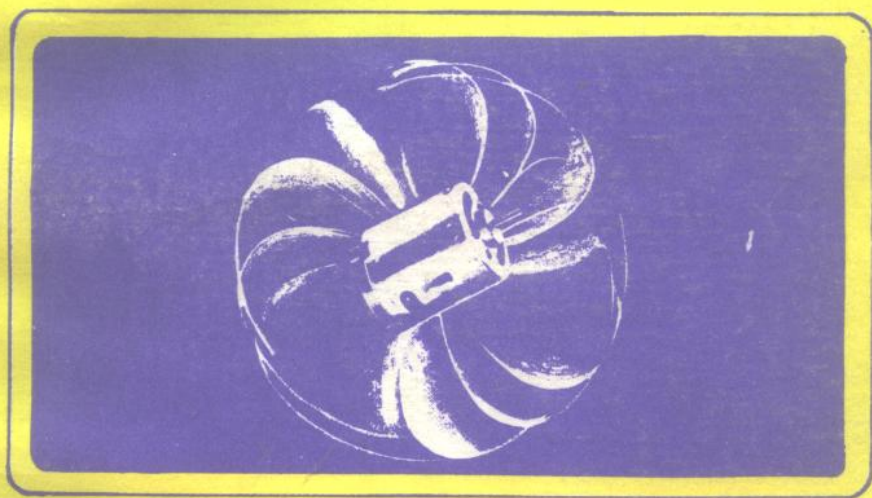


精密科技

精密小馬達

基礎及應用

山田 博著
賴耿陽譯著



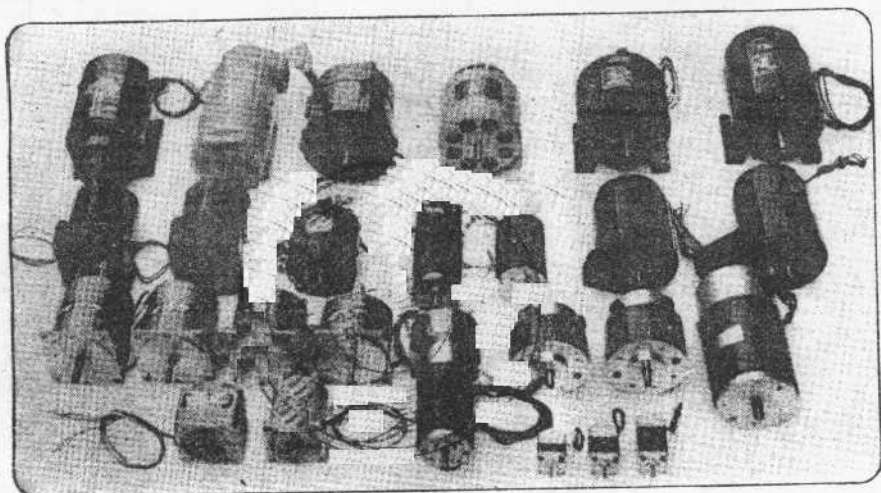
復漢出版社

精密科技

精密小馬達

基礎及應用

山田 博著
賴耿陽譯著



復漢出版社印行

中華民國七十一年一月出版

精密小馬達基礎及應用

原著者：山田博

譯著者：賴耿陽

出版者：復興出版社

地址：台南市德光街六五一號

郵政劃撥三一五九一號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

打字者：克林照相植字排版打字行

版權所有
翻印必究

平裝 二角五分
精裝 二角五分
B

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

最近由於民生機器的發達、電子工學及自動控制分野的發展，將電能變換為機械能的最重要要素——精密小形馬達的需要量日增，順應此態勢，推介本書，實一大喜訊。

精密小形馬達有微小型馬達、無芯馬達等直流馬達、感應馬達、反作用馬達、磁滯馬達等交流馬達，更有步進馬達，若再包括特殊馬達，種類極多。但是，轉矩發生機構為各馬達的共通處，追究轉矩的發生原理，除了靜電馬達等之外，大都利用磁力。

本書盡量網羅多種馬達，並着眼於各馬達的共通點，當成利用磁力的電—機械能變換器，辨清各種馬達的關係。亦即，把握基礎知識為關鍵所在，使讀者不局限於本書的應用例，能有新的構想，開發新式馬達。

精密小形馬達的控制裝置等與電子工學密不可分，所以馬達電子學也是本書重點之一。

本書的對象針對馬達利用者及製造者，只要高工程度即可理解，但是由本書所得的知識均屬上乘。

值得強調的是精密小形馬達是前途光明的行業之一，有眼光的人不妨評估投資的可行性。

精密小形馬達的基礎與應用 / 目次

第 1 章 馬達的電磁理論..... 1

- 1.1 馬達的種類與定義..... 1
- 1.2 磁場與磁束密度..... 2
 - 1.2.1 導磁係數..... 2
 - 1.2.2 邊界條件..... 3
 - 1.2.3 不均勻物質變換為均勻物質..... 4
- 1.3 磁帶迴線..... 5
 - 1.3.1 主迴線..... 5
 - 1.3.2 副迴線..... 5
- 1.4 交換磁場與旋轉磁場..... 6
 - 1.4.1 交換磁場..... 6
 - 1.4.2 旋轉磁場..... 7
 - 1.4.3 交換磁場與旋轉磁場的關係..... 7
- 1.5 感應起電力..... 9
 - 1.5.1 電力與動力..... 9
 - 1.5.2 感應起電力..... 10
 - 1.5.3 磁束密度分佈與感應電壓..... 11
- 1.6 馬達轉矩..... 13
 - 1.6.1 轉矩的本質..... 13
 - 1.6.2 馬克斯威爾的應力..... 15
 - 1.6.3 轉矩式..... 16

第 2 章 馬達的基本特性..... 19

- 2.1 微小型馬達的基本特性..... 19
 - 2.1.1 動作原理..... 19
 - 2.1.2 轉矩特性..... 19
 - 2.1.3 發生轉矩的微視考察..... 21
- 2.2 無芯馬達的基本特性..... 22
 - 2.2.1 動作原理..... 22
 - 2.2.2 轉矩特性..... 22
- 2.3 無刷式馬達的基本特性..... 23

2.3.1 動作原理	23	2.3.2 轉矩特性	24
2.4 直流分激馬達的基本特性	24		
2.5 交直流通用馬達的基本特性	26		
2.5.1 動作原理	26	2.5.2 轉矩特性	27
2.6 感應馬達的基本特性	28		
2.6.1 動作原理	28	2.6.2 轉矩特性	28
2.7 永久磁鐵同步馬達的基本特性	31		
2.7.1 動作原理	31	2.7.2 轉矩特性	32
2.8 反作用馬達的基本特性	33		
2.8.1 動作原理	33	2.8.2 轉矩特性	34
2.9 磁滯馬達的基本特性	36		
2.9.1 動作原理	36	2.9.3 非同步時	37
2.9.2 轉矩特性	37	2.9.4 同步時	38
2.10 單極馬達的基本特性	39		

第3章 馬達的構成材料 40

3.1 鐵芯材料	40		
3.1.1 純鐵 (電磁軟鐵)	40	3.1.4 矽鋼板	42
3.1.2 構造用碳鋼	41	3.1.5 其他的軟磁性材料	43
3.1.3 鑄鋼	41		
3.2 磁鐵材料	44		
3.2.1 淬火硬化磁鐵材料	45	3.2.3 燒結磁鐵材料	46
3.2.2 析出硬化磁鐵材料	45	3.2.4 其他的磁鐵材料	47
3.3 導電材料	47		
3.4 線圈材料 (magnet wire)	50		
3.4.1 線圈材料的種類與特色	50	3.4.2 瓷漆線的端部剝離	51
3.5 絕緣材料	52		
3.5.1 絕緣凡立水	52	3.5.2 皮材料	54

3.6	接點及接觸件	56
3.6.1	接點	56
3.6.2	電刷	58
3.6.3	整流子	59
3.6.4	滑環	60
3.7	軸承	60
3.7.1	滑動軸承	61
3.7.2	滾動軸承	67
3.7.3	空氣軸承	70

第4章 馬達的基本設計

4.1	電樞鐵芯	72
4.2	蔽圈造成的移動磁場	73
4.3	單相運轉	75
4.4	同步引入	77
4.5	定子槽的影響與對策	77
4.5.1	磁場分佈	79
4.5.2	起動時	80
4.5.3	同步時	81
4.5.4	圓周方向磁束形	82
4.5.5	槽的對策	82
4.5.6	考慮槽之影響的等值回路	82
4.6	馬達的小形化和效率	83
4.7	馬達的速度變動與對策	84
4.7.1	同步馬達	84
4.7.2	非同步馬達	87

第5章 非同步馬達

5.1	微小型馬達	90
5.2	無芯馬達	91
5.2.1	圓筒形無芯馬達	91
5.2.2	圓板形無芯馬達	93
5.3	無刷式馬達	94
5.3.1	霍爾馬達	95
5.3.2	其他的無刷式馬達	97
5.4	通用馬達	99
5.5	感應馬達	101

5.5.1 蔽圈形感應馬達	5.5.3 蔽圈形伺服馬達
.....101	104
5.5.2 單相感應馬達	5.5.4 二相伺服馬達
.....102	104
	5.5.5 高週波馬達
	106

第6章 同步馬達.....108

6.1 永久磁鐵同步馬達	108
6.1.1 複合形永久磁鐵 同步馬達	108
6.1.2 永久磁鐵同步馬 達	109
6.1.3 Siemens 形馬 達	109
6.1.4 磁滯永久磁鐵同 步馬達	110
6.1.5 感應件形永久磁鐵 同步馬達	110
6.1.6 定子磁鐵形同步馬 達	111
6.1.7 直流起動形永久磁 鐵同步馬達	111
6.1.8 周波數控制形永久 磁鐵同步馬達	112
6.2 反作用馬達	112
6.2.1 磁阻馬達	112
6.2.2 霍尼克馬達	114
6.3 磁滯馬達	114
6.3.1 圓周方向磁束形 磁滯馬達	114
6.3.2 半徑方向磁束形 磁滯馬達	116
6.3.3 極異方性磁滯馬 達	119
6.3.4 分割形磁滯馬達	120
6.3.5 軸方向激磁 (axial air gap) 磁滯馬 達	121
6.3.6 低慣性磁滯馬達	121
6.3.7 華侖馬達	122
6.3.8 多極蔽圈形磁滯馬 達	123
6.4 感應件馬達	123

第7章 步進馬達及同位馬達.....125

7.1 步進馬達	125
7.1.1 永久磁鐵步進馬 達	125
7.1.2 可變磁阻步進馬達	128

7.1.3 交變磁場形步進馬達	馬達	129
7.1.4 旋轉磁場形步進馬達	馬達	128
7.1.5 籠形感應馬達應用於步進馬達		129
7.2 同位馬達		130
7.2.1 同位旋轉機與馬達的關係		130
7.2.2 同位機的轉矩特性		130
7.2.3 直流同位機		135
7.2.4 同位發信機		135
7.2.5 同位收信機		136
7.2.6 差動同位機		137
7.2.7 控制變壓器		137
7.2.8 分解器		138
7.2.9 inductosyn		138
7.2.10 magnesyn		139

第8章 特殊馬達 141

8.1 有反作用場磁的永久磁鐵直流馬達	141
8.2 反作用形無刷式馬達	141
8.3 自激形同步馬達	141
8.4 半速馬達	142
8.5 線型馬達	142
8.5.1 線型非同步馬達	143
8.5.2 線型步進馬達	143
8.6 米納夏馬達	144
8.7 轉矩馬達	147
8.7.1 直流轉矩馬達	147
8.7.2 交流轉矩馬達	148
8.8 FM馬達	151
8.9 假動馬達	151
8.9.1 Stereo 馬達	153
8.9.2 外擺線馬達	153
8.10 諧和馬達	154
8.11 音叉馬達	154
8.12 靜電馬達	155
8.12.1 霍爾形靜電馬達	155
8.12.2 電介質形靜電馬達	156

第9章 利用伺服馬達控制位置 157

9.1	自動化與伺服馬達	157
9.2	位置控制系的構成	157
9.2.1	閉迴線控制	157
9.2.2	開迴線控制	158
9.3	構成要素與特性	159
9.3.1	閉迴線控制系	159
9.3.2	開迴線控制系	162
9.4	利用微小型馬達控制	163
9.5	利用無芯馬達控制	165
9.6	利用無刷式馬達控制	165
9.6.1	利用霍爾馬達控制	165
9.6.2	利用SMD馬達控制	166
9.7	利用直流分激馬達控制	166
9.7.1	場磁控制	166
9.7.2	貝洛戴因積分器	168
9.8	利用感應馬達控制	169
9.8.1	利用蔽圈形伺服馬達控制	169
9.8.2	利用二相伺服馬達控制	169
9.9	利用步進馬達控制	170
9.9.1	開迴線控制	170
9.9.2	勵調對策與阻尼	172
9.9.3	改善響應性	174
9.9.4	閉迴線控制	175
9.10	利用轉矩馬達及力馬達控制	176
9.10.1	利用轉矩馬達(torque)控制	176
9.10.2	利用力馬達(force)控制	177

第10章 馬達的速度控制 179

10.1	馬達的定速度控制與可變速度控制	179
10.2	速度控制系的構成	179
10.2.1	定速控制	179
10.2.2	可變速控制	180
10.3	構成要素與特性	180
10.3.1	非同步馬達	180
10.3.2	同步馬達	183
10.4	微小型馬達的速度控制	184
10.4.1	機械調速器方式	184
10.4.2	電橋方式	186
10.4.3	速度發電機方式	187

10.4.4 數位方式·····	191	10.4.5 可變速控制·····	191
10.5 無芯馬達的速度控制·····	192		
10.6 無刷式馬達的速度控制·····	193		
10.6.1 激起電壓方式·····	193	10.6.2 載波器驅動方式·····	194
10.7 通用馬達的速度控制·····	194		
10.7.1 定速控制·····	194	10.7.2 可變速控制·····	195
10.8 感應馬達的速度控制·····	196		
10.8.1 定速控制·····	196	10.8.2 可變速控制·····	197
10.9 同步馬達的可變速控制·····	198		
10.9.1 可變周波振盪器 與電力放大器·····	198	10.9.2 可變周波反用換流 器·····	201

第 11 章 馬達的同步化控制····· 203

11.1 馬達的速度變動及位置偏移與同步化控制·····	203
11.2 同步化控制系的構成·····	203
11.2.1 相位同步化控制	203
11.2.2 速度控制迴線 迴路·····	204
11.3 迴線要素與特性·····	204
11.3.1 位置檢出器·····	204
11.3.2 相位檢波器(同 步檢波器)·····	205
11.3.3 速度檢出器·····	205
11.3.4 迴線濾波器·····	206
11.3.5 馬達驅動迴路·····	208
11.3.6 馬達·····	208
11.4 非同步馬達的同步化控制·····	209
11.4.1 直流馬達的同步 化控制·····	214
11.4.2 感應馬達的同步 化控制·····	210
11.4.3 數位同步化控制·····	218
11.5 對同步馬達的應用·····	220
11.5.1 改善永久磁鐵同 步馬達的同步化 力與阻尼·····	220
11.5.2 將周波數控制應用 於磁滯馬達·····	220
11.6 超低速·高精度的同步化控制·····	221

第 12 章 利用馬達的負荷直結驅動法.....223

- 12.1 直結驅動 (DD) 的目的..... 223
- 12.2 DD 化的原理..... 223
- 12.3 DD 馬達的種類與形式..... 224
- 12.4 DD 馬達的構造與特性..... 224
 - 12.4.1 直流 DD 馬達的構造與特性.....225
 - 12.4.2 交流 DD 馬達的構造與特性.....225
- 12.5 DD 馬達的速度安定化..... 226
 - 12.5.1 DD 馬達的速度變動原因與對策.....226
 - 12.5.2 直流 DD 馬達的構造使速度安定化.....227
 - 12.5.3 交流 DD 馬達的速度控制..... 228
 - 12.5.4 交流 DD 馬達的速度控制.....228
 - 12.5.5 DD 馬達的同步化控制.....229
- 12.6 DD 馬達發生的雜音・鳴聲與對策..... 229
 - 12.6.1 DD 馬達發生的雜音與對策.....229
 - 12.6.2 DD 馬達發生的鳴聲與對策.....229
- 12.7 DD 馬達的應用..... 230

第 13 章 馬達的測定..... 231

- 13.1 轉矩的測定..... 231
 - 13.1.1 轉矩的測定法與種類.....231
 - 13.1.2 利用線與重錘的方法.....232
 - 13.1.3 利用渦電流制動與電天平的方法.....233
 - 13.1.4 利用磁滯制動與重力彈簧的方法.....233
 - 13.1.5 利用磁滯制動和彈性彈簧的方法.....234
 - 13.1.6 利用馬達制動和彈性彈簧的方法.....235
- 13.2 轉矩及速度變動的測定法..... 236
 - 13.2.1 轉矩變動的測定法.....236

13.2.2 速度變動的測定	法.....	236
13.3 不平衡的測定		240
13.3.1 不平衡試驗機		240
13.3.2 容許不平衡		242
13.4 溫度及絕緣測定法		242
13.4.1 溫度測定法		242
13.4.2 絕緣測定法		243

第1章 馬達的電磁理論

1.1 馬達的種類與定義

精密小形馬達的類別與定義通常不大嚴明，但本書討論的主要小形馬達之類別與定義如下：

(a) 微小型馬達 (micro motor)

定子用永久磁鐵的超小形精密直流馬達。

(b) 無芯馬達 (coreless motor)

定子用永久磁鐵，轉子無鐵芯的小形精密直流馬達。

(c) 無刷式馬達 (brush-less motor)

轉子有永久磁鐵，無電刷的小形精密直流馬達。

(d) 直流分激馬達

定子用分激場磁，用電樞為轉子的小形精密直流馬達。

(e) 交直流通用馬達 (universal motor)

定子與轉子雙方有線圈的交直流兩用小形精密串激整流子馬達。

(f) 感應馬達

利用轉子產生的感應電流所致之感應轉矩的小形精密交流馬達。

(g) 反作用馬達

轉子有磁性突極性，利用它所致之反作用轉矩的小形精密交流同步馬達。

(h) 永久磁鐵同步馬達

轉子用永久磁鐵，利用電磁轉矩的小形精密交流同步馬達。

(i) 磁滯馬達 (hysteresis motor)

轉子用磁鐵材料 (磁滯材料)，利用它所致之磁滯轉矩的小形精密交流同步馬達。

(j) 感應體馬達 (inductor motor)

轉子有永久磁鐵和多極感應體的小形精密交流同步馬達。

(k)步進馬達 (step motor)

對定子線圈施加矩形波，對應於矩形波的反覆周波數，使轉子成步進式旋轉的小形精密馬達。

(l)單極馬達

定子有相對於轉子旋轉方向產生均勻磁束密度的場磁，有轉子導體和電刷的小形精密直流馬達。

(m)同位馬達 (synchro motor)

轉子有滑環和單相線圈，定子有三相線圈，分別發生交變磁場的精密小形旋轉機。

1.2 磁場與磁束密度

1.2.1 導磁係數

以 H 表示磁場，以 B 表示磁束密度

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (1.1)$$

其中， μ ：導磁係數 μ_0 ：空間導磁係數

μ_r ：比導磁係數

比導磁係數為物質固有者，但在磁性體常因磁場或溫度等而異其值。記號表示法有實數、複素數。複素數的場合如下：

$$\mu = \mu_r + j\mu_i \quad (1.2)$$

其中， μ_r ： μ 的實數部 μ_i ： μ 的虛數部

μ_r 是發生正比於磁場 H 的磁束密度，構成電感 (inductance) 貯存磁能於空間的成分。反之， μ_i 表示磁壁移動或磁區改變方向時，有等值摩擦作用。因而對磁場產生遲延 $\pi/2$ 的磁束密度，表示變為熱能的等值電阻。

(1.1)式表示物質內的磁束密度只取決於該點的磁場，不受該點以外的狀態左右，這表示該點以外的狀態改變時，磁場的值變動，磁束密度却不變。

1.2.2 边界條件

如圖 1.1 所示，兩不同物質接觸時，相對於接觸面上的磁場及磁束密度，兩不同物質 1 與 2 之間的關係如下：

(1) 平行接觸面的磁場彼此相等。

(2) 垂直接觸面的磁束密度彼此相等。

換言之，平行接觸面的磁場與垂直接觸面的磁束密度在其面連續。反過來說，平行接觸面的磁束密度與垂直接觸面的磁場在其面分階段驟變。圖 1.1 中

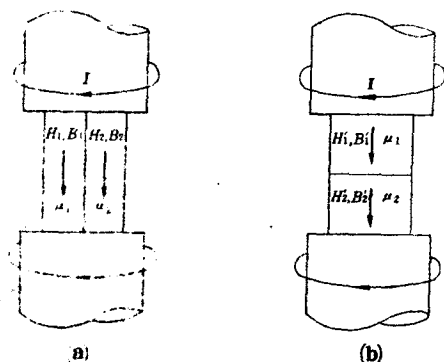


圖 1.1 邊界的磁場與磁束密度

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= H_2, B_1 \neq B_2 \\ B_1' &= B_2', H_1' \neq H_2' \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

馬達如圖 1.2 所示，磁束通過空隙（導磁係數 μ_0 ）進入磁性體（導磁係數 μ' ）時，

$$\left. \begin{aligned} H_{\perp} &= H_{\perp}', \frac{B_{\perp}}{\mu_0} = \frac{B_{\perp}'}{\mu'} \\ B_{\parallel} &= B_{\parallel}', \mu_0 H_{\parallel} = \mu' H_{\parallel}' \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

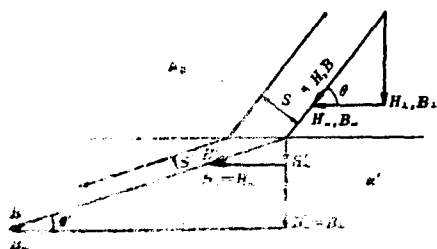


圖 1.2 磁束的折射

求 θ 與 θ' 的關係，得

$$\tan \theta = \frac{H_{\perp}}{H_{\parallel}} = \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}}$$

因此

$$\tan \theta' = \frac{H_{\perp}'}{H_{\parallel}'} = \frac{B_{\perp}'}{B_{\parallel}'} = \frac{\mu_0}{\mu'} \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{\mu_0}{\mu'} \tan \theta$$

因而

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

式(1.5)在 $\mu_0 < \mu'$ 時 $\theta' < \theta$ ，這表示磁性體的導磁係數 μ' 愈大時，磁性體內的磁束傾斜，磁束的斷面積 S' 愈小。亦即磁束密度增加。

1.2.3 不均勻物質變換為均勻物質

如圖1.3(a)所示，有空隙與磁性體共存時，就起磁力源看來，如圖1.3(b)所示，置換為等值導磁係數 μ_e 的均勻磁性體時，其 μ_e 為

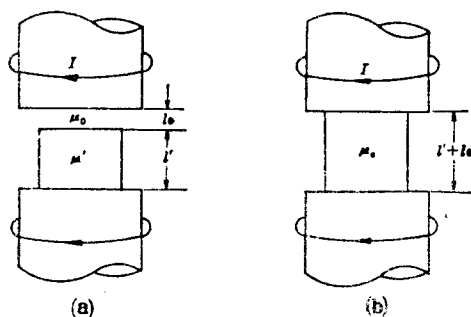


圖 1.3 磁質的等值變換

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

其中， H_e ：當成均勻物質時的等值磁場

U ：施加於空隙與磁性體的全起磁力

(1.6)式表示 μ_e 比無空隙時小，減小的程度取決於磁性體與空隙的導磁係數之比 μ' / μ_0 的增大。