

電機機械學

Electric Machines

(上 冊)

原著者：G. R. Slemon

A. Straughen

譯述者：王勝德 曹同慶

葉琰新 黃健宇

科技圖書股份有限公司

原 序

本書是以當今充滿新鮮而蓬勃的電機工程學系中較為濃縮的「電機能量轉換 (electromechanical energy conversion) 課程而編寫，在這課程內有許多新鮮而活潑的主題，需要納入。先後雖有新書陸續出版。這些教本的作者有責任用自己的方式來處理在表面上似已涵蓋周全 (well-covered) 的主題。

過去幾年中，先後出版的新書，一向具有創作性、包羅廣泛，並寫得很好，對主題也有新的見解，但却是艱深難懂，任何施教者，面對尋找適用作電機系的主要課本，或退一步說，適用於專攻電子學的電機系學生，或其他供非電機系的工程學生的教材則諸多困難，而了解在試用目前可得的材料所遭遇到的失敗。施教者，最後也只能用演講筆記型式，寫成一本教材，我們希望藉着以下幾頁的內容作適當的選擇以滿足師生雙方的需要。我們的指導原則一直是具「選擇性的」 (selectivity) 所關心的是，確信經由討論教材的某些章節，而省略了剩餘章節的這種簡單過程，能選出許多不同程度與涵蓋不同範圍以及興趣的完整而獨立的課程。

第一章是討論磁系統出現在電機機械中的性質與狀態。在附錄 A 中，討論些磁的基本原理，以供有需要復習原理的讀者之用。鑑於永久磁機械 (permanent-magnet machines) 的重要性日增，在本章中列有永久磁系統的討論。

第二章討論變壓器與類似變壓器的裝置，並敘述演導任何電磁系統的等效電路一般方法。

第三章是本書的核心，務必完全了解。因所討論的在所有電機機械中所發生電機能量轉換過程的基本原理。

第四到第六章討論工業上最常見的直流與交流機械。精通這幾章後可使讀者能就一設定用途，指定一適當機械，並預測該機械在所任

工作情況下的性能。

我們深信，當今電機工程學的本質是系統設計（system design）。因“系統”一詞頗有彈性。在此必需講明，我們將變壓器、電動機與發電機均視作系統的元素；想應用這些元素的工程師，有必要了解它們的物質行為（physical behavior）。

本書的很大部份致力於演導各種裝置的模式，所有的模式原本只是近似的。因其只保留足夠的性能（performance）作為預測所需的資料。我們又強調等效電路模式的運用，因在電機或電子系統中作類似的研究也會碰到。此種強調的另一好處是，電路參數，通常只與該裝置的尺寸與材料性質有關。

在本書的適當處，也插入有關固態（solid-state）或功率、半導體（power semiconductor）轉換器的電動機控制基本原理。我們並不認為這些討論，可使讀者有能力設計一個包含機械與轉換器的控制系統，這些討論的有限目標，是顯示如何由使用固態轉換器與機械的組合；以獲得可控制的速率改變。為這目的，轉換器已予理想化。而且具很多差異，包括實際上是使用脈動直流而非圓滑直流，為非理想正弦交流而不是理想交流等，都予忽略。想設計電動機（或馬達）控制系統的讀者，將對固態功率轉換器以及這裡所介紹的電機機械的基本原理需有健全的了解。

近年來，關於電機機械的一般化模式論者已多。在很多被推荐的模式中，都假設為線性（linear）的。但大部分裝置的操作範圍內，磁的非線性，皆極重要。此外，雖有一定的模式也許只適合該裝置的穩態操作，但要模擬其動態行為，則需有很大改變，而且更趨複雜。如需涵蓋這些方面，將需一本比本書更厚的書，這將成為使讀者乏味的書。因此，明白地指出，這些模式的限制，並清楚地敘述超出可用的操作範圍的後果。

使用本書的學生，應已修過電與磁的基礎導論與電路分析的基礎課程。我們假定在微分方程式與系統分析方面的平行課程，能提供足夠的分析技巧。若干討論到可視為“高深”或“專門”題材的章節與問題，都用星號標明。未標星號的章節，可構成單學期初步課程的教

材。時間特別短的，則第三章中同步機械的題材大致足夠，6.1.1至6.1.5則可省略。Toronto大學機械系就使用這樣縮減的教材。超過一學期的課程，可依教師的興趣，從剩餘的材料作廣泛的選擇。本書也能作為工程師在以後應用上提供方便與熟悉的參考。

開給 Toronto大學電機系三年級的連續兩個學期課程中，第一課程中包括下列題材：

第一章——1.1 到 1.19 各節。

第二章——2.1 與 2.2 ； 2.4 到 2.6.5 ； 2.8 到 2.10.2 ； 2.12 到 2.12.2 各節。

第三章——全部。

第二課程，包括以下教材：

第四章——4.1 到 4.6.2 ； 4.7 與 4.9 到 4.11 等節。

第五章——5.1 ， 5.2 ， 5.4 與 5.4.3 等節。

第六章——6.1 到 6.1.7 等節。

其餘的某些章節，尤其關於固態馬達控制部分，可放在四年級選修課程中討論。

關於符號 (symbols) 與數學記號 (notation) 有兩點頗為重要，值得在此一提。就一般來說，大部分出版物都用粗體字表示向量，我們認為這種習慣不太合宜，因為它給教師一個不能方便地在黑板上表示，而學生又不能在筆記本寫出來的符號，與其用正常的斜體字來困擾已習慣於粗體字向量的讀者，我們寧可在粗體符號上加一箭頭，一個有箭頭的正常字體很容易在黑板上或筆記本上書寫而且一目了然。第二點是關於極大與極小數的寫法。在表示數據或答案方面，我們使用國際制 (International System, SI) 記號，其中十的次方總是 ± 3 的倍數。這套符號現今被用於掌上電算器中，用在工程上常用百萬 (mega-)、千 (kilo-)、千分之一 (milli-)、百萬分之一 (micro-) 等一系列次單位 (subunit) 在物理常數的表示方面，如磁常數 ($4\pi \times 10^{-7}$) 或電荷 (1.603×10^{-19})，我們則沿用大家熟悉的形式。

符號的數目，無可避免地會很多。其中很多是加上腳標的 (

subscripts) 與上標 (superscripts) 。爲求查閱方便，很多這些符號已列在本書末頁。那些有一定使用的腳標，就不列入表中，只在使用它們時給以定義。我們儘可能用小寫字母來表示變數的瞬間值，大寫字母表示 rms 或直接常數 (constant direct values) 但這個習慣也有些例外，用來避免與其他常用符號 (T , 表示轉矩， t 表示時間) ，或慣常的用法本身的例外 (B 表示磁通密度) 相混淆。

謝辭

我們感謝我們的同事，P.P.Biringer, P.E.Burke, S.B. Dewan, J.D.Lavers and S.D.T.Robertson 諸位教授。他們在使用本書的原稿，並提供批評，對我們頗多助益。問題解答部分，係由多人負責，但其中很多都由 Zahir Dhavani 準備，並全部由他檢查校對，作爲教材及教師手冊中的解答。我們感謝他這個珍貴的幫助。

我們也感謝許多公司，樂意提供書中論及的機械照片，尤其要感謝 John Wiley & Sons 公司的寬宏，應允我們直接將他們的「磁電裝置」 (Magnetoelectric Devices , 1966 年版，G.R.Slemon 著) 一書中的若干章節與極多的問題編入本書，而不必再作改寫以隱瞞其出處的這種負義工作。

最後，我們對 Shirley DesLauriers 女士，Sandy Langill 女士與 Amelia Chung 小姐表達誠摯的謝意，她們在原稿打字過程中，對兩種迥異而筆跡草率作長期而有耐性的努力。

G.R.S. 司蘭夢
A.S. 司勞芬

目 錄

原 序

第一章 磁系統

1.1	等效磁路與電路·····	1
1.2	順磁·····	7
1.3	磁化·····	10
1.4	磁滯·····	15
1.5	磁場中的能量·····	18
1.6	磁滯損失·····	19
1.7	交變磁通·····	22
1.8	渦流損失·····	23
1.9	磁心損失·····	28
1.10	電感的激磁電流·····	30
1.11	磁系統·····	33
1.12	較複雜的磁系統·····	38
1.13	空氣中的磁通·····	40
1.14	空氣隙的線性效應·····	42
1.15	空氣隙系統中的電感與所儲能量·····	44
1.16	電感的等效電路·····	47
1.17	陶鐵磁鐵與鐵磁性·····	53
1.18	晶粒向異性材料·····	58
1.19	電感的構成與設計·····	60
1.20	永久磁性·····	64
1.21	具空氣隙的永久磁體系統·····	67

2 電機機械學

1.22 永久磁體合金材料	72
1.23 陶鐵磁體的永久磁體材料	73
1.24 稀土族永久磁體材料	75
1.25 永久磁體系統的設計	77
1.26 總習題	82

第二章 變壓器

2.1 理想變壓器	92
2.2 兩繞組變壓器的綫性等效電路	98
2.3 變壓器的耦合電路表示法	103
2.4 正弦激磁的變壓器	105
2.5 變壓器鐵心損耗	109
2.6 變壓器的性能	110
2.7 變壓器的暫態衝入電流	122
2.8 電力變壓器的構造	125
2.9 變壓器設計要點	128
2.10 較複雜磁系統的等效電路	130
2.11 頻率變動的操作	139
2.12 多相系統的變壓器	144
2.13 特殊變換設備	157
2.14 習題	166

第三章 電機的基本原理

3.1 機電能量轉換	183
3.2 圓柱型電機	210
3.3 固定轉矩的條件	221
3.4 多相交流電機	239
3.5 多於兩繞組的電機	247
3.6 電磁機械的構造	250
3.7 習題	256

第四章 直流機

4.1	直流機的磁系統	273
4.2	電樞繞組	277
4.3	內轉矩	289
4.4	激磁方式	290
4.5	等效電路與常用方式	292
4.6	發電機的性能	297
4.7	電動機的性能	312
4.8	直流電動機用的固態驅動器	336
4.9	額定值與效率	346
4.10	電樞反應	350
4.11	換向	355
4.12	永久磁鐵電動機	361
4.13	習題	368

第五章 感應機

5.1	交流機的繞組	381
5.2	三相感應電動機	394
5.3	感應電動機用的固態驅動器	437
5.4	單相感應電動機	446
5.5	同步器	461
5.6	線型感應電動機	464
5.7	習題	471

第六章 同步機

6.1	三相同步機	483
6.2	用在同步電動機的固態驅動器	533
6.3	線型同步電動機	539
6.4	步進電動機	543

4 電機機械學

6.5 習題	547
--------	-----

附 錄

A 基本關係式複習	555
B 磁通與磁通密度的測定	569
C 複數功率	572
D S I 單位換算表	574
E 物理常數	576
F 電阻率與若干導體的電阻率與溫度係數	577
G 線規表	578
H 改進感應電動機的等效電路	579
習題解答	583
符號說明	587
常用的腳標與上標	590

第一章 磁系統

電磁機械 (electromagnetic machine)，除軸與軸承等機械組件外，可分為兩個部份：電系統與磁系統。此類機械的目的，是將能量從電的形式轉換到機械的形式，或反過來。凡使用此類機械的工程師，都要瞭解以下電的與機械的最終變數間的關係：電位差、電流、功率因素、頻率、速率、轉矩或力。這些關係的特性，都可能被磁系統的行為或特性所影響。如果使用的工程師們不瞭解這些行為，這些關係的性質，便顯得神秘與迷糊。因此，這一章的目的是，要給讀者一個基本的瞭解。研讀這一章的比例多寡，將依所使用的機械種類的範圍而定。

正如前面所暗示的，電機能量 (electromechanical energy) 轉換的程序，是決定於中間能量轉換程序，也就是從電到磁，再從磁到機械的形式。電磁能量 (electromagnetic energy) 的轉換，決定於磁場的建立，磁場的產生，可由線圈中的電流或永久磁極。因此，要研討能量轉換，必先討論所要產生的一定形式、位置與強度的磁場所使用的方法與材料。在此討論中，有一個有用的觀念，那就是等效磁路 (equivalent magnetic circuit)。這個觀念使運用的工程師可用等效電路來模擬一個電與磁系統的結合系統。我們首先討論這兩個觀念。

有關於以下討論中的基本物理原理，可參考附錄 A。

1.1 等效磁路與電路

圖 1.1，代表一個木質或塑膠的圈餅 (torus)，上繞 N 圈線圈。該線圈載有電流 i ，在環形線筒內產生的磁場，其方向可用向量 $\vec{H}$ 表示，而磁場強度的大小，可用安培環流定律 (Ampere's Circuital Law) 來決定。此定律可用方程式表示為

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (1.1)$$

(看附錄A.5)。(1.1)式的左邊，為磁場強度 H ，沿着一個磁場封閉路徑的線積分，而右邊的表示式，則為電流密度 J ，沿着任何該路徑所圍成的曲面的面積分。

設在圖 1.1 中的封閉路徑為圈餅的中心線，其半徑為 a ，並設此封閉路徑所圍成的曲面是平坦的，每一圈導線，都垂直地穿過此曲面，所以(1.1)式可寫成

$$H(2\pi a) = Ni \quad (1.2)$$

由此可得

$$H = \frac{Ni}{2\pi a} = \frac{Ni}{l} \quad \text{A/m} \quad (1.3)$$

其中， l 表示該路徑的長度。同理，使用環流定律，可証明在圈餅外面的同一平面上各點的 H 為零，因為沒有電流被半徑小於該圈餅內半徑的圓路徑所包圍，而被半徑大於圈餅外徑的圓路徑所包圍的淨電流也為零。

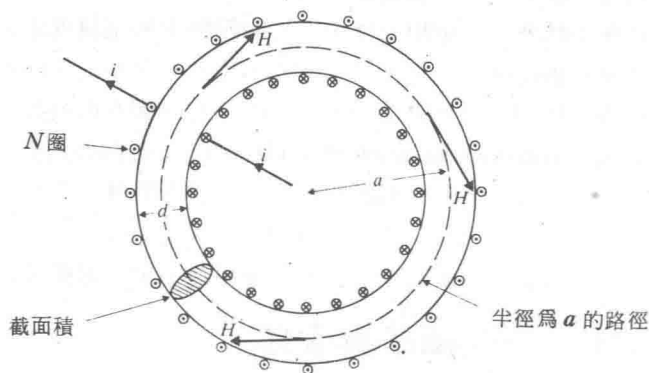


圖 1.1 木質圈餅線筒上的線圈

運用(1.2)式，到小於或大於半徑 a 的圓路徑可証明，在圈餅內的 H (或 B)為不均勻，但是，如果圈餅的截面直徑遠小於 a ，則 H 在此圈餅截面內，可被視作常數，在半徑平均值 a 處的 H 值，是一良

好的平均值。

磁通密度 (magnetic flux density) 的平均值爲

$$\vec{B}_{av} = \mu_0 \vec{H}_{av} \quad T \quad (1.4)$$

其中, μ_0 爲磁常數 (magnetic constant, $4\pi \times 10^{-7}$)。在圈餅內產生的磁通近似值爲

$$\phi = B_{av} \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Wb} \quad (1.5)$$

磁通 ϕ , 可認爲是被磁通路徑所包圍的總電流 (Ni) 所造成的結果。這電流稱爲磁動勢 (magnetomotive force, mmf)。

$$\mathcal{F} = Ni \quad A \quad (1.6)$$

$\mathcal{F}$ 的單位, 常被稱爲“安培·圈” (ampere-turn), 但因 N 爲無因次數, 因此, $\mathcal{F}$ 可用安培來表示。

圖 1.1 所示的磁系統, 運用環流定律 (1.1) 式可得

$$\mathcal{F} = Ni = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad A \quad (1.7)$$

也就是說, 一個封閉路徑的 mmf, 等於該路徑所包圍的電流。從 (1.2)、(1.4) 與 (1.5) 三式得

$$\mathcal{F} = H(2\pi a) = \frac{B}{\mu_0} (2\pi a) = \frac{\phi}{(\pi d^2/4)} \cdot \frac{2\pi a}{\mu_0} \quad A \quad (1.8)$$

於是, ϕ 正比於 $\mathcal{F}$, 且可認爲是 $\mathcal{F}$ 的結果。此兩量間的比例常數, 稱爲該路徑的磁阻 (reluctance) $\mathcal{R}$, 並被定義成下式

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi} \quad A/\text{Wb} \quad (1.9)$$

$\mathcal{R}$ 的單位爲安培 / 韋柏 (weber), 對此圈餅系統 (toroidal system) 而言

$$\mathcal{R} = \frac{2\pi a}{\mu_0(\pi d^2/4)} \quad A/\text{Wb} \quad (1.10)$$

由此可看出, 磁阻直接與磁路的長度成正比與截面積成反比。磁系統的磁阻, 與電系統的電阻類比, 其單位爲歐姆或伏特 / 安培, 可寫爲

$$R = \frac{\rho \cdot l_{\text{wire}}}{A_{\text{wire}}} \quad \Omega \quad (1.11)$$

其中, ρ 為該導體材料的體積電阻度 (volume resistivity)

在許多情況, 用一個等效磁路 (equivalent magnetic circuit) 的模式與電路類比是有用的。圖 1.1 的系統模式示於圖 1.2。

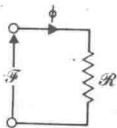


圖 1.2 等效磁路

在圖 1.1 的系統中, 如電流 i 改變, 磁通 ϕ 也跟着改變。根據法拉第定律, 電動勢 (electromotive force, emf), 將在每圈線圈產生。每圈線圈的 emf 為

$$e_{\text{turn}} = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{V} \quad (1.12)$$

由該線圈誘導而來的總 emf 為

$$e = \frac{Nd\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{V} \quad (1.13)$$

其中 λ 為該線圈的磁通鏈 (flux linkage), 被定義為

$$\lambda = N\phi \quad \text{Wb} \quad (1.14)$$

對圖 1.1 的系統而言, 由 (1.3) 式、(1.4) 式與 (1.5) 式代入 (1.14) 式的 ϕ , 得

$$\lambda = \frac{N^2 \mu_0}{2\pi a} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot i \quad \text{Wb} \quad (1.15)$$

可見磁通鏈直接線圈的電流成正比。電感 L , 被定義為該線圈每安培電流的磁通鏈, 而以亨利 (henries) 來表示, 於是

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad \text{H} \quad (1.16)$$

對圖 1.1 的系統而言, 由式 (1.15) L 的大小可用系統的因次來表示。從 (1.15)、式 (1.16) 式與 (1.10) 式, L 與 $\mathcal{R}$ 間的關係, 可用下式表示

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad \text{H} \quad (1.17)$$

因爲如圖 1.1 的線圈，可在電路中使用，所以使用理想的電路元件來模擬它們較爲方便。電路分析，使用元件的端點的電位差與電流進行。理想線圈，假定是沒有電阻的，因此端點的電位差便等於線圈所誘導的電動勢 (emf)。在端點的電位差爲

$$v = e = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{V} \quad (1.18)$$

由 (1.16) 式代入 i ，得

$$v = L \frac{di}{dt} \quad \text{V} \quad (1.19)$$

如圖 1.3 (a) 所示，沒有電阻的線圈，可用一純電感的電路元件來代表，實際上任何線圈都含有電阻，在許多情況下，這電阻的效應，是不可能被忽略而不產生嚴重的誤差。含有電阻的實際線圈模型示於圖 1.3 (b)，在此模型中

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{V} \quad (1.20)$$

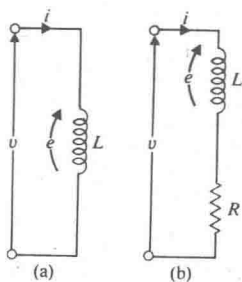


圖 1.3 等效電路

(a) 無電阻線圈

(b) “實際”線圈

例題 1.1

圖 1.4 所示爲一矩形截面塑膠質圈餅線圈。該線圈繞以直徑 3mm 銅線 200 圈。

6 電機機械學

- (a) 若線圈電流為 50 A，求在平均直徑處的磁通密度。
- (b) 設其內部磁通密度為均勻，且等於在平均直徑處，求該線圈的電感。
- (c) 試決定由於假設為均勻磁通密度所造成的百分誤差 (percentage error)。
- (d) 若銅的體積電阻率為 $17.2 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ ，試決定圖 1.3 (b) 的近似電路參數。

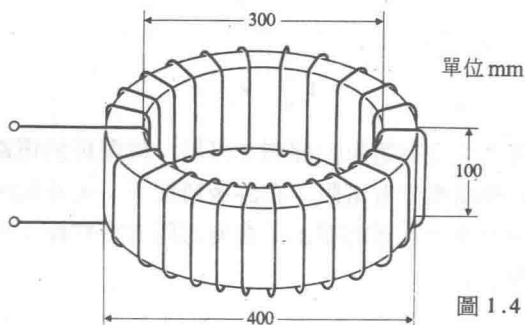


圖 1.4 例題 1.1 之圖

解：

(a) 在平均直徑處

$$H = \frac{Ni}{2\pi r} = \frac{200 \times 50}{0.35\pi} = 9095 \text{ A/m}$$

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \times 9095 = 11.43 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$$

(b) 設 $B_{av} = 11.43 \times 10^{-3}$

$$\phi = BA = 11.43 \times 10^{-3} \times 0.1 \times 0.05 = 57.15 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\lambda = N\phi = 200 \times 57.15 \times 10^{-6} = 11.43 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{11.43 \times 10^{-3}}{50} = 0.2286 \times 10^{-3} \text{ H}$$

或 $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 A} = \frac{0.35\pi}{4\pi \times 10^{-7} \times 0.1 \times 0.05} = 175.0 \times 10^6 \text{ A/Wb}$

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{200^2}{175.0 \times 10^6} = 0.2286 \times 10^{-3} \text{ H}$$

(c) 在半徑 $0.15 < r < 0.20$ m 處，

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 200i}{2\pi r} \text{ T}$$

$$\phi = \int_{0.15}^{0.20} B \times 0.1 \, dr \text{ Wb}$$

$$\lambda = N\phi = \frac{0.1\mu_0 N^2 i}{2\pi} \int_{0.15}^{0.20} \frac{dr}{r} \text{ Wb}$$

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{0.1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 200^2}{2\pi} \ln\left(\frac{0.2}{0.15}\right) = 0.2301 \times 10^{-3} \text{ H}$$

$$\text{誤差} = \frac{0.2301 - 0.2286}{0.2301} \times 100\% = 0.651\%$$

$$(d) \quad R = \frac{\rho l_{\text{wire}}}{A_{\text{wire}}} = \frac{17.2 \times 10^{-9} \times 200 \times 0.3}{\pi \times 3^2 \times 10^{-6}/4} = 0.1460 \, \Omega$$

近似的等效電路的參數為

$$R = 0.1460 \, \Omega; \quad L = 0.2286 \text{ mH}$$

1.2 順磁

在圖 1.1 的圈餅系統 (toroidal system)，在圈餅內部的線圈電流 (coil current)，產生磁場強度 H 。接着產生共線磁通密度 (col-linear magnetic flux density) B 。線圈內部如為真空，則任何點上的 B 與 H 間的關係可寫成

$$B = \mu_0 H \text{ T} \quad (1.21)$$

如線圈內部充滿空氣，則磁通密度 B 約增加百萬分之 0.4。的確，對大部份非順磁性物質 (nonferromagnetic substances)， $B - H$ 關係的偏離 (departure)，在 (1.21) 式中小到可以忽略。再者，如在圖 1.1 中的 a 遠大於 d ，則 H 與 B 可視為在整個截面為均勻的。因此，在討論這樣一個系統，(1.21) 式可替代 (1.4) 式。如圖 1.1 的木質圈餅由同尺寸的鐵質圈餅所取代，則同樣的線圈電流所產生的總磁通，將大為增加，這是由於順磁 (ferromagnetism) 的現象，其名稱是自第一次從鐵觀察到的。這是一個用電磁機械 (electromagnetic machines) 轉換能量過程中的重要因素。

爲求瞭解順磁現象的原理，可利用一個相當簡單的原子模型，其構造爲一電子雲，繞一原子核，每個電子荷電爲 1.6×10^{-19} 庫倫 (coulomb)，此電荷可視爲集中於一小圓球。每一電子，依軌道繞原子核運行，並在運行中，每一電子依自己的軸作自旋。

圖 1.5 (a)，說明一個電子在軌道上繞原子核運行，軌道的下半部通過軸與讀者之間，而上半部則在軸的另一邊，軌道運行的方向如圖所示，帶負電的電子；與在軌道上形成一等效正電流其方向如圖所示。用右手螺旋定則，可証明所產生的磁通方向。同樣，磁矩 (magnetic moment) 如圖所示，爲一向量，沿着軌道的軸以 p_{mo} 表示。

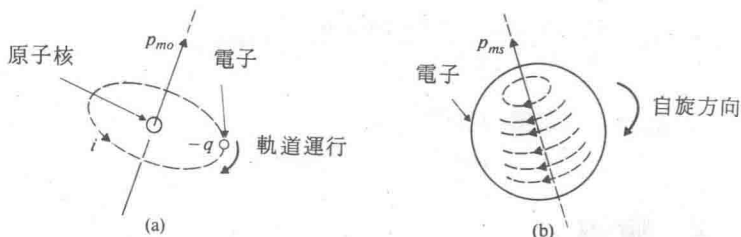


圖 1.5 (a) 電子的軌道運行。(b) 電子的自旋

每個電子，又有一個與軌道運行無關的磁矩，這磁矩是由於電子的電荷繞它自己的軸旋轉所產生的，也就是自旋。圖 1.5 (b) 表示自旋的效應。如果電子的電荷作球形均勻分佈，前段對軌道電子的敘述，仍可運用到這種情況，電子電荷順時針繞其軸，與一反時針走向的環電流 (loop of current) 等效。正如每一電子都有特定的電荷量，它也有特定的磁矩，自旋磁矩 (spin magnetic moment) p_{ms} 的大小爲 $9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ，而軌道磁矩 (orbital magnetic moment) 值爲零，或這數的整數倍。

原子的磁矩 p_m ，可由兩個因素所產生，但在許多元素的原子中，電子是對稱排列的，所以由於自旋與軌道運動的磁矩上互相抵消，使原子沒有淨磁矩 (net magnetic moment)。雖然如此，仍然有三分之一已知的元素，沒有這種對稱性，所以它們是擁有淨磁矩的。

雖然有這許多元素的原子具有淨磁矩，但由這些原子排列而成的