

# 全數位化線性馬達運動控制實務

歐宗勳、胡永柵、陳盛基

E-mail: 9125213@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本論文分別以有刷式旋轉馬達，無刷式交流馬達及線性馬達三種伺服系統，及使用全數位化四軸同動運動控制卡，以德州儀器公司（TI）的數位訊號處理器（DSP）搭配FPGA晶片運用於這些系統中，將設計好之控制器與SIMULINK作連結，經過運算後提供良好的控制參數進行馬達運動控制，論文中控制器設計以PID控制器及可變結構控制器為主要設計對象，並對控制器設計良好的控制參數是必然的。有刷式旋轉馬達方面，使用閉迴路二階低阻尼的暫態響應找尋系統模式，利用單位步階響應來規劃特性，而且以低阻尼系統為指標，做閉迴路控制可經由量測幾項重要的性能指標，得到系統的轉移函數，之後進行控制器設計與模擬。對於旋轉馬達或線性馬達方面，都將探討霍耳元件、反電動勢與電流命令訊號輸出之相對位置。DSP控制系統以交流式旋轉馬達及無刷直流線性作為控制架構，進行自調適系統鑑別，此方式可以快速且正確的鑑別出馬達模式，由於馬達在運轉時通常都會有許多未知的干擾，如摩擦力、背隙等，因此採用可變結構控制器進行控制，當系統進入滑動模式後，幾不再受參數及外界干擾的影響，使系統具有強健性與有效性，由模擬與實驗結果都證實此控制器比傳統PID控制器具有更佳的性能。

關鍵詞：可變結構控制器，PID控制器，DSP控制系統，無刷直流線性馬達

## 目錄

第一章 緒論	1.1 前言	--P1
	1.2 研究動機	--P2
	1.3 研究步驟	--P4
	1.4 系統架構	--P7
	1.4.1 直流有刷馬達系統架構	--P7
	1.4.2 永磁式線性直流無刷馬達系統架構	--P11
	1.4.3 DSP運動控制卡初始設定	--P13
	1.4.4 DSP（旋轉、線性）直流無刷馬達系統架構	--P15
第二章 直流伺服馬達的基本工作原理	2.1 直流有刷馬達工作原理	--P18
	2.2 直流無刷馬達工作原理	--P21
	2.2.1 應用無刷馬達	--P29
	2.2.2 直流無刷馬達伺服控制架構	--P32
	2.3 線性直流無刷馬達工作原理	--P33
	2.3.1 線性直流無刷馬達伺服控制架構	--P38
	2.4 線性與旋轉馬達的速度單位轉換	--P38
第三章 線性馬達驅動原理	3.1 簡介	--P41
	3.2 變頻器之分類	--P41
	3.3 六步方波換向原理	--P42
	3.3.1 反電動示波形	--P42
	3.3.2 轉子的位置感測	--P43
	3.3.3 換向及旋轉方向	--P43
	3.3.4 評論	--P45
	3.3.5 電流控制脈波寬度調變（PWM）	--P46
	3.4 變頻器產生正弦波PWM動作之原理	--P47
	3.4.1 電流控制PWM（CURRENT-CONTROLLED PWM）	--P49
	3.5 LBDCM驅動系統架構圖	--P50
	3.6 馬達動部位置測量之方法	--P53
第四章 控制器的設計	4.1 控制器的簡介	--P63
	4.2 PID控制器設計	--P64
	4.3 系統鑑別	--P66
	4.3.1 系統模式鑑別方法	--P67
	4.3.2 系統模式鑑別實驗	--P70
	4.4 PID控制器參數調整方法	--P72
	4.5 PID控制器之位置迴授參數設計	--P73
	4.6 PID控制器之實驗圖形	--P76
	4.7 可變結構控制器	--P80
	4.7.1 可變結構的由來	--P80
	4.7.2 研究動機	--P80
	4.7.3 可變結構設計的原理	--P82
	4.7.4 滑動模態設計原理	--P82
	4.8 逼近條件與平滑條件	--P85
	4.9 可變結構參數設計	--P90
	4.9.1 二階受控系統之可變結構參數設定要點	--P94
	4.9.2 直流有刷旋轉馬達參數計算	--P95
	4.10 參數對系統的影響	--P96
	4.10.1 參數對系統之影響	--P96
	4.10.2 參數對系統之影響	--P100
	4.10.3 參數對系統之影響	--P102
	4.10.4 高頻震盪的消除	--P104
	4.11 可變結構控制器之系統模擬與實驗	--P105
	4.11.1 直流有刷旋轉馬達定位控制實驗	--P105
	4.11.2 可變結構控制器之速度控制	--P108
	4.12 PID控制器與可變結構控制器之比較	--P111
	4.12.1 定位控制比較	--P111
	4.12.2 速度控制比較	--P113
	4.13 PID與可變結構控制器之討論	--P114
第五章 DSP伺服控制系統	5.1 馬達控制參數自調式原理	--P115
	5.1.1 伺服馬達的控制參數調整	--P117
	5.1.2 電流控制迴路	--P118
	5.1.3 扭力與磁場向量控制	--P121
	5.1.4 速度控制迴路	--P124
	5.1.5 位置控制迴路	--P126
	5.2 旋轉馬達應用與實驗	--P127
	5.2.1 旋轉馬達的系統架構	--P127
	5.2.2 電流控制迴路參數調整（調整電流量測的偏移量）	--P129
	5.2.3 電流開迴路參數估測	--P131
	5.2.4 電流控制迴路的控制器設計（調整電流量測的偏移量）	--P135
	5.2.5 閉迴路電流控制與模擬比對（調整電流量測的偏移量）	--P139
	5.2.6 向量控制迴路（調整電流量測的偏移量）	--P140
	5.2.7 速度控制回路（調整電流量測的偏移量）	--P144
	5.2.8 速度控制迴路的控制器設計	--P147
	5.2.9 閉環速度控制與模擬比對	--P149
	5.2.10 顯示參數自調式的建議參數	--P151
	5.2.11 位置控制迴路	--P152
	5.3 DSP運用於旋轉馬達之控制	--P154
	5.3.1 DSP運動控制卡之程式設計	--P155
	5.3.2 旋轉馬達定位控制之實驗圖形	--P157
	5.4 線性馬達應用與實驗	--P159
	5.4.1 線性馬達的系統架構	--P159
	5.4.2 調整電流量測的偏移量	--P161
	5.4.3 電流開迴路參數估測	--P161
	5.4.4 電流控制迴路的控制器設計	--P163
	5.4.5 閉迴路電流控制與模擬比對	--P164
	5.4.6 向量控制迴路	--P164
	5.4.7 速度控制迴路	--P166
	A.速度開迴路參數估測	--P166
	B.速度控制迴路的控制器設計	--P167
	C.閉迴路速度控制與模擬比對	--P168
	5.4.8 位置控制迴路	--P169
	5.4.9 可變結構理論運用於DSP線性馬達定位控制	--P170
第六章 結論		--P172
附錄A		--P174
附錄B		--P181
參考文獻		--P188

參考文獻

- [1] R. B., ARONSON, "ATTACH OF THE LINEAR MOTOR," MANUFACTURING ENGINEERING, 1997 MAY, PP. 60-71 [2] A., BASAK, "PERMANENT-MAGNET DC LINEAR MOTORS," OXFORD UNIVERSITY PRESS INC., 1996.
- [3] FAMOURI, P. "CONTROL OF A LINEAR PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR VIA EXACT LINEARIZATION METHODS", ENERGY CONVERSION, IEEE TRANSACTION ON , VOLUME: 7 ISSUE: 3 , SEPT. 1992 [4] WAKIWAKA, H., YAJIMA, H., YAMADA, H. AND ODA, J. "DESIGN AND EVALUATION OF LINEAR DC MOTOR FOR PEN RECORDER", MAGNETICS, IEEE TRANSACTIONS ON , VOLUME: 31 ISSUE: 6 PART: 2 , NOV. 1995 [5] YAJIMA, H., WAKIWAKA, H. AND SENHO, S. "CONSIDERATION ON HIGH-RESPONSE OF A LINEAR DC MOTOR", MAGNETICS CONFERENCE, 1997. DIGESTS OF INTERMAG '97., 1997 IEEE INTERNATIONAL , 1997 [6] C. L. LAI AND C. C. TASI, "MODELING AND VELOCITY CONTROL OF A SINGLE-SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR", PROC. OF 1998 R.O.C AUTOMATIC CONTROL CONF.,PP.577-584,1998.
- [7] DAMIANO, A. , GATTO, G., PISANO, A. AND USAI, E." DIGITAL SECOND ORDER SLIDING MODE CONTROL OF PM DC MOTOR" INDUSTRIAL ELECTRONICS, 1999. ISIE '99. PROCEEDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON , VOLUME: 1 , 1999 [8] C. L. LAI AND C. C. TASI, "ROBUST VELOCITY CONTROL AND POSITION CONTROL OF A SINGLE-SIDED LINEAR INDUCTION", PROC. OF 1998 R.O.C AUTOMATIC CONTROL CONF.,PP.897-904,1998 [9] CHO, D., KATO, Y. AND SPILMAN, D." SLIDING MODE AND CLASSICAL CONTROLLERS IN MAGNETIC LEVITATION SYSTEMS" IEEE CONTROL SYSTEMS MAGAZINE , VOLUME: 13 ISSUE: 1,FEB.1993 [10] 陳永平, "可變結構控制器設計", 全華科技圖書股份有限公司, 民國88年九月.
- [11] 楊伯森, "線性馬達可變結構控制器設計與模擬", 逢甲大學自動控制工程研究所, 民國89年 [12] ADVANTECH, "PCL-727 12-CHANNEL D/A OUTPUT CARD USER'S MANUAL", PART NO.2003727000 REV .A1 PRINTED IN TAIWAN, AUGUST 1993 [13] TITAN SERIES MOTION CONTROL CARD-PROGRAMMERS GUIDE, SYSCOR R&D INC., CANADA, 1999.
- [14] TITAN SERIES MOTION CONTROL CARD-PROGRAMMER'S GUIDE, SYSCOR RESEARCH & DEVELOPMENT INC. 1999 [15] TMS320F/C24X DSP CONTROLLER REFERENCE GUIDE, PERIPHERAL LIBRARY AND SPECIFIC DEVICES, NUMBER SPRU161C, TEXAS INSTRUMENT, JUNE 1999.
- [16] A. BASAK, "PERMANENT MAGNET DC, LINEAR MOTOR", OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1996.
- [17] C.W.GREEN AND R.J PAUL, "APPLICATION OF DC LINEAR MACHINES AS SHORT-STROKE AND STATIC ACTUATORS", PROC.IEE, VOL.116, NO.4, 1969, PP.599-604 [18] A. BASAK AND A.F. FLORES-FILHO, "STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A DOUBLE ARMATURE DC LINEAR MOTOR", IEE JAPAN, VOL.118-D NO.9, 1998, PP.1050-1055.
- [19] FRANKLIN, G.F., J.D.POWELL, AND EMAMI-NAEINI, "FEEDBACK CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS", CHAP.7, EDITION, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1994.
- [20] "SERVOSTAR PRODUCT SERIES INSTALLATION AND SETUP MANUAL M-SU-000-H ISSUE 6", KOLLOMORG EN.
- [21] 張富鈞, "線性馬達驅動系統之研製" 逢甲大學自動控制工程研究所碩士論文, 民國九十年六月 [22] 張碩, "自動控制系統", 四版, 鼎茂圖書出版有限公司, 台北, 台灣, 1997 [23] U.ITKIS, "CONTROL SYSTEMS OF VARIABLE STRUCTURE ", 1976 BY KETER PUBLISHING HOUSE JERUS-ALEM LTD.
- [24] 陳永平, "可變結構控制設計", 全華科技圖書股份有限公司, 1999.
- [25] 高為炳, "可變結構控制理論基礎", 中國科技出版社, 1990.
- [26] 曾世峰, "線性直流無刷馬達-自調適DSP控制器之設計", 大葉大學電機工程研究所碩士論文, 民國九十年六月 [27] TITAN SERIES MOTION CONTROL CARD-PROGRAMMER'S GUIDE, SYSCOR RESEARCH & DEVELOPMENT INC. 1999.
- [28] ASTROM, K. J. AND T. HAGGLUND, "AUTOMATIC TUNING OF PID CONTROLLERS", INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA, 1988.
- [29] "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, 民國九十年四月