

電機機械學

Electric Machines

(下 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

第四章 直流機

在第 3.3.1 與第 3.3.2 節中，已討論過直流電機的基本原理。本章將更詳細的分析其動作過程，並將導出用來預測穩定狀態特性 (steady-state performance) 的等效電路模式。

4.1 直流機的磁系統

圖 4.1 (a) 兩極機械 (two-pole machine) 的磁系統。該系統係由圍繞各極的一個或多個場繞組激磁。磁力線穿過極的中心，經由極靴 (pole shoe) 散佈到轉子周圍的一邊，然後經過轉子上的齒，通過氣隙，到達另外一極，再由定子的軛部回來。

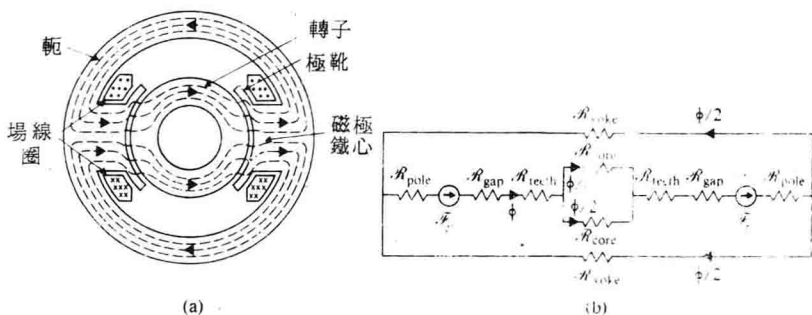


圖 4.1 (a) 兩極電動機的磁系統，(b) 等效磁路

欲決定一電機機械的性能，必需知道通過每一極下氣隙的磁通量 ϕ 與每一極線圈所生的磁動勢 $\mathcal{F}_p$ 間的關係。依 1.8 節的方法，可得如圖 4.1 (b) 的等效磁路。在這個磁路中，磁路系統的每一部分，都分別有磁阻表示出來。此磁路系統有的磁通密度大略為均勻的。

在磁通量不大的情況下，電機機械中的磁性材料可視為理想的，

其導磁率可視為無限大。若將所有與這些材料對應的磁阻定為零，則每一極中的磁通量，可由下式近似之。

$$\phi = \frac{2 \mathcal{F}_p}{2 \mathcal{R}_g} = \frac{\mathcal{F}_p}{\mathcal{R}_g} \quad \text{Wb} \quad (4.1)$$

磁阻 $\mathcal{R}_g$ 與極的面積成反比，而與有效氣隙長度 g 成正比，將槽所造成的影響考慮進去。

磁通量 ϕ 加大後，在電機機械內的各個部份，都可能發生磁飽和。在轉子的齒上，可能性更大。圖 4.2 (a) 所示為各氣隙內磁通量 ϕ 與極磁動勢 $\mathcal{F}_p$ 間的關係；在磁飽和變得明顯以前，圖 4.2 (a) 的曲線可由 (4.1) 式描述，且其誤差很小。

雖然在許多分析中，磁滯現象 (magnetic hysteresis) 可以忽略不計，但在某些型式的電機機械中，磁滯的影響很大。圖 4.2 (b)，將磁通量與磁動勢的多值關係，稍微誇大地顯示出。

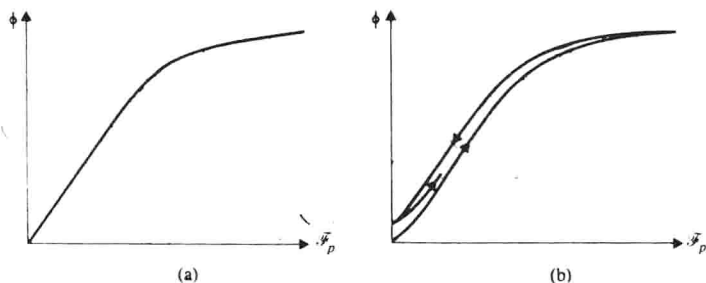


圖 4.2 每極中氣隙磁通量 ϕ 與磁動勢 $\mathcal{F}_p$ 的關係

(a) 不考慮磁滯現象，(b) 考慮磁滯現象。

如圖 4.1 (a) 所示，在兩極的電機機械中，介在兩極間的空隙相當大，使對轉子表面無法作充分有效的利用。若如圖 4.3 所示，使用較多的極數，可減少每單位輸出馬力所需的磁性材料。圖中相鄰極的磁動勢作用方向，是相反的。因這系統是對稱的，各氣隙中每極的磁通量 ϕ 與每極的磁動勢 $\mathcal{F}_p$ 間的關係，可只由一個磁路來決定，如圖 4.3 中的 abc 。

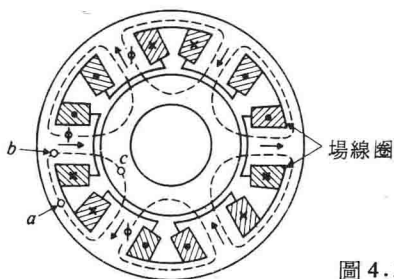


圖 4.3 六極電動機的磁路系統

4.1.1 磁化特性的決定

磁通量與磁動勢間的關係曲線可由電機機械的大小及構成磁系統各元件材料的磁性質來預測。由於磁阻 $\mathcal{R}_g$ 很是重要，故應該首先考慮它的計算方法。若電樞 (armature) 的表面是光滑的，且氣隙寬度各處一樣，則磁阻可用下式來近似：

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_p} \quad \text{A/Wb} \quad (4.2)$$

式中， A_p 為極靴表面的面積， g 為氣隙寬度。但對有槽的轉子而言，磁通所經的有效面積實際上是減少的。若氣隙非常窄，所有的磁通可想成只經由齒的上方的氣隙通過。此時，氣隙這段的有效面積縮減成爲

$$A_g = A_p \frac{t}{t + d} \quad \text{m}^2 \quad (4.3)$$

式中， t 與 d 為轉子表面的齒與槽的寬度，如圖 4.4 (a) 中所示。但在齒邊緣的磁通，會擴散開來，如圖 4.4 (b) 的磁場分佈所示。磁通會穿透到槽的裏面，因此，真正有效氣隙面積 (effective air-gap area)，應介於 (4.3) 式的計算值與極表面面積 A_p 之間。在許多情形下，有效氣隙面積，用下列經驗公式便已足夠。

$$A_g = A_p \frac{(t + kd)}{(t + d)} \quad \text{m}^2 \quad (4.4)$$

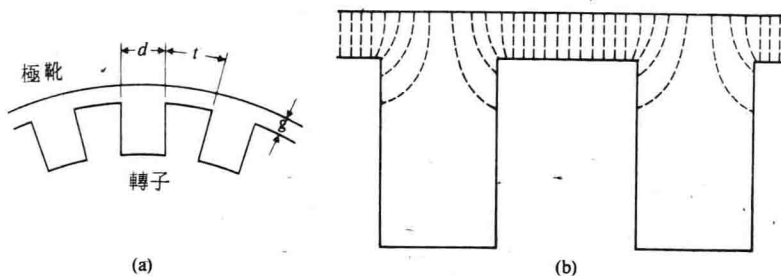


圖 4.4 氣隙磁阻的決定

$$k = \frac{1}{1 + d/5g} \quad (4.5)$$

另外，(4.4) 式中修正因數 (correction factor) 的倒數，可用在氣隙寬度上，以求有效氣隙寬度的計算式如下：

$$g_e = g \frac{(t + d)}{(t + kd)} \quad \text{m} \quad (4.6)$$

因此，在 (4.2) 式中，用 A_e 代替 A_p ，或以 g_e 代替 g ，均可增加 R_a 的精確度。

當磁系統的磁通量開始增大時，最先飽和的地方，通常都在齒的附近。槽的兩邊通常是平行的，以容納截面積為矩形的繞線。因此，齒的形狀是一頭寬另一頭窄，如圖 4.4 (a) 所顯示。對一已知磁通量 ϕ ，齒磁阻所消耗的磁動勢，或是經過齒磁阻的磁位差，可由下列步驟求得：(1) 求出通過一個齒的磁通量，(2) 求出經過齒路徑上各點的磁通密度 B ，(3) 由材料的 $B-H$ 曲線找出相對應的磁場強度 H 以及 (4) 沿齒路徑，將 H 積分得到磁位差。

對一個已知磁通量 ϕ ，通過其他磁阻的磁位差，可由其材料的 $B-H$ 曲線算出。將圖 4.1 (b) 通過封閉磁路上各個磁阻的磁位差上相加，就可得到場繞組所需產生的磁動勢值。圖 4.2 (a) 所示的各氣隙中磁通量 ϕ 與每極磁動勢 $\mathcal{F}_p$ 間的關係。若電機機械是設計成磁系統所有元件均幾乎同時到達它們 $B-H$ 曲線的飽和部份。則圖 4.2 (a) 中 $\phi - \mathcal{F}_p$

關係接近飽和時會很快地飽和。但若不同的元件在不同的磁通量 ϕ 下達到飽和，則 $\phi - \mathcal{F}_p$ 曲線上的斜率變化將較緩慢。

在相鄰極的空氣間隙內，有漏磁 (leakage flux) 通過，由於此磁通並未進入轉子，故對能量轉換無任何助益。但它使場線圈的磁通交鏈量高於圖 4.1 (b) 等效磁路所預測的值，且對磁極鐵心 (pole core) 與軛的飽和有正向影響。

4.2 電樞繞組

直流機轉子上的繞組稱為電樞繞組 (armature winding)，而在定子上的繞組稱為場繞組 (field winding)。

在實際應用時，需將 3.3.2 節所討論的直流機在幾個方面作若干改良。首先，轉子上固定有許多很多匝數的線圈，構成線圈一邊的所有導線，均放在一個槽內，構成另外一邊的所有導線則放在另一個槽內。圖 4.5 所示，是一個兩匝線圈的導線與端接頭 (end connector) 的安排方法。其次，有時槽在轉子表面並不沿着軸的方向行進，而是歪偏一個槽距而形成螺旋形。這種安排方法，使當一個槽通過極下邊緣時，磁路系統的磁阻，不會突然改變，因此，可消除電機機械一般經常發生的振動與噪音。第三，在大型電動機上裝有兩個以上的場極 (field poles)，使電樞上有最大數量的導線處，在高磁通密度的區域內。

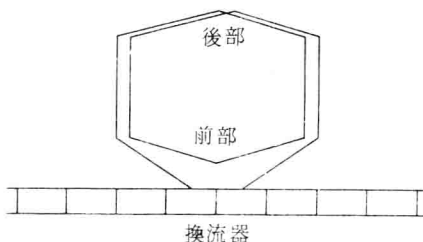


圖 4.5 電樞上疊繞的兩區線圈

圖 4.6 (a) 所示的是四極電機機械磁系統的磁通所經路徑，定子上的四個極，故轉子的電樞繞組也有四個極。圖 4.6 (b) 中四極電機機械氣隙磁動勢 $\mathcal{F}_{sg}$ 與 θ 的變化相對顯示出磁動勢沿着空氣間隙有兩個整週期的變動。如 3.5 節中所解釋的，只要分析一對極附近的實際情況便已足夠，故圖 4.6 (b) 中橫軸的單位用電弧度 (electrical radians) 來計算較為方便。

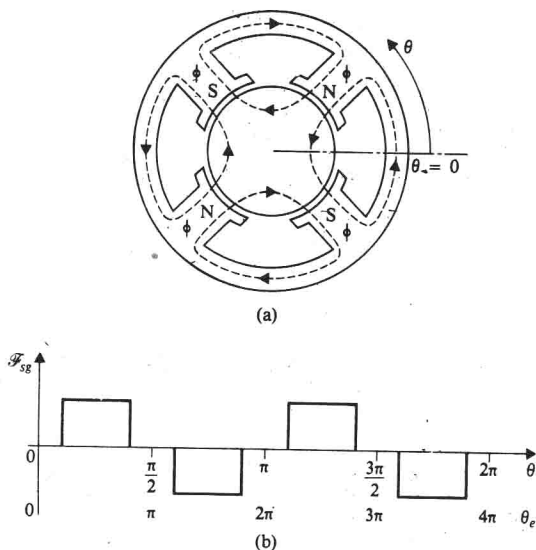


圖 4.6 四極電動機的磁路與磁動勢

圖 4.7 所示為直流機，將其自換流器端所見到的電樞繞組展開成易於了解的圖形。觀察的方向如圖 4.7 (c) 所示。將觀察者眼睛位置想像成放在轉子的軸上，經由繞組向定子看去。這樣，轉子的正方向轉動 ω_m ，將造成如圖 4.8 自左到右正向線形運動的導線。同時觀察者的位置，假設所看到的磁動勢波第一個週期的前半，是正的，如圖 4.6 (b) 所示。

圖 4.8 顯示，轉子槽數為奇數的四極電機機械 (4-pole machine)。為求簡明，將線圈數比實際減少許多，並且每一線圈只有一匝。每

個槽中放着兩根導線，成為雙層繞組 (double-layer winding)。因為繞組內電流的路徑會轉回與原先的重疊，這種繞線方法，稱為疊繞 (lap winding)。注意，換流器上相鄰小片 (commutator segments) 在經過炭刷下方時，會暫時地短路（由於轉子槽數的減少，所以圖中必需將炭刷所覆蓋的換流器部份放大，以顯示這一點）。因此接到這兩個小片的線圈，也會暫時地經由炭刷形成短路。目前暫且忽略這些短路線圈上的電流，它們所造成的影響，將在以後討論。

炭刷間電流的路徑，可追溯電樞繞組得知。圖 4.7 中，從置於第 11 與 12 小片上的正極炭刷出發，可追溯到兩個負極炭刷中的一個；同樣，從放在第 1 與第 2 小片上的正極炭刷出發，也可追溯到兩個

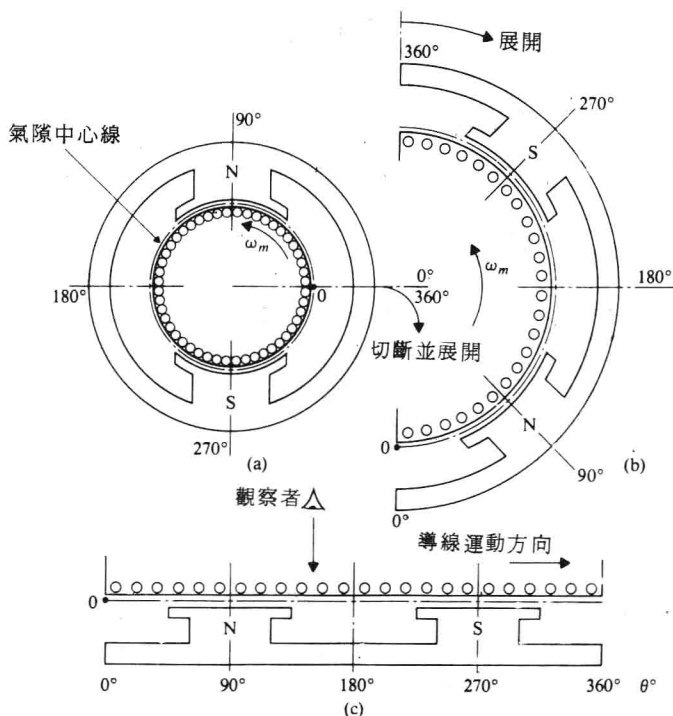


圖 4.7 兩極直流電動機的展開

負極炭刷中的一個。而正極炭刷是彼此連接的，負的也是一樣。故從電樞正極端到負極端共有四條路徑彼此並聯，在疊繞中，並聯的路徑數目與極數、炭刷數目相同。

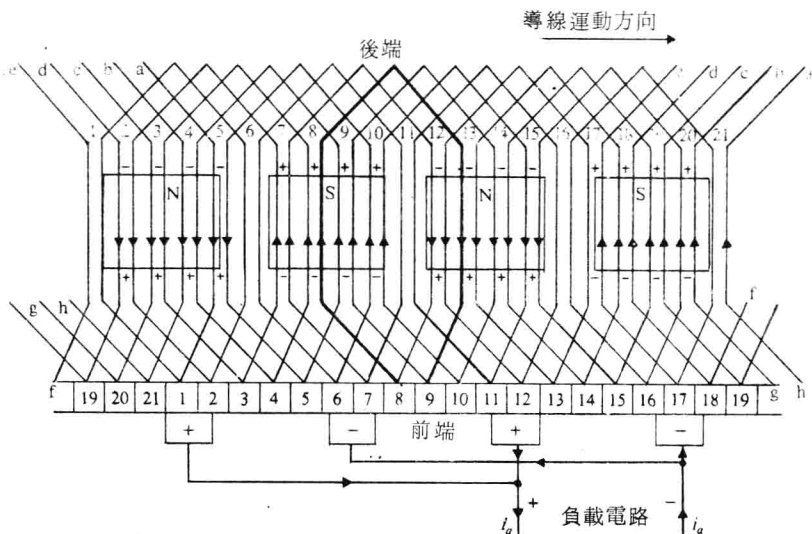


圖 4.8 四極疊繞，作為發電機用（由圖 4.7 展開的繞線向下看所看到的）

圖 4.9 所示，為另一種兩極以上的電機機械的電樞繞組內線圈連接方法，導線與端接頭（end connector）的安置方式如圖 4.10 所示，與圖 4.5 相較，可知這兩種繞組方式的基本不同點在於線圈尾端連接在換流片的方式。圖 4.9 的繞線方式，稱為波形繞組（wave winding）。這個名稱可經由追溯繞組內電流路徑而清楚。圖 4.9 中的粗線，是一個線圈，可以看出是呈波狀的。

若追溯從正極到負極，經由波形繞組的電流路徑，則從電樞正極到負極只能找到兩條並聯的路徑。基本上這兩個正極炭刷是接連到繞組的同一點上；因為它們分別與只由一個線圈連接的整流片彼此相接觸。負極炭刷也是如此。因此，當電流由正極炭刷流到負極炭刷時，會經過較多串聯在一起的線圈。