

Orientalmotor

TECHNICAL MANUAL

技術手冊
步進馬達篇



目次

前言 步進馬達的歷史	5
1	
步進馬達的特徵	9
1.1 步級動作	9
1.2 以高解析度進行高精度定位	10
1.3 旋轉量與脈波數成正比	10
1.4 轉速與脈波速度成正比	11
1.5 停止狀態下的位置保持	11
1.6 高同步性	11
2	
步進馬達的種類	13
2.1 PM 型步進馬達	13
2.2 VR 型步進馬達	15
2.3 混合型步進馬達	16
3	
混合型步進馬達的構造與動作原理	17
3.1 混合型步進馬達的構造	17
3.2 產生保持力	18
3.3 配設間距和步級動作	18
3.4 步級角度	20
3.5 5 相步進馬達	21
4	
步進馬達的特性	25
4.1 靜特性	25
4.2 過渡特性	32
4.3 動態特性	38
4.4 溫度特性	43
4.5 噪音特性	45
5	
驅動回路	49
5.1 接線方式	49
5.2 激磁方式與激磁程序	54
5.3 驅動方式	56
5.4 微步級驅動	58
5.5 新的驅動方法	59
6	
控制器的種類與特徵	63
6.1 步進馬達的動作	63
6.2 控制器的種類	67
6.3 步進馬達的網路控制	69
後記	71



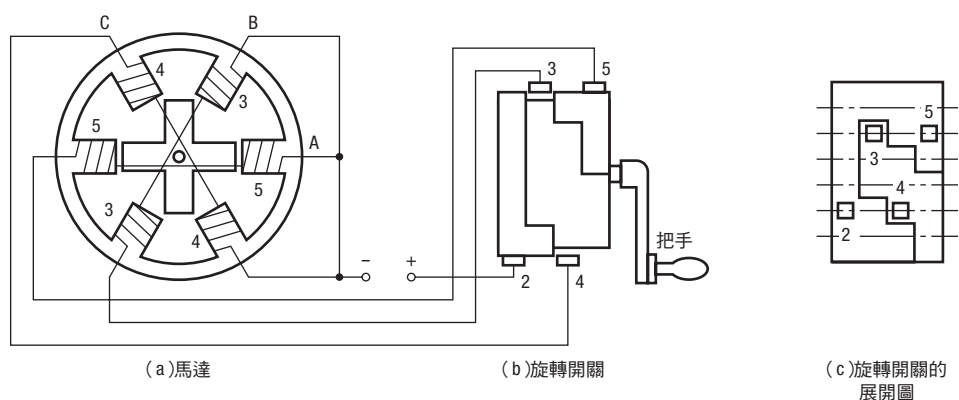
前言 步進馬達的歷史

「馬達」是以電的能量作為動力的裝置，讓物品移動和停止都需要馬達。步進馬達¹⁾也是一種馬達，性能的優點在於能「以精密的轉量停止」。

雖說如此，但不代表不擅長以高速旋轉或以定速連續旋轉。這種馬達從停止到數千 r/min 的範圍內，能夠自由地旋轉和停止。本技術手冊主要針對混合型步進馬達，講解其構造、旋轉原理、各種特性，讓讀者閱讀過後能更加理解，並更加發揮其特性。

在進入正文前，先介紹步進馬達的歷史。

最早在 19 世紀中葉就有應用步進馬達的例子，而在 1920 年左右，據說 VR 型步進馬達就被用於控制英國戰艦的砲管方向。



初期的 VR 型步進馬達

美國的工業技術因為第 2 次世界大戰而大幅成長，開始使用交流／直流的伺服馬達，作為自動化機械的驅動源。此後不久，由於出現數值控制而開始使用步進馬達，提升了 VR 型步進馬達的特性。

轉子和定子設有小齒，朝軸方向一分为二的轉子核心中有磁鐵，為多極的馬達。這種混合型步進馬達的基本構造從 1952 年美國 General Electric 公司申請專利²⁾以來，時至今日，其基本構造依然沒有任何變動。利用上述構造，美國 SIGMA 公司製作了低速旋轉用的交流馬達，施加交流 60 Hz，能達到 72 r/min。極數為 100 極，現今也持續使用這種設計。該公司在 1960 年代後半製作了一種電動機產品，藉由個別切換各相電流，可得到任意轉量和轉速。

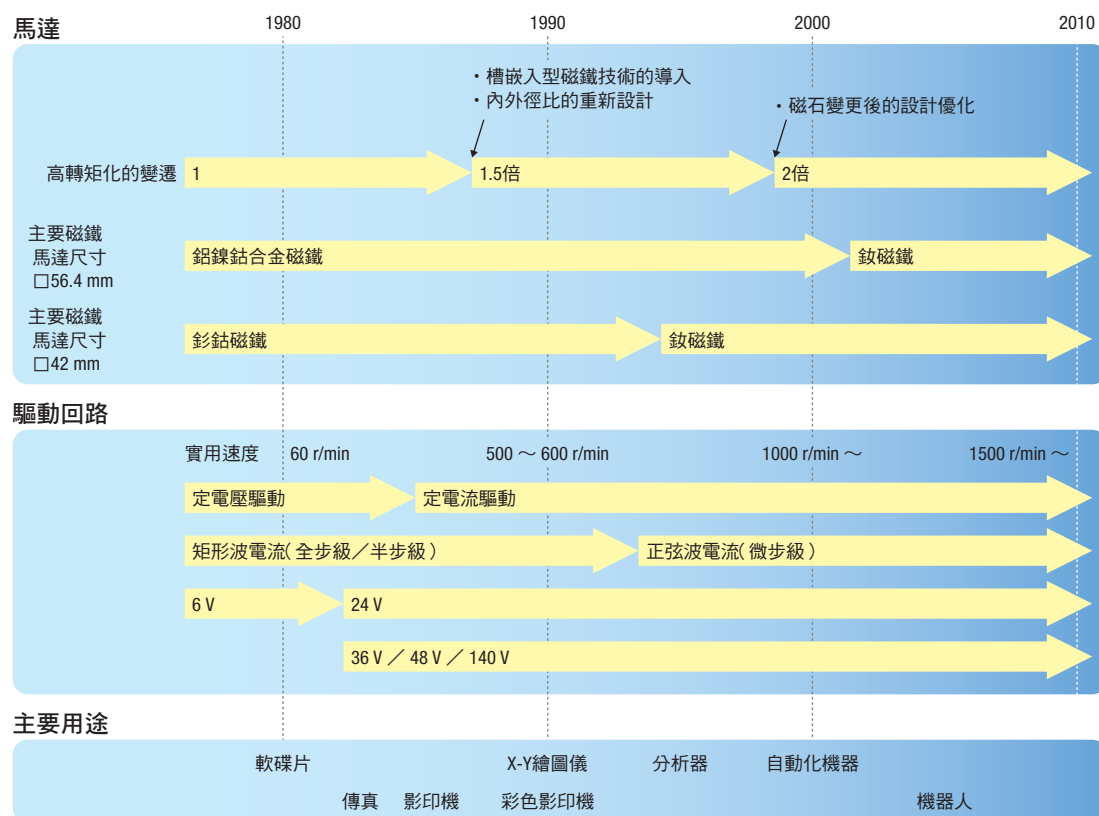
1) 由於以脈波信號控制，因此也被稱為「脈波馬達」。本書使用日本廣泛使用的名稱「步進馬達」，名稱來自其根據脈波進行步級狀的動作。

2) USP2859999、DYNAMOELECTRIC MACHINE

自 1960 年代末期，日本國內也開始生產混合型步進馬達。進入 1970 年代後，由於編碼器等檢知器和直流放大器的發展，NC³⁾ 控制的作動器逐漸以。另一方面，步進馬達則用於 OA 機器的輸出裝置或磁碟驅動⁴⁾，生產量大幅上升。

步進馬達以 2 相交流機之姿誕生，但為了使其自由旋轉，進行矩形波驅動後，會產生巨大振動的問題。若增加相數，除了角度解析度會上升外，步級時的轉矩變動會變小，振動也會隨之減低，因此嘗試將步進馬達多相化，目前實際使用的是 2、3、4、5 相。本公司也和德國 Berger 公司技術合作，製作了 5 相步進馬達。

為了提升轉矩，本公司很早就展開小齒齒型改善等研發活動。下圖統整了 1980 年代後的發展情況。



近年步進馬達的發展

以 1980 年當時為基準來看靜止轉矩的變化，可發現 1986 年左右時為 1.5 倍，2000 年左右時變為 2 倍。美國 SIGMA 公司開發的「SIGMAX」技術為高轉矩設計的先驅，是將稱為槽嵌入型磁鐵的磁鐵插入定子小齒凹處，以提升轉矩的技術。1986 年，本公司將 SIGMAX 技術應用於 5 相步進馬達，這也成為日本混合型步進馬達進入高轉矩化競爭的契機。

在此之後，則開始研究不使用槽嵌入型磁鐵就提升轉矩的方法，發現內外徑比對決定轉矩有決定性的影響。1980 年代後半到 1990 年，內外徑比開始比以前高，靜止轉矩約變為 1.5 倍。

3) Numerical Control(數值控制)的簡稱

4) 8 吋軟碟片的時代

1990 年代後半到 2000 年，用於小型馬達的磁鐵種類發生了重大變化，由於使用高能量磁鐵和零件加工、線圈技術提升，與 1980 年左右相比，靜止轉矩大約變為 2 倍。

1980 年代到 2010 年，驅動回路也發生重大變化，使用電流反饋和 PWM 控制(或是 PAM 控制)的定電流驅動成為主流，取代了電壓驅動回路。因此，原本實用速度為 60 r/min 左右，在 1985 年左右變為 600 r/min，2000 年左右則成長至 1000 r/min 以上，今日更超過了 1500 r/min。

另一方面，讓我們來看驅動波形。1980 年左右時一般使用矩形波驅動，步級角度不是全步級就是半步級。到了 1990 年代中期，微步級驅動變得普及，其將施加電流作為模擬正弦波，細分步級角度。最初是對電氣角 360° 進行 16 分割，今日由於電流控制技術和 PWM 解析度的提升，已能輕易對電氣角 360° 進行數千分割。

從 1980 年開始，伴隨這 30 年的各種發展，步進馬達的用途也變得更廣泛。1980 年時，轉矩小、實用速度也低，當時主要的用途包含利用高定位精度的軟碟片磁頭驅動，以及活用高同步性的傳真機收發機構。從 1980 年代到 1990 年代，由於高轉矩化及導入了定電流驅動回路，讓機器朝高速化發展。此時期主要的用途為 X-Y 繪圖儀和彩色影印機。彩色影印機需要精密定位，採用 5 相步進馬達後得以實現。1990 年代中期開始廣泛應用於分析機器，許多馬達用於樣本移動或分光用鏡子旋轉。此時也開始用於半導體製造裝置等製造裝置上。進入 2000 年代後，高轉矩化和高速化更加發達，由於微步級普及，低振動化也更加發達，開始用於各種自動化機器、簡易機器人、3D 列印等用途，使用範圍更加廣泛。

步進馬達今日依然持續發展，透過提升轉矩或減低振動，不斷變化為更好用的工具。

1 步進馬達的特徵

步進馬達的特徵在於不使用檢知器或剎車也能以正確的速度旋轉，並在正確的位置停止，因此能輕鬆構成定位系統。

1.1 步級動作

一般來說，馬達給人連續旋轉的印象，但步進馬達是當脈波信號輸入至驅動回路（驅動器）時才以一定角度旋轉，因此即使不使用轉量檢知器，也能正確運轉。

當脈波信號快時，步進馬達的動作看起來像是連續旋轉，當脈波信號慢時，則像時鐘的指針一樣間歇性旋轉。以 2 相步進馬達為例，如圖 1.1 所示，基本上是以 1.8° 為單位動作。

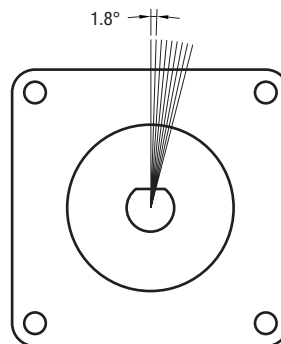


圖 1.1 2 相步進馬達

步進馬達的運轉系統如圖 1.2 所示，由 3 個項目構成：以脈波信號下達運轉指令的控制器或產生器、為了讓馬達符合指令動作而供給電力的驅動器以及將電力轉換為動力後依照指令實行運轉的步進馬達。



圖 1.2 步進馬達的運轉系統

控制器會輸出脈波信號，下達步進馬達的速度及轉量指令。為了讓步進馬達以高速進行定位運轉，除了需要脈波信號的加速、減速（緩慢加速、緩慢減速）控制外，還需要有脈波數設定和脈波計數的機能。因此，專門搭配步進馬達使用的控制器或可程式控制器之類位置控制單元開始被採用。

用於步進馬達運轉指令的脈波信號為間歇產生的電氣信號，就如同心臟跳動一般，其波形如圖 1.3 所示呈矩形。

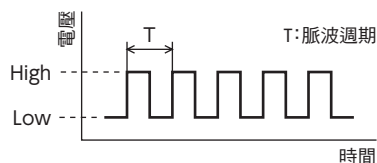


圖 1.3 脈波信號

驅動器會依脈波信號控制步進馬達旋轉，其主要由決定電流通順序的控制器及控制供給電力至馬達的功率放大器所構成。

1.2 以高解析度進行高精度定位

步進馬達中有一種旋轉角度僅以馬達構造決定，稱為基本步級角度。

驅動器具有細分步級角度的功能，步級角度 θ_S 為每個脈波信號的旋轉角度，根據馬達和驅動器的搭配而定。

1 圈旋轉 360° 除以步級角度後的數值稱為解析度。

$$\text{解析度} = \frac{360}{\theta_S} \quad (1.1)$$

2 相步進馬達的基本步級角度為 1.8° ，5 相步進馬達的基本步級角度則為 0.72° ，因此解析度各為 200 和 500。也有能夠細分至 10 萬以上的驅動器，可達到極高的解析度。步級角度 θ_S 為單脈波的旋轉量，是理論上的數字，仔細觀察可發現實際的旋轉角度會有微小差異。此偏差量為代表值。

$$\pm 3' = \pm 0.05^\circ \text{ 以下} \quad (1.2)$$

即使重複旋轉也不會累積誤差，因此能以高精度進行定位。

1.3 旋轉量與脈波數成正比

馬達的總旋轉量 θ 為輸入至驅動器的脈波數 n 和步級角度 θ_S 的乘積，以公式 (1.3) 表示。因此，設定脈波數就能設定馬達的轉量。

$$\theta = n \cdot \theta_S \quad (1.3)$$

舉例來說，若為步級角度 1.8° 的 2 相步進馬達，就如圖 1.4 所示。

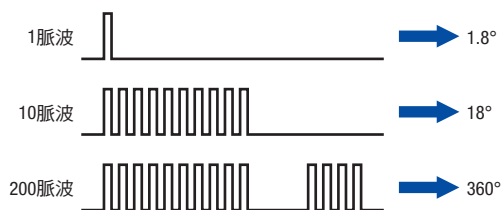


圖 1.4 脈波數和旋轉量

1.4 轉速與脈波速度成正比

每秒的脈波數稱為脈波速度¹⁾，單位以 Hz 表示。將頻率 200 Hz 的脈波連續輸入至步級角度設定為 1.8° 的驅動器後，馬達就會每秒旋轉 1 圈，也就是會以 60 r/min 的速度旋轉。此關係如圖 1.5 所示。

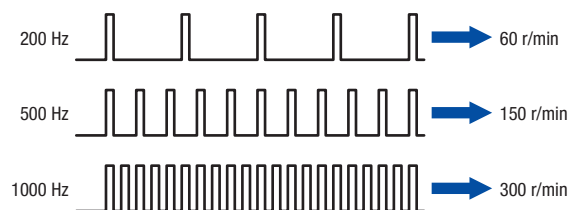


圖 1.5 脈波速度和轉速

脈波速度 f Hz 與轉速 N r/min 的關係以下列公式表示。

$$N = \frac{\theta_s \cdot f}{360} \times 60 \quad (1.4)$$

1.5 停止狀態下的位置保持

幾乎所有馬達都不擅長停止，為了要保持位置，需要使用電磁剎車或是位置回授。相較於這些馬達，步進馬達只要流通一定的電流，就能產生保持力。因此，即使施加一定程度的外力，也不會旋轉。這對於定位用途來說是一大優點。

然而，若因停電等原因把馬達電流切斷，保持力也會跟著消失，因此若用途為上下驅動等經常從單一方向施力的情況，基於安全起見建議搭配機械剎車使用。

1.6 高同步性

以一定速度旋轉時，若因負載變動等原因造成狀態混亂，就稱為外亂。

若是以檢知器等機制保持同步性的馬達，在發生外亂現象後，除了需要花費時間恢復原本狀態外，同時也會產生與原本的位置有所變化的偏差情況。另一方面，就步進馬達來說即使發生外亂現象時，發生與原本位置變化的偏差很小，是同步性很高的馬達。

1) 脈波頻率，或稱為脈波斜率，有時也會以表示每秒脈波數的 pps (pulse per second) 作為單位。

2 步進馬達的種類

具代表性的步進馬達有 PM 型、VR 型、混合型 3 種。此技術手冊主要針對混合型步進馬達進行說明，在此先簡單說明 PM 型和 VR 型步進馬達。

2.1 PM¹⁾型步進馬達

PM 型就如圖 2.1 所示，是轉子表面為磁鐵的步進馬達。線圈通電後，定子的極就會磁化，轉子的磁極會固定在被吸引到的位置上。

圖 2.1 中，使 A_1 極的內圈面為 S 極、 A_2 極為 N 極的通電後狀態。定子產生的磁極與轉子表面的磁極，停止於相互吸引的位置。將通電的相從 A 相切換為 B 相，使 B_1 為 S 極、 B_2 為 N 極，轉子便會依順時鐘方向旋轉 90° 。

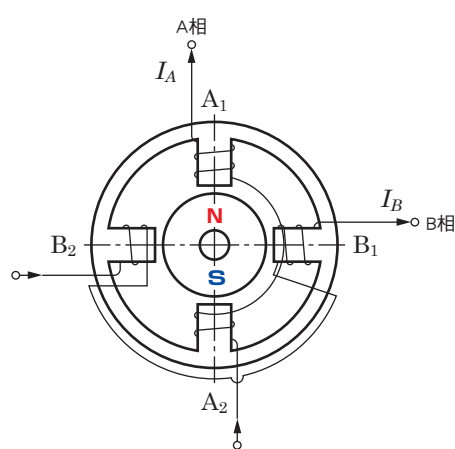


圖 2.1 PM 型步進馬達

實際上廣泛運用的 PM 型步進馬達，是如圖 2.2 所示的 2 相爪極型²⁾步進馬達。為了提高解析度，而增加轉子的磁極數，一併改變了定子的構造。

環狀線圈與包覆線圈的導磁性³⁾外殼，其內圈面配置和轉子磁極同間距的極（爪極），兩者一組構成 1 相。

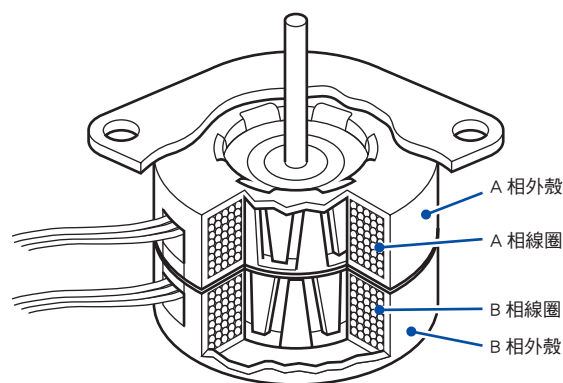


圖 2.2 爪極型步進馬達

1) Permanent Magnet (永久磁鐵) 的簡稱

2) 彎曲的極就像爪子 (claw)。

3) 磁力容易穿過的性質，或是擁有此性質的物質。

圖 2.3 表示 A 相通電後的狀態下，包含軸在內的截面。線圈通電後，在電流周遭即會產生圓環狀的磁場。圖中，在內側產生了朝上的磁場。透過此磁場，連接於外殼下側的爪極將磁化為 N 極，連接於上側的爪極則磁化為 S 極。

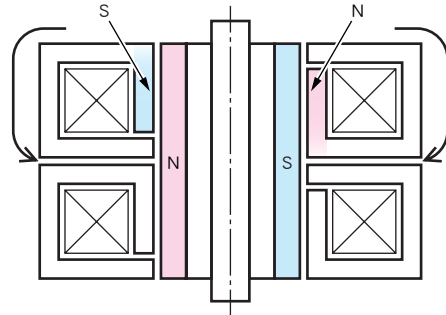


圖 2.3 A 相通電時

圖 2.4 是從內圈側觀看定子的圖。上側及下側分別表示各相的極，中央排列的 N 及 S 則為轉子磁極的示意圖。

A 相通電中，N 極與 S 極會交錯排列。若使定子的磁極間距與轉子的磁極間距為相同時，在磁鐵與爪極間即會發生轉距。A 相與 B 相構造相同，只是往圓周方向錯開 1/4 的極間距。將激磁從上側定子切換至下側定子，則轉子只會旋轉偏差的部分。

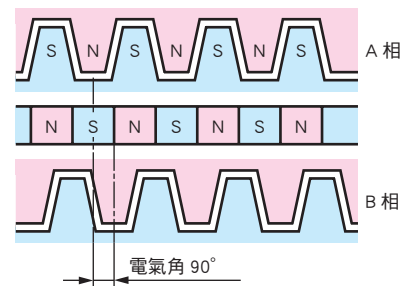


圖 2.4 展開圖

使用轉子的極數 n_p 與相數 n_ϕ ，步級角度可以下列公式表示。由此可知，若要縮小步級角度，只需增大極數或相數即可。

$$\theta_s = \frac{360}{2n_p n_\phi} \quad (2.1)$$

若要增大極數，必須在轉子表面上以細小間距進行磁化，做出多個極(圖 2.5)。理論上可以進行數十極的磁化，但隨著極數增大，磁力會變弱，轉距也會隨之變小，因此目前實際使用上只到 20 多極。

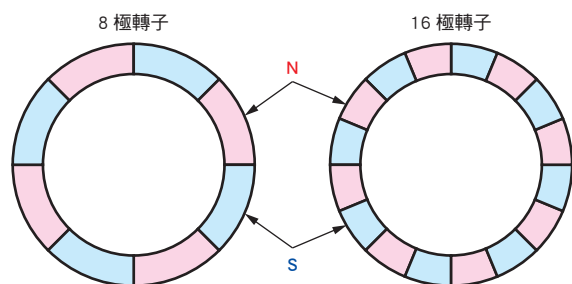


圖 2.5 PM 型步進馬達的多極轉子

爪極型步進馬達幾乎為 2 相馬達。亦可增加重疊的定子數量使其多相化，實際使用上亦有 3 相馬達。

其特色為構造簡單且可便宜製造，但因受限於建構磁鐵及磁路的外殼材質，發生轉矩也有限。此外，旋轉時的損失較大，高速旋轉時的特性會受到限制，因此多用於簡易的定位。

2.2 VR 型步進馬達

此為轉子與定子上設有凹凸部，藉由各凸部的磁吸力作用旋轉的馬達。圖 2.6 為 8 極 12 線槽⁴⁾3 相 VR 型步進馬達的範例。

磁力容易穿過的物質稱為鐵磁性物質。代表性鐵磁性元素有鐵、鈷、鎳。其中，地殼中含有大量的鐵，因此磁芯大多由鐵製成（鐵芯）。鐵芯置於磁場中，磁力作用使磁通量更容易通過。VR 型步進馬達便是利用此效果發生轉矩。

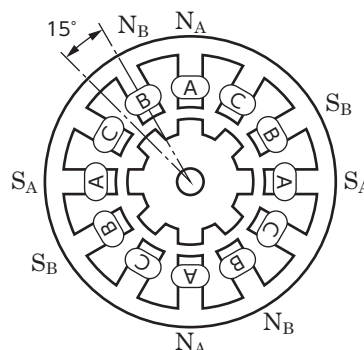


圖 2.6 VR 型步進馬達

圖 2.7 所示為構造最簡單的 4 極 6 線槽 VR 型步進馬達。定子上側的 A 相磁化為 N 極、下側的 \bar{A} 相磁化為 S 極的電流狀態下，磁化的定子的極會吸引轉子的凸部。此狀態為 A 相中磁通量最容易通過的位置。

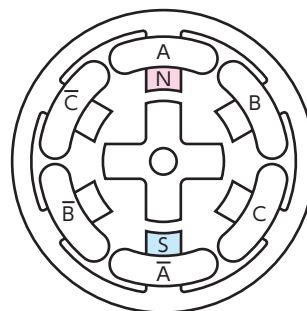


圖 2.7 VR 型步進馬達（4 極 6 線槽）

圖 2.8 為激磁的相切換為 B 相的瞬間。

轉子的橫向凸部有部分面向 B 相。由此狀態產生向左的力，使得面向 B 相的面積變得更大，磁通量更容易通過，並旋轉 30° 至圖 2.9 的位置。再將激磁的相切換為 C 相，同樣向左旋轉 30° ，變成圖 2.10 的狀態。

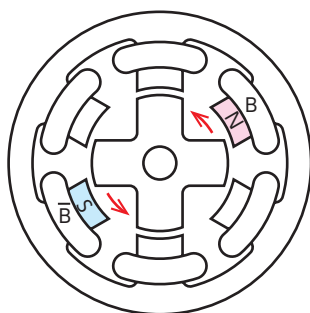


圖 2.8 B 相激磁後的瞬間

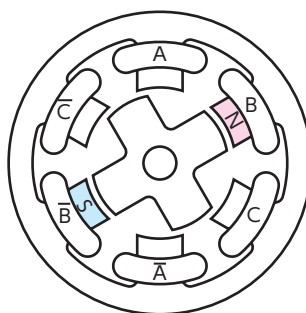


圖 2.9 B 相的停止位置

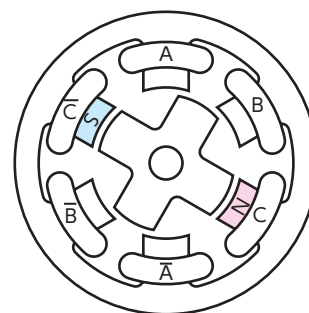


圖 2.10 C 相的停止位置

圖 2.10 之後設為圖 2.7 的狀態。如此一來，雖然定子的極只能在 120° 的範圍內移動，但轉子會朝單一方向（此例為逆時鐘方向）旋轉。這是因為 VR 型步進馬達的轉子不是磁鐵，定子的極性並不構成問題，哪一極已磁化才是重點。因無需改變定子的極性，只要電流為單一方向的流向即可，具有簡化驅動回路的優點。

4) 放入線圈的地方

磁通量通過的難易度因轉子的旋轉而改變，意即線圈的電感會隨轉子的位置而變化。將電感設為 L 、電流設為 i ，則轉矩 T 可以下列公式表示。

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} i^2 \quad (2.2)$$

從公式(2.2)可得知，轉矩與電流的平方成正比。控制轉矩或旋轉時，期望轉矩與電流成正比，因此 VR 型步進馬達不適用於細部的控制。另外，由於具有轉子非磁鐵且構造簡單又堅固的特徵，常用於可高速旋轉的 SRM⁵⁾。

將轉子凸部數設為 n_p ，相數設為 n_ϕ ，則 VR 型步進馬達的步級角度可以下列公式表示。

$$\theta_s = \frac{360}{n_p n_\phi} \quad (2.3)$$

讓步級角度更精細的有效方法是增大轉子凸部數。但是，若同時也增加了定子槽數，則構造將變得複雜且不易製作。為解決此問題，僅在轉子和定子面對面的部分，做出精細的凹凸構造「小齒」。圖 2.11 此為轉子上設置 50 片小齒，並以相同間距在定子上設置小齒的範例。線圈分為 4 組的 4 相馬達。公式(2.3)中，代入 $n_p = 50$ 、 $n_\phi = 4$ ，即可得其步級角度為 1.8° 。

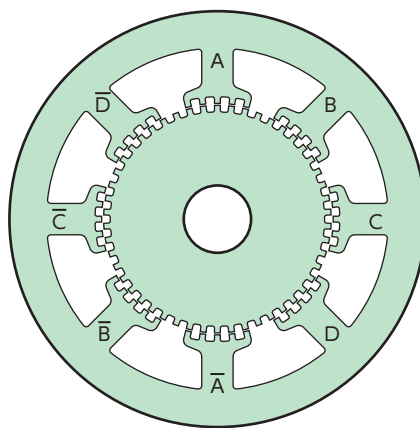


圖 2.11 小齒式 VR 型步進馬達

2.3 混合型⁶⁾步進馬達

此為小齒式 VR 型步進馬達併用磁鐵的馬達。由於兼具磁鐵和小齒構造，而稱為混合型。

一面維持透過小齒獲得的高解析度，一面透過磁鐵獲得高轉矩。並且，由於電流與轉矩的關係接近等比，是較 VR 型更容易控制的馬達。

接下來，本技術手冊將針對混合型步進馬達進行說明。

5) Switched Reluctance Motor(開關式磁阻馬達)的簡稱。備受矚目的高速動力用馬達，可用相對簡單的回路，製作出可高速運轉的系統。

6) Hybrid(雜種、混合)。雖然以語言角度來看有誤，但簡稱為「HB 型」。

3 混合型步進馬達的構造與動作原理

所有混合型步進馬達共通的特徵在於由「小齒」和朝軸向磁化的永久磁鐵組合成的超多極構造。此構造讓馬達具備高轉矩、步級動作、高停止精度等性能。

3.1 混合型步進馬達的構造

圖 3.1 是混合型步進馬達中最普遍的 2 相步進馬達的構造。由定子和轉子構成，定子繞有線圈，轉子內有朝軸向磁化的永久磁鐵。透過該磁鐵，前後的轉子段被磁化，一邊為 N 極，另一邊為 S 極。定子和轉子的鐵芯是由層層的電磁鋼板堆積而成，磁力容易通過電磁鋼板，且不易損失。

定子和轉子均設有小齒¹⁾。若為步級角度 1.8° 的 2 相步進馬達，轉子表面的小齒數量為 50 齒，間距為 7.2° 。兩個轉子段以錯開半間距 (3.6°) 的狀態組裝而成。

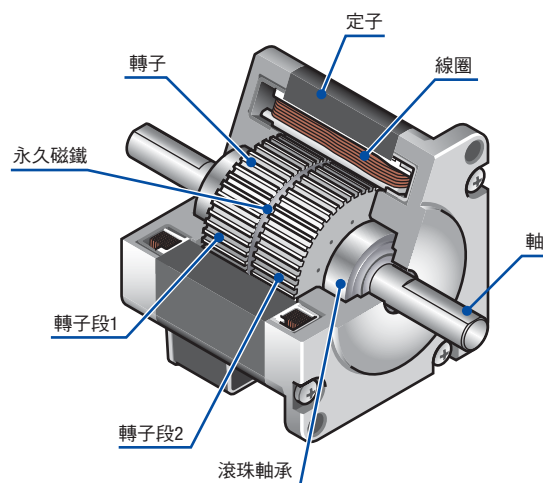


圖 3.1 步進馬達的截面圖

圖 3.2 是從正面（軸方向）觀看轉子的圖。此處以桃紅色標示 N 極側，以淺藍色標示 S 極側。從正面看轉子可發現，有 50 齒轉子的小齒交錯排列，N 極和 S 極交錯排列成 100 極的構造。

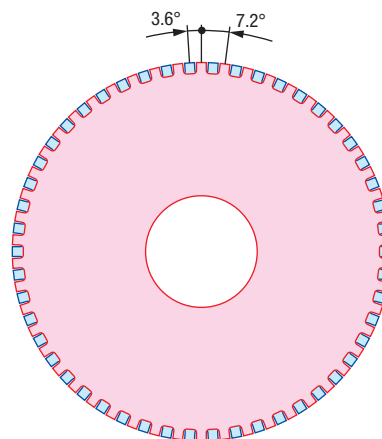


圖 3.2 從軸方向觀看轉子

1) 由於具有吸引並引導磁通量的功能，正確名稱為「感應器」。和齒輪的「小齒」形狀相似，因此一般稱之為「小齒」。

圖 3.3 是從軸方向觀看定子核心的圖。定子有 8 個主極²⁾，內圈和轉子一樣設有小齒。將線圈繞上此主極並流通電流後，每個主極就會被磁化為 N 極或 S 極。將電流入線圈產生磁力稱為激磁。激磁後，位於相對位置的 2 極會變成同極，位於 90° 位置的 2 極則變成異極。同時被磁化的主極稱為相，由於分為 A 相、B 相 2 種，因此稱為 2 相步進馬達。以 45° 間隔配置的主極上，全都採用 5 個間距為 7.2° 的小齒的設計。

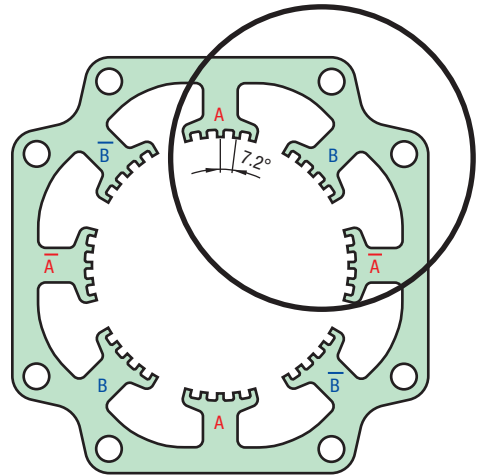


圖 3.3 從軸方向觀看定子核心

3.2 產生保持力

圖 3.4 是將圖 3.3 的圓圈處和轉子一起放大的圖。A 相極激磁後，其小齒變為 S 極，轉子 N 極側的小齒被吸引。同時，位於 90° 位置的 \bar{A} 相³⁾極小齒則變為 N 極，吸引 S 極側轉子的小齒。

在此種狀態下，轉子和定子間有強大的吸引力，加上能讓轉子旋轉的外力後，就會產生與之相反而保持位置的高轉矩。這就是即使不用電磁剎車也能保持位置的原因。

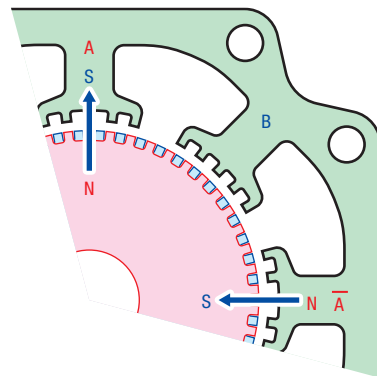


圖 3.4 A 相激磁後的狀態

3.3 配設間距和步級動作

A 相的小齒群和 B 相的小齒群位於 45° 的位置，但若將小齒的間距 7.2° 作為基準，則變為如下。

$$\frac{45}{7.2} = 6 \frac{1}{4} \quad (3.1)$$

就只偏差 4 分之 1 的間距。這個偏差稱為「配設間距」，是決定步進馬達磁氣構造的重要數字。

2) 捲有線圈的鐵芯和內圈的小齒部統稱為「主極」。

3) 念作「A bar 相」。

圖 3.5 表示 A 相被 S 極激磁後與 B 相的偏差。A 相小齒群與轉子小齒面對面時，B 相小齒群會與轉子小齒偏差 1.8° ，相當於配設間距。

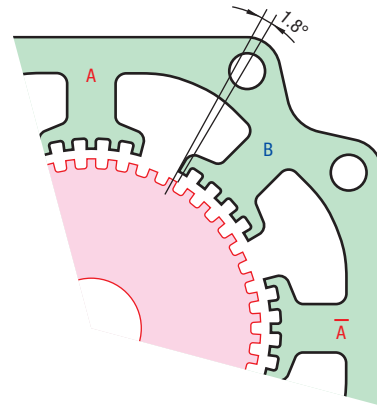


圖 3.5 A 相激磁後與 B 相的偏差

將激磁從 A 相切換到 B 相後，就會成為圖 3.6 的狀態。當激磁從 A 相切換到 B 相後，轉子旋轉了 1.8° 。這個相當於配設間距的旋轉角度，就是步進馬達的基本步級角度。

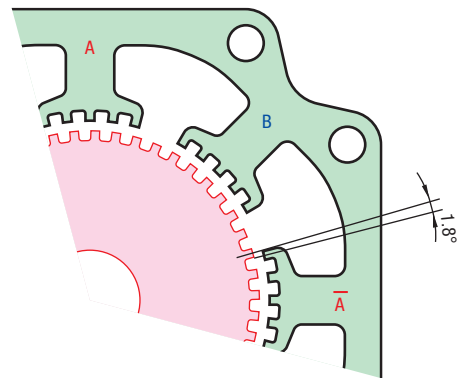


圖 3.6 B 相激磁後的狀態

此時，由於 \bar{A} 相主極的小齒偏差 1.8° ，將激磁從 B 相變為 \bar{A} 相後，會再旋轉 1.8° ，成為圖 3.7 的狀態。此時 A 相會變為和初期狀態相反的 N 極，與轉子的 S 極側互相吸引。 \bar{A} 相被激磁為 S 極時，同時 A 相則是被激磁為 N 極。因此， \bar{A} 相這個名稱除了用來稱呼定子與轉子的小齒相位相反的主極，也用來稱呼與 A 相激磁後磁性相反的狀態。

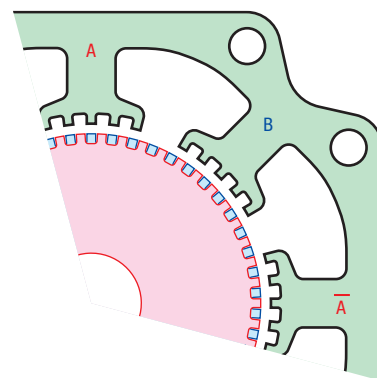


圖 3.7 \bar{A} 相激磁後的狀態

激磁每切換一次，就會重複小齒間偏差角度的動作，這就是步進馬達的動作。若脈波信號的頻率變高，激磁每次切換時就不會停止，將連續動作，但基本原理相同。

3.4 步級角度

3.4.1 相數和步級角度

如上所述，2 相步進馬達的配設間距為 $1/4$ 。圖 3.8 表示轉子 N 極側和上下主極為面對面狀態時小齒的偏差方式。紅字為轉子 N 極側的偏差量，藍字為 S 極側的偏差量。所有偏差量都是配設間距 $1/4$ 的整數倍，因此狀態的數量是 4 個。若將不同偏差方式的主極激磁，由於只會旋轉偏差的量，因此 2 相時，將小齒間距分為 4 等分後的角度就成了基本步級角度。

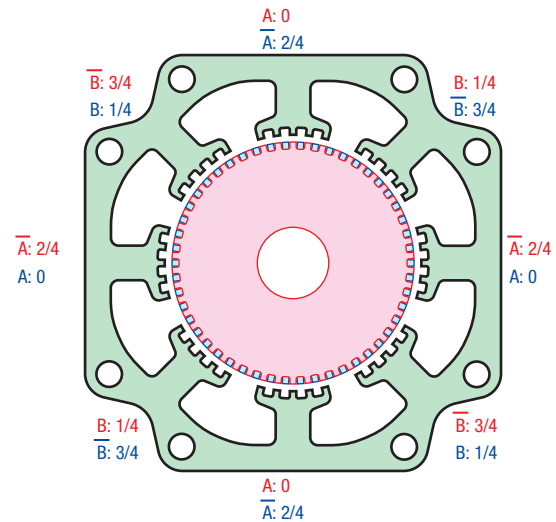


圖 3.8 2 相步進馬達小齒面對面的狀態

馬達中的線圈被分為好幾組。這個線圈的組稱為「相⁴⁾」。2 相步進馬達的線圈分為 A 相和 B 相 2 個相。電流通方向與 A 相相反的狀態稱為 \bar{A} 相，但在同個線圈改變極性的狀態不會列為不同的相。B 相和 \bar{B} 相也一樣。將電流方向列入考量，狀態數量就會變成相數的 2 倍。配設間距的分母 4 為相數的 2 倍，符合電流所造成的狀態數量。對應到各狀態的小齒偏差量為固定數，對應 0、 $1/4$ 、 $2/4$ 、 $3/4$ 的激磁相為 A、B、 \bar{A} 、 \bar{B} 。小齒偏差與相數所決定的電氣狀態數量相同，設計步進馬達時，首先要平均配置小齒偏差。

狀態數量與相數成正比，會變大。配設間距與之成反比，可更加細分，步級角度也會變小。理論上，相數沒有限制，所以只要增加相數，就可以產生細小的旋轉。但若增加相數，馬達和驅動回路會變得複雜，能產生的轉矩也會變小，因此實際使用的相數是 2 相、3 相、4 相、5 相。

3.4.2 小齒數和步級角度的關係

混合型步進馬達中最常使用的轉子小齒數 Z_R 為 50，與 60 多年前提出的原型相同。持續使用 $Z_R=50$ 不只是因為其為已固定的標準，轉矩和轉速等特性間也保持著極佳的平衡。

讓我們再看一次 2 相步進馬達，小齒偏差量 0、 $1/4$ 、 $2/4$ 、 $3/4$ 為表示小齒螺距（若 $Z_R=50$ 則 $360/50=7.2^\circ$ ）的比例。因此，增加小齒數會成反比，小齒間距變小，步級角度也跟著變小。也有馬達以此為目的，設定 $Z_R=100$ ，用於希望步級角度變小的狀況。

4) 原本表示相位的英文為 phase。三相交流中，將相位不同的電壓稱為 U 相 / V 相 / W 相，與之連接的線圈也同樣稱為 U 相 / V 相 / W 相。

3.4.3 決定基本步級角度

統整前述內容，步進馬達的基本步級角度與轉子小齒數 Z_R 和相數 n 成反比，能以下列公式求出。

$$\theta_S = \frac{360}{2n Z_R} \quad (3.2)$$

分母的 2 代表定子的主極可變為 N 極和 S 極 2 種狀態。

3.5 5 相步進馬達

5 相步進馬達如其名，是相數為 5 的步進馬達。通常主極數為 10，主極間的角度為 36° 。若轉子小齒數 $Z_R=50$ ，小齒螺距就會是 7.2° ，因此變為如下。

$$\frac{36}{7.2} = 5 \quad (3.3)$$

主極間距會被小齒間距整除，當 A 相被激磁，小齒間互相面對面時，其他相的小齒也會面對面。此時，即使切換激磁也不會造成旋轉。因此，5 相步進馬達在設計上會刻意改變主極的形狀，製造配設間距。

圖 3.9 表示 5 相步進馬達的構造。主極數為 10，以 36° 的間隔平均配置。轉子的小齒數和 2 相一樣為 50，小齒螺距為 7.2° 。為了製造配設間距，可以發現主極形狀有經過改變。外圈顯示的是以小齒間距為基準，當 A 相中轉子和定子小齒面對面時，其他主極中的小齒偏差量。紅字為轉子 N 極側的偏差量，藍字為 S 極側的偏差量。

比較以 2 相表示同樣關係的圖 3.8 後可發現，在 2 相中鄰接的主極偏差量 $1/4$ 變大為 $6/10$ 。這是為了要將鄰接主極的磁氣極性反轉的緣故。

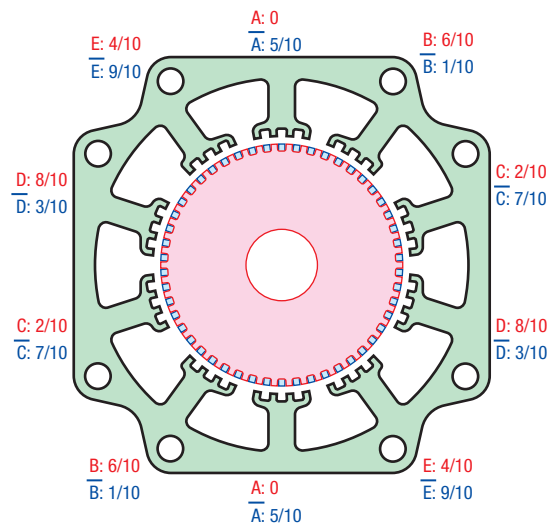


圖 3.9 5 相步進馬達的構造

當小齒的偏差量為連續時，如圖 3.10 所示，並排的主極會激磁成為相同極性。這種不平衡的磁極配置特性差。

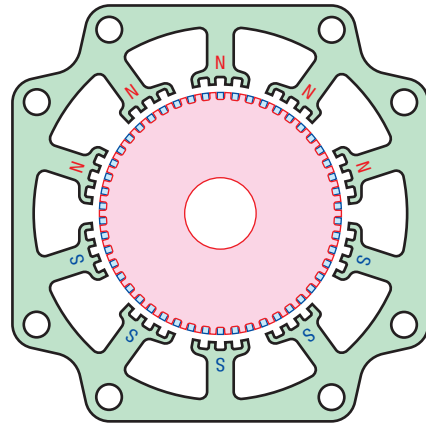


圖 3.10 鄰接極為相同極性時

實際上會如圖 3.11 所示，將極性平均配置。

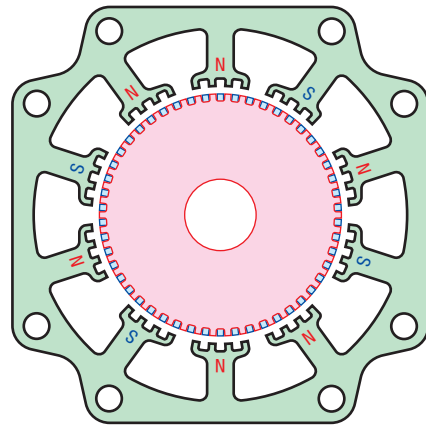


圖 3.11 5 相步進馬達的極配置

圖 3.12 是當 A 相定子小齒與轉子 N 極小齒面對面時，B 相中小齒狀態的放大圖。若以定子的的小齒為基準，N 極側小齒向右偏差 2.88° ，S 極側小齒向左偏差 0.72° 。因此，主極為了吸引 S 極的小齒而進行激磁後，將旋轉 0.72° ，成為圖 3.13 的狀態。

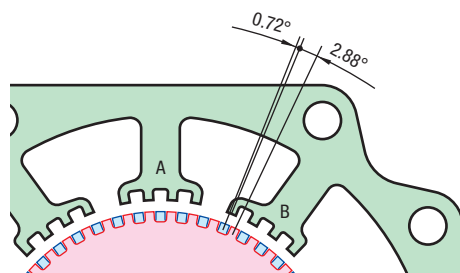


圖 3.12 A 相激磁後的狀態

圖 3.13 中，轉子 N 極側的小齒和 C 相主極的小齒偏差 0.72° ，因此接下來將 C 相激磁為 S 極後，將旋轉 0.72° 。5 相步進馬達就是不斷重複此動作。

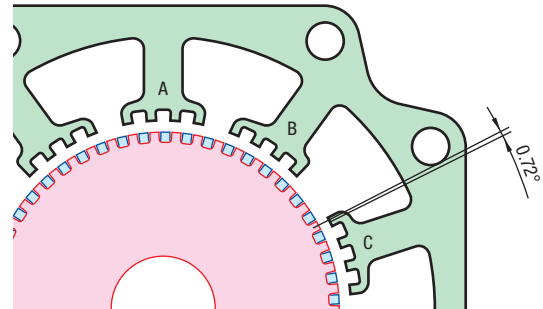


圖 3.13 B 相激磁後的狀態

4 步進馬達的特性

有許多能顯示馬達性能的特性。在此將舉出幾個能從馬達外部觀察到的代表特性，並說明看法和意義。

4.1 靜特性

表示停止狀態時的特性，是步進馬達的一大特徵。

4.1.1 角度－轉矩特性

a. 小齒的偏差和發生轉矩的關係

第 3 章的動作原理曾說明過，將電流流入定子主極的線圈而激磁後，此主極的小齒和轉子的小齒將互相吸引，並在面對面的狀態下停止。就如同指北針的針指向北方靜止。施加外力於指北針的針後就能改變其方向，同理，施加力偶（轉矩）於停止的步進馬達出力軸後，也能讓其稍微旋轉。此時，施加的轉矩與出力軸旋轉角度的關係稱為角度－轉矩特性（ θ - T 特性），是步進馬達動作中最重要的特性。圖 4.1 為角度－轉矩特性與各點上定子與轉子小齒的位置關係。轉矩的極性（正負）往右為正，往左為負。

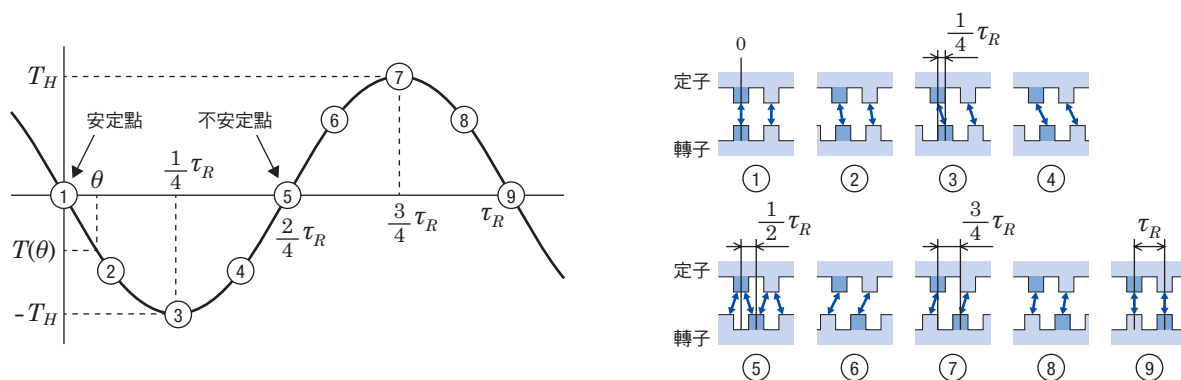


圖 4.1 角度－轉矩特性（ θ - T 特性）

①所表示的點為無外力時停止的位置。加上外力後從這點偏移，就會產生想返回的轉矩，這個位置稱為安定點。考量馬達發生轉矩的復原力，①即為潛在能量¹⁾的最小點。

在安定點①的附近，變形位移越大，拉回安定點①的轉矩就越大，外力和馬達轉矩會在平衡點停止（點②）。若再加上更多外力，變形位移和發生轉矩的比例關係會崩壞，坡度慢慢變緩，發生轉矩的大小在點③時為最大。此時的發生轉矩稱為激磁最大靜止轉矩，以 T_H 表示。

1) 位能。潛在能量的微分即為力。

若給予超過點③的變形位移，原本面對面的小齒間的距離將變大，往左方的力則會變小。同時會向旁邊的小齒靠近，往右方的力開始作用。因此，往左方的力將變得更小(點④)。若再給予更多變形位移並到達點⑤，原本面對面的小齒間的距離將與旁邊小齒的距離相同。由於此時雙方的吸引力達到平衡，發生轉矩為 0。以此點為界線，左側會發生朝左的轉矩，右側會發生朝右的轉矩，因此這個平衡為不穩定的平衡。此點稱為不安定點。

此時再給予更多變形位移，朝右側小齒的吸引力會變大(點⑥)，通過為最大轉矩 T_H 的點⑦後，力會變小(點⑧)，到達下一個安定點⑨。

從一個安定點到下一個安定點的變形位移和轉矩的關係，可大致以正弦波表示，因此可寫成下列公式。

$$T = -T_H \sin Z_R \theta_m \quad (4.1)$$

此處的 Z_R 為前述的轉子小齒數， θ_m 則為轉子的旋轉角度。由於表示角度的記號多使用 θ ，因此可將此特性簡寫為「 θ -T 特性」。從公式(4.1)可了解， θ -T 特性是以 $360/Z_R$ 為週期的週期函數。T 為表示時間週期的字母，以 T 的希臘字母小寫 τ_R 表示此週期。若轉子小齒數為 50，則 $\tau_R = 7.2^\circ$ 。 θ -T 特性的多寡與電流成正比，也可如下以比例常數 k_T 和電流 i 表示。

$$T = -k_T i \sin Z_R \theta_m \quad (4.2)$$

此比例常數 k_T 稱為轉矩常數。

也可以改變角度的表示方法，將公式(4.2)寫成下列公式。

$$T = -T_H \sin \theta_e \quad (4.3)$$

θ_e 為將電氣、磁氣現象輪完一輪的角度視為 360° 時的角度表示方式，稱為電氣角(electrical angle)。相對於此，公式(4.1)中的 θ_m 為實際「物體」旋轉的角度，由於是以機械測量，因此稱為機械角(mechanical angle)。電氣角與機械角之間的關係如下。

$$\theta_e = Z_R \theta_m \quad (4.4)$$

b. 利用 θ -T 特性的步級動作表現

θ -T 特性在每個被激磁的相以相同形狀、不同相位表現。圖 4.2 表示此特性，圖中將對應到 2 相步進馬達 A、B、 \bar{A} 、 \bar{B} 的 θ -T 特性重疊表示。

週期 τ_R 表示的是機械角，從圖可知道，若為電氣角則相當於 360° 。

θ -T 特性之間的相位差 $\frac{1}{4} \tau_R$ 相當於說明旋轉原理時出現的鄰接主極小齒的偏差，為電氣角 90° 的相位差。A 相激磁後的安定點位於圖中 0 的位置。

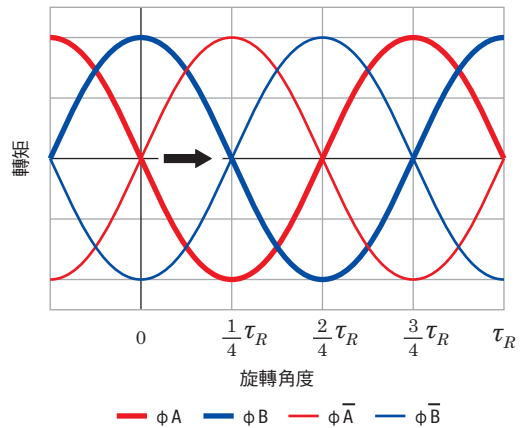


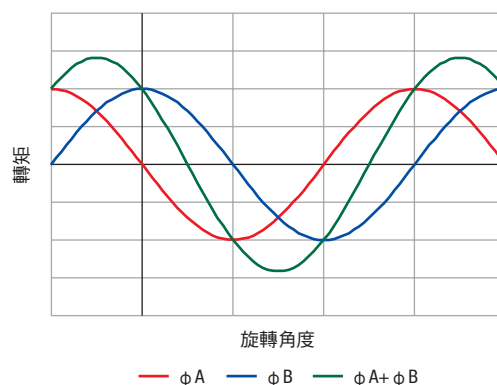
圖 4.2 每個相的 θ -T 特性

將激磁改為 B 相後，A 相的 θ -T 特性(紅)將消失，B 相的 θ -T 特性(藍)則會出現。B 相的 θ -T 特性中，0 的位置為正轉矩，也就是說，由於會發生朝右的轉矩，如圖中箭頭所示，轉子會朝右旋轉，移動至 B 相的安定點 $\frac{1}{4} \tau_R$ 所在位置。此處的說明是從 θ -T 特性的觀點來看步進馬達的動作，步級角度會是 $\frac{1}{4} \tau_R$ 。

c. 多個相被激磁時

目前為止是針對單一相激磁的情形進行說明，實際上是多個相同時激磁的情況較多。圖 4.3 是將各為相同電流值的 A 相、B 相的 θ -T 特性加上 A、B 兩相激磁時的情形。

A 相與 B 相會各自動作，因此只要將各相發生的轉矩加總，就可得到 2 個相激磁時的 θ -T 特性。將 1 個相激磁的狀態稱為 1 相激磁，將 2 個相激磁的狀態稱為 2 相激磁。

圖 4.3 2 相激磁後的 θ -T 特性

d. 以向量標示

若就振幅和相位來看， θ -T 特性可如圖 4.4 使用向量表示。

如圖所示，考慮實軸和虛軸²⁾構成的平面，假設 T_a 為表示 A 相轉矩的向量， T_b 為表示 B 相轉矩的向量，並將角度固定為電氣角 90° 。若兩者會隨轉子旋轉而逆時針旋轉，且各自向量實軸的射影表示的是轉矩，則圖 4.3 和圖 4.4 為等價關係。此時，2 相激磁的轉矩包含相當於最大轉矩的向量長和相位，以合成向量表示。

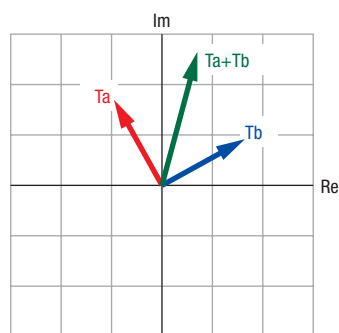


圖 4.4 轉矩的向量標示

即使轉子旋轉造成向量旋轉，各相轉矩和相位的關係相互固定，通常會如圖 4.5 所示，省略座標軸標示。此處表示 A、A \bar{B} 、B、B \bar{A} 、 \bar{A} 、 $\bar{A}\bar{B}$ 、 \bar{B} 、 $\bar{B}\bar{A}$ ，共 8 個向量。如 AB 這種記成 2 個字母的向量代表 A+B 之向量和的簡略標示。以向量間的關係表示各相轉矩的大小和相位就稱為轉矩向量。

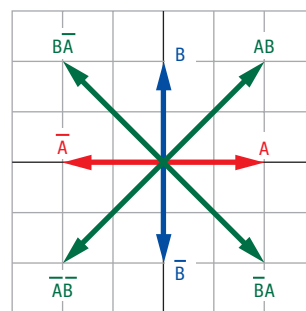


圖 4.5 2 相步進馬達的轉矩向量

向量間的角度表示的是電氣角的相位。2 相步進馬達基本步級角度的電氣角為 90° ，但若重複 1 相激磁和 2 相激磁，就能以一半的步級角度 45° 進行動作。轉子小齒數為 50 的 2 相步進馬達的基本步級角度為 1.8° ，能以一半角度的 0.9° 旋轉。這種改變激磁相數而將步級角度改為基本步級角度的 $1/2$ 的動作，就稱為半步級驅動。相對來說，以基本步級角度動作就稱為全步級驅動。

2) 以 2 維平面表示複數時，實數 (Real Number) 為橫向，稱為實軸 (Re)，虛數 (Imaginary Number) 為縱向，稱為虛軸 (Im)。

e. θ -T 特性的測量例子與無激磁保持轉矩

圖 4.6 是以多個電流將 2 相步進馬達激磁後，測量出的 θ -T 特性。轉矩大致上與電流成正比，此處重疊顯示了不同振幅的曲線。紅色的線為 2 相激磁的特性，藍色的線則為 1 相激磁的特性。由於轉子磁鐵的作用，電流為 0 時也會發生的轉矩稱為無激磁保持轉矩³⁾，此處以黑色的線表示。

2 相激磁的最大轉矩為保持轉矩 (T_H)。

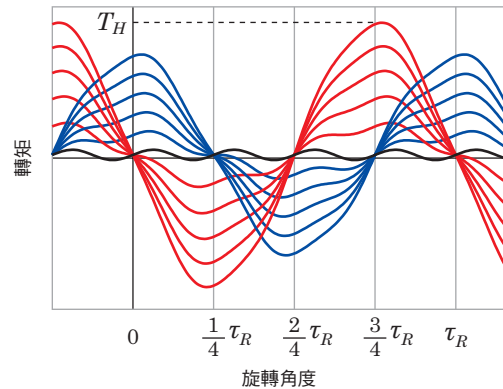
圖 4.6 θ -T 特性的例子

圖 4.7 是測量 1 次旋轉中的無激磁保持轉矩。大致上，一定的 OFFSET 起因於馬達中發生的損失，主要原因是鐵芯中的磁滯損。細微的變動則是由於各小齒吸引力的些微不平衡造成。

有時為了當作簡易剎車使用，無激磁保持轉矩要大越好，有時則要求損失少，因此越小越好。圖中紅色的線所標示的平均值為本公司的基準值。

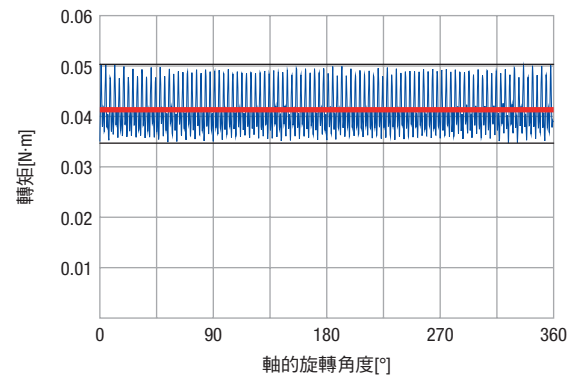
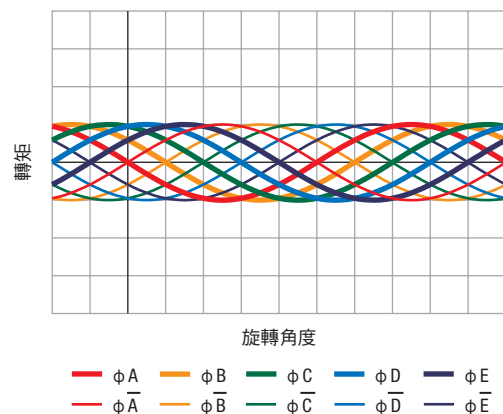


圖 4.7 無激磁保持轉矩的例子

f. 5 相步進馬達的 θ -T 特性

5 相步進馬達的轉子小齒間距可分割為 10 等分，如圖 4.8 所示，對應至各相的 θ -T 特性以相位差 36° 的正弦波表示。

圖 4.8 5 相步進馬達的 θ -T 特性
(1 相激磁)

3) 除了步進馬達，只要是使用磁鐵的馬達都會發生無激磁保持轉矩。在無刷馬達或伺服馬達中，則稱為頓轉轉矩。

圖 4.9 為 1 相激磁、2 相激磁、3 相激磁、4 相激磁及 5 相激磁的 θ -T 特性。

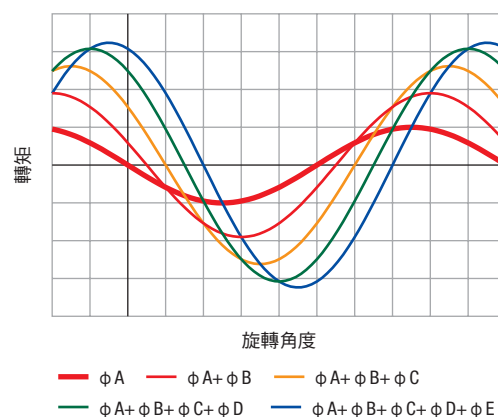


圖 4.9 將 5 相步進馬達以多個相激磁後的 θ -T 特性

由於 5 相步進馬達的相數多， θ -T 特性的圖十分複雜難懂。但若如圖 4.10 以轉矩向量表示，就可以立即了解各相的關係或是將多個相激磁後的情形。

從圖 4.10 可知，與 2 相步進馬達相同，相同激磁相數的步級角度 ($ABCDE \rightarrow BCDE\bar{A}$) 為基本步級角度，改變激磁相數後 ($ABCD \rightarrow ABCDE$)，就會成為半步級驅動。

由於各相的轉矩向量為 36° 的相位差，將 n 相激磁後的轉矩向量長度 $|T_n|$ ，在經過向量合成後結果如下。

$$T_1 = 1, T_2 \approx 1.90, T_3 \approx 2.62, T_4 \approx 3.08, T_5 \approx 3.24$$

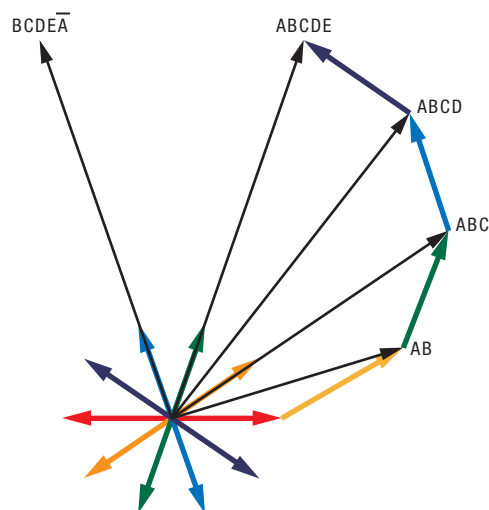


圖 4.10 5 相步進馬達的轉矩向量

4.1.2 停止精度

相較於透過脈波指示位置，步進馬達能以良好精度停止，但兩者間僅有些微差異。圖 4.11 表示的是步級角度 1.8° 的馬達，橫軸為步級數，縱軸為設定旋轉角度和實際旋轉角度。由於步進馬達的旋轉精度高，如此比較無法了解差異。

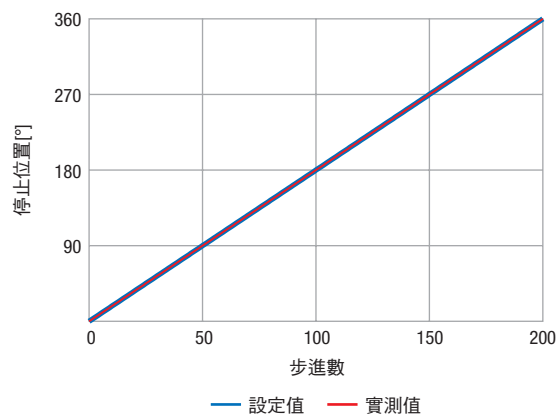


圖 4.11 每個步級的角度

若要表示從初始位置開始的實際旋轉角度與設定旋轉角度的差異，即如圖 4.12 所示。橫軸為步級的號碼。測量此偏差的結果稱為停止精度，以靜止角度誤差、步級角度誤差、遲滯角度誤差這 3 種誤差來評估。

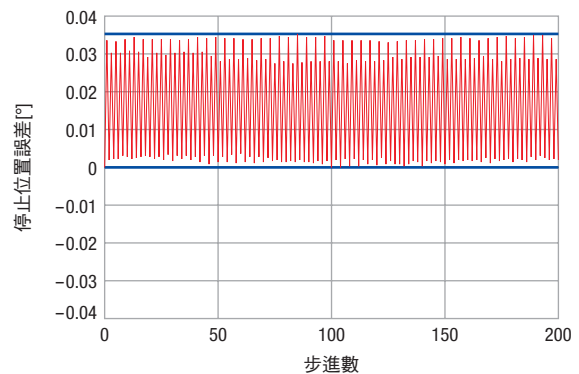


圖 4.12 每個步級的誤差（靜止角度誤差）

a. 靜止角度誤差

以任意一點為原點旋轉一圈，測量實際上的停止位置和理論上的停止位置之間的差，此結果就稱為靜止角度誤差（圖 4.12）。

圖 4.12 中，資料整體位於正數領域。這是由於測量角度時，經常是從初始位置測量的緣故。對步進馬達來說，初始位置不一定就是真的理想位置，因此若初始位置位於朝正方向偏離理想位置之處，則整體會朝負方向移動，若位於朝負方向偏離之處，則整體會朝正方向移動。因此，若初始位置和轉量為任意，可能會朝正負兩方偏離，偏差量為靜止角度誤差的範圍。

靜止角度誤差比起數值本身，更代表了整體範圍。此時，若要表示誤差大小，會以圖中藍色的線表示的正方向最大誤差值和負方向最大誤差值範圍的中間值表示。圖 4.12 的例子中，靜止角度誤差為 $\pm 0.0175^\circ$ 。

b. 步級角度誤差

圖 4.13 表示每個步級的實際旋轉角度與設定旋轉角度的差，稱為步級角度誤差。以此例而言，紀錄了每次旋轉角度和步級角度 1.8° 相差的大小。

由於步級角度誤差的正方向最大值和負方向最大值不同，若要表示精度，會以 $+0.339^\circ$ 、 -0.339° 表示各自的值。

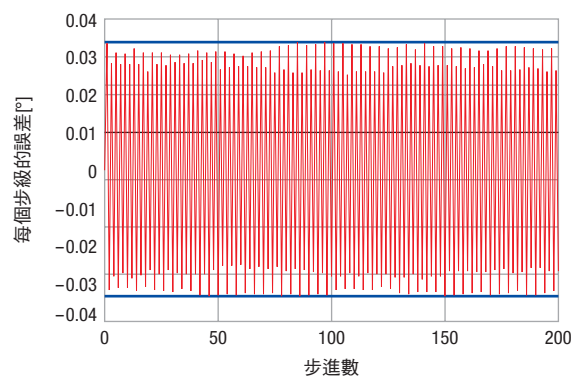


圖 4.13 步級角度誤差

c. 遲滯角度誤差

以正轉測量靜止位置的結果與以逆轉測量的結果之差如圖 4.14 所示。此結果顯示，即使以脈波指示的位置相同，旋轉方向仍會造成停止位置產生些微差異。這種旋轉方向造成的停止位置差異稱為遲滯角度誤差，要進行高精度定位時，須特別留意。

遲滯角度誤差是由於用於轉子和定子鐵芯的電磁鋼板的遲滯所產生。

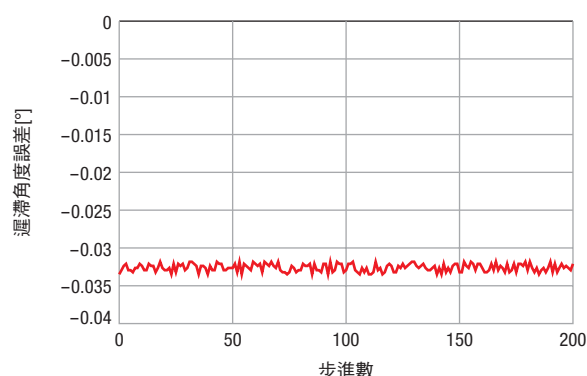


圖 4.14 遲滯角度誤差

d. 誤差原因

有幾個原因會造成角度誤差。其中影響最大的是各相轉矩的誤差。將靜止角度誤差（圖 4.12）放大，以圖 4.15 進行說明。圖中也顯示了激磁狀態的相。

可以看出每切換激磁一次，就會重複產生大小誤差。使用轉矩向量就很容易了解這個原因。

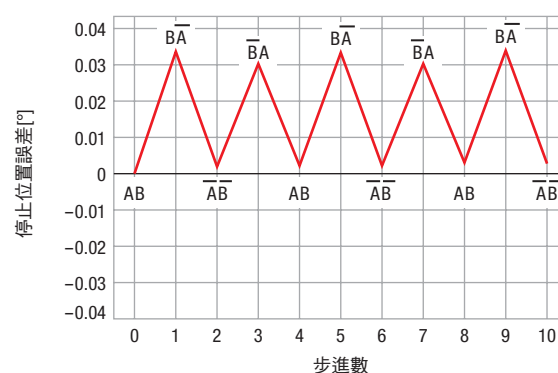


圖 4.15 靜止角度誤差（放大）

圖 4.16 中所舉的例子是在 2 相轉矩向量（圖 4.5）中，將 A 相長度延長 20%，此變化使得 2 相激磁的向量方向改變。激磁的組合按照 $AB \rightarrow B\bar{A} \rightarrow \bar{A}\bar{B} \rightarrow \bar{B}A \rightarrow$ 改變後，向量間的角度也依照大 \rightarrow 小 \rightarrow 大 \rightarrow 小 \rightarrow 變化。因此，靜止角度誤差也會如圖 4.15 變化。

造成各相轉矩不相同的原因為 A 相和 B 相磁力有差異，或線圈電流不同，這兩者都會造成同樣的角度誤差。

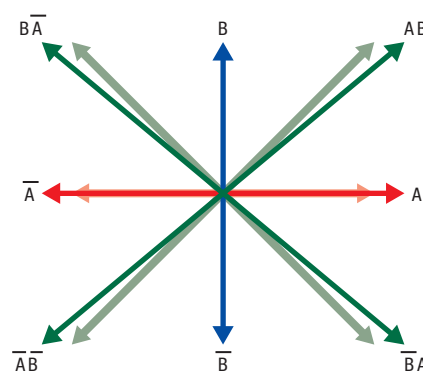


圖 4.16 轉矩不平衡造成的向量偏差

如圖 4.17 所示，無激磁保持轉矩也會造成角度誤差。

通電後發生的轉矩，即使如圖中紅色細線所示為理想的正弦波，在和綠色的線所表示的無激磁保持轉矩重疊後，實際的轉矩就會如紅色粗線所示產生歪斜。以藍色所表示的 B 相也是一樣。各自的安定點，也就是轉矩為 0 時的點的間隔，和無無激磁保持轉矩時不同（以黑色圓圈圈起的部分）。此差即為造成角度誤差的原因。

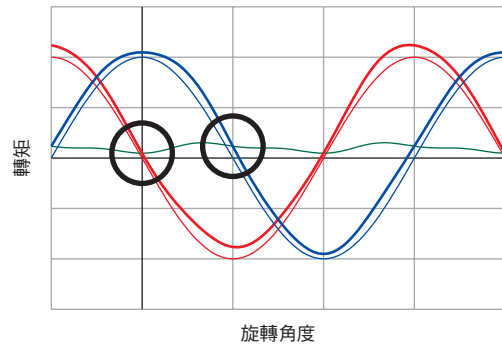


圖 4.17 無激磁保持轉矩對角度精度的影響

4.2 過渡特性

步進馬達開始運轉時、停止旋轉狀態時，或是轉速變化等等狀態變化時的動作稱為過渡特性。在此介紹幾個代表性的動作。

4.2.1 1 步級響應

圖 4.18 為靜止狀態下，輸入單脈波時的響應，稱為 1 步級響應。此圖以時間軸方式觀察在動作原理時說明的步級角度動作，這種 1 步級響應是步進馬達動作的基礎。轉子到達目標位置（圖中為 1.8° ）後，會進行慣性慣量和 θ -T 特性的復原力造成的衰減振動，然後在目標位置停止。紅色虛線的包絡線表示從步級角度進入 $\pm 5\%$ 以下的時間，稱為整定時間⁴⁾，是馬達停止時間的基準。

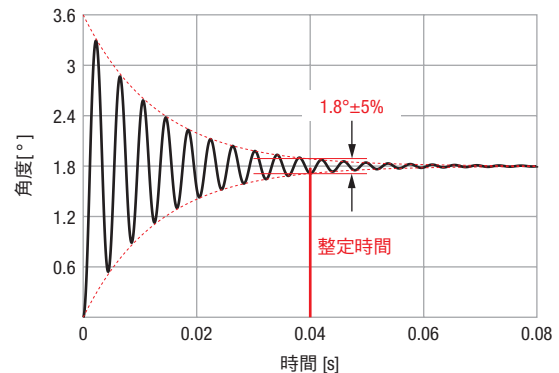


圖 4.18 1 步級響應

圖 4.19 將 1 步級響應朝時間方向放大。起動後，最初到達目標位置的時間稱為上升時間，並作為起動性的基準。

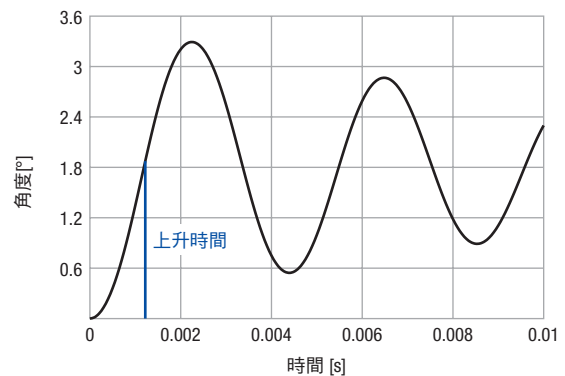


圖 4.19 1 步級響應(放大)

4) Settling time。指的是從動作指示結束到實際動作結束為止的時間。

下列公式表示的是衰減振動，公式中的 J 為慣性慣量， D 為黏性係數， T_H 為保持轉矩， Z_R 為轉子小齒齒數，可算出 1 步級響應的近似值。

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D \frac{d\theta_m}{dt} + T_H \sin Z_R \theta_m = 0 \quad (4.5)$$

第 1 項為慣性慣量乘上加速度的加速轉矩，第 2 項為轉速乘上黏性係數的黏性轉矩，第 3 項為馬達的發生轉矩，也就是 θ -T 特性。由於此公式為超越方程式，沒有能以初等函數表示的解，若將復原力視為與變形位移成正比的振幅在小範圍內，下列公式可以求出近似值。

$$\theta \approx \theta_S e^{-\frac{D}{2J}t} \cos\left(\frac{\sqrt{4JT_H Z_R - D^2}}{2J}t\right) \quad (4.6)$$

此處的 θ_S 為步級角度。振動的共振頻率 f_{res} 能以下述公式求出。

$$f_{res} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T_H Z_R}{J} - \frac{D^2}{4J^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{T_H Z_R}{J}} \quad (4.7)$$

右邊是沒有黏性項的共振頻率，由於步進馬達的轉矩和小齒數很大，即使不考慮黏性項，共振頻率也不會有太大的不同。

4.2.2 起動時的動作和響應性

步進馬達在起動、停止的響應性十分優良，乍看之下能瞬間響應脈波。然而，細看可發現動作有延遲。

圖 4.20 表示從停止狀態以一定的脈波速度起動時的轉子動作。基本上步級響應會重疊，但由於振動途中會輸入下個脈波，根據輸入的時序不同，有時振動會像綠色的線一樣變大。

關於剛起動的部分(以紅圈圈起來的部分)，可看出不管什麼情形下都為相同動作。這是因為輸入第 2 個脈波之前為 1 步級響應的動作。各動作的平均斜率即為各自的平均速度。關於剛起動的 1 步級響應動作中的斜率，可看出能以更高的轉速起動。

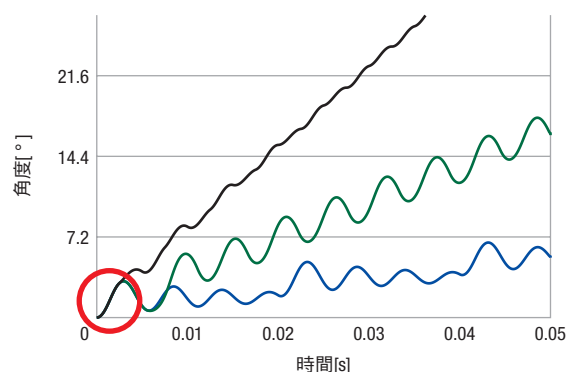


圖 4.20 起動時的動作

圖 4.21 表示以 2 個有些微差異的速度起動後的情形。黑色的線為轉子的動作，階梯狀的紅色線則為安定點的位置。藍色的線為兩者的差，也就是轉子的延遲。實線為能夠起動的速度，虛線為無法起動會失步的速度。

至 2 ms 左右的動作幾乎相同，在這之後的動作則有很大的差異，造成此分歧的就是「延遲」的量。由於轉子有慣性，起動的瞬間會產生延遲。也可以 θ -T 特性來看動作中的情形，安定點附近會發生朝向安定點的力，此力會造成轉子加速。延遲小於 3.6° ($\tau_{R/2}$) 時，朝向安定點的轉矩會造成加速，但若超過 3.6° ，由於轉矩會朝負方向反轉而減速，將無法追上。這種無法追上指令的狀態就稱為「失步」，是當加速度或負載過大時發生的現象。

不只脈波速度會決定延遲的大小，負載的摩擦或慣性慣量也有影響，不論是哪种情形，只要延遲超過 3.6° ，就會產生失步。如上所述，理解步進馬達的動作時，需時常謹記 θ -T 特性。

圖 4.22 是將時間範圍擴大來觀察圖 4.21 中實線的動作。可看出起動時的延遲造成的振動動作逐漸趨緩。

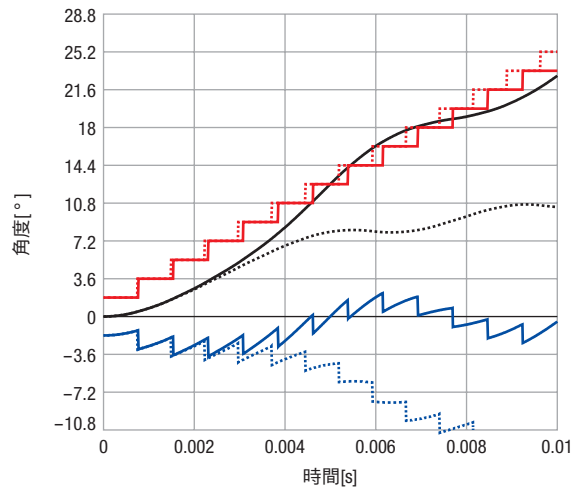


圖 4.21 以高速起動的情形

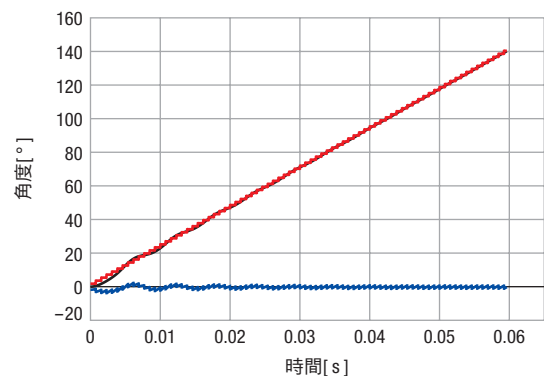


圖 4.22 以高速起動時的動作

4.2.3 停止時的動作

細看可發現，停止時也並非和脈波同時停止。圖 4.23 為 $t=0$ 時停止脈波的動作。在那之後，角度 θ 為安定點的位置。

黑色的線表示轉速不太高時的動作，脈波停止後，稍微過衝之後才衰減振動進而停止。藍色的線表示高轉速時的動作，雖然過衝到不安定點 3.6° 附近，但在快到達前就返回安定點。

紅色的線表示轉速更高的情形，過衝超過了 3.6° 。超過不安定點時，轉矩會反轉，因此會朝正轉方向加速，移動至下個安定點 7.2° 後停止。如上所述，在高轉速時停止，可能會產生超過正常位置的情形。

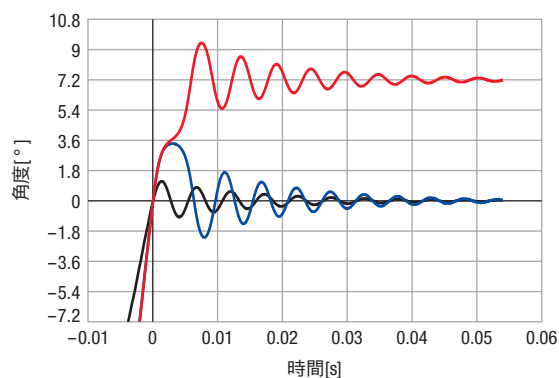


圖 4.23 停止時的動作

4.2.4 慣性負載的影響

即使馬達的發生轉矩相同，加上慣性負載後，加速度會變小，動作將變得緩慢。圖 4.24 以 1 步級響應表示慣性負載的影響。黑色的線為馬達單體時的狀態，紅色的線為附加轉子 3 倍慣性慣量後的狀態。由於總慣性變為 4 倍，振動週期會變為 2 倍，振動的衰減時間則變為約 4 倍。

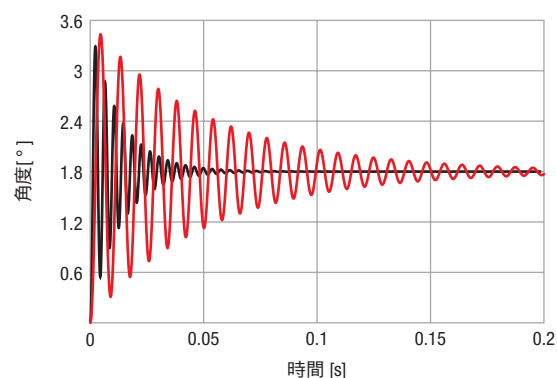


圖 4.24 慣性造成的步級響應變化

圖 4.25 表示的是慣性負載帶給起動時動作的影響。此處也顯示了附加 3 倍慣性慣量時的情形。

紅色的線為指示位置，黑色的線為轉子位置，藍色的線表示延遲，另外實線為馬達單體，虛線則表示附加慣性時的情形。可以看出慣性增加後，動作變得緩慢，造成失步。此時，需要讓速度變得更慢。

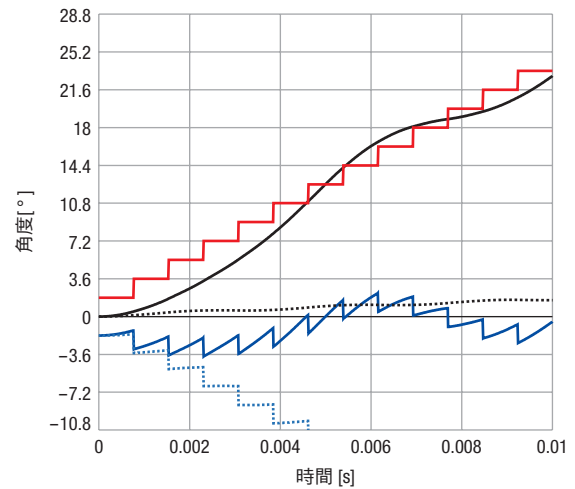


圖 4.25 慣性造成的起動時動作變化

圖 4.26 表示負載慣性與起動可能速度(脈波速度)的關係，稱為「慣性負載 - 自起動頻率特性」。橫軸表示以轉子慣性為基準的比。

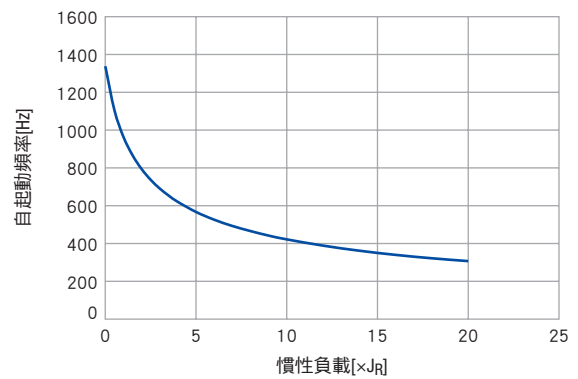


圖 4.26 慣性負載 - 自起動頻率特性

在馬達轉矩沒有太大變化的範圍內，此特性可以下列公式求出近似值。下列公式中， f_0 為無負載時的自起動頻率， J_R 為轉子的慣性慣量， J_L 為負載的慣性慣量。

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{J_L}{J_R}}} \quad (4.8)$$

4.2.5 摩擦負載的影響

有摩擦負載時，轉子的動作也會變緩慢。此情形如圖 4.27 所示。

在此例中，加上了保持轉矩約 10% 的摩擦負載。摩擦負載雖不會影響振動的頻率，但摩擦負載會吸收振動的能量，造成振動加速衰減。另外，發生轉矩和摩擦負載會在彼此平衡的位置停止，因此會在偏離安定點的位置停止。也因此可了解到有摩擦負載時，停止精度將變差。

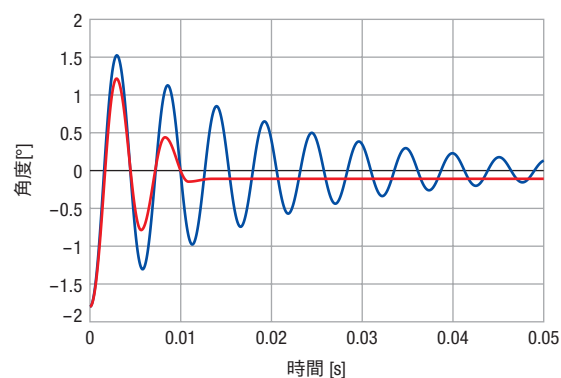


圖 4.27 摩擦負載造成的步級響應變化

有摩擦負載時，能用於馬達起動的轉矩會減少。相對來說，馬達以某轉速運轉，其發生轉矩減去起動所需的轉矩後，剩下的轉矩可看作是作為負載所容許的轉矩。這個作為負載所容許的轉矩即為引入轉矩。

起動所需的轉矩可透過下列公式概算得出。

$$T_a = J \frac{\theta_S^2}{\tau_R} \frac{2\pi}{180} f^2 \quad (4.9)$$

此公式中， J 為馬達軸換算的總慣性慣量， θ_S 為步級角度， τ_R 為轉子小齒間距， f 為起動頻率。此公式中雖含有大量近似值，但在選用步進馬達時，為了避免過渡動作造成的不穩定，通常會預估足夠的範圍，因此沒有問題。

將近似值設為較少時，可導出下列公式。

$$f = \frac{2 \times 180}{\pi \theta_S} \sqrt{\frac{T_M(f)}{Z_R J_R}} \sqrt{\sqrt{1 - \left(\frac{T_L}{T_M(f)}\right)^2} - \frac{T_L}{T_M(f)} \cos^{-1} \frac{T_L}{T_M(f)}} \quad (4.10)$$

此處， $T_M(f)$ 為脈波速度 f 的馬達轉矩。此公式兩邊都有 f ，由於右邊出現反三角函數，需要方程式計算的解法。

圖 4.28 為舊公式(4.9)和提案公式(4.10)的比較結果。作為參考，圖中也顯示了透過方程式計算的起動模擬結果。系統的阻尼器係數造成了提案公式與數值模擬的差，要正確表示過渡動作時，也需要提高參數的精度。

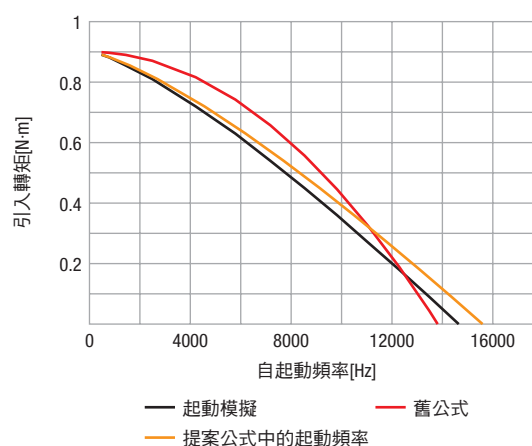


圖 4.28 公式造成的差

4.3 動態特性

馬達連續動作時的特性稱為「動態特性」。

4.3.1 運轉速度－轉矩特性

圖 4.29 為表示步進馬達運轉時的轉速和輸出轉矩關係的特性圖，稱作運轉速度－轉矩特性。橫軸為馬達轉速或是脈波速度，縱軸則為馬達的輸出轉矩。此特性是為了判斷是否能讓連接馬達的裝置運轉，是選擇馬達時最重要的特性。

運轉速度－轉矩特性並非光靠馬達決定，組合的驅動器也有很大的影響。

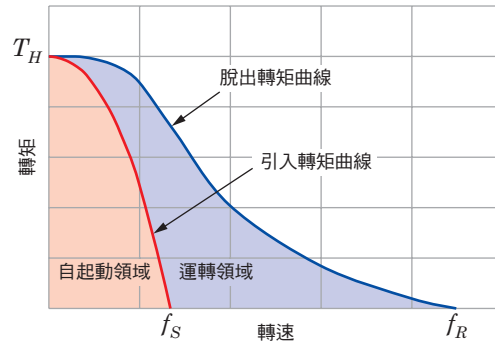


圖 4.29 運轉速度－轉矩特性

a. 激磁最大靜止轉矩 (T_H 、保持轉矩)

從外部將轉矩加至停止狀態的馬達軸時，能夠保持位置的最大轉矩就稱為激磁最大靜止轉矩，若再加上更多轉矩，就會開始旋轉。激磁最大靜止轉矩大致上與流經線圈的電流成正比。

額定電流流經馬達時的激磁最大靜止轉矩為馬達固有的值。

b. 脫出轉矩曲線

將負載轉矩慢慢加至運轉中的步進馬達時，負載轉矩在超過脫出轉矩之處會追隨不上脈波信號，造成無法旋轉，進而失步停止。失步前的轉矩稱為此轉速的脫出轉矩。脫出轉矩曲線結合了各轉速的脫出轉矩，根據不同的馬達和驅動器的搭配，曲線將極為不同。

c. 最大響應頻率 (f_R)

最大響應頻率為脫出轉矩曲線的最大速度點。表示馬達和驅動器的搭配下能夠旋轉的最高速度。

d. 最大自起動頻率 (f_S)

最大自起動頻率指的是不設定加速時間，自停止狀態開始能追隨上所給予的指令速度時的最大速度。為了以高於最大自起動頻率的的速度旋轉，以最大自起動頻率以下的速度起動後，需要進行加速以達到目標速度。此操作稱為緩慢加速。

在高速旋轉下，停止時也需要減速。此操作稱為緩慢減速。

e. 引入轉矩曲線

摩擦負載和慣性負載會造成自起動頻率降低。即使有這些負載轉矩，還是會可實現自啟動運轉，因此將摩擦負載和自起動頻率的關係稱為引入轉矩曲線。將公式(4.10)以圖表示後就是引入轉矩曲線。

f. 自起動領域

指的是座標軸和引入轉矩曲線圍住的領域。此領域中，不設定加減速時間就能起動、停止。

g. 運轉領域 (Slew 領域)

指的是引入轉矩曲線和脫出轉矩曲線之間的領域。由於在此領域中無法以自起動運轉直接到達希望的速度，需要從自起動領域開始進行加速運轉。為了讓步進馬達以高速旋轉，需要使用運轉領域。

4.3.2 輸出

輸出也稱為功率，表示每秒可產生的能量。馬達可透過轉矩和轉速的乘積來計算， P [W] 為輸出， T [N · m] 為轉矩， ω [rad/s= s^{-1}] 為轉速，可以下列公式求出。

$$P = T\omega \quad (4.11)$$

將轉速表示為 N [r/min] 後，就會變成下列公式。

$$P = \frac{2\pi}{60} T \cdot N \quad (4.12)$$

若是像輸送帶這種用於動力的用途，多能依照經驗，從負載類型和機械裝置大小判斷所需的輸出，並根據輸出選擇馬達。但像步進馬達這種定位用途的馬達，比起固定的輸出值，一般是根據與加減速性能有緊密關聯的轉矩的大小來選擇。因此，轉矩可說是步進馬達最重要的特性。

另外，步進馬達低速時的轉矩，雖然會有固定的轉矩值，然而與輸出有密切關係的高速時轉矩，會因驅動器（驅動回路）的不同產生極大的變化，這也是步進馬達不採用輸出標示的原因之一。

4.3.3 振動特性

一般會以速度觀測馬達旋轉中的動作。東方馬達使用 DC 測速發電機 (1000 r/min、3 V 輸出) 來觀測步進馬達的速度。

圖 4.30 表示多個速度中 DC 測速發電機的輸出波形。

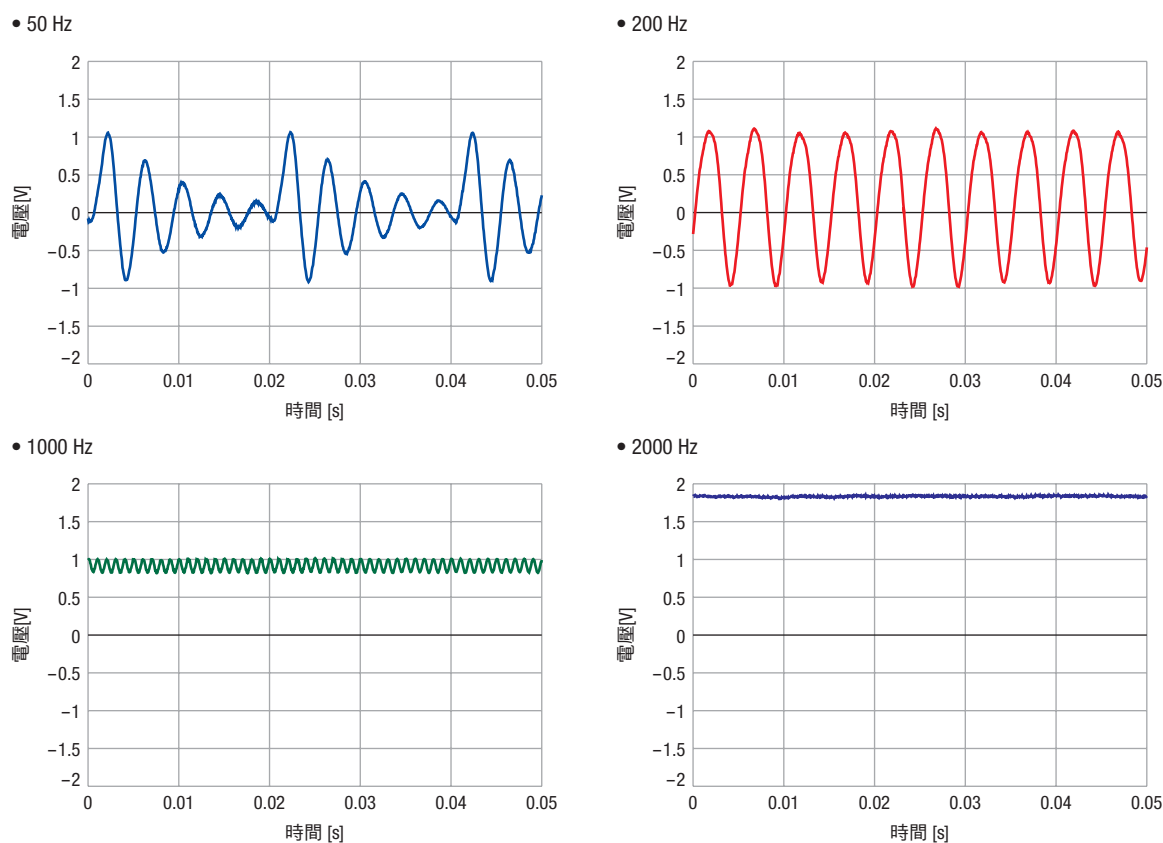


圖 4.30 以 DC 測速發電機觀測波形

步進馬達看起來雖是以一定速度旋轉，但細看可發現速度會變動。

如圖 4.31 所示，電壓變動和速度變動的關係為正比關係。

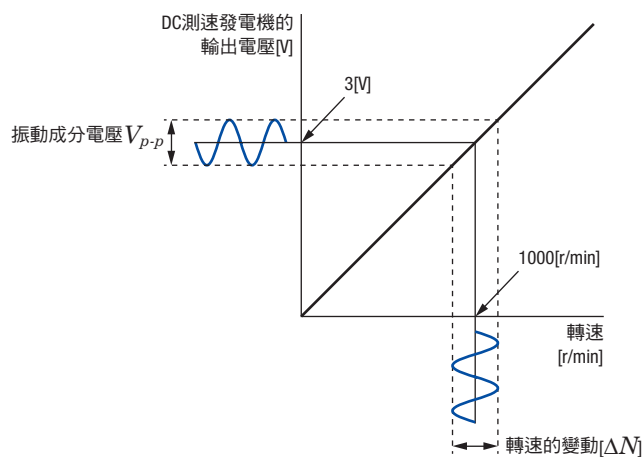


圖 4.31 電壓變動與速度變動的關係

橫軸為馬達的速度，縱軸為 DC 測速發電機輸出電壓的漣波，此即為振動特性。圖 4.32 是以全步級驅動 2 相步進馬達時的振動特性。

會產生振動(速度變動)是因為有轉矩變動的緣故。以下介紹幾個原因。

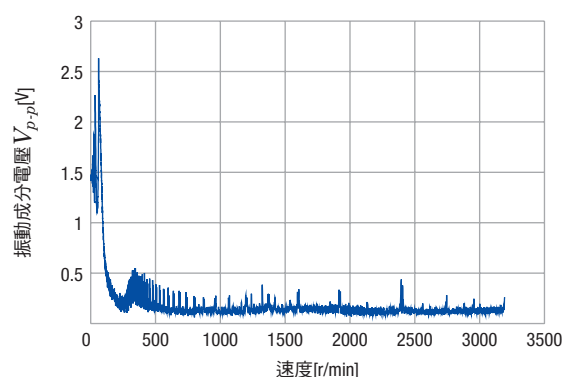


圖 4.32 振動特性(2 相)

低速下的大振動是由於步級動作時的轉矩變動。激磁的切換代表 θ -T 特性在極短的時間內移動，因此如圖 4.33 所示，會產生轉矩跳躍，速度因此變動。

步級角度相對於 θ -T 特性週期的比例越小，激磁切換時的轉矩變動就越小，振動也越小。圖 4.34 為步級角度小的 5 相步進馬達的情形。

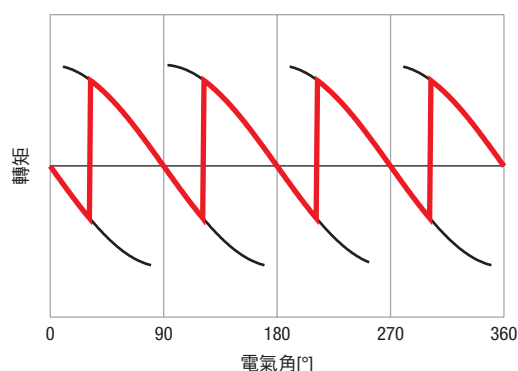


圖 4.33 激磁切換時的轉矩變動(2 相)

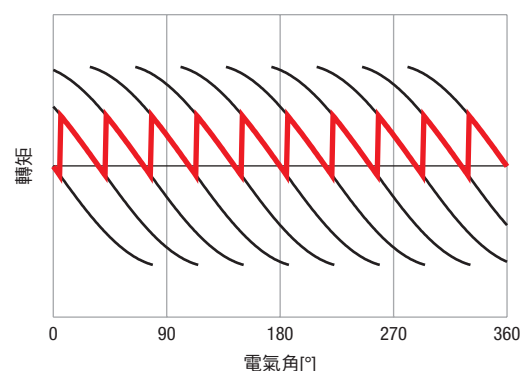


圖 4.34 激磁切換時的轉矩變動(5 相)

如圖 4.35 所示，即使是利用回路讓電流細微變化，並細分步級角度的微步級技術，也同樣能減低振動。

由於轉矩會與流經線圈的電流成正比，電流變動時，轉矩會跟著變動，有時會造成振動。例如，馬達的轉速因為負載變動而不安定，電流因此變化。此時，驅動器會為了將電流恢復而改變輸出電壓，但若此操作過多或控制速度太慢，有時會加深馬達的速度變化，讓振動情形變得更嚴重。

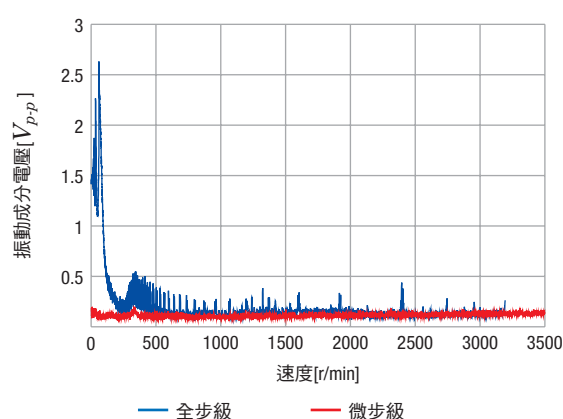


圖 4.35 微步級的效果

4.3.4 同步安定性

有負載且以一定速度旋轉的狀態下，負載轉矩和發生轉矩會在動作點達到平衡。圖 4.36 比較了步進馬達與同步電動機⁵⁾的安定性。圖中的 p 為極對數⁶⁾，小齒數為 50 的步進馬達會是 $p=50$ 。同步電動機的極對數有多種可能，圖 4.36 中設為 $p=5$ 。步進馬達以外的同步電動機為了按照指令動作，會一邊改變轉矩一邊運轉，因此系統的安定性與驅動器的性能有密切關係。為了比較馬達本身的安定性，圖 4.36 將最高轉矩設為相同大小，在加上最高轉矩一半的負載轉矩，在此狀態下將動作點設於 0° 位置進行比較。

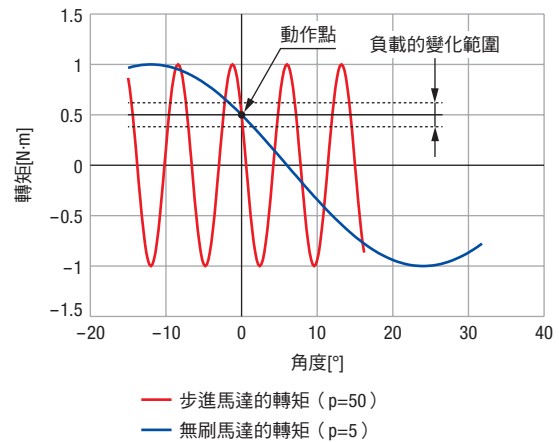


圖 4.36 有負載時的動作點比較

細實線為負載轉矩，紅色的線為步進馬達的轉矩，藍色的線則為無刷馬達的轉矩。發生轉矩和負載達到平衡之處為動作點，若負載固定，則兩者並無差異。虛線表示負載轉矩的 $\pm 20\%$ （最高轉矩的 10% ）。極數多，其轉矩斜度也大，因此負載變動的位置變動將變小。此時，位置的變動範圍會相差 10 倍。

圖 4.37 是朝橫向放大後的結果，能夠幫助理解此關係。

當無刷馬達有負載變動時，位置、速度的變化範圍大，有時會偏離同步，為了避免此種情形發生，需要使用編碼器或霍爾 IC 等來監視轉子位置。步進馬達轉矩變動的變動範圍小，因此從同步偏離的可能性低，多數情形下，不需檢知轉子位置就能進行運轉。這就是步進馬達能夠以開回路動作的原因。

步進馬達透過小齒製造轉子磁極，因此與其他馬達相比，能夠擁有較多極數。小齒數為 50 時會有 100 極，小齒數為 100 時則會有 200 極。其他種類的馬達很少超過 10 極，此差異造成了同步性的差異。

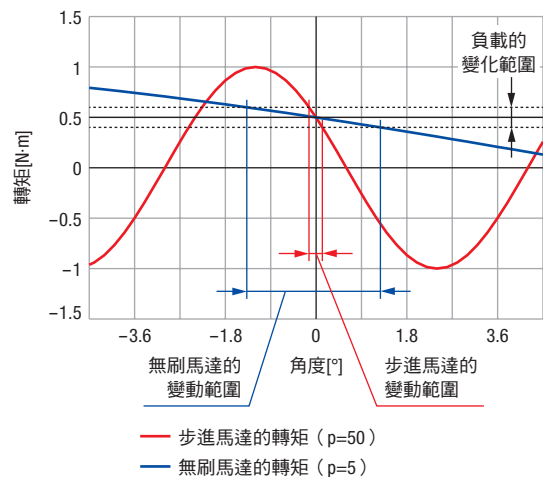


圖 4.37 負載變動與位置的變動範圍

5) 磁極不會在轉子上移動的馬達。步進馬達就是一種同步電動機。相反概念為感應馬達。

6) 轉子上的 N/S 極對數

4.4 溫度特性

4.4.1 步進馬達的發熱

馬達是將電能轉換為機械能的裝置。轉換時會伴隨損失，轉換效率並非 100%。小型馬達發生損失的部位主要是線圈和鐵芯。

由於線圈多由銅線所製，線圈發生的損失稱為「銅損」。銅損 (P_c、Copper Loss) 是將電流流入線圈電阻後產生的焦耳損，將 n 作為相數， i 作為相電流實效值， R 作為相電阻，可以下列公式計算。

$$P_c = ni^2 R \quad (4.13)$$

為了讓通磁效率更好，馬達或變壓器等應用磁力的裝置會使用鐵芯。雖然鐵芯的材料是以減少損失為目標製造的電磁鋼板，但當內部磁力大小或方向改變，還是會產生損失。

在鐵芯發生的損失稱為「鐵損」。鐵損 (P_i、Iron Loss) 可分為磁滯損 (P_h、Hysteresis Loss) 和渦流損 (P_e、Eddy Current Loss)。

磁滯損為鐵芯中改變磁力方向所需的能量，其大小會與代表磁力強度的磁通量密度之 1.5~2 次方成正比，並與變化速度 (頻率) 的 1 次方成正比。渦流損為磁力變化後，鐵芯中引發的電流所產生的焦耳損，大致上各與磁通量密度及頻率的 2 次方成正比。此電流以圓環狀產生在磁力線周遭，因此稱為渦電流。

4.4.2 轉速與溫度

圖 4.38 的轉速－損失特性表示定電流驅動器中馬達速度與損失的關係。

低速運轉下，磁力變化的頻率低，因此損失幾乎都為銅損。隨著速度上升，損失也增加，這是因為鐵損增加的緣故。尤其是渦流損與頻率的 2 次方成正比，造成了急速的變化。高速運轉下，鐵損、銅損均降低，但全損失上升，一般認為這是因為滾珠軸承或空氣阻力造成了機械損增加，此為力學損失。

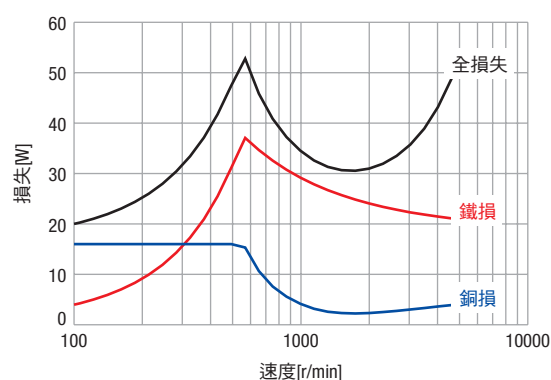


圖 4.38 轉速－損失特性

圖中央附近出現了損失的最高值，高速側中的損失為降低狀態。頻率增加，損失卻降低，這是因為電流或磁通量密度降低。圖 4.39 與圖 4.38 為相同條件下，表示馬達施加電壓、馬達電流及鐵芯磁通量密度的圖。

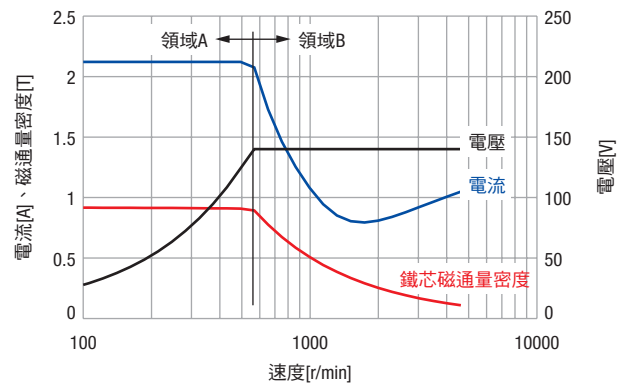


圖 4.39 速度與狀態的變化

從驅動器看到的馬達電阻阻抗與馬達內部產生的電壓大致上與速度成正比，會越來越高，為了與之抗衡，讓一定的電流通過，必須提高電壓。從低速到 680 r/min 附近的領域 A 中，電壓正在上升。磁通量密度幾乎沒有改變，因此在頻率的影響下鐵損變高，全損失也變高。在此速度範圍中，電流會保持固定，因此稱為「定電流範圍」。

速度較高的領域 B 中，電壓為可輸出的最大值。因此相對於速度，電流變小，銅損也逐漸減少。在此範圍中，電流產生的磁力會抑制磁鐵產生的磁力，所以磁通量密度也會降低。因此即使頻率變高，鐵損依然減少。此範圍中的電壓固定，因此稱為「定電壓範圍」。

定電流範圍和定電壓範圍的界線位於低速，為了能輕易確認變化，將圖 4.38 到圖 4.40 製作成半對數圖表⁷⁾。

損失會變成熱，讓馬達溫度上升，因此以損失大的速度運轉時，溫度也會變高。圖 4.40 在圖 4.38 的損失資料上，加入了有散熱板的情況下連續運轉時外表溫度上升的資料。圖 4.41 以損失和溫度上升的關係描繪同份資料，可看出兩者幾乎為正比關係。

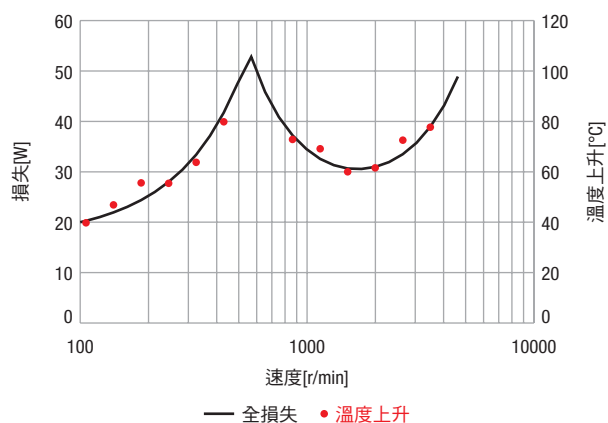


圖 4.40 轉速－損失特性、溫度上升

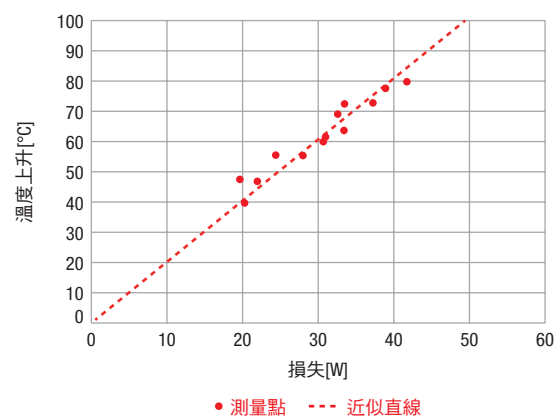


圖 4.41 損失與溫度上升的關係

7) 以單軸為對數的圖表。低速側顯得寬廣，高速側顯得狹窄。

4.4.3 運轉週期與溫度

步進馬達大多用於定位，很少連續旋轉，主要用法是週期運轉，也就是重複旋轉和停止。此時，平均損失 P_{ave} 可以下列公式表示。此公式中， D 為運轉週期， P_{run} 為運轉時的損失， P_{stop} 為停止時的損失。

$$P_{ave} = P_{run} \times D + P_{stop} \times (1 - D) \quad (4.14)$$

平均損失相對於運轉週期會直線變化，溫度則相對於損失會大致上呈直線，因此可預想馬達溫度相對於運轉週期也會直線變化。圖 4.42 所舉的例子中，週期 100% (連續運轉) 時的溫度上升為 100°C，停止時的溫度上升為 40°C。利用週期與溫度上升的直線關係，可知溫度上升為 80°C 時的週期是 67%，或是週期 40% 時的溫度上升約為 64°C。

如圖 4.41 所示，嚴格來說，由於溫度和損失並不完全是直線關係，週期和溫度的關係也並非那麼嚴謹。

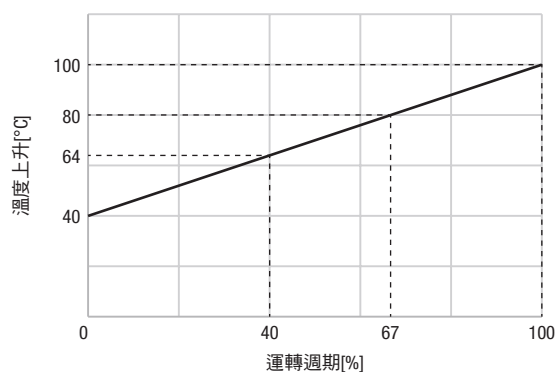


圖 4.42 運轉週期與溫度的關係

4.5 噪音特性

4.5.1 關於聲音的基礎知識

鼓膜捕捉到空氣中的壓力變動後就會聽見聲音。此壓力變動稱為音壓，可用壓力的單位帕斯卡 $\text{Pa} = \text{N/m}^2$ 表示。人類能捕捉的音壓範圍為 $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。由於以線性比例尺難以表示 10^{12} 倍的範圍，且人類的感官對於刺激強度的反應呈現對數關係，因此取最小可聽音壓 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 音壓比常用對數的貝 [B]，以及將之分割為 10 等分的分貝 [dB]，作為表示聲音大小的單位，稱為音壓量。使用此單位，人類在音壓方面的可聽範圍為 0~120 dB。

頻率方面的可聽範圍為 20 Hz~20 kHz。如圖 4.43 所示，此範圍內是否容易聽到聲音取決於頻率。圖 4.43 表示頻率如何改變人類感受到的聲音大小，例如 200 Hz 的聲音聽起來會比實際音壓量還要小 10 dB 左右。反之，2 kHz 附近的聲音聽起來則會比實際音壓量還大。圖 4.43 中，到達測量補整的音壓量即為 A 特性補整音壓量 dB(A)，也稱為噪音等級。

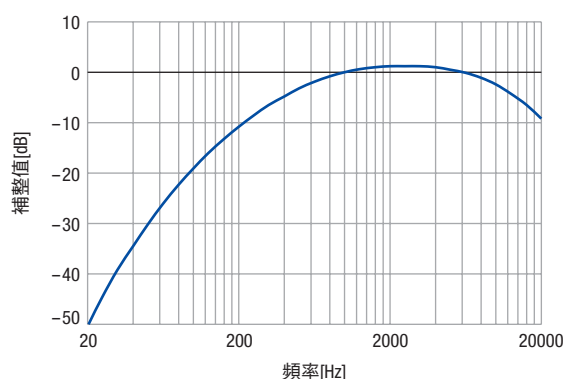


圖 4.43 A 特性補整曲線

4.5.2 馬達產生的聲音

馬達產生的聲音有好幾種，例如軸振動產生的振動音、磁力造成變形而產生的磁氣音、軸承產生的軸承音等。其中，步進馬達的主要噪音為振動音和磁氣音。

振動音並非馬達本身發出的聲音，而是以轉矩變動為激振力，通過軸傳向裝置時發出的聲音。在低速或共振頻率等馬達振動大的速度下，振動音會變大。根據振動頻率不同，有時裝置整體會共振，進而增加噪音。由於轉子和定子因磁氣互相吸引，轉子一振動，定子也會因為反作用而振動。此振動會從安裝面傳至裝置，因此若安裝面的強度低，就會傳至裝置整體，有時會成為造成噪音的主因。

馬達產生的聲音中，多會提到磁氣音。磁氣音是轉子和定子的吸引力或磁致伸縮造成馬達細微變形後產生的聲音。變形量只有 $1\ \mu\text{m}$ 左右，因此肉眼看不出來，觸碰時也幾乎感覺不到。但是，由於變化量相同的噪音值會與頻率的 2 次方成正比，像步進馬達極數大又以高頻率驅動，就會產生刺耳的噪音。

圖 4.44 為測量轉速與噪音關係的結果。縱軸為聲音功率位準，以 1 m 的距離表示平均噪音值。整體看來，相對於頻率有增加的傾向，這是由於頻率的 2 次方有變大的效果。其中出現的多個最高值是在激振力頻率與對於馬達變形的固有頻率一致的速度。

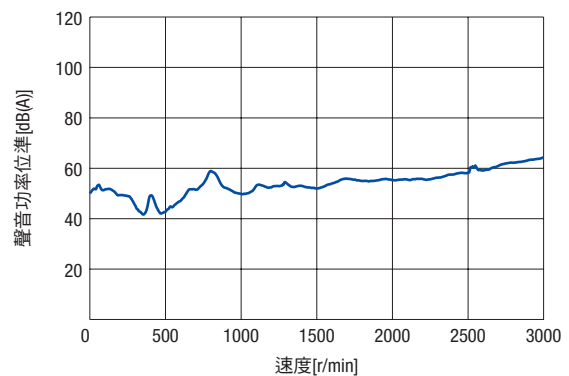


圖 4.44 轉速造成的噪音變化

圖 4.45 是以全步級、4 kHz 的速度旋轉 2 相馬達時的磁氣音頻譜。觀察頻譜的頻率，可發現其由 1 kHz 的整數倍頻率構成。基音 1 kHz 是此速度中馬達內部的電流頻率，也是鐵芯中磁通量變化的頻率。

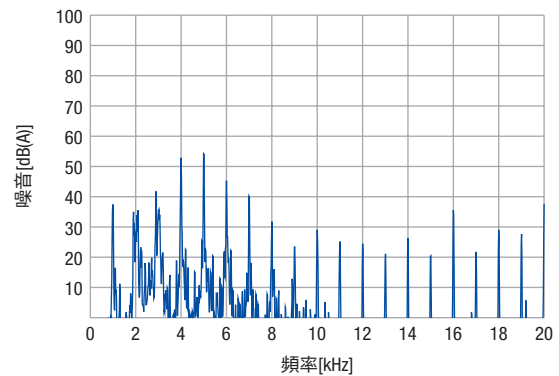


圖 4.45 噪音頻譜

磁氣音會從馬達表面直接放射，由於還伴隨了細微的表面振動，有時會從安裝面傳至機器。圖 4.46 是使用加速度檢知器測量馬達安裝面振動的結果。可看出產生了極大的加速度，當此振動從安裝面傳至裝置時，可能會造成極大的噪音。

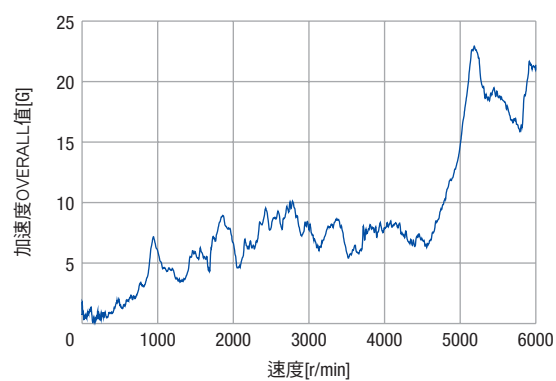


圖 4.46 安裝面的加速度

5 驅動回路

為了使用控制用馬達，需要讓電流流入適當線圈的驅動回路（驅動器）。本章將針對步進馬達用的驅動器基本原理及新型驅動方法進行講解。

5.1 接線方式

馬達內部設有多個線圈，這些線圈在內部被接線成好幾個組，只有與驅動器連接所需的幾個點，會透過導線拉到外部。內部接線的方式也跟組合的驅動器類型有關，是相當重要的因素。

5.1.1 雙極驅動與單極驅動

將定子的主極切換至 N 極和 S 極的方法包括改變流通線圈的電流方向，以及分別準備 N 極用的線圈和 S 極用的線圈。前者具有 2 種電流方向，因此稱為「雙極驅動方式」；後者各線圈的電流只會朝一個方向流通，因此稱為「單極驅動方式」。圖 5.1 是雙極驅動方式的基本回路，圖 5.2 則是單極驅動方式的基本回路。

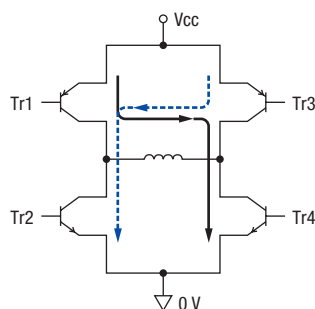


圖 5.1 雙極驅動回路

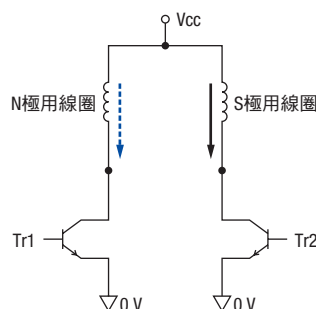


圖 5.2 單極驅動回路

雙極驅動方式會在每個相設置全橋式回路。1 號和 4 號電晶體為 ON 時，電流會朝實線方向流，2 號和 3 號電晶體為 ON 時，電流則朝虛線方向流。由於馬達線圈 1 個相需要 4 個電晶體，以往電子零件還很昂貴，在步進馬達發展初期算是價格高昂的回路。

單極驅動方式則是只將一邊的電晶體轉為 ON 後切換線圈，馬達線圈 1 個相只需要 2 個電晶體，輸出回路相當簡單，具有優勢，以往被廣泛使用。但缺點是只能使用半個線圈。

如公式 (5.1) 所示，馬達轉矩 T_M 與電流 i 和線圈圈數 t 的乘積成正比。

$$T_M \propto i \times t \quad (5.1)$$

此外，銅損則與電流的 2 次方和電阻成正比。

$$P_c \propto i^2 R \quad (5.2)$$

將作為線圈使用的銅線直徑固定，電阻就會和線圈圈數成正比。換句話說，此關係和線圈的使用率成正比。若線圈的使用率為 k ，則如下。

$$\begin{cases} R \propto k \\ t \propto k \end{cases} \quad (5.3)$$

統整以上關係後則如下。

$$T_M \propto \sqrt{k} \quad (5.4)$$

可以知道步進馬達的轉矩和線圈使用率的平方根成正比。單極驅動方式的線圈使用率為雙極驅動方式的一半，轉矩較低，約為 70%。因此，隨著電子零件價格變低，單極驅動方式的使用也隨之減少，雙極驅動方式的使用比例變高。

5.1.2 2 相步進馬達的驅動方式

2 相步進馬達的導線條數共有 4 條、5 條、6 條、8 條這 4 種。圖 5.3 為這 4 種各自內部的接線方式。端子部標示了本公司採用的標準顏色。

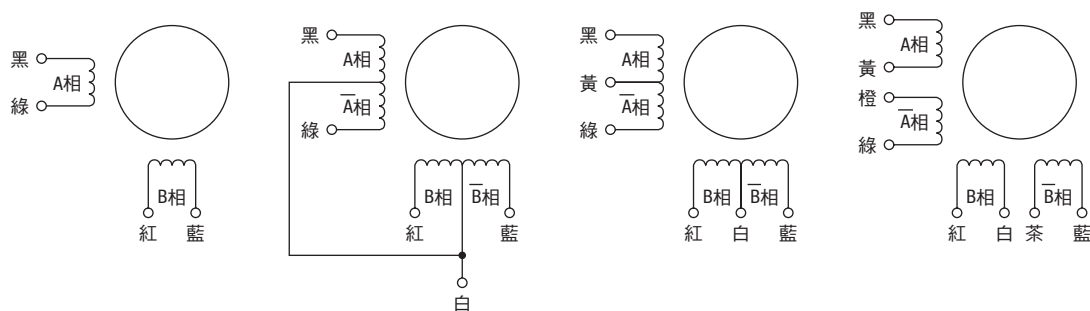


圖 5.3 2 相步進馬達的內部接線

4 條導線的馬達專用於雙極驅動方式。

5 條導線的馬達專用於單極驅動方式。

6 條導線的馬達是為了用於單極驅動方式而製造的馬達。也可將中接頭(A 相側黃色、B 相側白色的端子)絕緣，使用兩端端子，以雙極驅動方式使用。

8 條導線的馬達則支援 3 種驅動方法：將各線圈的單邊連接電源的單極驅動(圖 5.4)、將線圈串連使用的串連雙極驅動(圖 5.5)、將線圈並列使用的並列雙極驅動(圖 5.6)。

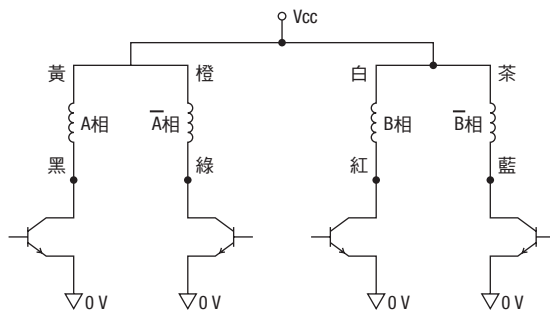


圖 5.4 單極驅動

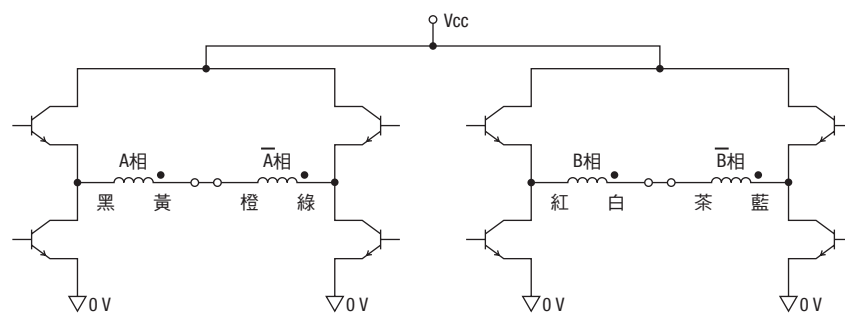


圖 5.5 串連雙極驅動

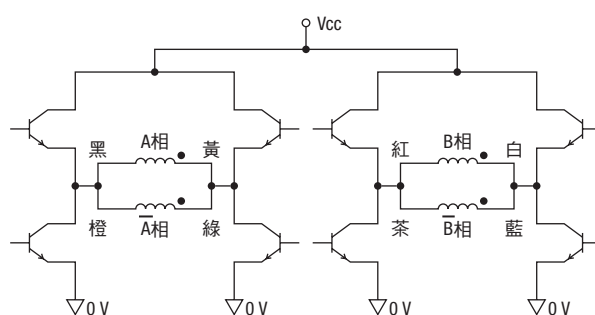


圖 5.6 並列雙極驅動

由於單極驅動和雙極驅動的線圈使用率不同，轉矩的大小也不同。此外，相較於並列雙極，串連雙極具 4 倍的阻抗，因此高速轉矩的下降方式極為不同。圖 5.7 比較了這 3 種接線的轉矩特性。

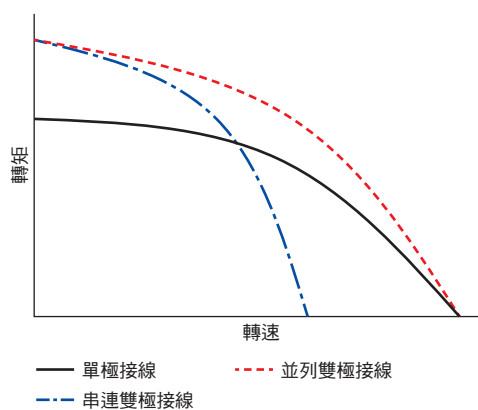


圖 5.7 不同接線的特性差異

5.1.3 5 相步進馬達的驅動方式

5 相步進馬達最基本的驅動方式，就是圖 5.8 的標準雙極驅動方式。這種方法是在各相設置全橋，特性優良，但由於動力元件多，成本也較高。

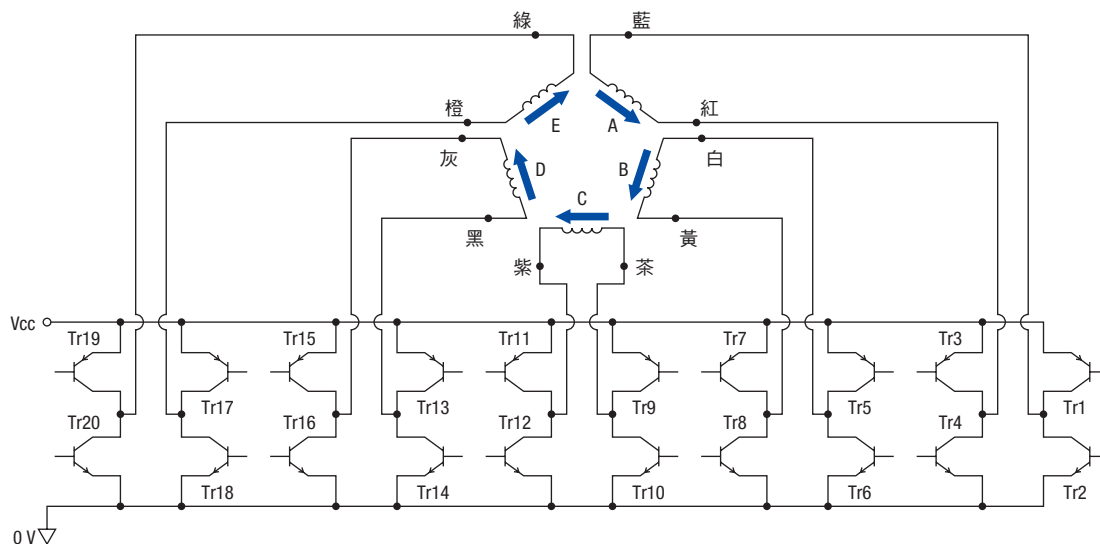


圖 5.8 標準雙極驅動方式 (Standard Bipolar)

有 3 種驅動方式連接各相的線圈，並減少和驅動器的連接點數量，分別為星型雙極驅動方式、五角型驅動方式、新五角型驅動方式。這些驅動方式的驅動器輸出部是由 5 組半橋構成，動力元件數量為標準雙極驅動方式的一半。三種驅動方式之間的特性無差異。

圖 5.9 為星型雙極驅動方式的接線圖。此方法以同個點連接各相的單邊，作為中性點。

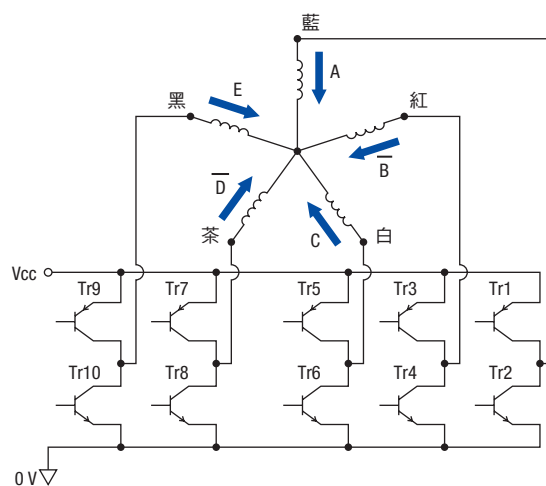


圖 5.9 星型雙極驅動方式 (SB: Star Bipolar)

圖 5.10 為五角型驅動方式，圖 5.11 則為新五角型驅動方式的接線圖。兩者皆為將線圈環狀連接，並將連接點連接至驅動器的方法，差異在於相的線圈連接的順序。由於本公司沒有五角型驅動用的馬達，此處為使用導線 10 條的標準雙極驅動用馬達時的連接方式。

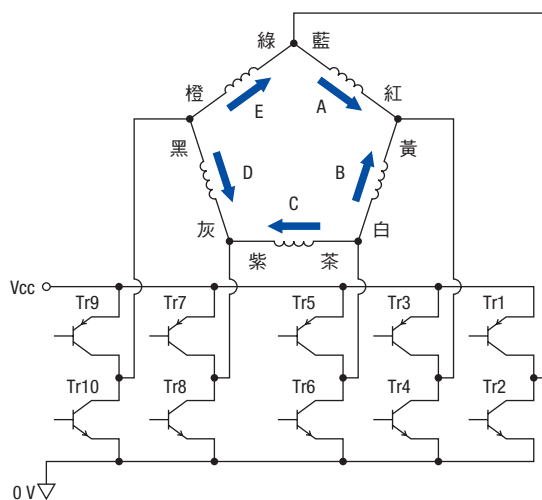


圖 5.10 五角型驅動方式 (P : Pentagon)

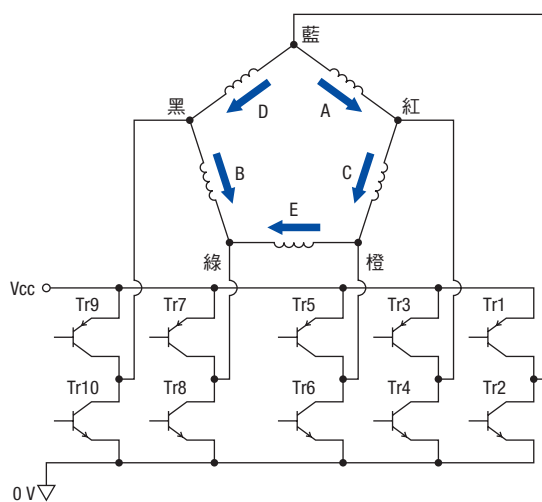


圖 5.11 新五角型驅動方式 (NP : New Pentagon)

5.2 激磁方式與激磁程序

能夠各自改變電流的線圈組數就稱為相。2 相步進馬達的定子有 8 個線圈，這些線圈以 4 個為 1 組，分為 A 相和 B 相 2 組，因此稱為 2 相。5 相步進馬達有 10 個線圈，以 2 個為 1 組，分為 A 相、B 相、C 相、D 相、E 相 5 組。改變馬達的構造就可以無上限增加線圈的數量，將線圈分為 2 組就是 2 相馬達，分為 5 組就會是 5 相馬達。

同時激磁幾個步進馬達的相稱為「激磁方式」，針對不同的激磁方式，流入線圈的電流順序也不同。這個順序就是激磁程序。

5.2.1 2 相步進馬達的激磁方式與激磁程序

圖 5.12 是 2 相的轉矩向量，使用前面出現過的圖。考量電流的方向與組合後，此處的 8 條轉矩向量為 2 相步進馬達中可成立的所有組合。

1 相激磁方式只激磁 1 個相，只使用縱橫的 1 相激磁轉矩向量，對應的正轉(逆時針方向)激磁程序如下。

正轉： $A \rightarrow B \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{B} \rightarrow$

激磁程序會從尾端連接到開頭不斷重複。逆轉則為如下。

逆轉： $\bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow$

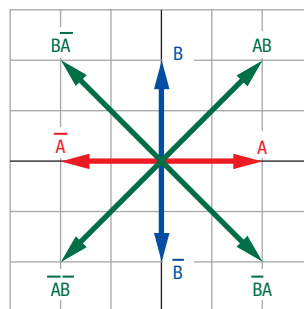


圖 5.12 2 相步進馬達的轉矩向量

激磁程序輪完一輪後，轉子只會旋轉 1 個小齒，每個步級的旋轉角度為小齒間距的 $1/4$ ，小齒數為 50 的步進馬達就會是 1.8° 。

2 相激磁方式激磁 2 個相，只使用斜向位置的 2 相激磁轉矩向量，對應的激磁則如下。

正轉： $A B \rightarrow B \bar{A} \rightarrow \bar{A} \bar{B} \rightarrow \bar{B} A \rightarrow$

逆轉： $\bar{B} A \rightarrow \bar{A} \bar{B} \rightarrow B \bar{A} \rightarrow A B \rightarrow$

步級角度和 1 相激磁相同，為 1.8° 。轉矩向量的長度大致與轉矩的大小成正比，因此 2 相激磁的轉矩約為 1 相激磁的 $\sqrt{2}$ 倍。然而，此關係僅限當固定電流流入線圈時。當電流相同，2 相激磁會產生 1 相激磁的 2 倍銅損。將銅損設為相同，1 相激磁的電流就會是 $\sqrt{2}$ 倍，轉矩變為相同。因此，當激磁相數改變時，需注意是要在各相電流固定的情況下，還是要在馬達整體銅損為固定的情況下。

1-2 相激磁方式會重複 1 相激磁和 2 相激磁，使用所有轉矩向量，對應的激磁則如下。

正轉： $A \rightarrow A B \rightarrow B \rightarrow B \bar{A} \rightarrow \bar{A} \rightarrow \bar{A} \bar{B} \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{B} A \rightarrow$

逆轉： $\bar{B} A \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{A} \bar{B} \rightarrow \bar{A} \rightarrow B \bar{A} \rightarrow B \rightarrow A B \rightarrow A \rightarrow$

此時，激磁程序會以 8 步級為一輪，步級角度為 0.9° 。如此一來，改變激磁相數的方式具有將步級角度改為基本步級角度的 $1/2$ 的效果。

圖 5.13 以圖取代記號表示 1 相激磁的程序。橫軸為激磁程序中的順序，基線的上下移動表示相電流的正負。此圖中雖加註記號表示已激磁的相，但通常只會以圖表示。從左到右看此圖就是正轉的激磁程序，從右到左則為逆轉的激磁程序。如此一來，可以了解激磁相的順序和方向。

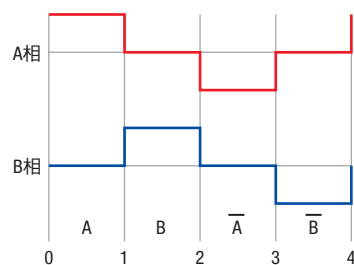


圖 5.13 1 相激磁程序

以相同方式表示，圖 5.14 為 2 相激磁的程序，圖 5.15 為 1-2 相激磁的程序。

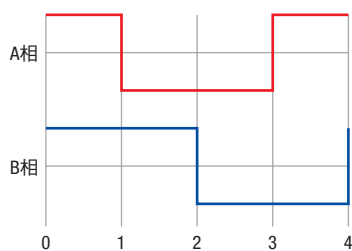


圖 5.14 2 相激磁程序

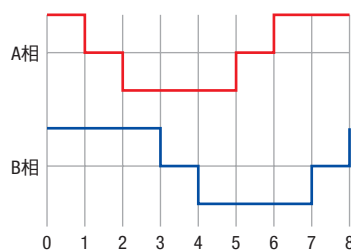


圖 5.15 1-2 相激磁程序

5.2.2 5 相步進馬達的激磁方式與激磁程序

5 相步進馬達有 1 相、2 相、3 相、4 相、5 相激磁方式，以及將這些互相組合的激磁方式，但 1 相、2 相、3 相激磁方式的轉矩小，經常使用的是 4 相激磁方式、5 相激磁方式、4-5 相激磁方式這 3 種。

圖 5.16 為 4 相激磁(虛線)和 5 相激磁(實線)的轉矩向量。

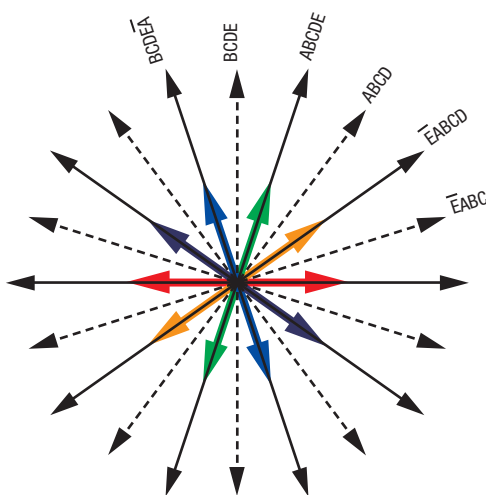


圖 5.16 5 相步進馬達的轉矩向量

4 相激磁方式會照順序使用將 4 相激磁的組合，其激磁程序如下。

$A B C D \rightarrow B C D E \rightarrow C D E \bar{A} \rightarrow D E \bar{A} \bar{B} \rightarrow E \bar{A} \bar{B} \bar{C} \rightarrow \bar{A} \bar{B} \bar{C} \bar{D} \rightarrow \bar{B} \bar{C} \bar{D} \bar{E} \rightarrow \bar{C} \bar{D} \bar{E} \bar{A} \rightarrow \bar{D} \bar{E} \bar{A} \bar{B} \rightarrow \bar{E} \bar{A} \bar{B} \bar{C} \rightarrow$

由於有 10 種狀態，每個步級的轉量為小齒間距的 1/10，轉子小齒數為 50 的步進馬達就會是 0.72° 。以記號表示激磁程序會很混亂，為了淺顯易懂，下面以圖表示。

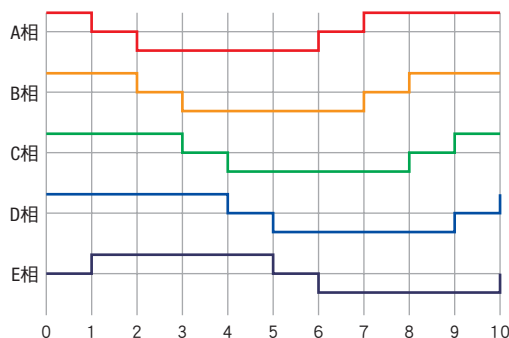


圖 5.17 4 相激磁程序

以相同方式表示，圖 5.18 為 5 相激磁的程序，圖 5.19 為 4-5 相激磁的程序。

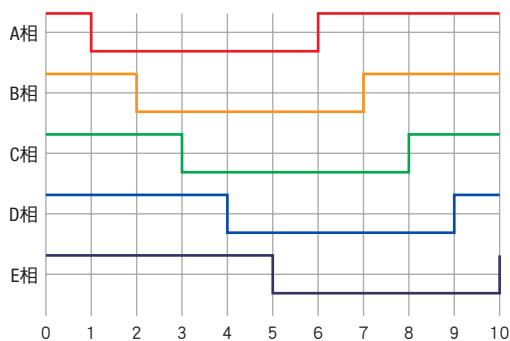


圖 5.18 5 相激磁程序

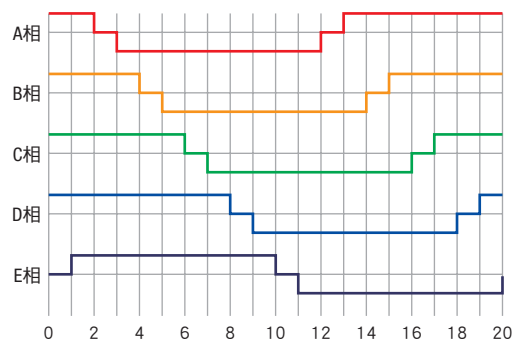


圖 5.19 4-5 相激磁程序

5.3 驅動方式

接線方式和激磁方式，主要是決定流入各相線圈的電流組合和順序，而驅動方式則是決定電流的大小。

5.3.1 定電壓驅動方式

定電壓驅動方式是將驅動回路的輸出電壓固定的方式。驅動回路的構成很簡單，但有輸出轉矩在高速下會降低的問題。

公式(5.5)表示施加於馬達的電壓 V 、電流 I 、阻抗 Z 、馬達感應電壓 E 的關係，稱為電壓方程式。粗體代表各自的變數為帶有相數成分的向量或矩陣。

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} + \mathbf{E} \quad (5.5)$$

用於計算電流就會變成下列公式。

$$\mathbf{I} = \mathbf{Z}^{-1} (\mathbf{V} - \mathbf{E}) \quad (5.6)$$

感應電壓 E 和速度成正比。阻抗 Z 會按照下列公式變化， R 為線圈電阻， f 為電流頻率， L 為電感。

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2} \quad (5.7)$$

每個要素都會相對於速度而變大，施加一定的電壓後，相對於速度，電流會逐漸變小，轉矩也會隨之降低。

為了提升高速旋轉時的輸出轉矩，如圖 5.20 所示，可使用外部電阻附加驅動，將電阻串連至線圈以提升阻抗。

利用此方法，可以不降低低速電流，僅提高附加電阻量的施加電壓 V_{cc} 。此狀態下的阻抗如下。

$$Z = \sqrt{(R + R_0)^2 + (2\pi f L)^2} \quad (5.8)$$

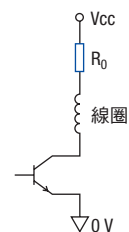


圖 5.20 外部電阻附加驅動

和公式 (5.7) 比較，可發現頻率的影響較小。因此，可以抑制高速下電流降低的情形。

外部電阻和施加電壓越大，高速時的轉矩就會越高，同時外部電阻造成的損失也越大，效率就越差。

5.3.2 定電流驅動方式

理論上，定電壓驅動會隨速度減少電流。為了避免這種情形發生，定電流驅動方式會改變電壓並將電流固定。

圖 5.21 表示定電流驅動器的速度與相電流、相電壓、轉矩的關係。

可看出隨著速度上升提高電壓，並將電流固定。此例中，由於施加電壓的上限約為 140 V，因此 800 r/min 以上時就會輸出可施加的最高電壓。此領域中，由於使用定電壓驅動，電流會隨著速度減少。

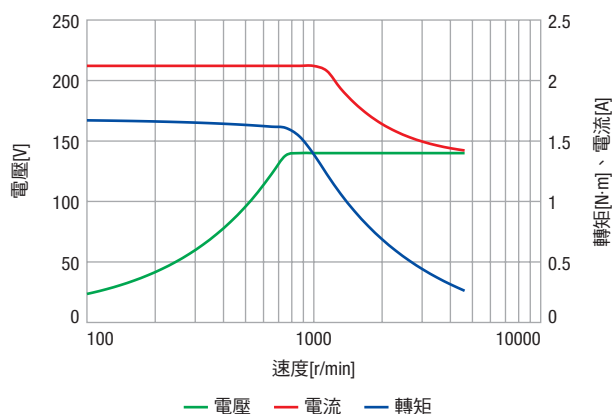


圖 5.21 定電流驅動時的電流與電壓

圖 5.22 為定電流控制的基本回路。

準備比步進馬達的額定高很多的高電壓，以電阻等檢知馬達電流，利用回授確保電流固定，並用開關調整電壓。越高速就會施加越高的電壓，因此電流不會降低，可得到較高的轉矩。

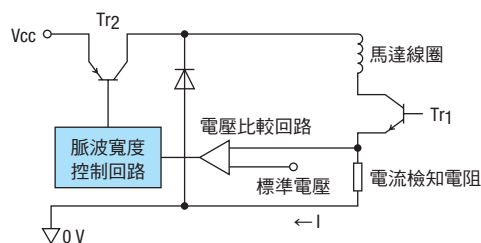


圖 5.22 定電流驅動回路

5.4 微步級驅動

切換電流通的相時，步進馬達的構造會決定旋轉角度。若需要較細微的角度，則必須換成其他相數或轉子小齒數較多的馬達。為了解決此問題，以電氣將步級角度細分的微步級驅動就此誕生。

以 2 相步進馬達為例，說明微步級驅動的方法。圖 5.23 為使用微步級驅動的半步級驅動電流波形，圖 5.24 則為各轉矩向量頂點的軌跡。前面說明過，半步級驅動使用 1-2 相激磁方式時，會根據電流的有無改變激磁方向，因此線圈的電流固定，然而微步級驅動會在電流切換點設置中間值，改變電流值的同時，可細分步級角度。圖 5.24 從原點到頂點距離的 2 次方對應到線圈的銅損，因此在損失為固定的條件下，可細分步級角度。

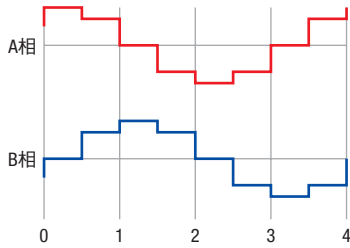


圖 5.23 2 相微步級驅動時的電流

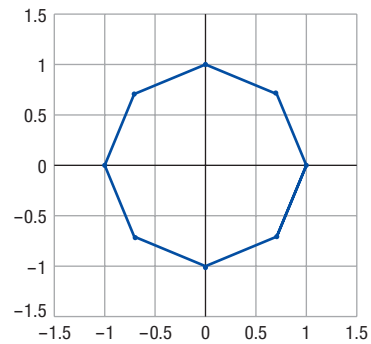


圖 5.24 2 相微步級驅動時的電流軌跡

圖 5.25 為 1/4 步級和 1/8 步級的電流值，圖 5.26 則為各轉矩向量頂點的軌跡。電流中間階段數變大，步級角度就會變小，波形整體的形狀將越來越接近正弦波。

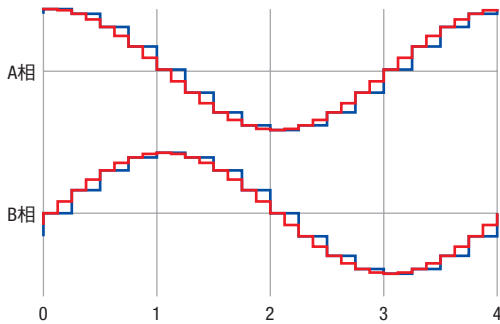


圖 5.25 微步級驅動時的電流

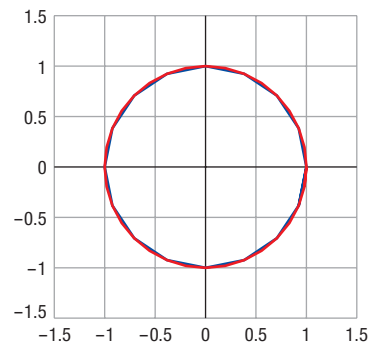


圖 5.26 微步級驅動時的電流軌跡

任意步級角度下，將轉矩向量的長度設為 i_0 ，接著決定希望的步級角度並設為 θ_m 。此時，如下所示，將第 n 步級的相電流切換為 90° 相位的正弦波。

$$\begin{cases} i_A = i_0 \cos(nZ_R \theta_m) \\ i_B = i_0 \sin(nZ_R \theta_m) \end{cases} \quad (5.9)$$

在 2 相步進馬達的微步級驅動，電流波形會接近正弦波，因此看起來會和常規的激磁程序完全不同，可將之視為激磁程序的擴展。以 5 相的微步級驅動舉例來看，圖 5.27 為 5 相微步級驅動下，將全步級驅動分割成 10 等分時的電流。與全步級驅動比較之下，只有電流切換的部分改變，可看出是微步級驅動將激磁程序(圖 5.19)擴展後的結果。

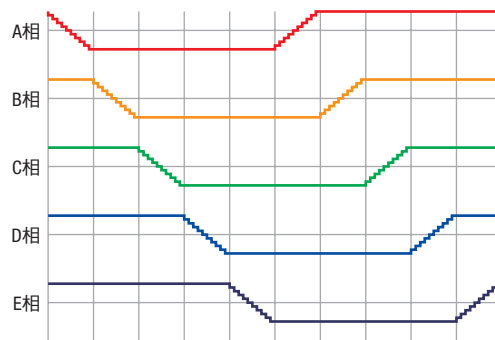


圖 5.27 5 相微步級驅動時的電流

5.5 新的驅動方法

5.5.1 回授控制

使用步進馬達的系統時，基本上會根據脈波指示移動量和速度，將電流流入必要的相，並相信馬達會依照指示動作。

由於不具備監視動作狀態的系統，當過負載或加減速度過大時，可能會無法維持同步，產生位置偏差的情形。此現象稱為失步。為了解決此問題，一般對策是針對必要的負載轉矩，讓馬達能產生的轉矩有餘量，擔保其穩定性。此餘量稱為安全率，多數情形為 1.5~2 左右。

另一方面，若為特別重視穩定性的用途，會利用編碼器確認位置或使用伺服馬達。伺服馬達具優異的高速性，效率極佳，且噪音小。但是，伺服控制系統的缺點是系統複雜又高昂，且在位置偏差的情況下動作，對指令的同步性不佳。此外，針對負載變動，為了保持系統的安定性，還必須進行增益調整。

為了解決這些舊有系統的問題，結合了步進馬達和位置檢知器，開發出位置控制系統。然而，多數位置控制系統和伺服馬達一樣使用回授控制方式，具有和伺服系統相同的問題。

本公司的 α STEP 產品也是使用位置檢知器進行控制，但位置資訊的使用方式和舊有方式大不相同。在此說明 α STEP 採用的控制方法和優點。

圖 5.28 為 α STEP 的動作概念圖，在位置指令固定的狀態下，結合 α STEP 和常規步進馬達的 θ -T 特性。橫軸為指令位置與轉子實際位置的差，縱軸為發生轉矩。小齒數預想為 50 個。

將轉矩施加於馬達後，發生轉矩在與之達到平衡前，會不斷偏離位置。在不超過安定點的 $\pm 1.8^\circ$ 的領域中，施加的轉矩和變形位移的關係為單調遞增，由於處於非常穩定的狀態，並不會積極進行控制。

將施加的轉矩再增大，就會超過馬達能夠發生的轉矩，因此轉子會開始旋轉。無控制狀態下的發生轉矩為正弦波狀，因此有多個安定點，當超過 $\pm 3.6^\circ$ 旋轉時，即使除去外部轉矩，也無法復歸為原本的安定點。

$\alpha STEP$ 的控制下，當轉子旋轉 1.8° 以上，會移動激磁位置，讓那個點能發生最大轉矩。圖 5.28 的例子中，動作點位於 4° 。在此位置中，藍色代表原本的 θ -T 特性，由於其發生轉矩會變得十分小，因此會移動綠色的 $2.2^\circ\theta$ -T 特性，讓動作點的發生轉矩為最大。跟著動作點移動 θ -T 特性，連續進行此操作就能得到圖中以紅色標示的特性。由於安定點只有 1 點，只要除去外部轉矩，就能復歸為原本的安定點。旋轉中的動作也相同，在保持相對關係下，圖整體要以定速移動，從這個角度來看就能理解不會失步。

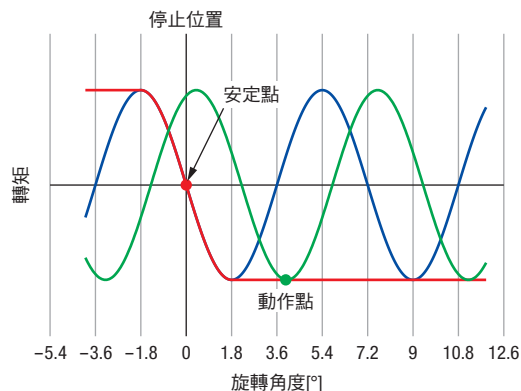
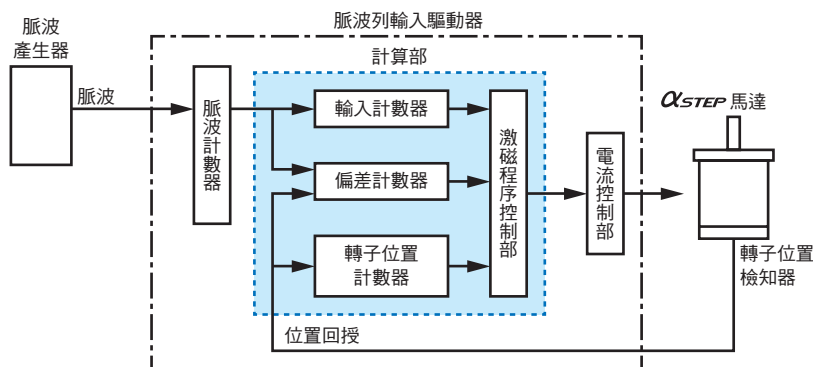
圖 5.28 $\alpha STEP$ 的動作

圖 5.29 為 $\alpha STEP$ 的方塊圖。只要解析度高，可以使用任何位置檢知的方式，一般會用旋轉變壓器或編碼器。利用偏差計數器監視指令位置與實際位置的差距，超過 1.8° 時，會對偏離原激磁位置的地方進行激磁，原激磁位置由輸入脈波決定。

電流控制部與常規驅動器相同，僅控制電流大小。

圖 5.29 $\alpha STEP$ 的控制程序圖

5.5.2 以正弦波為基礎的驅動

代表感應馬達¹⁾的交流馬達設計用於定速，因此必須持續發生固定轉矩。為了將發生轉矩固定，有 2 種可能的方法，一是設計成不會發生轉矩變動，二是隨時監視發生轉矩並進行控制。即使目前測量和控制技術已提升不少，後者仍難以實現，於是傳統上就設計成不會發生轉矩變動。連接商用正弦波電壓使用時，若感應電壓含有基本波以外的成分，會造成轉矩產生週期性的變動，還會產生振動或噪音。因此，在使用這些馬達時，會盡可能去除感應電壓的高階成分。

另一方面，步進馬達或 DC 無刷馬達則是將「切換」線圈電流視為前提，以電流的波形來看，是以矩形波進行運轉。這種情況下，無法期待發生轉矩固定。步進馬達會因轉矩變動而造成振動變大的速度帶，有時會避免在此速度帶下使用。DC 無刷馬達在高速時則沒有速度變動的問題，在低速時則會透過設定速度限制來避免此問題。

在介紹 2 相微步級驅動部分中，說明了當分割越細，電流的波形會逐漸接近正弦波。反之，另一種直接使用正弦波的驅動方式，則是在一連續的正弦波上選取輸入的電流值。圖 5.30 和圖 5.31 在正弦波上重疊放上對 360° 進行 4 分割、8 分割、16 分割的結果。

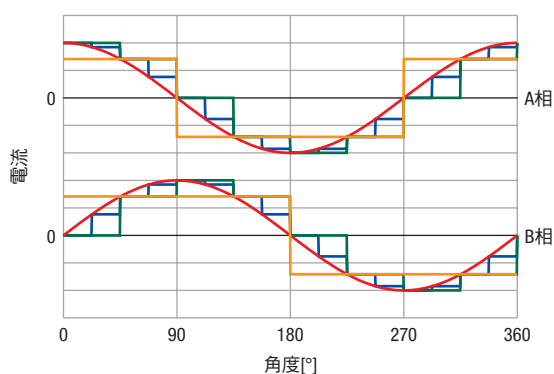


圖 5.30 以正弦波為標準的電流(2 相)

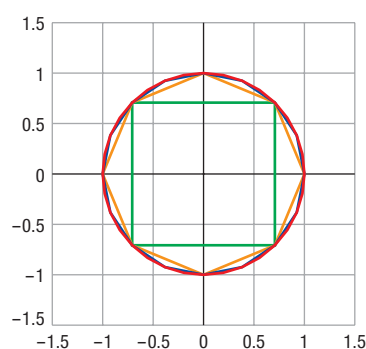


圖 5.31 以正弦波為標準的電流軌跡(2 相)

圖 5.30、圖 5.31 與說明 2 相微步級驅動時的圖 5.25、圖 5.26 相同。但是要將激磁程序細分，還是分散選擇正弦波上的點，兩者在技術層面的內容大不相同。

接下來針對 5 相進行說明。圖 5.32 是以正弦波為標準構成的全步級電流波形，以細線表示標準的正弦波。將標準的正弦波依角度方向分為 10 等分，各點的值保持在固定區間後產生了實際電流。因此，若激磁程序以電流切換為標準，產生的電流會是矩形波狀，而這裡則是正弦波狀。圖 5.33 是合成 5 相電流的轉矩向量軌跡，可看到電氣角被分為 10 等分。

1) 利用電磁感應發生轉矩的馬達。本公司的感應馬達、可逆馬達、轉矩馬達都屬於此類型。

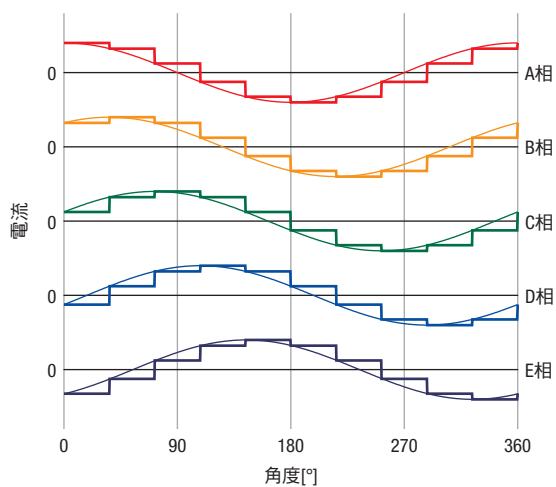


圖 5.32 以正弦波為標準的電流
(5 相全步級)

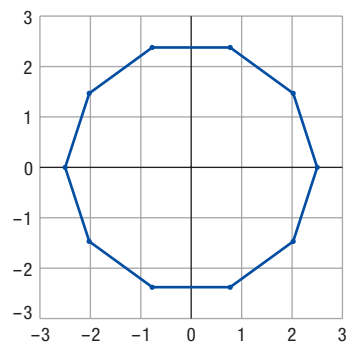


圖 5.33 以正弦波為標準的電流軌跡
(5 相全步級)

圖 5.34 是將步級角度分為 1/10 時的電流，圖 5.35 則為電流向量軌跡，幾乎為正弦波。因此，即使在非常低速的狀態下，也可以順利旋轉。

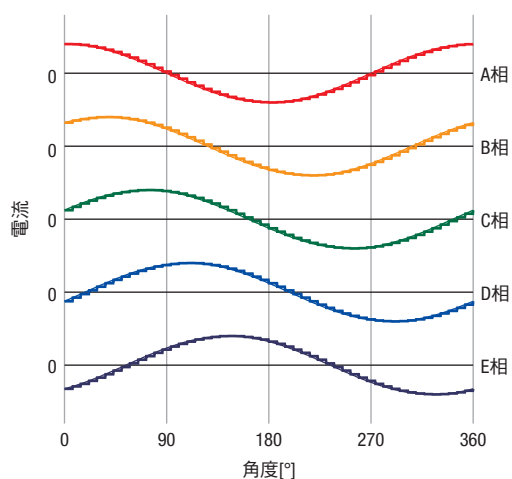


圖 5.34 以正弦波為標準的電流
(5 相 1/10 步級)

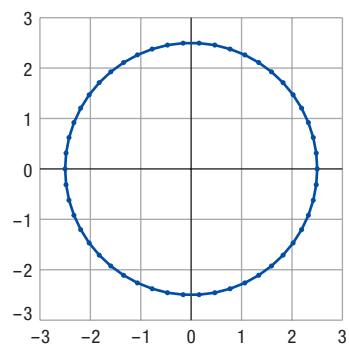


圖 5.35 以正弦波為標準的電流軌跡
(5 相 1/10 步級)

6 控制器的種類與特徵

為了控制步進馬達的運轉，就需要控制器或脈波發生器，以設定的數量與速度產生脈波。在說明過步進馬達動作的種類後，將針對控制器的種類及特徵進行說明。此外，也會對半導體製造裝置及各種生產線的系統而言不可或缺的網路對應產品進行說明。

6.1 步進馬達的動作

連續產生的脈波群稱為「脈波列」。步進馬達的動作可由輸入驅動器的脈波列的量（數量）與速度（頻率）來決定。只要在轉速－轉矩特性的範圍內，對任何脈波列都可追蹤，可自由決定脈波列。

然而，自由度若是過大，反而會難以決定步進馬達的動作。因此，在此列舉五種代表性的動作，將其組合為一連串馬達動作。

- 定位運轉¹⁾
- 連續運轉
- 多段變速運轉
- 機械原點復歸運轉
- JOG 運轉

在此節說明以上動作。

6.1.1 定位運轉

步進馬達最基本的特色為即使不使用檢知器，也能正確停止於指定位置。活用此特色的是定位運轉，可從現在位置旋轉至目標位置。

為進行定位運轉，需要有表示位置的量（座標）。實際機構中的物理座標，是以旋轉角度或直線移動量表示，但決定步進馬達旋轉的虛擬座標，則以脈波數或步級數²⁾表現。將物理座標移動量設為 L 、虛擬座標移動量設為 A 、1 步級的移動量設為 l ，則兩者關係可以下列公式表示。

$$A = \frac{L}{l} \quad (6.1)$$

1) 也稱為 INDEX 運轉。

2) 對於內藏控制器的驅動器，不稱為輸入脈波列，因此一併記述步級數。兩者數值相等。

進行定位運轉時，如圖 6.1 所示，事先設定起動脈波速度(VS)、停止脈波速度(VS)、加速斜率(TR)、減速斜率(TR)、運轉脈波速度(VR)、運轉脈波數(A)，再根據起動信號開始運轉。其中，由於起動脈波速度和停止脈波速度、加速斜率和減速斜率多使用相同數值，這裡以相同記號表示。

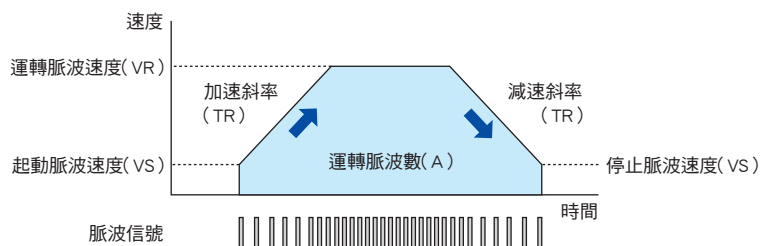


圖 6.1 定位運轉

為正確指定起動／停止脈波速度與加速／減速斜率則必須計算轉矩，因此不在此多加闡述。

目標位置座標的指定方法，包括相對定位和絕對定位，前者以相對於現在位置的差表示，後者以固有的位置座標指定。分別對應兩者的運轉方法，有相對定位運轉與絕對定位運轉。兩種皆使用公式(6.1)所算出的虛擬座標數值。

a. 相對定位運轉(增量式運轉)

相對定位運轉為指定現在位置和目標位置之相對差距的運轉方法。會指定脈波數與運轉方向作為位置座標。如尺寸、定量移動等，適用於已事先決定好下個移動量，或是重複進行同量移動時。圖 6.2 為相對定位運轉的運轉模式。

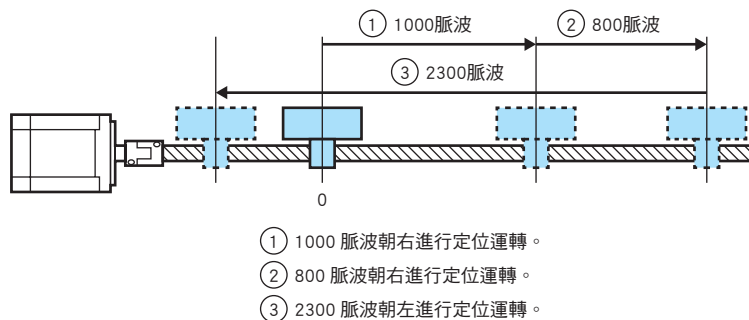


圖 6.2 相對定位運轉

b. 絕對定位運轉(絕對式運轉)

絕對定位運轉透過距離標準點(原點)的脈波數來指定目標位置。一個標準點就是一個原點，因此稱為絕對定位運轉。由於可以利用從標準點算起的脈波數指定位置，適用於會經常變更定位點的用途。圖 6.3 為絕對定位運轉的運轉模式。

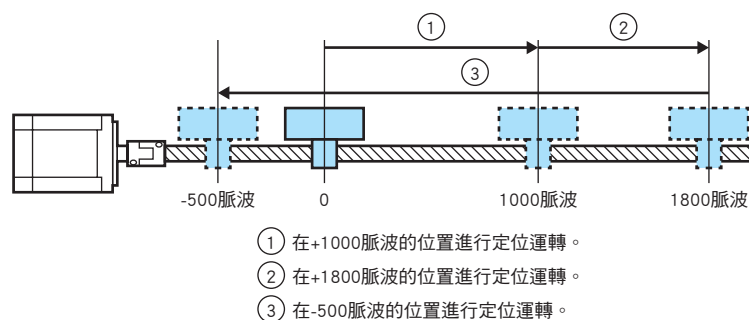


圖 6.3 絕對定位運轉

6.1.2 連續運轉

在不指定運轉脈波數的情況下，持續運轉步進馬達，直到輸入停止信號為止。用於執行步進馬達的動作測試或移動至任意位置時。

如圖 6.4 所示，會指定起動脈波速度、運轉脈波速度、加減速斜率、旋轉方向。

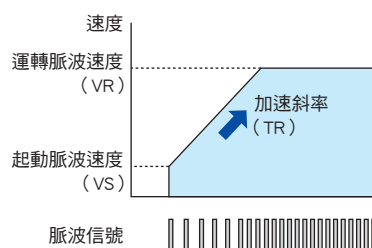


圖 6.4 連續運轉

6.1.3 多段變速運轉

運轉時連續改變運轉脈波速度。

會指定起動脈波速度、運轉脈波速度 1、運轉脈波速度 2、加減速斜率等速度資料及旋轉方向。變更運轉脈波速度，僅可執行於單一方向旋轉時。圖 6.5 為多段變速運轉的運轉模式。

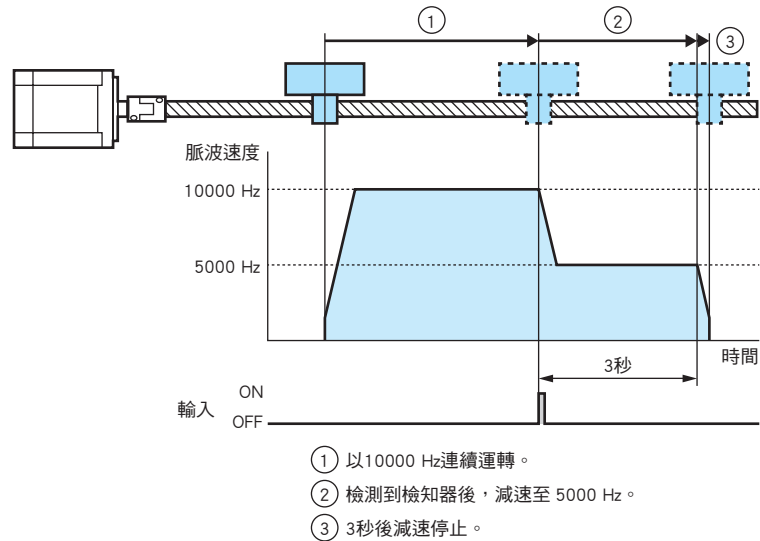


圖 6.5 多段變速運轉

6.1.4 機械原點復歸運轉

機器上要正確定位，必須事先正確決定作為基準的原點。此原點為固定於機器上的 HOME LS(原點極限檢知器)位置，稱為「機械原點」。³⁾

在機械原點復歸運轉中，檢測機械原點。圖 6.6 所示，利用 HOME LS、+LS(正方向極限檢知器)、-LS(負方向極限檢知器)，朝固定於機器的原點移動。

在機械原點復歸運轉中，指定起動脈波速度、運轉脈波速度、加減速斜率。此外，還會指定到達極限時的動作以及運轉開始時的移動方向等。

在圖 6.6 中，表示執行下列運轉時的情況。

- 將初期移動方向設為正方向。
- 以 +LS 反轉後，通過 HOME LS 再反轉。
- 之後，移動至正方向，將檢測出 HOME LS 的位置視為機械原點。

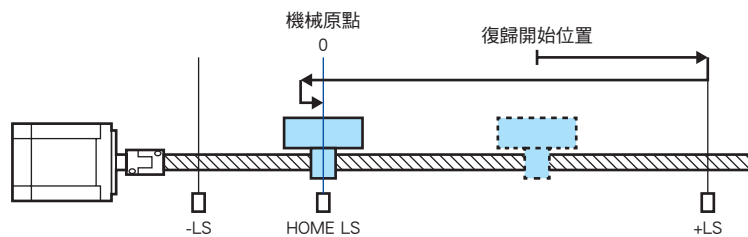


圖 6.6 機械原點復歸運轉

3) 有時可能會推壓動作端，將該處視為原點。

6.1.5 JOG 運轉

如圖 6.7 所示，輸入信號後會輸出 1 脈波，馬達便會旋轉 1 個脈波。若維持輸入信號後的狀態，經過圖中表示的一定時間(T)後，將連續輸出脈波。JOG 運轉用於馬達動作測試、接線確認、位置微調整等用途。

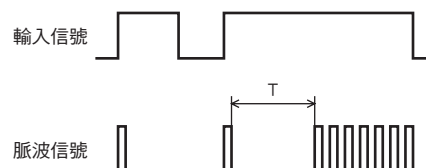


圖 6.7 JOG 運轉

6.2 控制器的種類

控制器為登錄頻率或脈波量組合的裝置，並可一邊切換一邊發生脈波。

以往流行使用僅能發生 1 種脈波列的簡單型脈波發生器。最近，因備有多種功能，被歸類於控制器的裝置逐漸增加。此外，在多個機器共同運轉進行作業的系統中，為了在上位控制器的監視／指令下運作步進馬達，也出現了許多支援網路的控制器。

也有許多驅動器內藏控制器功能。這類驅動器並非以脈波列進行控制，但不會影響步進馬達的動作及特性。

控制器包括資料儲存型和程式儲存型 2 種。

6.2.1 資料儲存型

資料儲存型控制器會在內部事先登錄定位資料，接收主(上位)控制器的起動信號，實行運轉。

主控制器無須具備運轉資料，只需對控制器下達簡單的指示，步進馬達就會運轉，因此能減輕主控制器程式和資料區域的負載。

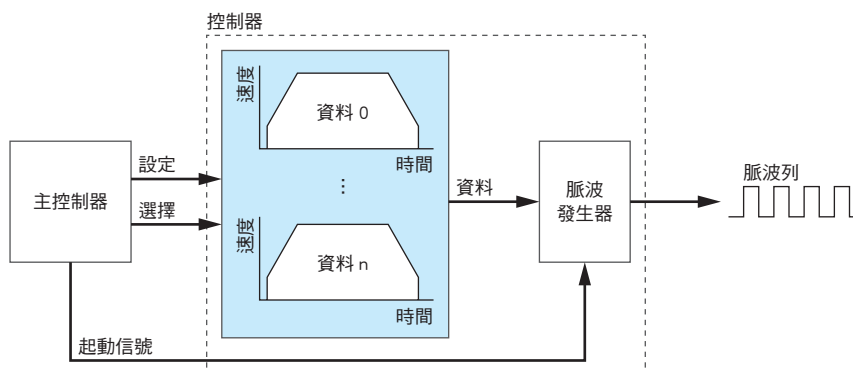


圖 6.8 資料儲存型控制器

6.2.2 程式儲存型

程式儲存型控制器不只登錄定位資料，連定位順序或起動時序等，一連串動作(時序)都會登錄。可單獨實行定位運轉。另外，也有控制器可控制輸出信號的程式或條件分歧，連小型機器整體都能控制。

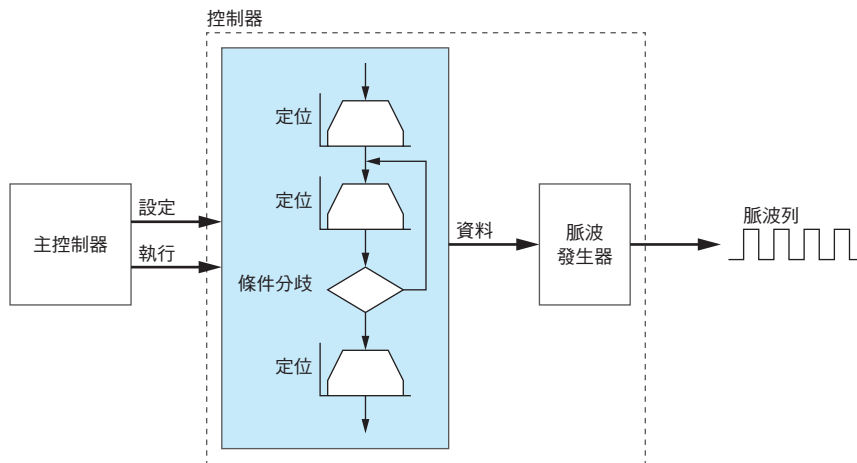


圖 6.9 程式儲存型控制器

6.3 步進馬達的網路控制

隨著電腦技術和數位通訊技術的發達，OA 機器的網路化十分顯著，FA 機器也迅速發展網路化。這裡所說的網路可分為 3 層(圖 6.10)。第 1 個是工廠內生產管理等的資訊網路(電腦層)，第 2 個是連接生產線內裝置的控制器網路(控制器層)，第 3 個是控制裝置內馬達、檢知器、模組產品、作動器等 FA 網路(裝置層)。

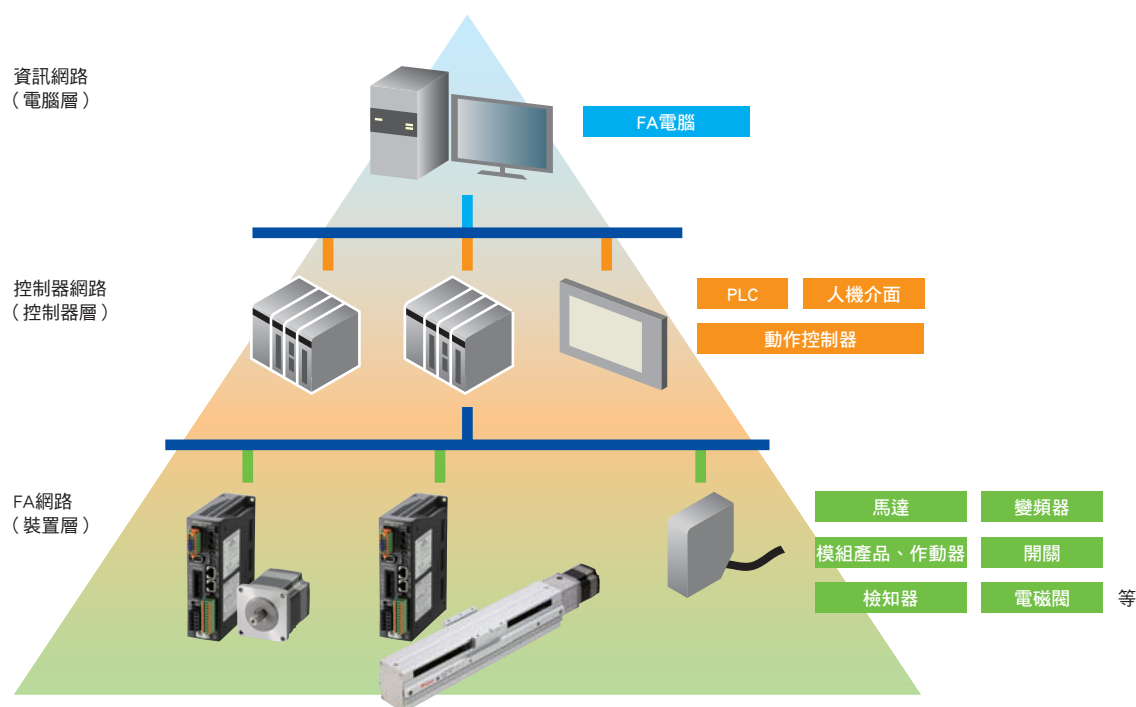


圖 6.10 工廠內的網路層

資訊網路會與工廠內或工廠間的資訊管理系統及生產管理系統連接，主要為 PC(電腦)－PLC(Programmable Logic Controller)間的網路。生產必需的設計資料、生產資訊資料、品質管理資料等大容量的資料，主要利用 Ethernet 來傳送。

控制器網路會連接生產線內的各裝置，主要為 PLC 間的網路。除了週期性傳遞裝置間必要的生產資訊外，也可以傳送裝置異常等訊息。

FA 網路為裝置內的網路。將 PLC 與馬達和檢知器等裝置(機器)連結，為了支援作業的同步性和工程高速化，需要高速的資料通訊。FA 的網路化具有下列優點：

1. 在同個生產線可控制多個信號，可降低配線成本。
2. 與脈波信號相比，可延長配線距離。
3. 每個網路均有規定的協定，因此不同廠商之間的程式只需作最少變更就能使用，可縮短設計裝置的時間。
4. 可監視輸入輸出資訊或警示等機器運轉狀態，提升維修性。

FA 網路包括現場網路和運動控制網路，前者的 1 台主站可連接多台機器，也能連接多種機器。後者的通訊高速，且複數軸能進行同步運轉。

CC-Link⁴⁾/DeviceNet⁵⁾/PROFIBUS/Modbus 等現場網路，主要是在上位機器(主站)和下位機器間，傳遞溫度、壓力等測量資訊或馬達的運轉資訊等。支援的驅動器內藏定位功能，接收速度或轉量等設定資料和起動指示後動作。特色是同個網路上能夠設置的機器數量多，且傳送距離長。

SSCNET⁶⁾和 MECHATROLINK 通訊⁷⁾等運動控制網路是為了控制伺服馬達而開發。能以短週期下達指令讓各軸追隨，可進行多軸的同步運轉。但是連接台數少，且傳送距離也短。

4) CC-Link(Control & Communication Link)為 Mitsubishi Electric Corporation 推動的開放現場網路。CC-Link 是 Mitsubishi Electric Corporation 的註冊商標。

5) DeviceNet 為 ODVA(Open DeviceNet Vendor Association, Inc.)推動的開放現場網路。DeviceNet 為 ODVA(Open DeviceNet Vendor Association, Inc.)的註冊商標。

6) SSCNETIII/H 為 Mitsubishi Electric Corporation 推動的運動控制網路。SSCNETIII/H 是 Mitsubishi Electric Corporation 的註冊商標。

7) MECHATROLINK-II、MECHATROLINK-III 為 MECHATROLINK 協會推動的運動控制網路。MECHATROLINK 是 MECHATROLINK 協會的註冊商標。

後記

感謝您閱讀「技術手冊 步進馬達技術篇」。

本技術篇在說明上主要著重於讓讀者理解步進馬達。想必您已理解產生正確動作的構造和動作原理，以及與其他馬達不同的各種特性等內容。


現代社會中，日常周遭使用了許多自動化機器。而讓那些動作產生的正是馬達。除了本書介紹的步進馬達，日常生活中還使用了如感應馬達、無刷馬達、伺服馬達、DC 馬達等各種馬達。從大小和輸出的觀點來看，小至手機用的振動馬達，大至汽車或船隻使用的動力用馬達，使用範圍極廣。運用各種馬達的特徵，支撐了現代社會的各種運作。

希望本技術手冊對讀者有所幫助，並能促進社會進步與發展。







The background is a solid light orange color. It is decorated with various geometric elements: a large white circle with a smaller white circle inside on the left; several hexagons in white outline and solid orange and light orange colors scattered across the page; a large white hexagon with a yellow outline on the right; and a series of parallel white lines at the bottom left.

台灣東方馬達股份有限公司