

# 馬達及其驅動控制

馬達是最常用的驅動致動元件，但馬達驅動系統是一機電整合系統，需有合適的電力轉換器供電及控制，才有優良的操控性能。雖然馬達的種類很多，但有其共通性，本文概述馬達的組成、操控原理及其驅動控制。

■ 廖聰明

馬達（motor）或稱電動機，是最常應用於工業及周邊設備的致動元件。依結構及供電方式，馬達有許多種類，需依其固有特性及所欲驅動的負載謹慎選用。各類馬達都有共通性，馬達的操作原理可以淺顯直覺，易於理解，各種馬達的增能驅動則是關鍵。

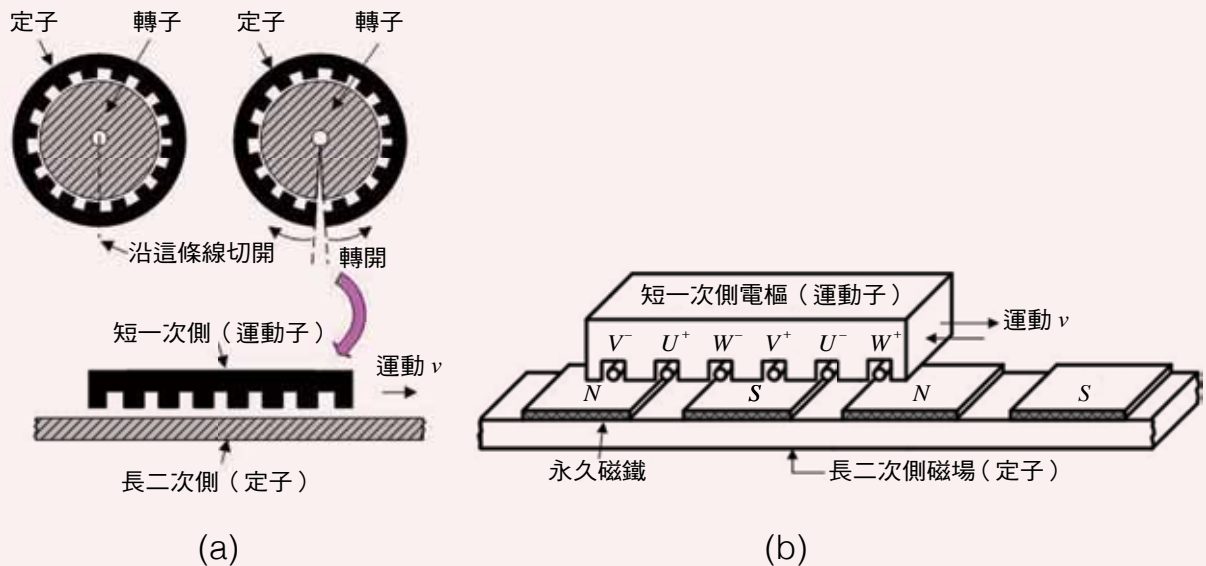
任何馬達都需以適當的電力轉換器供電激勵，依據馬達反電動勢波形的特性，有些馬達的線圈電流宜為方波，有些則是弦波。有些更須配合馬達的線圈電感特性，從事切換控制及 / 或適當的換相時刻調適，以得到較佳的運轉特性及轉換效率。近年來，全世界普遍重視節能，對於各種馬達，適當地搭配電力轉換器以及調整關鍵變數與參數，可有效提高能量轉換效率，因而可節省可觀的能源。

## 馬達的操控原理

馬達（也稱電動機）與發電機的結構相同，差異僅在作用方式。馬達的操作原理是，帶有電流的導體在磁場中會受到作用力；而發電機的操作原理是，被帶動的導體在磁場中會產生電壓，進而供給負載而產生電流。實務上，馬達的考量因素有：

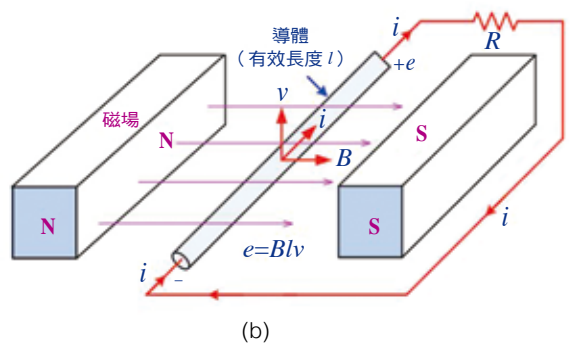
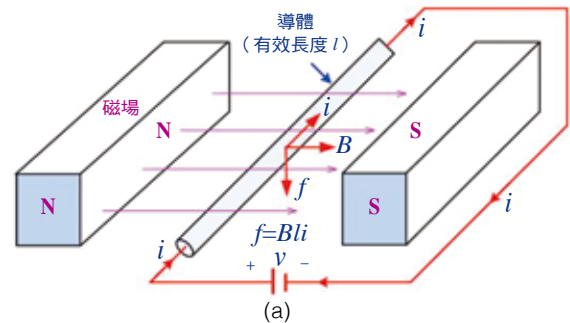
- （1）運動部位如是線性移動則稱為線型馬達，如是轉動則稱為旋轉馬達，前者可由後者把圓周展開成直線而得。旋轉馬達組成較簡易，因轉一圈後又回到原點，且較易支撐。

近年來，全世界普遍重視節能，對於各種馬達，適當地搭配電力轉換器以及調整關鍵變數與參數，可有效提高能量轉換效率，因而可節省可觀的能源。



由旋轉馬達形成線型馬達：(a) 形成過程；(b) 短一次側電樞的永磁線型馬達。

- (2) 旋轉馬達由電樞及磁場組成，兩者分別放置於定子及轉子，或轉子及定子，只要有相對運動即可。近來也有採用外永磁磁場轉子的扁平式馬達，應用在新式電梯馬達、電動車輪內馬達等。
- (3) 磁場中的作用導體是眾多線圈，需考慮交替運行於磁場 N 極及 S 極下的電流換向，以得到單一方向的轉矩。
- (4) 運轉部如是電樞，需以滑動接觸與外部的電源連接，因此產生有刷式馬達的缺點，例如體積大、產生火花、壽命短、需常維修等。近年來，各式無刷式馬達的開發就在於改善這缺陷。
- (5) 在磁場中帶電流的導體如未與磁場呈垂直（即夾角  $\theta < 90^\circ$ ），產生的作用力會打折扣，使馬達產生轉矩的能力降低，所需的電流及電能增大，效率降低而耗能。在所有馬達中，只有傳統直流有刷馬達帶電流的導體與磁場



馬達與發電機的操作原理：(a) 馬達；(b) 發電機。

各種馬達有其共通性，基本操作原理可以用一個含單一定子相線圈及單一轉子線圈的簡易馬達加以說明。

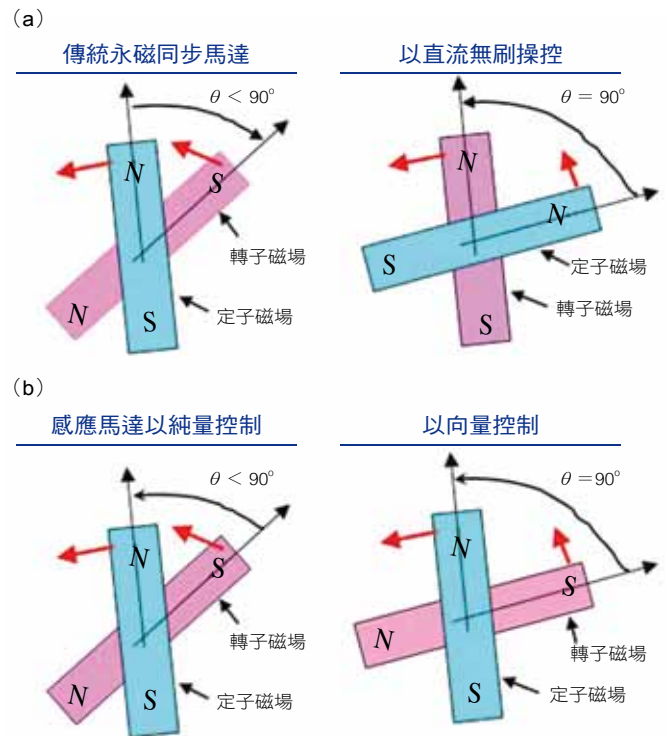
垂直，但有固有碳刷的缺點。因此，有些馬達能透過適當地調適控制其關鍵變數，也能具有這特徵，使其轉矩產生能力媲美於直流有刷馬達而增進效能。例如永磁同步馬達的直流無刷操控和感應馬達的向量控制，都使  $\theta = 90^\circ$ 。

### 馬達通論

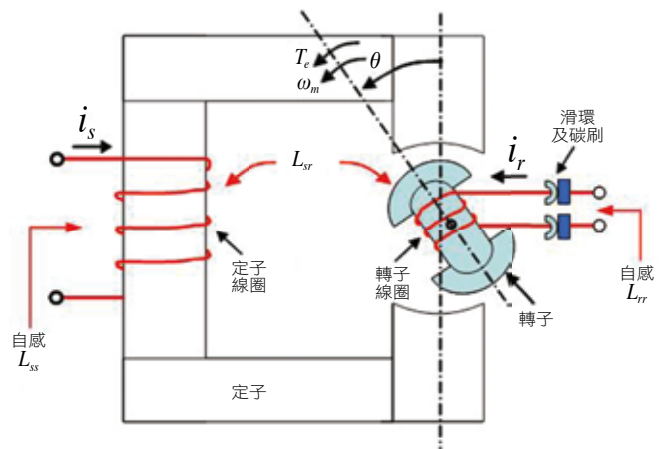
各種馬達有其共通性，基本操作原理可以用一個含單一定子相線圈及單一轉子線圈的簡易馬達加以說明。假設磁路是線性的，馬達的電磁產生轉矩可由其系統儲能對轉角的變化得到。

我們可以觀察到：

- (1) 定子線圈電流及轉子線圈電流可以是交流或直流，但必須有適當的換向。例如對於傳統有刷直流馬達而言，定子線圈電流是直流，以激磁產生固定的磁場；而流經轉子線圈的電流，必須先把外加的直流經碳刷及換向器轉換成交流電流。
- (2) 對於交流馬達，若定子線圈只有一相，則不會自行啟動，且運轉中會有抖動轉矩，這兩個問題都須由多相線圈的配置及激勵予以克服。
- (3) 如無轉子線圈，馬達的轉矩將只靠磁阻轉矩成分，這類馬達稱為磁阻馬達，它利用磁力線會往最低磁阻路徑移動而產生最大電感的特性產生轉矩。
- (4) 如果轉子的周面圓滑均勻而無凹凸，磁阻均勻則轉子需構置線圈予以適當激磁，或安置永久磁鐵，以獲得激磁轉矩成分。

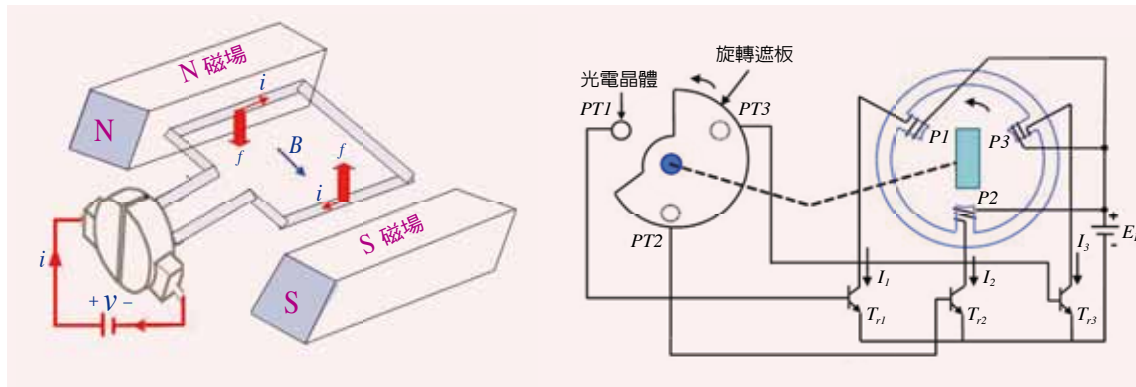


增能控制的交流馬達：(a) 永磁同步馬達的直流無刷操控使  $\theta = 90^\circ$ ；(b) 感應馬達的向量控制使  $\theta = 90^\circ$ 。



含單一定子相線圈及單一轉子線圈的簡易馬達結構示意圖。s 表示定子，r 表示轉子， $L_{sr}$  是 s 與 r 間的互電感。

唯有透過馬達本身的適當設計，以及馬達與驅動系統組件間的妥善搭配，才能得到優良的運轉控制性能。



(左) 直流有刷馬達及(右) 直流無刷馬達。 $PT1 \sim PT3$  控制定子電流  $I_1 \sim I_3$  的開或關，未被遮時表示電流通。

- (5) 如果轉子具有線圈，且其周面凹凸具有凸極性，則含有磁阻轉矩及激磁轉矩兩項成分。不同馬達利用不同的轉矩產生特徵操作。

## 直流有刷馬達及直流無刷馬達

傳統直流有刷馬達的轉子線圈電流，必須先把外加的直流經碳刷及換向器轉換成交流電流，才能使運行於磁場 N 極及 S 極的導體線圈產生單一方向的轉矩。但是，從事機械換向的碳刷及換向器，具有體積大、產生火花、需常維修、壽命短等缺點。

若使用三相方波直流的永磁同步無刷馬達，由變頻器供電激勵，變頻器中的電晶體開關由位置感測器決定其切換，也就是以電子方式控制換向，則可避免上述機械式換向的缺點。

## 馬達的驅動控制

任何型式的馬達都需以適當的電力轉換器供電激勵，馬達驅動系統可以由交流電源供電或蓄電池供電。如果是電池供電，

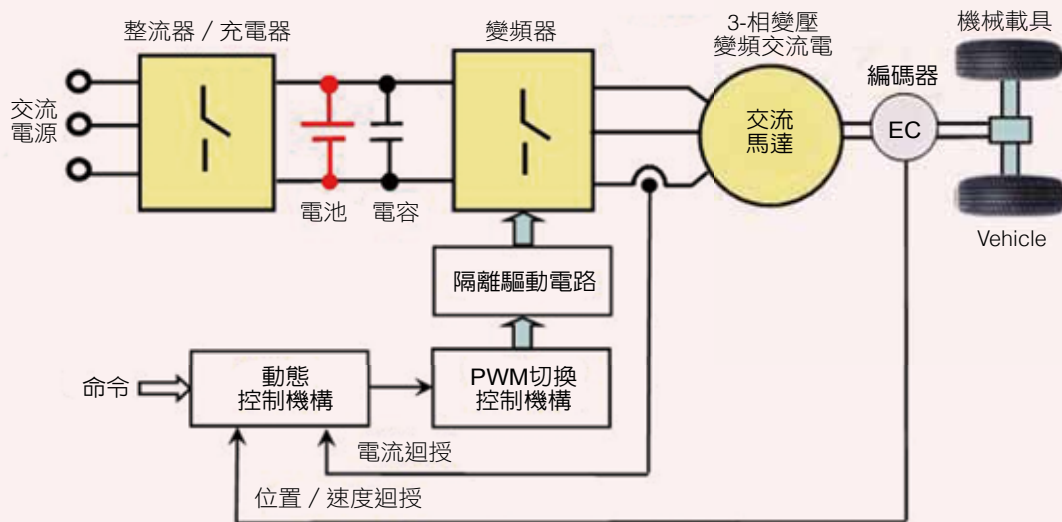


永磁式直流有刷馬達結構的照片

則前端是一插入式充電器，直流鏈上的電容是濾波用，有時也可加裝超電容以得其蓄能優勢。馬達驅動系統是一含馬達、機械、轉換器、控制器、感測與轉換等的機電整合系統，唯有透過馬達本身的適當設計，以及馬達與驅動系統組件間的妥善搭配，才能得到優良的運轉控制性能。

依據馬達線圈在磁場中用運動所產生的反電動勢波形的特性，有些馬達的線圈電流宜為方波，有些是弦波，有些馬達更需配合線圈的電感特性加以切換控制。





典型的馬達驅動系統組成示意圖

傳統有刷直流馬達採用直流轉換器，成本較低，且控制機構較簡單。而交流馬達，如感應馬達及同步馬達，則需採用較複雜的變頻器，以及先進的切換與動態控制。感應馬達是利用定子線圈的旋轉磁場在轉子線圈中生成感應電流而產生轉矩，同步馬達則是因轉子上裝有磁鐵而被旋轉磁場拉著轉。

### 理想及實際的馬達操控特性

傳統有刷直流馬達的單一線圈會有換向時產生的紋波轉矩，藉由多線圈的配置，可產生平滑的轉矩。一般實用馬達具有許多線圈，因此有刷直流馬達產生的轉矩很平滑。

若有理想切換式磁阻馬達，線圈電流與線圈電感樣型密切搭配，可得到定值的平滑轉矩，但實際上不理想的方波電流及換相過程都會產生紋波轉矩。

理想的三相弦波永磁同步馬達，三相弦波線圈電流與三相弦波馬達應電勢的同

步對位搭配，可得到定值的產生轉矩。實際上，不理想的弦波電流會產生紋波轉矩。

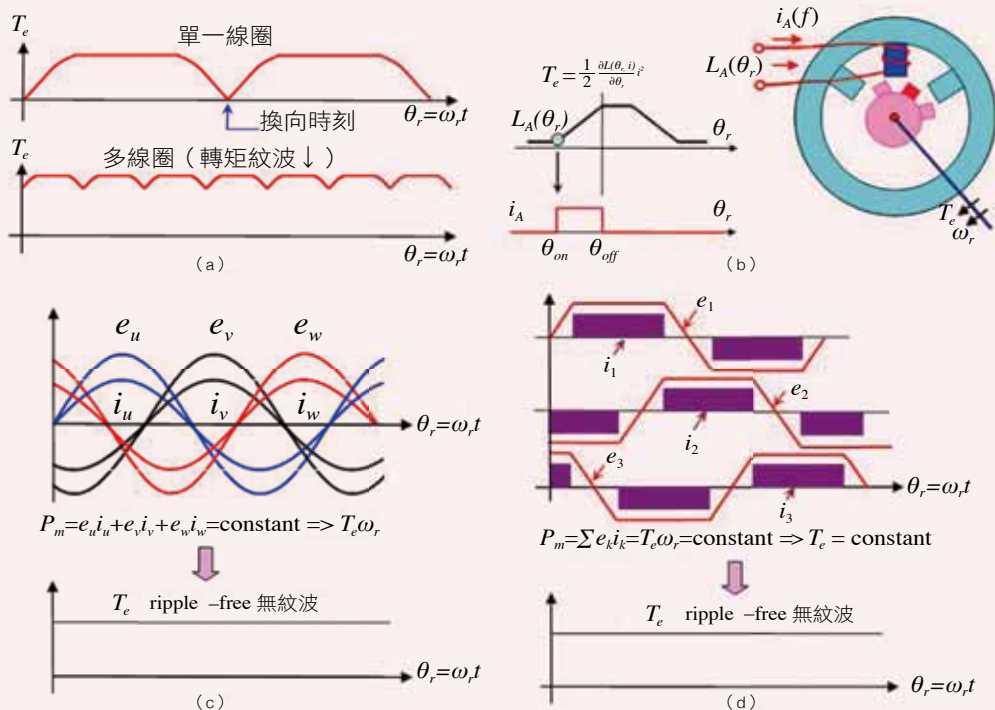
至於方波永磁同步馬達，需三相方波狀線圈電流與梯形狀應電勢的搭配。然而，實際上仍會因不理想的電流而產生紋波轉矩。

上述的各式馬達的紋波轉矩產生特性，與所採用的電力轉換器及切換控制機構有密切的關係。而所產生的馬達紋波轉矩會導致機械載具的振動及噪音，因此在開發靜音馬達驅動設備時，宜注意紋波轉矩產生的原因，以利研擬改善措施。

### 馬達的應用

馬達的應用場合相當廣泛，不勝枚舉，有關應用上的一些評述如下：

- (1) 在不需考量安裝空間及不需很長的使用期限下，傳統直流有刷馬達仍是合適的選用對象。
- (2) 在各種應用場合，尤其是大功率，一直很常使用感應馬達。例如台灣高鐵



一些典型馬達的理想轉矩產生特性：(a) 傳統有刷直流馬達；(b) 切換式磁阻馬達；(c) 三相弦波永磁同步馬達；(d) 三相方波永磁同步馬達。 $T_e$  是轉矩， $\omega_r$  是轉子角速度， $P_m = T_e \omega_r$  是馬達功率； $i$  是電流， $e$  是反電動勢， $ie$  就是電功率，等於馬達功率。

列車，使用  $4 \times 9 = 36$  部的三相 285kW 感應馬達。

- (3) 近來，家電設備及電動車已漸漸採用永磁同步馬達取代感應馬達，以得到更小巧的產品，尤其是內置磁石式的永磁同步馬達。
- (4) 在電動車輛的驅動應用上，歐美較常用感應馬達，日系車則偏向使用永磁同步馬達。
- (5) 對於切換式磁阻馬達，雖然目前較少使用，但有潛力而值得關注。

馬達的種類雖然眾多，但有共通性，其操作原理可直覺地理解。特定的馬達，只要了解並妥適調控關鍵參數，就可有效增進操控效能，並提升轉換效率以節省能源。

任何馬達驅動系統都需以適當的電力轉換器供電激勵，因此馬達驅動系統是一含馬達、機械載具、轉換器、控制器、感測與轉換等的機電整合系統，必須做好馬達本身的適當設計，以及馬達與驅動系統組件間的妥善搭配，才可獲得優良的運轉控制性能。

廖聰明  
清華大學電機系