

電 機 機 械

Electric Machinery

(第 四 版)

原著者：A. E. Fitzgerald

C. Kingsley, Jr.

S D. Umans

譯述者：陳嘯中 高百宏 李育芳

乾 泰 圖 書 有 限 公 司

電機機械

Electric Machinery

(第四版)

原著者：A. E. Fitzgerald

C. Kingsley Jr.

S D. Umans

譯述者：陳嘯中 高百宏 李育芳

乾泰圖書有限公司

本書的第三版在台灣行銷頗廣，但已十二年未予改版。由於近十年來電機機械進步神速，國外新書出版甚多。此風行全球的名著已在上年出版第四新版本。茲為便利國內學生們能在最短時間獲得較深奧而新鮮的知識，特出版本書以應需要。

特價新台幣 220 元

版權所有

翻印必究

出版者：乾泰圖書有限公司

總經銷：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段49號四樓之一

電話：3118308・3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

七十四年十月初版

序 言

與本書的以前三版一樣，第四版對機電組件的基本原理，有一致性的說明，而其重點則放在旋轉電機的應用、控制與限制上。本書大部分，係由第二版與第三版中精華部分選出再經過重新安排與編寫。

在過去的廿年，電力與電子受到相當注意與重視，有很多教科書討論到這個主題，很多電機系也開講獨立課程。當然，僅用一章來討論亦是不夠。因此，固態電機控制的整章在本版中刪除。但用在電機機械上的固態控制觀念仍保留在若干章節中；例如，第六章中的直流電動機中驅動器，及第十章中的交流電動機中的變頻驅動器等。

因此，有空間可加上一些新材料，並將在第二版中曾提到的某些材料再度加入。例如，在交流電機暫態分析中非常有用的 $dq0$ 變數轉換技巧，又重行編入，本書經重新編排後，可使讀者更易使用本書。

本書前四章簡單介紹能量轉換的觀念與旋轉電機機械。第二章中的機電能量轉換，總被認為太過數學化，不適於電機機械的初級課程用。因此，在本版中的寫法改為：前兩節對主題作一鳥瞰，其餘部分則可略去仍不失本書的完整性。

討論直流、同步與感應機的各章，分別成對的出現。在第一章介紹電機的类型、基本模式，及其穩態工作狀況。第二章中則包括電機的控制與動態行為，另外尚包含在基本模式中不常用到的細節。

本書中用到的數學程度，並不比大學中的基礎物理學與電路理論中用的為難。要強調的是，對數學模式有一實質意義的概念。

顯然，本書的內容會超過一般課程所能講授的。因此，實際的講授內容，由各教師依需要自行調整。本書在編排時已特別注意在使用上的彈性，但不失其連貫性。請先花上一兩小時閱讀各章前列的簡介性各節，教師們便可瞭解本書的內容與編排次序。本書也可給學生在

往後從事專業生涯中作為參考書。

A.E.Fitzgerald 博士已於 1978 年 7 月去世，這是對合著本書多年友誼的重大損失。依他的直覺而穩重的見解，思路清晰的寫作風格，確是一件難以代替的貢獻。但其在初版中所寫的資料，仍保留在第四版本中。

在計劃改編第四版時，本書第三版的合著者 A Kusko 博士，由於其它任務不能抽空合作重寫其中部分的工作實引為憾事。

同時失去兩位合著者，幸而獲得 M.I.T 的 S.D.Umans 博士的同意參與此項新版改訂工作。若無他的幹練與熱忱，並對時間進度的信守，此新版書將不易與讀者相見。依吾的感覺，與 Umans 博士的合作，為一愉快的經驗。

C. Kingsley, Jr. 金斯蘭

電機機械

目 錄

序 言

第一章 磁路與變壓器

1.1	磁路簡介	1
1.2	磁通鏈、電感與能量	9
1.3	磁性材料的性質	14
1.4	交流激磁	18
1.5	變壓器簡介	25
1.6	無載狀況	28
1.7	二級繞組內電流的作用；理想變壓器	31
1.8	變壓器電抗與等效線路	34
1.9	變壓器分析在工程上的各種考慮	39
1.10	三相變壓器	49
1.11	標么制	53
1.12	自耦變壓器與多線路變壓器	57
1.13	結 論	61
1.14	習 題	63

第二章 機電能量轉換原理

2.1	磁場系統中的力與轉矩	71
2.2	能量平衡	75
2.3	單激磁場系統中的能量與力	76
2.4	磁力的決定：共能	81
2.5	複激磁場系統	88

2 電機機械

2.6	動態方程式	93
2.7	分析的技巧	97
2.8	結 論	103
2.9	習 題	104

第三章 旋轉電機：基本觀念

3.1	基本概念	115
3.2	直流與交流機的簡介	118
3.3	分佈繞組的磁動勢	129
3.4	旋轉電機的磁場	137
3.5	交流機的旋轉磁動勢波	141
3.6	產生的電壓	147
3.7	非凸極電機中的轉矩	153
3.8	結 論	162
3.9	習 題	164

第四章 實際電機性能的工程觀點

4.1	磁飽和	172
4.2	漏磁通	175
4.3	損 耗	177
4.4	額定與發熱	181
4.5	電機的冷卻方法	185
4.6	激磁源	187
4.7	電機的能量效率	190
4.8	電機問題的性質	191
4.9	結 論	194
4.10	習 題	194

第五章 穩態直流機

5.1	直流機導論	198
-----	-------	-----

5.2	換流作用	206
5.3	電樞磁動勢的作用	208
5.4	電路方面的基本分析	212
5.5	磁路方面的基本分析	215
5.6	穩態表現的分析	218
5.7	換流作用與間極	228
5.8	補償繞組	231
5.9	結論：直流機的應用	233
5.10	習 題	236

第六章 直流機的動態及控制

6.1	直流電動機的速率控制	245
6.2	動態方程式	249
6.3	直流機的轉移函數與方塊圖	252
6.4	自激式發電機的飽和效應	265
6.5	整流電路簡介	269
6.6	固態直流電動機驅動系統	279
6.7	基本的電動機速率穩定器	290
6.8	共樞機與旋轉放大器	295
6.9	結 論	298
6.10	習 題	300

第七章 同步電機：穩態

7.1	多相同步電機	313
7.2	同步電機的電感：等效電路	316
7.3	開路與短路的特性	322
7.4	穩態下功率 - 角度特性	330
7.5	穩態操作的特性	337
7.6	凸極效應；直軸與交軸原理	342
7.7	凸極機的功率 - 角度特性	348

4. 電機機械

7.8	互相聯結的同步發電機	352
7.9	結 論	354
7.10	習 題	355

第八章 同步電機：暫態行為

8.1	同步電機的暫態	362
8.2	直軸與交軸變數的轉換	365
8.3	dqo 變數間的基本關係	367
8.4	突發三相短路分析	371
8.5	暫態功率 - 角度特性	380
8.6	額外轉子線路的效應	382
8.7	同步機暫態分析的模型	387
8.8	同步電機動態	390
8.9	結 論	398
8.10	習 題	400

第九章 多相感應電機

9.1	多相感應電機簡介	409
9.2	感應電機中的電流與磁通	413
9.3	感應電動機的等效線路	416
9.4	等效電路的分析	420
9.5	用 Thevenin 定理求轉矩與功率	424
9.6	利用無載與鎖定轉子試驗的性能計算	430
9.7	結 論	435
9.8	習 題	436

第十章 多相感應機的動態與控制

10.1	轉子電阻的效應：雙層鼠籠式轉子	443
10.2	感應電機的動態	451
10.3	感應機的速率控制	455

10.4	感應機的電暫態·····	459
10.5	用可調速固態交流電動機驅動的應用·····	463
10.6	結 論·····	469
10.7	習 題·····	470

第十一章 分數馬力交流電動機

11.1	單相感應電動機的定量測試·····	479
11.2	單相感應與同步電動機的起動與運轉性能·····	482
11.3	單相感應電動機的旋轉磁場理論·····	491
11.4	對稱兩相電機的不平衡操作；對稱分量概念·····	498
11.5	兩相控制電動機·····	503
11.6	串式通用電動機·····	507
11.7	步進電動機·····	509
11.8	交流轉速計·····	513
11.9	同步與控制變壓器·····	515
11.10	結 論·····	519
11.11	習 題·····	521

附錄A 三相線路

A.1	三相電壓的形成·····	526
A.2	三相電壓、電流與功率·····	529
A.3	Y與 Δ 聯結的電路·····	533
A.4	平衡三相電路的分析：單線圖·····	540
A.5	其它多相系統·····	542

附錄B 交流分佈繞組內的電壓與磁場

B.1	產生電壓·····	543
B.2	電樞磁動勢波·····	550
B.3	分佈繞組的氣隙電感·····	553

第一章 磁路與變壓器

本書編寫目標重在學習機電能量轉換時所需使用的裝置。因大部分這類能量轉換，都藉電磁方式達成。故本書重點放在電磁性旋轉機械，同時又放在變壓器上，它雖然不是一種機電能量轉換裝置，但在能量轉換的主題上，是一種相當重要組件。因在討論旋轉電機時所用到的許多技巧，與變壓器是不可分離的。

實際上，所有變壓器與電機機械都是用磁性材料先形成磁場，作為傳導與轉換能量的媒介。因此，要想瞭解這些裝置，就先要分析並描述一些磁場的特性；導磁物質在決定一個電磁性設備的大小與效率時，扮演一個相當重要的角色。

在本章中，將對磁場與導磁材料作一簡單介紹，這些結果稍後將用來分析變壓器。在往後各章節中，又將其用來分析旋轉電機。

本書編寫內容，假設讀者已對基礎物理課程中的磁學與電學理論有了基本概念，有些讀者可能已經學過電磁學中的Maxwell方程式，但對學習本書時不是必需的。其中有些重要基本方程式，在用到時，都會先作簡略介紹。

1.1 磁路簡介

在大多數情況下，實際工程中的磁場問題，就是在求各種情況下的Maxwell方程式的解。但想求得一個真實的解答幾不可能，且在實際工程上也是不必要的。因此，可先作一些簡化假設，求得些有用的「工程解」(engineering solution)。

第一個簡化的假設在本書中所提到的電機機械與變壓器的變化，及其頻率與大小所引發的位移電流(displacement-current term)項，可在Maxwell方程式中忽略不計。忽略這些項，就會造成Maxwell方程

2 電機機械

式的磁準靜態型 (magneto-quasi-static form)。意指磁場大小，僅由電源電流大小來決定，而磁場的變化量，也直接由電源電流的變化求得。

第二個簡化的假設牽涉到磁路 (magnetic circuit) 概念。通常求一個複雜幾何結構的磁場強度 (magnetic field intensity) $\mathbf{H}$ 與磁通密度 (magnetic flux density) $\mathbf{B}$ 的一般解相當不易。都將一個三維的問題，簡化成一維的等效磁路問題，而得相當令人滿意的「工程解」。

磁路，是一個大部分由高導磁性物質 (high-permeability magnetic material) 所形成的結構。這些高導磁性物質是用來限制磁通在結構內的路徑通行，與導電體限制電流在電路內流動一樣。在本節中的這種磁路觀念將在往後各章節中廣泛地使用着。

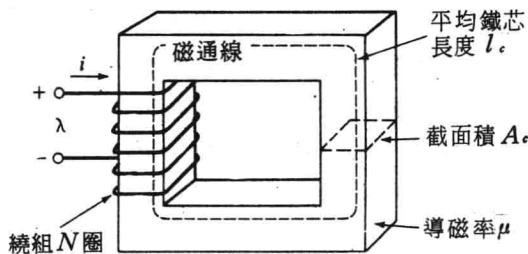


圖 1-1 簡單磁路

圖 1-1，為一簡單的磁路。它的鐵芯 (core)，假設由導磁性遠大於空氣的材料所組成，截面積均一的，由 N 圈的繞組 (winding)， i A (amperes) 電流來激磁。此繞組在鐵芯內部，產生如圖所示的一個磁場。此磁場可視為由一組閉迴路 (close loop)，與繞組交鏈 (interlink) 的磁通線所組成。在沿磁通線上，對磁場強度 $\mathbf{H}$ 的線積分，就等於磁通線所含的淨電流。

在圖 1-1 中，鐵芯的磁場大小，就是電流與匝數的乘積 Ni ，在磁路術語中， Ni 就是磁動勢 (magnetomotive force, mmf) $\mathcal{F}$ 。雖然圖 1-1 中只有一組繞組，在大部分電機機械中至少都有兩組以上的繞組，但也只是將各組繞組的 Ni 相加就可求得總和。由於假設截面積上的

磁通密度均一的，因此 $\mathbf{H}$ 的線積分，就變成磁通線上磁場強度 $H_c l_c$ ，與磁通線平均長度 l_c 的乘積。如此，mmf 與磁場強度間的關係可寫成

$$\mathcal{F} = Ni = H_c l_c \quad (1-1)$$

H_c 的方向，可用右手定則 (right-hand rule) 來表示。亦即，將右手半握，四指順着電流流動的方向，則拇指所指的為其所產生的磁場方向。在圖 1-1 中的線圈表示右手握着 (象徵的說)。手指是指電流方向。拇指為磁場方向。

磁場強度 $\mathbf{H}$ 在其所存在的空間，產生一個磁通密度 $\mathbf{B}$ ，其間的關係為

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-2)$$

其中， μ 為導磁率 (permeability)。 $\mathbf{B}$ 的 SI 單位為 Wb/m^2 ，或稱為 teslas (T)。 μ 的單位為 $\text{Wb/A} \cdot \text{匝} \cdot \text{m}$ ，或稱為 henrys/m。自由空間的導磁率為 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ，鐵磁性物質的導磁率 μ_r 都用自由空間導磁率的相對值表示，亦即 $\mu = \mu_r \mu_0$ 。一般電機機械所用材料的 μ_r ，介於 2000 到 80000 之間。鐵磁性物質的特性，將在 1.3 與 1.4 節中討論。此處假設 μ_r 為一已知常數，但在實際上，會隨着磁通密度而作適切的改變。

因鐵芯具高導磁性，故磁通幾全被限制在鐵芯內，而場線 (field line) 就沿這些磁通線。且由於截面積是均一的，因此截面積上的磁通密度，也可視為均一的。

磁通量 (magnetic flux) ϕ ，是指某表面上垂直分量 $\mathbf{B}$ 的面積分；其 SI 單位為 Wb (webers)；亦即

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (1-3)$$

由場理論中的磁通連續性方程式 (continuity-of-flux equation)

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (1-4)$$

4 電機機械

上式表示，在一三維空間閉合面上的淨磁通等於零。這就等於說，進入某閉合面的磁通線，必從此閉合面的其它某部分離開。當鐵芯外的磁通可以忽略不計時，式 (1-3) 就變成下列的簡單純量方程式 (simple scalar equation)

$$\phi_c = B_c A_c \quad (1-5)$$

其中， ϕ_c = 鐵芯內磁通量

B_c = 鐵芯內磁通密度

A_c = 鐵芯的截面積

在上式中，假設在磁路長度中的 A_c 為一常數。由於場線形成一閉合環路 (closed loop)，因此，磁通亦可視為整條磁路是連續的。

變壓器，是繞在如圖 1-1 的密閉鐵芯上，但能量轉換裝置必需在磁路上留有氣隙，以安放運動元件。一個有氣隙的磁路如圖 1-2 所示。當氣隙長度 g 遠小於相鄰鐵芯面的尺寸時，磁通量 ϕ 可假設完全留在鐵芯與氣隙內，而在氣隙附近的磁路亦可假設為連續的。

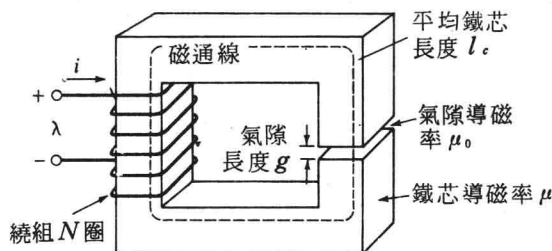


圖 1-2 有氣隙的磁路

因此，圖 1-2 中的磁路，可分為兩個連續部分：一個是鐵芯的導磁率 μ 與平均長度 l_c ；另一為氣隙的導磁率 μ_0 與平均長度 g 。在鐵芯內的磁通密度假設為均一的，截面積為 A_c 。因此，在鐵芯內

$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (1-6)$$

在氣隙內的

$$B_g = \frac{\phi}{A_g} \quad (1-7)$$

如圖 1-3 所示，當磁路通過氣隙時，會向外突出。這種邊緣場 (fringing field) 的效應，會增加氣隙處的截面積 A_g 。有多種實驗法可驗證這種效應。普通的修正方法是在氣隙處，將其長寬各加上一個氣隙長度以彌補此種效應所增加的面積。但此種修正方法只適用於氣隙甚短時。在本書中，此種邊緣場效應均忽略不計。如此， $A_g = A_c$ ，而

$$B_g = B_c = \frac{\phi}{A_c} \quad (1-8)$$

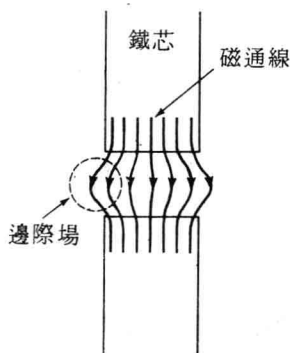


圖 1-3 氣隙內的邊際場

由式 (1-1) 與式 (1-2) 可得該磁路形成的

$$\mathcal{F} = Ni = H_c l_c + H_g g \quad (1-9)$$

$$\mathcal{F} = \frac{B_c}{\mu} l_c + \frac{B_g}{\mu_0} g \quad (1-10)$$

此處， Ni 為磁路上所加的電流乘圈數的乘積總和。因此可知，mmf 的一部分，是用來對鐵芯上的磁場激磁，另一部分是用來對氣隙的磁場激磁。

對實際磁性物質而言， B_c 與 H_c 間的關係並不如此簡單。 B_c 與 H_c 間經常呈非線性的，一個 B_c 值會對應着數種 H_c 值。因此，式 (1-9) 雖然成立，但並不一定保證可導出式 (1-10) 的簡單形式。若必需用 B_c - H_c 間的非線性關係代入前式，就要用圖解或分析方法討論題目。幸而在大多數情況下，用一個導磁率 μ 代入，已足令人滿意。

用式 (1-8)，可將式 (1-10) 重寫成以通量 ϕ 為項的公式為

$$\mathcal{F} = \phi \frac{l_c}{\mu A_c} + \phi \frac{g}{\mu_0 A_c} \quad (1-11)$$

在此，氣隙內的邊緣效應忽略不計，假設磁通線筆直的通過氣隙，上式與磁通相乘的各項，稱為磁阻 (reluctance, $\mathcal{R}$)，鐵芯與氣隙的磁阻分別被定義成

$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (1-12)$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_c} \quad (1-13)$$

$$\mathcal{F} = \phi(\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g) \quad (1-14)$$

因此得

由上式可知，在磁路中每一部分所需的 mmf，在全部 mmf 中所佔的比例，與磁路中各該部分的磁阻成正比。亦即，磁阻愈大，該部分所需的 mmf 亦愈大。由式 (1-14) 同時又知，當鐵芯的導磁率增加時，與氣隙相對應的磁場，變得相當小而可忽略不計。亦即，當 $\mu \gg \mu_0$ ，則 $\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$ 。如此，式 (1-14) 可簡化成，只與氣隙性質相關的式

$$\phi \approx \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_g} = \frac{\mathcal{F} \mu_0 A_c}{g} = Ni \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (1-15)$$

其中，與 mmf 相乘的一項，稱為磁導 (permeance, $\mathcal{P}$)。因此，氣隙的磁導就等於

$$\mathcal{P}_g = \frac{1}{\mathcal{R}_g} = \frac{\mu_0 A_c}{g} \quad (1-16)$$

在 1.3 節中，將會知道，實際導磁材料的導磁率並非常數，會隨着磁通量的大小而改變。由式 (1-12) 到式 (1-14)，可知只要導磁率相當大，它的變化就不會對磁路產生明顯的影響。

至此，已藉簡單的幾何形狀，將前所提到的磁準靜電場 (magneto-quasi-static field)，進一步簡化成磁路模式 (magnetic-circuit model)。本節的最終目的，是說明實際工程上，會遇到的某些觀念與名詞。特別要強調的是，此處考慮的簡化方法，並不適用於所有工程上的問題。在實際問題上的簡化方法，視情況而定。例如，在此假設導磁率為常數，而在 1.3 節中可知通常不是一個常數。又在此假設磁場完全被限制在鐵芯與氣隙內，但在稍後，將會知道，當一個磁路內有兩組以上繞線時（大部分的變壓器與電機機械均屬此種型式），在鐵芯外，會形成一個漏磁場 (leakage field)，在決定各組繞線間的磁耦合時，將是重要。

例題 1-1

一磁路如圖 1-2 所示。已知 $A_c = 9 \text{ cm}^2$ ， $A_g = 9 \text{ cm}^2$ ， $g = 0.050 \text{ cm}$ ， $l_c = 30 \text{ cm}$ ， $N = 500$ 匝。設鐵的 $\mu_r = 70000$ 。試求：(a) 當 $B_c = 1 \text{ Wb/m}^2$ 時的電流 i ；(b) 磁通 ϕ 與磁通鏈 (flux linkage) $\lambda = N\phi$ 。
解：(a) 由式 (1-10)，該磁路的 A-匝數 (ampere-turn) 為

$$Ni = \frac{B_c l_c}{\mu_r \mu_0} + \frac{B_g g}{\mu_0}$$

因 $\phi = B_c A_c = B_g A_g$ ，故電流為

$$i = \frac{B_c}{\mu_0 N} \left(\frac{l_c}{\mu_r} + g \right) = \frac{1}{(4\pi \times 10^{-7})(500)} (0.04 + 5.0) \times 10^{-4} = 0.80 \text{ A}$$

注意，由於其高導磁率，此處 30 cm 的鐵芯路徑的磁阻，只有 0.050 cm 氣隙磁阻的 $0.04/5.0 = 0.008$ 倍。

(b) 由式 (1-8) 得