” Asian Productivity Organization, (1990)。
6. 許朝勝，“長行程單桿液壓缸於垂直負荷之位置伺服控制研究”，成功大學機械所碩士論文，1999。
7. 葉國安，“使用比例閥與伺服閥在液壓伺服定位控制上之比較”，中原大學機械所碩士論文，1995。
8. J. S. Yun and H. S. Cho, “Adaptive Model Follow Control of Electrohydraulic Velocity Control System Subject to Unknown Disturbance”, IEE Proceeding Control Theory and Application, Vol.135, No.2, pp.149-156, 1988.
9. J. S. Yun and H. S. Cho, “Application of an Adaptive Model Follow Control Technique to a Hydraulic Servo System Subject to Unknown Disturbance”, Trans.ASME. J. of Dyn. Syst. Meas.Control, Vol.113 pp.479-486, 1991
10. 許毅然，“伺服油壓制動器位置適應控制研究”，成功大學機械所碩士論文，1988。
11. 陳秉州，“智慧型多功能組合式伺服控制平台之研製”，國立台北科技大學 車輛工程系碩士論文，2005。
12. Hassan Bevrani, Takashi Hiyama, Yasunori mitani, and Kiichiro Tsuji, “Automatic generation control:A decentralized robust approach” Intelligent Automation and Soft Computing(SCI), Vol. 13, No. 3, 2007, pp.273-287.
13. Chih-Keng Chen, and James Hwang, “PD-Type Iterative Learning Control for the Trajectory Tracking of a Pneumatic X-Y Table with Disturbances” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 2, 2006, pp.520-526.
14. L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Information and. Control, vol.8, pp. 338-353,(1965).
15. Procky, T. J.and E. H. Mamdani, “Alinguistic Self-Organizing Process Controller”, Automatica, Vol.5, pp.15-30,(1979).
16. Shao, Shihuang, “Fuzzy self-organizing controller and uts application for dynamic processes”, Fuzzy Sets and System 26, pp.151-164,(1988).
17. Zhang, B. S. and Edmunds ,J. M. “Self-Organizing Fuzzy Logic Controller”, IEE

18. W. Thomas Miller, Richard S. Sutton and Paul J. Werbos “Neural Networks for Control” CIP, (1990).
19. S. R. Lee and K. Srinivasan, “Self-Tuning Control Application to Closed-Loop Servohydraulic Material Testing”, Trans.ASME. J. of Dyn. Syst. Meas. Control, Vol.112 pp.681-689, (1990).
20. Sung-Woo Kim, Ju-Jang Lee, “ Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface ”, Fuzzy Sets & Systems, vol.71, no.3, 12 May 1995,pp.359-67. Netherlands.
21. Tzafestas SG, Rigatos GG, “A simple robust sliding-mode fuzzy-logic controller of the diagonal type”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol.26, no.3-4, Nov.-Dec. pp.353-88, Netherlands,(1999).
22. Jiun-Fei Shiu and Chin-Min Lin, “ Decoupled Fuzzy Controller Designed with Fuzzy Sliding Surface”, 2000 Automatic control Conference, pp.463-468.
23. Ranjit Kumar Barai, and Kenzo Nonami, “Optimal two-degree-of-freedom fuzzy control for locomotion control of a hydraulically actuated hexapod robot.”. Information Sciences, Vol. 177, 2007, pp. 1892-1915.
24. Satoru Shibata, Tomonori Yamamoto, and Mitsuru Jindai, “A Synchronous Mutual Position Control for Vertical PneumaticServo System” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 1, 2006, pp. 197-204.
25. Shih-Jer Huang, and Hung-Yi Chen, “Functional Based Adaptive and Fuzzy Sliding Controller for Non-Autonomous Active Suspension System” JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 4, 2006, pp. 1027-1032.
26. W. S. McCulloch and W. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,” Bulletin of Mathematical Biophysics, pp. 115-133, 1943.
27. 林盈宏, 以線上學習之模糊類神經網路發展新的 MRAS 控制器設計法, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1996.
28. 吳毅剛, 以倒傳遞法設計模糊類神經網路 PID 控制器, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1996.
29. 林坤志, 實現於 MRAS 的 PI 型模糊類神經網路, 中原大學電機工程研究所碩士論文, 1997.
30. P. J. Werbos, “Backpropagation : Past and future,” IEEEInternational conference on neural networks, vol. 1, pp.343-353, July. 1998.
31. Satoru Shibata, Mitsuru Jindai, Tomonori Yamamot, and Akira Shimizu, “A Disturbance Estimation Type Control for Pneumatic Servo System Using NeuralNetwork”JSME International Journal Series C, Vol. 49, No. 1, 2006, pp. 189-196.
32. 王占林, 液壓伺服控制, 北京航空學院出版社, 2002。

33. G. Derringer and R. Suich, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, No. 4, 1980, pp. 214–219.
34. Y. K. Yang, "Optimization of a Photo Resist Coating Process for Photolithography in Wafer manufacturing via Design of Experiments Method", *Microelectronics International*, Vol. 23, 2006, pp. 26–32.
35. 葉怡成，實驗計劃法-製程與設備最佳化，五南圖書股份有限公司，2001。

符號彙編

符號	註解
A_P	油壓缸活塞端有效面積(cm^2)
A_R	油壓缸桿端有效面積(cm^2)
B_C	油壓缸黏性阻尼係數($\text{kg}_f\text{-s}/\text{cm}$)
C_l	油壓缸洩漏係數($\text{cm}^5/\text{kg}_f\text{-s}$)
E	液壓油容積彈性係數(kg_f/cm^2)
F	受力體結構所承受油壓缸的出力(kg_f)
F_f	油壓缸來自受力體結構的抵抗力(kg_f)
K_A	伺服放大器增益(mA/v)
K_S	伺服閥流量增益[(cm^3/s)/ mA]
K_C	致動器增益($1/\text{cm}^2$)
K_F	回授檢出器增益(v/cm)
K_O	伺服閥線軸無負荷流量增益($\text{cm}^3/\text{s-v}$)
K_V	伺服閥無負荷流量增益($\text{cm}^3/\text{s-v}$)
K_P	伺服閥的油洩漏係數[(cm^3/s)/(kg_f/cm^2)]
M_C	油壓缸活塞的質量($\text{kg}_f\text{-s}/\text{cm}$)
M_O	系統超越量(%)
P_S	油壓系統供應壓力(kg_f/cm^2)
P_L	油壓缸負荷壓力(kg_f/cm^2)
Q_L	油壓缸負荷流量(cm^3/s)
Q_{L_f}	油壓缸負荷壓力差所引起輸出流量的減少量(cm^3/s)
Q_N	伺服閥無負荷流量(cm^3/s)
T_V	伺服閥時間常數($1/\text{s}$)
T_r	系統的上升時間(s)
T_S	系統的穩定時間(s)
V	伺服閥控制油路和油壓缸控制端的油液容積(cm^3)
V_f	位置回授信號(v)
V_i	輸入信號(v)
X_V	伺服閥線軸位移量(cm)
Y	輸出位移(cm)
B	液壓油的壓縮率(cm^3/kg_f)
L	油壓缸的油洩漏係數[(cm^3/s)/(kg_f/cm^2)]
W	滑軸肩部圓周長(cm)
i	輸入電流信號

P	液壓油的密度
X_v	伺服閥位移量
X_t	活塞位移
E	等效容積彈性模數
C_{ip}	內漏係數
F_f	外干擾力
G_l	伺服閥位移

附錄一 工作進度表

工作項目	月次									備註
	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	
1. 整體規劃、蒐集資料	***	***								
2. 電氣—液壓伺服系統		***	***							
3. 控制器設計			***	***	***					
4. 規畫直交實驗表					***					
5. 分析與討論					***	***	***			
6. 驗證重要因子							***	***		
7. 資料整理、報告撰寫								***	***	
預定進度累計百分比	10%	20%	32%	45%	58%	68%	80%	90%	100%	