



單元

7

特殊電機

» 單元重點

隨著電器產品推陳出新，對於輕、薄、高速、節能的要求日益嚴苛。為了提升性能，傳統電動機（包括直流電動機、感應電動機及同步電動機）會進行材料與控制系統的提升與改良。另一方面因應工廠自動化、智慧家電或是電腦周邊需要，產學界運用各種原理與材料，陸續開發出許多具有特殊設計或是特殊功能的電動機，提供更舒適的生活環境。

» 單元綱要

- 12-1 步進電動機
- 12-2 伺服電動機
- 12-3 直流無刷電動機
- 12-4 輪轂馬達原理
- 12-5 線性電動機

單元七 生活知識家 特殊電動機 - 電腦及周邊設備的好伙伴

現代人生活常用的電腦及周邊設備裡，隱藏著許多小型電動機，以維持穩定與高速的性能。其中包含：避免 CPU 或是系統溫度過高所裝設的散熱風扇，常採用直流無刷式電動機；而硬碟機的主馬達常採用薄型直流無刷式電動機，至於讀取頭則會使用線性電動機或是步進電動機。至於印表機或是掃描器的內部也常會用到步進電動機與伺服電動機。只要仔細觀察身邊的電子產品，一定可以發現這些小型特殊電動機的蹤影。



圖片來源：東芝電機



CHAPTER 12

特殊電機

» 本章重點

隨著科技日新月異，針對不同需求而設計的電機產品陸續推出。本章針對目前運用較為廣泛的 4 種特殊電機包括：步進電動機、伺服電動機、直流無刷電動機以及線性電動機，做基本原理、構造與用途的介紹。

12-1 步進電動機 (step motor)

一、特性

傳統電動機通電後轉子加速旋轉，斷電後轉速逐漸減慢而後停止，此種旋轉慣性對於電扇、手扶梯、電車的影響不大。但就不適合用在印表機或磁碟機等需要準確定位的場合。

因應定位需求，將同步電動機改良而成的步進電動機，動作方式如圖 12-1，每接收一個脈波 (pulse)，步進電動機立刻旋轉一個特定角度而後停止；脈波數量越多，累積旋轉的角度也越大，因此又稱為脈波電動機 (pulse-motor)。

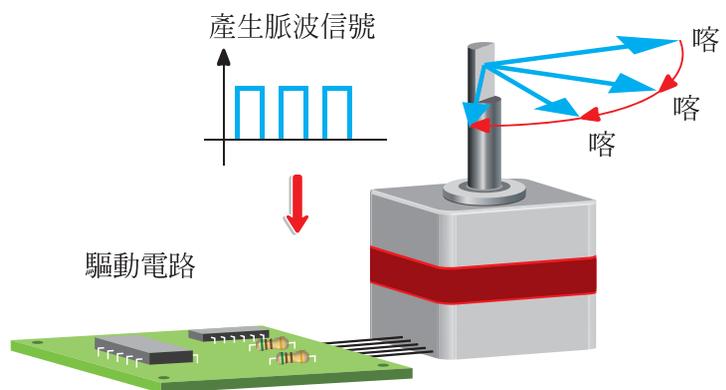


圖 12-1 步進電動機的動作方式

步進電動機的運轉特性包括：

1. 轉動的角度 (θ) 與輸入脈波數成正比，即轉速與脈波頻率成正比。
2. 步進角度誤差小，且沒有累積誤差。
3. 靜止時仍具有高度的保持轉矩，能夠維持位置不轉動。
4. 低速時具有很大的轉矩。
5. 起動、停止及正反轉容易控制且響應良好。
6. 沒有電刷與換向器，維修容易。
7. 利用開迴路控制就可以掌控位置與轉速，不需要複雜的回授系統。
8. 不適合高速運轉，特別是負載大時，轉子動作容易混亂，產生失步。

二、種類

步進電動機依據轉子的構造主要分為下列三種類型：

(一) 可變磁阻 (variable reluctance, VR) 型

可變磁阻型的轉子採用矽鋼板等強磁性體加工成齒輪狀，定子磁極上繞有線圈，當定子線圈加入直流電後產生電磁力，吸引轉子旋轉一個角度。

以圖 12-2 為例，定子分成 A 、 B 、 C 三組繞組，轉子鐵心有 8 個凸極。將 A 相線圈通上直流電，轉子的 1、3、5、7 號凸極受到 A 相線圈吸引停留在圖 12-2(a) 所示的位置。

A 相線圈斷電後，改將 B 相線圈通電，轉子的 2、4、6、8 號凸極受到 B 相線圈磁場吸引，帶動轉子朝逆時針方向旋轉 15° 停在圖 12-2(b) 所示位置；若將 B 相線圈斷電，改將 C 相線圈通電，轉子的 1、3、5、7 號凸極再次受到 C 相線圈磁場吸引，轉子再以逆時針方向旋轉 15° 停在圖 12-2(c) 位置。

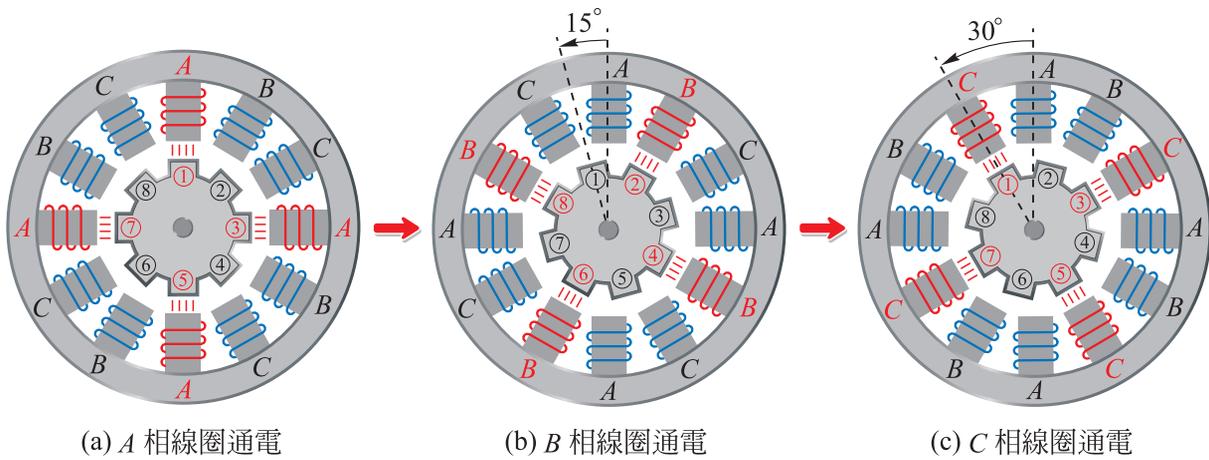


圖 12-2 可變磁阻 (VR) 型步進電動機

因此當定子繞組依序以 A 相→B 相→C 相→A 相→……的順序加入直流脈波時，轉子朝逆時針方向每次旋轉 15°。若是定子改以 A 相→C 相→B 相→A 相→……的順序通電時，轉子改成順時針方向每次旋轉 15°；當累積輸入 24 個脈波信號，轉子等於轉了 1 圈。

一個脈波信號可讓轉子轉動的角度稱為步進角，可變磁阻型步進角為：

$$\theta = \frac{360^\circ}{q \times N} \quad (12-1)$$

θ ：步進角 (度) q ：定子相數 N ：轉子凸極數

可變磁阻型優點在於步進角度小、反應快，但是轉子是依據定子的磁化而動作，因此轉矩較小、效率低，目前較少運用。

範例
01

有一部 4 相、18 齒的可變磁阻型步進電動機，求 (1) 步進角 θ 、(2) 要讓電動機的轉速為 300 rpm，則每相輸入的脈波信號頻率為何？

解 (1) 步進角 $\theta = \frac{360^\circ}{q \times N} = \frac{360^\circ}{4 \times 18} = 5^\circ$ 。

(2) 已知步進角為 5° ，旋轉一圈總共需要 $\frac{360^\circ}{5^\circ} = 72$ 個脈波。

轉速 300rpm，每秒鐘轉 5 圈，每秒總共需要 $5 \times 72 = 360$ 個脈波。

每相繞組每秒需要輸入 $\frac{360^\circ}{4} = 90$ 個脈波，故頻率為 90 Hz。

(二) 永久磁鐵 (permanent magnet, PM) 型

永久磁鐵型步進電動機的轉子採用氧化鐵材料製成的永久磁鐵，定子磁極上同樣繞有線圈。以圖 12-3 為例，定子有 A、B、C、D 四個線圈，轉子為兩極式的永久磁鐵。A 相線圈通上直流電後所產生的 N 極，會將轉子 S 極吸引停留在圖 12-3(a) 所示的位置。

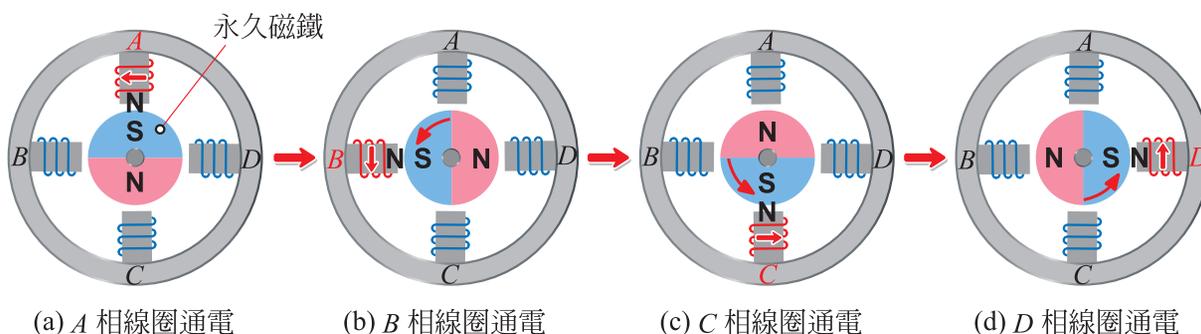


圖 12-3 永久磁鐵 (PM) 型步進電動機

將 A 相線圈斷電，改將 B 相線圈通電，轉子 S 極受到 B 相線圈產生的 N 極吸引朝逆時針方向旋轉 90° 後停留在圖 12-3(b) 位置。因此當定子繞組依序以 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow \dots$ 的順序通上直流電時，轉子朝逆時針方向每次旋轉 90° 。若是定子改以 $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow \dots$ 的順序通電時，轉子改成順時針方向每次旋轉 90° 。累積接收到 4 個脈波信號，轉子等於轉了 1 圈。



永久磁鐵型的構造簡單、效率高、轉矩大、保持轉矩高，因此常用於冷氣出風口的控制、機器手臂、工作母機等場所。

步進電動機利用定子持續激磁產生旋轉磁場牽引轉子的過程與同步電動機的原理很類似：但是受限於定子線圈數，步進電動機無法產生圓滑的旋轉磁場，造成轉子容易產生振動，可以透過構造與激磁方式來改善。

以圖 12-3 永久磁鐵型步進電動機為例，可以採用的激磁方式與步進角整理如表 12-1 所示。

表 12-1 激磁方式與步進角的關係

激磁方式	線圈激磁順序					轉向	步進角
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5		
一相激磁	A 相	B 相	C 相	D 相	A 相	逆時針	90°
	A 相	D 相	C 相	B 相	A 相	順時針	
二相激磁	A 與 B	B 與 C	C 與 D	D 與 A	A 與 B	逆時針	90°
	A 與 D	D 與 C	C 與 B	B 與 A	A 與 D	順時針	
一、二相激磁	A 相	A 與 B	B 相	B 與 C	C 相	逆時針	45°
	A 相	A 與 D	D 相	D 與 C	C 相	順時針	

相較於一相激磁而言，兩相激磁產生的轉矩大、振動小。而一、二相激磁則可以將步進角減半，做更精準的定位。綜合上述，要改變步進電動機的轉向必須改變繞組的激磁順序。要改變轉速則必須控制脈波信號的頻率。

(三) 混合 (hybrid, HB) 型

混合型是將永久磁鐵 (HB) 型與磁阻 (VR) 型兩者優點結合而成。轉子構造如圖 12-4(a)，中間為圓筒型的永久磁鐵 (PM 型特徵)，外層為兩層齒輪狀鐵心 (VR 型特徵)，N 極鐵心齒與 S 極鐵心齒間有 $\frac{1}{2}$ 齒距的偏差。圖 12-4(b) 為其定

子構造，極身繞有磁場繞組，極掌也是齒輪狀並與轉子鐵心齒間形成良好的嚙和。

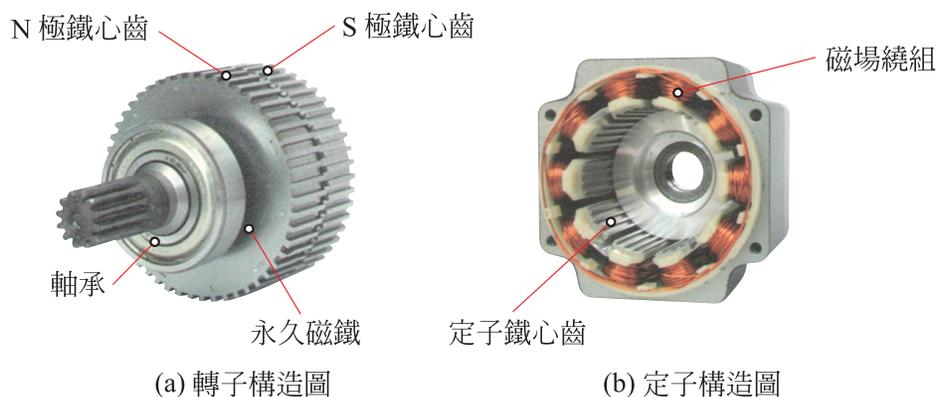


圖 12-4 混合 (HB) 型步進電動機的構造
(圖片來源：Oriental motor)

混合型步進電動機動作原理如圖 12-5，將定子 A 相繞組加入直流電後，定子上方產生磁極 S 與轉子外側的 N 極鐵心齒相吸；定子下方產生磁極 N 與轉子內側的 S 極鐵心齒相吸，轉子停留在圖 12-5(a) 所示的位置。

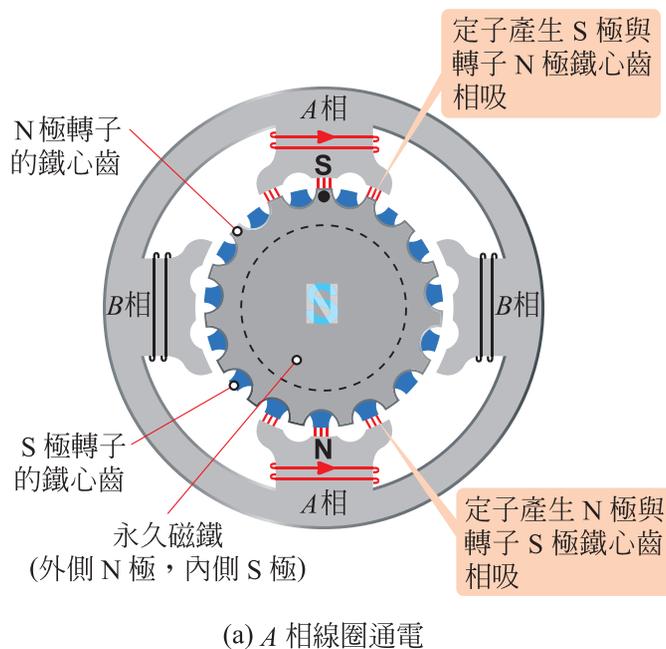
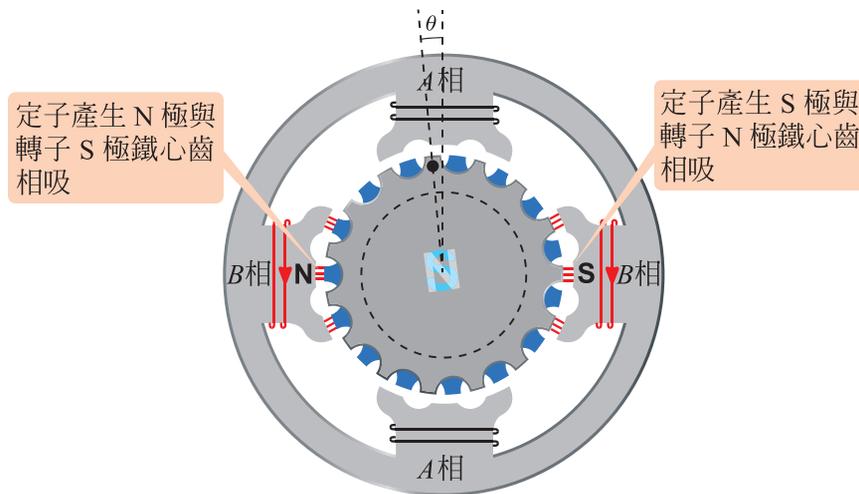


圖 12-5 混合型步進電動機的動作原理



將 A 相繞組斷電，改將 B 相繞組通電，定子左方產生磁極 N 將轉子內側的 S 極鐵心齒吸引過來，定子右方產生磁極 S 將轉子外側的 N 極鐵心齒吸引過來；整個轉子以逆時針方向偏轉 θ 度，停在圖 12-5(b) 的位置。之後將 A 相與 B 相繞組分別改以反向激磁，轉子就能持續以逆時針方向轉動。

混合型的優點在於步進角度小，精確度高，轉矩大；但是相較而言構造複雜、價格高。



(b) B 相線圈通電

圖 12-5 混合型步進電動機的动作原理 (續)

隨堂練習

- () 1. 下列何者不是步進電動機之特性？
- (A) 旋轉總角度與輸入脈波總數成正比
 - (B) 轉速與輸入脈波頻率成正比
 - (C) 靜止時有較高之保持轉矩
 - (D) 需要碳刷，不易維護。
- () 2. 一部四相步進電動機，轉子轉一圈須走 48 步，且每秒可走 960 步，則電動機每分鐘轉速為何？ (A)900 rpm (B)1000 rpm (C)1100 rpm (D)1200 rpm。

12-2 伺服電動機 (servo motor)

一、特性

傳統電動機在起動時、轉速改變或是停止時，受到慣性影響會有一段反應時間。爲了達到快速響應、精準控制以及輸出穩定的需要，如圖 12-6 將電動機軸端安裝感測電路監控運轉狀態，透過轉換電路將資料提供給比較電路，比較電路依據電動機狀態與目標值進行比較後，再通知驅動電路輸出適當的電源型態給電動機，讓電動機依據輸入目標值穩定運轉，並且持續修正，這種系統稱爲閉回路控制系統 (close-loop control system)。

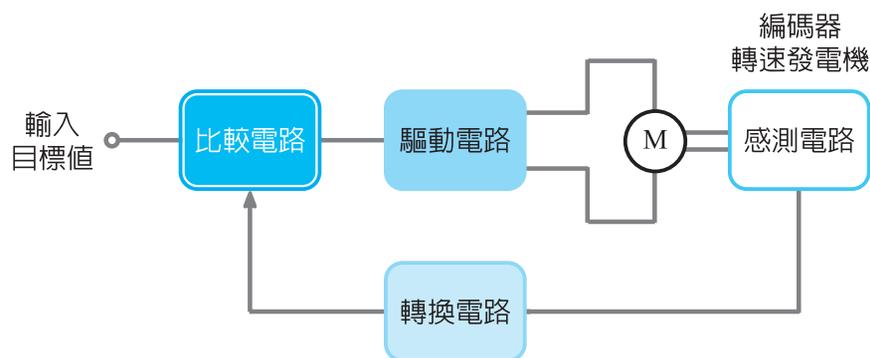


圖 12-6 閉回路控制系統

經由閉迴路控制方式達到快速回應指令，並且控制位置、速度或加速度的系統就稱爲伺服系統 (servo system)。特別設計用於伺服系統的電動機就稱爲伺服電動機。相較傳統電動機而言，伺服電動機必須具備的特點包括：

1. 起動轉矩大：以降低起動時間，因應頻繁的起動與停止需要。
2. 轉子慣性小：轉子設計成細長型，以縮短反應時間，因應急加速及急減速以及正反轉需要。
3. 良好的運轉特性：低電壓即可運轉，轉速 – 電壓特性以及電流 – 轉矩特性爲直線。
4. 損失小、耐熱性佳：因應頻繁的轉速變化所產生的熱量。

二、種類

伺服電動機依據構造可分為直流伺服電動機 (DC servo motor) 與交流伺服電動機 (AC servo motor) 兩類，依據用途又會有不同的設計，其分類方式如圖 12-7 所示。

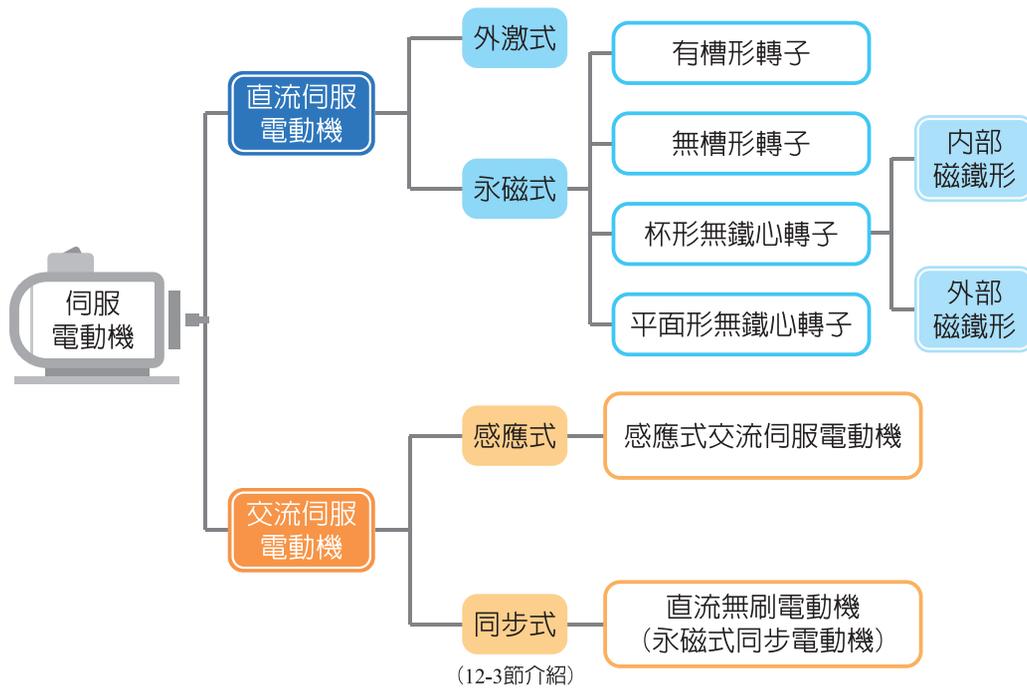


圖 12-7 伺服電動機的分類

(一) 直流伺服電動機 (有刷式)

1. 定子構造

直流伺服電動機的定子磁場來源分為永久磁鐵式與電磁鐵兩類。隨著磁性材料進步，目前多數直流伺服電動機的定子都採用永久磁鐵，以符合體積小、反應快的要求。

2. 轉子構造

轉子裝有電樞繞組與換向器，透過電刷通電後，與定子磁場作用產生轉矩。轉子依據設計方式分為下列幾種：

- (1) 有槽形轉子：與傳統直流電動機相同，如圖 12-8(a) 將電樞繞組埋入轉子鐵心槽內並與軸端換向器連接。由於可容納導體多，磁通密度高，因此轉矩大。但是**導體集中放在槽內造成作用力不均勻，轉矩有脈動現象；另外線槽間的空隙會干擾主磁場，造成低電壓時發生顫轉的現象。**

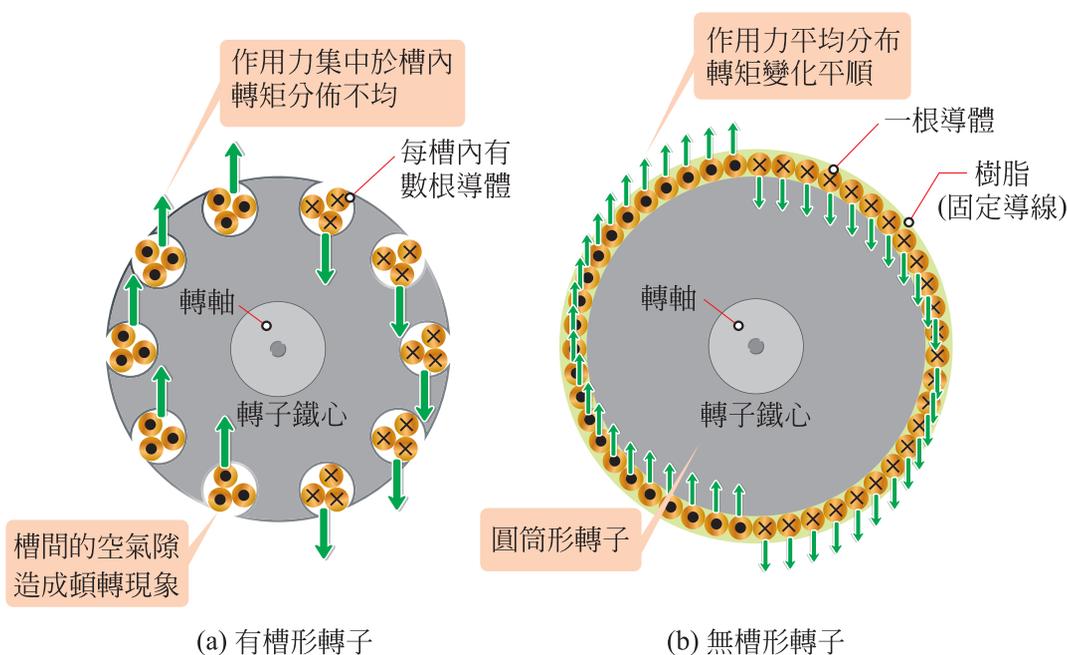


圖 12-8 直流伺服電動機

- (2) 無槽形轉子：參考圖 12-8(b)，鐵心沒有凹凸的線槽，電樞繞組直接纏繞在光滑的圓筒型鐵心上，再用環氧樹脂 (epoxy) 將繞組固定，繞組引接線則與軸端的換向器連接。

無槽形轉子可以降低運轉時的轉矩脈動與噪音現象，低速運轉也很順暢，但由於**磁通密度較低，轉矩較小**，適用在小型、輕量化的場所



(3) 杯形無鐵心轉子：爲了提升反應速度，會將轉子鐵心去除，直接利用樹脂將電樞繞組固定成杯形並與轉軸連接，稱爲無鐵心 (coreless) 型。依據構造，無鐵心轉子又可以分成內部磁鐵型 (適合小型化) 與外部磁鐵型 (加大磁鐵以增加反應速度) 兩種，外觀如圖 12-9。

無鐵心轉子的優點在於慣性小，反應快、效率高，適合做成超小型的馬達，缺點則是轉矩低，製造成本高。

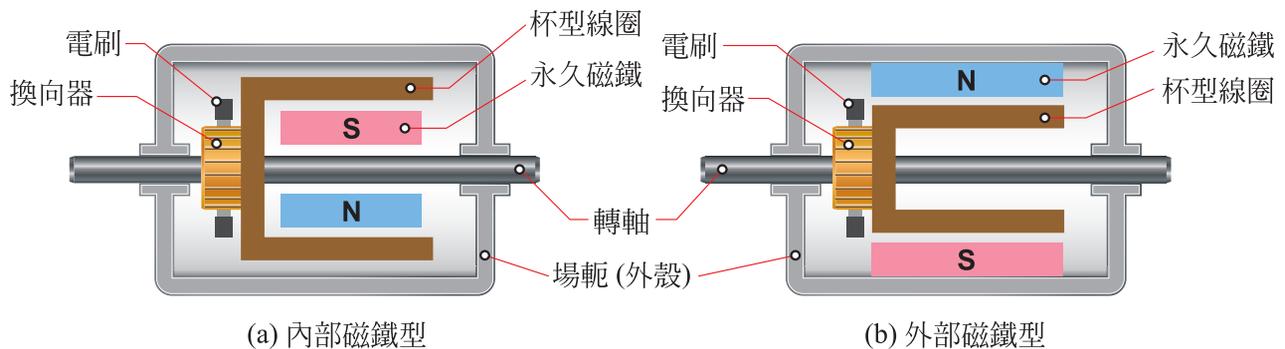


圖 12-9 直流伺服電動機 (杯形無鐵心轉子)

(4) 平面型無鐵心轉子：轉子的電樞導體類似印刷基板的方式，在絕緣材料的表面，利用沖壓或是蝕刻的方式將導電材料附著上去，因此也稱爲印刷馬達。其外觀如圖 12-10。由於定子與轉子均爲平面，空氣隙可以設計的很窄，以提升效率，適合做成超薄型馬達使用。

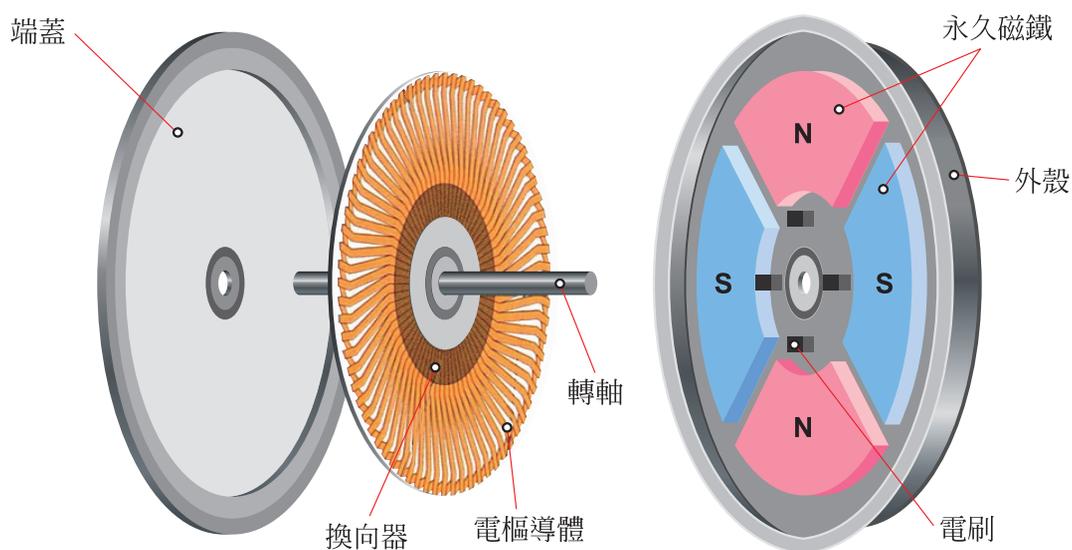


圖 12-10 直流伺服電動機 (平面型無鐵心轉子)

3. 控制方式

直流伺服電動機的轉子類型很多，但大部分的定子都是採用永久磁鐵，控制方式參考如圖 12-11(a)，主要利用脈波寬度調變 (PWM) 的方式控制電樞電壓，當電樞電壓越高時，電動機的轉速與轉矩成正比增加，其變化如 12-11(b)，當電源極性 (V_a) 改變，電樞電流 (I_a) 反向，電動機就會反轉。

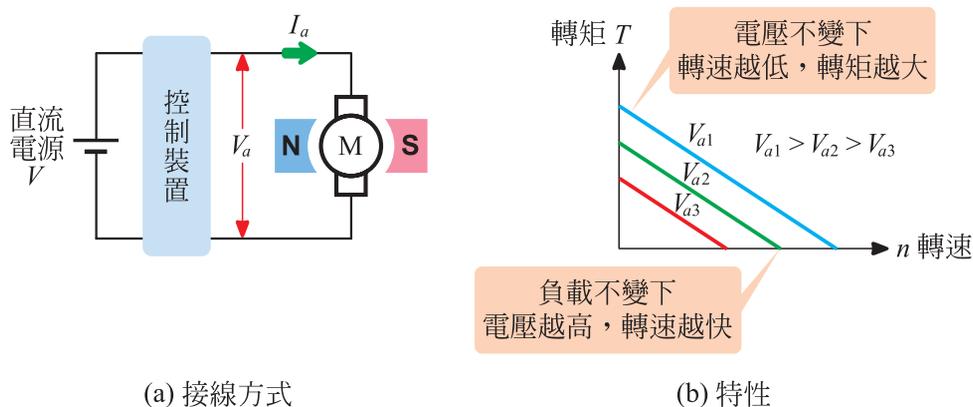


圖 12-11 直流伺服電動機的控制

4. 特點

直流伺服電動機的優點包含構造簡單、驅動容易、反應佳、容易輕量化。最大缺點則是電刷有磨損及火花問題，需要定期維護、保養，運用於中、小功率 (1 W ~ 100 W) 之伺服系統。

(二) 交流伺服電動機

交流伺服電動機利用定子電樞繞組通電後產生旋轉磁場來牽引轉子旋轉，因此沒有電刷與換向器；透過變頻器改變電源頻率就可以控制電動機轉速；依據動作原理分為感應式與同步式兩類。本小節先說明感應式兩相伺服電動機的原理，至於同步式的動作原理與直流無刷電動機相同，將於下一節介紹。

圖 12-12 為兩相伺服電動機，構造與單相永久電容式感應電動機相似：

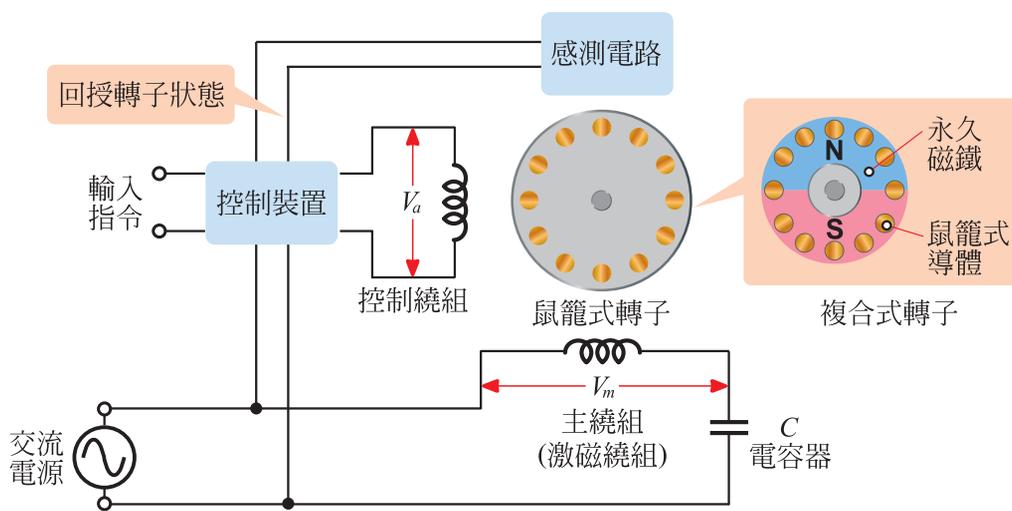


圖 12-12 兩相同步電動機

1. 定子構造

裝有二組互隔 90° 電機角的繞組，其中：

- (1) 主繞組 (main winding)：又稱為激磁繞組 (exciting winding) 或固定繞組 (fixed winding)。主繞組經由電容器或直接與交流電源連接，通電後持續產生脈動磁場。
- (2) 控制繞組 (control winding)：接於伺服控制裝置之輸出端。控制裝置依據輸入指令與感測電路回授的轉子狀態，將交流電源處理後再提供給控制繞組。

2. 轉子構造

兩相同步電動機的轉子主要分為：

- (1) 感應式：採用細長型鼠籠式轉子或是低慣性的杯形無鐵心轉子。轉子採用高電阻材料製成可以避免伺服電動機在單一繞組供電下的轉動現象。
- (2) 複合式：轉子內層採用永久磁鐵，外層為鼠籠式導體的複合式設計，利用外層鼠籠式導體產生起動轉矩後，內層的轉子永久磁鐵再與定子磁場相吸，使電動機以同步轉速持續轉動。

3. 控制方式

兩相伺服電動機的控制方式主要分為：

- (1) 電壓控制法：主繞組與控制繞組電壓相位互隔 90° 電機角。改變控制繞組電壓 (V_a) 值，使轉速與轉矩成正比增加，當控制繞組電壓為零 ($V_a = 0$) 時，電動機停止；控制繞組電壓反向時，電動機反轉。此種方式電路設計簡單，但是易受雜訊干擾。
- (2) 相位控制法：主繞組與控制繞組電壓大小不變。改變控制繞組電壓相位超前或是落後主繞組，可以控制轉向；改變相位差可以控制轉速與轉矩。
- (3) 混合控制法：又稱電容控制法，利用激磁繞組上的串聯電容器分相，不需要複雜的移相裝置，構造簡單、成本低，為目前最常使用的方式。

4. 特點

兩相伺服電動機的構造簡單、耐用，加上沒有電刷與換向器，因此摩擦小、故障少，缺點則是控制方法較直流伺服電動機複雜，加上轉子電流產生銅損而容易發熱，大多運用於 30W 以下的小功率之伺服系統。

隨堂練習

- () 1. 伺服電動機必須具備的特點，下列何者錯誤？
(A) 轉子慣性小 (B) 起動轉矩小 (C) 可正反轉 (D) 轉速與電壓成正比。
- () 2. 直流伺服電動機的轉向，是由下列何者因素所決定？
(A) 控制信號的頻率 (B) 控制信號的電壓值
(C) 控制信號的電流方向 (D) 控制信號的電流大小。
- () 3. 有關二相伺服馬達的敘述，下列何者錯誤？
(A) 激磁繞組直接或經由電容器接於交流電源
(B) 控制繞組連接於伺服放大器輸出端
(C) 轉向由兩繞組電流相位差決定
(D) 定期保養電刷，可減少磨損。



12-3 直流無刷電動機

一、特性

(一) 基本原理

傳統直流電動機構造簡單、性能佳，最大缺點就是電刷與換向器間有摩擦與火花，除了需要保養、更換外，還會產生雜訊干擾；對於使用直流電源的資訊產品（手機、筆記型電腦等）並不適合。

隨著科技進步，1960 年代研發出**直流無刷電動機 (brushless DC motor, BLDC)**，基本原理利用**霍爾效應 (Hall effect) 感測器**或是**光耦合器 (optical coupler)**監控轉子位置，控制器再將直流電源轉換成可變頻率之交流電源提供給定子繞組，驅動轉子運轉。由於利用電子元件取代傳統直流電動機的電刷與換向器，因此沒有摩擦，損失小、效率高，普遍應用於資訊設備（如風扇、硬碟）。

(二) 霍爾效應

1879 年美國物理學家霍爾 (Hall) 就發現當電流 (I) 通過位於磁場 (B) 中的導體時，磁場會對導體內的電子產生與電流方向垂直的作用力，使得導體的另外兩端產生電動勢 (E)，其關係如圖 12-13(a)。磁通方向改變時，電動勢方向也跟著轉變。

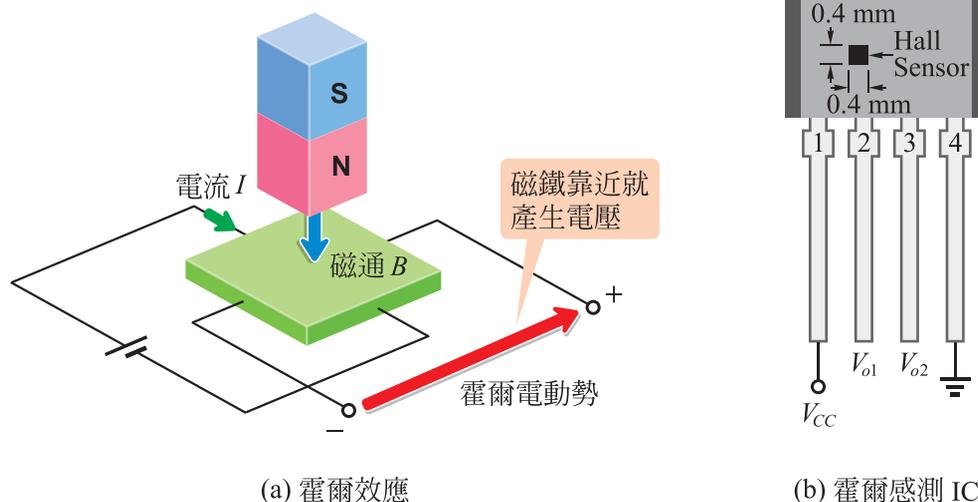


圖 12-13 霍爾效應與感測元件

半導體問世後，將霍爾感應器與驅動電路包裝成圖 12-13(b) 的積體電路 (IC)，當 IC 內部的霍爾感測器 (Hall Sensor) 偵測到磁通方向改變，輸出端的電位 (V_{o1} 、 V_{o2}) 就會改變，使用非常方便。

二、構造

(一) 定子構造

圖 12-14 是一部直流無刷式電動機的外觀，外圈的定子構造類似三相交流電機，裝有三組互隔 120 度電機角的線圈；外部直流電源經過驅動電路並配合霍爾感測器，將定子三組線圈依序通電以產生旋轉磁場，吸引轉子永久磁鐵持續以同步轉速旋轉。



圖 12-14 直流無刷式電動機外觀

(二) 轉子構造

無刷式電動機依據轉子安裝方式，分為下列兩種型式：

1. 內轉子型 (Inner rotor)

構造如圖 12-15(a)，由永久磁鐵構成的轉子放在電動機內部，定子的電樞線圈繞在外圍。由於慣性小，控制性能佳，適合用於頻繁的定位控制。

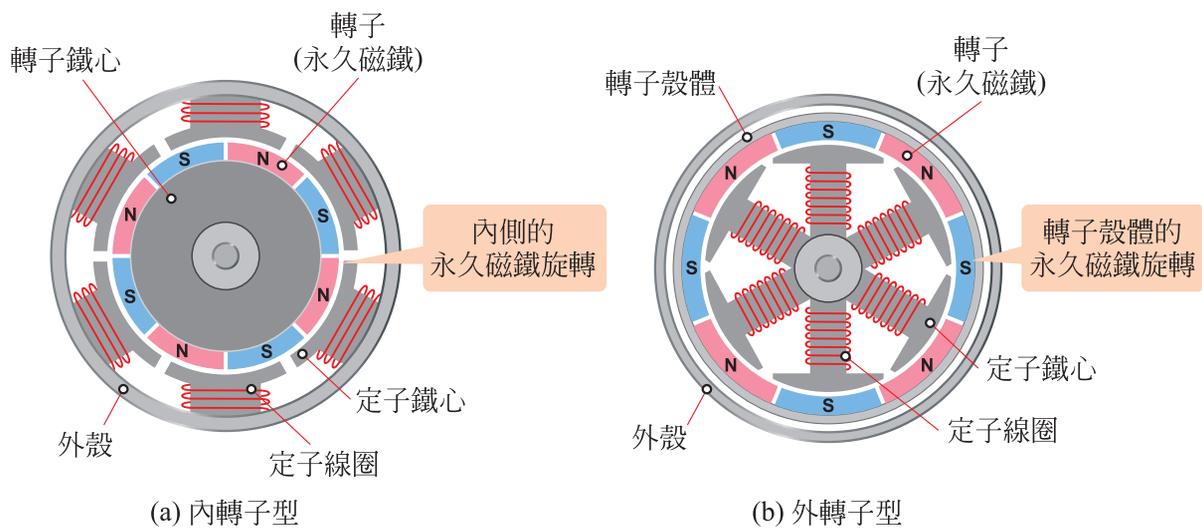


圖 12-15 無刷式電動機の種類

2. 外轉子型 (Outer rotor)

構造如圖 12-15(b)，定子線圈固定在電動機的中央基座上，由永久磁鐵構成的轉子放在電動機外圍。由於轉子直徑大，慣性大，速應性較差，適合用於需要定速的場所。

三、控制方式

無刷式電動機無論是內轉子型或外轉子型，基本控制方式都相同，圖 12-16(a) 為兩相內轉子式直流無刷電動機的控制電路，

1. 當轉子磁軸與霍爾感測器 (HG) 平行時，如圖 12-16(b)，霍爾感測器感測到 S 極磁通，輸出端 V_{o1} 產生正電壓，使得電晶體 Q_1 導通進入飽和區，電流 I_1 通過電動機的定子左側線圈，定子左側產生 S 極，將轉子的 N 極吸引過來，整個轉子開始以逆時針方向旋轉。
2. 當轉子轉到磁軸與霍爾感測器垂直時，霍爾感測器的兩個輸出端沒有電壓差，定子沒有產生磁極，稱為死點 (dead point) 或是禁帶 (forbidden band)，轉子必須依靠慣性才能越過此位置。
3. 當轉子 N 極逐漸靠近霍爾感測器，如圖 12-16(c)，輸出端 V_{o2} 產生正電壓，使得電晶體 Q_2 導通進入飽和區，電流 I_2 通過電動機的定子右側線圈，定子右側產生 S 極，將轉子的 N 極吸引過來，整個轉子繼續以逆時針方向旋轉。

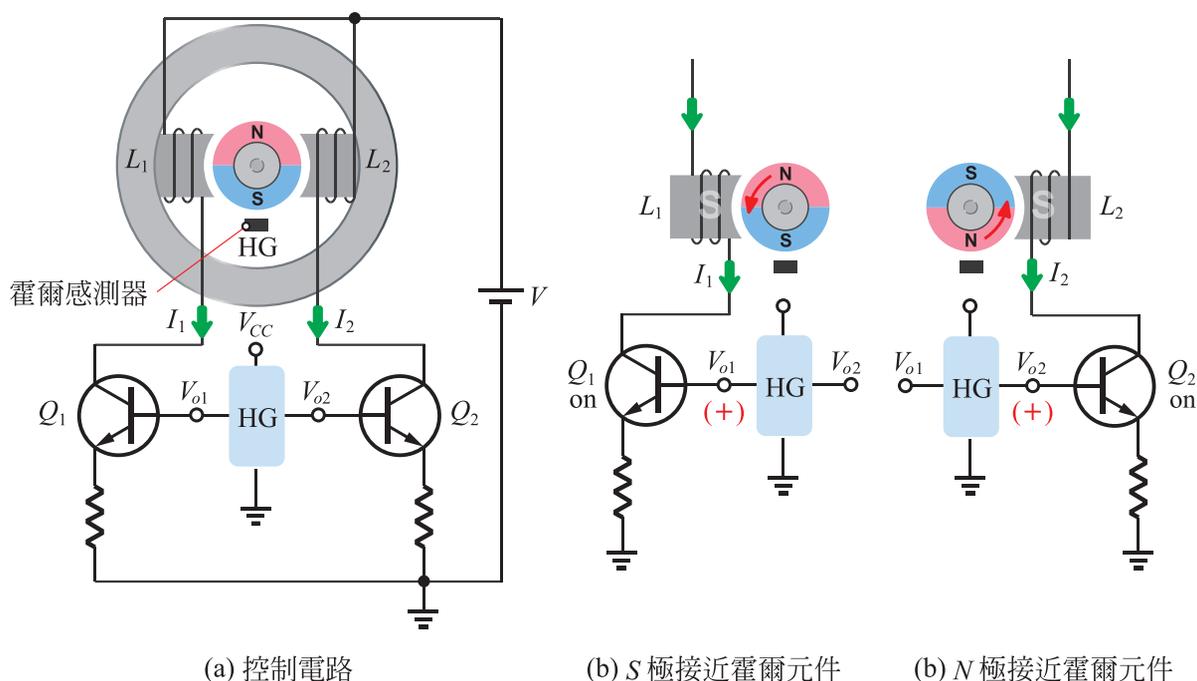


圖 12-16 兩相直流無刷電動機的控制方式

兩相直流無刷電動機，如果轉子位於死點位置會無法起動。為了解決此問題，可以增加定子線圈與霍爾感測器的數目，除了讓電動機在任何位置都可以起動外，也可以進行精準的控制。

四、特點與應用

直流無刷電動機將磁場 (永久磁鐵) 置於轉子，使用時必須搭配位置感測元件以及變頻器等驅動電路才能正常工作；相較於傳統直流電機而言，雖然控制系統較為複雜，但是可以避免電刷與換向器間的磨損與火花，使壽命變長、體積變小。另外，依據轉子位置適時供電給定子線圈產生磁場的驅動方式，也能提升效率與轉矩。

隨著材料與電力電子驅動技術的進步，目前各式無刷電動機經常運用於高性能伺服應用場合，圖 12-17 的設計方式稱為永磁式同步電動機 (permanent-magnet synchronous motor, PMSM) 或稱為永磁式交流伺服馬達 (PM ac servo motor)。

定子鐵心繞有三相電樞繞組，轉子採用永久磁鐵，編碼器 (encoder) 與電動機同軸安裝，將電動機轉子狀態以數位信號方式回授給控制器。控制器依據輸入命令與電機狀態進行判斷，再由功率驅動器將三相電源轉變成適當的頻率與電壓給電樞繞組，電樞繞組產生適切的旋轉磁場牽引轉子以同步轉速持續轉動。

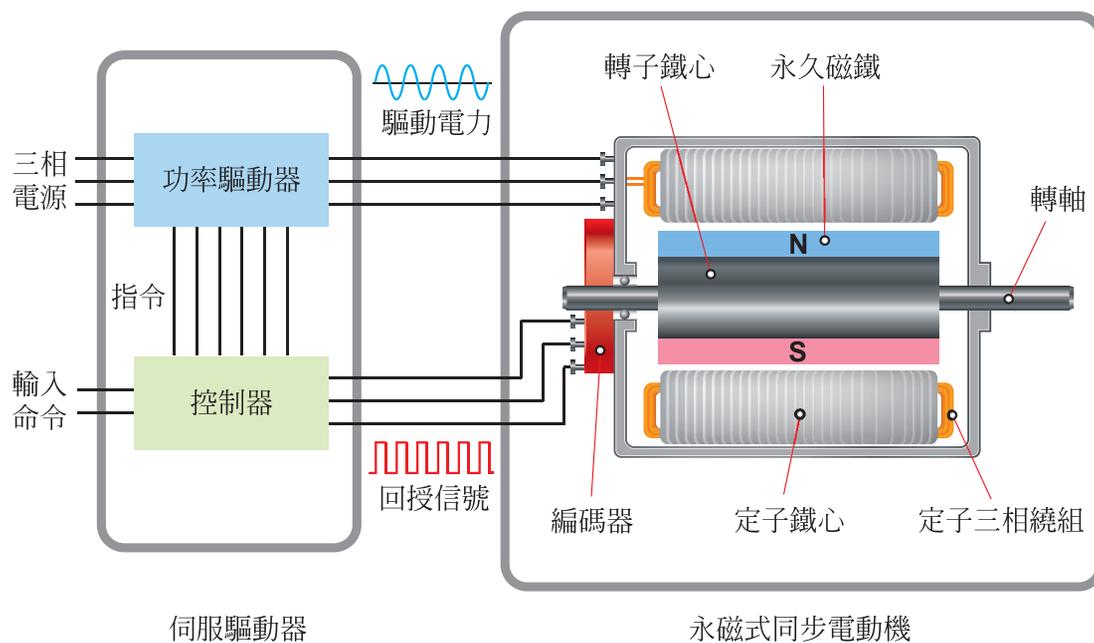


圖 12-17 永磁式同步電動機與驅動控制系統

無刷式電動機採用閉迴路控制方式，因此響應速度快，可以在短時間內達到高速旋轉，加上速度控制範圍寬廣，目前在電腦控制數值工具機 (CNC Machine) 或工業機器人等運用非常普遍。

隨堂練習

- () 1. 相同容量下，若以保養容易、高效率、體積小等因素為主要考量時，下列電動機何者最適宜？ (A) 直流分激電動機 (B) 直流串激電動機 (C) 直流無刷電動機 (D) 感應電動機。
- () 2. 有關直流無刷電動機的敘述，下列何者錯誤？ (A) 利用居禮元件檢測位置 (B) 利用固態開關元作使繞組中電流換向，不必用電刷之直流機 (C) 轉子構造通常為永久磁鐵 (D) 無火花、雜訊小。

12-4 輪轂馬達原理

目前直流無刷電動機的重要用途之一就是輪轂馬達 (hub motor)，它的最大特點就是將動力、傳動和制動裝置都整合到輪轂內，由馬達直接驅動輪胎，可大幅簡化電動車輛的機械結構、提升傳動效率。

一、輪轂馬達的種類

輪轂馬達依據轉子型式分成：

1. 外轉子式：構造如圖 12-18(a)，內圈為定子裝有電樞繞組及霍爾元件後固定於輪軸，電樞繞組通電後產生旋轉磁場牽引外圈轉子的永久磁鐵。再將轉子與車輪如圖 12-18(b) 直接組合後，轉子轉速就等於輪胎轉速，因此結構簡單、響應速度快、效率高、軸向尺寸小。最高轉速約在 1000 ~ 1500 rpm 間。



圖 12-18 外轉子式輪轂馬達
(圖片來源：E-bikekit)



2. 內轉子式：構造如圖 12-19，馬達的外圈為定子裝有電樞繞組及霍爾元件，通電後產生磁場牽引內圈轉子的永久磁鐵，再經由行星齒輪組將動力傳至輪轂內齒環後才與車輪組合，由於透過齒輪減速，構造複雜、效率稍低；但是馬達轉速可達 10000 rpm，具有功率密度比高、噪音小等優點。

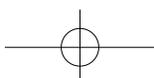


圖 12-19 內轉子式輪轂馬達
(圖片來源：E-bikekit)

二、輪轂馬達的驅動

無論內轉子與外轉子的輪轂馬達，驅動原理都與直流無刷電動機相同。以圖 12-20(a) 外轉子式輪轂馬達為例，定子三相電樞繞組及三個霍爾元件 (H1 ~ H3)，各自互隔 120 度。轉子採用兩極永久磁鐵。

要使輪轂馬達轉動，首先控制電路必須根據霍爾元件判斷轉子位置，此位置訊號經過放大及適當的控制電路判斷後，提供觸發電流給特定一對功率晶體 (Q1 ~ Q6) 使其導通，讓電流經過電樞繞組產生磁場以牽引轉子永久磁鐵轉動。



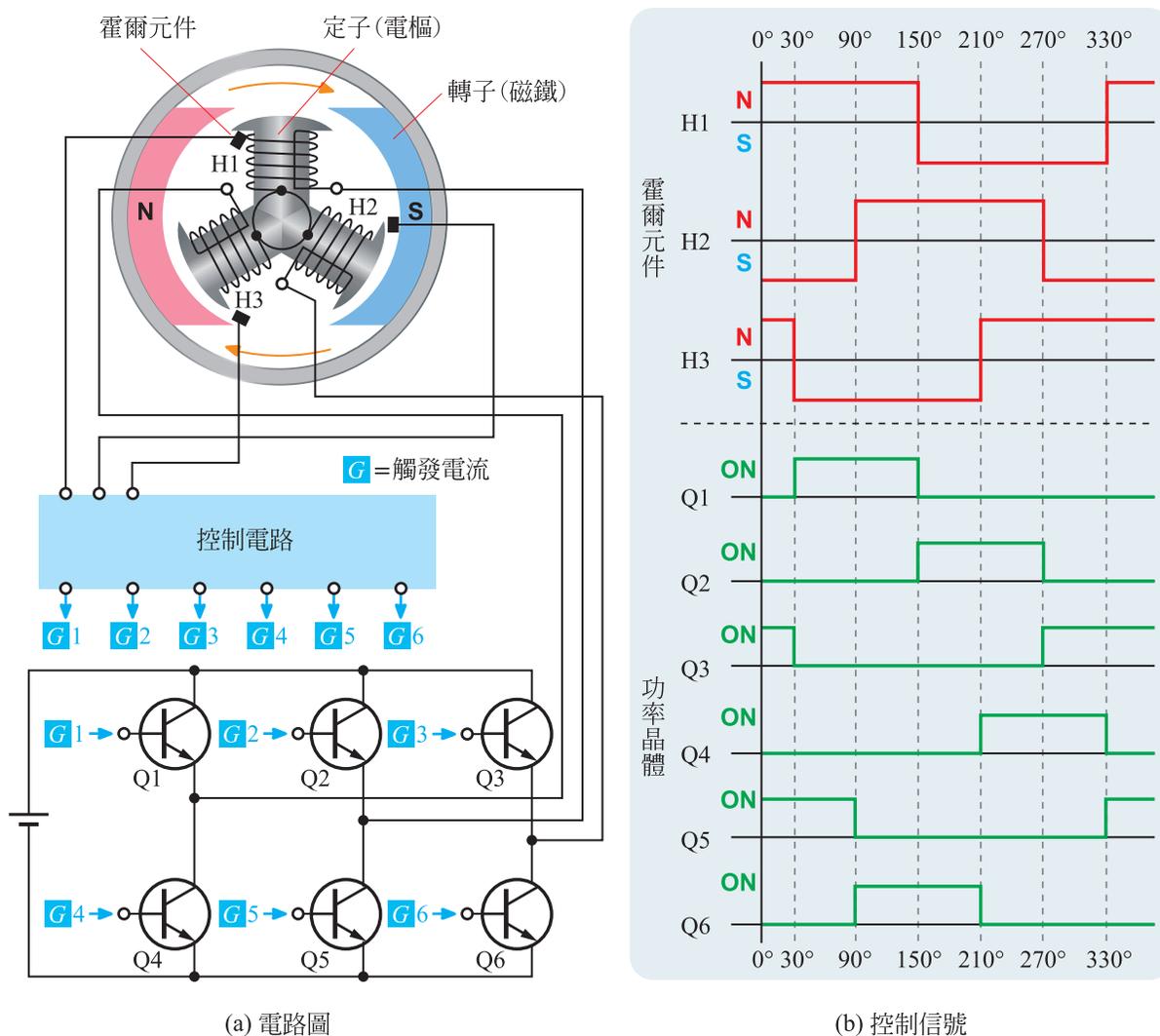


圖 12-20 輪轂馬達驅動電路

以圖 12-20 的位置為例，H1 與 H3 感應到轉子 N 極輸出高態，H2 感應到轉子 S 極輸出低態，此時控制電路提供觸發電流給功率晶體 (Q3&Q5) 使其導通。定子電樞繞組產生之磁極方向如圖 12-21 所示，右側為 N 極、上方為 S 極，透過同極相斥、異極相吸之特性，使得轉子磁鐵朝順時針方向旋轉。



之後控制電路依據圖 12-20(b) 所列，配合霍爾元件所提供的位置信號，依序將功率晶體 (Q1-Q5) → (Q1-Q6) → (Q2-Q6) → (Q2-Q4) → (Q3-Q4) 輪流導通，其結果如圖 12-22 所示，可使轉子持續順時鐘旋轉，直到控制電路關閉全部的功率晶體，則馬達停止。若是將控制信號反向開啓，則馬達反轉。當馬達轉動後控制電路可以透過導通時間長短，利用脈波寬度調變 (PWM) 方式就可以控制馬達轉速。

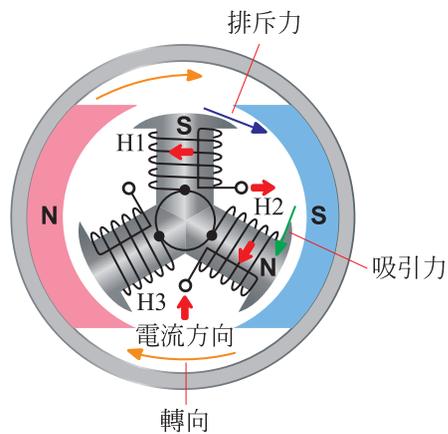


圖 12-21 輪轂馬達的起動

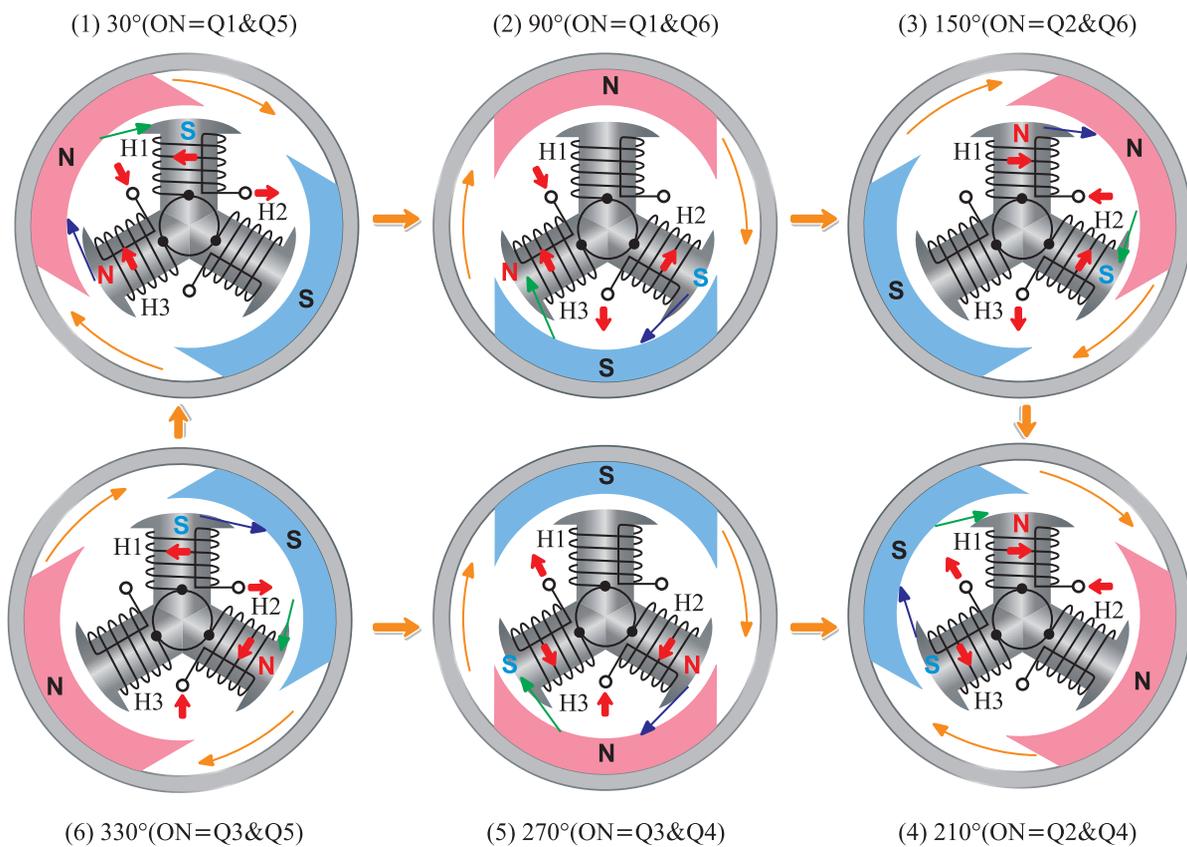
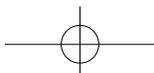


圖 12-22 輪轂馬達的旋轉



12-5 線性電動機 (linear motor)

一、基本原理

傳統電動機是以圓周運動方式提供機械能，對於需要直線移動（例如自動門、工作平台）的場所，必須透過齒輪與齒條等機械方式轉換。因此研發出可以直線運動的電動機，稱為線性電動機，其基本原理如圖 12-23。

線性電動機的基本原理如圖 12-23 所示，將傳統電動機切開後，延展成直線而成。原本定子繞組通電後產生的旋轉磁場會轉為水平方向的移動磁場，並使轉子金屬（或稱移動板）感應電流，產生直線驅動轉矩，使移動板隨磁場方向水平移動。

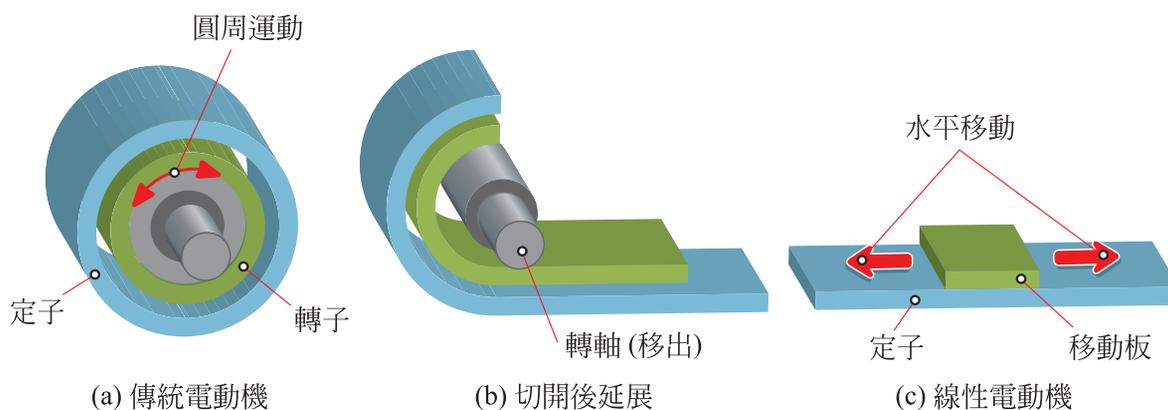


圖 12-23 線性電動機基本原理

二、種類

線性電動機是將傳統電動機延展而來，依照使用電源可以分成三相線性電動機與直流線性步進電動機兩大類：

(一) 三相線性電動機

1. 移動磁場的產生

三相感應電動機定子鐵心與繞組展開呈直線後，將圖 12-24(a) 的三相電流加入定子 (或稱為一次側) 的三組繞組，隨著定子繞組內的電流變化，如圖 12-24(b) 可以看出三組繞組合力產生向左的移動磁場。

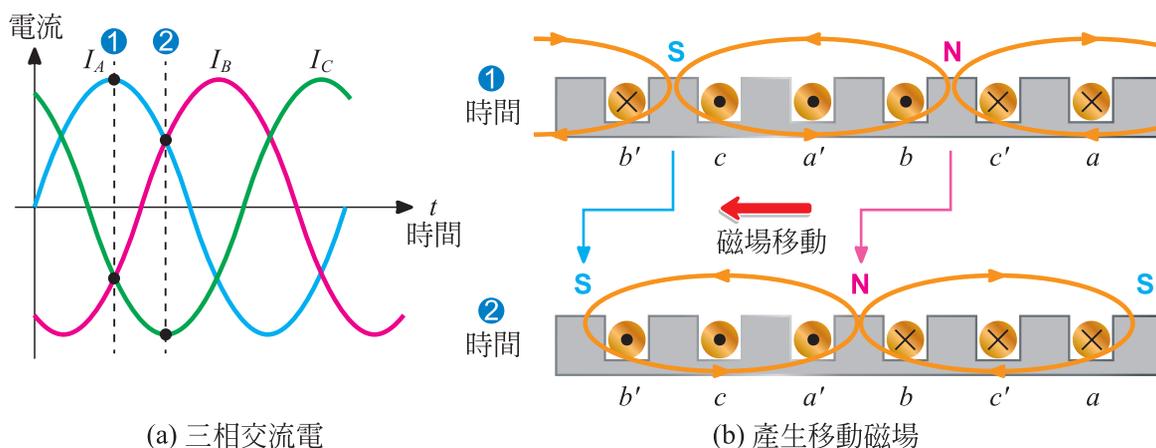


圖 12-24 三相交流電產生的移動磁場

傳統交流 P 極電機外加電源頻率 f 後，同步轉速為 $n_s = \frac{120f}{P} (\text{rpm}) = \frac{2f}{P} (\text{rps})$

由於線性電動機是以直線運動，因此磁場的移動改用同步速率描述較為恰當，假設原本定子內側半徑為 $r(\text{m})$ ，將圓展開後之圓周長為 $2\pi r(\text{m})$ ，因此同步速率為：

$$v_s = \frac{2f}{P} \times 2\pi r \quad (12-2)$$

定子有 P 極，磁極間的距離 (極距) $Y_p = \frac{2\pi r}{P} (\text{m})$ ，將其帶回公式 12-2，可得同步速率為：

$$v_s = 2Y_p \times f \quad (12-3)$$

v_s ：同步速率 (m/sec) Y_p ：極距 (m/極) f ：頻率 (Hz)

依據公式 (12-3) 可知，線性電動機的移動速率與極數 (P) 無關。

2. 轉子的移動方式

- (1) 線性感應電動機：構造如圖 12-25，若定子繞組通電後產生向左的移動磁場。定子上方的移動板又稱為反作用板 (reaction plate) 或是二次側，採用鋁或銅的非磁性導體以避免跟定子產生電磁吸引力。安裝於板內的導體受到定子磁場切割產生渦流，使得定子與移動板間產生相對作用力，造成移動板循著移動磁場向左移動；反之若是移動板固定不動，定子就會向右移動。

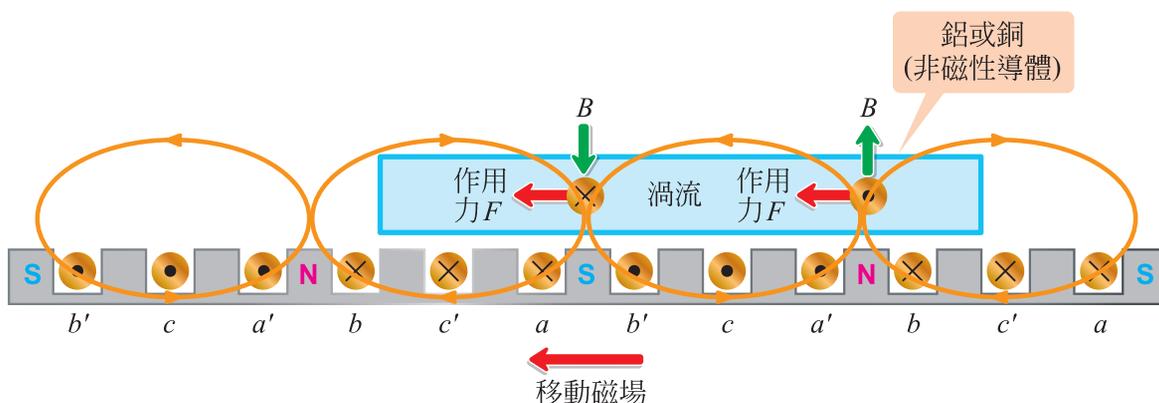


圖 12-25 線性感應電動機

線性感應電動機的原理與感應電動機相同，因此移動板實際移動速率 v 會略低於定子磁場的同步速率 v_s ，轉差率為：

$$S = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (12-4)$$

S ：轉差率 v_s ：同步速率 (m/sec) v ：移動板移動速率 (m/sec)

- (2) 線性同步電動機：構造如圖 12-26，將定子上方的移動板改用永久磁鐵取代。磁鐵 S 極受到定子產生的 N 極吸引而向左方移動，磁鐵 N 極同樣受到定子的 S 極吸引也向左移動。永久磁鐵會在移動磁場稍微後方一些的位置以同樣的速度向左移動。

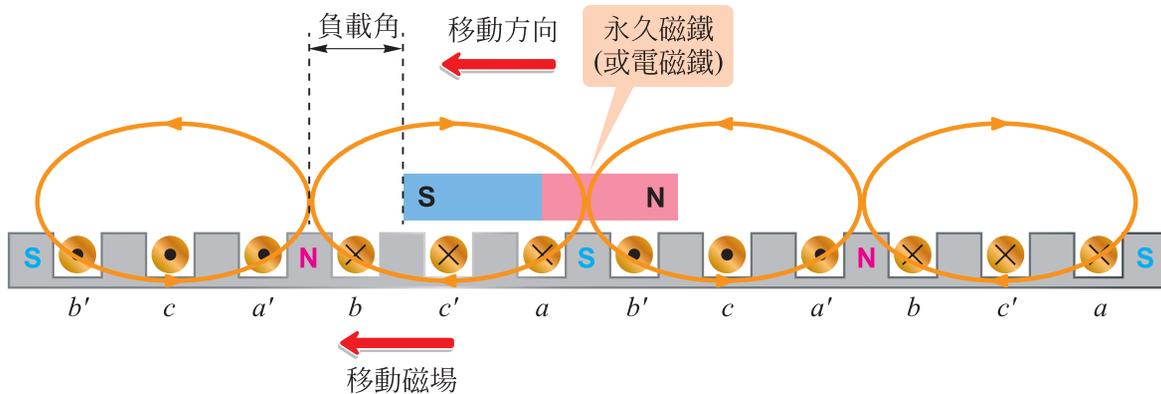


圖 12-26 線性同步電動機

線性同步電動機的功率因數與效率都比線性感應電動機佳，**利用變頻器改變電源頻率就能使移動板以不同速度移動**。將線性同步電動機應用在磁浮式鐵路的基本原理如圖 12-27，列車內部所搭載的超傳導線圈形成電磁鐵，再利用地上的推進線圈與磁浮導引線圈，使車身呈現磁浮高速行駛狀態，但是磁浮式電車由於定子與轉子都必須激磁，加上複雜的控制電路，投資成本極高。

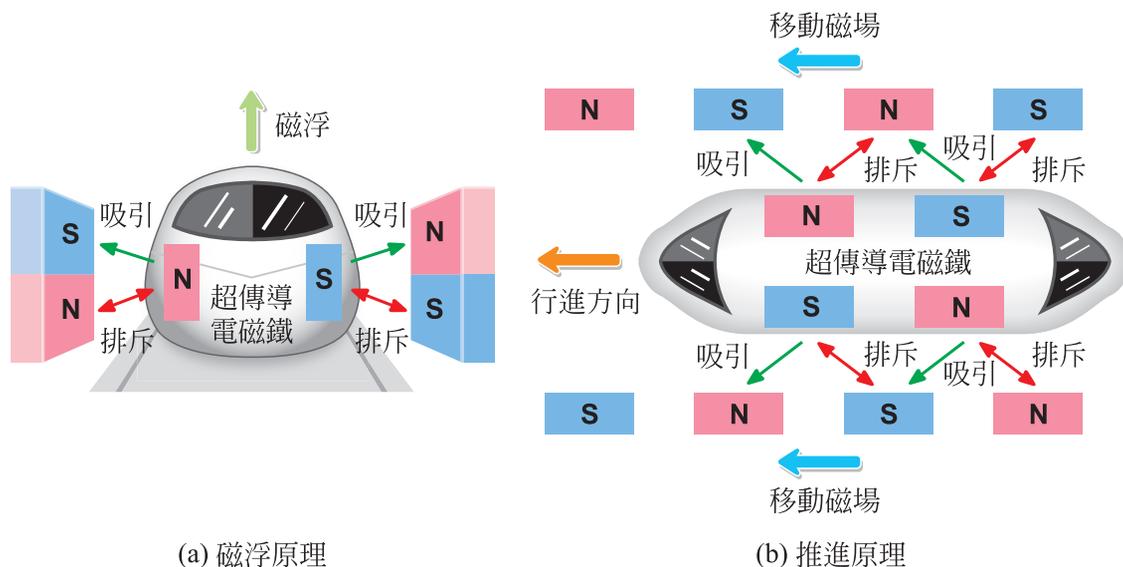


圖 12-27 磁浮式電車基本原理

(3) 直流線性步進電動機：構造如圖 12-28，如同將磁阻型步進電動機展開而成。當 1 號線圈激磁時，所產生的磁通經過凸極鐵心形成通路，移動板停留在圖 12-28(a) 的位置。改將 3 號線圈激磁時，凸極鐵心凸極受到磁通吸引，向右移動 1/2 齒距停留在圖 12-28(b) 的位置。

線性步進電動機的控制方式與一般步進電動機相同，改變繞組的激磁順序可以改變移動方向。控制脈波信號頻率可以改變移動速度。

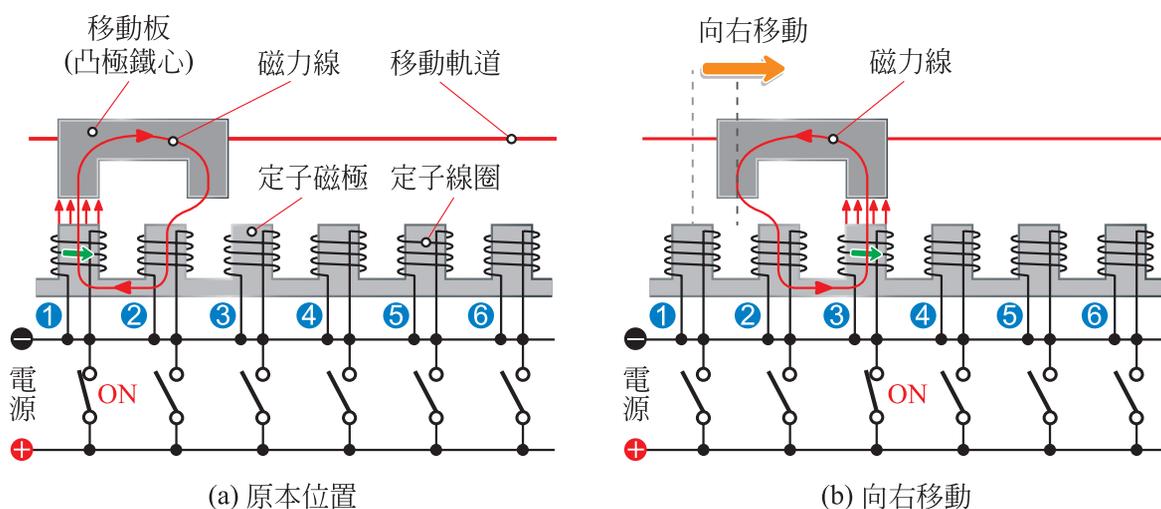


圖 12-28 直流線性步進電動機

三、特點

線性電動機是由旋轉電機演變而來，用電磁效應可以產生無摩擦的直線驅動力，由於不需要傳動機構，因此整個系統精密度提高、振動與噪音減少。應用在磁碟機讀取頭、繪圖機、電動門、電梯與磁浮列車等。

隨堂練習

- () 1. 有一個 16 極線性感應電動機，長度為 8 公尺，以頻率 50 Hz 激磁，已知移動板的移動速率 $v = 40 \text{ m/sec}$ ，則轉差率為 (A)0.1 (B)0.2 (C)0.4 (D)0.6。
- () 2. 下列何者可以用來控制線性脈波電動機之轉速？

(A) 改變輸入脈波電壓大小	(B) 改變輸入脈波頻率
(C) 改變輸入脈波相位	(D) 改變輸入脈波功率。

自我評量

一、選擇題

12-1 () 1. 下列何種電動機可用開迴路控制方式來進行精密的定位控制？

- (A) 步進電動機 (B) 直流伺服電動機
(C) 蔽極式感應電動機 (D) 交流串激電動機。

() 2. 步進電動機不適合使用於

- (A) 工具機定位控制 (B) 電動汽車驅動
(C) 繪圖機控制 (D) 印字機控制。

() 3. 步進電動機的轉速，是由下列何者因素決定？

- (A) 激磁脈波的頻率 (B) 激磁脈波的電壓值
(C) 激磁脈波的電流值 (D) 負載量。

() 4. 步進電動機每次激磁，轉動半個步進角，係採用下列何種激磁方式？ (A) 1 相激磁 (B) 2 相激磁 (C) 1-2 相激磁 (D) 交流激磁。

() 5. 某 VR 型步進電動機，定子為 3 相，轉子有 8 齒，若採 2 相激磁，則輸入 12 個激磁脈波，該步進電動機將轉動多少角度？

- (A) 45° (B) 90° (C) 135° (D) 180° 。

12-2 () 6. 有關直流伺服電動機的敘述，下列何者錯誤？

- (A) 定子大多採用永久磁鐵 (B) 電樞繞組安裝在轉子
(C) 常用來作為位置控制 (D) 多採開迴路控制系統。

() 7. 直流伺服電動機的轉向，是由下列何者因素所決定？

- (A) 電源頻率 (B) 電源極性 (C) 電壓大小 (D) 電流大小。

() 8. 直流伺服電動機的轉速，是由下列何者所決定？

- (A) 電源頻率 (B) 電源極性 (C) 電壓大小 (D) 負載量。

() 9. 有關二相伺服馬達的敘述，下列何者錯誤？

- (A) 激磁繞組直接或經由電容器接於交流電源
(B) 控制繞組連接於伺服放大器
(C) 轉速與電壓平方成正比
(D) 轉向由兩繞組電流相位差決定。

- () 10. 若交流伺服電動機的轉速由變頻器來作控制，則電動機轉速與變頻器輸出頻率之關係為何？
(A) 正比 (B) 反比 (C) 平方正比 (D) 平方反比。
- () 11. 伺服電動機與傳統電動機之不同點，下列何者錯誤？
(A) 速應性極高
(B) 起動轉矩大及線性控制特性
(C) 轉軸細長，重量輕
(D) 電機具有高電感性，以減低時間常數。
- () 12. 永磁式同步電動機的轉子裝有
(A) 永久磁鐵 (B) 電樞繞組 (C) 換向器 (D) 滑環。
- 12-3** () 13. 下列何者常做為直流無刷電動機的換向依據？
(A) 霍爾元件 (B) 電容器 (C) 二極體 (D) 換向器。
- () 14. 下列有關直流無刷電動機的敘述，何者錯誤？
(A) 不需利用碳刷，可避免火花問題
(B) 以電子電路取代傳統換向部分
(C) 壽命長，不需經常維修
(D) 轉矩與電樞電流的平方成正比。
- () 15. 有關線性感應電動機之特性，下列敘述何者錯誤？
(A) 激磁電流大 (B) 效率低
(C) 功率因數低 (D) 同步速率與極距無關。
- () 16. 超高速、低噪音之磁浮列車，是由下列哪一種電動機來驅動？
(A) 同步電動機 (B) 交流感應電動機
(C) 線性電動機 (D) 直流伺服電動機。
- () 17. 有一個極距為 5 cm 的線性感應電動機，以頻率 50 Hz 激磁，其移動速率 $v = 2 \text{ m/sec}$ ，則轉差率為
(A) 0.1 (B) 0.2 (C) 0.4 (D) 0.6。

單元摘要

第十二章

1. 步進電動機轉動角度與輸入脈波數成正比，即轉速與脈波頻率成正比。
2. 可變磁阻型步進角 θ 與定子相數 q 及轉子凸極數 N 之間的關係為：

$$\theta = \frac{360^\circ}{q \times N}$$

3. 經由閉迴路控制方式達到快速回應指令，並且控制位置、速度、或加速度的系統就稱為伺服系統。
4. 伺服電動機必須具備的特點包括：可以正、反轉、起動轉矩大、轉子慣性小、良好的運轉特性、損失小以及耐熱性佳。
5. 直流伺服電動機的控制主要利用脈波寬度調變 (PWM)，電樞電壓越高時，電動機的轉速與轉矩成正比增加；當電源極性改變，電動機就會反轉。
6. 兩相伺服電動機定子裝有二組互隔 90° 電機角的繞組，其中：
 - (1) 主繞組：經由電容器或直接與交流電源連接，通電後產生持續產生脈動磁場。
 - (2) 控制繞組：接在於伺服控制器之輸出端。
7. 兩相伺服電動機的控制方式包括：電壓控制法、相位控制法以及混合控制法。
8. 直流無刷電動機利用霍爾效應感測器或是光耦合器監控轉子位置，利用電子元件取代傳統直流電動機的電刷與換向器，沒有摩擦，損失小、效率高。
9. 直流無刷式電動機的定子繞有多相電樞繞組，轉子採用永久磁鐵，依據轉子安裝方式，分為內轉子型以及外轉子型兩類。
10. 線性感應電動機的原理與感應電動機相同，同步速率 $v_s = 2Y_p \times f$ ，轉子實際移動速率 v 會略低於定子移動磁場的同步速率 v_s ，轉差率為

$$S = \frac{v_s - v}{v_s}。$$