

田口法應用於永磁同步馬達之控制器設計

林滋偉* 王寶鋒** 張永華*** 陳功****

* 國防大學中正理工學院國防科學研究所

** 陸軍總部計畫署

*** 長庚大學電機系

**** 國防大學中正理工學院電機系

摘 要

本文旨在探討永磁同步馬達之電流及速度控制器設計，為了避免受控實體因執行長時間的參數調整導致損耗，將以傳統 PI 控制器設計為基礎，並運用田口式實驗法則調整控制器參數，得以有效地簡化參數調整步驟。本文中，PI 控制器參數為控制因子，不同的負載條件為雜訊因子，加權之最大超越量及穩態誤差為選定之品質函數；依據 S/N 比之回應分析，可得知 PI 控制器的最佳參數組合。實驗結果亦說明在不同負載環境下，本文所得之 PI 控制器確實能提供較佳的控制性能。

關鍵字：永磁同步馬達、向量控制、田口法

Controller Design of PM Motor with Taguchi Method

Hung-Wei Lin*, Pao-Feng Wang**, Yeong-Hwa Chang***, and Gong Chen****

* *School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

** *Planning Service, The General Headquarter of Army, R.O.C.*

*** *Department of Electrical Engineering, Chang Gung University*

**** *Department of Electrical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

ABSTRACT

This paper mainly investigates the controller design of a permanent magnet synchronous motor. In order to avoid the wastage caused by a long-term parameter tuning, based on traditional PI design procedures, the parameter design skill of Taguchi method is used to simplify the tuning procedure. In this paper, controller parameters and load torque are considered as the control factor and noise factor, respectively. Weighted maximum overshoot and steady state error is the chosen performance index. Following the analysis of S/N ratio, a set of optimal PI controllers can be obtained. Experimental results indicate that the derived PI controllers indeed provide better performances than the nominal PI does.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, vector control, Taguchi method

一、前言

在自動化工業的應用上，往往需要馬達來帶動不同結構形式的機械負載。其中，直流馬達因具備可靠的控制性能，且驅動器裝置便宜，最常被工業界使用；然而，構造複雜、效率較低，及碳刷、整流子、換向片容易磨損等為直流馬達的缺點[1-3]。反之，交流馬達具有轉子轉動慣量小、啟動性能好、散熱效果佳、控速範圍大及維護容易等優點。隨著功率半導體元件、微處理機及控制技術等快速發展，使得複雜的控制法則得以實現，進而改善交流馬達控制不易困難的缺點；近年來，交流馬達已漸漸取代直流馬達，成為工業應用之主流。

交流馬達數學模式為一高階、非線性系統，1970年代德國西門子公司工程師 Hasse 與 Blaschke 發展出向量控制理論 (vector control)，又稱磁場導向控制 (field oriented control) [4-12]，利用座標轉換的原理使交流馬達能在等效於直流馬達的模式下進行控制，再運用電力電子技術使其恢復成交流輸出，使交流馬達運轉進而控制轉速。

交流馬達主要包含同步馬達及感應馬達兩大類；其中，永磁同步馬達以磁性材料為轉子，轉動慣量較感應馬達來得小，所以在相同的負載轉矩下其響應速度較快。又因為永磁同步馬達不需要轉子激磁電流，具有較高的效率，且沒有溫升問題；故在相同的輸出功率下，永磁同步馬達只需要較小容量的變頻器即可。基於上述的優點，永磁同步馬達已被廣泛地使用在高性能的伺服驅動系統上。

控制器設計的方法固然有許多，其中，比例積分 (PI) 控制器在實際應用仍扮演舉足輕重的角色。本文主要目的即是探討永磁同步馬達系統的速度與電流控制器參數調整之技術，

為避免多次試誤過程對受控體的耗損，特別應用田口式實驗計畫法[13-18]，藉由對系統特性的瞭解，先行決定 PI 控制器參數範圍與影響實驗系統之雜訊因子，經由參數設計實驗，針對所選擇的控制因子和雜訊因子配置合適之直交表進行實驗，最後依實驗所得之實驗觀測值計算出信號雜訊比 (signal to noise ratio, S/N ratio)，透過 S/N 比、回應表 (variance table) 及回應圖 (variance chart) 分析，進而決定最佳 PI 控制器參數，以改善系統整體之控速性能，滿足伺服驅動系統性能規格。

二、向量控制永磁同步馬達

近年來由於磁性材料、半導體功率元件和控制理論的進步發展，已使得低、中功率範圍內的永磁同步馬達在工業控制應用上，扮演一個相當重要的角色。永磁同步馬達具有結構堅固、體積小、高氣隙磁通密度、高功率、高轉矩慣量比及高的轉矩容量等特點，相較於感應馬達，更由於沒有轉子損失和低於額定轉速的無載電流以及解耦控制的性能，故較不受馬達參數變動影響，致使永磁同步馬達具有較高效率的優點。

2.1 永磁同步馬達之向量控制數學模型

向量控制法已被廣泛運用於許多交流電動機的控制上，以提高傳統閉迴路之控制精度，其推導步驟是先確定永磁同步馬達之電路方程式，再經座標轉換並推導出轉矩方程式，最後加上非干涉控制，如此就是一般所謂的向量控制[1]。

旋轉座標系下的永磁同步馬達狀態方程式，可以重新整理其狀態變數如下[1, 3]：

$$p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_{re} \\ -\omega_{re} & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由(1)式可觀察出在 $(d-q)$ 軸電樞電流 $(i_{ds}、i_{qs})$ 可控制，而 $e_{qs} = \omega_{re} \phi_f$ 並不能控制，此乃因 e_{qs} 為永久磁鐵的電樞線圈交鏈磁通數產生的速度感應電動勢。如果能量測出磁極的位置，便可由變頻器輸出三相電樞電壓 $(v_{us}、v_{vs}、v_{ws})$ 經過逆座標變換，變換成二相直流座標系統之 $d、q$ 軸電樞電壓 $v_{ds}、v_{qs}$ ，如此可以輕易在 $(d-q)$ 座標下，控制 v_{ds} 及 v_{qs} 而達控制馬達之目的。而 $v_{ds}、v_{qs}$ 與 $v_{us}、v_{vs}、v_{ws}$ 間之關係式如下：

$$\begin{bmatrix} v_{us} \\ v_{vs} \\ v_{ws} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_{re} & -\sin \theta_{re} \\ \cos \left(\theta_{re} - \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta_{re} - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \cos \left(\theta_{re} + \frac{2}{3}\pi \right) & -\sin \left(\theta_{re} + \frac{2}{3}\pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

另由於永磁同步馬達 $(d-q)$ 軸間會互相干擾，為了達到方便控制之目的，以下我們將探討非干擾化控制。令 $v_{ds}、v_{qs}$ 如下所示：

$$\begin{aligned} v_{ds} &= v'_{ds} - \omega_{re} L_s i_{qs} \\ v_{qs} &= v'_{qs} + e_{qs} + \omega_{re} L_s i_{ds} \\ &= v'_{qs} + \omega_{re} (\phi_f + L_s i_{ds}) \end{aligned} \quad (3)$$

將非干擾化控制(3)式代入永磁同步馬達數學模式中，可得

$$\begin{bmatrix} v'_{ds} \\ v'_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

並由上式可描繪出非干擾化控制方塊圖，如圖 1 所示：

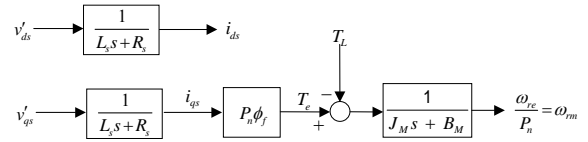


圖 1. 非干擾化控制永磁同步馬達之方塊圖。

至此其兩軸電流將不再相互干擾，且可輕易控制，而永磁同步馬達只能直接檢出三相電樞電流，故須將直接檢出的三相電樞電流轉換為二軸 $(d-q)$ 電流：

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \left(\theta_{re} + \frac{\pi}{3} \right) & \sin \theta_{re} \\ \cos \left(\theta_{re} + \frac{\pi}{3} \right) & \cos \theta_{re} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \end{bmatrix} \quad (5)$$

如此回授電流即可為二軸 $(d-q)$ 環境下之控制器使用，因此若能設計控制器來控制電流，則其性能便如同控制直流馬達一樣。

永磁同步馬達的轉矩 T_e 是根據佛來明左手定則，係以互相垂直相交電樞線圈交鏈磁通數與電樞電流乘積之和表示：

$$\begin{aligned} T_e &= P_n \phi_f \{-i_{\alpha s} \sin \theta_{re} + i_{\beta s} \cos \theta_{re}\} \\ &= P_n \phi_f i_{qs} \end{aligned} \quad (6)$$

由於 ϕ_f 受永久磁鐵的溫度或磁飽和影響有限，所以永磁同步馬達電路方程式經適當的座標變換並作解耦後，轉矩控制便成僅需控制電樞電流 i_{qs} ，進而控制永磁同步馬達，一如控制他激式直流馬達一般簡單。

除了描述馬達電氣參數相關的模型之外，尚有描述機械特性的模型，如圖 2 所示。由圖 2 與馬達轉矩特性可得馬達機械轉矩方程式如

下[1]：

$$T_e - T_L = (J_m + J_L) \frac{d\omega_{rm}}{dt} + (B_m + B_L)\omega_{rm} \quad (7)$$

簡化如(8)式：

$$T(s) = \frac{1}{J_M s + B_M} \quad (8)$$

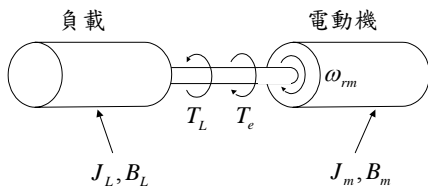


圖 2. 馬達連結負載示意圖。

2.2 比例積分控制器

比例積分控制器為工業界所常見的控制器之一，隨著電動機使用之型態，電氣參數設計亦有所不同，為有效達到向量控制所需之控制精確度，對控制器應有一套完整設計步驟，使其模擬或實作流程均能步驟化。

在向量控制架構下，永磁同步馬達的輸出電磁轉矩，可以由 q 軸定子電流與轉子磁通的乘積得到，即永磁同步馬達輸出電磁轉矩，可

以直接由 q 軸定子電流加以控制。永磁同步馬達向量控制的整體架構，包括控制器及電壓解耦器，其中控制器為 PI 控制器，包括速度控制器及 d 、 q 軸定子電流控制器。在向量控制下的永磁同步馬達方塊圖，可簡化如圖 3 所示。

從圖 3 僅考慮 q 軸電流控制部份，可得未加 PI 控制器時開迴路轉移函數為：

$$G_q(s) = \frac{i_{qs}^e}{v_{qs}^e} = \frac{\frac{1}{L_s}}{s + \frac{R_s}{L_s}} \quad (9)$$

閉迴路轉移函數 $T_q(s)$ 之特性方程式如下：

$$1 + \left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) \left(\frac{\frac{1}{L_s}}{s + \frac{R_s}{L_s}} \right) = 0 \quad (10)$$

有關各個控制器的調整係採用根軌跡法來調適三個迴路控制器參數的比例積分控制器，包括 q 軸定子電流控制器、 d 軸定子電流控制器及速度控制器的控制器增益，設計流程如圖 4。

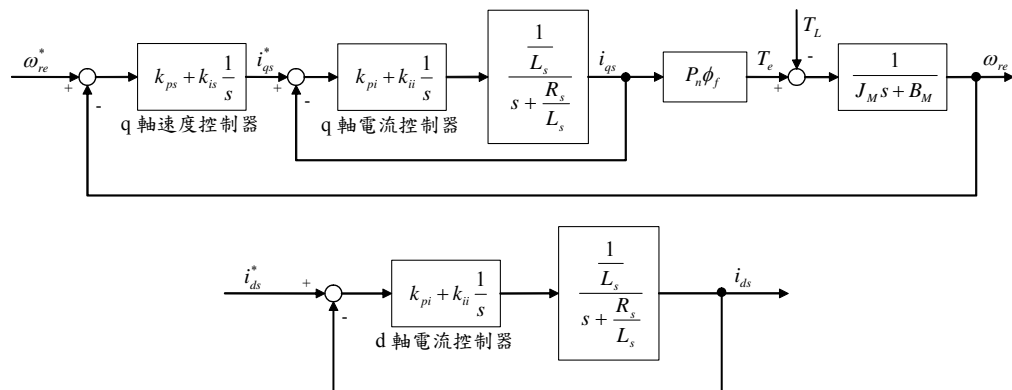


圖 3. 永磁同步馬達控制方塊圖。

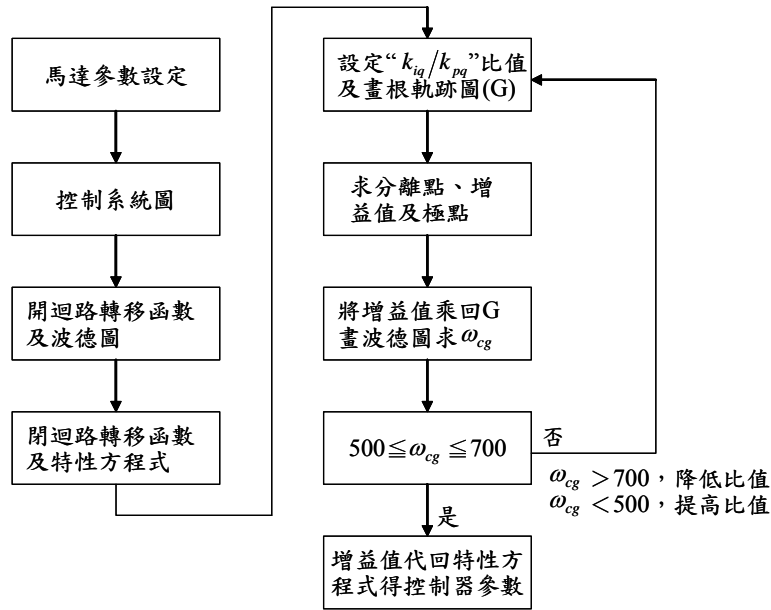


圖 4. 永磁同步馬達 PI 控制器設計流程。

由閉迴路轉移函數 $T_q(s)$ 求其分離點 (breakaway point)，可得到兩相同實根及其增益值 K ，依所求得的增益值進而畫出單位步階響應圖及波德圖，即可獲得交越頻率、相位邊限、相位交越頻率、增益邊限。為使增益交越符合系統要求，選取適當的 k_{iq}/k_{pq} 值最主要的判別範圍，當所得到的增益交越頻率為預定值，則 PI 速度控制器參數調適完成；若所得到的增益交越頻率過大或太小，則需重新選定 k_{iq}/k_{pq} 值後再重新調適。依前述設計原則，本文所得到的控制器參數為 $k_{pq} = 6.5$ 、 $k_{iq} = 2339$ ；另由圖 3 可發現 d 軸系統架構與 q 軸相同，因此可視 d 軸電流控制器的參數值設計與 q 軸電流控制器的參數相同。

當內迴路的電流控制器的截止頻率 (cut-off frequency) 高於速度控制器的截止頻率數倍以上時，電流迴路的特性不會影響到速度控制器的特性，而電流迴路的閉迴路轉移函數可視為單一增益[1]，即

$$T_q(s) \cong 1 \quad (11)$$

故可將速度閉迴路控制系統方塊圖簡化為圖 5，其中速度受控系統 $G_s(s)$ 如(12)式

$$G_s(s) = \frac{\omega_{rm}}{T_e} = \frac{1}{s + \frac{B_M}{J_M}} \quad (12)$$

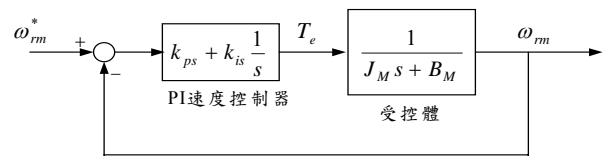


圖 5. 速度閉迴路控制系統方塊圖。

將(12)式代入特性方程式中，可求得極點位置為零及 $-B_M/J_M$ ，因此選取適當的零點即 k_{is}/k_{ps} ，並應用波德圖驗證觀察系統增益交越是否能符合要求，一般系統速度迴路增益交越頻率約在 300 (rad/sec)，並依前述設計原則，

本文所得到速度控制器參數為 $k_{ps} = 0.743$ 、 $k_{is} = 39.38$ 。

三、田口法為基礎之控制器設計

田口法 (Taguchi method) 是日本田口玄一博士於 1950 年代發展起來的統計實驗設計法，這個方法被成功地用在日本工業製造及產品品質改善。在 1970 年初期，田口法開始傳入美國，但是直到 1980 年美國工業界才大量採用此理論。國內曾在 1960 年引入此法，但在近幾年才在工業界流行。田口法之基本精神在於透過直交表實驗的統計分析，取得最佳系統品質特性且對所有內在不確定性或外在雜訊及干擾最不敏感的最佳參數組合，並且能夠得到實驗進行系統參數與品質特性間迴歸函數關係。因此，本文應用田口式實驗計劃法之參數設計以期達到系統穩健設計的目標。

3.1 控制器參數的調整

現今相關 PI 控制器參數調整法則相當地多，但都有其限制，如需對系統內部參數進行估測、調整過程無法掌握、無法應用於多變數的系統等；而較具完備性的遺傳演算法，則因調整時控制器參數的變異過大，容易損害受控制體的機構，且調整次數過多，不適合線上進行調整[19]。基於以上理由，本文應用田口式實驗計劃法，執行參數調整。

PI 控制器是目前工業程序控制中，應用最廣泛的工業控制器；PI 控制器的轉移函數為：

$$G_c(s) = k_{ps} + \frac{k_{is}}{s} \quad (13)$$

其中 k_{ps} 為比例增益常數， k_{is} 為積分增益常數。

對一個將進行控制的系統，我們必須決定其 PI 控制器參數的範圍，應於此範圍內調整出最佳參數的組合。

田口法應用於 PI 控制器參數調整的詳細步驟可彙整如下：

- 一、選定系統的品質特性。
- 二、調整控制器參數的範圍。
- 三、雜訊 (誤差) 因子的選擇。
- 四、選取合適的直交表。
- 五、按照直交表配置進行實驗。
- 六、計算 S/N 比。
- 七、完成 S/N 比回應表及回應圖。
- 八、決定最佳參數組合。

3.2 時域規格的性能指標

控制系統的性能響應，通常以單位步階輸入的暫態響應和穩態響應來規劃特性，而且以初始條件為零作為標準，以典型系統二階的單位步階響應圖為例，其時間響應中的暫態性能就是以此定義規格或指標[20-21]。

根據系統二階典型步階響應圖時域，暫態響應和穩態響應的性能有下列五項：

- 一、最大超越量 (maximum overshoot) M_o ：通常被用來測量控制系統的相對穩定度，以步階響應終值的百分比來表示，即

$$M_o = \frac{y_{\max} - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (14)$$

- 二、延遲時間 (delay time)：單位步階響應達到終值百分之五十所需的時間。
- 三、上升時間 (rise time)：單位步階響應從終值百分之十上升到百分之九十所需的時間。
- 四、安定時間 (settling time)：單位步階響應減小並維持在終值百分比內所需的時間，通

常使用的數值為 5%、2%、1%。

五、穩態誤差 (steady-state error)：時間趨近於無窮大時誤差訊號的行為。

其中，對控制系統在穩態響應時所做的性能評估，最重要的性能指標為穩態誤差；而上升時間通常表示系統初期響應的速度，安定時間則表示系統後期響應的速度。

3.3 實驗設計

根據田口實驗計劃法品質工程三階段論，控制器設計可分為：

- 一、系統設計：對不同的類型受控體選擇適當的控制法則，以及控制器的結構選擇。
- 二、參數設計：在既定的控制器結構下，找出一組最佳的控制器參數，使系統具有強健性能。
- 三、允差設計：在參數設計後，若系統性能仍不符合設計規格，則在不改變控制器結構的前提下，必須考慮提高控制器參數的精確度。

若允差設計仍無法達到令人滿意的系統的性能，則須回到第一階段重新選擇適當的控制法則，進行控制器設計，故一開始便選擇正確的控制法則極其重要，本論文將只針對系統設計及參數設計進行田口法實驗設計。

四、直交表與實驗配置

4.1 選定系統的品質特性

由於控制器設計規格是用來表示系統必須達到的性能標準，因此可直接將其拿來做為品質特性值，但一般的設計規格大多包含數個指標，且指標間又存在一定程度的矛盾，在處理上更添複雜與困難。針對永磁同步馬達實驗系統，期望能具穩定性的追蹤命令，故就時域的一般性能指標，選擇轉速之最大超越量與穩態誤差均方根值為本實驗設計之性能指標，則可定義其品質特性值（損失函數）如(15)式：

$$y = \left(W * \frac{V_{Mo}}{V_{Mo_Max}} + (1-W) * \frac{V_{ess}}{V_{ess_max}} \right) \quad (15)$$

其中 W 為選定的權重，如表 1 所示。

表 1. 權重函數組合表。

組合	W
1	0
2	0.5
3	1

表 2. PI 控制器參數範圍表。

水準數 \ 控制因子	水準一	水準二	水準三
A：速度比例增益 (k_{ps})	0.594	0.743	0.892
B：速度積分增益 (k_{is})	31.51	39.38	47.27
C：電流比例增益 (k_{pi})	5.2	6.5	7.8
D：電流積分增益 (k_{ii})	1871	2339	2807

4.2 調整控制器參數的範圍

本文之速度控制器為永磁式同步馬達系統，故對此系統設計電流及速度控制器，參照 2.2 節得知電流及速度 PI 控制器參數的預定值。為求得最佳 PI 控制器參數組合，並兼顧安全及成本的考量，假設 PI 控制器參數預定值的變動範圍為 $\pm 20\%$ 來進行實驗。範圍如表 2 所示

4.3 雜訊（誤差）因子的選擇

本實驗系統針對永磁式同步馬達系統的特性，加載即是影響系統在追蹤命令時所造成的誤差，故選擇負載為本實驗系統最主要之雜訊因子，分列於三個水準，其如表 3 所示。

表 3. 雜訊因子表。

雜訊因子 (N)	水準數		
	水準一 N_1	水準二 N_2	水準三 N_3
負載 (nt)	0	1.2 (半載)	2.4 (滿載)

4.4 選取合適的直交表

參數設計的第一步，為分開列出控制因子與雜訊因子，標準參數設計實驗，它包括兩個直交表，一為內側直交表，用於配置控制因子，另外一個為外側直交表，用於配置雜訊因子，各種回應值均可由這兩個直交表配置的各種因子條件下實驗出來的結果做分析；由於本實驗的最終目的為如何調整 PI 控制器的最佳參數，以適應於各種環境之下，藉由表 2 控制因子範圍表及表 3 雜訊因子表，故可進行參數設計之實驗，將其配置於合適的直交表如表 4 所示。

五、實驗結果與回應分析

永磁同步馬達向量控制的實驗系統如圖 6 所示，主控制器是 Pentium-III 500 個人電腦，其視窗 (windows) 作業系統為一多工作業系統，作業系統程式使用分時 (time sharing) 方法，同時執行多組應用程式，即包括程式起始、執行時間、系統實體記憶體及周邊介面等資源之使用，需在每一取樣時間內完成，而且中間

表 4. 控制器設計實驗配置表。

Ex. No.	控制因子 內側直交表 $L_9 (3^4)$				雜訊因子 外側直交表			S/N 比
	A	B	C	D	N1	N2	N3	
1	1	1	1	1	實驗觀測值 (V_{Mo} 、 V_{ess})			SN ₁
2	1	2	2	2				SN ₂
3	1	3	3	3				SN ₃
4	2	1	2	3				SN ₄
5	2	2	3	1				SN ₅
6	2	3	1	2				SN ₆
7	3	1	3	2				SN ₇
8	3	2	1	3				SN ₈
9	3	3	2	1				SN ₉

不可間斷，如此才可獲得較好之控制性能，而其最主要目的就是做為永磁同步馬達控制軟體的發展及控制信號的運算處理與資料記錄。永磁同步馬達為 8 極、750W，額定轉速為 3000 rpm，如圖 7；另以 750W 直流發電機為負載之設計如圖 8 所示，藉由不同之轉速、負載電阻，可提供不同的負載轉矩 T_L 如下

$$T_L = \frac{\rho}{\omega_{re}} \quad (16)$$

其中 $\rho = I^2 R$ 、 $\omega_{re} = 2\pi \times \frac{rpm}{60}$ ，為電氣角速度。若轉速為 3000 rpm、負載電阻為 100Ω、半載 (1.2nt-m) 狀況下之電流值為 1.94 A，滿載 (2.4nt-m) 狀況下之電流值為 2.74 A。

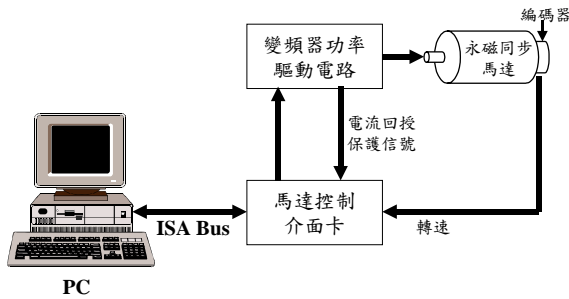


圖 6. 永磁同步馬達驅動控制系統。



圖 7. 永磁同步馬達與直流發電機實體圖。

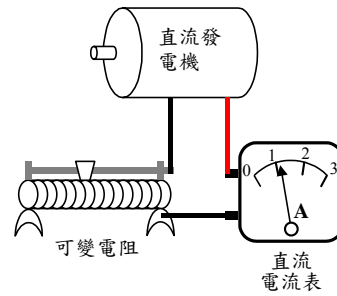


圖 8. 負載設計架構圖。

5.1 依直交表配置進行實驗

首先下達轉速之輸入命令，其輸入信號圖如圖 9 所示，分別依據表 4 所列參數進行實測，本文欲量測之實驗觀測值，分別為轉速之最大超越值和轉速穩態誤差均方根值，其經實驗量測所得之實驗結果如表 5 所示。

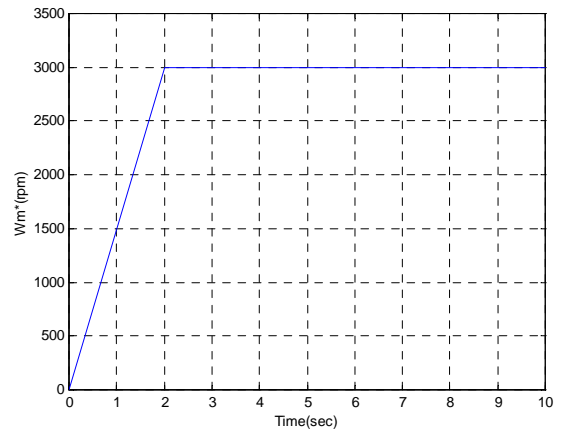


圖 9. 輸入轉速訊號圖。

5.2 S/N 比計算與回應分析

由於 S/N 比主要是針對可控因子與水準數設定，討論其影響品質變異的大小，將所求得的信號雜訊比也就是將品質特性轉成一種反應變異量大小的數值，數值越高穩定性越佳。本文以時域規格轉速之最大超越值和轉速穩態誤差均方根值為系統之性能指標，其品質特性值 (損失函數) 如(15)式，由於設計的目的即

表 5. 實驗觀測值表。

	實驗觀測值					
	N1		N2		N3	
	最大超越值 (rpm)	穩態誤差 均方根值 (rpm)	最大超越值 (rpm)	穩態誤差 均方根值 (rpm)	最大超越值 (rpm)	穩態誤差 均方根值 (rpm)
1	48.2875	5.8877	38.4321	4.4960	41.8862	4.2828
2	39.8973	5.8796	37.8391	4.4725	39.4275	4.3409
3	37.8052	5.2063	37.4788	4.3513	41.4483	4.3755
4	41.0947	4.9021	39.9910	4.3111	38.9708	4.3836
5	39.1012	4.9129	32.1234	4.2572	39.4998	4.3564
6	33.7824	4.8002	32.6652	4.3287	32.7157	4.3418
7	39.5251	4.7479	37.7078	4.2297	31.3239	4.5216
8	37.4140	4.5620	37.6146	4.3007	39.2176	4.2913
9	31.1085	4.6811	31.9189	4.2886	32.0981	4.4021

在使得損失函數達到最小值，因此系統所期望之特性為望小特性；將表 5 所得之實驗結果代入(15)式配合表 1 權重函數的計算，分別得到本實驗系統之品質特性值，再依據 S/N 望小特性公式：

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} [(y_1 - 0)^2 + \dots + (y_n - 0)^2] \quad (17)$$

$$= -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$$

求得各種權重函數組合的 S/N 比，所得之結果如表 6 所示，另針對三種權重組合之 S/N 比結果之回應圖示如圖 10。

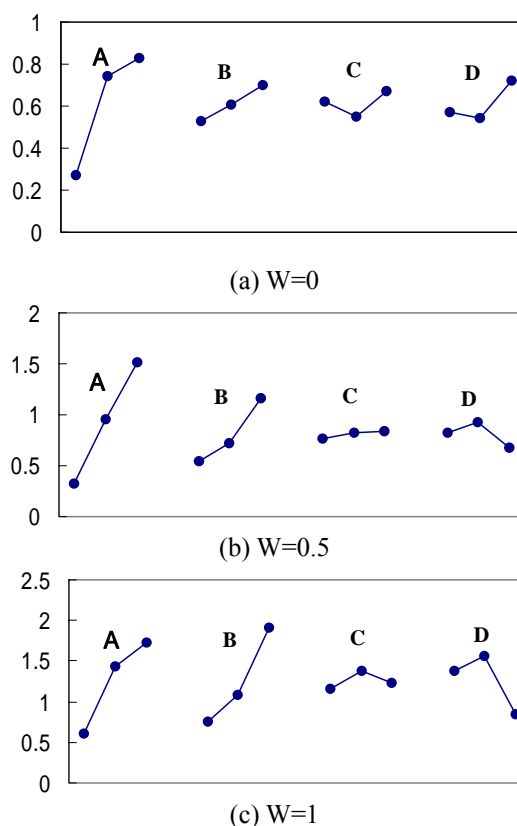


圖 10. S/N 比回應圖：(a)組合一、(b)組合二、(c)組合三。

表 6. S/N 比值表。

S/N	組合1	組合2	組合3
Y ₁	0.15	0.03	0.11
Y ₂	0.13	0.38	0.85
Y ₃	0.53	0.57	0.84
Y ₄	0.70	0.57	0.64
Y ₅	0.76	0.91	1.37
Y ₆	0.77	1.37	2.30
Y ₇	0.73	1.03	1.51
Y ₈	0.94	0.87	1.04
Y ₉	0.81	1.53	2.62

5.3 控制器參數選擇與分析

組合 1：相關品質特性僅針對轉速穩態誤差均方根值作探討。依據圖 10(a)之回應分析，討論如下：

- (1) 對品質特性影響較大的因子為 A 因子，也就是本實驗系統速度控制器之比例增益。
- (2) 最佳參數組合為 A3 B3 C3 D3，其所對應 PI 控制器參數如表 7 所示。
- (3) 原始控制器之轉速響應如圖 11-13 所示；其中， $k_{ps} = 0.743$ 、 $k_{is} = 39.38$ 、 $k_{pi} = 6.5$ 、 $k_{ii} = 2339$ 。依據表 7 之控制器參數，不同雜訊水準（負載條件）下之轉速響應如圖 14-16 所示；相較於原始轉速響應，轉速之穩態誤差有明顯地改善，如表 8 所示。

表 7. 最佳 PI 控制器參數（組合 1）。

A (k_{ps})	B (k_{is})	C (k_{pi})	D (k_{ii})
0.892	47.27	7.8	2807

表 8. 最佳 PI 控制器輸出響應改進表（組合 1）。

雜訊水準	轉速穩態誤差均方根值 (rpm)		
	預設值	田口法改良值	改進幅度
N1	4.7255	4.2571	9.91%
N2	4.3533	4.0824	6.22%
N3	4.3391	4.1968	3.28%

組合 2：相關品質特性同時考慮最大超越量及穩態誤差均方根值。依據圖 10(b)之回應分析，討論如下：

- (1) 對品質特性影響較大的因子為 A 與 B 因子，也就是本實驗系統速度控制器之比例增益及積分增益。
- (2) 最佳參數組合為 A3B3C3D2，其所對應 PI 控制器參數如表 9 所示。
- (3) 依據表 9 之控制器參數，不同雜訊水準（負載條件）下之轉速響應如圖 17-19 所示；相較於原始轉速響應，無論轉速之最大超越量或穩態誤差均有明顯地改善，如表 10 所示。

表 9. 最佳 PI 控制器參數（組合 2）。

A (k_{ps})	B (k_{is})	C (k_{pi})	D (k_{ii})
0.892	47.27	7.8	2339

表 10. 最佳 PI 控制器輸出響應改進表 (組合 2)。

雜訊水準	最大超越值 (rpm)			轉速穩態誤差均方根值 (rpm)		
	預設值	田口法改良值	改進幅度	預設值	田口法改良值	改進幅度
N1	37.38	30.31	18.91%	4.7255	4.3471	8.01%
N2	38.28	30.65	19.93%	4.3533	4.1242	5.26%
N3	34.86	33.74	3.21%	4.3391	4.1708	3.88%

組合 3：相關品質特性僅針對轉速最大超越量作探討。依據圖 10(c)之回應分析，討論如下：

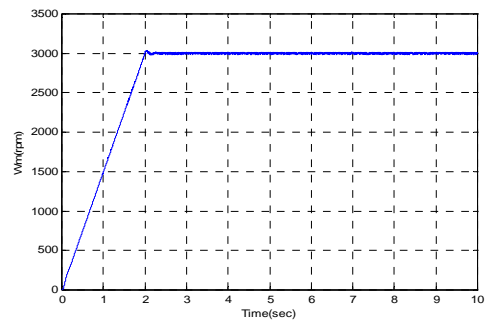
- (1) 對品質特性影響較大的因子為 A、B 與 D 因子，也就是本實驗系統速度控制器之比例增益及積分增益與電流控制器之積分增益。
- (2) 最佳參數組合：A3B3C2D2，其所對應 PI 控制器參數如表 11 所示。
- (3) 依據表 11 之控制器參數，不同雜訊水準(負載條件)下之轉速響應如圖 20-22 所示；相較於原始轉速響應，轉速之最大超越量有明顯地改善，如表 12 所示。

表 11. 最佳 PI 控制器參數 (組合 3)。

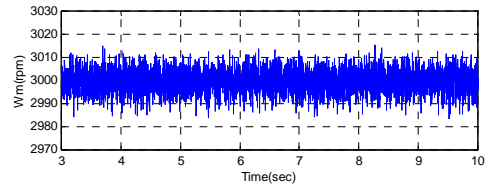
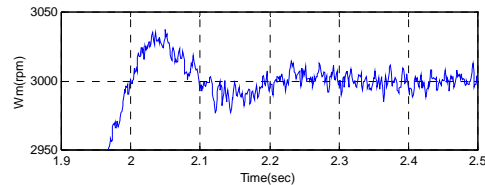
A (k_{ps})	B (k_{is})	C (k_{pi})	D (k_{ii})
0.892	47.27	6.5	2339

表 12. 最佳 PI 控制器輸出響應改進表 (組合 3)。

雜訊水準	最大超越值 (rpm)		
	預設值	田口法改良值	改進幅度
N1	37.38	30.17	19.29%
N2	38.28	33.08	13.58%
N3	34.86	31.29	10.24%



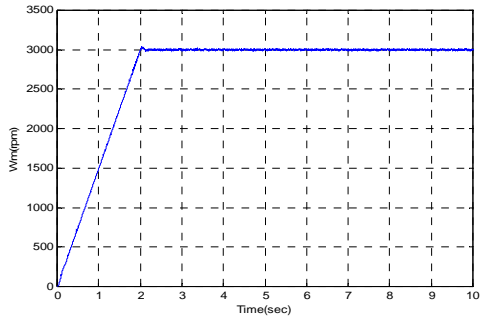
(a)



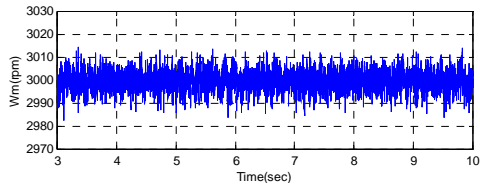
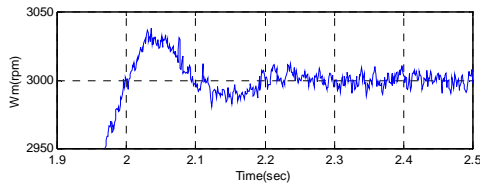
(b)

圖 11. 原始預定之 PI 控制器於 N1 輸出響應圖：

(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

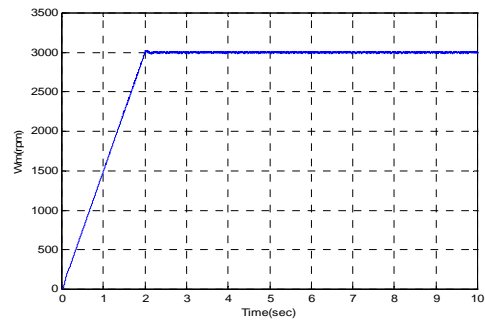


(a)

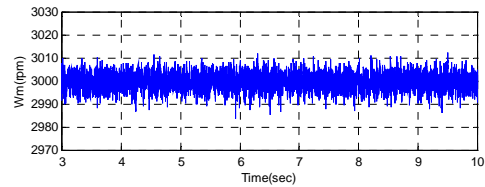
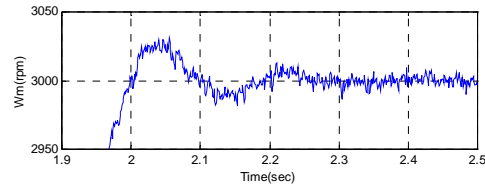


(b)

圖 12. 原始預定之 PI 控制器於 N2 輸出響應圖：
 (a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

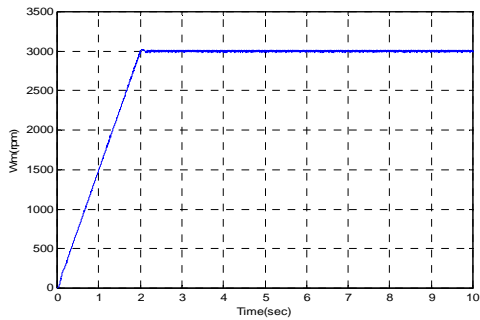


(a)

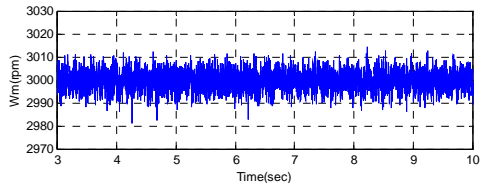
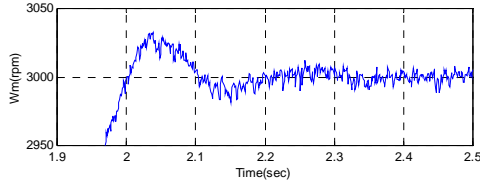


(b)

圖 14. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N1 輸出響應圖
 (組合 1)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

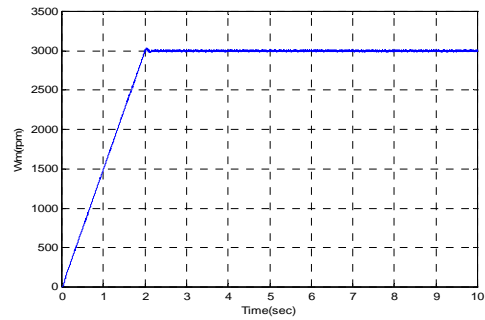


(a)

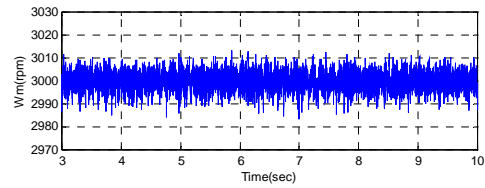
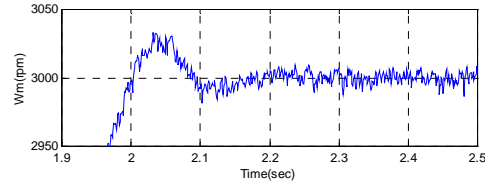


(b)

圖 13. 原始預定之 PI 控制器於 N3 輸出響應圖：
 (a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

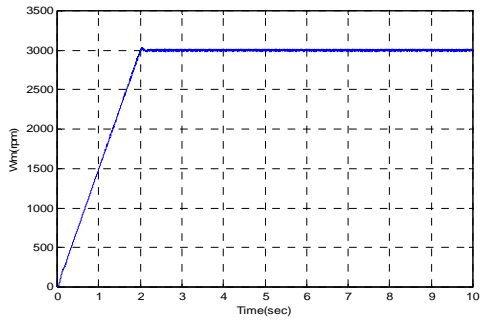


(a)

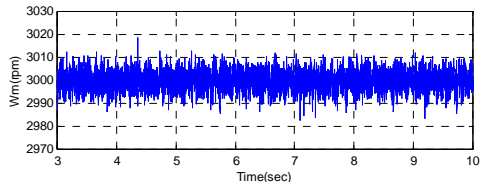
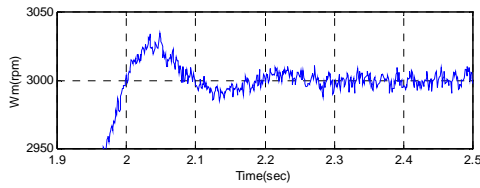


(b)

圖 15. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N2 輸出響應圖
 (組合 1)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

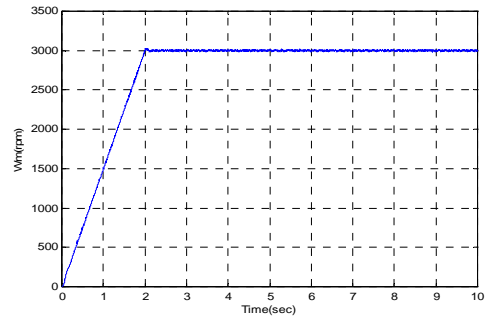


(a)

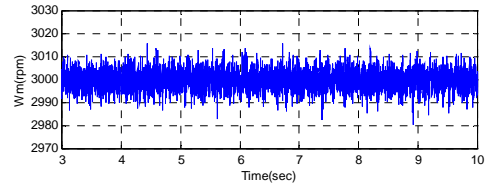
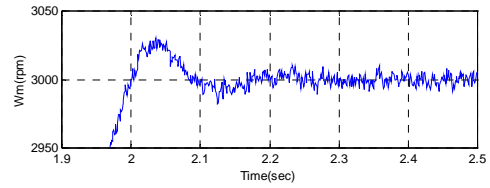


(b)

圖 16. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N3 輸出響應圖
(組合 1)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

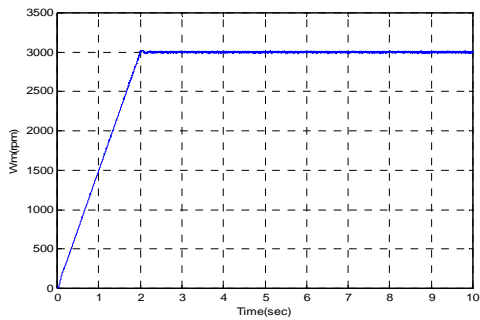


(a)

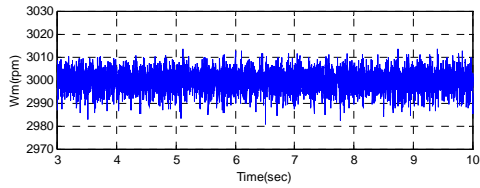
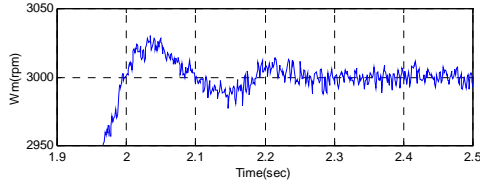


(b)

圖 18. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N2 輸出響應圖
(組合 2)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

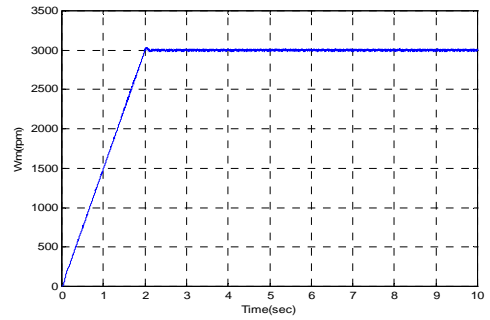


(a)

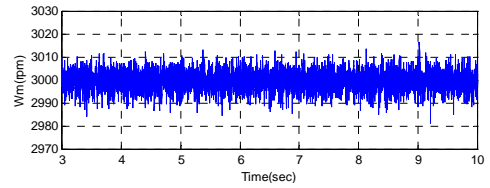
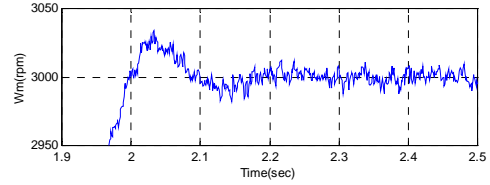


(b)

圖 17. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N1 輸出響應圖
(組合 2)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

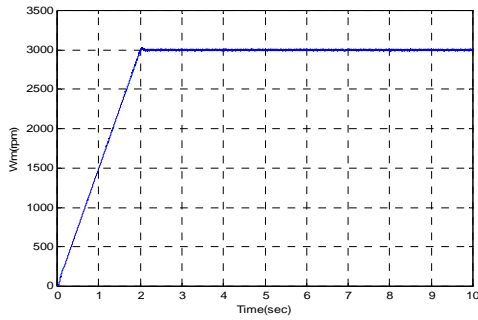


(a)

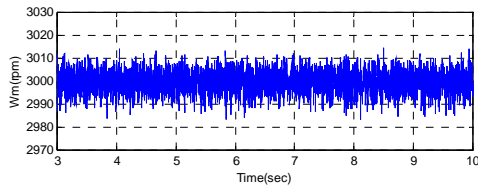
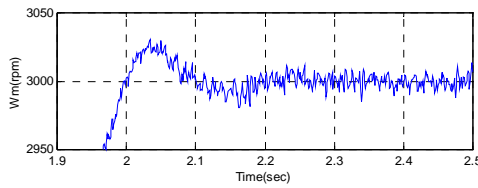


(b)

圖 19. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N3 輸出響應圖
(組合 2)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

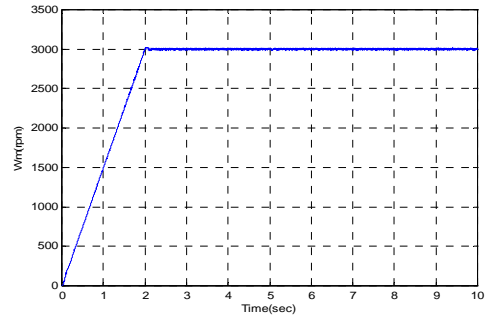


(a)

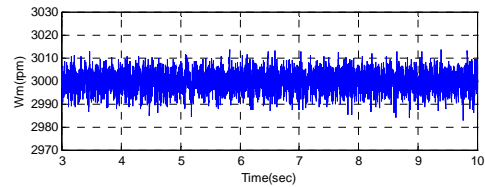
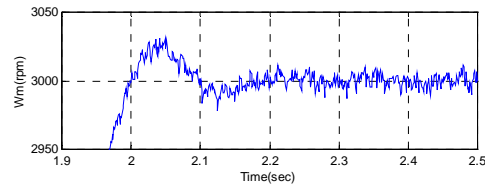


(b)

圖 20. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N1 輸出響應圖
 (組合 3)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。



(a)

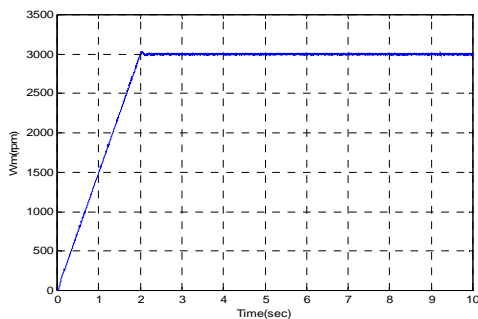


(b)

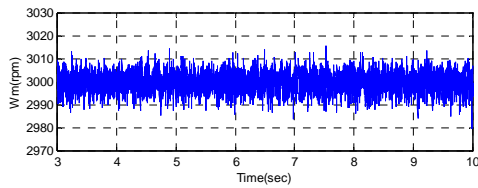
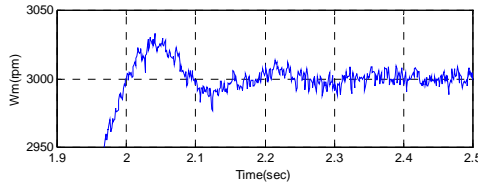
圖 22. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N3 輸出響應圖
 (組合 3)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

六、結論

本文結合 PI 控制器與田口式實驗法，提供一個速度與電流控制器參數之設計方法，除可避免冗長地試誤過程，亦能有效地提昇永磁同步馬達的控速性能；相關田口實驗配置以負載條件為雜訊因子，得以改善傳統 PI 控制器因負載變動而無法達到性能要求之缺點。本文分別以最大超越量、轉速誤差、或其兩者之組合為控制性能指標，藉由回應分析除可得到最佳之控制器參數，亦可知速度控制器是影響品質函數的主要因素。綜合實驗結果得知，在不同品質特性定義下，所得之控制器參數均可提供較佳之速度控制性能。



(a)



(b)

圖 21. 田口法實驗設計 PI 控制器於 N2 輸出響應圖
 (組合 3)：(a) 轉速響應圖、(b) 局部放大圖。

參考文獻

- [1] 劉昌煥、許溢适，AC 伺服系統的理論與設計實務，文笙書局，1992。
- [2] 劉昌煥、許溢适，變頻器驅動技術，文笙書局，1994。
- [3] 許溢适，交流電動機的向量控制，文笙書局，1998。
- [4] Blaschke, F., "The Principle of Field Orientation as Applied to The New Trans Vector Closed Loop Control System for Field Machines," *Siemens Review*, Vol. 34, pp. 217-220, 1972.
- [5] Stantisteban, J. A. and Stephan, R. M., "Vetor Control Methods for Induction Machines: An Overview," *IEEE Trans. Education*, Vol. 44, No. 2, pp. 170-175, 2001.
- [6] Novotny, D. W. and Lipo, T. A., Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [7] Vas, P., Vector Control of AC Machines, Clarendon Press, Oxford, 1990.
- [8] Bose, B. K., "Technology Trends in Microcomputer Control of Electrical Machines," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 35, No. 1, pp. 160-176, 1988.
- [9] Sen, P. C., "Electric Motor Drives and Control-Past, Present, and Future," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 37, No. 6, pp. 562-575, 1990.
- [10] Bayer, K. H., Waldmann, H., and Weibelzahl, M., "Field-Oriented Close-Loop Control of a Synchronous Machine with the New Transvector Control System," *Siemens Rev*, Vol. 39, pp. 220-223, 1972.
- [11] Leomhard, W., Control of Electrical Drive, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [12] Chang, Y.-H. and Wang, Y.-Y., "Self-Tuning Speed Controller Design of Vector Control Induction Motor Drives," *Journal of the Chinese Institute of Electrical Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 263-273, 2000.
- [13] Ross, P. J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill Inc., NY, 1996.
- [14] 鍾清章，田口式品質工程導論，中華民國品質學會，台北，1998。
- [15] 劉克琪，實驗設計與田口式品質工程，華泰書局，台北，1985。
- [16] 吉澤正校編，田口品質工程組翻譯，開發設計階段的品質工程，中國生產力中心，台北，1981。
- [17] Madu, I. E. and Madu, C. N., "Design Optimization using Signal-to-Noise Ratio," *Simulation Practice and Theory*, Vol. 7, pp. 349-354, 1999.
- [18] Silva, G. J., Datta, A., and Bhattacharyya, S. P., "PI Stabilization of First-Order Systems with Time Delay," *Automatic*, Vol. 37, pp. 2025-2300, 2001.
- [19] Tan, K. K., Wang, Q.-G., and Hang, C. C., Advances in PID Control, Springer, 1999.
- [20] Kuo, B. C., Automatic Control Systems, Prentice Hall, 1995.
- [21] Franklin, G. F., Powell, J. D., and Emami-Naeini A., Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice Hall, 2002.

符號說明

英文字母

B_L	: 負載黏滯係數
B_m	: 馬達黏滯係數
B_M	: 包含馬達本體及負載之黏滯係數
e_{qs}	: q 軸的電樞線圈之速度感應電動勢
i_{ds}	: d 軸電樞電流
i_{qs}	: q 軸電樞電流
i_{us}	: u 相電樞電流
i_{vs}	: v 相電樞電流
i_{ws}	: w 相電樞電流
$i_{\alpha s}$: α 相定子電流
$i_{\beta s}$: β 相定子電流
J_L	: 負載轉動慣量
J_m	: 馬達轉動慣量
J_M	: 包含馬達本體及負載之等效轉動慣量
p	: d/dt 微分運算子
P_n	: 永磁同步馬達的極對數
R_s	: 電樞線圈電阻
T_e	: 電磁轉矩
T_L	: 負載轉矩
v_{ds}	: d 軸電樞電壓
v_{qs}	: q 軸電樞電壓
v'_{ds}	: 非干涉 d 軸電樞電壓
v'_{qs}	: 非干涉 q 軸電樞電壓
v_{us}	: u 相電樞電壓
v_{vs}	: v 相電樞電壓
v_{ws}	: w 相電樞電壓
y_{\max}	: 單位步階響應最大值
y_{ss}	: 單位步階響應穩態值
y	: 品質特性質 (損失函數)
V_{Mo}	: 馬達轉速最大超越量
V_{Mo_Max}	: 轉速最大超越量中之極大值
V_{ess}	: 穩態誤差值

V_{ess_max}	: 最大轉速穩態均方根值
W	: 權重
vector	: 粗體, 表示矩陣或向量

希臘字母

θ_{re}	: 電氣角度
ϕ_f	: 電樞線圈交鏈磁通
ω_{re}	: 馬達電氣角速度
ω_{rm}	: 馬達轉速

上註標

*	: 上註標, 表示命令值
---	--------------