

智慧型步進馬達閉迴路伺服控制系統之開發 A Development of Intelligent Servo Step Motor Control System

鐘世明

Shyh Ming Jong

黎明技術學院創意產品設計系
Department of Innovative Production Design Engineering,
Lee Ming Institute of Technology

摘 要

步進馬達以脈衝(Pulse)驅動，所以震動、失步、過衝(OverShooting)的問題是其主要缺點；為了克服此缺點，本文擬以數位訊號處理器(Digital Signal Processor, DSP)研發出智慧型微步進馬達閉迴路伺服控制系統，將馬達位置檢知解角器(Resolver)的訊號輸入，經解碼電路及類比數位轉換器(Analog Digital Converter, ADC)至 DSP，主控電路在接收到外部的控制命令後，先判斷馬達目前的位置，接著計算出所需轉動的角度及方向後，再傳送訊號至步進馬達驅動電路控制馬達轉動，以達到不失步的功能。步進馬達驅動器以弦波輸出至數位類比轉換器(Digital Analog Converter, DAC)來推動馬達，依 DAC 解析度調整基本步級角中的細分割數，以達到低震動及高解析的功能，同時弦波輸出模組也可供解角器解碼電路之用。

關鍵詞：數位訊號處理器、步進馬達、微步進、解角器

Abstract

Step motor is driven by pulse, so the vibration, step losses, overshooting are its defects. For overcoming those defects, we proposed an intelligent servo micro stepping control system based on digital signal processor, DSP. First, we derive the step motor position detected by resolver as input signals to DSP through the decode circuits and analog to digital converter, ADC. Second, main control circuits get the external commands and decide the degree and direction of rotated motor, and pass the signals to motor driver for avoiding lose steps. Step motor driver generates sine wave to digital to analog converter (DAC) to drive motor. Based on resolution of DAC, controller adjusts the micro steps for approaching low-vibration and high resolution functions as well as be applied by resolver.

Key Words: Digital Signal Processor, Step Motor, Micro Stepping, Resolver



1. 前言

馬達驅動因為低轉速與高扭力的需求，所以採用減速齒輪搭配交直流伺服控制器是工業界長期使用方式，但齒輪背隙與高單價的伺服控制，孕育出馬達直接驅動的需求[1]，步進馬達驅動就是其中一項具有此優點的控制方式[2][3]。本文作者在執行教育部推動技專校院與產業園區產學合作計畫(計畫編號 99M83023)，計畫名稱：「智慧型低震及超高解析五相步進馬達驅動器設計」，協助企業開發國內首件以 FPGA 設計超高解析度及智慧型減震的五相步進馬達驅動器[4][5]，發現國內馬達控制器開發公司，習慣用類比電路或微處理器來開發驅動器。類比電路開發週期較長，電路較龐大；微電腦的程式執行架構是順序式(Sequential)，無法負荷高速訊號切換與反應，所以產品與市場需求有一段較大的落差。因此本文擬以 DSP 開發智慧型微步進馬達閉迴路伺服控制系統，讓步進馬達也有伺服控制的可靠性與穩定性；弦波輸出推動兩相步進馬達的方式，增加定位解析度及精度，可大大提高低價馬達的性能。

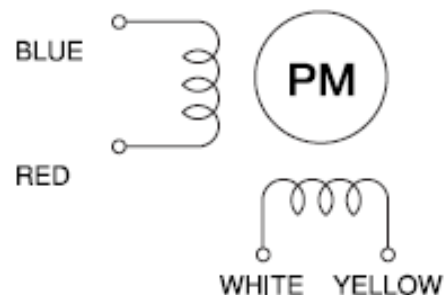
由於一般馬達數位驅動器大都採用電位計(Potentiometer)來做為轉子位置感測器，鑑於電位計之先天特性，主要由銀鈹金屬刷與導電塑膠膜所組成，在長期操作下，由於磨損的關係很容易造成靈敏度下降與使用年限縮短等缺點。為了克服電位計使用上的缺點，本文採用另外一種新型的位置感測器，即所謂的解角器(Resolver)以取代電位計。為了實現工業用高性能馬達數位驅動器，本文引入 DSP 來進行馬達控制器之設計與開發，整體系統架構包括 DSP 主控電路、馬達驅動電路、解角器解碼電路、ADC 電路、DAC 電路等。馬達數位驅動器可藉由外部輸入控制命令，當

DSP 主控電路接收到控制命令時，隨即進行命令解碼，並進行馬達之控制與驅動。此外，透過解角器解碼電路可快速精準地取得目前馬達之轉動位置，因此藉由馬達轉動位置之回饋，系統可準確地進行馬達速度與位置之控制。本文針對合作廠商所規劃的步進馬達驅動技術評估後，計畫將採用高精密度之 IC 結合 DSP，設計出步進馬達驅動電路板，並結合 ADC、DAC 模組，解析度細分割處理與閉迴路控制之技術開發 SOC 步進馬達驅動器。

2. 原理與方法

2-1. 兩相步進馬達驅動器的資料研究及評估

兩相 bipolar 步進馬達結構繞線如圖一所示。



圖一、兩相步進馬達配線圖

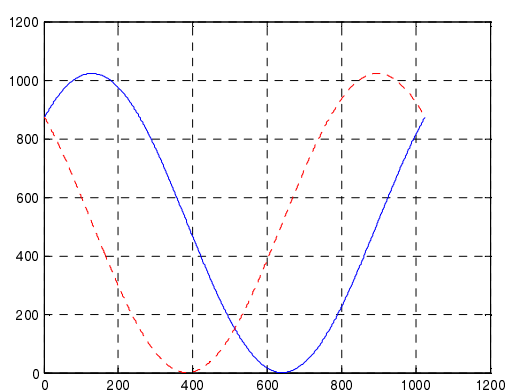
兩相 bipolar 步進馬達激磁方式如圖二所示。

2-Phase Excitation		Step				
		0	1	2	3	0
RED		+	-	-	+	+
YELLOW		+	+	-	-	+
BLUE		-	+	+	-	-
WHITE		-	-	+	+	-

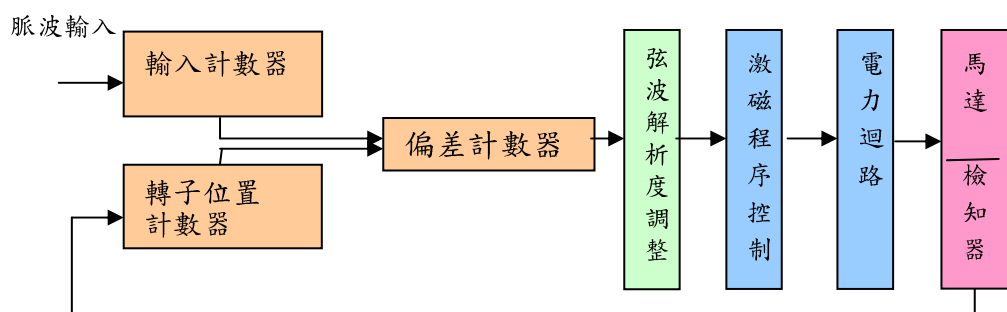
圖二、兩相步進馬達之二相激磁



基本步級角之間(step 0-1)，如果以正弦波(如圖三藍色實線波形)輸出至 Blue-Red 線圈、餘弦波(如圖三紅色虛線波形)輸出至 white-Yellow 線圈，則可產生微步進(Micro-Step)的功能。



圖三、正弦/餘弦波



圖四、系統架構圖

2-2-1 DSP 主控電路

DSP 主控電路的功能大致上有三項：
 (1)接收外部的控制命令，以計算馬達應轉動的角度；
 (2)傳送訊號以控制馬達的運轉；
 (3)擷取自 Resolver 回授的訊號，以取得馬達之位置。DSP 主控電路在接收到外部的控制命令後，先判斷馬達目前的位置，接著計算出所需轉動的角度及方向後，再傳送訊號至馬達驅動電路控制馬達轉動。藉由 Resolver 回授的馬達位置，便能進一步控制馬達運轉的速度，即當馬達

2-2.閉迴路控制系統架構圖

整個馬達閉迴路控制系統之架構開發如圖四所示，主要包括 DSP 主控電路、馬達驅動電路(激磁與電力迴路)、以及解角器與偏差計數器介面電路、弦波解析度調整電路等。本系統之運作如下：當系統電源啟動時，系統將處於待機狀態，此時馬達煞車不會轉動，當外部下達控制命令時，DSP 主控電路便會開始進行控制命令之解碼，接著傳送訊號到馬達驅動電路以控制馬達的運作，而藉由解角器與偏差計數器介面電路來回授馬達目前位置，如此便能依據外部輸入的控制命令精確地調整弦波解析度以控制馬達之轉動。

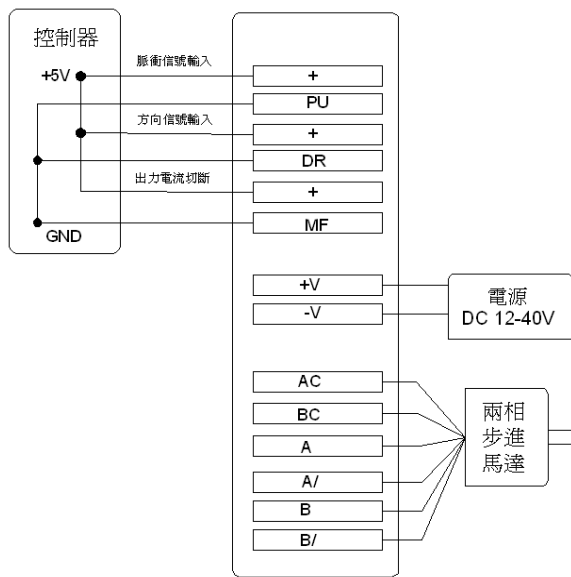
需轉動的角度較大時，轉動速度較快；而當目標角度愈來愈接近時，便會將速度緩緩降低，使馬達的煞車曲線呈現平滑而流暢的狀態；如此，系統便能達到高精確度之位置與速度控制，亦能進一步減輕馬達硬體之磨損，以增加產品之耐久性。

2-2-2 解角器與訊號轉換介面電路

本文採用解角器作為馬達位置回授之元件，由於解角器所需之輸入/出入訊號皆為弦波，為了方便進行訊號之控制及處理，



因此加入了訊號轉換介面來進行馬達位置之解碼，訊號轉換介面含兩的模組：ADC 及 DAC。ADC 將 Resolver 位置 10bits 轉換成數位訊號；DAC 將產生弦波以供 Resolver 解碼之用。其解角器與訊號轉換介面連接之情形如圖五所示，首先由 DAC 送出一組激發訊號，由 RSO 及 COM 兩隻腳位所提供，此訊號為峰對峰值 5V 之弦波訊號，頻率為 100 kHz(最高 500KHz)。



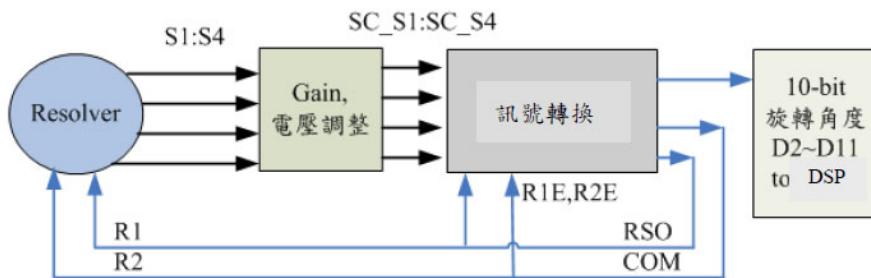
圖五、解角器與訊號轉換介面連接示意圖

RSO-COM 訊號是作為解角器訊號之激發源，會分別連接至訊號轉換介面 R1E 及 R2E 與解角器 R1 與 R2 之腳位。由於所採用的解角器其變壓轉換常數 K(Transformation ratio)為 0.5，因此圖六中

S1~S4 便是峰對峰值 2.5V，頻率 100kHz 之弦波訊號。S1-S3、S2-S4 此兩組弦波訊號即代表著馬達目前的所在位置，但須進行訊號之解碼後，才能得知數位化的角度位置。因此這兩組弦波需要連接至訊號轉換介面進行運算，而訊號轉換介面對此兩組弦波訊號需要先進行電壓之調整及外部雜訊之濾除，因此 S1~S4 會先經過電壓調整電路後便為訊號 SC_S1~SC_S4 再連接至訊號轉換介面，如圖六。當馬達轉動時，解角器會更新所對應之兩組弦波訊號 S1-S3 及 S2-S4，之後訊號轉換介面便會針對調整後的弦波訊號 (SC_S1-SC_S3、SC_S2-SC_S4) 進行馬達位置之解碼，其位置將以 10 位元的表示方式由訊號轉換介面 ADC 的 D2 到 D11 之腳位輸出。

2-2-3 步進馬達驅動器規劃

本文將產出的步進馬達驅動器初步規劃如圖六所示。步進馬達控制器(Controller)將馬達正轉及反轉訊號傳送給以 DSP 建構成的步進馬達驅動器，依微步進解析度設定值調變激磁脈波寬度(PWM)至邏輯電路。同時，為了避免 EMI 電磁干擾，內部設計有 DSP 信號處理功能，作為數位低通濾波器，負責過濾 60Hz 電源雜訊，及 EMI 干擾。微步進解析度設定方式為 10 位元編碼，最高可將基本角細分 1024 步，真值表如表一所示。



圖六、步進馬達驅動器系統規劃圖



表一、步進馬達驅動器解析度真值表

真值表A

IN							OUT										
/RST	/OT-OFF	AB1-E	CD1-E	2P/1P	CU	CD	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	CO	Zo	/Zo
L	*	*	*	*	*	*	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
H	L	*	*	*	*	*	L	L	L	L	L	L	L	L	?	?	?
H	H	L	*	*	*	*	L	L	?	?	?	?	?	?	?	?	?
H	H	*	L	*	*	*	?	?	L	L	?	?	?	?	?	?	?

真值表B

IN							OUT											
/RST	/OT-OFF	AB1-E	CD1-E	2P/1P	CU	CD	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2	CO	Zo	/Zo	
H	H	H	H	H	@	L	正向順序輸出									@	?	?
					L	@	逆向順序輸出									@	?	?
					H	@	輸出順序不改變									?	?	?
					@	H	輸出順序不改變									?	?	?
					@	H	正向順序輸出									@	?	?
					@	L	逆向順序輸出									@	?	?

- 備註 1. "*"代表 H/L 不在意
 2. "?"代表 H/L 不一定
 3. "@"代表 CNT 入力
 4. /RST 及 DIV 切換時, 所有 OUT 先變 "L", 再變 "初始值"
 5. A1=A2 & AB1-E、B1=B2 & AB1-E、C1=C2 & CD1-E、D1=D2 & CD1-E

2-2-4 邏輯電路設計

傳統上電路板所使用的 4000 系列 CMOS 邏輯，或是單晶片架構已嫌老舊，而且微步進程式碼較大，一般的 CPLD 元件無法負荷，使用 FPGA 元件做為步進馬達驅動器的邏輯電路，已經是目前電子電路設計的主流。邏輯電路上，設計弦波輸出作為步進馬達的相位控制，以達到基本步進角的細分割，完成微步進控制。

3. 結果與討論

整個研究結果將分成主控電路、馬達驅動電路，解角器與介面電路之開發說明之。

3.1. 主控電路

主控電路的功能大致上有三項：(1)接收外部的控制命令，以計算馬達應轉動的角度；(2)傳送訊號以控制馬達的運轉；(3)

擷取自 encoder 回授的訊號，以取得馬達之位置。主控電路在接收到外部的控制命令後，先判斷馬達目前的位置，接著計算出所需轉動的角度及方向後，再傳送訊號至馬達驅動電路控制馬達轉動。藉由 encoder 回授的馬達位置，便能進一步控制馬達運轉的速度，即當馬達需轉動的角度較大時，轉動速度較快；而當目標角度愈來愈接近時，便會將速度緩緩降低，使馬達的煞車曲線呈現平滑而流暢的狀態；如此，系統便能達到高精度度之位置與速度控制，亦能進一步減輕馬達硬體之磨損，以增加產品之耐久性。

3.2. 馬達驅動電路

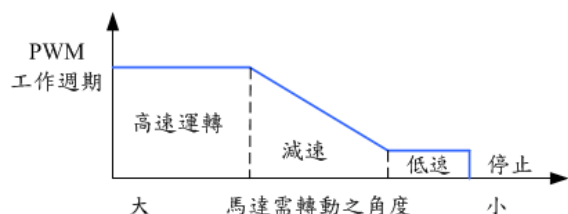
本文採用 DSP 作為馬達之驅動器，此控制器的操作電壓可從 10 到 30 伏特，具有高輸出的電流可控制外部功率電晶體的導通，可支援馬達正/反轉、煞車、以及速度之控制。經過初步驅動測試的實驗後發



現，在相同的 PWM 工作週期之驅動下，馬達正/反轉之速度有明顯的差異，即正轉的速度比反轉時要快，主要原因是減速齒輪組的摩擦力所造成。

3.3.解角器與介面電路

本文主要依據馬達需轉動的角度來進行判斷，如圖七，即需轉動的角度較大時，以工作週期較高的 PWM 來驅動，而對於轉動角度較小的部份，則以工作週期較低之 PWM 進行驅動。



圖七、馬達速度控制曲線

4. 結論

具體研發出兩相微步進智慧型閉迴路控制系統，達到以下的特點：

1. 採用閉迴路控制，步進馬達不失步。
2. 低成本，即可達成步進馬達伺服化控制。
3. 安全性高，伺服步進馬達不失步、不過衝。
4. 在步進馬達運轉中，能即時對偏差脈波進行高速正向或反向補償。
5. 步進馬達比一般伺服馬達的加減速更為迅速，對斜率的要求低，甚至不需加減速斜率。
6. 當步進馬達撞機，完全無法補償定位時，系統會發出警告。
7. 步進馬達不會像一般伺服馬達一樣強力補償，步進馬達可適度的調整出力，當外力阻擋時，衝擊力輕微；而外力解除後，可迅速補償定位，安全性高。

8. 可輕易解決步進馬達失步級與一般伺服馬達停止抖動、不易調整等問題，尤其適用於皮帶傳動機構。

致謝

本文為黎明技術學院 102 學年度獎補助校內研究案成果。

參考文獻

- [1] R. Kurse, G. Praff and C. Pfeiffer, "Transverse Flux Reluctance Motor for Direct Servodrive Applications," Proc. of IEEE/IAS Ann. Meeting, pp.656-662, 1988.
- [2] B. C. Kuo: Step Motors and Control System, SRL Publishing.
- [3] N. Matsui, M. Nakamura and T. Kosaka, "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol.32, No.5, Sep/Oct., pp.1176-1182, 1996.
- [4] Shyh-Ming Jong, Shun-Te Hsiao, Yuan Kang, "An Implementation of FPGA Based Driver for Approaching High Resolution of Five-Phase Hybrid Step Motor," International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC 2010), Qingdao, China, Vol.5, pp.2543-2548, July 11-14 2010.
- [5] Shyh-Ming Jong, "A Design of Automatic Speed Adjustable System for Five-Phase Hybrid Step Motor Driver," International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application (PACIIA 2010), Wuhan, China, Vol.4, pp.343-346, Dec. 4-5, 2010.

