

初級·电工原理

(第三冊)

陸 鶴 壽 編

上海科学技术出版社

目 錄

第十六章 發電機的工作原理..... 379

- 16-1 簡化了的電機形式..... 379
- 16-2 電樞單圈旋轉了..... 380
- 16-3 基本發電機和正弦波有着密切的關係..... 387
- 16-4 從交流電得到直流電..... 390
- 16-5 換向器是怎樣工作的..... 391
- 16-6 再比一比交直流發電的情況..... 397
- 16-7 什麼因素決定感應電動勢的大小..... 399
- 16-8 感應電動勢的計算..... 402
- 16-9 複習題..... 408

第十七章 電動機的工作原理..... 411

- 17-1 先談原則..... 411
- 17-2 電能改變成機械能..... 413
- 17-3 電動機工作原理的另一種解釋..... 415
- 17-4 電動機適用的左手定則... 416
- 17-5 兩個磁場一定互相排斥... 417
- 17-6 電動機的反電動勢..... 419
- 17-7 反電動勢有什麼作用..... 420
- 17-8 力的問題..... 422
- 17-9 什麼是轉矩..... 424
- 17-10 電動機的轉矩..... 425
- 17-11 直流電動機的轉速..... 427
- 17-12 複習題..... 428

第十八章 磁場部份的結構..... 430

- 18-1 直流電機的基本構造..... 430
- 18-2 直流電機的磁場是那麼來的..... 432
- 18-3 直流電機中磁場部份的結構..... 434
- 18-4 激磁繞組的電流是那麼來的..... 437
- 18-5 三種重要的激磁法..... 438
- 18-6 多極電機好處多..... 440
- 18-7 複習題..... 442

第十九章 電樞部份的結構..... 443

- 19-1 增加電樞單圈數目的結果 444
- 19-2 單圈排列的位置亦是重要的..... 445
- 19-3 電樞的鐵心有什麼作用... 447
- 19-4 電樞鐵心的構造情況..... 448
- 19-5 電樞繞組的基本形式和它

們的優缺點.....	450	19-9 波繞法.....	460
19-6 鼓型繞組的基本繞法.....	452	19-10 波繞線圈中的電流行程.....	463
19-7 疊繞法.....	453	19-11 一般性的繞組問題.....	465
19-8 沿着疊繞線圈的旅行.....	457	19-12 複習題.....	466

第二十章 換向部份的結構和相關問題..... 468

20-1 換向器的構造.....	468	手.....	478
20-2 電刷和刷握.....	470	20-7 理想的換向程序.....	480
20-3 電刷的本位.....	471	20-8 換向時的火花.....	483
20-4 什麼是發電機的電樞反應.....	473	20-9 最簡單的抑制火花法.....	484
20-5 電動機亦有電樞反應問題.....	476	20-10 複習題.....	486
20-6 間極是電樞反應的有力敵.....			

第二十一章 直流發電機的種類和特性..... 488

21-1 發電機的分類.....	488	21-7 怎樣得到理想的發電機.....	499
21-2 他激發電機的特性.....	491	21-8 複激發電機的特性.....	500
21-3 串激發電機中電壓是怎樣 升起的.....	493	21-9 為什麼直流發電機要並聯 運用.....	502
21-4 串激發電機的特性.....	495	21-10 並聯運用的條件是什麼.....	503
21-5 分激發電機的電壓活起來 了.....	496	21-11 直流發電機怎樣做並聯.....	504
21-6 分激發電機的特性.....	497	21-12 複習題.....	507

第二十二章 直流電動機的特性和控制..... 510

22-1 電動機的分類.....	510	22-7 電動機怎樣開動的.....	520
22-2 電動機那些工作特性是重 要的.....	511	22-8 什麼因素決定電動機的轉 速.....	523
22-3 他激電動機的特性.....	512	22-9 電動機的轉速怎樣控制的.....	523
22-4 分激電動機的特性.....	512	22-10 電動機有那些保護設備.....	527
22-5 串激電動機的特性.....	514	22-11 複習題.....	530
22-6 複激電動機的特性.....	516		

第二十三章 直流電機的運用..... 582

- | | |
|-------------------------|--------------------------------|
| 23-1 電機的損失是多樣性的... 532 | 23-6 電動機的構造影兒..... 541 |
| 23-2 電機要在高效率工作..... 534 | 23-7 變速電動機有那幾種..... 544 |
| 23-3 電動機輸出量的測量方法 535 | 23-8 發電機和電動機的組合應
用..... 545 |
| 23-4 電機的冷卻散熱... .. 538 | 23-9 複習題..... 546 |
| 23-5 電動機帶動負荷的方法... 539 | |

第十六章

發電機的工作原理

發電的概念早在第四章裏有了明確的說明，所以發電機實在就是經電磁感應的方式，把機械能變成有偉大貢獻的電能的機器。我們已經掌握了電和磁的基本理論，現在再在這個基礎上學習電機的工作原理，實在是很確當的。不過電機的理論並不簡單，單靠我們已經學過的一點知識，要一下子體會電機全部道理還差得遠呢。爲了這一點，我們不得不先放棄了實際的電機，來從頭介紹簡化了的形勢。這個不是「匣圈子」和「不切實際」的方法，恰恰相反，唯有逐步從簡單到複雜，才能深刻地和徹底地了解電機的工作原理。

16-1 簡化了的電機形式

第八章裏介紹的電磁感應原理是電機的最原始的和最簡單的部份，因爲它包含了三個主要的基本因素，就是磁場、導體和運動，所差的只是它沒有電機的形式吧了。這一部份既然解釋得很詳細，我們亦不再重複，而從圖 16-1 說起。

在圖 16-1 中，仍利用永久磁鐵，以便產生一個平均的磁通。導體是裝在由兩塊絕緣木塊組成的轉軸上，這個導體就擔任了

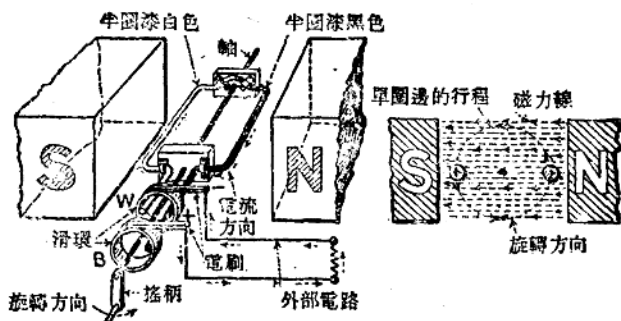


圖 16-1 簡化了的電機。電樞單圈在開始位置。

電機中電樞部份的任務。圖 16-1 和圖 8-1 所不同的就在這裏，差別雖然很小，但是圖 16-1 却具備了「旋轉」的條件，因之在割切磁場上亦發生了不同的作用。為什麼如此，以後會解釋的，這裏只需要認清這一點。這樣的導體在我們的解釋中稱做電樞單圈，並且爲了旋轉時容易識別起見，電樞單圈的一半是白的，另一半漆了黑色。這個單圈的兩頭各銲接一個金屬圓環，那末用電刷接觸後，就可以把電流引導出來。在實際的交流發電機中的確用到圓環，我們稱它滑環，無非因爲電刷能夠在環面上滑動的關係。

16-2 電樞單圈旋轉了

電機開動後，每一分鐘要旋轉幾百轉，有時多到千轉以上，我們的肉眼就無法看出電機內部的情況。這一點並不困難解決。我們可以利用電影的「慢動作」法術，來透視旋轉的電樞上任何

一個單圈的實際情形。

現在可以使電樞單圈旋轉了。本來旋轉的方向並不受限制，向左旋或向右旋都是可以的；不過在這裏的說明中，我們採取了向左旋的方向。這個方向一般稱做反時針的方向，無非因為它和鐘表上的時針取反對的方向。這種用時針的方向來說明電樞的旋轉方向是很普遍的，我們學習電工原理時就有需要熟悉這一點。

再看圖 16-1 中的截面圖。圖中畫出的磁場（就是磁力線或磁通）的方向是自右到左（由北極到南極），圖中又畫出了電樞單圈的旋轉方向——反時針方向。至於電樞單圈中電流應取的方向，在這圖中亦有表示，就是「黑」單圈部份的電流向紙面「外」流，由 $\odot$ 來代表，而「白」單圈部份的電流向紙面「內」流，由 $\otimes$ 來代表。這種電流方向的代表法，亦是在電工學上普遍採用的符號。

圖中的情況很顯然，電樞單圈的「黑」「白」兩部份都割切了磁力線，照理就有一個電動勢發出來。如果這個雛型發電機的外部電路是接通的，這個電動勢就推動了電流，像圖中所示一般。在這個情況下，滑環 W 上引出的電壓將是負的，而滑環 B 則必然引出電壓的正端。兩個電刷和兩個滑環的接觸是很良好的，所以滑環 W 上的負電壓亦使電刷 W 上的電壓變成負的，滑環 B 上的正電壓則使電刷 B 上的電壓變成正的。在以後可以看到，在這個位置上，電樞單圈中感應的電動勢是最大的。

兩個電刷接到電機外部的電路，電刷 B 的電位高（正電壓），驅使電流向着電刷 W 流去。這就說明發電機在轉動時為什麼會有電流的，亦說明電流為什麼會取一定的流向。

從圖 16-1 到圖 16-2，電樞單圈只旋轉了 45° 的角度。這時

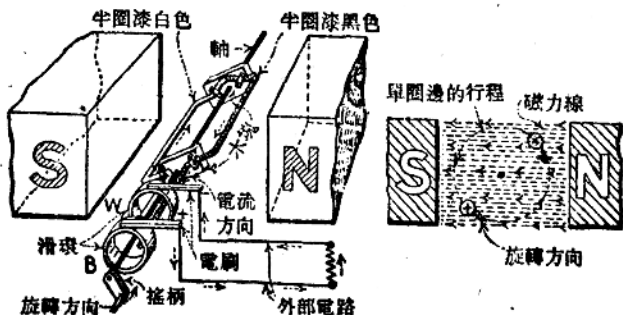


圖 16-2 電樞單圈旋轉了 45° 時的情況。

[黑]單圈部份仍在右邊，而[白]單圈部份仍在左邊。由於這個關係，滑環 W 和電刷 W 上都還保持着負電壓，而滑環 B 和電刷 B 上必然的仍舊在正電位。電動勢的方向既然沒有變動，電流的流向亦就無法變動，只不過在數量上打了一個折扣。我們曉得，電樞單圈是照着一定的速度旋轉的，決不會時而快和時而慢的，那末就很顯然，在這個位置電樞單圈所感應的電動勢，就在[每況愈下]的下坡路上，比較圖 16-1 所產生的要小得多了。這一點是由圓周運動的本質來決定的，亦就使得每一個瞬時感應出一個不同量的規律性變化的電動勢來。在第十章和第十一章裏，這個問題已經說得很多，這裏亦就從略了。

在圖 16-3 中，電樞單圈的平面正好和磁極面平行，亦就是恰

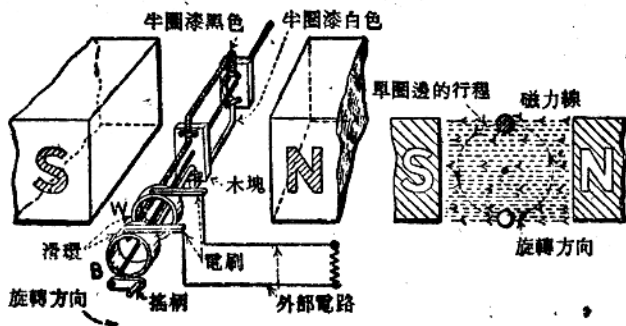


圖 16-3 電樞單圈旋轉了 90° 時的情況。

恰和磁力線成垂直。這一個位置亦很重要的，因為在圖中可以看出，不但沒有電動勢的產生，亦沒有電流的流行。產生這種結果的關鍵，就在於電樞單圈的「黑」白兩邊都和磁力線「平行」，失去了「割切」的行為。

從圖 16-1 到圖 16-3，實際上就是電動勢的最大降到零的情況，歷時只有 90° 。在這裏是由三幅圖來表示的，但是電動勢的變化情形並不是跳躍的，而是正弦性質的。所以這些圖，以及以後的各個圖，都只表示電樞旋轉某一個角度的「瞬時」磁場情形。

電樞還是繼續在等速度旋轉着。根據圖 16-3 我們可以看出，只要電樞單圈略微從 90° 的位置偏移一點，「黑」白兩邊又開始對磁力線發生割切作用。不過，這時單圈每一邊所感應的電

動勢方向恰恰和以前的電動勢方向相反。我們可以用學過的右手定則（第8-4節）來證明這時電流的方向，應該是L白邊出和L黑邊進。結果使滑環W的電位高於滑環B，外部電路的電流亦會L向後轉，改從電刷W流到電刷B。

從圖16-3到圖16-7代表電樞單圈旋轉了180度，亦就是從

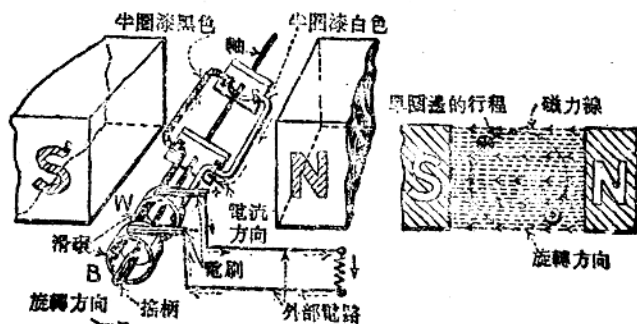


圖16-4 電樞單圈旋轉了135°時的情況。

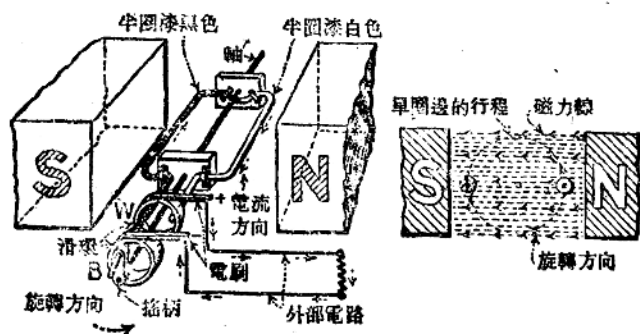


圖16-5 電樞單圈旋轉了180°時的情況。

[單圈平面]的一個垂直位置(黑邊在上)到另一個垂直位置(白邊在上)。在這一段過程中,磁力線的割切率是由零上升到最大,再由最大下降到零。不過無論如何,感應電流總取一樣的方向,使得滑環 W 和電刷 W 保持高電位。這裏圖 16-5 是磁力線割切率最大的位置,亦是瞬時電壓最高的情況。電樞單圈每一

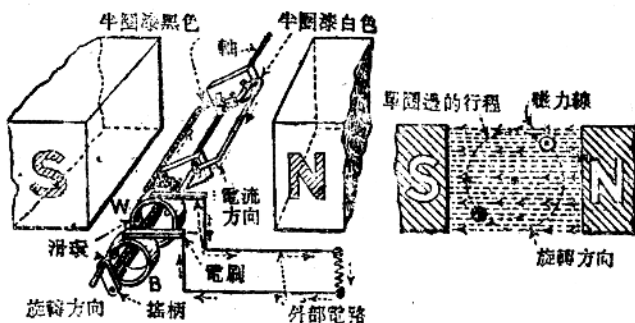


圖 16-6 電樞單圈旋轉了 225° 時的情況。

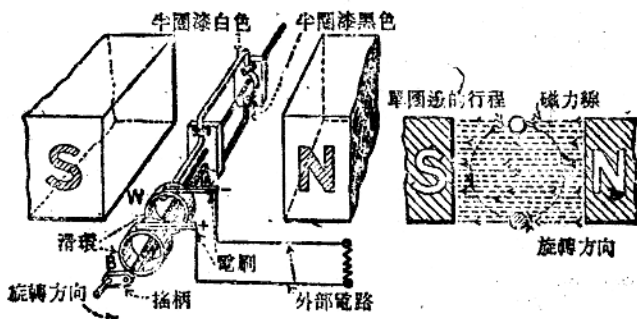


圖 16-7 電樞單圈旋轉了 270° 時的情況。

邊的電流方向在各圖中都已繪出，一看就明白的。

自圖 10-7 起，電樞單圈內的情形又起了一次重大的變化，值得我們注意。這些變化是：(1)滑環 B 和電刷 B 的電壓從低的負值改變為高的正值；(2)感應的電動勢自零逐漸上升到最大；(3)電流的流向亦就從電刷 B 經過外電路到電刷 W 。

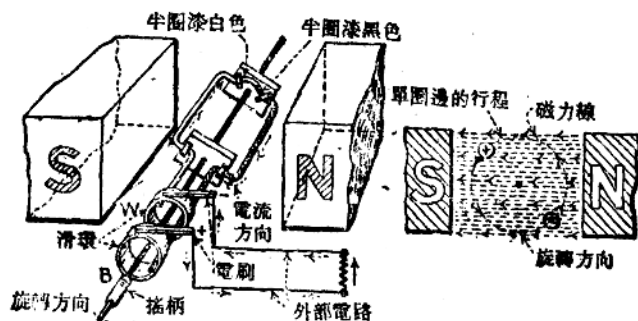


圖 15-8 電樞單圈旋轉了 315° 時的情況。

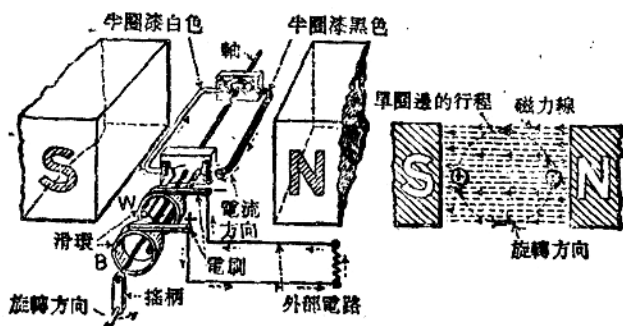


圖 16-9 電樞單圈旋轉了 360° 時的情況。

圖 16-1 和圖 16-9 實際上是一樣的，這是因為電樞單圈已處在同一個位置了——[白]邊在左和[黑]邊在右，同時單圈的平面和磁力線平行。這裏九幅圖雖然很是簡單，但是對於電樞旋轉後所有的情況都已包括在內。我們看了這些圖需要認真地反覆學習一下，方才容易瞭解任何一個發電機裏的所作所爲了。

16-3 基本發電機和正弦波有着密切的關係

上一節中，電樞單圈做了一次[環球旅行]，在這同時它發揮了作用，感應了電動勢和推動了電流。現在應該總結一下這些行爲，並且因此說明基本發電機的作用和正弦波有着密切的關係。

從圖 16-1 到 16-9 只是一次循環中各個瞬時情況的表示：表示了電樞單圈的位置，表示了電流方向、旋轉方向和磁場方向。在以前雖然亦說明過電動勢的變化情形是正弦波性質的，但是沒有詳細的分析，對於讀者所起的影響還不夠明確，這裏就要細緻地說明這兩者間的關係，這樣才能使發電的基本原理明朗化。

我們必須先認清發電機工作的基本條件。主要的是：(1)磁場是均勻的和(2)電樞旋轉的速度是始終如一的。如果發電機工作的基本條件並不是如此的，那末感應的電動勢就不是正弦形的，或者甚之是奇形怪狀的，這些都屬於例外的特殊情形，不是一座正常發電機應有的作用，所以不在我們討論之列。

先看圖 16-10，這是把以前各圖簡化了的剖面圖，保存着磁場和電樞。這裏的電樞單圈的兩[邊]分別由 S 和 S' 來代表。當

電樞單圈的兩邊由 AA' 旋轉到 BB' 位置時，產生了磁力線的割切行爲，一如上述。我們曉得，每一圓周總可以分成 360 度，如

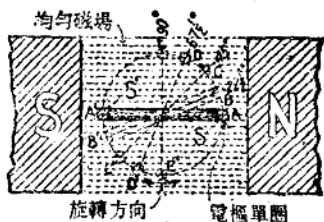


圖 16-10 在均勻磁場中割切磁力線的情況。

果這裏的電樞單圈需要 16 秒鐘的時間旋轉一周——360 度，那末從 AA' 位置到 BB' 位置，恰巧佔一周的 $1/16$ ，所以需時 1 秒鐘。從這一點可知， AA' 和 BB' 之間的角度是： $360 \div 16 = 22\frac{1}{2}$ 度。同樣的，從 BB'

到 CC' ，從 CC' 到 DD' ，從 DD' 到 EE' ，……等都具有 $22\frac{1}{2}$ 度的角度，所以 AA' 到 EE' 恰是 90 度，計算起來並不困難。這些情況說明了旋轉速度是一致的，每一秒鐘各旋轉了 $22\frac{1}{2}$ 度。

電樞單圈對於磁力線的割切情況又是怎樣的呢？這是整個發電作用的主要關鍵問題，直接支配着感應電動勢的數值。從圖我們可以先得得到大概的結果。我們不妨計點一下：從 A 到 B ， S 邊在一秒鐘內割切了 5 根磁力線；從 B 到 C ，在同一時間內 S 邊割切了 3 根磁力線；從 C 到 D ， S 邊只割切 2 根磁力線；最後從 D 到 E ， S 邊所割切的磁力線只有一根了。這是非常籠統的情形，只能約略地表示磁力線的割切率；即使如此，我們還是能夠看出這個「割切率」是在變化中的，並且隨着單圈旋轉角度的增加而減少了。換句話說， S 邊愈接近 E 點，磁力線的割切速率（每 1 秒鐘割切的數目）就愈小。

電樞單圈的另一邊—— S' 邊——亦是以同樣的割切率從 A' 到 E' 橫過均勻磁場。這個 S' 邊運動後所感應的電動勢，對於電樞單圈所起的作用，完全和 S 邊一致。所以我們可以根據第八章中介紹過的原理，配合了這裏的實際情況，得出一個很重要的結論來，就是 S 邊（或 S' 邊）愈近 A 點（或 A' 點），感應的電動勢愈大；反之，當它們愈近 E 點（或 E' 點）時，感應的電動勢就愈小。事實證明：在 A 點（或 A' 點）的電動勢最大，但在 E 點（或 E' 點），電動勢就是最小了。

這種概括性質的電磁感應現象亦可以用圖來表示出來，這就是圖 16-11。這裏爲了要使正弦電動勢曲線能夠從 0 點開始，

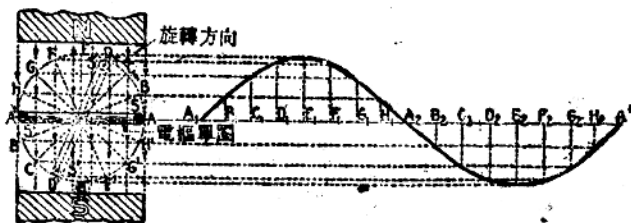


圖 16-11 正弦波的產生。

磁場方向已經旋轉了 90 度。這就是圖 16-10 和 16-11 的不同處，對於我們理論的解釋是沒有影響的。這種正弦曲線對於本書的讀者已很熟悉，不必再多加說明。在每一點上，感應的電動勢值由水平線上下的高度來代表。在水平線上下的電動勢是同形狀的，我們用三角學就很容易證明正弦形曲線的必然性，因之可知它一定具有這種週期性的對稱的形狀。

我們可以肯定說：在均勻磁場中，等速旋轉的電樞單圈一定感應正弦性質的電動勢，絕無例外。這種電動勢就是我們通常稱作「交流電」的一種。爲了這個原因，這種發電機就是交流發電機。說來亦很奇怪，交流發電機的工作原理，亦就是正弦波電動勢的感應原理，是所有發電機（直流的和交流的）最基本的原理。這一點在下面有說明的，這裏恕不贅述了。

16-4 從交流電得到直流電

從上述的說明，我們明確了發電的基本原理，說得明白點，這還是交流發電機的工作原理。但是直流發電機的工作原理又是怎樣的呢？我們可以這樣說：直流發電機既然利用電樞在磁場中旋轉，那末我們必然先得到了交流性質的電壓和電流，只得配合了適當的設備，使電樞中感應來的電動勢改變成直流的。這

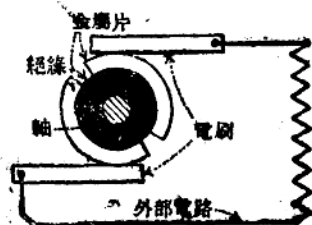


圖 16-12 換向器的基本構造圖。

種變換交流爲直流的設備是換向器，或稱整流器。這時滑環已不需要了。

圖 16-12 是換向器的基本構造圖。這裏仍舊利用兩個電刷與外部電路聯接起來，只是把滑環減爲一個，並劈成兩半片，互相絕緣，各接電樞單圈的一「邊」。圖 16-13 是換向器與電樞單圈的連接圖，這裏電樞單圈的「黑」邊連着「黑」換向片，「白」邊則連着「白」換向片。這種畫法亦是爲

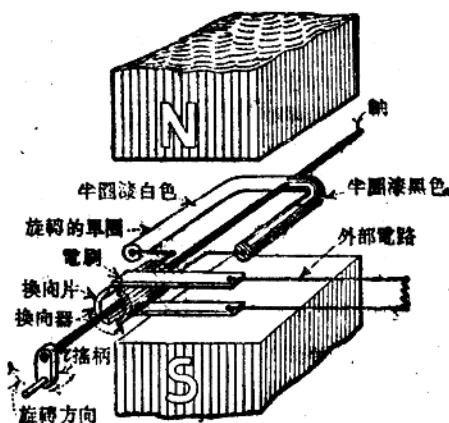


圖 16-13 換向器與電樞單圈的連接法。

了容易識別起見，實際的發電機中並不是如此的。這裏也有磁場，亦有電刷，所以與圖 16-9 以前各圖是一致的，所不同的只是換向器代替了滑環。這是交流電變成直流電的關鍵問題，我們就必須先認識清楚。

16-5 換向器是怎樣工作的

看清了換向器的構造和連接的情況後，我們可以進一步討論這個換向器怎樣能夠巧妙地完成它的「整流」任務了。

圖 16-14 到 16-22 又是一系列連續性的插圖，表明電樞單圈在各個不同旋轉角度的瞬時情況。這些圖全是圖 16-13 的剖面圖，無非使這些圖便於說明問題。這裏磁場亦是均勻的，電樞的