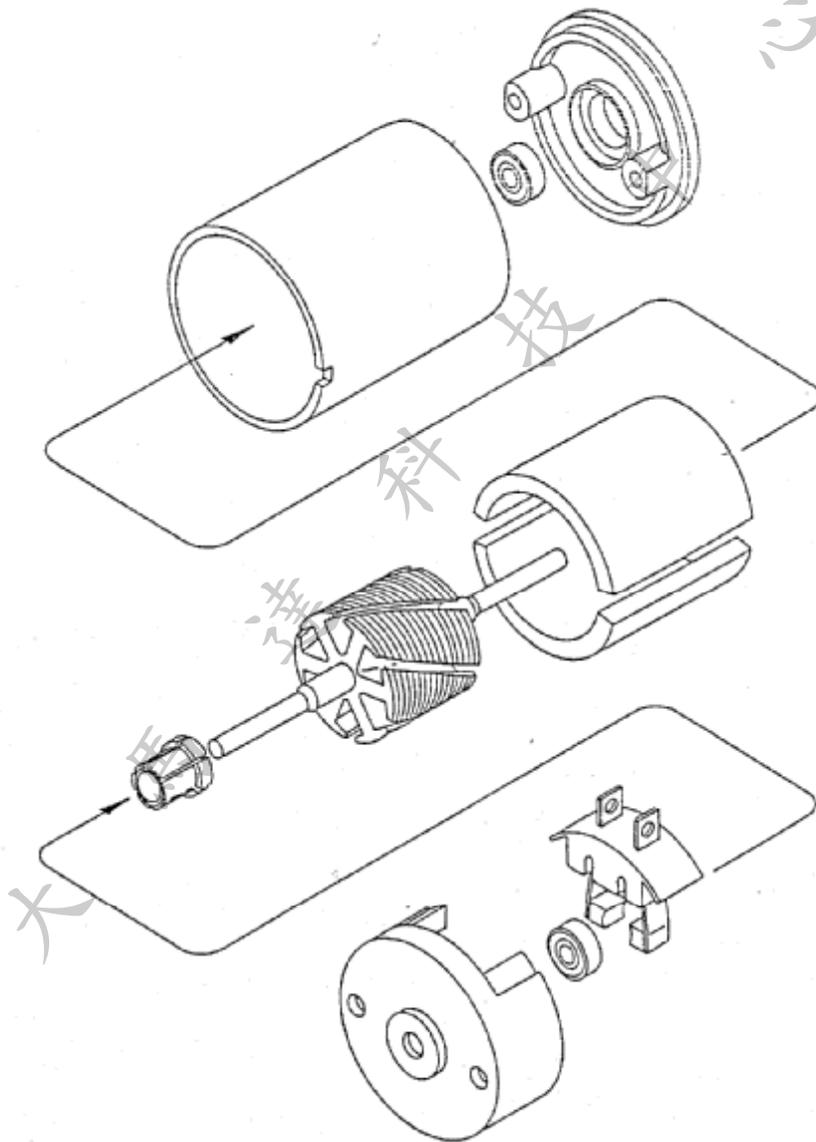


第 2 章 永久磁性直流馬達的結構

永久磁性馬達的種類繁多。它們可依照場域系統、電樞構造以及電刷和換向器的構成而進行分類。本章將就這方面進一步闡述直流馬達的電樞結構將在下一章中詳細討論。



2.1 永久磁鐵的基礎

場域系統的結構和所使用之永久磁鐵的特性有著密切的關連。圖 2.1(a)顯示一個遲滯迴路(hysteresis loop)。吾人假設讀者都已具備磁學以及遲滯迴路的知識。在很多情況中，永久磁鐵都是在第 II 和 IV 象限中運作。在這些象限中，磁場強度(magnetic field intensity) H 的方向與磁感應(magnetic induction) B 的方向相反。

$B-H$ 曲線的第二象限稱為去磁曲線(demagnetization curve)。在這個區域內的磁性特性稱之為去磁特性(demagnetization characteristics)。而去磁特性的重點引述如下：

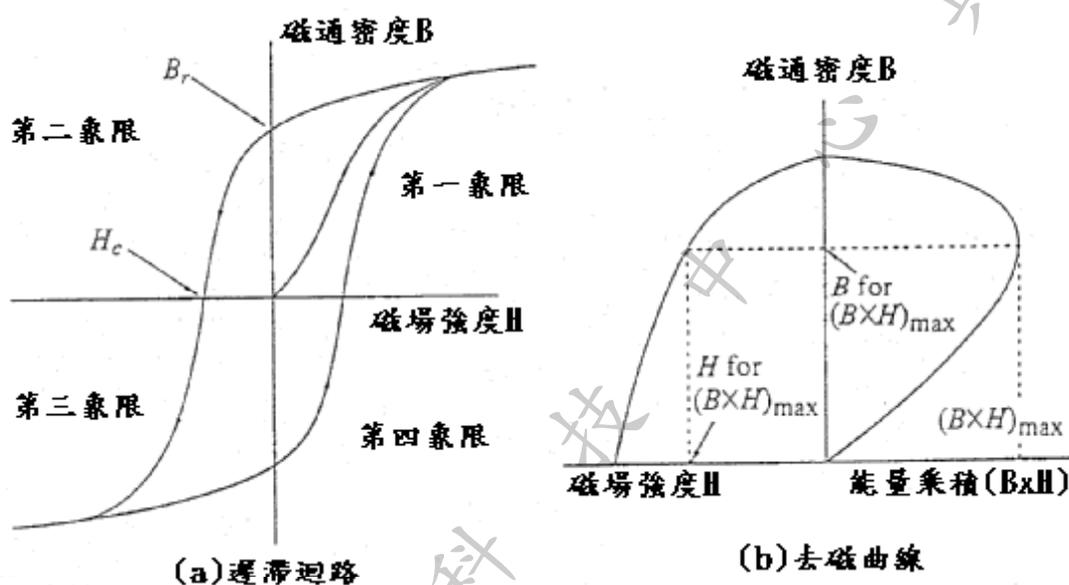


圖 2.1 遲滯迴路、去磁曲線和能量乘積

- (1) 剩磁(demagnetization remanence)和矯頑磁力(coercive force)：一旦永久磁鐵被磁化之後，它就會維持具有磁性的狀態，即使它的磁場強度減至零。在這種狀態下，其磁通量密度便稱為剩磁。並以 B_r 符號表示。此外，當磁場強度在相反極性下沿著去磁曲線增加時，磁通量密度最終會變成零。此時的磁場強度稱為矯頑磁性或 coercivity，符號為 H_c 。
- (2) 能量乘積(Energy product)和最大能量乘積：在去磁曲線的每一點上，其磁通量密度(B)和磁場強度(H)之間乘積的絕對值即稱為能量乘積。圖 2.1(b)顯示能量乘積的在第 II 象限內是 B 的函數。而能量乘積的最大值就叫做最大能量乘積；並且，這個數值就被用來做為表示永久磁鐵之強度的指標之一。

<單位>在國際單位系統(SI)中，磁場強度和矯頑磁力的單位均為 Ampere/meter (A/m)，但物理學家都採用 Oersted (Oe)單位。它們之間的單位換算如下：

$$1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe} = 1.256 \times 10^{-2} \text{ Oe} \quad (2.1)$$

$$1 \text{ Oe} = \frac{1}{4\pi} \times 10^3 \text{ A/m} = 79.577 \text{ A/m} \quad (2.2)$$

在 IS 制中，磁通量密度和剩磁的單位皆為 Tesla (T)，並且 $1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2$ MKS 制。而物理學定採用 Gauss 為單位。

$$1\text{T} = 10000\text{ Gauss} \quad (2.3)$$

$$1\text{ Gauss} = 0.0001\text{ T} \quad (2.4)$$

能量乘積在 SI 制的單位是 J/m^3 ，但 kJ/m^3 更常被使用。

- (3) **反衝線(Recoil lines)**：存在於遲滯迴路之第 II 象限中的一條次級迴路。它可用一條直線予以趨近而呈現一條來回的反衝線。在圖 2.2 中的 AC 線段即是反衝線。

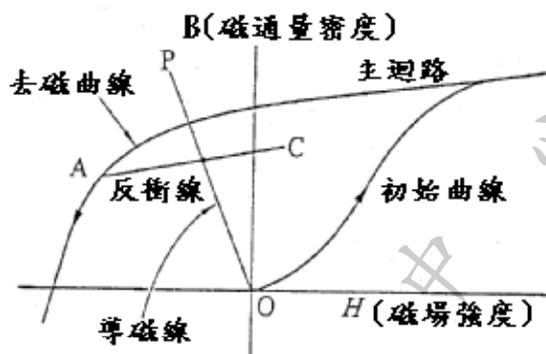


圖 2.2 反衝線

- (4) **穩定化(Stabilization)**：馬達運轉中，如果其磁通量降低，則它的轉矩常數和反電動勢常數也可能因而變小。這種情形即為去磁(退磁、消磁)。在操作中，若要避免去磁發生，必需在使用之前先確定操作點來使場磁鐵穩定；其具體作法，是在一條適當的反衝線上，藉由現有的磁通量密度 B 和磁場強度 H 來標定一個協調點。這個操作過程即叫做“穩定化”，且通常是由馬達製造商實施。
- (5) **操作點(Operating point)**：在一個沒有供應電流的直流馬達中，反衝線與導磁線(permeance line) \overline{OP} 的交錯點就是永久磁鐵的 $B-H$ 狀態。導磁線是由機件結構有關的特徵量來決定；亦即，間隙長度、磁性路徑長度以及線圈捲繞的圈數。然而，在操作中，操作點會被電樞的電流所偏移。在磁鐵的一端，操作點會被偏移到反衝線的一側；而在磁鐵的另一端，操作點又會被偏移到反衝線的另一側。因而，總體而言，磁鐵所提供的磁通量幾乎都是維持恆定值；除非操作點被偏到主去磁曲線上。

2.2 永久磁鐵的種類

基本上，小型直流馬達中可使用下列三種永久性磁鐵：

- i) 鋁鎳鈷 (Alnico)磁鐵；
- ii) 鐵滄氧(Ferrite)或陶瓷磁鐵，以及
- iii) 稀土磁鐵(釷-鈷磁鐵)

這三種磁鐵之間的 $B-H$ 特性互異極大，如圖 2.3 所示。它們的特徵列述如下：

- (1) **鋁鎳鈷磁鐵**：其提供很高的磁通量密度，但矯頑磁力(coercive force)則低。當矯頑磁性(coercivity)低且兩互呈相反極性的磁極靠在非常近的距離，則磁極之間會相互抵弱。因而，鋁鎳鈷磁鐵皆在縱向充磁時被使用。
- (2) **鐵滄氧(陶瓷)磁鐵**：與鋁鎳鈷磁鐵不一樣的是，這種磁鐵的磁通量密度低，但矯頑磁力卻很高。因此，基於具有高矯頑磁力，通常是對這種磁鐵進行橫向充磁。由於材料及製作成本很低，鐵滄氧磁鐵最被廣泛使用。
- (3) **鈰-鈷磁鐵**：這種稀土元素磁鐵同時具有高的剩磁和矯頑磁力。由於價格昂貴，這種磁鐵較常用在飛機和軍事裝備的伺服馬達以及電腦週邊設備的馬達之中。逐漸地，這種磁鐵也會擴及到其它的用途。

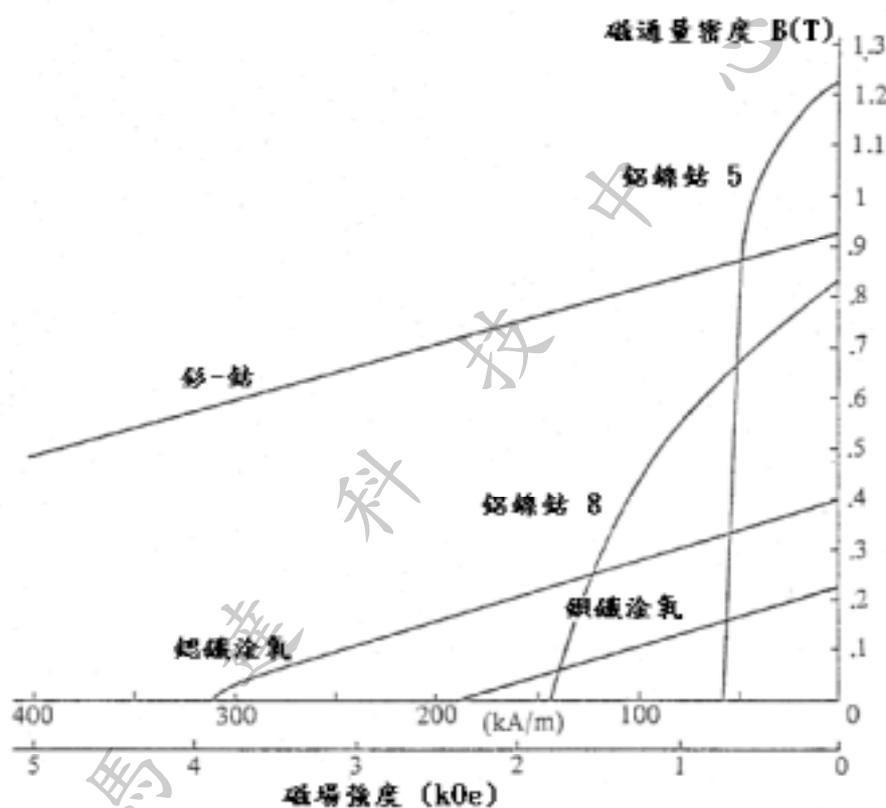


圖2.3 磁性材料的特性

2.3 場域系統的結構

由於場域系統的結構密切地影響到磁鐵的使用，吾人將討論每一種磁鐵的應用情形。

- (1) **鋁鎳鈷磁鐵**：由於鋁鎳鈷磁鐵具有高 B_r 值，它們常用在高級的直流伺服馬達中。藉由先前提及之縱向充磁的方法，則可達高磁通量的效果。圖 2.4 描繪許多這種場域系統的例子。圖 2.4(a)和(c)是二極結構，圖 2.4(b)和(d)為四極結構。其中：(a)必須採用非磁性材料製作殼體，而通常用鋁或鋁合金；(c)採用

軟鋼殼體來構成一個磁通量的路徑；(d)使用軟鋼所構成的圓柱型殼體做為磁軛(yoke)或磁通路徑；以及(b)具有四個磁極靴(pole shoe)，且其需要一個非磁性殼體或其它構件來固定磁鐵和磁極靴，圖 2.5 顯示一個使用非導向性鋁鎳鈷磁鐵的雙極微馬達。

從這些圖示可以瞭解：磁極的數量通常是雙數的。而永久磁性直流馬達經常採用二或四極，但也有許多馬達具有六或更多的極數。

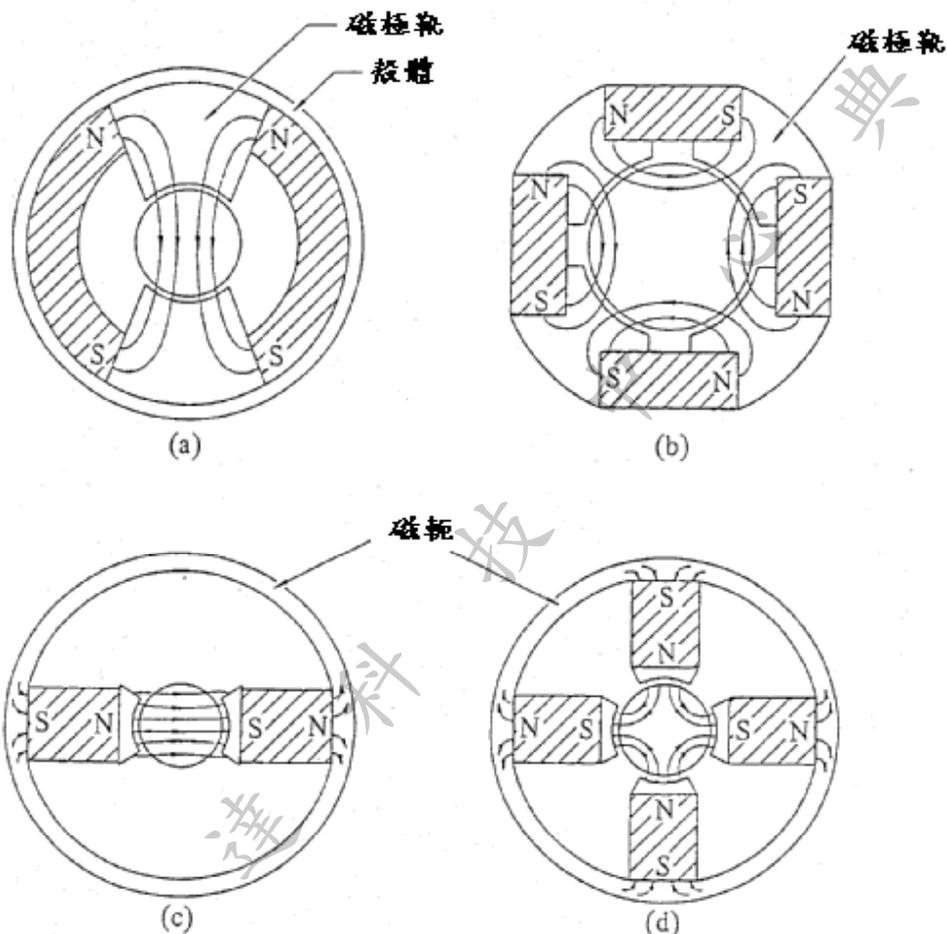


圖2.4 使用鋁鎳鈷磁鐵的場域系統

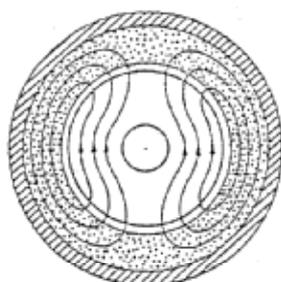


圖2.5 在微馬達中，使用鋁鎳鈷磁鐵的場域結構

(2) 鐵滲氧磁鐵：鐵滲氧磁鐵具有高矯頑磁力，因而它們不會自我去除磁性，即

使是採橫向進行消磁。圖 2.6 以剖面圖顯示使用一或二個鐵滲氧磁鐵的場域系統。由於鐵滲氧磁鐵的磁通密度低，因此圖 2.7 的結構經常被用來說明這種情形；其中，磁鐵比轉子還長，以便在電樞內產生高磁通密度。由於，在這些結構中，軟鋼殼體的面積大；因而，其可以把外殼做得薄一些來減輕馬達的重量。

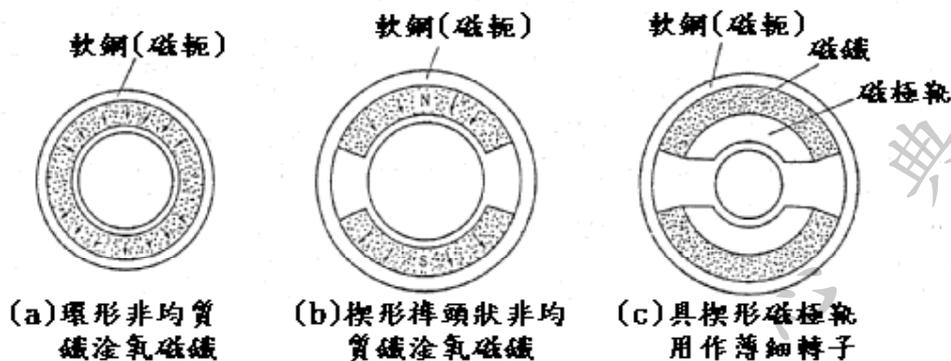


圖2.6 使用鐵滲氧磁鐵的場域結構

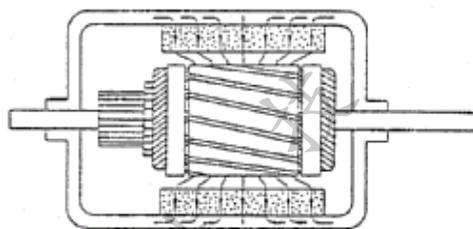


圖2.7 直流馬達中，鐵滲氧磁鐵的縱向剖示圖

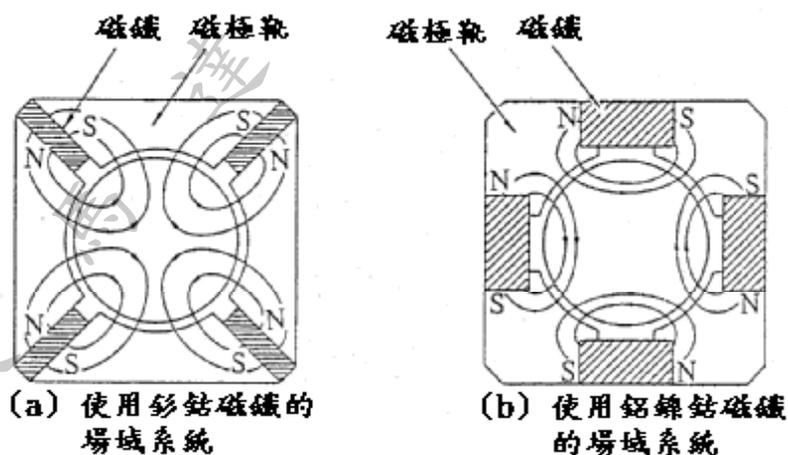


圖2.8 鈔鈷磁鐵與鋁鎳鈷磁鐵之間場域系統的比較

(3) 稀土磁鐵：這種磁鐵具有高的矯頑磁力，因此可以將它像鐵滲氧磁鐵一樣地橫向磁化。由於成本很高，稀土元素磁鐵一般都做得非常薄。如圖 2.8 所示，稀土磁鐵的場域系統結構與鐵滲氧磁鐵的類似。然而，由於鈔鈷磁鐵是一種高剩磁的磁鐵，其轉子的設計會與鐵滲氧的不同。在具有相同面積以及長度

的條件下，其磁通密度會是鐵滄氧磁鐵的兩倍。因此，馬達的轉矩會成比例地增加；但也不完全是這樣，因為鐵滄氧馬達可藉由調整其槽隙/齒槽而增加它的電性負載。這將在 2.5.2 節中討論。而在相同尺寸下，鈔-鈷馬達對鐵滄氧馬達之許多物理特性的比值如下[1]：

轉矩	大約 1.5 倍
機械時間常數	大約 0.5 倍
尖峰輸出能量	大約 2.0 倍
電性時間常數	大約 0.7 倍

2.4 去磁作用及其反制方法

在永久磁性直流馬達中，場磁鐵所產生的磁通量有時候會因為電樞電流所感應的磁場而減少。這種不良的效果即是所謂的去磁效應。有關去磁的機制及反制方法將在下一節中討論。

2.4.1 去磁的過程

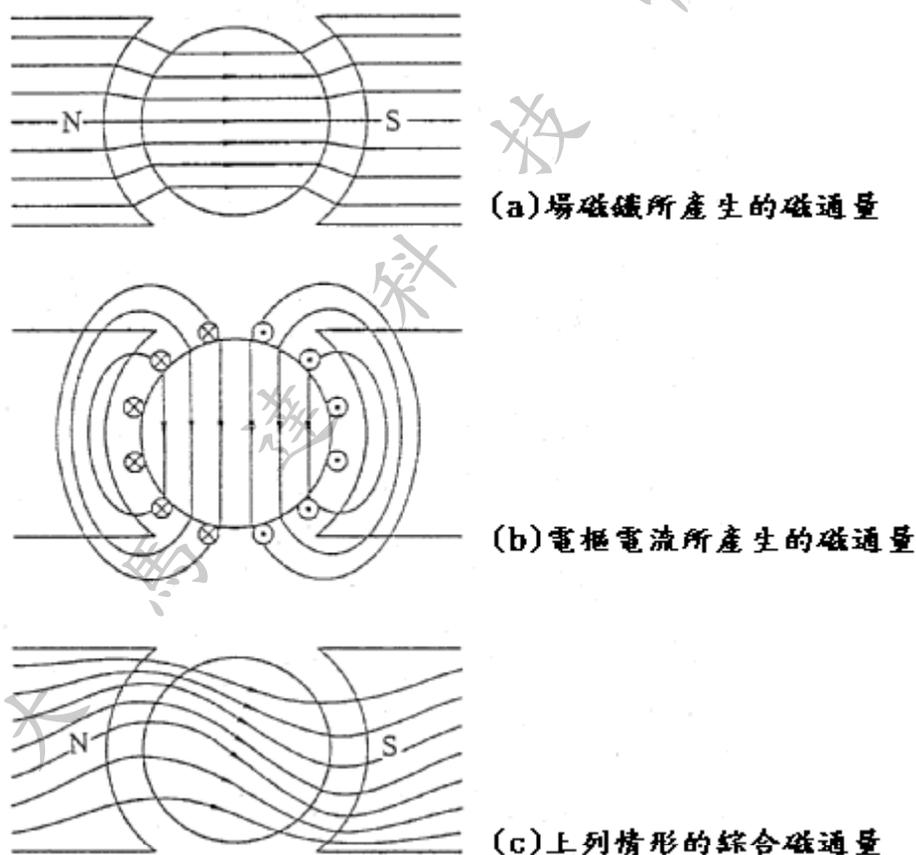


圖 2.9 直流馬達內的磁通量分佈

在圖 2.9(a)和(b)的二極馬達中，顯示了由場磁鐵以及電樞電流所產生之磁通量的分佈情形。圖 2.9(c)則是其二者結合下的磁通量分佈狀況。在電樞的核心中，

磁場通量與電樞的磁通量互相成直角交錯。在空間的間隙中，磁極一端的磁通密度會增加，而在磁極另一端的則會減少。當磁通密度降至某一底限時，去磁效應便會發生。這可由圖 2.10 看出。

如早先在 1.9 節中所解釋者，永久磁鐵馬達從製造商運出之前，必須先完成穩定化的程序。穩定化的意義就是在磁鐵經過這種處理之後，其磁化的狀態在往後的操作過程中不會有所改變。這個程序是藉由在反衝線上設定 $B-H$ 的關係來達成。如先前所述，如果未供應任何電樞電流，它的操作點會位在反衝線 AC 與導磁線 OP 的交叉點 Q 上。導磁線是一條斜率為負值且通過原點的直線。這個斜率是由馬達的製作參數所決定。在交點 Q 上， $B-H$ 的關係可以同時滿足反衝線 AC 以及導磁線的要求。如圖 2.9 所示，當在電樞中有著大電流，則電樞一端的磁場會增強，另一端會減弱。而問題即發生在減弱的那一端：當電樞所感應的磁場太強，操作點會抵達反衝線的端部，而進入主要的遲滯迴路，並且最終到達 D 點。當電樞電流減弱，則操作點會沿著新的反衝線 DE 而上到 Q' 點；以致於磁通密度減低。這個過程就是所謂的去磁作用。

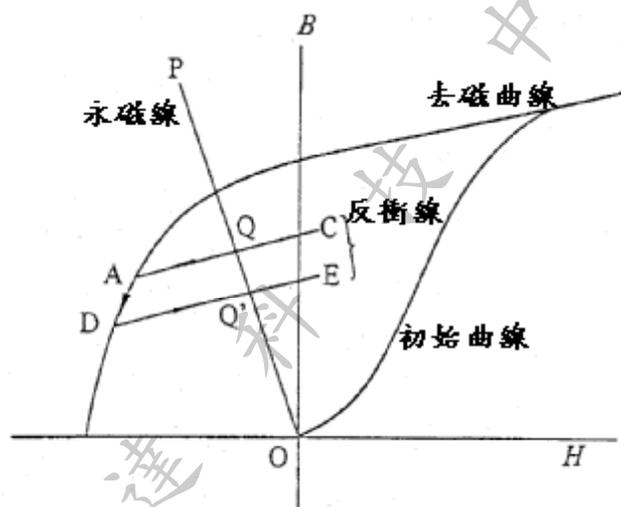


圖2.10 去磁曲線，反衝線以及導磁線

如第 1.9 節所述，電樞電流增至最大的時候，是當馬達藉由逆轉其末端電壓而減速的情況。而當末端電壓逆轉之際，其電流約略為起始電流(或者是馬達一開始所消耗電流)的兩倍。因此，由於這個高電流，在磁極的一側可能會有去磁作用。當末端電壓再度逆轉時，磁極的另一側也會發生去磁。結果，轉矩常數和反電動勢都會降低，並導致馬達性能的衰退。而藉由無負載速度的量測，吾人可偵測到去磁的發生。因為無負載速度等於末端電壓除以反電動勢常數(如圖 1.8 所示)，故當去磁發生時，無負載速度便會增加。

2.4.2 限制去磁效應

限制去磁效應的方法有多種。其中之一是保持電流在最大電流值以下。另外一個方法是利用如圖 2.11 所示的磁極靴。所謂磁極靴，是指在永久磁鐵上附著一個軟鋼件，以便集合磁通量並將之傳輸到空氣間隙(air gap)。如圖 2.11 所示，

電樞電流所產生的磁通量會通過磁極靴。從圖示中可看出此磁通量並不影響到永久磁鐵。另外，磁極靴也有助於集合磁力線以使空氣間隙達到較高的磁通量。

動圈式(moving-coil)或無縫(slotless)電樞的磁極靴也可以採用固態的軟鋼。然而，對於開槽電樞(slotted amature)，由於磁力線的縫隙脈衝(slot pulsation)會在固態鋼中產生強大的渦流電流(eddy-current)以及生成熱，因而開槽電樞須使用薄板式的鋼片。當馬達速度高時，在薄板磁極靴內的渦流電流損失會很明顯，而這就是主要的缺點。

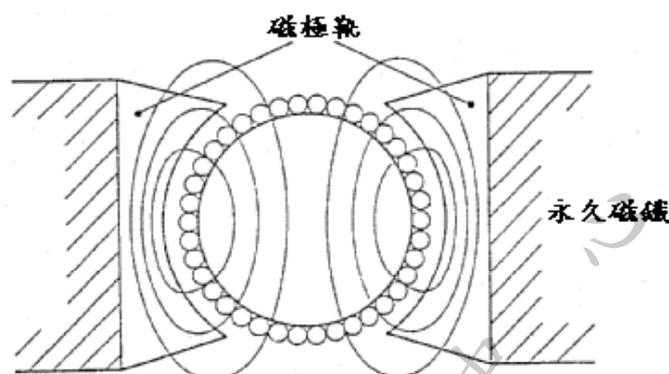


圖2.11 電樞的磁力線穿透軟鋼的磁極護套的情形

鈰-鈷磁鐵具有極高的矯頑磁力，且反衝線幾乎與去磁曲線一致，這就表示去磁效應不會發生。圖 2.12 展示一個沒有磁極靴之磁場結構的例子。在這種馬達中，在永久性磁鐵端部的空氣間隙較寬，如此可使得電樞在這些端部所產生的磁通量降至最少。

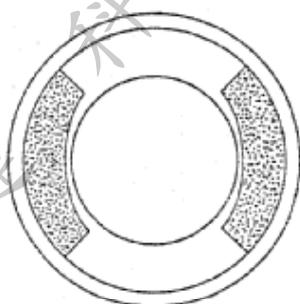


圖2.12 去磁效應可藉由將磁性端緣的空氣間隙寬度減小而達到最小的程度

2.5 電樞的結構

基本的電樞結構有三種。圖 2.13 至 2.15 展示每一種電樞及其剖面視圖。其分別是開槽轉子，無縫轉子以及動圈式轉子。

2.5.1 開槽轉子

開槽轉子的鐵心是一個矽鋼片或碳鋼片，且線圈係纏繞在它的縫隙中。在開槽轉子中，轉矩是直接施加在牢固的鐵心(而不是脆弱的線圈)上。因此，開槽轉子一般比較經久耐用。鐵心通常也會具有若干槽隙，因為槽隙愈多則稱做齒槽效

應(cogging)或電雜訊發生的情形也愈少。具有偶數槽隙的鐵心由於製作簡單，故多用於自動化量產的馬達製程。但是，單數槽隙的鐵心因其齒槽效應轉矩低，而較受到喜愛。

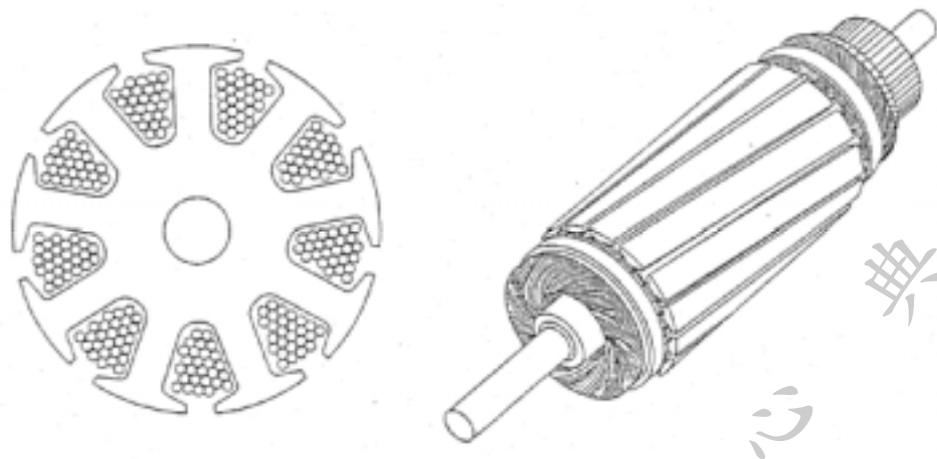


圖2.13 間槽轉子

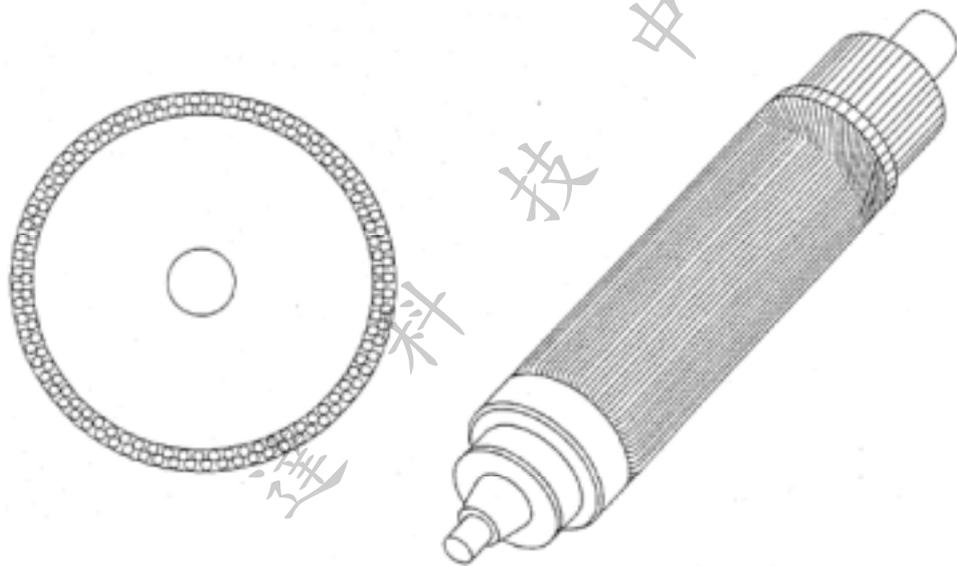


圖2.14 無縫轉子

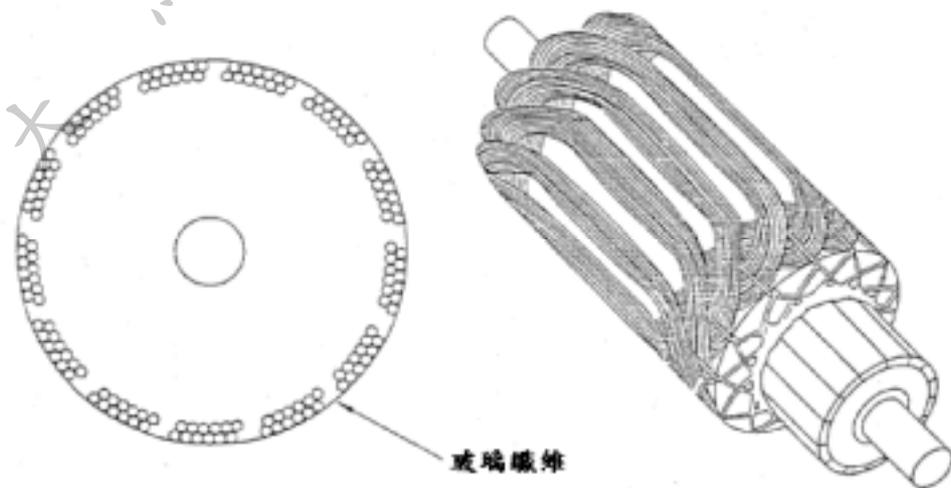


圖2.15 籠式轉子

如圖 2.13 所示，使轉子呈螺旋形可降低由轉子齒部與磁極靴之間所造成的齒槽效應。這種情形就稱為“歪扭”(skewing)。

2.5.2 鐵材機件與銅材機件

開槽馬達的設計有兩種考量；亦即鐵材機件和銅材機件。它們的概念將在此解釋。

由方程式(1.5)所得的轉矩重覆如下：

$$T = \frac{(ZI_a) \cdot \Phi}{2\pi} \quad (2.5)$$

在此， ZI_a (導體總數與電流的乘積)係與縫隙中的銅線有關，並稱之為“電性負載”。而另一方面， Φ 是指通過鐵心的磁通量；其數量與鐵心齒部的厚度有關，並稱之為“磁性負載”。請參考圖 2.16。

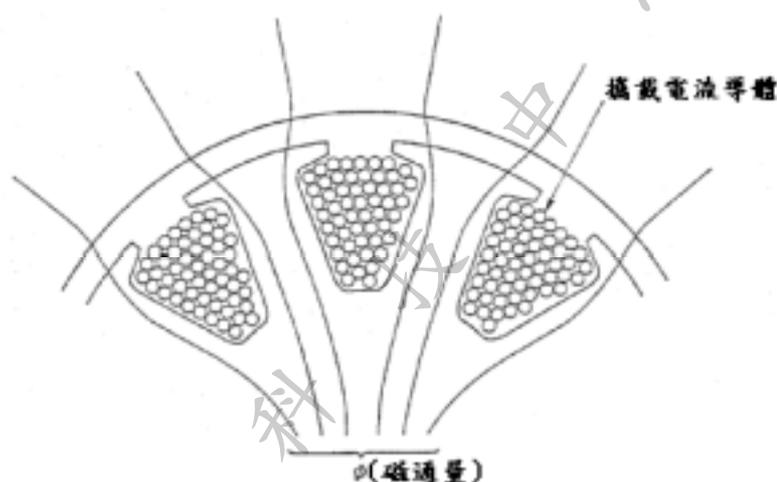


圖 2.16 磁通量和電流分佈

當馬達尺寸為固定，必須使用較寬的齒來獲致較多的磁通量。但是，由於 ZI_a 所佔的空間減少，故線圈捲繞的數目必須減少；或者，使用較細的線圈，但這會無可避免地增加焦耳熱。另一方面， ZI_a 也可藉由使齒部變細而增大，但這種情況將難以造成高的磁通量。



(a) 銅材機件的鐵心



(b) 鐵材機件的鐵心

圖 2.17 銅材、鐵材機件的鐵心

在鐵淦氧磁鐵的馬達中，其使用細齒以及大的縫隙，因為鐵淦氧磁鐵提供的磁通密度低。由於，此種情形下的縫隙大，吾人可纏繞更多的銅質絲線於其中。這種馬達一般就稱為“銅材機件”(copper machine)。另一方面，鋁鎳鈷磁鐵或稀土磁鐵若配上圖 2.17(b)所示的寬齒和窄縫，即稱作“鐵材機件”(iron machine)。

當使用鐵淦氧磁鐵時，在每一個較大的槽隙內似乎會纏紮著一些線圈，但也不完全都是這種情形。圖 2.18 即是一種將線圈設置在槽隙底部的典型方法。這樣可使馬達的轉動慣量減少，進而導致較小的機械時間常數。

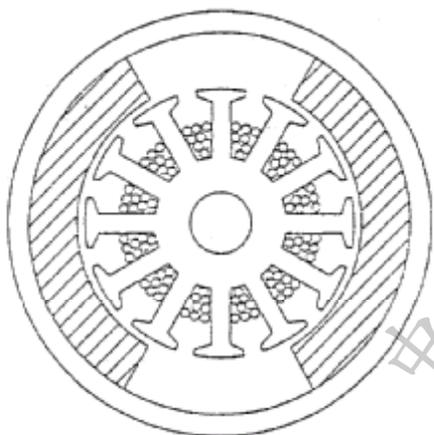


圖 2.18 降低馬達慣性的線圈纏繞方法

2.5.3 無縫馬達

藉由將捲繞的線圈固定在沒開設槽隙的柱狀鐵心，可獲致極低的齒槽效應轉矩。從這個觀點，藉由佛來明左手定則，轉矩是直接作用在線圈(線圈件)之上。然而，磁通量有可能因為存在於轉子鐵心與磁極靴之間的縫隙大而減少。因此，稀土磁鐵或大而長的鋁鎳鈷磁鐵必須援用以獲得足夠的磁通量。

2.5.4 動圈式馬達

為了使轉子具有最小的轉動慣量，其中不可使用厚重的鐵心。近年來，這種型式的轉子已受到廣泛的應用。由於動圈式馬達中的所有鐵心都是靜態的；亦即，它們在場域的磁通量中不會移動，因而其內部不會有渦流電流或遲滯損失。就此理由，動圈式馬達在高速的範圍內會有高的效率。這將在下一章中有進一步的解說。

2.6 電刷與轉向器

電刷是直流馬達的一個重要元件，它們是用石墨或貴重金屬製成。

2.6.1 石墨電刷以及轉向器的表面

標準轉向器的片段是採銅材製作。而電刷則是在壓縮模造以及高溫鍛燒的製程下用石墨製造而成。轉向器的片段是用雲母或塑膠材料構成絕緣，如圖 2.19

所示。轉向器的表面會因為與電刷的滑動接觸而摩擦剝落。而由於銅比雲母更快被摩擦剝落，因而雲母通常混埋在轉向器的表面。

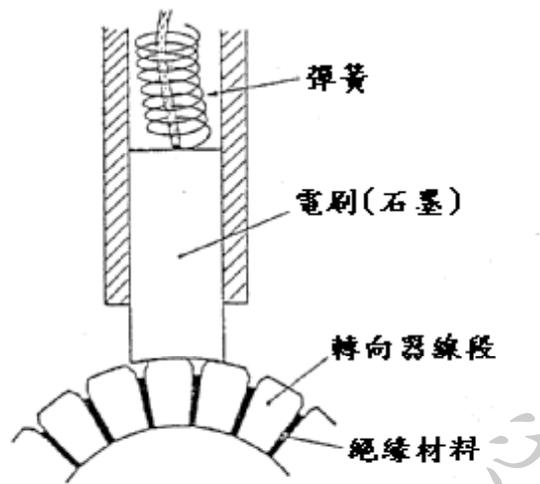


圖2.19 電刷和轉向器

當轉向器的表面覆蓋著若干微米厚度的氧化亞銅(cuprous oxide, Cu_2O)，則機械的摩擦會降低，壽命也因而延長。這種型式的表面使得轉向器呈現具有光澤的深褐色。在運轉中，空氣中的溼氣會在 $5-8 \text{ A/cm}^2$ 電流密度的電解作用(electrolysis)下分解。氧原子會因而生成，且轉向器表面的銅會因化學作用結合而形成新的氧化亞銅薄膜。因此，機械的摩擦和氧化亞銅的再生之間會達成平衡。氧化亞銅薄膜的作用如同一個絕緣體，並且一般咸信，電流係藉由突破許多與電刷接觸點的絕緣薄膜而流動(如圖 2.20 所示)。而在圖 2.21 中，電刷與轉向器之間有著一個 $1\sim 1.5$ 伏特的電壓降。這個電壓降，亦即接觸電位差(contact potential difference)，對於轉向器是很重要的，因為受到轉向器的影響，在線圈中所產生的電動勢會被接觸電位差所吸收，進而可以壓制火花的形成。然而，對於低電位的馬達而言，這樣子的電位降會降低它們的效率。混合著銅或銀塵粒的金屬石墨電刷可達到低的電位降，故它們都運用在具有低電位且高電流的馬達。但是，轉向器的品質會隨著使用這類型的電刷而降低、產生更多火花、以及更快的機械性磨耗。對於用做速度感測器之直流發電機的測速發動機(tachogenerators)，其所使用的電刷具有高比例的銀。

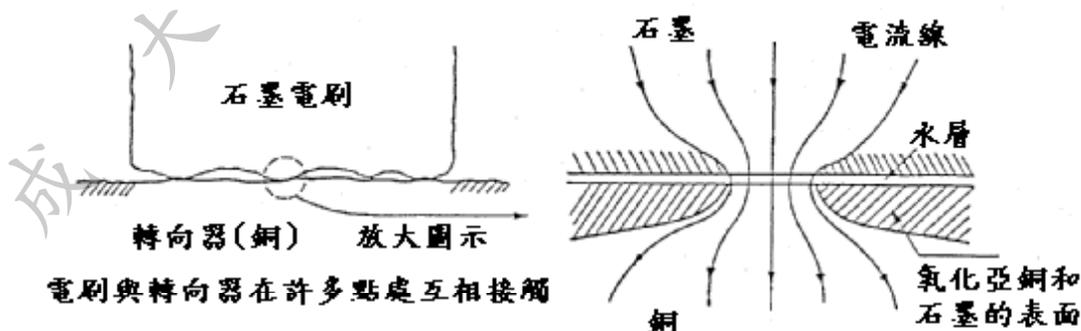


圖2.20 電刷和轉向器線段的接觸面積；它們之間在若干點接觸

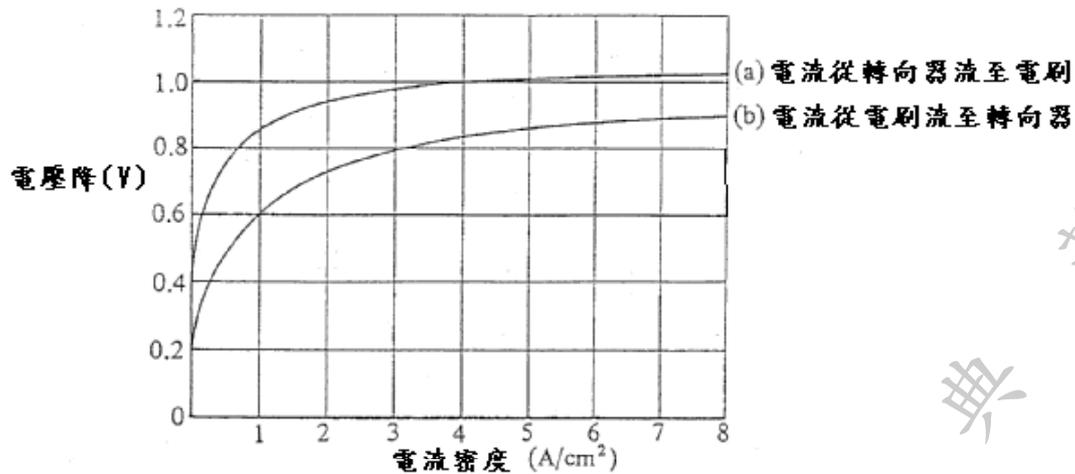
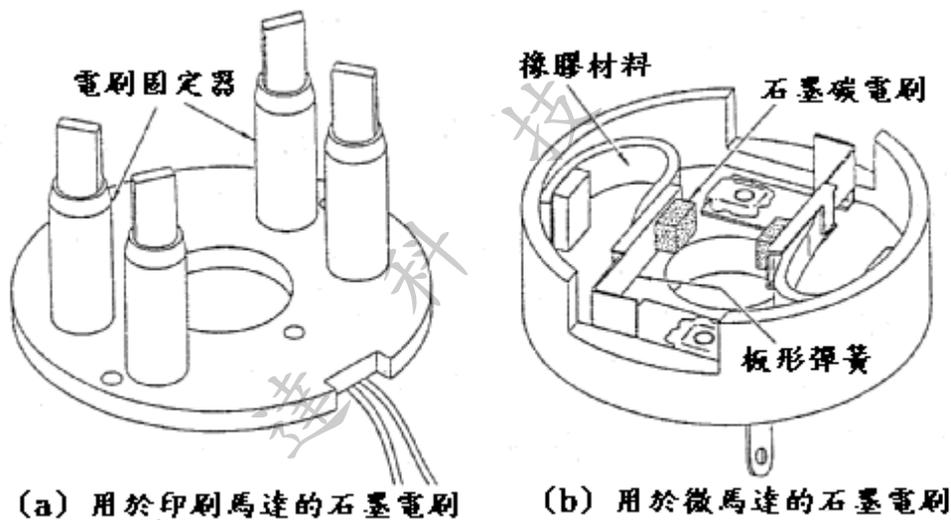


圖2.21 跨越電刷和轉向器線段的電壓降是電流的函數

圖 2.22 描繪石墨(碳)材料的電刷；其中，(a)圖顯示作為印刷馬達的電刷，以及(b)圖中是一個微型馬達。這些電刷使用到金屬以及橡皮彈簧，因而可增加對電刷的壓力，並且吸收振動。



(a) 用於印刷馬達的石墨電刷

(b) 用於微馬達的石墨電刷

圖2.22 碳(石墨)電刷的固定裝置

2.6.2. 金屬電刷

石墨電刷的尺寸對小於 10W 的微型馬達會是一個問題。如前所述：跨越電刷的電壓降會減低馬達能量轉換的效率。因此，金屬電刷乃被用於高品質的微型馬達中(參考圖 2.23)。由於，在穩定的轉向中，金屬接觸是亟需避免的，因而金屬材料的選擇也曾是一個問題；但是，現在貴重金屬(銀、金、白金、鈀)也都有在使用。金屬電刷在旋轉期間會在它們的共振頻率下振動，並且會與轉向器反覆地構成接觸。為解決這個缺失，它的電刷會分成三個具有不同共振頻率的區段，如圖 2.24 所示。當使用這種電刷時，至少其中一個區段會一直與轉向器接觸。圖 2.23(a)即以對角線方向顯示如圖 2.24 中的電刷。

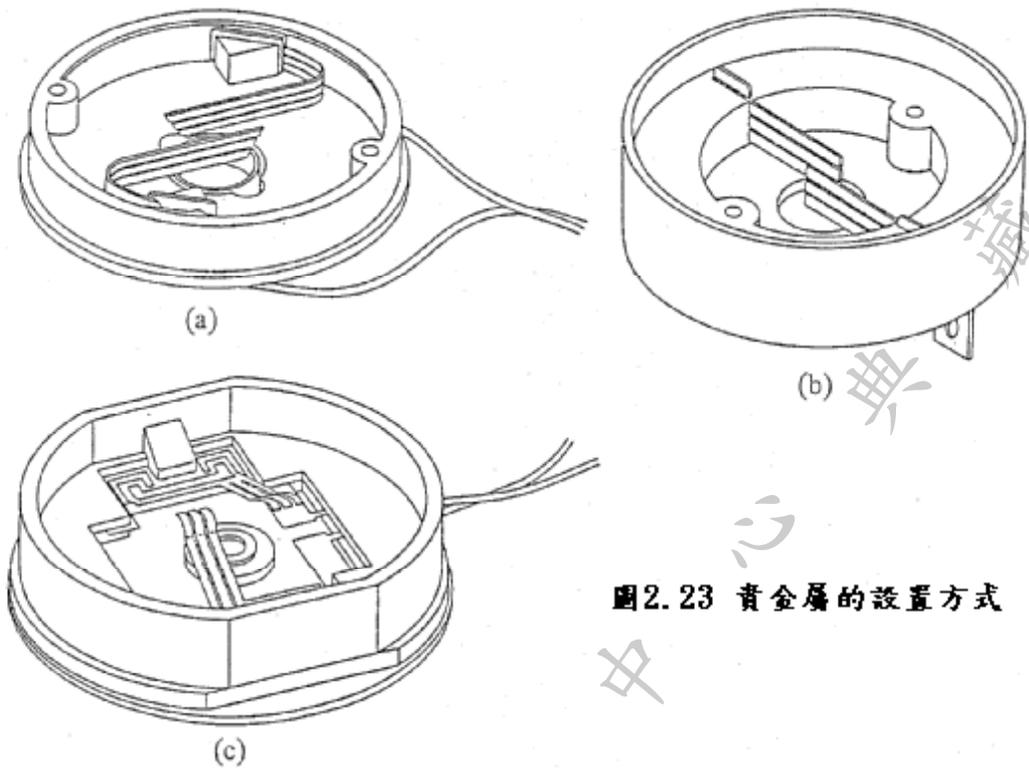


圖2.23 貴金屬的設置方式



圖2.24 分割成三片的電刷

2.7 相關參數的例子

表 2.1 和 2.2 顯示開槽及無縫馬達的實用相關參數。第 6、7 章將解釋若干這些參數的意義。這兩個表格是經由重新編輯製造商的产品目錄而得。如果讀者不熟悉國際單位系統(SI)制，本書最後所附的換算表可供使用。

第 2 章參考資料

- [1] Lyuch, R. (1976). The Development of Samarium Cobalt Permanent Magnet D.C. Servomotors. IEE Conf. Pub. 136 (Small Electrical Machines), pp.5-10.

型號

表2.1 開槽馬達產品型錄的數據

Items	製造商 型號	Yasukawa Electric Mfg. Co., Ltd.						Tamagawa Seiki Co., Ltd.					
		UGJMED -10M	UGJMED -40M	UGJMED -40L	UGTMEM -01S B4	UGTMEM -03M B2	UGTMEM -06S B2	TS908N7 -E4	TS908N8 -E4	TS688N6 -E3	TS902N2 -E6	TS688N4 -E6	TS906N2 -E13
Inertia J	10^{-4} kg m ²	600	1600	2000	1.57	23.5	95	0.918	1.57	2.50	28.4	39.2	235
Electrical time constant τ_E	ms	6	12.2	10.1	0.3	0.8	1.9	0.45	0.3	0.8	1.6	1.3	1.4
Mechanical time constant τ_M	ms	13.7	24.8	28.5	4.1	6.5	11.7	9	7	8	12	12	18
Torque constant K_T	10^{-2} N m/A	47	37	50.6	3.4	7.5	9.3	3.82	3.92	3.72	6.43	6.47	12.5
Back-e.m.f. constant K_E	10^{-2} V s/rad	47	37	50.6	3.4	7.5	9.3	3.82	3.92	3.72	6.43	6.47	12.5
Armature resistance R_a	Ω	5.0	1.05	1.3	3.2	1.59	1.02	14.3	6.9	4	1.7	1.3	1.05
Power rate	kW/s	1.5	1.5	2.9	1.5	2.4	1.6	0.20	0.71	0.35	0.87	1.92	1.73
Rated continuous torque T	10^{-1} N m	0.95	1.53	2.40	0.05	0.24	0.39	0.137	0.333	0.294	1.57	1.96	6.38
Rated rotational speed Ω	rpm	1000	1000	1000	3000	2000	1300	3750	3000	3000	3300	4000	3000
Rated output P_o	W	100	160	250	15	50	53	5	10	10	60	80	200
Rated voltage	V	64	44	60	20.3	24.4	19.8	21	21	18.3	30.8	31.3	43
Weight	kg	6	10.5	12	0.22	1.1	1.6	0.09	0.15	0.4	1.3	1.5	3.0

本表是改編自製造商的型錄資料

表2.2 無縫馬達產品型錄的數據

Items	製造商 型號	Yasukawa Electric Mfg. Co., Ltd.			Olympus Opto-Electronics Co., Ltd.			
		UGMMEM -06AA1	UGMMEM -13AA1	UGMMEM -25AA1	OMS-312	OMS-512	OMS-1024	OMS-2024
Inertia J	10^{-4} kg m ²	56.7	141	283	0.13	0.22	0.58	1.73
Electrical time constant τ_E	ms	1.1	1.5	1.3	0.09	0.11	0.2	0.28
Mechanical time constant τ_M	ms	4.7	4.6	3.6	10	10	9.5	9.5
Torque constant K_T	10^{-2} N m/A	10	17.8	19.3	0.85	0.89	2.3	2.1
Back-e.m.f. constant K_E	10^{-2} V s/rad	10	17.8	19.3	0.85	0.89	2.3	2.3
Armature resistance R_a	Ω	0.84	1.03	0.47	5.3	3.6	6.3	2.6
Power rate	kW/s	6.1	11.5	21.2	0.069	0.11	0.29	0.36
Rated continuous torque T	10^{-1} N m	5.9	13	25	0.03	0.05	0.13	0.25
Rated rotational speed Ω	rpm	3000	3000	3000	10500	10500	9200	9200
Rated output P_o	W	185	401	771	3	5	10	20
Rated voltage	V	40.5	68.5	70.9	12	12	24	24

註：

轉子：線圈是用AB膠和透明膠帶而均勻固定(圖2.14)
鋁鎳鈷磁鐵是用來產生場域系統

電力率 = $\frac{\text{額定轉矩}}{J}$
(參考7.6.1節)