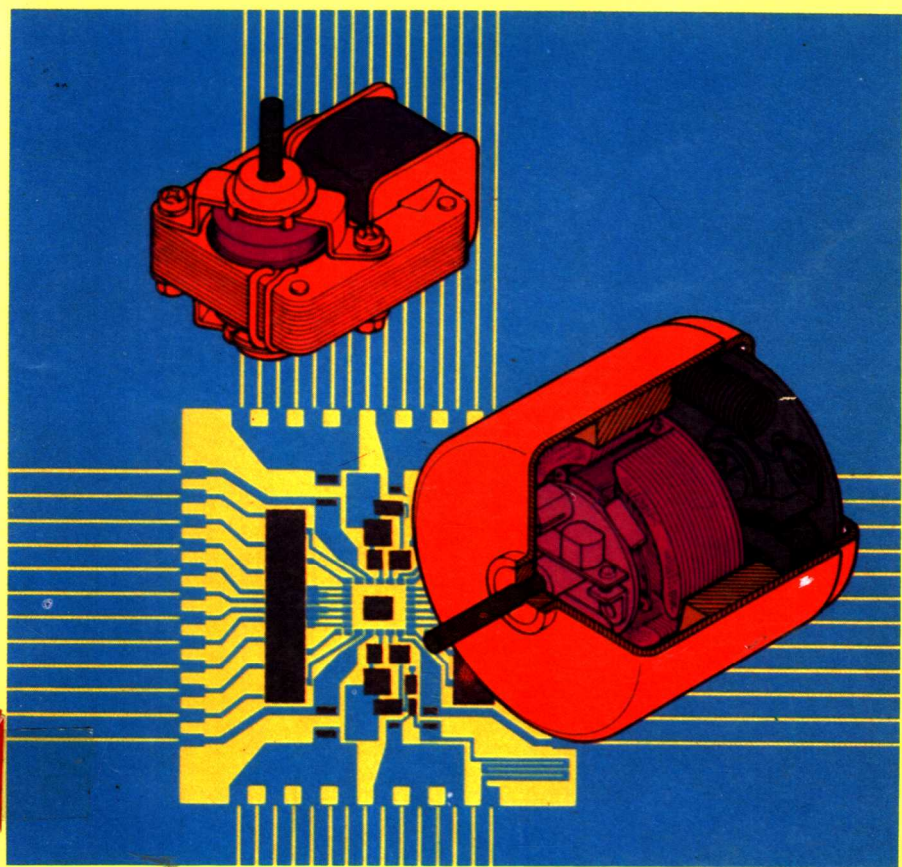


小型電動機 選擇與使用

徐偉編

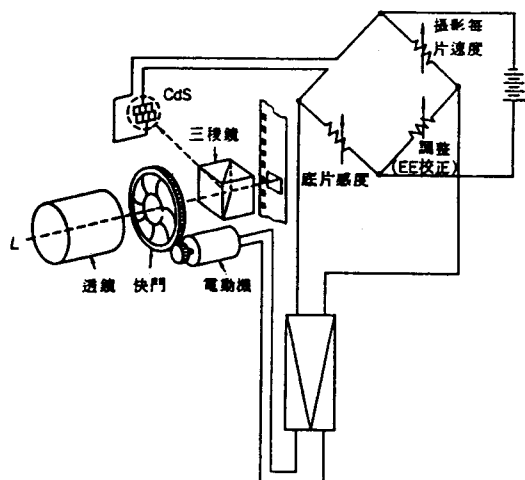


華美科技出版社出版

小型電動機

選擇與使用

徐偉編



永久磁鐵直流伺服電動機控制系統

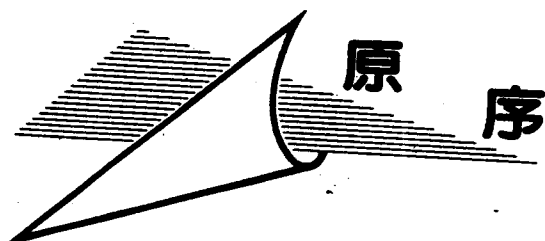
小型電動機選擇與使用

編 者 徐 偉

出版者 華美科技出版社
九龍深水埗元州街312號
秉暉工業大廈五樓

承印者 本社印刷部
九龍深水埗元州街312號
秉暉工業大廈五樓

定 價 港幣叁拾柒元



近年來能量傳達隨著機電迅速地發展，而成為最優秀的電力，動力變換的小型電動機也因此而逐漸受到重視。也因為如此，作者才有這個機會來寫這本書，所以必須集中心力，盡力來完成。

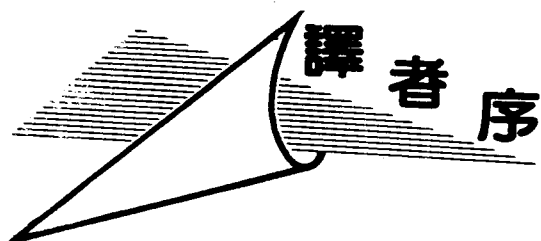
若只研究電動機的應用原理，可能較難理解，並且花費較多的時間。所以電動機電磁理論基礎是必須去深入理解的，故應依照其基礎知識，及有關應用的物理概念去理解，那將會更為容易、有趣。

由於這種觀念，使我們對物理概念日益重視，因而，培養“基礎能力”是首要的，同時對其現象的敘述，儘可能地簡單明瞭。基礎性的敘述及有關的應用，僅取其代表者，而這些都是研究的心得，若用心學習，則其他的應用例，也能觸類旁通。

關於小型電動機方面的製造以及利用，其學習對象大都為高工及大專程度，筆者也曾設法擴大學習對象的範圍，但在此所得的知識，決非程度較低淺者所能理解的。

因著者學力疏淺，對於以上各點及著者的獨自見解，恐怕多少也會產生錯誤，希望諸位讀者不吝指正。

閱讀本書時，不須依照本書所寫的一字不漏的背誦，而應該把握其物理性的基本概念，由此達到結果的順序，再由讀者以自己的方法去做，相信會有更適當而有趣的研習。

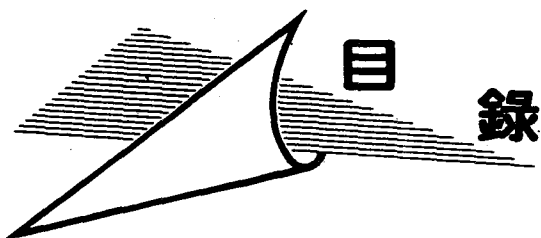


本書共分為九章，第一章解說電動機轉動的電磁鐵理論，第二章說明電動機轉動的原理，第三章敘述電動機的繞線鐵心與性能，第四、第五章說明電動機的選擇法，第六章為各種電動機的控制，第七章說明位置控制與電動機的使用法，第八章述說速度控制與電動機的使用法，第九章說明同步化控制與電動機的使用法。即依原理、選擇法、控制與使用法的順序進行討論。目前電機系（科）的畢業生，所碰到的問題已不是傳統的電機機械，而是精密小型的電動機，此種電動機種類繁多，而且有不同的驅動電路，廣泛應用於工業控制、電腦及其周邊機器和民生機器等方面，故本書是電機、電子、控制科系的學生必讀的好書。

本書具有以下幾項優點：

- (1) 按照原理、選擇法、控制及使用法的順序進行討論，層次分明。
- (2) 列條說明，簡單明瞭，容易理解。
- (3) 沒有艱深的數學理論，只要稍具電機電子的基礎知識，便可瞭解。
- (4) 附有很多的控制電路與方塊圖，可在實驗室自行試作。

因其具有以上的優點，乃不揣淺陋，利用公餘時間，編譯本書，供各界參考之用。



目

錄

1 轉動電動機的電磁理論

1. 磁場與磁通密度	1
① 磁的流通	2
② 導磁係數	2
③ 邊界條件	3
④ 空隙與等效導磁係數	4
⑤ 鐵心內的磁場強度	5
2. 磁性物質與磁特性	6
① 磁性物質	6
② 磁滯環路	6
3. 電磁力	9
① 磁力的本質	9
② 馬克士威應力	11
③ 電磁轉矩與磁阻轉矩	13
④ 永久磁鐵系的能量	15
⑤ 轉矩公式	16
⑥ 電動機轉矩與同步化力	18
4. 電動力	20
① 感應電勢	20
② 磁通密度分佈與感應電勢	23
③ 電力與動力	24

2 產生旋轉的電路原理

27

1. 電動機的旋轉磁場 28
 - ① 旋轉磁場與線圈 28
 - ② 交變磁場與旋轉磁場 29
 - ③ 步級旋轉磁場與脈波旋轉磁場 32
 - ④ 簡易線圈與等效旋轉磁場 33
 - ⑤ 蔽極線圈與移動磁場 34
 - ⑥ 利用二相線圈作單相運轉 35
 - ⑦ 槽線圈與槽效應 37
2. 電動機的電磁電路 38
 - ① 電動機與單位系統 38
 - ② 磁路 39
 - ③ 圓周方向磁通型與半徑方向（徑向）磁通型磁路 39
 - ④ 槽周圍的磁路 40
 - ⑤ 永久磁鐵電路 41
 - ⑥ 最大能量乘積與最佳動作點 42
 - ⑦ 電磁鐵電路 44
 - ⑧ 電磁電路的應用 46

3 電動機的繞線鐵心與其特性

51

1. 電動機的繞線鐵心 52
 - ① 繞線鐵心的形狀 52
 - ② 槽的影響與對策 52
 - ③ 鐵損與等效電路 55
 - ④ 充實鐵心與磁的皮膚效應 57
 - ⑤ 鑲齒與磁場強度的分佈 59
2. 電動機的特性 62
 - ① 線圈與效率 62

② 效率的評估	63
③ 形狀、效率、經濟性	63
④ 耐熱性與效率	64
⑤ 小型化與效率	64
⑥ 控制性能常數	67
⑦ 可靠性、維護性、剛性	68
⑧ 性能常數的計算實例	68

4 整流子電動機的選擇法	73
1. 整流子電動機及其種類	74
2. 直流電動機的選擇法	76
① 直流電動機的原理與特徵	76
② 直流電動機的特性	79
③ 直流電動機的構造與用途	87
3. 通用電動機的選擇法	96
① 通用電動機的原理	96
② 通用電動機的特性	96
③ 通用電動機的構造與特性	99
④ 優點與缺點	101
⑤ 用途	101

5 旋轉磁場電動機的選擇法	103
1. 旋轉磁場電動機與種類	104
2. 旋轉磁場電動機的原理與轉矩特性	107
① 永久磁鐵轉子電動機的原理與轉矩特性	107
② 磁阻同步電動機的原理與轉矩特性	111
③ 磁滯電動機的原理與轉矩特性	116
④ 感應電動機的原理與轉矩特性	121
3. 旋轉磁場電動機的三態	126

① 有極性同步電動機的三態	126
② 磁滯電動機的三態	127
③ 感應電動機的三態	128
4. 旋轉磁場電動機的效率改善	131
① 旋轉磁場電動機與效率	131
② 永久磁鐵轉子電動機的效率改善	132
③ 磁阻轉子電動機的效率改善	133
④ 磁滯電動機的效率改善	134
⑤ 感應電動機的效率改善	135
5. 旋轉磁場電動機的構造與用途	136
① 永久磁鐵轉子電動機的構造與用途	136
② 磁阻轉子電動機的構造與用途	141
③ 磁滯電動機的構造與用途	144
④ 感應電動機的構造與用途	148

6

各種電動機的控制

1. 電子伺服機構	152
① 電動機與電子伺服機構	152
② 位置控制	153
③ 速度控制	156
④ 同步化控制	157
2. 控制理論	160
① 反饋理論	160
② 控制動作	161
③ 伺服系統的落後與漣波雜訊	162
3. 電動機的驅動控制方式	164
① 電壓源驅動與電流源驅動	164
② 整流子電動機的驅動控制方式	166
③ 旋轉磁場電動機的驅動控制方式	168

4. 有關伺服系統電動機的控制性能	171
5. 位置控制系統的種類與穩定性	175
6. 非同步伺服電動機的速應性	176
7. 定速控制系統的種類與定速精確度	177
8. 對速度控制，非同步電動機的控制性能	179

7

位置控制與電動機的使用法

183

1. 類比位置控制

184

- ① 使用直流電動機作位置控制 184
- ② 使用二相伺服電動機作位置控制 185
- ③ 使用步進電動機作位置控制 186
- ④ 使用無刷電動機作位置控制 187
- ⑤ 使用可動子電動機(forcer)作位置控制 188

2. 數位(硬體)位置控制

189

- ① 數位類比併用位置控制 189
- ② 相位比較式位置控制 192
- ③ 開環控制 194

3. 數位(軟體)位置控制

196

- ① 微算機(微電腦)的位置控制 196
- ② 適應控制 201
- ③ 非線性最適控制 202
- ④ 使用向量控制(驅動控制)的位置控制 205
- ⑤ 利用轉矩角控制的位置控制 211

8

速度控制與電動機的使用法

213

1. 類比速度控制

214

- ① 直流電動機的控制 214
- ② 感應電動機的控制 221
- ③ 無刷電動機的控制 224

④ 急遽變速定速控制	226
⑤ 超低速控制	227
2. 數位(硬體)速度控制	228
3. 數位(軟體)速度控制	229
① 偏移控制	229
② 抖動控制	232
③ 非線性最佳控制	233
④ 非線性補償控制	237

9 同步化控制與電動機的使用法

1. 類比同步化控制	242
① 頻率調變方式	242
② 制動伺服方式	244
③ VH閉鎖方式	245
④ 石英閉鎖方式	246
⑤ 同步化控制系統的IC化趨勢	246
2. 數位(硬體)同步化控制	251
① 直流電動機的同步化控制	251
② 磁滯電動機的同步化控制	253
3. 數位(軟體)同步化控制	258
① 感應電動機的同步化控制	258
② 無刷電動機的同步化控制	259

轉動電動機的電磁理論

- 1 磁場與磁通密度・2
- 2 磁性物質與磁特性・6
- 3 電磁力・9
- 4 電動力・20

1. 磁場與磁通密度

① 磁的流通

磁的流動必定帶有電流，而電的流動附帶有電荷與位移磁流（ $-\partial B/\partial t$ ， B ：磁通密度， t ：時間）。但磁流並無磁荷存在，故無對應傳導電流的傳導磁流。又磁的流動帶有傳導電流、位移電流、電子流、離子電流、電子自轉（spin）電流等，所以說磁通為連續性的（ $\text{div } B = 0$ ）。

② 導磁係數

磁場強度以 H 表示，而磁通密度以 B 表示，則

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad \dots\dots\dots 1.1$$

上式 μ = 導磁係數

μ_0 = 在真空中的導磁係數

μ_r = 相對導磁係數

導磁係數為物質本身所具有的，就磁性物質而言其值通常都隨著磁場強度或溫度而變化。如用符號表示，可分為實數部分及虛數部分。複數部分為

$$\mu = \mu_r - j\mu_i \quad \dots\dots\dots 1.2$$

上式 $\mu_r = \mu$ 的實數部分

$\mu_i = \mu$ 的虛數部分

μ_r 為產生比例磁場強度 H 的磁通密度，以及空間構成儲蓄磁能的電

感成分。相對 μ_i 的存在，於磁壁間移動，當磁區內電子自轉電流的方向變化時，其意義為等效的摩擦存在。對磁場強度產生 $t/2$ 落後的磁通密度，變為熱能及構成等效電阻的成分。

③ 邊界條件

如圖 1.1 所示，為二個不同物質接觸時，對接觸面上的磁場強度以及磁通密度和物質 1 與 2 的關係如下所示。

- (1) 與接觸面方向平行的磁場彼此相等。
- (2) 與接觸面方向垂直的磁通密度彼此相等。

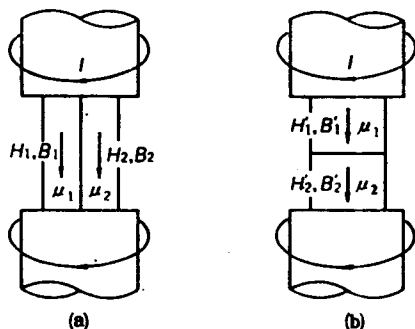


圖 1.1 邊界磁場強度與磁通密度的關係

換言之，與接觸面平行的磁場強度，以及垂直的磁通密度在其面上為連續性。

相反的，與接觸面平行的磁通密度，和垂直的磁場強度，在該面都能得到階段性急遽變化的意義。

圖 1.1 為

$$\left. \begin{array}{l} H_1 = H_2, \quad B_1 \neq B_2 \\ B_1' = B_2', \quad H_1 \neq H_2' \end{array} \right\} \dots\dots\dots 1.3$$

例如，電動機如圖 1.2 所示，通過空隙（導磁係數 μ_0 ）磁性物質（導磁係數 μ' ）進入磁通時為

4 小型電動機選擇與使用

$$\left. \begin{aligned} H_- = H'_-, \quad \frac{B_-}{\mu_0} &= \frac{B'_-}{\mu'} \\ B_+ = B'_+, \quad \mu_0 H_+ &= \mu' H'_+ \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots 1.4$$

在此如求 θ 與 θ' 的關係為

$$\tan \theta = \frac{H_+}{H_-} = \frac{B_+}{B_-}$$

且

$$\tan \theta' = \frac{H'_+}{H'_-} = \frac{B'_+}{B'_-} = \frac{\mu_0}{\mu'} \cdot \frac{H_+}{H_-} = \frac{\mu_0}{\mu'} \tan \theta$$

故

$$\theta' = \tan^{-1} \left(\frac{\mu_0}{\mu'} \tan \theta \right) \dots\dots\dots 1.5$$

式 1.5 如考慮 $\mu_0 < \mu'$ ，則 $\theta' < \theta$ ，因而如磁性物質的導磁係數 μ' 愈大，則 θ 就愈大。磁性物質內磁通如變斜，即表示磁通的斷面積 S' 小。其意義為增加磁通密度的作用。

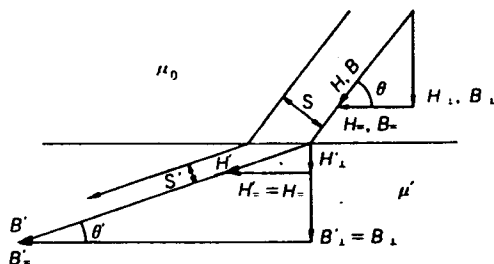


圖 1.2 磁場強度的折射

④ 空隙與等效導磁係數

如圖 1.3(a) 所示，由磁動勢來看，空隙與磁性物質同時存在。圖 1.3 (b) 所示，如用等效導磁係數 μ_e 的均勻磁性物質替換，其 μ_e 為

$$\mu_e = \frac{B}{H_e} = \frac{B}{\frac{U}{l' + l_0}} = \frac{B(l' + l_0)}{\frac{B}{\mu'} l' + \frac{B}{\mu_0} l_0} = \mu' \frac{l' + l_0}{l' + \frac{\mu'}{\mu_0} l_0} \dots\dots\dots 1.6$$

上式 H_e ：均勻物質的等效磁場強度

U : 加於空隙與磁性物質的總磁動勢

式 1.6 μ_e 如與無空隙比較時，表示變小。其變小的程度，隨磁性物質與空隙導磁係數之比 μ' / μ_0 的變大而顯著。

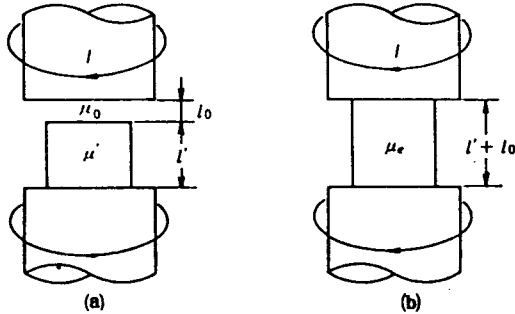


圖 1.3 空隙的等效變換

⑤ 鐵心內的磁場強度

如上所述，由空隙鐵心內通過磁通，鐵心內的磁場強度比空隙部的磁場強度為小。但由鐵心外部來看，磁動勢的消耗在磁鐵心內與空隙部比較相當小，但鐵心內部實際的磁場強度，並非如此之小。

即鐵心的作用磁場強度 H :

- (1) 在真空中的導磁係數 μ_0 ，構成 Fe 分子的電子自轉電流的方向，因 H 的關係產生角位移，產生 xH (x : 磁化率) 的磁場強度。
- (2) 故綜合磁場強度為 $H + xH$ ，產生磁通密度 $B = \mu_0(H + xH) = \mu_0(1 + x)H = \mu_0\mu_r H = \mu H$ 。
- (3) 由外部看時，鐵心可視為等效 μ_e 的相對導磁係數之物質。

主要是因鐵心內與在真空中的自轉電流分布狀態相等，而實際的磁場強度變為 $1 + xH$ 。

2.

磁性物質與磁特性

① 磁性物質

磁性物質的特性是構成左右磁性物質的電子自轉電流配合方向之難易。即有關配合方向之電子自轉電流由磁性物質除去，其磁性物質就變成非磁性物質。又磁性物質為磁性具有空間導磁係數 μ_0 的空間，其有關配向的自轉電流等於分布的狀態。

故其磁性物質能以產生磁性物質的磁通分布，與產生相當於磁通分布的電流來代替。此電流分布的大小，使容易追蹤外部磁場的磁性物質為軟磁性物質，使困難追蹤的磁性物質為硬磁性物質。

此種軟磁性物質有鐵、軟鋼、矽鋼板等的高導磁係數材料。而硬磁性物質有鋁鎳鈷合金(alnico)磁鐵、肥粒鐵磁鐵，稀土類磁鐵等的永久磁鐵。即以矯頑磁力的大小為磁性軟或硬的標準。

永久磁鐵，雖然外部不供給任何的能，但也能永久地發生磁通。故使用永久磁鐵的電動機，效率比較高。磁通的發生能，並不需要時常供給，因為在真空中自轉的電子並無產生任何反方向的力。超電導磁鐵可代替其自轉，且可利用電子的線運動，使其高效率地產生磁通。

② 磁滯環路(Hysteresis loop)

1. 主環路

加於磁性材料的磁場強度 A ，交變而且在不會產生渦流的程度中緩慢變化，而磁通密度 B 如圖 1.4 所示變化，由 $B-H$ 特性產生所謂磁滯環路。

此種磁滯環路的特徵如下：