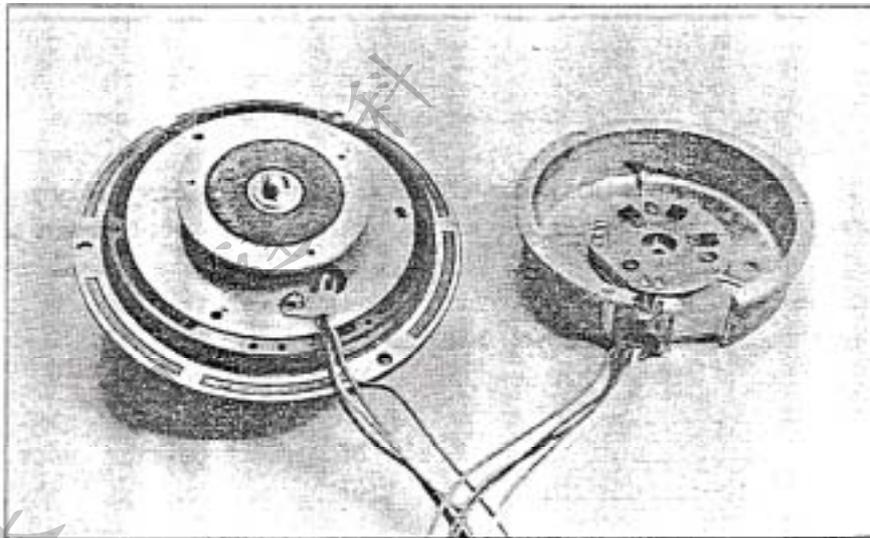


## 第 4 章 無刷直流馬達的原理與基本結構

傳統直流馬達的高效能及其特性使得它們極適合用做伺服馬達。但是，唯一的缺點是它們必須包含轉向器和電刷，而這也是造成磨耗的原因。當轉向器和電刷的功能經由固態開關而作動時，就可以達到無需維修養護的馬達。這種馬達就是所謂的無刷直流馬達。本章將集中在無刷直流馬達的基本原理及其實用結構的闡述。



## 4.1 無刷直流馬達的基礎

傳統無刷直流馬達中，電樞就是它的轉子，而場磁鐵是放置在靜子中。這種結構的無刷直流馬達的製作很困難。現今無刷直流馬達的製造與交流馬達(即永久磁鐵同步馬達)非常類似(參考圖 4.1)。電樞繞組是靜子的一部份，而轉子是由至少一個磁鐵所構成。在無刷直流馬達中的線圈繞組與多相交流馬達相似，而最舊式且有效的馬達具有一組三相的線圈繞組，並且是在雙極勵磁的狀態下運作(參考圖 4.2)。無刷直流馬達與交流同步馬達之間的差異，在於前者包含許多用以偵測轉子位置(或磁極)的構件，以便產生訊號來控制電子開關。最普通的位置/磁極探測器是霍爾元件(Hall Element)，但是也有馬達使用光學感測器。

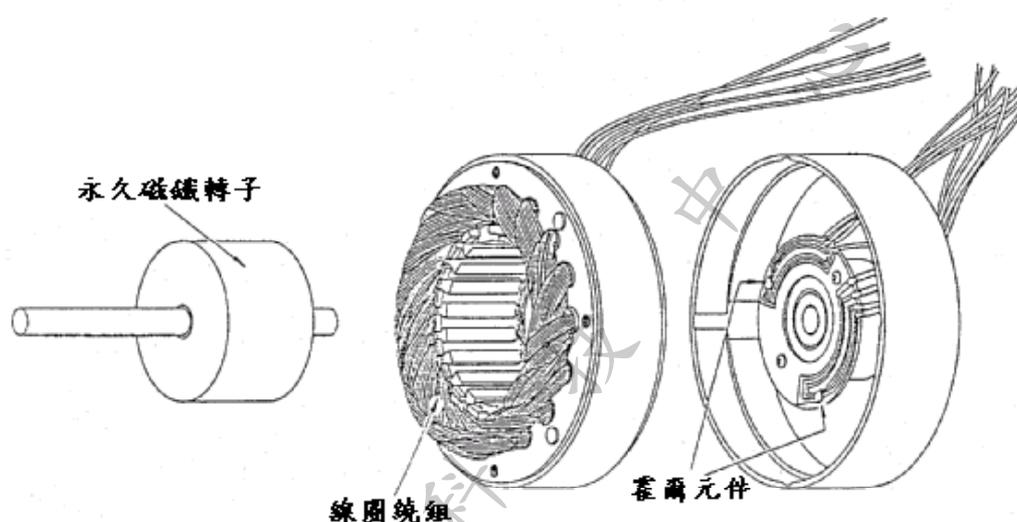


圖4.1 無刷直流馬達的分解視圖：  
永久磁鐵轉子、線圈繞組和霍爾元件

藉由簡單的三相、單極作動的馬達，無人可了解到無刷直流馬達的原理。參考圖 4.2，其所描繪的馬達係使用光學感測器(光電晶體)做為位置探測器。三個光電晶體 PT1, PT2, PT3 是採  $120^\circ$  角的間隔而放置在端板上，並且這些原件係透過一個與馬達軸桿連結的旋轉光閘(revolving shutter)而曝露於光線。

如圖 4.2 所示，轉子的南極現在面對著靜子的凸極(salient pole)P2，並且光電晶體偵測到光線而將電晶體 Tr1 打開。在這個狀態下，那經由流過線圈繞組 W1 而建構在凸極 P1 的南極會吸引轉子的北極，而在箭頭(CW)所示的方向上運動。當南極所到達的位置面對凸極 P1 時，那個與馬達軸桿連結的光閘會遮蔭著 PT1，而使 PT2 曝露在光線之下，並因而造成一個通過電晶體 Pr2 的電流。當電流經過線圈 W2 時，它會在凸極 P2 上造成一個南極，然後在轉子內的北極會在箭頭所示的方向上旋轉並且面對凸極 P2。此時光閘會遮蔭 PT2，並且光電晶體 PT3 會曝露在光線底下。這些動作驅使電流從線圈 W2 到達 W3。因此凸極 P2 便處在失勵(de-energized)的斷電狀態，而凸極 P3 便會通電並產生一個南極。因而轉子上的北極會進一步地從 P2 移動到 P3。經由連續重覆這種開關的動作(如

圖 4.3 所示)，永久磁鐵的轉子便持續地轉動。

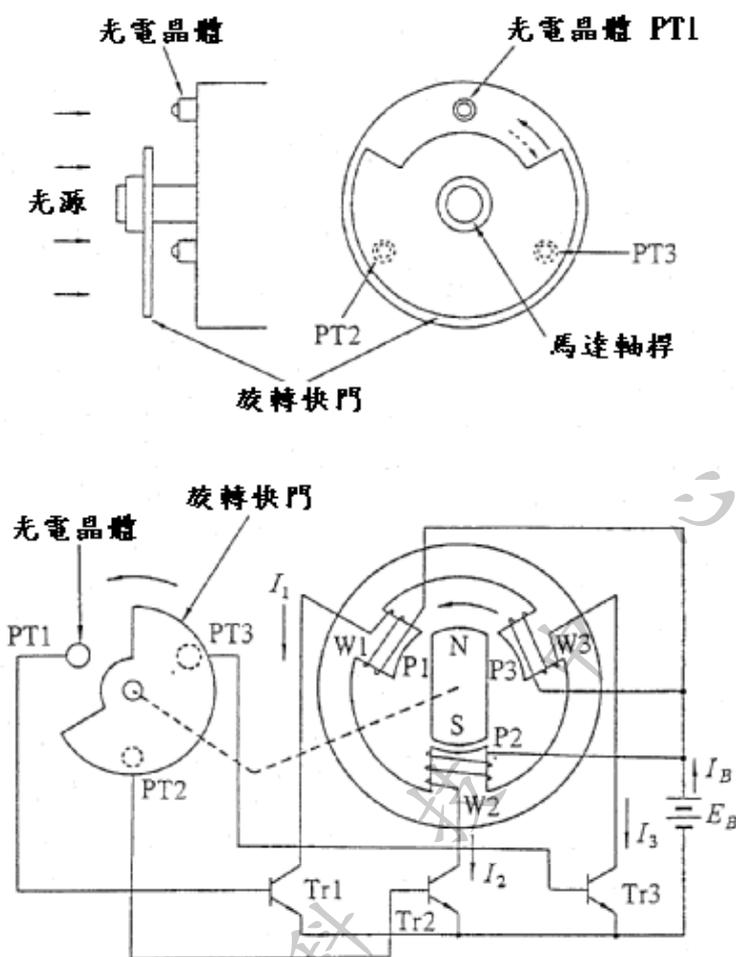


圖4.2 三相單極傳動無刷直流馬達

#### 4.1.2 逆轉旋轉方向的方法

欲使傳統直流馬達的旋轉方向逆轉，只要將末端電壓逆向即可。然而，這種作法並不會使運用半導體電晶體的無刷直流馬達逆轉，因為大部份的半導體原件都是單向開關。因此，當馬達要在兩個方向上運轉，就必須使用許多電路系統裝置。

在圖 4.3 中，光電晶體(PT1，PT2 和 PT3)與電晶體(Tr1，Tr2 和 Tr3)之間的連結方式如下：

PT1 ---- Tr1 用以控制通達 W1 的電流

PT2 ---- Tr2 用以控制通達 W2 的電流

PT3 ---- Tr3 用以控制通達 W3 的電流

這樣就可讓馬達反向旋轉。如果連接方式改變如下：

PT1 ---- Tr3

PT2 ---- Tr1

PT3 ---- Tr2

這樣就又可以使馬達逆轉。

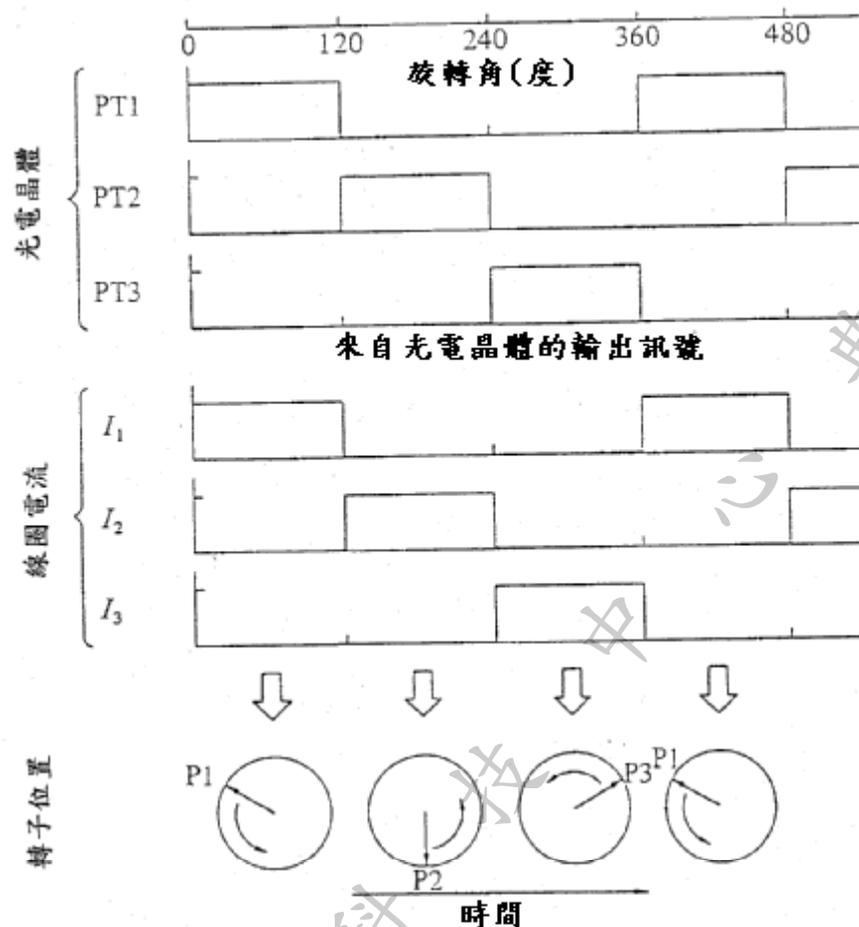


圖4.3 開關順序以及靜子磁場的旋轉

這些電晶體連結組合方式的改變可藉由一個邏輯選通(Logic-gate)電路而達成。它們的順序關係如表 4.1 所示。

表4.1 順(CW)、反(CCW)時鐘的開關順序

旋轉方向 開關順序		CCW				CW			
		1	2	3	4	1	2	3	4
光電晶體	PT1	1	0	0	1	1	0	0	1
	PT2	0	1	0	0	0	0	1	0
	PT3	0	0	1	0	0	1	0	0
電晶體	Tr1	1	0	0	1	0	0	1	0
	Tr2	0	1	0	0	0	1	0	0
	Tr3	0	0	1	0	1	0	0	1

## 4.2 三相雙極驅動馬達

當一個三相(無刷)馬達用三相電橋電路驅動時，其效率(機械輸出功率對電子輸入功率的比值)會達到最高。因為在這種驅動方式中，會有一個交流電流通

過每一個線圈繞組，就像交流馬達一樣。這種傳動方式就叫做‘雙極驅動(bipolar drive)’。這裡所指的‘雙極’是指線圈在南極和北極內交互地受到通電。

現在我們將探討三相電橋電路(圖 4.4)的原理。一樣地，我們用光學方法來探測轉子的位置。其中六個光電晶體以相同間隔配置在端板上。由於光閘是與軸桿連結，這些光學元件於是依序地曝露於來自圖示左側的光源。現在的問題是：要瞭解電晶體的開關(ON/OFF)狀態與偵測光源的光電晶體之間的關係。最簡單的關係是：設定邏輯定序器(logic sequencer)，使得當標示特定號碼的光電晶體曝露於光線時，其對應號碼的電晶體處在開啓(ON)的狀態。圖 4.4 顯示通過 Tr1，Tr4 和 Tr5，以及當端點 V 的電位值為 0 時，端點 U 和 W 的電流具有電池電壓。這種狀態下，電流會從端點 U 流到端點 V，並且另一個電流會從端點 W 流到端點 V，如圖 4.5 所示。吾人可確定：圖示中的實線箭頭代表在每一相中由電流所產生之磁場的方向。然後，在中央的粗箭頭即是靜子內的合成磁場。

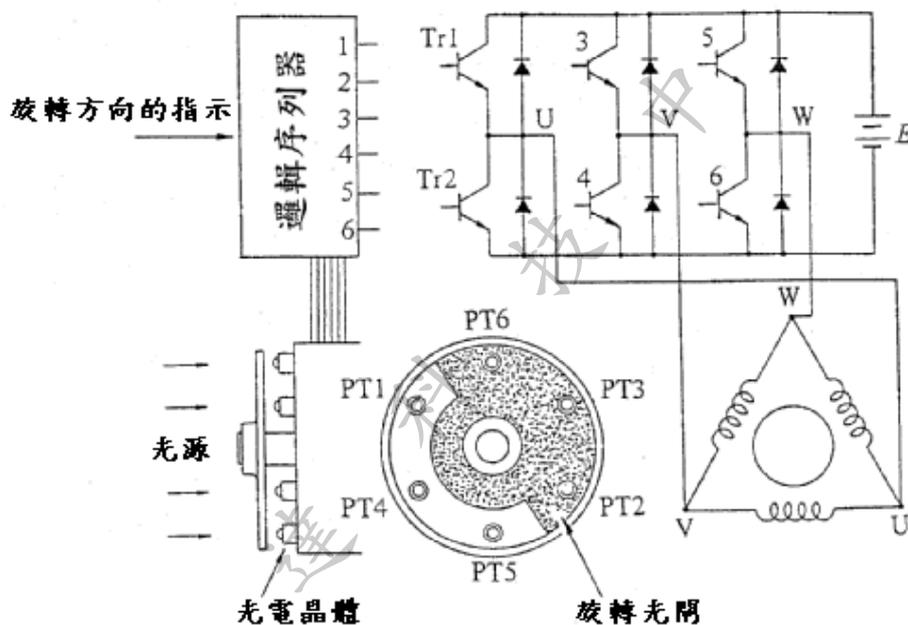


圖4.4 三相雙極驅動無刷馬達

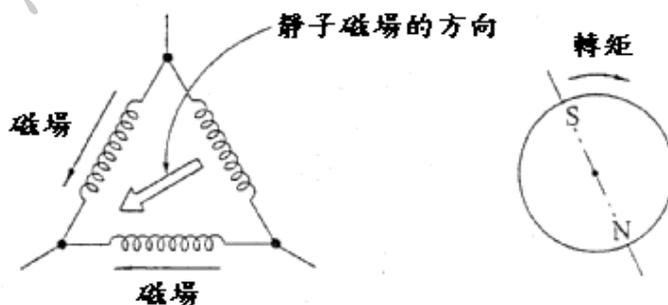


圖4.5 在圖4.4中光閘狀態下的靜子磁場以及轉矩的方向

轉子設置的方式：其磁通相對於靜子的磁場呈  $90^\circ$  角，如圖 4.5 所示。在這種狀態下，便可在轉子上產生順時鐘的轉矩。在旋轉  $30^\circ$  之後，光電晶體 PT5

會關閉(OFF)，PT6 會開啓(ON)。這樣會使靜子的磁極順時鐘旋轉  $60^\circ$ 。如此，當轉子的南極趨近時，靜子的南極會進一步地偏離而產生順時鐘的連續旋轉。這種開關(ON-OFF)的順序以及電晶體的旋轉方式如圖 4.6 所示。

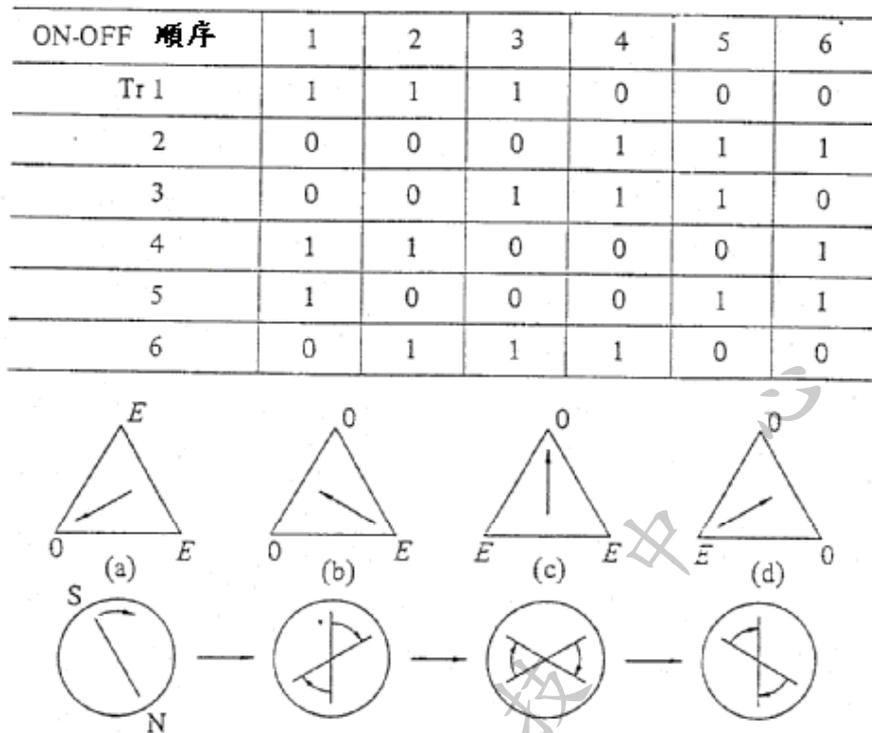


圖4.6 靜子磁場和轉子的順時鐘旋轉

ON-OFF 順序	1	2	3	4	5	6
Tr 1	0	1	1	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	1	1	0	0	0	1
4	0	0	1	1	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	1	1	1	0	0	0

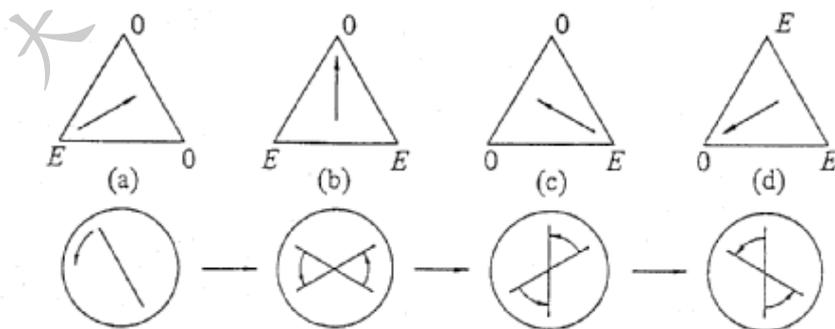


圖4.7 靜子磁場和轉子的反時鐘旋轉

旋轉的方向可藉由邏輯定序器的設定而逆轉，其方式：當一標示特定號碼的光電晶體曝露於光線時，其對應號碼的電晶體關閉(OFF)。另一方面，當光電晶體未曝露於光線時，其對應號碼的電晶體開啓(ON)。

在圖 4.4 所描述的位置狀態中，Tr2,Tr3 和 Tr6 呈開啓(ON)狀態，而端點 V 具有電池電壓 E 且端點 U 和 W 的電位值為 0。如圖 4.7(a)所示，靜子中的磁場呈現逆轉，並且轉子的轉矩為逆時鐘方向。在馬達旋轉約 30° 之後，Tr2 會關閉而 Tr1 會開啓。此時，磁場已旋轉 60° 並且變成如圖 4.7(b)所示。當轉子產生另一個逆時鐘的轉矩時，逆時鐘方向的運轉會持續且磁場會變成如圖 4.7(c)所示。這個作動會重覆(a)→(b)→(c)→(d)→的順序方式以產生連續逆時鐘方的旋轉。

### 4.3 傳統馬達和無刷直流達的比較

雖然，無刷直流馬達和傳統馬達在靜態的特性上有許多相似之處，它們在許多方面仍有明顯區別。我們用當今科技的標準進行比較，探討它們之間的不同點更易於了解其適用的範圍。表 4.2 就這兩種馬達的優劣進行比較。當我們討論電動馬達時，不應該忽略線圈繞組和轉向(commutation)的重要性。轉向的意義是指將輸入電流轉換成交流電流並且適當地將其分配到電樞中每一線圈的過程。在傳統直流馬達中，其藉由電刷和轉向器來達成轉向的功能；相反地，無刷直流馬達中是運用諸如電晶體的半導體裝置來實施。

表 4.2 傳統馬達和無刷直流馬達的比較

	傳統馬達	無刷馬達
機械結構	場磁鐵在靜子上	1.場磁鐵在轉子上 2.類似交流同步馬達
特殊特徵	響應快，可控性極佳	1.壽命長 2.維修養護容易(通常不需維護)
線圈繞組連結	1.環型連結 2.最簡易的方法：Δ-型連結	1.最高階的方法：Δ 或 Y-型連結 2.一般的方法：採取具有接地中性點之三相 Y-型連結的線圈繞組，或四相連結 3.最簡易的方法：兩相連結
轉向方法	電刷與轉向器之間為機械性接觸	用電晶體進行電性轉換
轉子位置的偵測方法	由電刷自動偵測	霍爾元件、光學編碼器，等電子零件
逆轉旋轉方向的方法	藉由末端電壓的逆轉	重新設定邏輯序列

#### 4.3.1 轉向功能的差異

圖 4.8 中，其改用兩個開關或電晶體來解釋直流馬達電刷的功能。轉向器 A 區段可具有下列三種狀態之一：(a)與正電刷接觸，(b)與負電刷接觸，(c)不與任何電刷接觸。如圖中所示，一個轉向器對應到兩個電晶體。

吾人應特別注意馬達中線圈電感的情形。在圖 4.9(a)中，開關 S1 呈關閉且電流供應到線圈。圖 4.9(b)中，當開關 S1 開啓時，電流明顯地會被切斷；但是，

因為有電感的存在，在跨越開關的空氣間隙(airgap)內會有高電壓出現，並且會產生火花。這個電流會流過那空氣間隙持續一段短暫時間。現在回到使用電刷的情形，如圖 4.9(c)所示，當電刷與轉向器(A 區段)分離時，可以注意到火花的產生。微弱的火花並不會對轉向器或電刷造成嚴重損害。然而，如果火花很強並且在運作中重覆發生，則可能對電刷和轉向器造成影響。

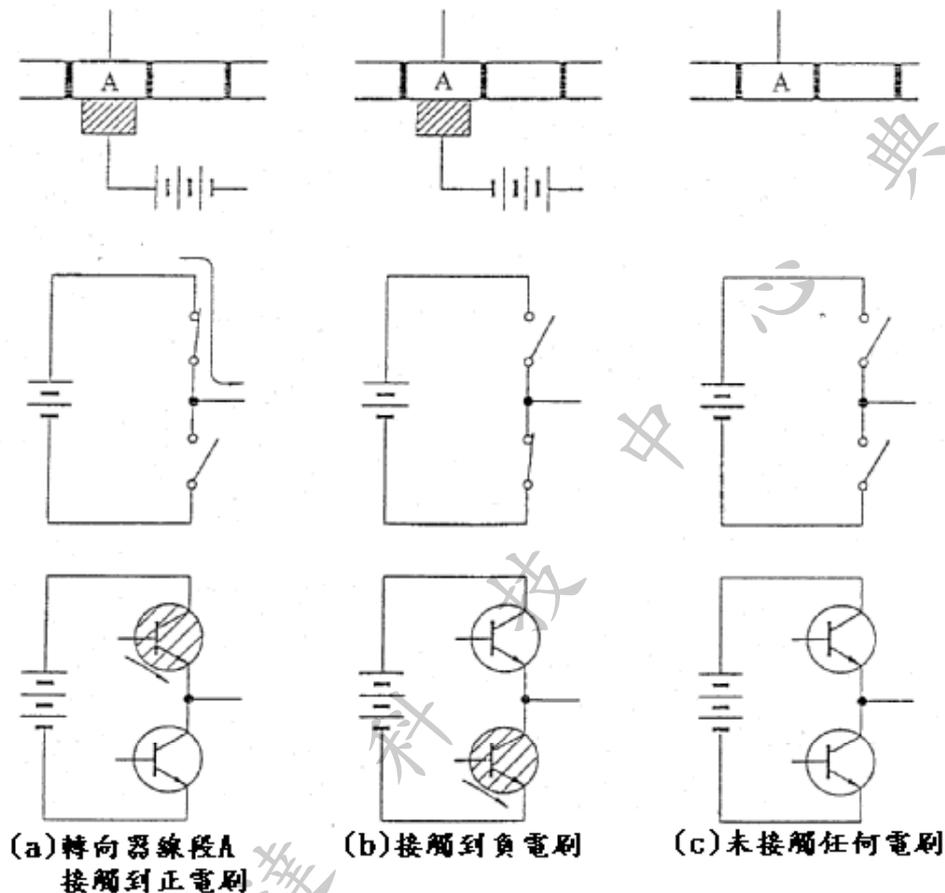


圖4.8 直流馬達電刷被機械式合閉或電晶體取代

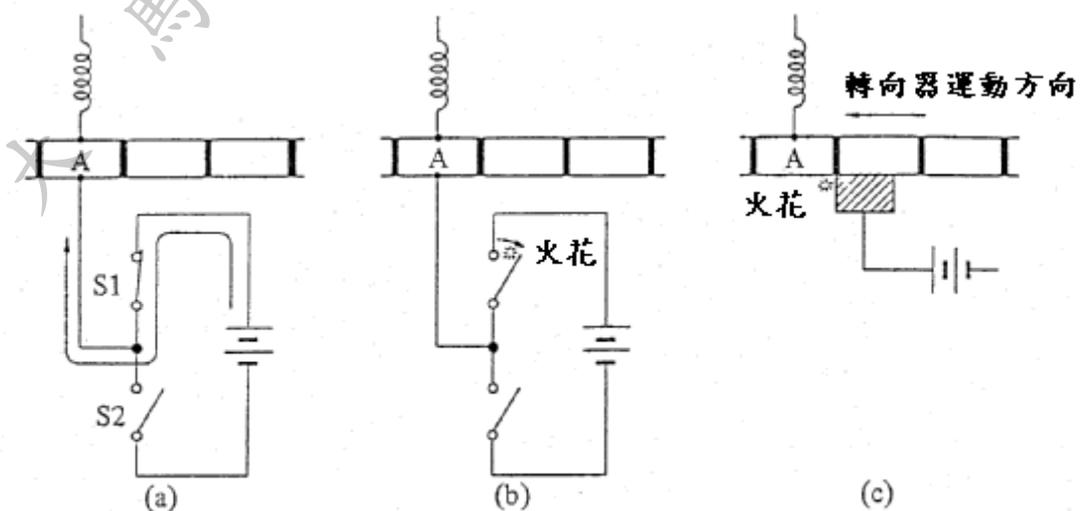


圖4.9 轉向器線段與電刷之間產生火花的情形

一般而言，當電流流入電路時，其電感設為  $L$ ，則會有電磁能量  $(1/2 Li^2)$  儲存其中。而當電流被截斷時，這個能量便釋出而產生火花。能量越大，則產生的火花越多。

較小的電感可降低火花的顧慮。亦即，連結到轉向器的線圈匝數應該減少，以便達成無火花的轉向功能。在傳統馬達中，線圈的組成係分散成許多繞組；而在許多馬達中，線圈匝數比轉向器的區段數目還要多，如圖 4.10 的結構所示。

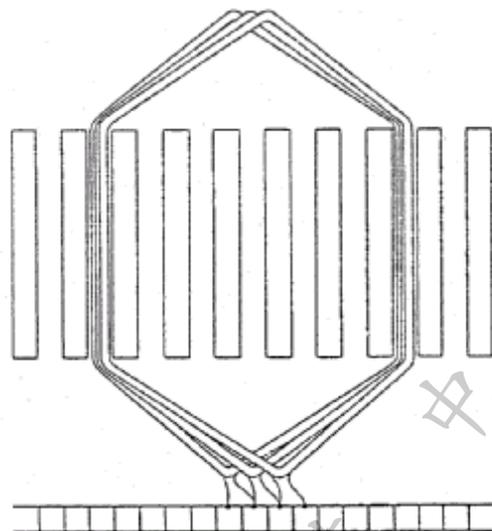


圖 4.10 欲減少在電刷的火花，可將線圈分成若干小線圈

圖 4.11 所顯示的轉向器電路使用兩個電晶體。在圖 4.11(a)中， $Tr1$  呈開啓狀態，並且電流係從電源供應器經由這個電晶體而流通到線圈  $L$ 。而在圖 4.11(b)中，當  $Tr1$  呈關閉狀態，電流會經由二極體  $D2$  流動，並暫態地持續一段時間直

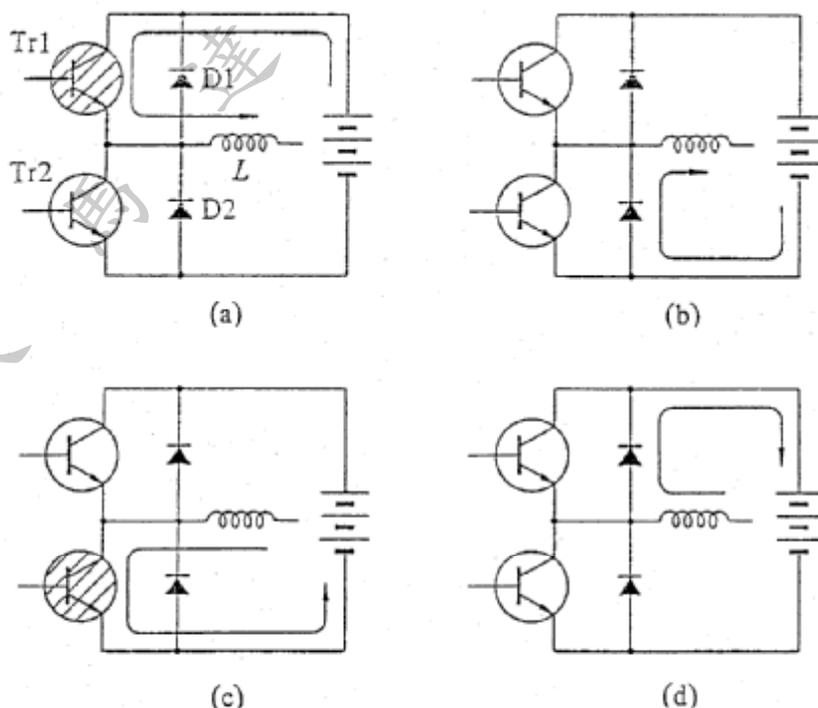


圖 4.11 使用兩個電晶體的轉向器電路

到降至零為止。如果沒有這個二極體，電流會立即消失。這種情形下，在線圈內會產生一個跨越 Tr1 集電器(collector)和發射器的高電壓  $L(di/dt)$ ，而此高電壓會對電晶體造成損害。如此，在無刷直流馬達中，儲存在線圈內的電磁能量便可藉由這個二極體而回到電源供應器，也因此不會有火花產生。吾人可知，二極體 D2 是用來保護 Tr1 不會受到損害，而 D1 則是用來保護 Tr2。

### 4.3.2 線圈繞組的差異

圖 4.8 中，一個轉向器的區段即等同於包含兩個電晶體和兩個二極體的組合。因此，依照此同等性原理，如果一個具有許多轉向器區段的傳統直流馬達欲轉變成無刷直流馬達，則這種電子裝置的成本會很高。基於經濟的考量，應該儘可能地減少半導體元件的數量來傳動無刷直流馬達。傳統直流馬達必須包含至少三個轉向器，以便藉由所施加的電壓極性來控制其旋轉的方向。圖示 4.12(a)即顯示這種型式的電樞。而具有這種電樞的馬達即稱為三區段(three-segment)馬達。

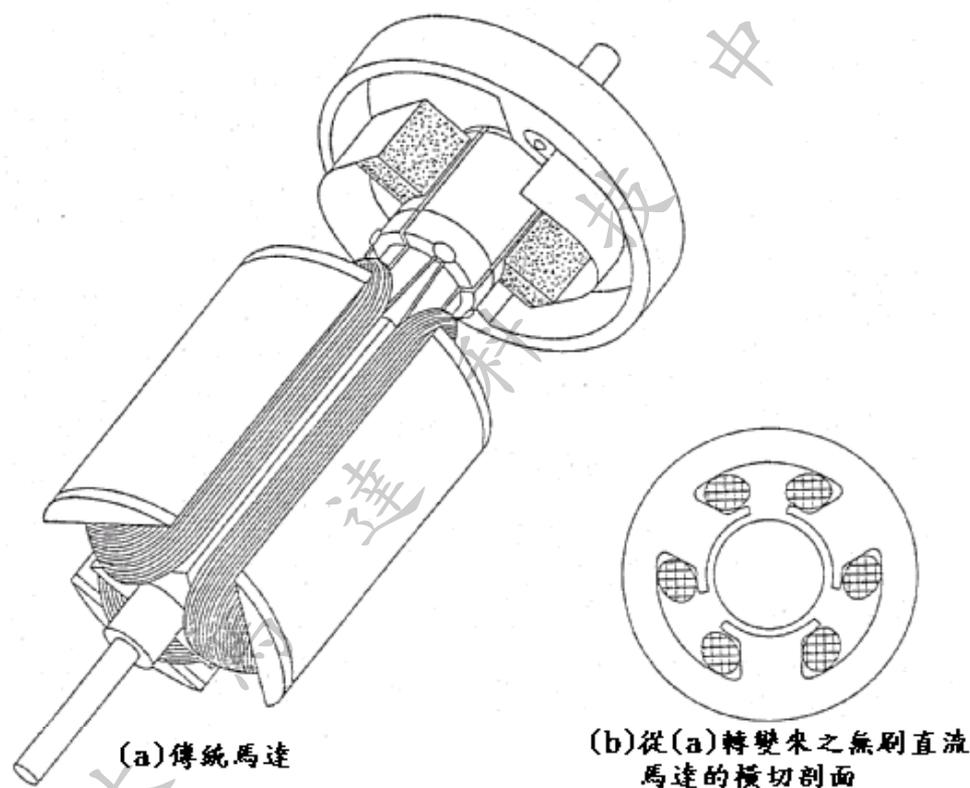


圖4.12 從傳統馬達到無刷直流馬達

圖 4.12(b)所示的剖斷面就是一個三相無刷直流馬達的電樞，其中包含三個槽隙和三個齒槽。由於每一相的線圈是沿著一個齒槽進行繞組，這種型式的纏繞方式稱為‘集中式繞組(concentrated winding)’。運用這種線圈繞組的方式可使馬達的製作變得簡單，但馬達的旋轉會比較不平順。若要使旋轉平穩，我們必需採用一種稱作‘配佈式繞組(distributed winding)’的線圈配置方式。在這種繞組的方法中，縫隙的數目會增加。圖 4.13 顯示一種四極配佈式線圈繞組方法，其

中採用了 24 個槽隙。由於這種配佈式線圈繞組很早就已經應用在鼠籠式感應馬達(squirrel induction motors)中，而就機器的結構而言，無刷直流馬達與交流馬達是類似的。

為什麼三相配佈式線圈繞組未運用在傳統直流馬達中？其理由如下：

- (1) 三相線圈繞組會增加線圈電感並導致火花。圖 4.12(a)所顯示的三槽隙馬達就是最簡單的三相馬達，它會產生很大的齒槽效應轉矩。因此，這種馬達並不符合高性能的要求。
- (2) 增加齒槽縫隙的數目可降低齒槽效應轉矩以及導致火花的不利影響。此外，將線圈分割成許多小線圈可以使火花減到最少。如圖 4.10 所示，每一個小線圈係連結於不同的區段。

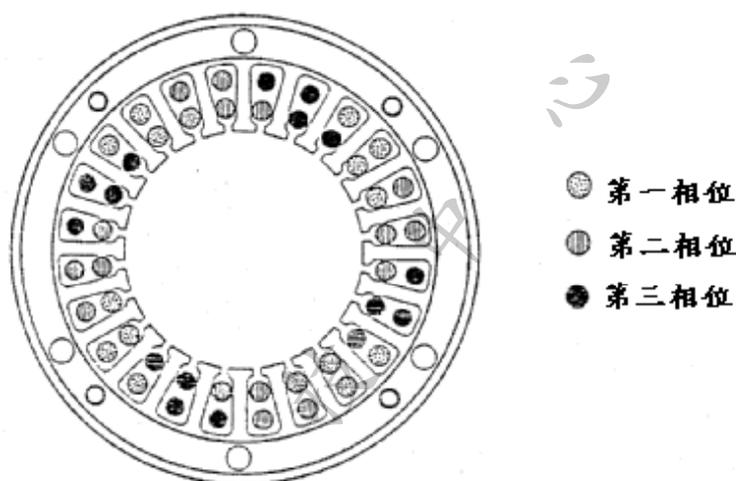


圖 4.13 三相四極分佈繞組的線圈設置方式

## 4.4 轉子位置的探測以及霍爾元件的運用

無刷直流馬達結合許多構件來探測其轉子上的極性/位置。現今所使用的位置探測器包含：

- (a) 霍爾元件
- (b) 發光二極體和光電晶體或二極體
- (c) 對電感變化敏感的感應器(inductors)

這些當中，(a)類已廣泛地使用，(b)類次之；至於(c)類曾經使用過，但近來它的使用已趨減少。霍爾元件和霍爾 IC 元件的原理將在以下討論。

### 4.4.1 霍爾元件

圖 4.14 中，當電流  $I_c$  向下流入一個丸狀半導體(位在與丸狀表面呈垂直的磁場內)時，會在丸狀半導體內產生一個電動勢  $V_H$ ，且這個電動勢與電流  $I_c$  和感應磁場  $B$  的方向垂直。由於，依據佛來明左手定則，電磁力會作用在帶電粒子(電子或電洞)上，於是帶電粒子會被偏向到丸狀半導體右側。當它是一個丸狀半導體元件時，電動勢的極性會隨是否為 p-型或 n-型半導體而不同。電動勢  $V_H$  (亦稱

作霍爾電壓) 的大小可以用下列方程式表示：

$$V_H = \frac{1}{d} \cdot B \cdot I_C \cdot R_H \quad (4.1)$$

其中：  
 $R_H$  = 霍爾常數 ( $\text{m}^3\text{C}^{-1}$ )  
 $I_C$  = 電流 (A)  
 $B$  = 磁通密度 (磁感應) (T)  
 $d$  = 丸狀半導體的厚度 (m)

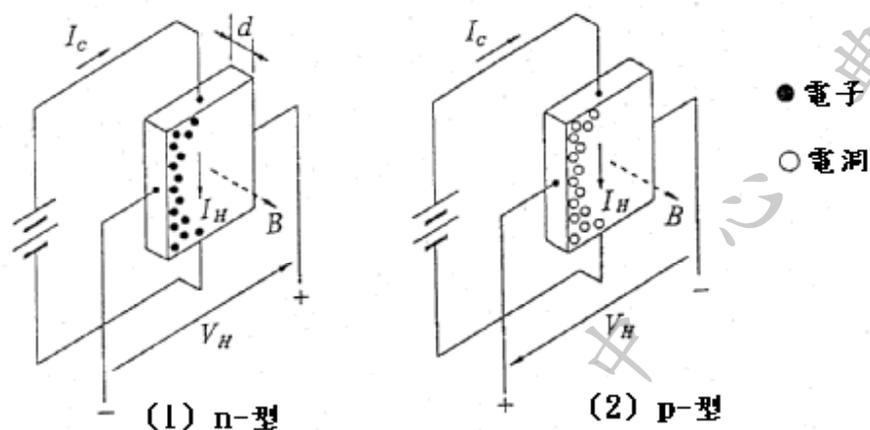


圖4.14 霍爾效應

這種現象是在 1878 年由 E.H. Hall 應用一塊金屬片所進行的實驗發現的，因此被叫做霍爾效應(Hall effect)。霍爾效應在許多金屬複合物或半導體中特別強烈。製作並用來探測磁場的半導體裝置即稱作霍爾元件或霍爾發生器。在現代的無刷馬達中，n-型 InSb(銻-銻)和 GaAs(鎵-砷)已被廣泛使用。圖 4.15 顯示市場上可購買到的典型霍爾元件，圖 4.16 則顯示霍爾元件的一般尺寸。

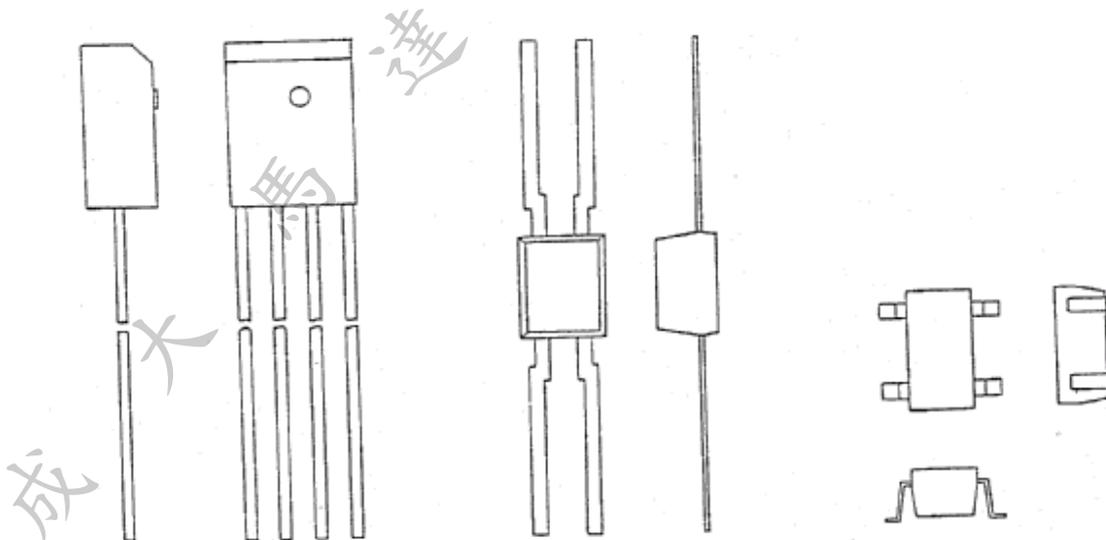


圖4.15 典型的霍爾元件

#### 4.4.2 用霍爾元件探測位置的原理

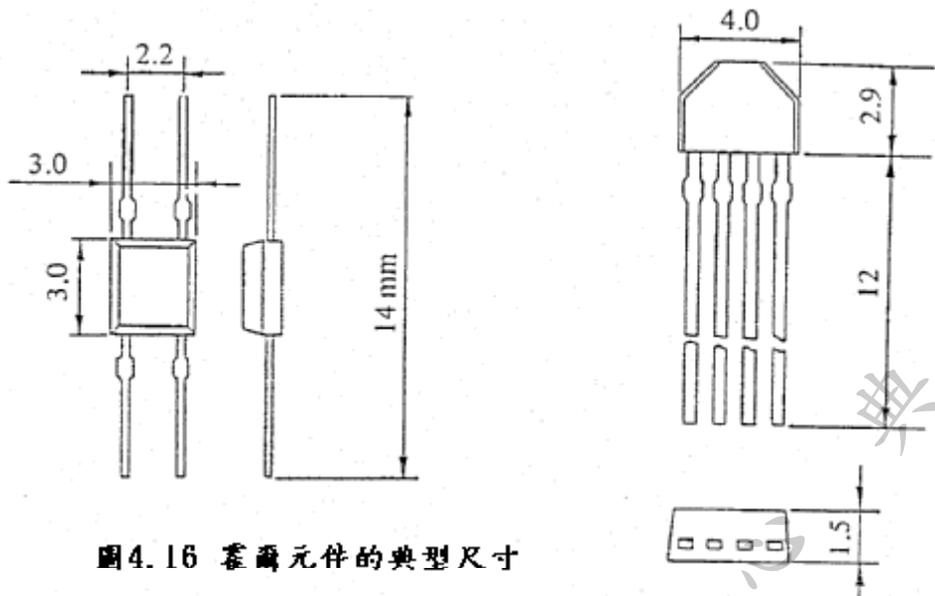


圖4.16 霍爾元件的典型尺寸

圖 4.17 顯示一種作為霍爾元件(呈 4 端點網路)的等效電路。當電流  $I_c$  (亦稱作控制電流或偏壓電流) 在曝露於磁場(與霍爾元件的平面垂直)的霍爾元件內從端點 3 流到端點 4 時，會產生一個跨越端點 1 和 2 的電壓  $V_H$ ，如前解釋者。當採取端點 4 做為參考點時，端點 1 和端點 2 的電位分別為  $V_H/2$  和  $-V_H/2$ ，其中假設  $R_1=R_2$  以及  $R_3=R_4$ 。此外，它的極性也會隨著磁通方向的逆轉而改變。圖 4.18 即顯示它們之間的關係。因此，當霍爾元件趨近永久磁鐵的轉子而配置時，它便可以精確地探測到極性的位置和磁通量密度，進而提供輸出電壓  $V_{H1}$  和  $V_{H2}$ 。

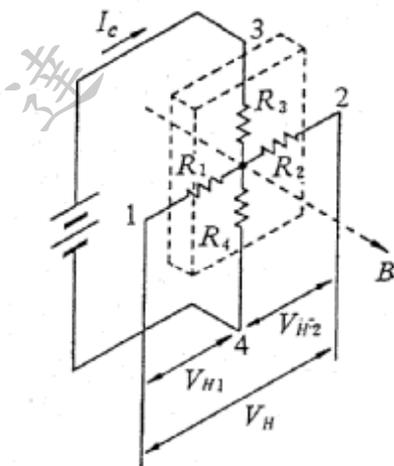


圖4.17 霍爾元件的等效電路

#### 4.4.3 位置探測的實用方法

圖 4.19(a)顯示無刷直流馬達最簡單的原理，其中所使用的霍爾元件配置如圖 4.19(b)所示。來自霍爾元件的輸出訊號即運用兩個電晶體  $Tr_1$  和  $Tr_2$  來控制在靜子線圈  $W_1$  和  $W_2$  內的電流。圖 4.20(a)-(c)顯示轉子旋轉時的狀態，並解釋如下：

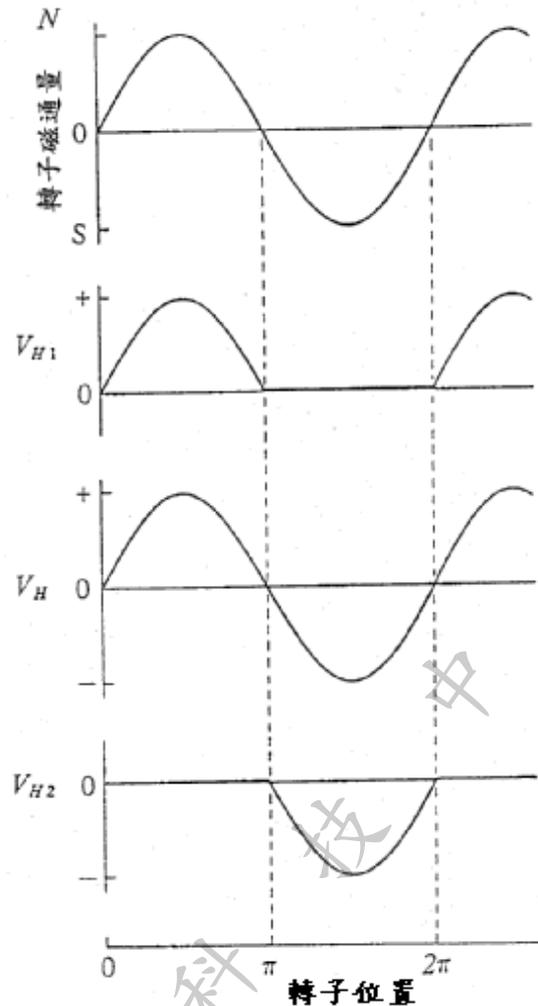


圖 4.18 霍爾元件的輸出波型

- (a) 霍爾元件探測到轉子磁鐵的北極，然後線圈 W2 即被通電以產生可以使轉子在逆時鐘方向傳動的南極。
- (b) 由於在這個位置的關係中，霍爾元件沒有受到磁場的作用，兩個電晶體都會處在關閉的狀態，且沒有電流流入線圈 W1 或 W2 中。此時轉子會因為慣性而繼續旋轉。
- (c) 霍爾元件探測到轉子的南極，且線圈 W1 會被通電以產生南極，此南極會吸引轉子的北極而持續逆時鐘方向的旋轉。

#### 4.4.4 霍爾 IC 元件

如先前所述，霍爾 IC 元件的使用必須伴同至少一個電晶體以放大輸出訊號。近來，霍爾元件和許多電子電路都被構成且模造在同一顆晶片上。這就是所謂的霍爾 IC 元件。圖 4.21(a)和(b)顯示典型霍爾 IC 元件的外觀以及其功能的方塊圖。一旦來自霍爾元件的輸出訊號被運算放大器(operational amplifier)放大，它的輸出訊號會在輸出的階段受到進一步處理。而來自霍爾 IC 元件的輸出訊號則是用以傳動功率電晶體，以便控制線圈的電流。霍爾 IC 元件有兩種型式，亦即

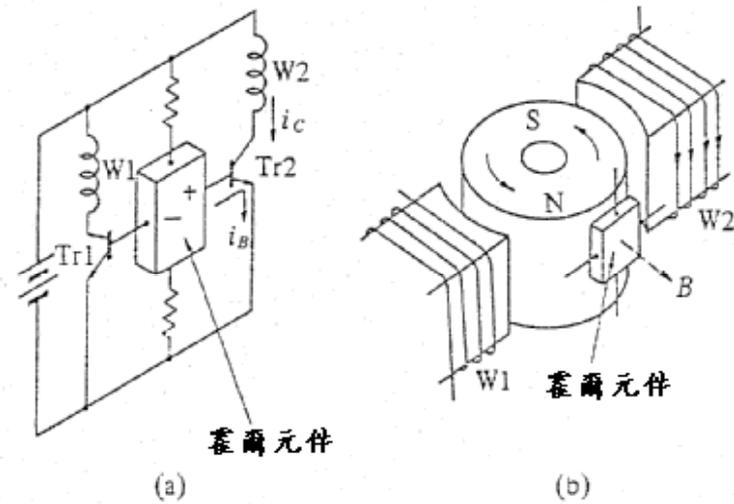


圖4.19 使用霍爾元件之無刷直流馬達的基本原理

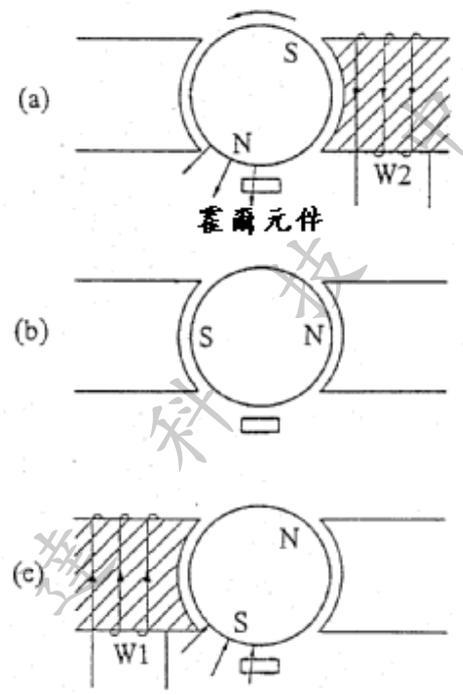


圖4.20 旋轉、逆旋與轉向

線性 (linear) 型和開關 (switching) 型。至於，選用何種型式的霍爾 IC 元件，須依據所選用馬達結構和其應用的內容而定。

圖 4.23 顯示一種使用三個霍爾 IC 元件的外轉子馬達。它的靜子線圈是三相型且是在單極激磁的狀態下傳動。設置在這個馬達內的霍爾 IC 元件是用以探測來自轉子的主要磁通量，而且開關的順序與 4.1 節中所解釋的情形一致，亦即使用一個光電構件作為轉子的位置探測器。

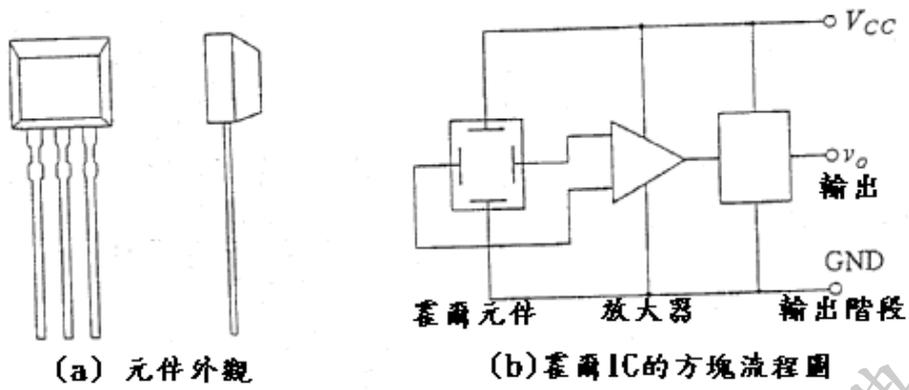


圖4.21 霍爾IC和它的功能

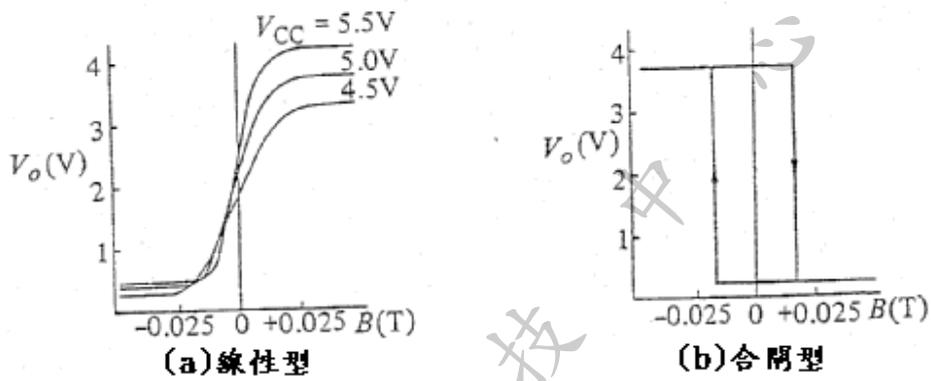


圖4.22 霍爾IC的特性

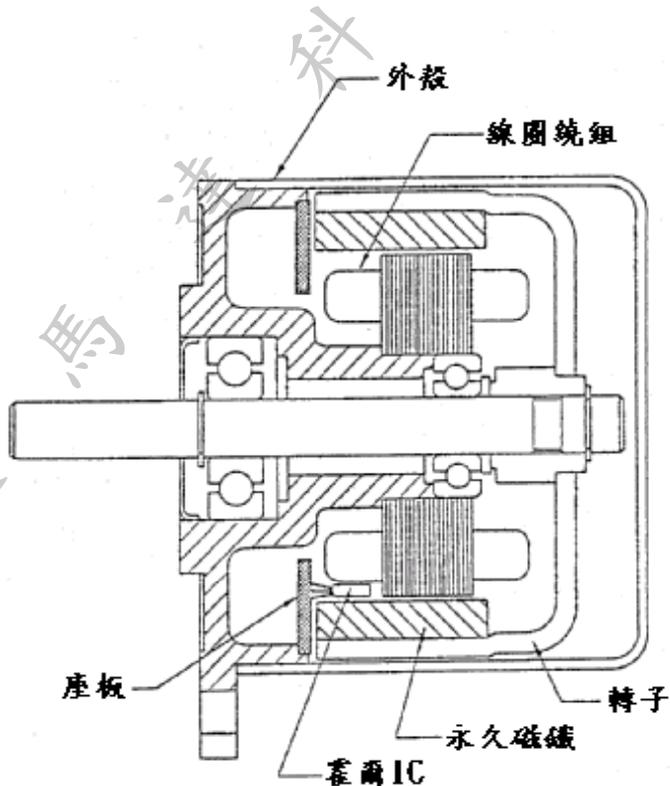


圖4.23 外轉子無刷直流馬達

## 4.5 消除二相馬達中的靜點

4.4.5 節中曾解釋到使用一個霍爾元件之二相馬達的原理。然而，這種馬達具有下列兩種缺點：

- (1) 霍爾元件會遭遇兩個無法感受磁通量的靜點(deadpoint)，以致在線圈內沒有電流來產生轉矩。因而，當馬達承受磨擦性的負載時，即有可能會在靜點處停止運轉並且無法重新啓動。當磨擦性的負載很小時，轉子或可以因慣性作用而穿越靜點(參考圖 4.24)。
- (2) 由於反電動勢在低轉矩的狀態會變得很小，大電流將會流過並增加銅耗(copper loss)。因此，馬達的效率(輸出機械功率對輸入電子功率的比值)不會太高。

對於在實際運用中的馬達而言，上述問題應均已排除。這種型式的馬達中，最貴但具有最高效率者是雙極激磁狀態下傳動的三相(three-phase)馬達，這曾在 4.2 節中解釋過。另一方面，沒有靜點的兩相馬達中最便宜的是無刷直流馬達。消除靜點的主要方法有兩種：其一是運用多相結構(polyphase structure)，其二是利用空間諧波磁場(space harmonic magnetic field)。

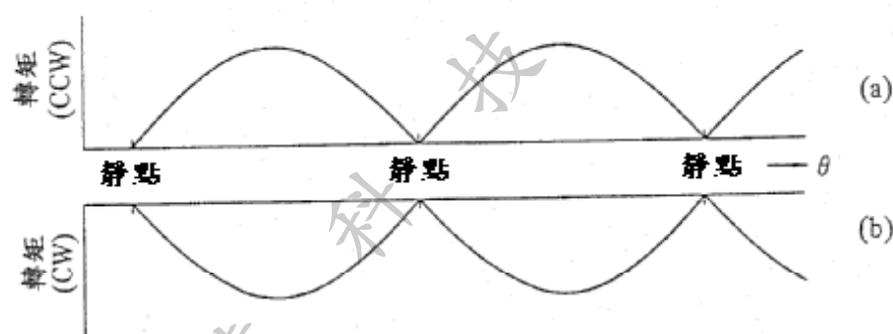
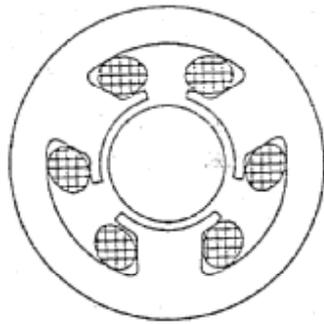


圖 4.24 在扁平二相馬達中，轉矩與旋轉角度之間的關係

### 4.5.1 多相馬達

圖 4.25 顯示一種多相馬達的例子。當一個直接電流提供到線圈的每一相(W1, W2 和 W3)並且轉子藉由外力而轉動時，其中因為線圈的電流與磁通量之間的交互作用而出現在軸桿的轉矩將會如圖 4.26 中所示。它們的型式會很接近正弦波，且波型之間會相差  $120^\circ$  的相位。如果運用霍爾元件來依序驅動線圈中的電流，以便在每一相位對最大的轉矩部份進行激磁，如此便可獲致如圖 4.26 中之陰暗部位的曲線。



(a) 橫向剖面

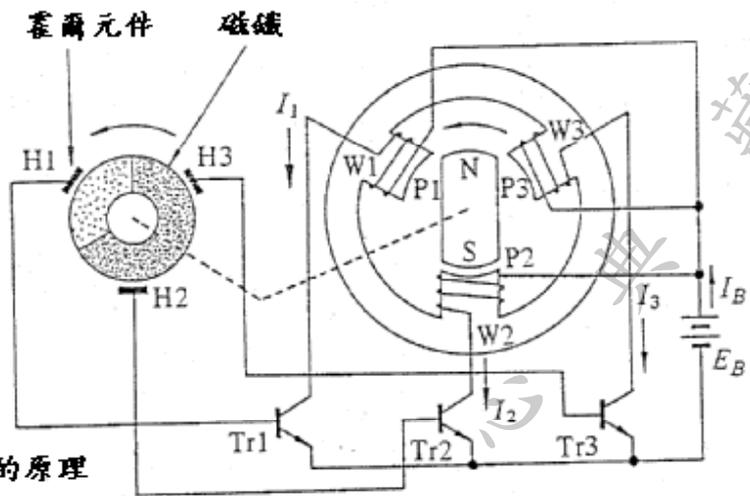


圖4.25 三相單極馬達的原理

(b) 基本原理

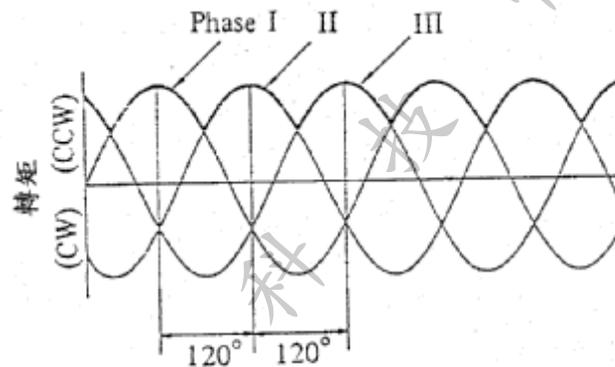


圖4.26 當直接電流進入每一相位時，轉矩與旋轉角度之間的關係

#### 4.5.2 空間諧波型式

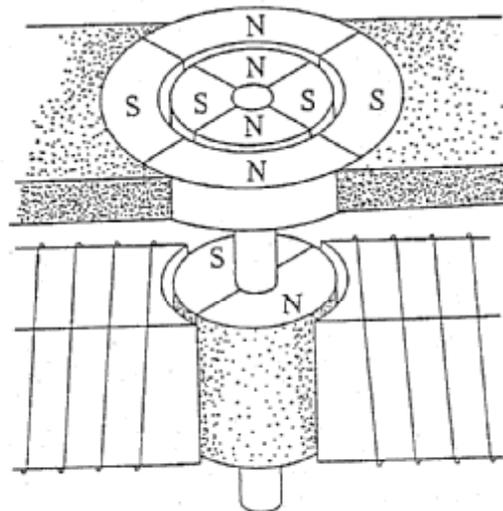


圖4.27 使用空間諧波轉矩的二相馬達

圖 4.27 的馬達是一種改良自圖 4.19 和圖 4.20 中所示的普通二相雙極馬達。在其轉子連結一個額外的四極磁鐵，且它的靜子在圖示的這種位置關係中也具有一個四極磁鐵。圖 4.28 顯示這種馬達的轉矩與旋轉角度之間關係。它的兩極轉矩曲線(以符號 A 標示)與圖 4.24 所示者一致，並且具有兩個靜點。曲線 B 代表由新安裝的永久磁鐵所產生的空間諧波轉矩曲線。兩極轉矩因為霍爾元件所造成的轉向而總是逆時鐘方向。四極轉矩則可在兩個方向(順時鐘和逆時鐘)上交替地變化。由於合成轉矩(以符號 C 標示)是上述兩種轉矩的總和，它沒有任何靜點。

這種由兩個額外磁鐵所構成的馬達尚未有實際的應用。以下即是其實用的方法：

- (1) 在其靜子中加入輔助的凸極並且在轉子中增加輔助的磁鐵，而輔助磁鐵所具有的磁極數目是主要磁鐵的兩倍。
- (2) 在轉子內使用一個與基波(fundamental-wave)的磁化強度重疊的第二個諧波磁化強度，並使靜子上的線圈繞組的間距移離  $180^\circ$  的位置。
- (3) 運用非均勻的空氣間隙來產生第二個諧波轉矩。

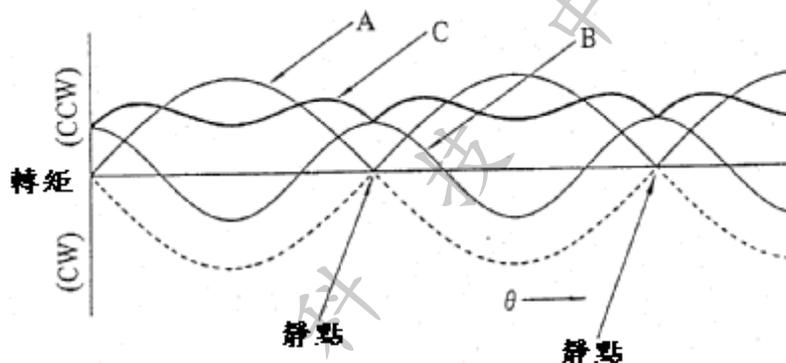


圖 4.28 將四極諧波轉矩重疊在雙極基本轉矩上，可藉以消除靜點