

# 使用eMotion控制器之模組化程式架構實現馬達控制系統

王進福、鍾翼能 ；黃繼震

E-mail: 9315037@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本文內容在於說明，如何使用eMotion控制器之模組化的程式架構，進行馬達全數位化控制之研究。由於程式以模組架構的方式開發，因此極易撰寫與維護。此外，針對每一模組程式，均在Simulink的環境中建立相對應的S-函數的程式方塊，使控制程式的建立，得以由方塊聯結的方式進行，大幅降低開發的難度。實現的功能，涵蓋馬達的各式操控需求，包括電流控制，推力控制，速度控制，與位置控制迴路等，並以線上參數調整的方式來調整馬達的輸出響應。本論文在實作方面，以 eMotion控制器、伺服界面卡、驅動器、馬達組成實作平台，用以驗證所發展之模組程式，並經模擬與實作結果比較，證實所發展之模組程式其正確性、方便性，對於研究及學界有很大的幫助。

關鍵詞：模組化程式架構；Simulink S-函式；全數位化控制；線上參數調整

## 目錄

封面內頁 簽名頁 授權書 . . . . .	iii	中文摘要 . . . . .	
. . . . . iv 英文摘要 . . . . .		v 誌謝 . . . . .	
. . . . . vi 目錄 . . . . .		vii 圖目錄 . . . . .	
. . . . . x 表目錄 . . . . .		xix 第一章 緒論 . . . . .	
. . . . . 1 1.1 研究動機 . . . . .		1 1.2 . . . . .	
文獻回顧 . . . . . 1 1.3 研究流程 . . . . .			
. . . . . 3 1.4 本文大綱 . . . . .		4 第二章 eMotion 控制器概述 . . . . .	
. . . . . 5 2.1 簡介 . . . . .		5 2.2 系統架構 . . . . .	
. . . . . 6 2.3 人機介面模組建立 . . . . .		7 2.3.1 程式架構 . . . . .	
. . . . . 8 2.3.2 eMotion程式建立流程 . . . . .		9 2.3.3 模	
組程式設計 . . . . . 10 2.3.4 系統程式設計 . . . . .			
. . . . . 12 2.4 eMotion/simulink程式建立流程 . . . . .		15 第三章 無刷馬達的控制架構 . . . . .	
. . . . . 20 3.1 無刷馬達數學模式之建立 . . . . .		20 3.2 無刷馬達模型簡化 . . . . .	
. . . . . 27 3.3 控制系統架構 . . . . .		35 3.3.1 無刷馬達	
電流回授控制架構 . . . . . 36 3.3.2 無刷馬達速度回授的控制架構 . . . . .		36	
3.3.3 無刷馬達位置回授控制架構 . . . . . 37 3.4線性馬達控制架構 . . . . .			
. . . . . 37 第四章 感應馬達控制架構 . . . . .		41 4.1 數學模式推導 . . . . .	
. . . . . 41 4.2 座標轉換 . . . . .		55 4.3感應馬達控制系統架	
構 . . . . . 78 第五章 模擬與實作結果 . . . . .		92 5.1	
模組建立 . . . . . 92 5.1.1 驅動級保護模組 . . . . .			
. . . . . 92 5.1.2 PWM電壓輸出模組 . . . . .		93 5.1.3 電流量測模組 . . . . .	
. . . . . 95 5.1.4 位置量測模組 . . . . .		97 5.1.5 相位量測模	
組 . . . . . 99 5.1.6 加減速控制模組 . . . . .			
. . . . . 101 5.1.7 位置迴路控制模組 . . . . .		103 5.1.8 速度迴路控制模組 . . . . .	
. . . . . 105 5.1.9 電流迴路控制模組 . . . . .		107 5.1.10 差分計算模組 . . . . .	
. . . . . 108 5.1.11 相位分配模組 . . . . .		109	
5.1.12 座標轉換模組 . . . . . 111 5.2硬體實驗模組配置規劃 . . . . .			
. . . . . 116 5.3基本參數調整 . . . . .		119 5.3.1馬達的基本參數 . . . . .	
. . . . . 119 5.3.2 DSP控制模組中的馬達參數 . . . . .		119 5.3.3 電流	
迴路開環路測試 . . . . . 121 5.3.4 電流迴路的閉環路設計 . . . . .			
. . . . . 123 5.3.5 速度迴路的開迴路測試 . . . . .		124 5.3.6 速度迴路的閉環路測試 . . . . .	
. . . . . 126 5.3.7 位置迴路的閉環路測試 . . . . .		128 5.4無刷馬達控制模	
擬 . . . . . 129 5.4.1 無刷馬達速度控制模擬之響應結果 . . . . .		129	
5.4.2 無刷馬達位置控制模擬之響應結果 . . . . .		131 5.5 馬達控制實驗及結果 . . . . .	

133	5.5.1 無刷馬達實驗	135	5.5.2 線性馬達實驗
142	5.5.3 座標轉換實驗	146	5.5.4 磁場導向控制實驗
150	5.5.5 感應馬達實驗		
152	第六章 討論與未來研發建議	155	文獻參考
156	圖目錄	4	圖1.1 研究流程圖
5	圖2.1 eMotion運動控制器實體圖	5	圖2.2 系統示意方塊圖
6	圖2.3 eMotion系統架構	7	圖2.4 eMotion馬達控制示意圖
7	圖2.5 單模組程式架構圖	8	圖2.6 多模組程式聯結架構
9	圖2.7 鋸齒波產生方塊圖		
10	圖2.8 SAE_WAVE.asm圖	11	圖2.9 SAE_WAVE.mod圖
12	圖2.10 testAVM.sys圖	14	圖2.11 testAVM.MEM圖
14	圖2.12 testAVM.VAR圖		
15	圖2.13 eMotion之Telnet連線畫面	16	圖2.14 eMotion 連線Matlab之畫面
16	圖2.15 Simulink 函數庫的選取畫面	18	圖2.16 新建 Simulink 模擬方塊操作畫面
18	圖2.17 S-Function的參數設定視窗	19	圖2.18自建Simulink馬達控制方塊函數庫
19	圖3.1 無刷馬達等效電路圖		
20	圖3.2 無刷馬達方塊圖	25	圖3.3 無刷馬達機電架構方塊圖
26	圖3.4 無刷馬達電流控制架構方塊圖		
27	圖3.5 將速度積分得角度之無刷馬達方塊圖	28	圖3.6 無刷馬達狀態流程圖
28	圖3.7 簡化無刷馬達方塊圖	32	圖3.8 無刷馬達伺服控制系統方塊圖
32	圖3.9 電流控制迴路	33	圖3.10 無刷馬達控制系統方塊圖
35	圖3.11 無刷馬達電流回授控制系統方塊圖		
36	圖3.12 無刷馬達速度回授控制系統方塊圖	36	圖3.13 無刷馬達位置回授控制系統方塊圖
37	圖3.14 線性馬達示意圖	38	圖3.15 線性馬達實體圖
38	圖4.1 感應電動機每相等效電路圖	43	圖4.2 感應電動機之等效電路圖
45	圖4.3 以定子側為參考的三相感應馬達每一相等效電路圖	45	圖4.4 直流馬達控制方塊圖
47	圖4.5 定子電流空間向量圖		
49	圖4.6 任意旋轉參考座標圖	56	圖4.7 靜止參考座標
57	圖4.8 座標轉換	62	圖4.9 轉子三相電流與靜止參考座標
65	圖4.10 二維參考座標關係圖		
67	圖4.11 直流馬達控制方塊圖	79	圖4.12 轉子磁通位置圖
87	圖4.13 轉子場導控制之感應馬達向量控制方塊圖	89	圖4.14 感應馬達速度控制方塊圖
90	圖4.15 感應馬達位置控制方塊圖		
90	圖4.16 感應馬達電流回授控制架構圖	91	圖4.17 感應馬達速度控制架構圖
91	圖5.1 驅動級保護模組方塊示意圖	92	圖5.2 驅動級保護模組方塊圖
93	圖5.3 驅動級保護模組參數設定方塊圖		
93	圖5.4 PWM電壓輸出模組示意圖	93	圖5.5 PWM電壓輸出模組方塊圖
94	圖5.6 PWM電壓輸出模組參數設定方塊圖	95	圖5.7 電流量測模組示意圖
95	圖5.8 電流量測模組方塊圖		
96	圖5.9 電流量測模組參數設定方塊圖	97	圖5.10 位置量測模組示意圖
97	圖5.11 位置量測模組方塊圖	98	圖5.12 位置量測模組參數設定方塊圖
98	圖5.13 相位量測模組示意圖		
99	圖5.14 UVW相位排列圖	100	圖5.15 相位量測模組方塊圖
100	圖5.16 相位量測模組參數設定方塊圖	101	圖5.17 加減速控制模組示意圖
101	圖5.18 加減速控制模組方塊圖		
103	圖5.19 加減速控制模組參數設定方塊圖	103	圖5.20 位置迴路控制模組示意圖
104	圖5.21 位置迴路控制模組方塊圖	105	圖5.22 位置迴路控制模組參數設定圖
105	圖5.23 速度迴路控制模組示意圖		
106	圖5.24 速度迴路控制模組方塊圖	106	圖5.25 速度迴路控制模組參數設定圖
106	圖5.26 電流迴路控制模組示意圖	107	圖5.27 電流迴路控制模組方塊圖
107	圖5.28 電流迴路控制模組參數設定方塊圖		
108	圖5.29 差分計算模組示意圖	108	圖5.30 差分計算模組方塊圖

.....	109	圖5.31 差分計算模組參數設定方塊圖	.....	109	圖5.32
相位分配模組示意圖	.....	110	圖5.33 相位分配模組方塊圖	.....	110
.....	110	圖5.34 相位分配模組參數設定方塊圖	.....	110	圖5.35 二相旋轉(de-qe)座標至二相靜止(ds-qs)座標轉換示意圖
.....	111	圖5.36 二相旋轉(de-qe)座標至二相靜止(ds-qs)座標轉換方塊圖	.....	111	圖5.37 二相旋轉(de-qe)座標至三相靜止(as-bs-cs)座標轉換方塊圖
.....	112	圖5.38 二相靜止(ds-qs)座標至二相旋轉(de-qe)座標轉換示意圖	.....	112	圖5.39 二相靜止(ds-qs)座標至二相旋轉(de-qe)座標轉換方塊圖
.....	113	圖5.40 二相靜止(ds-qs)座標至三相靜止(as-bs-cs)座標轉換方塊圖	.....	113	圖5.41 三相靜止(as-bs-cs)座標至二相旋轉(de-qe)座標轉換方塊圖
.....	114	圖5.42 三相靜止(as-bs-cs)座標至二相靜止(ds-qs)座標轉換方塊圖	.....	115	圖5.43 滑差估測(Slip Estimation)方塊圖
.....	115	圖5.44 硬體實驗模組配置	.....	116	圖5.45 伺服界面電路方塊圖
.....	117	圖5.46 伺服界面信號定義方塊圖	.....	118	圖5.47 實驗之系統程式方塊圖
.....	118	圖5.48 電流迴路開環路一階系統方塊圖	.....	121	圖5.49 電流迴路開環路系統程式方塊圖
.....	122	圖5.50 電流迴路閉環路系統程式方塊圖	.....	123	圖5.51 速度開迴路系統方塊圖
.....	123	圖5.52 速度迴路開迴路測試系統程式方塊圖	.....	125	圖5.53 速度迴路閉環路測試系統程式方塊圖
.....	125	圖5.54 位置迴路閉環路測試系統程式方塊圖	.....	128	圖5.55 -a 速度命令波形
.....	128	圖5.55 -b 電樞電流波形	.....	130	圖5.55 -c 轉子轉速波形
.....	130	圖5.56 -a 模擬位置命令波形	.....	131	圖5.56 -b 轉子位置波形
.....	131	圖5.56 -c 電樞電流波形	.....	132	圖5.56 -d 轉子轉速波形
.....	132	圖5.57 Matlab 之實驗畫面	.....	134	圖5.58 FPGA程式下載之Telnet畫面
.....	134	圖5.59 無刷馬達實驗硬體圖	.....	135	圖5.60 無刷馬達開迴路電壓控制程式方塊圖
.....	135	圖5.61 無刷馬達開路電壓波形	.....	136	圖5.62 無刷馬達開迴路電流控制程式方塊圖
.....	136	圖5.63 無刷馬達開迴路電流響應	.....	137	圖5.64 無刷馬達閉迴路電流控制程式方塊圖
.....	137	圖5.65 無刷馬達加入電流回授控制後的電流響應	.....	138	圖5.66 無刷馬達閉迴路扭力控制程式方塊圖
.....	138	圖5.67 無刷馬達閉迴路扭力控制輸出響應	.....	139	圖5.68 無刷馬達閉迴路速度控制程式方塊圖
.....	139	圖5.69 無刷馬達閉迴路速度控制輸出響應	.....	140	圖5.70 無刷馬達閉迴路位置控制程式方塊圖
.....	140	圖5.71 無刷馬達步階命令位置控制響應	.....	141	圖5.72 線性馬達實驗硬體圖
.....	141	圖5.73 線性馬達閉迴路扭力控制程式方塊圖	.....	143	圖5.74 線性馬達閉迴路扭力控制輸出響應
.....	143	圖5.75 線性馬達閉迴路速度控制程式方塊圖	.....	144	圖5.76 線性馬達閉迴路速度控制輸出響應
.....	144	圖5.77 線性馬達位置控制程式方塊圖	.....	145	圖5.78 線性馬達位置控制響應
.....	145	圖5.79 三相靜止座標至二相靜止座標轉換方塊圖	.....	146	圖5.80 三相靜止座標至二相靜止座標轉換響應波形
.....	146	圖5.81 二相靜止座標至二相旋轉座標轉換方塊圖	.....	147	圖5.82 二相靜止座標至二相旋轉座標轉換響應波形
.....	147	圖5.83 二相旋轉座標至二相靜止座標轉換方塊圖	.....	148	圖5.84 二相旋轉座標至二相靜止座標轉換響應波形
.....	148	圖5.85 二相靜止座標至三相靜止座標轉換方塊圖	.....	149	圖5.86 二相靜止座標至三相靜止座標轉換響應波形
.....	149	圖5.87 磁場導向控制閉迴路位置控制實驗方塊圖	.....	150	圖5.88 磁場導向控制閉迴路位置控制實驗響應波形
.....	150	圖5.89 磁場導向控制閉迴路速度控制實驗方塊圖	.....	151	圖5.90 磁場導向控制閉迴路速度控制實驗響應波形
.....	151	圖5.91 感應馬達實驗硬體圖	.....	152	圖5.92 感應馬達閉迴路速度控制程式方塊圖
.....	152	圖5.93 感應馬達閉迴路速度控制響應輸出圖	.....	153	圖5.94 感應馬達閉迴路位置控制程式方塊圖
.....	153	圖5.95 感應馬達閉迴路位置控制響應輸出圖	.....	154	表目錄
.....	122	表5.1 Kr值計算	.....	120	表5.2 i值計算
.....	122	表5.3 v值計算	.....	126	表5.4 kp值計算
.....	129		.....	129	

## 參考文獻

[1] "FPGA 中的DSP核心設計", 俊原科技股份有限公司。  
[2] 張智星, "Matlab程式設計與應用", 清蔚科技股份有限公司, 2000年2月。  
[3] 鈞思科技股份有限公司 編著, "視覺化建模環境 Simulink入門與進階", 2001年11月, 初版一刷。

- [4] 王偉修, 劉昌煥 著, "PC-Based 馬達控制器即時發展系統 Simu-Drive", 微鋒自動科技股份有限公司發行, 1998年。
- [5] 黃科憲, "永磁式同步電動機之效率改善", 碩士論文, 國立台灣科技大學電機系, 91年5月。
- [6] 許哲嘉, "永磁式同步電動機之參數調整", 碩士論文, 國立台灣科技大學電機系, 91年5月。
- [7] 邱森泰, "永磁式同步電動機伺服驅動系統之控制器參數調整", 碩士論文, 國立台灣科技大學電機系, 91年5月。
- [8] 劉昌煥 著, "電機機械", 東華書局, 92年5月, 第二版。
- [9] 劉昌煥 著, "交流電機控制", 東華書局, 92年5月, 第二版。
- [10] 林志一, 張嘉峰, 楊政達, 曾龍圖, "VisSim 動態系統模擬與即時控制", 台科大圖書股份有限公司, 2002年9月初版。
- [11] 唐佩忠 "VHDL 與數位邏輯設計", 高立圖書有限公司, 91年8月1日, 四刷發行。
- [12] 黃英哲, 董勝源, "TMS320C240原理與C語言控制應用實習", 長高科技股份有限公司2002年8月初版。
- [13] "DSP C語言與Simulink界面聯結操作手冊", 俊原科技股份有限公司, 90年7月, Ver. 1.0。
- [14] 陳文耀 編著, "電動機控制工程", 復文書局, 1998年1月, 五版發行。
- [15] 孫樹威 譯, "電機機械-Applying MATLAB", 美商麥克羅 希爾國際股份有限公司台灣分公司, 2002年12月, 初版一刷。
- [16] 廖東成, 王順源 譯, "電動機控制", 台灣培生教育出版有限公司, 91年5月, 一版一刷。
- [17] 詹前茂 著, "電機驅動控制理論與實驗", 新文京開發出版股份有限公司, 92年8月, 初版。
- [18] 黃繼震, "全數位化馬達控制參數自調適技術研究報告", 經濟部科專計畫, 90年4月, Ver 1.0。
- [19] 林義讓, 林清樺 編譯, "線性搬運技術與應用", 全華科技圖書股份有限公司, 84年3月, 再版一刷。
- [20] 廖聰明, "無刷馬達變頻器模組研究", 中山科學研究院委託計畫期末報告, 91年12月。
- [21] Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", Oxford University Press, 1990.
- [22] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford University Press, 1996.
- [23] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulink of Electric Machinery", Using Matlab/Simulink, Pearson Education Taiwan Ltd, 2003.