利用基因演算法於直流無刷馬達位置控制分析

黃燕文 [1*]　楊慶彬 [1]　彭偉彰 [2]

[1]南亞技術學院機械工程系

[2]南亞技術學院機械工程系機械與機電工程碩士班

摘要

本文旨在以基因演算法搜尋最佳化 PID 控制器控制參數的增益值，應用於直流無刷旋轉馬達(BLDC)系統，以期達到位置控制之目的。基因演算法(GA)進行參數搜尋工作，其適應性的交配與突變率公式可避免落入區域值而加速收斂。實驗部分使用智控科技提供的直流無刷馬達搭配功率放大器、TI DSP (TMS 320LF2407)控制器加以驗證本文控制法則之可行性。結果顯示以 GA 設計的最佳參數值可快速的追隨到位置命令。

關鍵字：無刷馬達，PID 控制器，基因演算法

*Email：hyw@nanya.edu.tw　　Fax：03-4384670　　Tel：03-4361070#6409

ANALYSISOF POSITION CONTROLOF DC BRUSHLESS MOTOR USING GENETIC ALGORITHM

Yan-Wen Huang[1*], Ching-Been Yang[1], Wei-zhangPeng[2]

[1]Department of Mechanical Engineering, Nanya Institute of Technology

[2]Master Program of Mechanical and Mechatronics Engineering, Department of Mechanical Engineering, Nanya Institute of Technology

Abstract

Investigated in this thesis is the application of a genetic algorithm (GA) for searching optimal parameters of a PID controller for a DC brushless rotary motor position control system. The gains of the PID controller are searched simultaneously through adaptive genetic algorithm (GA) whose adaptively crossover and mutation rate can avoid falling into local optimum and speed up the convergence. As for the experiment part, we use the DC brushless rotary motor, power amplifier and TI DSP (TMS 320LF2407) controller supported by Intelligent Control Technology Co., Ltd. to verify and improve the feasibility of controller. The results show that, the optimal PID controller designed by GA can track position command rapid.

Key Words: brushless rotary motor, PID controller, genetic algorithm (GA)

*Email：hyw@nanya.edu.tw　　Fax：03-4384670　　Tel：03-4361070#6409

壹、前言

在現今的工業應用中，馬達驅動系統為產業的重要環節，無刷直流馬達(Brushless DC Motor, BLDCM)係利用變頻器取代傳統有刷直流馬達的換向器(Commutator)及碳刷(Brush)等整流機械結構，具有低噪音、高使用壽命等優點，由於沒有整流子及碳刷，可高速運轉且避免維修，在自動化系統中，已逐漸取代直流馬達。因此，就控制性能、穩定性而言，無刷直流馬達為一良好的驅動裝置，所以應用範圍也逐漸擴大，包括電動機車、光碟機(CD-ROM)及其它高性能需求之場。

無刷直流馬達(Brushless DC Motor, BLDCM)藉由霍爾元件的磁極位置感測，已改變線圈之換相，免除了傳統有刷直流馬達的缺點，並保留了直流馬達控制容易的優點，故目前不論在工業設備與家庭消費產品，均有大量的應用。

由於微處理晶片技術的進步，微處理晶片的運算速度不斷提高，故伺服電動機驅動控制器之技術，已逐漸朝向以微處理系統整合晶片為基礎的全數位化控制系統。本研究之目的為發展使用德州儀器公司所生產的數位信號處理器(DSP TMS320LF2407)提供，應用DSP(數位信號處理器)之外部週邊設備如通用輸出入(GPI/O)、類比數位轉換(ADC)、單/三相PWM、捕捉器(Capture)、比較器(Compare)、編碼器(Encode)輸入、串列埠(SCI、SPI、CAN)及JTAG界面，並應用DSP軟體語言控制其輸出，達到控制無刷直流(BLDC)馬達加速、減速、正反轉之控制。而其信號的產生方式乃是根據控制程式所計算出的電壓控制命令，藉由DSP中之PWM產生器輸出PWM控制信號。目前常有使用模糊控制方法[1]及類神經控制[2]，這些方法適合馬達參數不確定系統，其控制參數非最佳值。本文之目的為發展利用基因演算法於直流無刷馬達位置控制，並以德州儀器之TMS320F2407 為控制器，實現無刷直流馬達之驅動控制，以全數位化的伺服實驗系統來驗證本研究所提出的控制法則為可行的。

貳、硬體安裝與介紹

MS320LF247 是個周邊功能相當完整的數位信號處理器(DSP)[3]，它主要是應用於機電整合控制方面，其最強的特色是具有兩組全功能的互補三相 PWM 輸出(有 12 個 PWM)，可應用兩軸三相馬達伺服控制或一組為三相馬達及另一組作為能夠迴流電源的換流器，如此可節省能源。

一、直流無刷馬達位置伺服控制系統架構

圖 1 為直流無刷馬達位置伺服控制硬體設備圖，主體為直流無刷馬達(MBE.172)、驅動器、DSP、PID 控制器、感測目前轉子位置回授感測器元件、霍爾元件及編碼器。表 1 為直流無刷馬達(MBE.172)參數表，圖 2 為直流無刷馬達位置伺服控制系統架構圖。

表 1 直流無刷馬達參數表

Motor P/N	MBE.172	單位
1..Power	52.5	(W)
2. Nominal current	1.16	(A)
3.Phase resistance (motor + drive)	2.63	(ohms)
4.Phase inductance (motor + drive)	2.3	(mH)
5.Back-EMF constant	3.72	(V/1000rpm)
6.Torque constant	0.025	(Nm/A)
7.Rated voltage	24	(V)
8.Rotor and load data total inertia (M_o)	1E-006	(Kgm^2)
9. Mechanical time constant (T_s)	8.6	(ms)
10. Encoder resolution	500	(lines/rev)
11.Hall sensors	2	
12.Number of pole pairs	4	
13Maximum speed	749	rad/s
14.Peak current	3.6	(A)

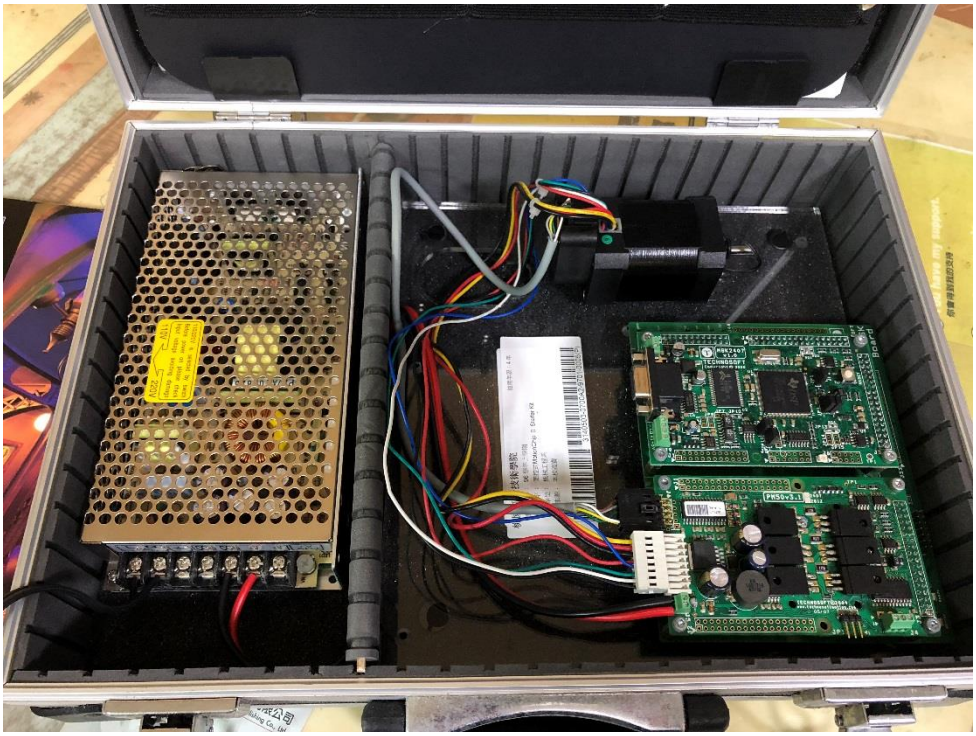


圖 1. 直流無刷馬達位置伺服控制驅動系統硬體設備圖[3]

直流無刷馬達位置伺服控制系統包括三個迴路，位置控制迴路、速度控制迴路及電流控制迴路。感測器包括位置感測器、電流感測器及霍爾感測器；速度估測由位置資訊而得。

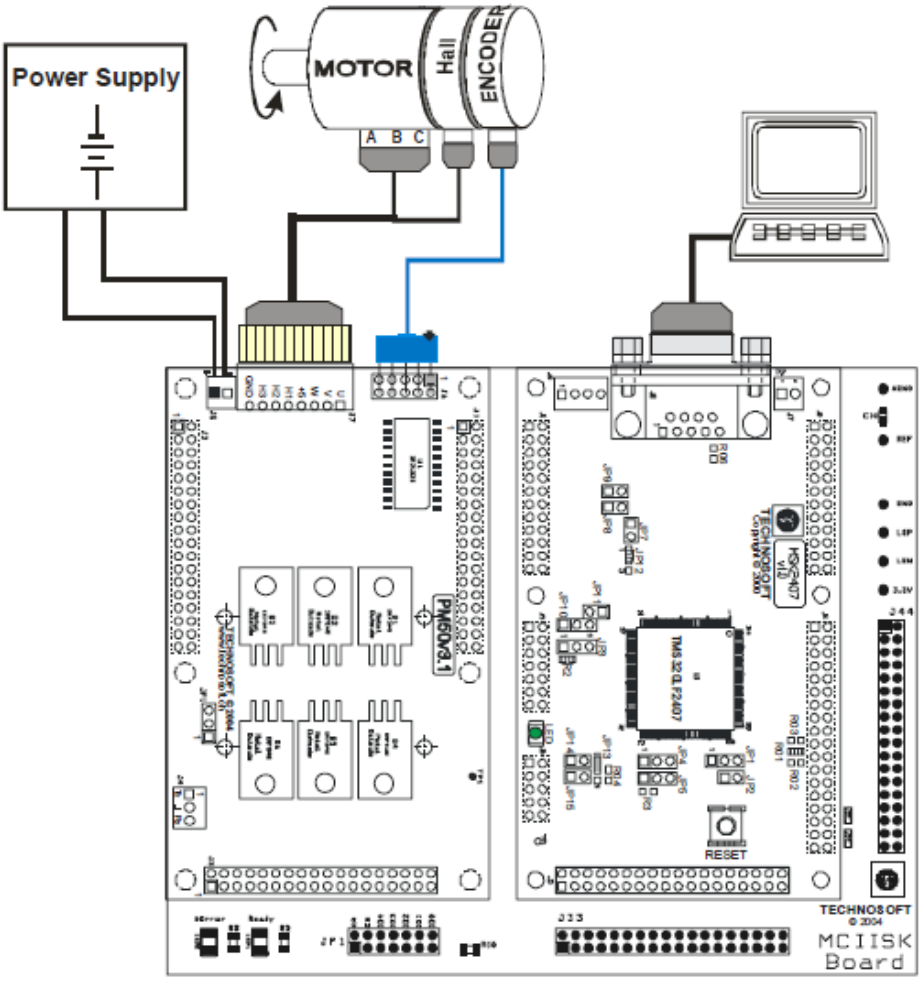


圖 2. 直流無刷馬達位置伺服控制系統架構圖[3]

參、直流無刷馬達基因演算模式位置控制

圖 3 為直流無刷馬達位置伺服控制系統圖，本實驗 PID 控制器用來調整系統暫態性能及消除穩態誤差、PID 控制器有參數比例k_p、積分k_i及微分k_d參數，其功能分別為比例項k_p具有產生與目前誤差成正比之控制信號，使系統反應迅速。積分項k_i可消除穩態誤差，而微分項k_d可預測誤差信號未來變化方向。調整這三個參數可以改變系統極點位置、阻尼比及自然頻率。實驗中觀察系統步階響應及追隨控制響應，可進一步調整這三個參數對系統暫態控制性能的影響。

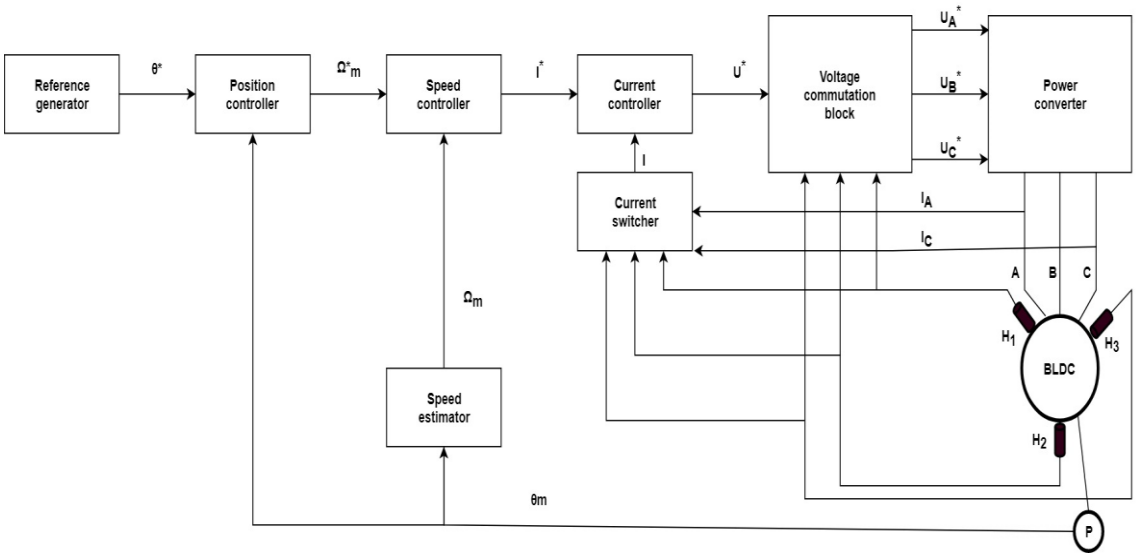


圖 3. 直流無刷馬達位置伺服控制系統方塊圖

一、基因演算法概要

1975 密西根大學的約翰·賀藍（John Holland）首創用了『基因演算法』Genetic Algorithm (GA)又稱: 遺傳演算法，發展出這項技術有力的理論基礎。他在理論中描述了基因演算法是如何運作，以及基因如何巧妙地創造了適應生存的物種。

基因演算法則的三個主要運算子為複製 (reproduction)、交配 (crossover)、以及突變 (mutation)。應用基因演算法則來解最佳化問題的基本精神為：將所要搜尋的所有參數編碼成稱為染色體 (chromosome)的離散 (discrete) 或二元 (binary) 字串 (string) 來代表參數的值；如此隨機地重覆產生 *N* 個初始物種(字串)，然後依據求解之條件來設計適應函數 (fitness function)，適應函數值高的物種將被挑選至交配池 (mating pool) 中，此即複製過程，再依交配及突變過程的運算，即完成一代的基因演算法則，如此重覆下去以產生適應性最強的物種。

圖 4 為基因演算法求解流程，大致上可以分為七個步驟進行：

（一）設計編碼方式(染色體個體表示法)

（二）決定族群大小規模

（三）設計適應函數，決定染色體個體適應度的評估標準

（四）決定挑選與複製的方法

（五）定義交配與交配率

（六）定義突變與突變率

（七）決定終止條件

基因演算參數編碼產生流程

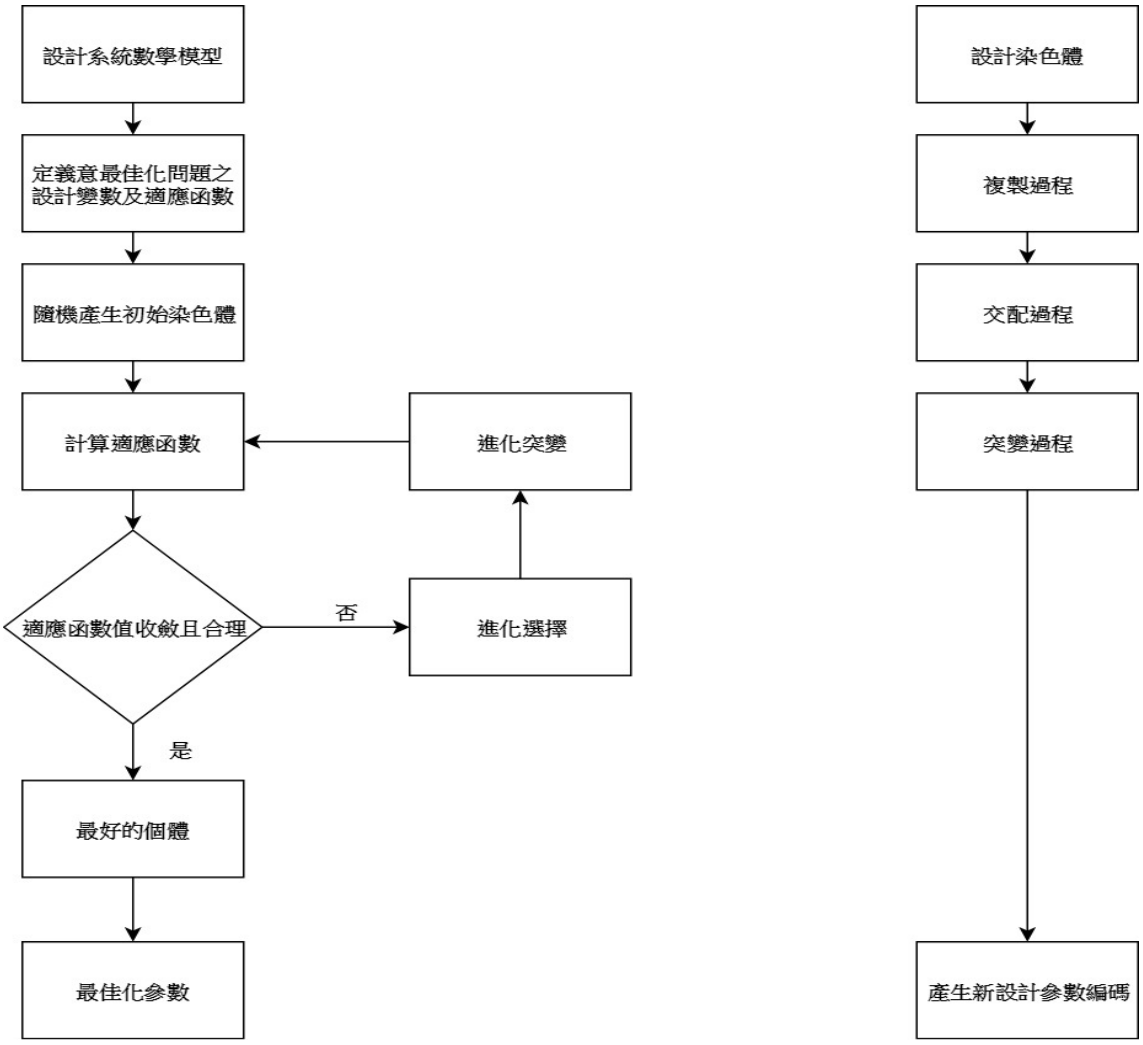


圖 4. 基因演算流程

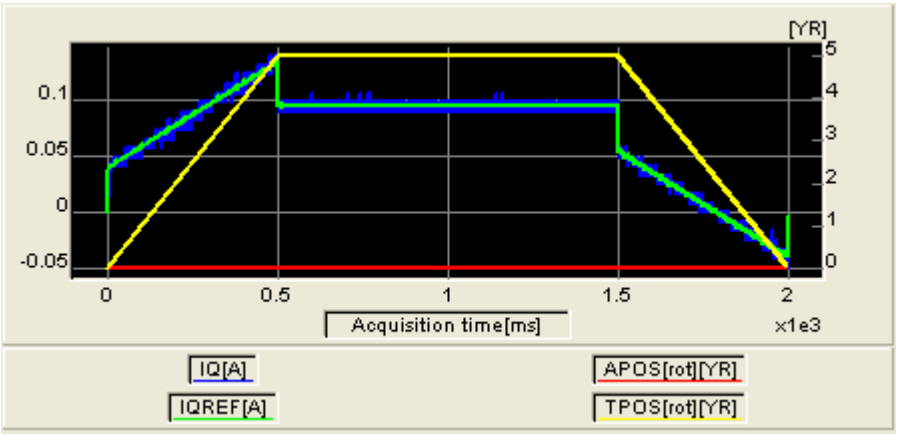
肆、實驗結果與討論

PID 控制器轉移函數，$G_c(\mathrm{s}) = K_p + K_i/s + K_d s$，選擇適合適應函數，利用 Matlab 基因演算模擬，依圖 4 遺傳演算法求解流程，經由複製、交配、突變等過程[4]及相關基因演算參數(表 2)，搜尋出最佳的 PID 控制器的 3 個參數值。最佳的 PID 控制器有三個調整參數比例$k_p = 0.31136$、積分$k_i = 0.00528673$及微分$k_d = 6.11257$參數。

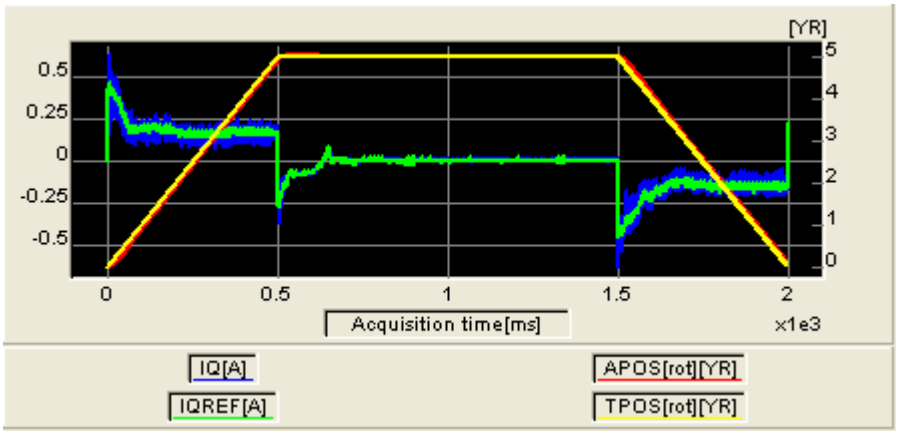
表 2 基因演算參數

Population size	30
Number of generations	60
Crossover rate	0.60
Mutation rate	0.04
Chromosome length length	30bits(15 each for k_p 、k_i及k_d)
Fitness function(目標函數)	$f = \dfrac{1}{M_o + T_s + 1}$

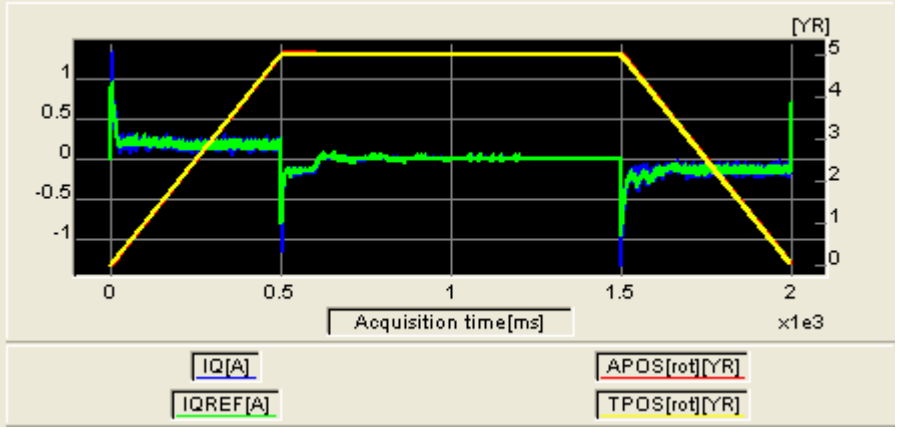
一、追隨控制響應



(a) k_p=0.003; k_i=0; k_d=0.6



(b) k_p=0.31136;k_i= 0.00528673; k_d=6.11257

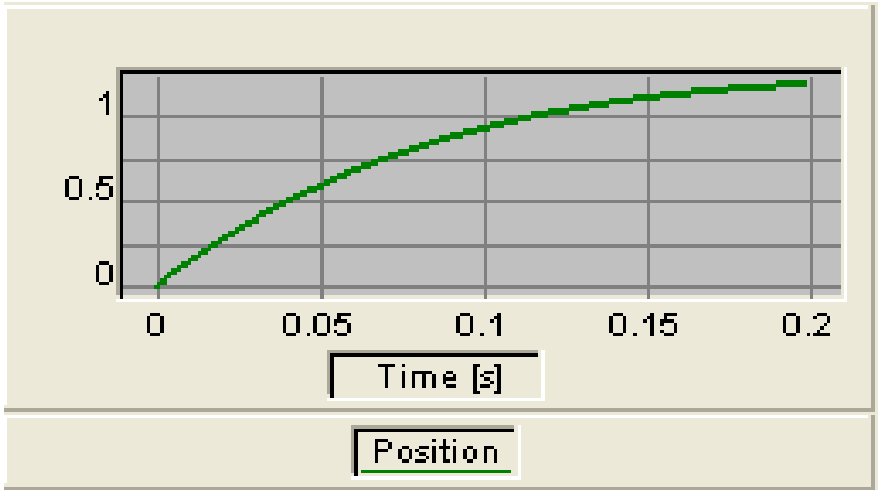


(c) k_p=1.2; k_i=0.04; k_d=12

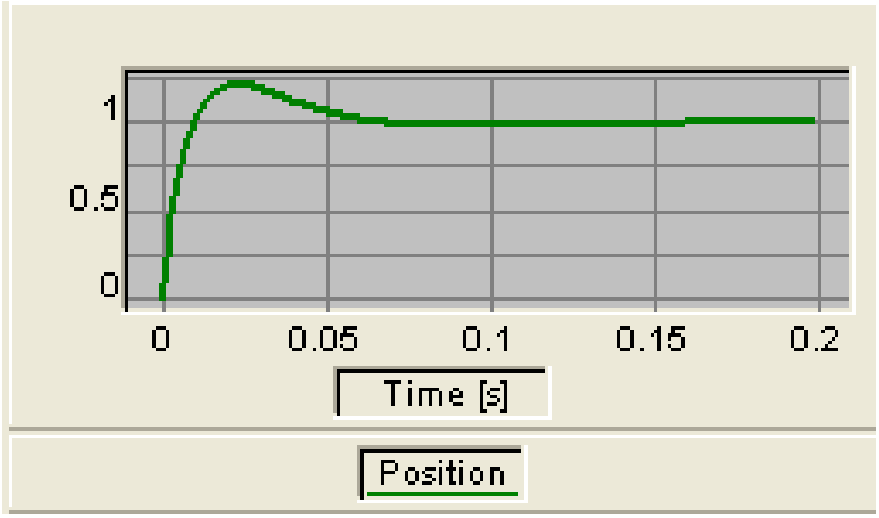
圖 5. 追隨控制響應圖

圖 5 為追隨控制響應圖，圖中 TPOS 為輸入命令，APOS 為馬達實際輸出，IQ 為實際電流，IQREF 為參考電流，由圖 5(a)(b)(c)追隨控制響應圖可知使用經由 GA 選出 PID 控制器 PID 參數值之系統響應無論在系統超振量與上升時間，均有大幅的改善控制性能，且系統追隨控制性能效果良好。

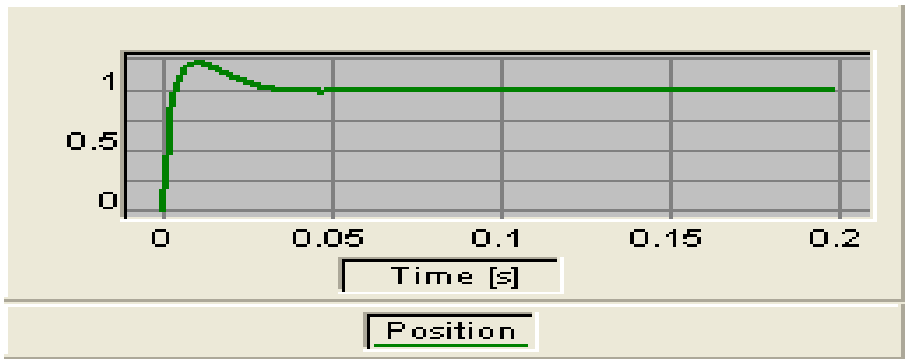
二、步階控制響應



(a) k_p= 0.003; k_i=0; k_d=0.6



(b) k_p=0.31136; k_i= 0.00528673; k_d= 6.11257



(c) k_p=1.2; k_i=0.04; k_d=12

圖 6 步階控制響應圖

表 3 步階控制響應性能規格表

圖號	安定時間	超振量
圖 6(a)	0.2 以上	0%
圖 6(b)	0.07	20%
圖 6(c)	0.035	25%

由圖 6(a)(b)(c)步階控制響應圖及表 3，步階控制響應性能規格表結論如下：

(一) k_p大，響應上升時間短，超振量大。

(二) k_p小，響應上升時間長，超振量小。

伍、結論

經由基因演算慎選 PID 控制器，得到最佳k_p、k_i、k_d值，可使無刷馬達依輸入命令(TPOS)要求，馬達實際輸出(APOS)能隨著輸入加速、等速；減速命令改變，追隨控制性能佳。

由測試結果可知，使用經由 GA 選出 PID 控制器 PID 參數值之系統響應無論在系統超振量與上升時間，均有大幅的改善控制性能，穩態誤差趨近於零，且系統追隨控制性能效果良好。

陸、參考文獻

[1] Rigatos GG., 2009, “Adaptive fuzzy control of DC motors using state and output feedback.” Electric Power Systems Research, volume 79, pp.1579–1592.

[2] Dandil B., 2009, “Fuzzy neural network IP controller for robust position control of inductionmotor drive.” Expert Systems with Applications, volume 36, pp.4528–4534.

[3] 智控科技股份有限公司技術資料。

[4] 呂立洋，2007，《應用遺傳演算法與田口法作表面型永磁無刷直流馬達之最佳化設計》，中央大學碩士論文。