

電 機 機 械

G. R. 斯利蒙 A. 斯特朗 著
劉康立 陳立明 譯

曉 園 出 版 社
世 界 圖 書 出 版 公 司

電 機 機 械

原著者 Slemon · Straughen

譯著者 劉康立 · 陳立明



曉 園 出 版 社

253/33

29

电机机械

G. R. 斯利蒙 A. 斯特朗 著

刘康立 陈立明 译

世界图书出版公司出版

北京朝内大街137号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994年8月第一版 开本: 711×1245 1/24

1994年8月第一次印刷 印张: 26

印数: 0001-550 字数: 51.8万字

ISBN: 7-5062-1917-4/TH·28

定价: 38.20元 (W_{9402/18})

世界图书出版公司向台湾晓园出版社购得重印权

限国内发行

原 序

在目前的電機課程中，有許多新而重要的課題。本書的對象，是有關機電能量轉移 (electromechanical energy conversion) 的課程。有關這方面的書籍已經有很多，而新書更不斷在出版。因此，在這一已被完全探討過的主題上應如何加以處理，就需要由書本的作者自己來作一個判斷了。

過去幾年中所出版的書都是屬於較原始 (original) 而廣泛，對主題有新的洞察，通常也寫得不錯，但卻難懂。一位講師，不論是在電機核心課程上，或面對一班打算主修電子的電機學生或是不屬於電機方面的工學院學生時，在課本的選擇上都會感到十分挫折。而最後的結果，總是另外編寫出一份自己的講稿或重點。本書作者的希望，就是要能從以下的文章中作適當的選擇，來滿足講師和學生的需求。主要的指導原則，就是選擇性。主要的目的，就是希望不論是完整的或自容 (self-contained) 的課程，不論是何種層次的難度，或偏重於那一方面，都能藉著討論一些章節，而省略其餘參考資料的簡單方式來加以選取。

第一章主要是討論電機機械中磁性系統的本質及行為。讀者們如果需要回顧電磁學的一些基本原理，則可以參閱附錄 A。鑑於永久性磁鐵電機 (permanent-magnet machines) 的重要性日益增加，因此本章也包含有關永久性磁鐵電機的探討。

第二章所處理的，是變壓器以及類似變壓器的設備，同時也說明，對任何一個電磁系統的等效磁路的建立，所可以採行的一般方法。

第三章是本書的核心所在，必須能加以完全地瞭解，因為它所探討的，是發生在所有各種電機機械內部的基本電磁能量轉移的過程。

第四章至第六章所討論的，是工業上最常見的直流與交流電機。瞭解這幾章之後，讀者就可以根據應用的對象來選擇適當的機器，並預測其在工作狀況下的行為。

我們深信，今日的電機工程的重點是系統設計，而“系統”這個字眼

有相當大的伸縮性，因此在本書中，我們應該認清一件事，那就是，諸如變壓器、電動機、及發電機等設備，是屬於系統元件。一個工程師如果想要運用它們，就必須瞭解它們的物理行為。

本書中有大部分是在於模型的建立。所有的模型的建立，基本上都只是將預測其行為表現所需要的資料加以保留而所得的近似結果。我們強調等效電路的模型運用，是因為它們同時也會在我們探討其他電機或電子系統的時候出現。此種強調的進一步好處是，個別的電路或磁路參數通常都和設備的大小和材料有相關性。

在本書中一些適當的地方，我們也簡介了利用固態或功率半導體轉換器(power-semiconductor convertors)來控制電動機的基本原理。這並不是說能夠使讀者設計出一個包含電機和轉換器的系統，而是希望能夠在有限的題材中，瞭解如何將固態轉換器和電機加以組合來達成速度變化的控制。在這個目標下，我們將轉換器理想化。同時，一些重要的差異也被忽略了，如機器運轉對脈衝直流而非平緩直流的反應，或對非正弦波而不是正弦波的反應等。讀者如果想要設計一個電動機控制系統，就必須對固態功率轉換器的本質和功能，以及對本書所介紹的電機的基本原理有充分的認識。

有關電機的一般化模型，近年來有許多文獻出版。其中有很多模型都使用線性化模型。但是大部分設備的工作範圍卻有很明顯的非線性電磁現象。此外，即使某一線性模型適用於某一電機的穩態(steady-state)表現，在模擬其動態(dynamic)行為時，仍然需要明瞭一些更重要且更嚴深的差異現象。如果要將這些方面通通加以涵蓋，則其篇幅將極為可觀，同時也會降低了學習者的興趣。因此在大部分的地方，我們只是清楚地註明該模型的限制，並概略地指出超過其適用範圍後所會發生的結果。

使用本書的學生，應當已修過電學、磁學，以及電路分析的基本課程。如果同時修習微分方程及系統分析，則可以提供讀者適當的分析技巧。本書中並不包括控制系統分析，因為大部分的課程安排中都會有這一門課。

課文及問題中所提到的一些較為“高等”或專門化的部分都有標上星號。所有沒有星號的部分是作為一學期的簡介課程之教材。如果時間短促，則可以只看第三章的同步電機，而省略6.1.1至6.1.5的部分。多倫多大學機械系的學生上課就是採用上述方式。如果不只一學期，則講節可以依

其個人的判斷，選擇其餘適合的部分授課。這些教材同時也可以提供工程師們在以後工作的時候作為方便的參考資料。

多倫多大學電機系二、三年級的學生都必須修完兩個學期的課程。第一部分的課程如下：

第一章— 1.1 節至 1.19 節。

第二章— 2.1 節，2.2 節，2.4 節至 2.6.5 節，2.8 節至 2.10.2 節，
2.12 節至 2.12.2 節。

第三章—全部。

第二部分的課程如下：

第四章— 4.1 節至 4.6.2 節，4.7 節，4.9 節至 4.11 節。

第五章— 5.1 節，5.2 節，5.4 節，5.4.3 節。

第六章— 6.1 節至 6.1.7 節。

其餘的部分，尤其是關於固態的電動機控制，則在四年級選修課程中涵蓋並擴充。

關於符號及記號，有兩點必須注意。在一般的書籍上，向量都採用粗字體。但是作者們認為這種方式並不好，一方面講師不容易在黑板上寫出，另一方面學生作筆記也不容易寫。為了不使習慣於粗體向量字的讀者感到混淆，我們使用一般的斜體字，但在上面加一個箭頭，如此就便於寫在黑板或筆記本上，而不會混淆不清。第二點是關於很大的或很小的數目的表示方法。在表示數據或答案時，我們使用國際標準的公制工程記號 (International System (SI) engineering notation)，其10的指數次方都為 ± 3 的倍數。這種記號方式目前已建立在掌上型計算機的內部，可以直接表示M，K，m或 μ 等一連串的工程上常用的單位。至於一些物理上的常數，如磁常數 ($4\pi \times 10^{-7}$) 或電子電荷 (1.603×10^{-19}) 等，則仍採用常見的形式。

符號的數目非常多，其中有很多使用不同的下註標 (subscripts) 及上註標 (superscripts)。為了方便指明，其中有很多都列印在機頁上面。如果註標的運用範圍有限，則僅在使用到的時候才加以定義，不另外列出。在盡可能的情形下，小寫字母代表瞬時變數，大寫字母代表均方值 (rms)

或固定直流值。其例外的情形，則是爲了避免與其他常用的符號（ T 代表力矩， t 代表時間）相混淆，以及一些通用的使用符號（ B 代表磁通密度）。

感謝詞

作者們要感謝其同事們——P.P. Biringer, P.E. Burke, S.B. Dewan, J.D. Lavers 及 S.D.T. Robertson 等幾位教授們——他們在許多課程上使用本書的各份原稿，並提供了他們的意見。習題解答部分是由許多人所完成的，而其中大部分是由 Zahir Dharani 先生所做出，並經由他檢查，核對後才印在課本及教師手冊上。我們感謝他的幫忙。

作者們也要向提供各種電機圖片的許多公司致謝。同時要特別感謝 John Wiley & Sons, Inc. 讓作者們轉用該公司圖書 1956 版，G.R. Slemon 所作的 Magnetoelectric Devices 上面一些章節及習題，而不用再花大量的人力來“偽裝修飾”。

最後，作者們衷心地感謝 Mrs. Shirley DesLauriers, Mrs. Sandy Langill, 以及 Miss Amelia Chung。他們在底稿打字時是那麼長久而有耐心地面對著兩種截然不同的惡劣手稿。

多倫多

1980 年 1 月

G.R.S.

A.S.

譯 序

本書係譯自 G. R. Slemon 與 A. Straughen 所著之 “Electric Machines”。書中所用名詞多取自公元一九八〇年十月國立編譯館編訂教育部公布之電機工程名詞。

本書涉獵甚廣，譯者在翻譯的過程中也曾遇到一些困難，幸經同學間互相切磋，與參考前人之譯文而終能解決。名詞的斟酌也讓譯者花費了許多心思，務求統一與達義。特殊名詞多附有原文，可以據此與原文書或其他相關的譯本相對照。

翻譯工作的完成要感謝師長的指導與同學的協助，以及晚園袁小姐提供了許多有用的參考資料。雖然本書力求嚴謹，但疏漏之處再所難免，敬祈各先進不吝指正。

劉 康 立

陳 立 明

謹序於臺灣大學電機工程學系

一九八四年八月十九日

目 錄

第一章 磁性系統

1. 等效磁路與等效電路 1 / 2. 鐵磁性 7 / 3. 磁化 10
/ 4. 磁滯 15 / 5. 磁場中之能量 18 / 6. 磁滯損失 19
/ 7. 交變磁通 22 / 8. 渦流損失 23 / 9. 鐵心損失 28
/ 10. 電感器激磁電流 31 / 11. 磁性系統 33 / 12. 較複雜
之磁性系統 39 / 13. 空氣中之磁通 41 / 14. 氣隙之線性
化效應 43 / 15. 氣隙系統之電感與儲存能量 45 / 16. 電
感器之等效電路 49 / 17. 鐵酸鹽與鐵酸鹽磁性 54 / 18.
晶粒 - 順向材料 59 / 19. 電感器結構與設計 61 / 20. 永
久磁性 65 / 21. 具有氣隙之永久磁鐵系統 69 / 22. 合金
永久磁鐵材料 73 / 23. 鐵酸鹽永久磁鐵材料 75 / 24. 稀
土族永久磁鐵材料 77 / 25. 永久磁鐵系統之設計 78 / 習
題 85

第二章 變壓器

1. 理想變壓器 93 / 2. 雙繞組變壓器的線性等效電路 100
/ 3. 變壓器耦合電路的表示 104 / 4. 正弦激磁的變壓器 107
/ 5. 變壓器的鐵心損 111 / 6. 變壓器的表現 112 / 7. 變
壓器的暫態湧入電流 125 / 8. 電力變壓器的製造 128 /
9. 變壓器設計的要點 131 / 10. 更複雜的磁系統之等效電路
133 / 11. 可變頻率的運轉 143 / 12. 多相系統的變壓器

148 / 13. 特殊的轉換設備 161 / 習題 171

第三章 電機機械的基本原理

1. 機電能量的轉換 186 / 2. 圓筒形電機 215 / 3. 轉矩固定的情況 227 / 4. 多相交流電機 245 / 5. 多極電機 253 / 6. 電磁電機的構造 257 / 習題 264

第四章 直流電機

1. 直流電機的磁性系統 279 / 2. 電樞繞組 283 / 3. 內轉矩 295 / 4. 激磁的方法 296 / 5. 等效電路與一般關係式 299 / 6. 發電機的表现 303 / 7. 電動機的表现 318 / 8. 直流電動機的固態驅動器 344 / 9. 額定值以及效率 354 / 10. 電樞反應 359 / 11. 整流 363 / 12. 永久磁鐵電動機 370 / 習題 377

第五章 感應電機

1. 交流電機繞組 389 / 2. 三相感應電動機 402 / 3. 感應電動機之固態驅動 448 / 4. 單相感應電動機 457 / 5. 同步步器 470 / 6. 線性感應電動機 474 / 習題 481

第六章 同步電機

1. 三相同步電動機 491 / 2. 使用同步電動機的固態驅動 543 / 3. 線性同步電動機 548 / 4. 步進電動機 552 / 習題 556

附 錄 563

习题答案 593

索引 597

第一章

磁性系統

電磁機器除了一些基本的機械零件（如軸和承軸等）之外，可以分成兩大部分：電的系統（electrical system）和磁性系統（magnetic system）。使用電機的目的不外是將電能轉換成機械能或將機械能轉換成電能。使用電機的工程師必須考慮電和機械中的變數如電位差、電流、功率因數（power factor），頻率、速率、轉矩或力之間的關係。然而這些關係往往會受到磁性系統的影響。如果工程師不具有磁性系統的基本認識，那麼當他（或她）想要利用這些關係時便會顯得力有未逮。因此，本章的目的就是介紹磁性系統的基本概念。所包含的範圍，即本章將研究的部分是根據電機及使用的種類而定。

如前段所述，機電能量轉換的過程要依靠中間能量轉換過程，由電能到磁能，再由磁能到機械能。電磁能量的轉換有賴於磁場的作用，磁場可由線圈中的電流所產生，也可能由永久磁鐵（permanent magnet）產生。所以在處理能量轉換之前我們先討論產生磁場的方法與物質，如何產生一形式，位置與強度均符合要求的磁場。等效磁路（equivalent magnetic circuit）的概念有助於這些討論，它和電路極為相似。工程師也常利用模擬磁電系統組合的等效電路（equivalent electric circuit）作為處理問題的工具。這兩個概念將首先討論。

討論中所牽涉的物理原理都在附錄A中。

1.1 等效磁路與等效電路

圖 1.1 是一有 N 匝（turn）電線繞在木製或塑膠的圓環上的線圈，圓環具有圓形的截面。線圈上所帶電流為 i 。圓環中會產生一磁場，方向如 $\vec{H}$ 向量所示，磁場強度由安培電路定律（Ampere's Circuital Law）得知。此定律以等式表成

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

(見附錄 A.5) (1.1) 式的左邊是磁場強度 H 沿著磁場中一封閉路徑所做的線積分。(1.1) 式的右邊是電流密度 J 在此封閉路徑內任一面上的面積分

假設圖 1.1 之圓環截面中心線為此圓環繞線產生磁場中之封閉路徑，為一半徑 a 之圓形，並假設被包圍的面是平的。每匝導體都垂直此平面，則由 (1.1) 式可得

$$H(2\pi a) = Ni \quad \text{安培} \quad (1.2)$$

由此可知

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

l 為磁通 (flux) 路徑之長度。由此定律也可得知，因為在一較線圈內徑小的環路中沒有包含電流，而在較線圈外徑大的環路中的淨電流又為零，所以在圓環的平面上圓環之外的任何地方 H 均為零。

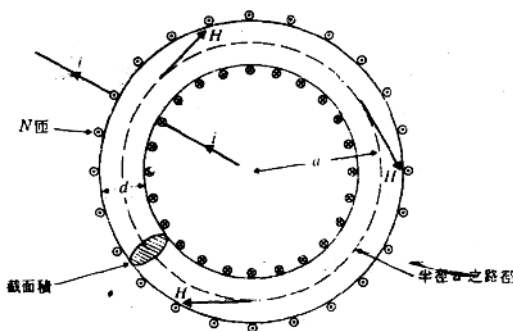


圖 1.1 繞在一木製圓環上的線圈

將 (1.2) 式應用於圓環內半徑較 a 大或小的圓形路徑上，可證明圓環中的 H (連帶 B) 並非均勻。然而如果圓環截面半徑 d 遠小於 a ， H 在截面中就可以視為一定值，平均半徑 a 上的 H 值很近似平均值。

磁通密度 (flux density) 的平均值則為

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

μ_0 是磁性常數 (magnetic constant) ($4\pi \times 10^{-7}$), 所以圓環中的磁通可近似為

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

磁通 (flux) ϕ 可視為所有電流 (Ni) 環繞磁通路徑的結果。此電流稱為磁動勢 (magnetomotive force, mmf)

$$\mathcal{F} = Ni \quad \text{安培-匝} \quad (1.6)$$

$\mathcal{F}$ 的單位通常稱為“安培匝” (ampere-turn), 但因 N 非次元, 所以 $\mathcal{F}$ 也可用安培表示。

對圖 1.1 線圈之磁性系統, 可使用 (1.1) 式之電路定律得知

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

亦即, 沿著封閉路徑上的磁動勢等於彼此路徑所包圍的電流。由 (1.2) (1.4) 與 (1.5) 式

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

於是, ϕ 正比於 $\mathcal{F}$ 並可視為 $\mathcal{F}$ 作用的結果。此兩者之間的比例常數稱為此路徑上的磁阻 (reluctance) $\mathcal{R}$, 定義為

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

所以 $\mathcal{R}$ 以安培每韋伯 (ampere per weber) 表示, 且對圓環系統,

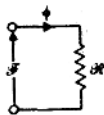


圖 1.2 等效磁路

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

磁阻和磁通路徑長度成正比且和截面積成反比。磁阻在磁性系統中的地位類似於電阻在電的系統中的地位。電阻單位是歐姆 (ohm)，或伏特每安培 (volt per ampere)，表示為

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

ρ 為導體材料之體積電阻係數 (volume resistivity)。

在許多情況下，一類似電路的等效磁路模型有很大的用處。圖 1.2 即為圖 1.1 系統之模型。

在圖 1.1 之系統中，如果電流 i 會改變，磁通 ϕ 也會改變，所以由法拉第定律 (Faraday's law)，線圈中的每一匝都會感應出電動勢 (electromotive force)。每匝的電動勢為

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

線圈中的總電動勢為

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

λ 為線圈的磁通鏈 (flux linkage)，定義為

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

對圖 1.1 之系統，將 (1.3)、(1.4) 與 (1.5) 式代入 (1.14) 式可得

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

所以磁通鏈和線圈電流直接成正比。線圈的電感 (inductance) L 定義為線圈中每安培電流的磁通鏈，以亨利 (henries) 為單位。即

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

且對圖 1.1 系統而言 L 以系統次元表示之大小可由 (1.15) 式得到。由 (1.15)、(1.16) 與 (1.10) 式可見 L 和 $\mathcal{R}$ 的關係是

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

因為圖 1.1 中的線圈可用於電路中，所以用一理想電路元件來模擬它是很方便的。電路分析時就採用元件端點上的電壓，電流與兩者之間的關係來分析。在一沒有電阻的理想線圈 (ideal coil) 中，端電壓等於線圈中感應出的電動勢，所以

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

由 (1.16) 式代入 λ 可得

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

此無電阻之線圈可用如圖 1.3 (a) 之純電感電路元件來表示。實際上，線圈會有電阻，且在許多情況下，電阻的效應如果被忽略將會引起嚴重的錯誤。圖 1.3 (b) 是一考慮電阻效應的實際線圈的模型。在此模型中，

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

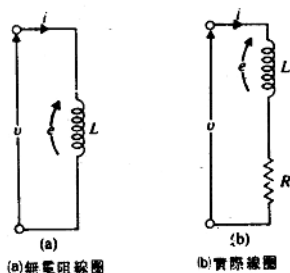


圖 1.3 等效電路

6 第一章 磁性系統

例 1.1 圖 1.4 為一繞在塑膠圈上的圓環線圈，其截面為矩形。線圈中有 200 匝直徑 3 公厘的圓形銅線。

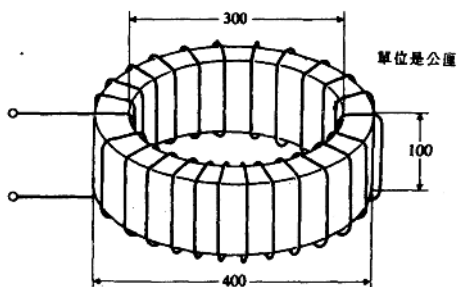


圖 1.4 例題 1.1 之圖

- 當線圈電流為 50 安培時，求出線圈平均直徑處的磁通密度。
- 假設其中的磁通密度是均勻的且等於平均直徑處之值。求出線圈之電感。
- 算出假設磁通密度均勻分布所造成的百分誤差。
- 若銅的體積電阻係數為 17.2×10^{-8} 歐姆·公尺 (ohm-meter)，求出圖 1.3 (b) 近似電路中的參數。

解：(a) 在平均直徑處：

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

$$B = \mu_0 H = 4\pi \times 10^{-7} \times 9095 = 11.43 \times 10^{-3} \text{ 韋伯 / 平方公尺}$$

- (b) 假設 $B_{av} = 11.43 \times 10^{-3}$

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

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

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

換一種求法

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