

73-231

268

RW1025/01

直流馬達速度控制 ・ 伺服系統(基礎篇)

李適中 編著



全華科技圖書公司印行

自序

來自美國康乃爾大學的萬又煊教授，在今年國建會的分組討論中曾經指出，我國在未來的五年到十年之內，必將遭遇到新技術的衝擊，而在各種新技術之中，尤以採取微電腦以提高自動化程度的技術最為明顯。當然，要全面促成自動化並非易事，必須機械和電子業的密切配合，以求對自動化技術設計的突破，而其中最重要也是目前國內最須要突破的，可說是精密控制伺服機構的建立。

現代化的巨輪，已使我國逐漸由開發中國家，邁向已開發國家之列，為應付與日俱增的商業競爭並適應當前國防上自衛的須求，目前我國正積極發展精密工業與高度尖端的國防工業，然而在研製許多精密系統如數值工具機、計算機週邊系統甚或飛機、快艇、精密航儀與導向飛彈的過程之中，國人所遭遇的技術瓶頸，也是目前國內技術最弱的一環，便是伺服機構的精密控制，因此整體系統的精密度，往往由於伺服機構的設計不良而告喪失怠盡，實在令人痛心。而國內在這方面的資料又相當缺乏，更是進步的一大阻力。

筆者就學台大電機研究所期間，有幸參與國科會“直流馬達數值伺服

系統之研製”計劃，並將研製成果發表為碩士論文，服役期間又在海軍造船廠的電工場內擔任工程官，從事實際的修護工作，因為工作及研究上的須要，曾遍尋國內外有關直流馬達精密控制的參考資料，可是找遍坊間之中外書籍，却發現有關馬達控制的書籍，多為較古老的電磁開關式控制或SCR控制，屬於新式的晶體式及數位式精密控制者，實在寥寥無幾，而且大都語焉不詳，鑑於以上原因，再加上筆者有幸得以從國內外之最新書籍和雜誌上收集到部份資料，並由實作與研究中得到一些心得，於是乃敢野人獻曝，著手編撰本書，以期為國家的科技升級盡一點棉薄之力。

過去，交流馬達一直是最普遍的動力來源，而直流馬達却一直得不到普遍的重視。近年來，由於自動化的衝擊使得工業的水準與科技的觀念有了重大的改變，直流馬達較易控制的特性，乃使它重新擡頭再度為人們所重視。目前各種特性及良好的直流馬達，加上精心設計的回授元件與驅動系統，已成為精密控制伺服系統之主流，即使是步進式馬達，在與之相較之下，亦黯然失色。

本書將對直流馬達精密控制加以詳細的介紹，全書共分為基礎篇與應用篇兩冊，主要的資料來源有美國飛船電氣公司的技術手冊“直流馬達·速度控制·伺服系統”一書、筆者的研究論文、“IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentations”、“Control Engineering”及郭宗儀教授(B.C.KUO)在伊利諾大學主持的增量控制研討會論文集等等。基礎篇共分為八章，乃是依據“直流馬達·速度控制·伺服系統”一書，加以消化理解，並加上許多新的資料與物理觀念之後，重新編撰而成的，目的在使讀者對直流馬達的精密控制，得到一個全盤的了解與基本的概念。由第一章到第四章，將介紹直流馬達與直流轉速發電機的基本原理、最新型式、測試方法、數學模式等觀念，使讀者對控制系統的基本元件能有透徹的了解，更可使已熟悉直流馬達基本原理的讀者，進一步對新型的伺服馬達也能夠有一個新的認識。第五章與第六章，則介紹速度控制與伺服系統的觀念，對基本控制原理、伺服元件、數學基礎，均有詳盡的介紹，使讀者對直流馬達控制能有初步的了解，以奠定研究精密控制的基礎。第七章將介紹速度與定位兩種精密控制的方法與

基本原理，以做為應用篇中分析與設計的基礎；第八章則介紹利用微處理機控制直流馬達伺服系統的新觀念，對系統的基本原理、控制方式、硬體電路、軟體程式及分析方法均有詳盡的介紹，使讀者得以迅速吸收這種新的觀念。本書的應用篇是依據各方的資料整編集合而成的，書中將列舉直流馬達精密控制的應用實例，並舉例說明伺服系統的設計方法，同時亦提及系統最佳化設計的方法與“智慧”控制（筆者自創名稱）的原理，此外將介紹無刷式直流馬達與光電式數位譯碼器等新元件，對目前問世的產品亦有專門的介紹，並列出系統及馬達的檢修表，以利應用之所須。

本書提供了熟悉控制原理而不熟悉馬達應用，或熟悉馬達應用而不熟悉控制原理的讀者，一個溝通理論與實際的橋樑，使他們能得到全盤的瞭解。本書更對熟習計算機及電子電路而欲從事伺服應用的讀者，提供了一個最好的快速訓練教材，使讀者很快地培養出從事伺服應用的能力。為避免發生曲高和寡的流弊，本書特重物理觀念的闡述，因此數學基礎較弱或無須擔任設計工作的讀者，亦可做重點式的部份吸收，將數學分析列入欣賞參考範圍，而由物理觀念上獲得許多裨益，本書亦適於工專電機科高年班或大學電機或控制系採用為教科書或參考書。盼望各階層讀者均能由本書獲得所須要的新知與助益，則筆者將引以為榮。

本書編者之時，承蒙各級長官與諸位友人的支持與鼓勵，謹此致上由衷的謝忱。

編者才疏學淺，經驗見識有限，疏漏不妥之處在所難免，尚祈諸先進及讀者諸君惠予指正。是幸。

最後，謹以此書敬獻予含華茹苦養育我長大成人的我最敬愛的父母親

李 適 中

民國六十九年十一月於海三廠電工場

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所將提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，且循序漸進。

現在，我們將這本「直流馬達速度控制、伺服系統」呈獻給您，使您能正確了解伺服系統的工作原理及應用。在精密的自動控制系統中，直流馬達的使用日益廣泛，加上精心設計的回授元件與驅動系統，已成為精密控制伺服系統之主流。本書針對此一趨勢，詳細討論直流馬達的精密控制；對熟悉控制原理而不熟悉馬達應用，或熟悉馬達應用而不熟悉控制原理的讀者，本書是一個溝通理論與實際的橋樑，使他們能得到全盤的了解。深信經由本書可使您徹底瞭解直流馬達的控制及伺服系統的工作原理。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習有關控制系統系列叢書，我們將全華公司一整套控制系統叢書按照深淺順序以流程圖方式列之於後，只要您按照順序詳加研讀，除可減少您摸索時間外，更可使您具備有控制系統方面完整的知識，希望您能善加利用。有關以下各書內容如您需要更進一步資料時，歡迎來函連繫，我們將可給您滿意的答覆。

目 錄

第一章 直流馬達

1-1 基本原理	1
1-1-1 直流馬達的歷史沿革	1
1-1-2 轉矩與功率的基本概念	2
1-1-3 電磁感應定律	4
1-1-4 磁路原理	6
1-1-5 電壓與轉矩方程式	7
1-1-6 換向原理	10
1-2 馬達特性之比較	12
1-2-1 概說	12
一、繞線磁場馬達	13
二、永磁式馬達	15
1-3 馬達方程式與轉移函數表示法	17
1-3-1 電氣方程式	18
1-3-2 動力方程式	19
1-3-3 馬達的轉移函數	20

2 直流馬達・速度控制・伺服系統

1-3-4 扭力共振現象	24
1-3-5 速度 - 轉矩特性曲線	34
1-4 直流馬達的功率散逸	36
1-4-1 功率散逸的來源	36
一、繞組損耗 $I_a^2 R$	36
二、電刷接觸損耗	37
三、渦流損耗	38
四、磁滯損耗	38
五、氣隙與摩擦損耗	38
六、換向瞬間的短路電流	39
1-4-2 功率散逸的計算	40
1-4-3 定速下的散逸	41
1-4-4 增量運動下的散逸	43
1-5 直流馬達的溫度特性	45
1-5-1 連續運轉狀況	45
1-5-2 斷續運轉狀況	46
1-5-3 熱模型	47
1-6 馬達特性與溫度的關係	48
1-6-1 電樞電阻	48
1-6-2 轉矩常數 k_T 與電壓常數 k_E	51
1-6-3 馬達轉矩額定的降低	51
1-7 馬達的其它特性	53
1-7-1 安裝	53
1-7-2 雜訊	55
1-7-3 雜訊與動力平衡	55
1-7-4 偏心負載所引起的雜訊	56
1-7-5 軸承雜訊	56
1-7-6 電刷雜訊	56
1-7-7 週遭狀況的通盤考慮	56

1-7-8 電刷的磨損狀況	57
1-7-9 馬達壽命	57
1-7-10 永磁式馬達的去磁效應	58

第二章 特種直流馬達

2-1 動圈式馬達	63
2-1-1 動圈式馬達	63
2-1-2 動圈式馬達的額定特性	66
2-1-3 動圈式馬達的溫度特性	69
2-1-4 動圈式馬達的共振現象	71
2-1-5 去磁電流	73
2-2 k_T 可變的永磁式馬達	73
2-2-1 概說	73
2-2-2 繞線磁場馬達	74
2-2-3 新型馬達	75
一、混合型馬達	75
二、直軸電樞反應控制型馬達	76
2-2-4 倒置型馬達	79

第三章 直流轉速發電機

3-1 概說	81
3-2 原理	82
3-3 直流轉速發電機的类型	84
3-4 安裝特性	84
3-5 溫度效應	88
一、超滯定性發電機	88
二、穩定性發電機	88
三、補償發電機	88
四、無補償發電機	89

3-6 線性化與負載效應	89
--------------	----

第四章 直流馬達與直流轉速計的測試

4-1 直流馬達的特性測試	93
4-1-1 軸向移位測試	93
4-1-2 垂直移位測試	94
4-1-3 軸偏心測試	94
4-1-4 轉動慣量的測試	95
4-1-5 電阻值測試	96
4-1-6 電感量測試	97
4-1-7 摩擦轉矩與起動電流的測試	98
4-1-8 無載電流與轉動損耗測試，無載電壓，無載速度測試	99
4-1-9 去磁電流的測試	100
4-1-10 轉矩常數的測試	100
4-1-11 電壓常數的測試	101
4-1-12 電氣時間常數的測試	102
4-1-13 機械時間常數的測試	104
4-1-14 轉矩漣波的測試	104
4-1-15 速度調整常數的測試	106
4-1-16 效率測試	107
4-1-17 頻率響應的測試	107
4-1-18 新購入馬達之檢查	108
4-2 轉速發電機的測試	110
4-2-1 輸出阻抗的測試	110
4-2-2 電壓梯度測試	111
4-2-3 電壓極性測試	111
4-2-4 發電機漣波測試	111
4-2-5 溫度係數的測試	114
4-2-6 介電性測試	114

4-2-7 線性程度測試	115
4-2-8 穩定性測試	116
4-2-9 新購入發電機之檢查	117

第五章 單向速度控制

5-1 基本的控制方式	121
5-1-1 控制器簡介	121
5-1-2 傳統的開路式控制	122
5-1-3 閉路式控制	126
5-1-4 速度控制與伺服系統的區分	127
5-2 速度控制・單象限控制器	128
5-2-1 單象限控制器的電壓與電流	128
5-2-2 系統的運轉狀況	129
5-2-3 動力制動	132
5-3 驅動放大器	134
5-3-1 線性放大器	134
5-3-2 轉矩的限制	140
5-3-3 動力制動裝置	142
5-3-4 可逆向的速度控制	142
5-3-5 受控的加減速系統	143
5-3-6 開關放大器	144
5-3-7 波寬調諧放大器	147
5-3-8 減速時能量再生現象對PWM系統的影響	152
5-3-9 SCR 控制器	155
5-3-10 盒裝式伺服放大器	157

第六章 速度控制與伺服系統

6-1 概說	159
6-2 伺服原理	160

6 直流馬達・速度控制・伺服系統

6-2-1 拉氏轉換	160
6-2-2 反拉氏轉換	161
6-2-3 轉移函數	162
6-2-4 方塊圖	165
6-2-5 直流馬達的轉移函數表示法	166
6-2-6 放大器的轉移函數表示法	170
6-2-7 穩定性	170
6-2-8 根軌跡法	171
6-3 伺服元件	181
6-3-1 直流馬達	181
6-3-2 放大器	183
一、電壓放大器	183
二、電流放大器	183
6-3-3 放大器馬達系統	183
6-3-4 轉速計	184
6-3-5 電位器	185
6-3-6 直線差動變壓器 (LVDT)	187
6-3-7 轉速譯碼器	187
一、增量式譯碼器	187
二、絕對式譯碼器	188
6-4 伺服系統	189
6-4-1 概說	189
6-4-2 速度控制系統	190
6-4-3 定位控制系統	192
6-4-4 轉矩控制系統	194
6-4-5 混合控制系統	194
6-5 系統的特性	195
6-5-1 系統的單階響應	195
一、過阻尼響應	196

二、臨限阻尼響應	196
三、欠阻尼響應	196
四、不穩定響應	197
6-5-2 系統的頻帶寬度	198
6-5-3 扭力共振現象所產生的影響	199
6-6 伺服放大器	200
6-6-1 線性放大器	200
6-6-2 SCR 放大器	202
6-6-3 開關放大器	202
一、概說	202
二、系統元件的方塊圖	203
三、系統的轉移函數	205
四、開關頻率與電流變化	207
五、馬達的功率散逸	209
六、電感量的選擇	210
6-7 如何使系統合意地工作	211
6-8 應用於伺服系統的永磁式馬達	215

第七章 直流馬達精密控制

7-1 概說	219
7-2 轉速的精密控制 - 鎖相伺服系統	220
7-2-1 概說	220
7-2-2 系統的元件	220
一、相位比較器	221
二、低通濾波器	223
三、放大器	223
四、馬 達	224
五、譯碼器	224
7-2-3 系統的設計與穩定	225

8 直流馬達・速度控制・伺服系統

7-2-4 系統的一些特殊性質	227
一、速度獲得與鎖住範圍	228
二、速度的變動	229
7-3 位移精密控制 - 增量運動伺服系統	231
7-3-1 概說	231
7-3-2 直流馬達增量運動伺服系統	234

第八章 直流馬達微處理機控制系統

8-1 概說	237
8-2 微處理機控制的直流馬達伺服系統	238
8-2-1 微處理機簡介	238
8-2-2 系統描述	239
8-2-3 控制器	239
一、可將微處理機視為一個黑箱	239
二、輸入裝置	240
三、輸出裝置	241
四、微處理機扮演一差分方程式的角色	241
8-2-4 系統分析	243
一、Z轉換法	245
二、系統穩定度	246
三、利用微處理機做迴路補償器	247
8-2-5 設計實例	248
一、比例控制器	249
二、領先滯後補償器	251
8-3 微處理機控速系統	253
8-3-1 概說	253
8-3-2 系統觀念的通視	254
8-3-3 控速系統的主要元件	255
一、延時可控式脈波產生器	255

二、數位式速度量度	257
1. 轉速譯碼器	258
2. 軟體計數器	258
3. 設計時應考慮的事項	260
三、控速程式	262
四、軟體結構	262
8-3-4 系統分析	264
8-3-5 系統的改良	269
8-3-6 結語	269

附錄：名詞釋義、符號與單位系統

一、名詞釋義	271
二、符號與單位系統	275
索 引	283

1

直流馬達

1-1 基本原理

1-1-1 直流馬達的歷史沿革

直流（DC）馬達，是一種早期用來將電能轉換為機械能的裝置。如果欲追溯它的起源，則應當首推由法拉第（Michael Faraday）構思並親自試驗成功的盤形機器，法拉第也就是建立電磁基本觀念的那位實驗科學家。

法拉第的原始構想發表之後，很快就被加以改良，於是在 1880 年代，直流馬達不斷地推陳出新，成為當時工業界的寵兒。可惜好景不常，當 60 赫交流電成為美國的國家標準電源，同時 50 赫交流電也普遍於歐洲之後，低成本的交流感應式馬達便因應而生，一夜之間成為新的寵兒，於是直流機乃日趨式微。多年來，直流馬達的使用大都限制於特殊的用途之中，因為它的某些獨特性質（例如它的高起動轉矩特別適用於牽引機）在特殊應用中非常好用，可以扯平它較高的造價，當然手提式裝備（使用電池者）限於電源，使用的馬達則非它莫屬了。

2 直流馬達速度控制·伺服系統

直流馬達極易控制轉速是早為人知的事實，近年來由於它特別適於與新型的矽控整流體（SCR）及電晶體放大器相匹配，更由於磁性材料及碳刷的不斷更新，使人們對直流機又重新發生了興趣。尤其是最近各方面對新型高精密度馬達的需求量日增，許多新式的精密馬達紛紛出籠，如無刷式、動圈式等等，更是令人一新耳目，直流馬達精密控制已成為一種最新的科技學門。

1-1-2 轉矩與功率的基本概念

欲了解發生於馬達上的電·機能量轉換，所依循的原理為何？首先便須熟知許多機械上的基本概念。第一個概念是轉矩（Torque）的觀念，有一力作用於一端固定的槓桿時，除非受到阻礙，槓桿將繞著支點旋轉，而引起這種旋轉運動的因素，便稱為轉矩。它的定義是作用力和支點至受力點距離（長度）的乘積，請參閱圖 1-1。

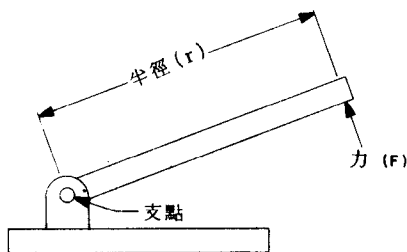


圖 1-1 對半徑為 r 的槓桿，施以一大小為 F 的作用力，所產生的轉矩為 $F \cdot r$ 。

由圖 1-1 可知，根據定義，轉矩（ T ）的方程式可表為：

$$T = F \cdot r \quad \left[\begin{array}{l} \text{牛頓米；牛頓，米} \\ \text{或〔盎司·吋；盎司，吋〕} \end{array} \right] \quad (1-1)$$

將大小方向各不相同的許多力，同時作用於槓桿的不同位置時，其合成轉矩亦可求出。首先將反時針方向的轉矩定為正值，順時針方向的轉矩

定為負值，則其合成轉矩應為作用於槓桿的每一轉矩分量之和，若將每一 $\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i$ 標以適當的正負號，便可將圖 1-2 所示系統的合成轉矩表為：

$$\mathbf{T} = \Sigma (\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i) \quad (1-2)$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{F}_1 \mathbf{r}_1 - \mathbf{F}_2 \mathbf{r}_2 - \mathbf{F}_3 \mathbf{r}_3 \quad (1-3)$$

利用這種簡明的轉矩定義，便可正確地表示出由馬達輸出軸所看到的轉動慣量。這種可量度的輸出轉矩，等效於將馬達的輸出轉矩，減去許多負轉矩（軸承和碳刷的磨擦轉矩，齒輪磨擦轉矩等）後的淨值。

建立了轉矩的概念後，接著便須了解功率（Power）的意義。功率乃是指作功或施能的額定。功（或能）亦可定義為將轉矩作用一所予的位移量之出力。

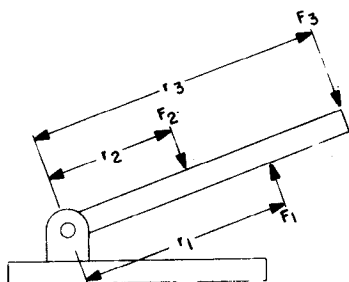


圖 1-2 許多作用於不同點的作用力，其合成的轉矩值乃是標以適當正負號的所有個別轉矩之總和。

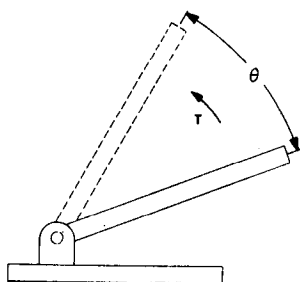


圖 1-3 功的定義為轉矩作用一所予的角位移所輸出的能量

如圖 1-3 所示，一大小為 $\mathbf{T}$ 的轉矩，作用 θ 的角度之後，它所作的功應為：

$$\mathbf{W} = \mathbf{T} \cdot \theta \quad \text{〔焦耳；牛頓米，徑度〕} \quad (1-4)$$

或〔盎司·吋；盎司·吋，徑度〕

假使上述的作功 $\mathbf{W}$ ，是在 t 時間內完成的，則其功率可表為：