



單元

3

直流電動機

» 單元重點

第四章曾介紹過格拉美於 1873 年在維也納展示發電機作品時，意外發現到將發電機倒過來運用就變成電動機【可逆反應】。因此直流電動機與直流發電機構造完全相同，許多特性非常類似，為了避免學習過程中造成混淆，妥善運用弗萊明左手定則（電動機定則）與弗萊明右手定則（發電機定則）來幫助觀念釐清，對於本單元的學習會有很大的幫助。

» 單元綱要

- 第八章 直流電動機之原理
- 第九章 直流電動機之構造
- 第十章 直流電動機之一般性質
- 第十一章 直流電動機之分類、特性及運用
- 第十二章 直流電動機之耗損及效率

單元學習時間 15 小時

單元三 生活知識家 直流電動機 - 便利生活的小幫手

1880 年代開發出的直流電動機是最早的馬達形式，雖然會有火花、碳刷需要維修、壽命短等缺點，但是驅動簡單並且相對便宜，在不需考量空間及不需要長時間使用的場所（例如汽機車的啟動馬達、電動座椅、電動窗簾、電動牙刷等），仍然可以看到直流電動機提供人類便利的生活。

目前汽車大多數電動機都採用 DC12V 系統，1950 年代起首先將啟動馬達、兩刷馬達運用於汽車後，發展至今汽車內可能裝有上百類不同類型的電動機，電動化的程度也會越來越高。





CHAPTER 8

直流電動機之原理

» 本章重點

本章首先介紹直流電動機的基本原理及轉矩計算，其次說明轉速、轉矩與輸出功率三者間的關係，最後介紹電動機運轉過程時因為負載改變所形成的變化。其中【電動機負載】所代表的意義對於後續學習很重要，務必要了解。

8-1 直流電動機基本原理

(一) 電動機動作原理

簡易電動機的設計如圖 8-1 所示，將直導線繞成口字形的線圈放入磁場中，線圈兩端分別安裝圓弧形的換向片並透過電刷與外部直流電源連接。

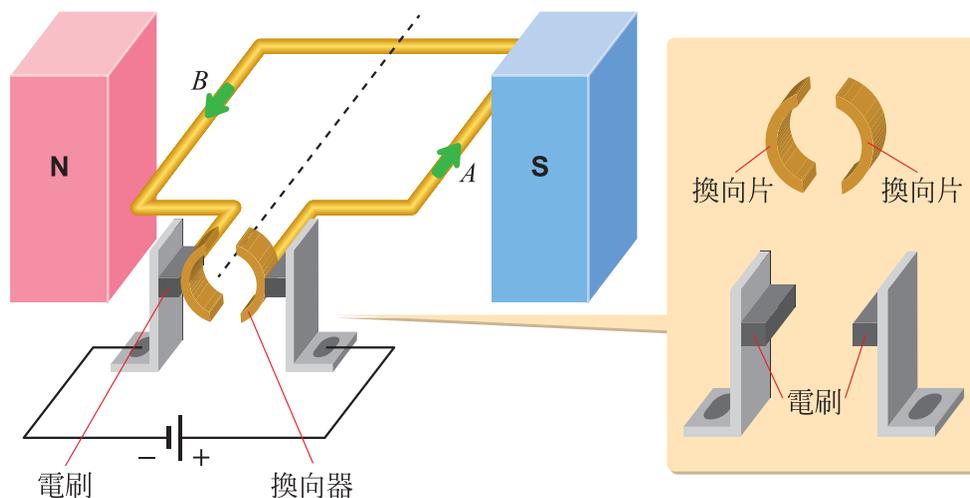


圖 8-1 簡易電動機構造

電流進入線圈後與磁場作用，以圖 8-2 為例，線圈邊 A 產生向下的電磁力 F ，線圈邊 B 產生大小相同、方向朝上的電磁力 F ，整個線圈產生順時針旋轉的趨向，這種趨向就稱為轉矩 T (torque)，常用單位為牛頓 - 公尺 (N-m)。

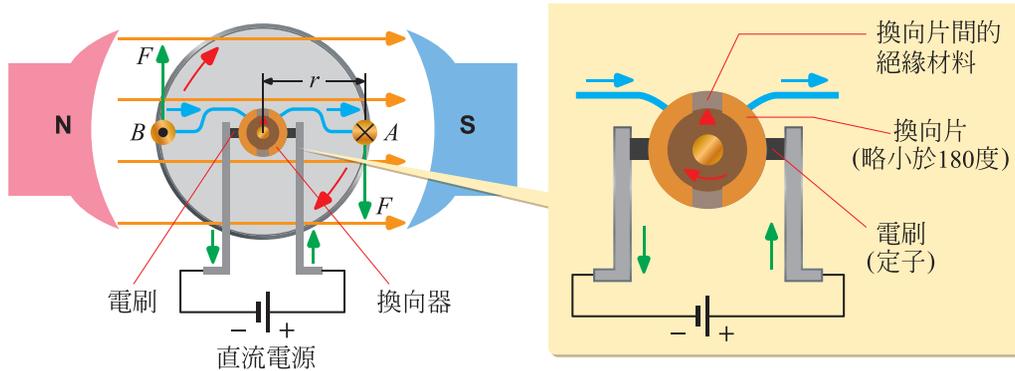


圖 8-2 線圈電流與作用力方向

單根導體【 A 或 B 】在圖 8-2 位置時，於軸心所產生的轉矩為

$$T = F \times r \quad (8-1)$$

T ：轉矩 (N-m) F ：電磁力 (nt) r ：電磁力與軸心之距離 (m)

整個線圈 (A 、 B 兩根導體) 合計產生的轉矩則為

$$T = 2 \times F \times r \quad (8-2)$$

直流電動機單一線圈運轉分析過程如圖 8-3，其中：

1. 線圈平面與磁場方向平行【0 度位置】

兩根導體產生大小相等、方向相反的電磁力 $F = B\ell I$ ，促使線圈產生順時針旋轉的力量，整個線圈在此位置時轉矩最大 $T = 2 \times F \times r$ 。

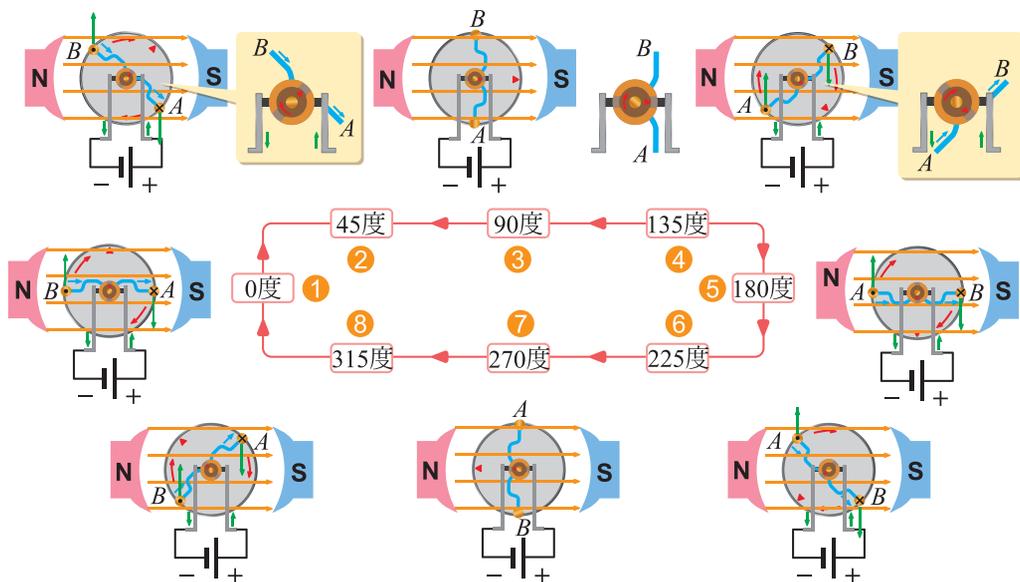


圖 8-3 直流電動機單一線圈運轉分析圖

2. 線圈順時針旋轉至與磁場方向成【45度位置】

A 、 B 兩根導體產生的電磁力 ($F = BlI$) 不變，但是如圖 8-4 所示，有效作用力 $F' = F \cos \theta$ 變小 (θ ：線圈平面與磁力線的夾角)。使得轉矩 $T = 2 \times F' \times r$ 下降，但線圈仍維持順時針方向旋轉。

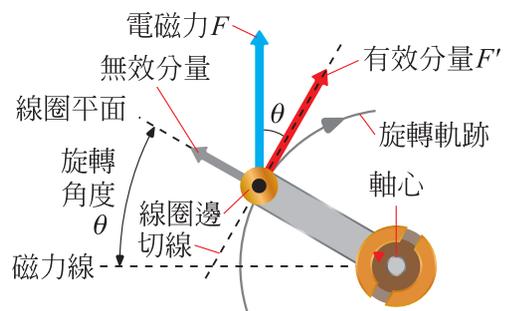


圖 8-4 線圈產生的作用力

3. 線圈平面與磁場方向垂直【90度位置】

電刷接觸到換向片間的絕緣物質，電流無法進入線圈；另一方面，此位置有效作用力 $F' = F \cos 90^\circ = 0$ ，轉矩 $T = 0$ 。倘若只有單一線圈時，必須依靠慣性作用才能使線圈離開此位置（磁中性面）。

4. 線圈順時針旋轉至與磁場方向成【135度位置】

電刷所接觸的換向片互換，使得電流改由 B 邊流入再由 A 邊流出。兩根導體的電磁力 $F = B\ell I$ 維持不變，轉矩大小與【45度位置】時相同，線圈繼續維持順時針旋轉。

5. 線圈平面與磁場方向平行【180度位置】

線圈持續順時針方向旋轉，此時轉矩與【0度位置】時相同，又變成最大值。

綜合上述，單一線圈通電後在磁場中產生的轉矩會隨著線圈位置而呈現脈動現象，其結果如圖 8-5 所示。

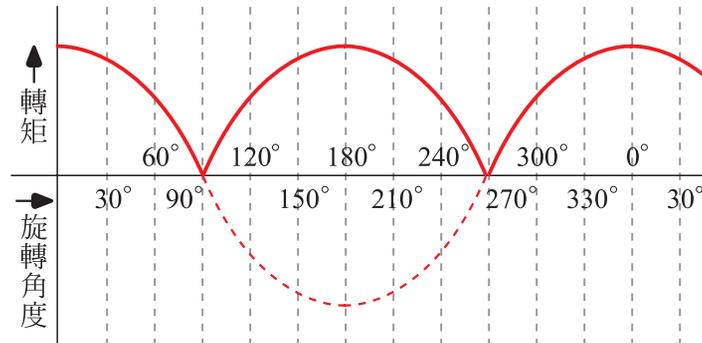


圖 8-5 單一線圈產生的轉矩

由於轉矩會隨著旋轉位置而改變，因此公式 8-2 的轉矩必須修正為：

$$T = 2 \times F \times r \times \cos \theta_T \quad (8-3)$$

θ_T ：線圈平面與磁力線的夾角



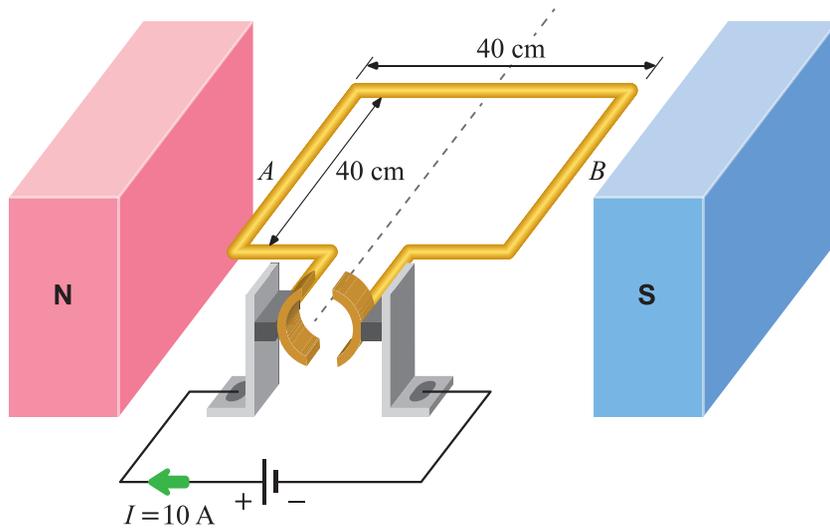
倘若線圈繞有 N 匝，則電磁力及轉矩為單匝線圈的 N 倍。



範例
01

如下圖所示，有一個 40 公分的方形線圈，匝數為 50 匝，所載電流為 10 A，置於磁通密度 $B = 0.1 \text{ Wb/m}^2$ 的磁場，線圈平面與磁場平行，試求：

- (1) 線圈一邊之電磁力為何？
- (2) 線圈旋轉方向為何？
- (3) 線圈轉矩為多少？
- (4) 倘若線圈旋轉 30 度後，轉矩變為多少？



解 線圈共有 50 匝因此 A 、 B 兩邊各有 50 根導體 ($Z = 50$)

(1) 單邊之電磁力 $F = ZBlI \sin \theta = 50 \times 0.1 \times (0.4 \text{ m}) \times 10 \times \sin 90^\circ = 20 \text{ nt}$

(2) 電流由線圈的 A 邊流入、 B 邊流出，依據弗萊明左手定則，可得 A 邊作用力向下、 B 邊作用力向上，線圈產生逆時針旋轉之轉矩

(3) 轉矩 $T = 2 \times F \times r = 2 \times 20 \text{ nt} \times (0.2 \text{ m}) = 8 \text{ N-m}$

(4) 轉矩 $T' = 2 \times F \times r \times \cos \theta_T = 2 \times 20 \text{ nt} \times (0.2 \text{ m}) \times \cos 30^\circ = 4\sqrt{3} \text{ N-m}$

(二) 直流電動機動作原理

爲了得到穩定的起動及運轉特性，一般直流電動機定子鐵心會改用磁場繞組取代永久磁鐵；轉子鐵心會有許多線槽以容納更多線圈，其外觀如圖 8-6 所示。

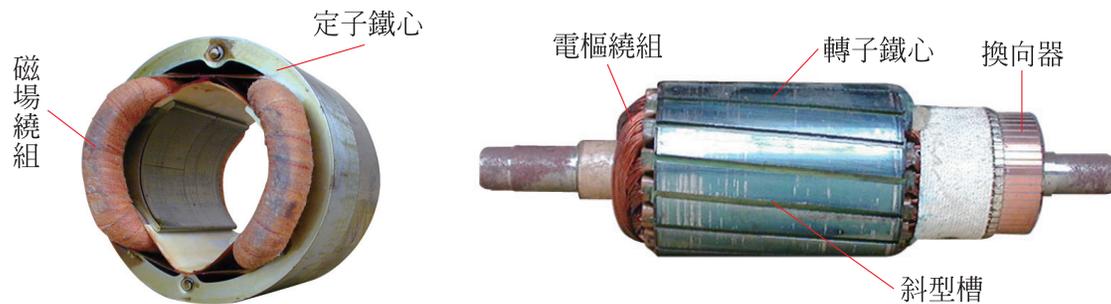


圖 8-6 直流電動機外觀 (圖片來源：開富公司)

圖 8-7 爲一部 4 極 ($P = 4$) 直流電動機的剖面圖，每極磁通量 ϕ ，轉子線槽內共有 Z 根電樞導體，分成 a 個電流路徑，當輸入電樞電流爲 I_a 時，整部直流電動機朝順時鐘方向旋轉，其電磁轉矩爲：

$$T = \frac{PZ}{2\pi a} \times \phi \times I_a \quad (8-4)$$

T ：轉矩 (牛頓 - 公尺；N-m)；(1 Kg - m = 9.8 N-m) a ：並聯路徑數

P ：磁極數 Z ：電樞繞組總導體數 (根)

ϕ ：每極磁通量 (Wb) I_a ：輸入電樞電流 (A)

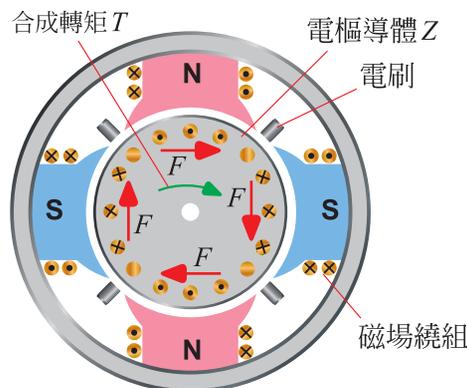


圖 8-7 四極電動機



電動機在出廠時，磁極數 P 、電樞繞組導總體 Z 以及並聯路徑數 a 已經由廠商設計與安裝完成，使用者無法改變，因此可視為常數 K_T ，至於磁通量 ϕ 可透過激磁電流來控制，而電樞電流 I_a 則會依據負載大小而變動，因此公式 8-4 可以簡化為

$$T = \left(\frac{PZ}{2\pi a}\right) \times \phi \times I_a = K_T \phi I_a \quad (8-5)$$

亦即電動機轉矩 T 與磁通量 ϕ 以及電樞電流 I_a 成正比。

範例

02

一台 4 極直流電動機，電樞總導體數為 720 根，電樞輸入的電流為 120 A，每極磁通量為 5×10^{-3} Wb，電樞之並聯路徑數為 4，試求：

(1) 電磁轉矩為多少牛頓 - 米？ (2) 相當於多少公斤 - 米？

解 (1) $T = \frac{PZ}{2\pi a} \times \phi \times I_a = \frac{4 \times 720}{2\pi \times 4} \times 5 \times 10^{-3} \times 120 = \frac{216}{\pi} = 68.8 \text{ N-m}$

(2) $1 \text{ kg-m} = 9.8 \text{ N-m}$ ，因此 $T = \frac{216}{9.8\pi} = 7.02 \text{ kg-m}$

範例

03

某直流電動機當電樞電流為 50 A 時產生的轉矩為 100 N-m，若磁通密度減為原來的 80%，電樞電流增為 80 A 時，其他條件均不變時，轉矩變為多少牛頓 - 公尺？

解 磁通密度 B 變成 0.8 倍，磁通量 $\phi = A \times B$ 也變成 0.8 倍

電流變成 $\frac{80 \text{ A}}{50 \text{ A}} = 1.6$ 倍

轉矩 $T' = K_T \phi I_a = 100 \times 0.8 \times 1.6 = 128 \text{ N-m}$

隨堂練習

- () 1. 一台 6 極直流電動機，每極磁通量為 0.06 Wb，電樞總導體數為 360 根，電樞輸入的電流為 50 A，電樞之並聯路徑數為 6，試求產生的電磁轉矩為多少公斤 - 米？
(A) 9.8 (B) 17.55 (C) 96.04 (D) 172。
- () 2. 同上題，倘若電樞電流變成 40 A，則每極磁通量應該調整為多少韋伯，才能維持轉矩不變？ (A) 1.25 (B) 0.8 (C) 0.075 (D) 0.048。

8-2 轉矩、轉速與輸出功率

(一) 轉矩

1. 基本觀念

對於電動機而言，轉矩 (T) 一詞會經常提及。**轉矩就是促使物體產生迴轉的力量，常用單位為 (N·m)**，其大小就是作用力 F (nt) 乘以力與旋轉軸中心的垂直距離 r (m)，即 $T = F \times r$ (N·m)，如圖 8-8 所示，在作用力 $F = 10$ nt 不變下，施力點的位置決定轉矩的大小。

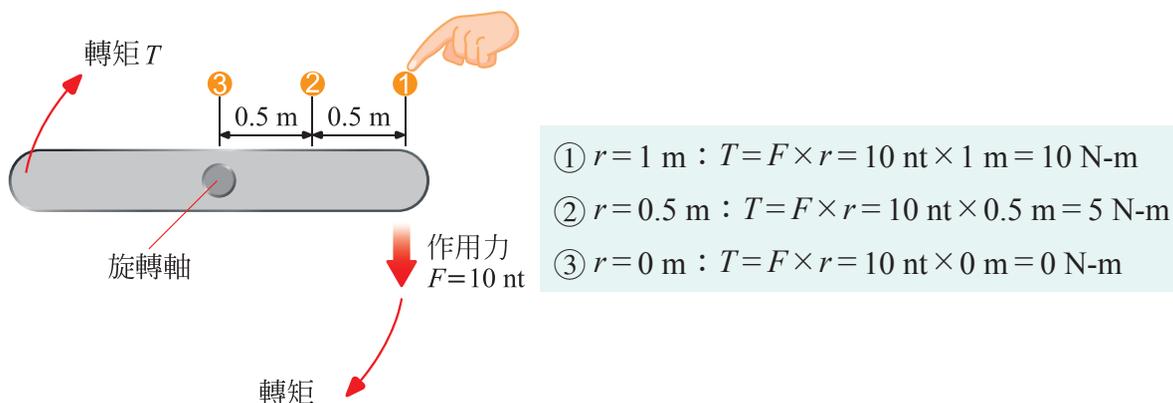


圖 8-8 施力點與轉矩的關係

2. 轉矩測量

小型電動機的轉矩測量方式如圖 8-9 所示，電動機通電後，隨著轉軸轉動，拉力計上的指示值也會改變，將拉力計上顯示的力量 M (kg) 乘以滑輪的半徑 r (m) 就是電動機的轉矩 T (kg·m)。

當電動機受到拉力計牽制而**無法繼續旋轉的轉矩稱為電動機的「最大轉矩」或是「停頓轉矩」**。大容量的電動機就必須透過動力計來測量轉矩。

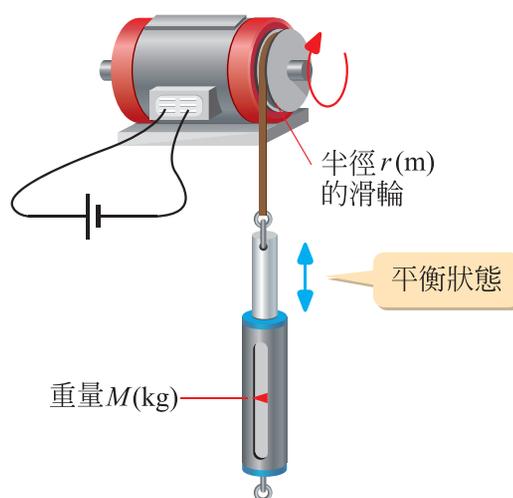


圖 8-9 利用拉力計測量轉矩

(二) 轉速

電動機的轉速 (n) 通常以轉軸一分鐘的旋轉次數表示，常用單位為 r.p.m. (revolution per minute)；有時候也會用一秒鐘的旋轉次數表示，其單位為 r.p.s.(revolution per second)。兩者關係為 $\text{r.p.s.} = \frac{\text{r.p.m.}}{60}$ 。

圖 8-10(a) 為光學測定方式，可以在不接觸的狀況下測出旋轉速度。圖 8-10(b) 則是在轉軸上連接小型發電機 (稱為轉速發電機)，利用發電機應電勢 (E) 與轉速 (n) 成正比的關係換算出轉速。

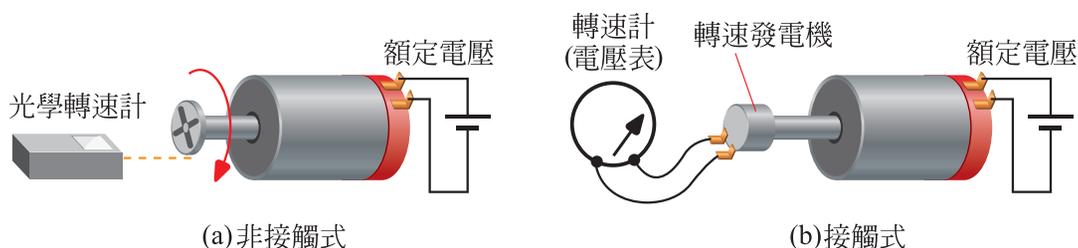


圖 8-10 測量轉速

電動機運轉過程中有關電壓、電流、功率、轉速等數值都會標示於銘牌上，這些標示的數值稱為『額定值』或是『滿載值』，例如額定電壓是指電動機使用時所需的電壓值，至於電動機的輸入電流會隨著負載大小而改變。以圖 8-11(a) 為例，電動機的轉軸端沒有接上負載的狀態稱為無載，此時向電源取用的電流稱為無載電流，轉速則稱為無載轉速。

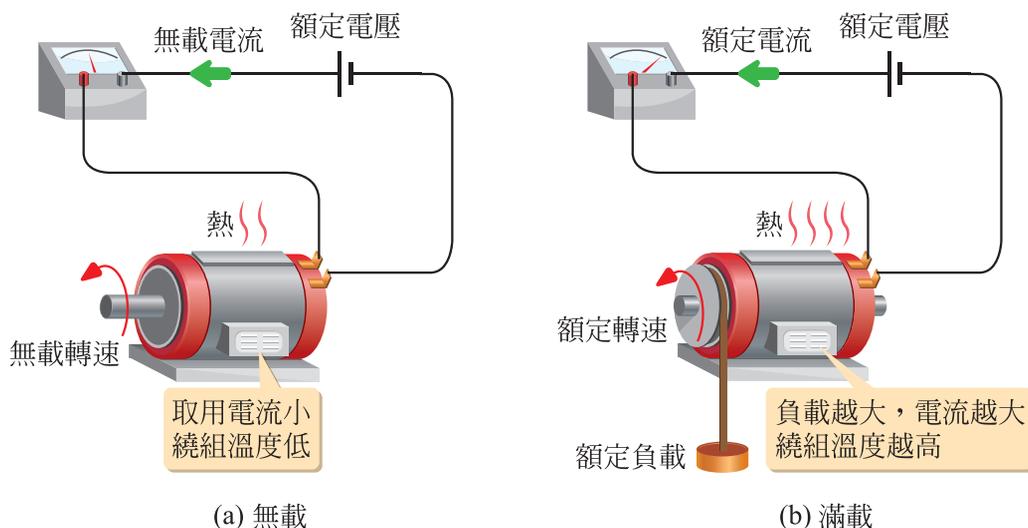


圖 8-11 電動機的運轉狀態

隨著軸端的負載逐漸增加，電動機取用的電流變大，轉速也會變化。當電動機軸端負載增加至額定（滿載）時，如圖 8-11(b)，此時取用的電流值就稱為額定（滿載）電流、轉速就稱為額定（滿載）轉速。倘若負載超過滿載值，繞組本身銅損導致溫度過高，會造成電動機效率降低甚至燒毀，要特別注意。

(三) 輸入功率與輸出功率

將圖 8-12 之電動機外加電壓 V 後，電流 I 開始流動，對電動機而言，輸入功率為：

$$P_{in} = V \times I \quad (8-6)$$

P_{in} ：輸入功率 (W)

V ：電壓 (V)

I ：輸入電流 (A)

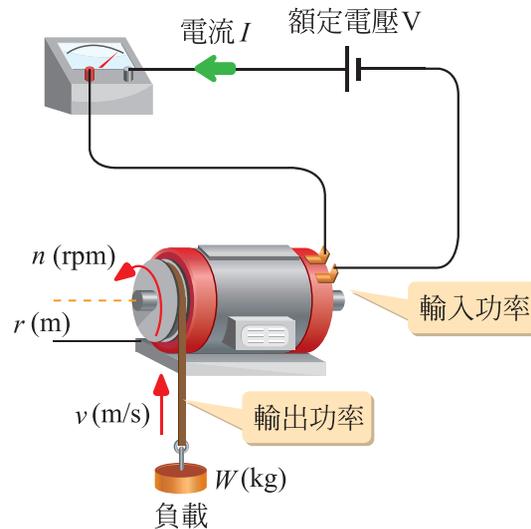


圖 8-12 輸入功率與輸出功率的關係圖

假設電動機滑輪的半徑為 r (m)，轉速為 n (rpm)，電動機電樞內導體通電後所產生的作用力為 F (nt)，則電樞導體每秒旋轉所生的功率為

$$P_o = \frac{W}{t} = \frac{F \times d}{t} = F \times v = F \times \left(2\pi r \times \frac{n}{60}\right) = F \times r \times \left(\frac{2\pi n}{60}\right) = T \times \left(\frac{2\pi n}{60}\right) = T \times \omega$$

整理上式可得電動機的輸出功率 P_o 、轉速 n 與轉矩 T 之間的關係為：

$$P_o = \omega \times T = \frac{2\pi n}{60} \times T \quad (8-7)$$

T ：轉矩 (N-m)

P_o ：輸出機械功率 (W)；1 馬力 = 746 瓦特

n ：每分鐘轉數 (rpm)

ω ：旋轉角速度 (徑 / 秒；rad/sec)

電動機的輸出機械功率 (P_o) 與輸入電功率 (P_{in}) 的比值稱為效率 (η)，常以百分比表示，即：

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% \quad (8-8)$$

(四) 轉速與轉矩的關係

依據公式 8-7，可知電動機在輸出功率 P_o 相同下，若不考慮摩擦損失，如圖 8-13 所示，將電動機轉軸改接齒輪後再與負載連接。若是轉速 $n_2 = \frac{n_1}{10}$ ，則轉矩 $T_2 = 10T_1$ 。這種使用齒輪來降低轉速、增大轉矩或是改變轉向的機構稱為齒輪箱 (gear case) 或是減速機 (gear reducer)。

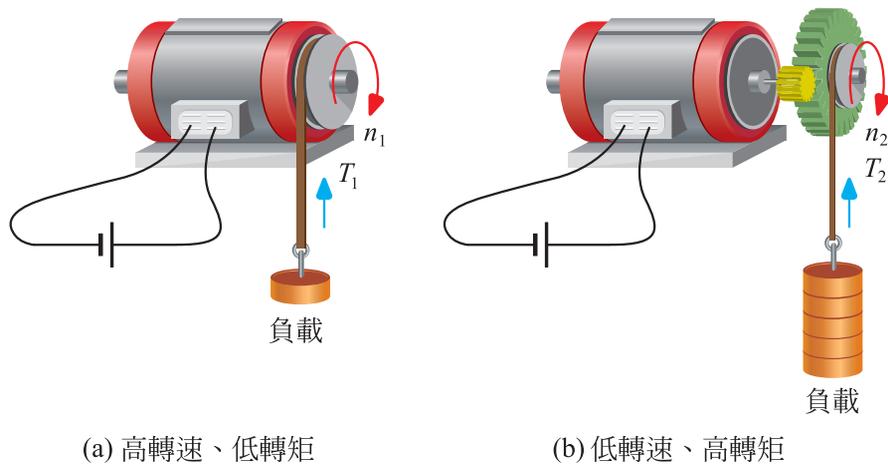


圖 8-13 轉矩與轉速的關係

(五) 直流電動機的運轉特性

直流電動機運轉過程，當負載改變時，電動機向電源取用的電流 (I)、旋轉的速度 (n)、輸出轉矩 (T) 以及輸出功率 (P_o) 等都會改變，將這些數據整理後可繪製成直流電動機運轉特性，其結果如圖 8-14 所示。

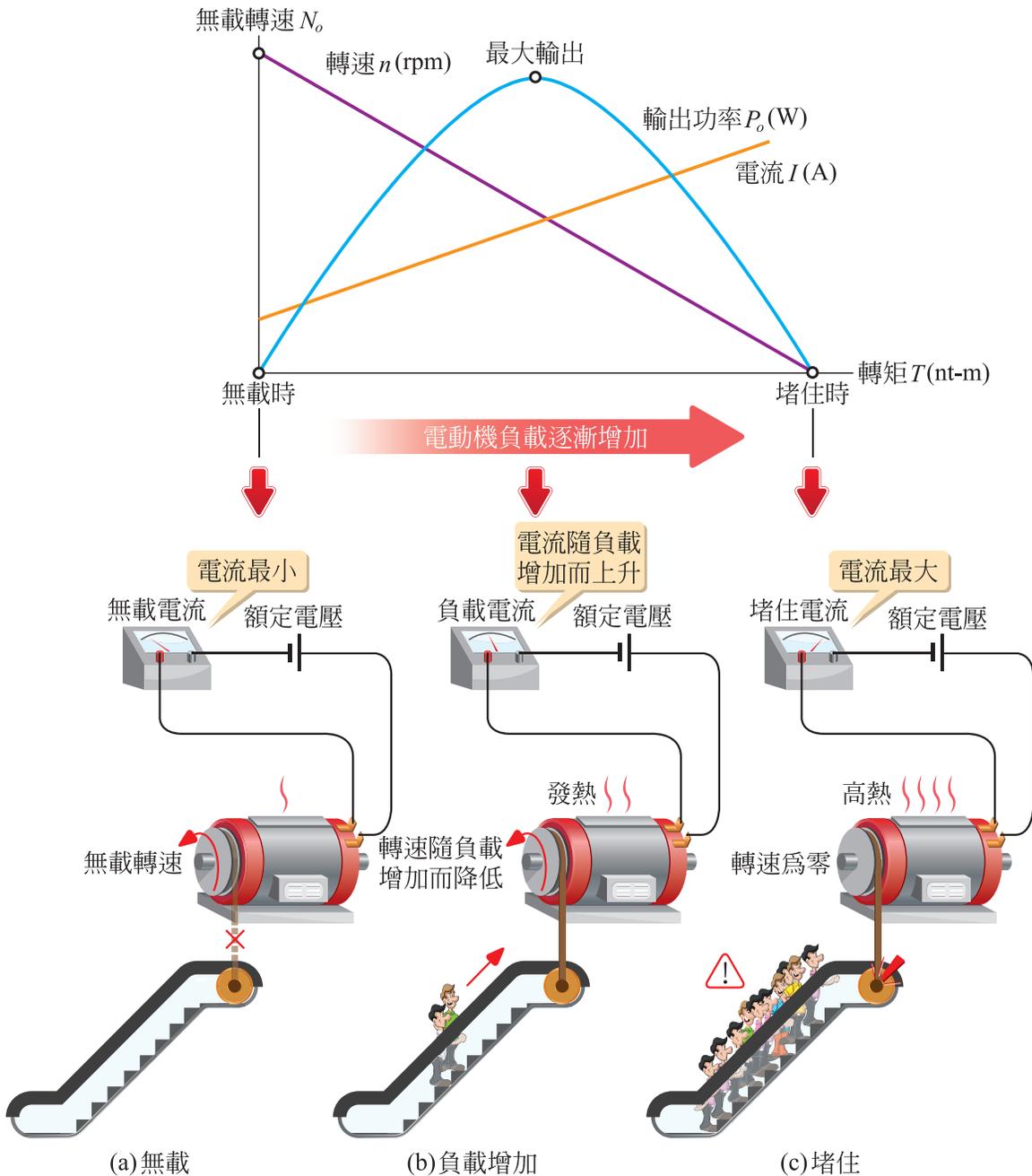


圖 8-14 直流電動機的運轉特性曲線



圖 8-14 是假設使用直流電動機作為手扶梯的動力來源，其中：

1. 無載：圖 8-14(a) 為電動機的轉軸上沒接負載【未與手扶梯連接】時，由於旋轉阻力小，因此**電動機輸出轉矩小、轉速也較高**、依據公式 8-7 可得無載時輸出功率極低、電動機向電源取用電流也很小。
2. 負載增加：圖 8-14(b) 為電動機外加負載【手扶梯】後，當負載增加【乘客變多】，**電動機的輸出轉矩隨之增加以克服旋轉時的阻力**，此時轉速降低、輸出功率變大、輸入電流上升，電動機也會因為銅損變大而發熱。
3. 堵住：圖 8-14(c) 是指負載過重【超載或異物卡住】時，所造成的**阻力超過電動機最大轉矩，電動機停住不轉，轉速變為 0**，輸出功率為 0。電動機向電源取用的電流變成銅損產生高熱，若不及時將電源切離，電動機將會燒毀，實務上會使用過電流保護裝置來避免過載情形發生。

綜合上述，電動機軸端的機械負載（例如手扶梯的乘客）會隨時改變，因此電動機的轉速、轉矩、向電源取用的電流 (I) 以及功率等數值也會隨時變動。不同機種的變化情形差異很大，必須依據需要選擇適合的電動機。

範例

04

一台 100 V 直流電動機，運轉過程中測得電動機的輸入電流為 5 安培，轉矩為 1.91 牛頓 - 公尺，轉速為 2000 rpm，求此時電動機：

(1) 輸入功率、(2) 輸出功率、(3) 效率。

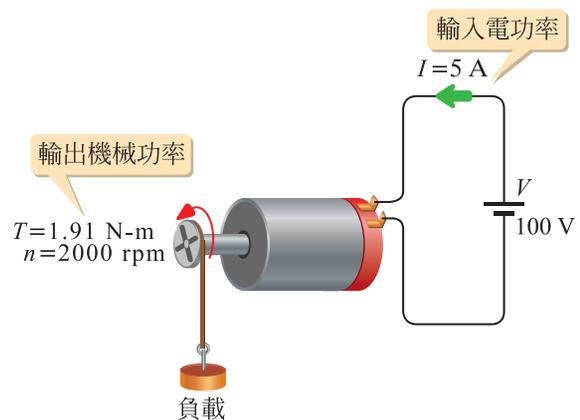
解 依照題意，電動機運轉時狀態如右圖所示，其中：

(1) 輸入功率 $P_{in} = V \times I =$

$$100 \text{ V} \times 5 \text{ A} = 500 \text{ W}$$

(2) 輸出功率 $P_o = \frac{2\pi nT}{60} = \frac{2\pi \times 2000 \times 1.91}{60} = 400 \text{ W}$

(3) 電動機效率 $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% = \frac{400 \text{ W}}{500 \text{ W}} \times 100\% = 80\%$



一、選擇題

- 8-1** () 1. 直流電動機，換向器功用是
- (A) 將電源的直流電改變為交流電輸入電樞繞組
 - (B) 將電源的交流電改變為直流電輸入電樞繞組
 - (C) 將電樞繞組的交流電改變為直流電輸出
 - (D) 將電樞繞組的直流電改變為交流電輸出。
- () 2. 轉矩單位為 (A) 牛頓 - 公尺 (B) 牛頓 (C) 特斯拉 (D) 瓦特。
- () 3. 直流電動機轉矩與下列何者成反比？
- (A) 電樞並聯路徑數 (B) 極數 (C) 導體數 (D) 磁通量。
- () 4. 4 極直流電動機，電樞導體為 800 根，每極磁通量 5×10^{-3} Wb，電樞並聯路徑為 4，若電樞輸入電流 100 A，則電動機轉矩為多少？
- (A) 6.5 kg-m (B) 13 kg-m (C) 63.7 kg-m (D) 127.4 kg-m。
- () 5. 某一直流電動機的電樞電流為 60 A，產生 120 N-m 的轉矩，若磁場降低為原來的 80%，則電樞電流要增加到多少安培才能產生 160 N-m 之新轉矩？ (A) 90 A (B) 100 A (C) 120 A (D) 160 A。
- () 6. 某一直流電動機當電流為 50 A 時，產生 60 N-m 之轉矩，若將其磁場減少 25%，而線路電流增為 80 A，則轉矩變為多少？
- (A) 96 kg-m (B) 72 kg-m (C) 24 kg-m (D) 7.35 kg-m。
- () 7. 直流電動機之轉矩大小與磁通量及電樞電流兩者之關係為
- (A) 皆成正比
 - (B) 皆成反比
 - (C) 與磁通量成正比，電樞電流成反比
 - (D) 與磁通量成反比，電樞電流成正比。

自我評量

- () 8. 欲使直流電動機的電樞循同一方向持續旋轉，則電樞導體中之電流在經過
- (A) 與磁場平行之平面
 - (B) 與磁場垂直之平面
 - (C) 與磁場平行與垂直之平面
 - (D) 極軸 須經換向手續，否則其將產生左右搖擺現象。
- 8-2** () 9. 有一部直流電動機，當其輸出為 6 kW 時，測得轉矩為 9.8 kg-m，則電動機的轉速應為多少？
- (A) 489 rpm (B) 597 rpm (C) 890 rpm (D) 1780 rpm。
- () 10. 電樞的角速度為 314 弧度 / 秒，則相當於
- (A) 3600 rpm (B) 3000 rpm (C) 1500 rpm (D) 1200 rpm。
- () 11. 直流電動機之輸出功率是
- (A) 轉矩 × 角速度
 - (B) 反電動勢 × 電樞電流
 - (C) 滿載端電壓 × 滿載輸入電流
 - (D) 滿載端電壓 × 電樞電流。
- () 12. 電動機使用減速機之目的，在於
- (A) 降低起動電流
 - (B) 增加轉速
 - (C) 減少噪音
 - (D) 提高轉矩。
- () 13. 4 極，1800 rpm 之直流電動機，其轉矩為 2 kg-m，此電動機透過一組齒輪比為 1 : 3 來帶動機器，忽略損失情形下，輸出轉矩及轉速為多少？
- (A) 2/3 kg-m、5400 rpm
 - (B) 2/3 kg-m、600 rpm
 - (C) 6 kg-m、5400 rpm
 - (D) 6 kg-m、600 rpm。



CHAPTER
9

直流電動機之構造

» 本章重點

直流電動機的構造與直流發電機完全相同，差別在於能量轉換方式相反，有關元件種類及電樞繞組的繞製等詳細內容，可以參閱第四章直流發電機的說明。本章主要學習重點是了解直流發電機與直流電動機互換使用時的差異。

9-1 直流電機的基本構造

圖 9-1 為直流電機的剖面圖，**無論是直流發電機或是直流電動機構造都相同**，基本元件包括定子以及會旋轉的轉子兩大部分，相關內容可參考第 4 章的介紹。

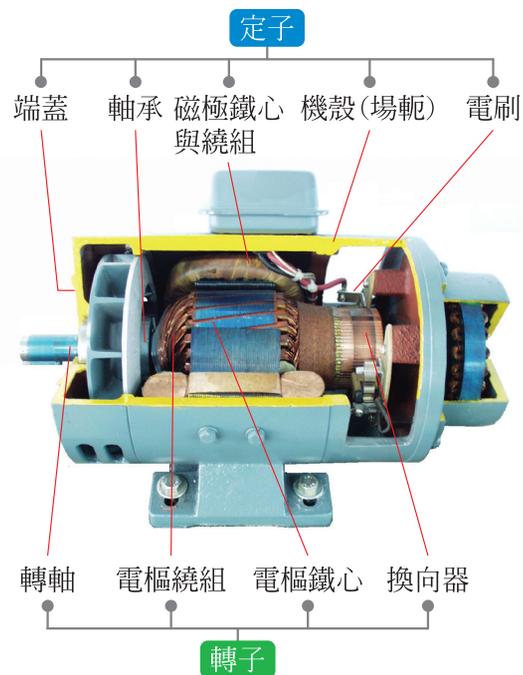


圖 9-1 直流電機的剖面圖

隨堂練習

- () 1. 直流電動機與直流發電機構造
(A) 完全不同 (B) 完全相同 (C) 大同小異 (D) 小同大異。
- () 2. 下列何者不屬於直流機的轉子？ (A) 電刷 (B) 換向器 (C) 轉軸 (D) 電樞繞組。
- () 3. 直流電機鐵心通常採用薄矽鋼片疊製而成，其主要目的為何？
(A) 減低噪音 (B) 減低磁滯損 (C) 減低渦流損 (D) 避免磁飽和。
- () 4. 4極直流電動機，若電樞採用單分疊繞組與單分波繞，其電流路徑數分別為？
(A) 2、2 (B) 2、4 (C) 4、2 (D) 4、4。

9-2 直流電機的比較

直流電機可以依據需要做為電動機或是發電機使用，以圖 9-2 直流分激式電機為例，其主要差異有以下幾項：

(一) 能量轉移方式不同

1. 直流電動機：參考圖 9-2(a)，必須外加直流電源，電樞繞組才能產生轉矩並透過轉軸帶動外部負載，**能量轉換方式是將直流電能轉變成機械能**。
2. 直流發電機：參考圖 9-2(b)，必須依靠外力(風力、水力等)帶動轉軸，電樞繞組才能持續產生應電勢輸送給負載使用。**能量轉換方式是將機械能轉變成直流電能**。

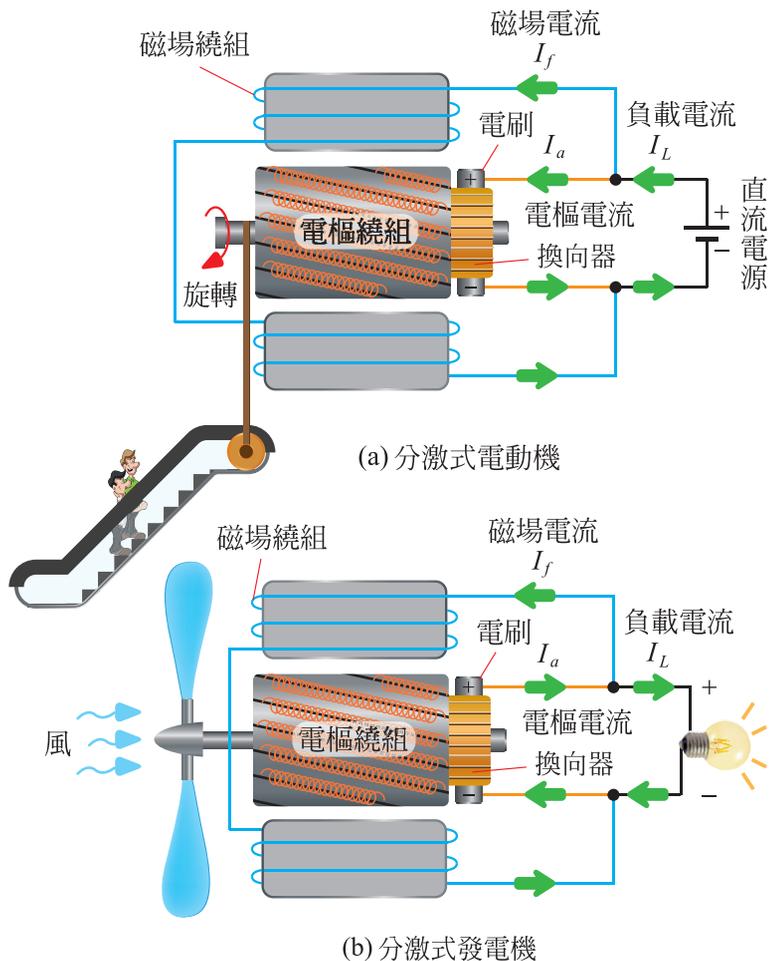


圖 9-2 直流分激式電機的兩種用途



(二) 電流方向不同

1. 直流電動機：圖 9-2(a) 中，電源正端流出的電流稱為輸入電流或是線路電流 (I_L)，分成磁場電流 (I_f) 與電樞電流 (I_a)，**直流分激電動機的電流關係為 $I_L = I_a + I_f$ 。**
2. 直流發電機：圖 9-2(b) 中，電樞繞組產生應電勢後，經由電刷流出的電流稱為電樞電流 (I_a)，分成磁場電流 (I_f) 與負載電流 (I_L)，**直流分激發電機的電流關係為 $I_a = I_L + I_f$ 。**
比較兩圖可以發現，直流分激式電機做為發電機與電動機使用時，電樞電流 (I_a) 方向相反，而分激磁場繞組電流 (I_f) 方向不變。

(三) 電刷的功能不同

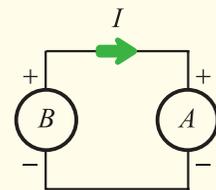
1. 直流電動機：圖 9-2(a) 直流電動機的電刷功能是**將電源所供應的直流電流傳遞給換向器**，電樞電流由上方 (+) 電刷流入換向器後進入電樞繞組，再由下方 (-) 電刷流出。
2. 直流發電機：圖 9-2(b) 直流發電機的電刷功能是**將電樞換向完成後的直流電傳遞給負載使用**，電流由上方 (+) 電刷流往負載後，由下方 (-) 電刷流入換向器後回到電樞繞組。

(四) 換向器的功能不同

1. 直流電動機：圖 9-2(a) 中，**直流電動機的換向器是將電刷傳遞進來的直流電轉換成交流電後提供電樞繞組使用**，電樞繞組才能持續產生轉矩帶動負載。
2. 直流發電機：圖 9-2(b) 中，**直流發電機的換向器是將電樞繞組旋轉過程中感應產生的交流電轉換成直流電**，再透過電刷輸送給外部的直流負載使用。
依據上述說明可以得知，**無論是直流電動機或是直流發電機，電樞內部導體的電流型態都是交流電。**

隨堂練習

- () 1. 有關直流電動機換向片的功能，何者正確？ (A) 將交流變為直流 (B) 將直流變為交流 (C) 引導直流 (D) 引導交流。
- () 2. 如右圖所示，下列何者正確？
 (A) A、B 皆為電動機 (B) A、B 皆為發電機
 (C) A 為電動機、B 為發電機 (D) A 為發電機、B 為電動機。



一、選擇題

- 9-1** () 1. 下列何者不是構成磁路的一部分？
(A) 場軛 (B) 電刷 (C) 電樞鐵心 (D) 空氣隙。
- () 2. 將電源電流引入直流電動機之轉子電樞中的機構是
(A) 轉軸 (B) 軸承 (C) 場軛 (D) 電刷。
- () 3. 電樞採用斜形槽結構，目的為減少
(A) 渦流損 (B) 起動電流 (C) 火花 (D) 雜音。
- () 4. 必須使用均壓線之繞組是
(A) 疊形繞組 (B) 波形繞組 (C) 蛙腿式繞組 (D) 二重波繞。
- () 5. 繞組中，虛設線圈其主要目的為
(A) 機械平衡 (B) 電路平衡 (C) 外表美觀 (D) 增加轉矩。
- () 6. 有一部 6 極直流電機，電樞繞組分別採用雙分疊繞與雙分波繞，則並聯路徑數分別為 (A) 2, 6 (B) 4, 12 (C) 6, 2 (D) 12, 4。
- () 7. 有一部 6 極直流電動機若其電樞導體數一定，則繞成單分疊繞時的電流路徑數為單分波繞時之
(A) 1/3 倍 (B) 1/2 倍 (C) 3 倍 (D) 6 倍。
- () 8. 直流機電樞繞組有疊繞與波繞，就單重繞組而言，此兩種繞法之下列敘述哪一項錯誤？
(A) 波繞須有均壓環連接 (B) 疊繞較適於低電壓，大電流
(C) 波繞之電流路徑數為 2 (D) 疊繞之電流路徑數等於極數。
- () 9. 電樞繞組就節省材料而言，疊繞與波繞之正確接法為
(A) 均為前進繞法 (B) 均為後退繞
(C) 前進疊繞、後退波繞 (D) 後退疊繞、前進波繞。
- () 10. 直流電動機，換向器功用是
(A) 將電樞繞組的交流電改變為直流電輸出
(B) 將電樞繞組的直流電改變為交流電輸出
(C) 將電源的直流電改變為交流電輸入電樞繞組
(D) 將電源的交流電改變為直流電輸入電樞繞組。

自我評量

- ()11. 電樞導體之電流為直流者係
(A) 串激直流電動機 (B) 分激直流電動機
(C) 複激直流發電機 (D) 以上皆錯誤。
- ()12. 直流電動機轉矩與下列何者成反比？
(A) 電樞並聯路徑數 (B) 極數 (C) 導體數 (D) 磁通量。
- ()13. 一個 4 極的直流電機， 90° 電機角等於
(A) 45° 機械角 (B) 90° 機械角 (C) 180° 機械角 (D) 270° 機械角。
- ()14. 某 6 極 36 槽直流電動機，電樞繞組採雙層、單式疊繞、短節距繞，若電樞繞組某線圈的一個線圈邊置於第 10 槽，另一個線圈邊可能置於第 (A) 15 槽 (B) 16 槽 (C) 17 槽 (D) 18 槽。
- 9-2** ()15. 直流電動機電樞繞組內部的電流現象為
(A) 交流 (B) 直流 (C) 交直流均有 (D) 視機型而定。
- ()16. 直流電動機磁場繞組的電流為
(A) 交流 (B) 直流 (C) 交直流均有 (D) 視機型而定。

二、問答題

1. 畫圖說明直流分激電動機的基本運作原理。
2. 直流分激式發電機做為電動機使用時，主要差異有哪些？
3. 直流串激式發電機做為電動機使用時，主要差異有哪些？



CHAPTER 10

直流電動機之一般性質

» 本章重點

直流電動機與直流發電機構造相同，因此實際運轉過程中，也同樣會發生：

- (1) 電樞反應：電樞繞組通過電流時產生【電樞磁場】對原本磁場繞組所供給的【主磁場】造成了干擾現象。
- (2) 火花：電動機換向器將外部直流電變成交流電的過程中，受到電樞反應及電樞繞組本身電抗影響，造成電流變化不穩定的情形。

10-1 電樞反應的現象

(一) 電樞反應的形成

1. 主磁場 (F_m)：將圖 10-1(a) 的磁場繞組外加直流電壓後，激磁電流在繞組中流動。依據右螺旋定則，左側為 N 極，右側為 S 極。

圖 10-1(b) 的主磁場的磁動勢 (F_m) 方向與極軸平行，與機械中性面垂直。無載時，磁中性面與機械中性面重疊。

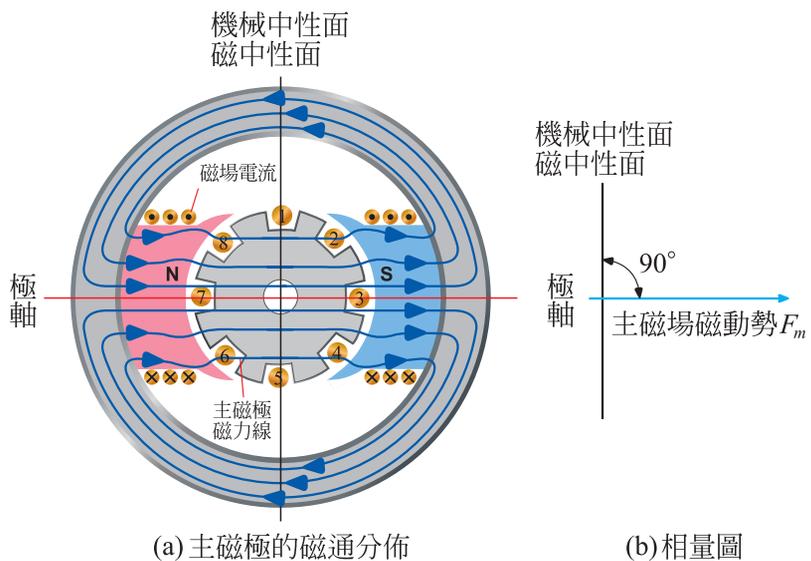


圖 10-1 直流電動機的主磁場

2. 電樞磁場 (F_a)：將圖 10-2(a) 開關 S 閉合後，電樞電流 (I_a) 開始在電樞繞組內流動，倘若電流由右側導體流入，左側導體流出，依據弗萊明左手定則，電樞繞組產生轉矩 ($T = K\phi I_a$) 朝順時針方向開始旋轉。

將圖 10-2(a) 簡化成圖 10-2(b) 後，依據右螺旋定則，整個電樞繞組內部產生向上的磁場，此由電樞電流產生的磁場稱為電樞磁場。

圖 10-2(c) 的電樞磁場的磁動勢 (F_a) 方向與極軸垂直；與刷軸及機械中性面平行。當電動機轉軸沒有連接負載 (無載) 時，電樞電流很小，可視為沒有電樞反應。

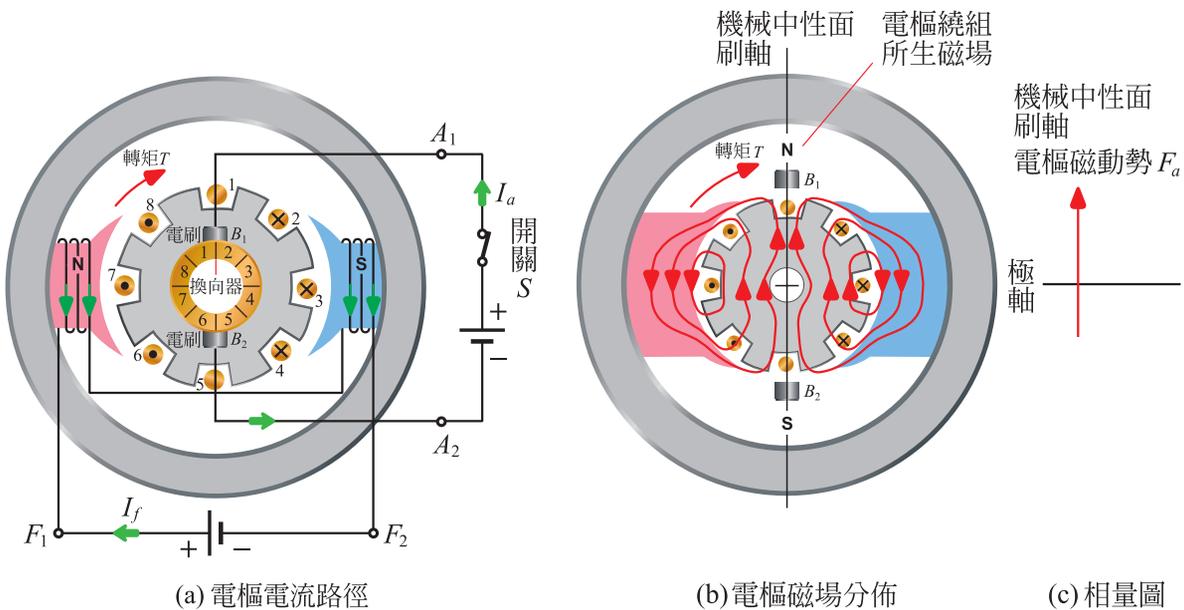


圖 10-2 直流電動機的電樞磁場

3. 合成磁場：當直流電動機軸端機械負載開始增加時，電樞電流變大，使得電樞磁場對主磁場造成干擾，將圖 10-1(a) 與圖 10-2(b) 兩者合成後，可得到磁場分佈情形如圖 10-3(a) 所示，其中：

- (1) 磁極的 m 、 k 處 (前極尖)，電樞磁場與主磁場方向相同，總磁通量增強。
- (2) 磁極的 n 、 l 處 (後極尖)，電樞磁場與主磁場方向相反，總磁通量削弱。
- (3) 將磁場作用改以圖 10-3(b) 的相量表示後，可以看出主磁場磁動勢 (F_m) 受到電樞磁動勢 (F_a) 的干擾，使得合成磁動勢 (F_o) 方向產生傾斜；造成合成磁場的磁中性面 (x, y) 不會停留在機械中性面的刷軸上，而是逆著轉向移動了 α 角。

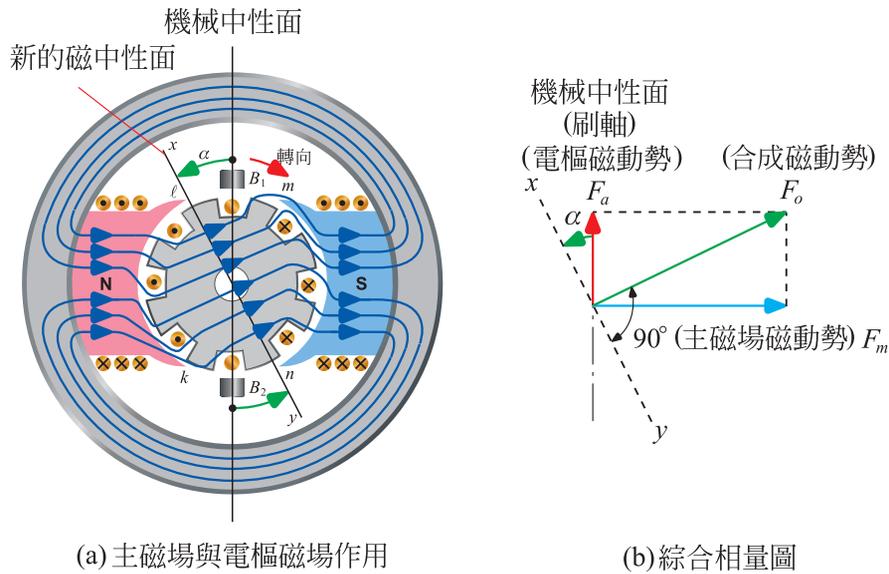
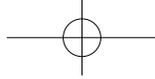


圖 10-3 直流電動機的電樞反應

- (4) 雖然前極尖 m 、 k 處的综合磁通量增強，後極尖 n 、 l 處的综合磁通量削弱，但是受限於鐵心的磁飽和作用，整體的有效磁通量 (ϕ) 還是會因為電樞反應而減少。

(二) 電刷移位對直流電動機的影響

不同的電刷移位方式對直流電動機產生影響如下：

1. 電刷不移位：圖 10-4(a) 中的電樞磁場 (F_a) 與主磁場 (F_m) 垂直，使得主磁場扭斜產生交磁效應，兩者的相量關係如圖 10-4(b) 所示。由於電刷不移動，因此被電刷短路的線圈仍有電壓存在，造成換向器間發生環流而產生火花。

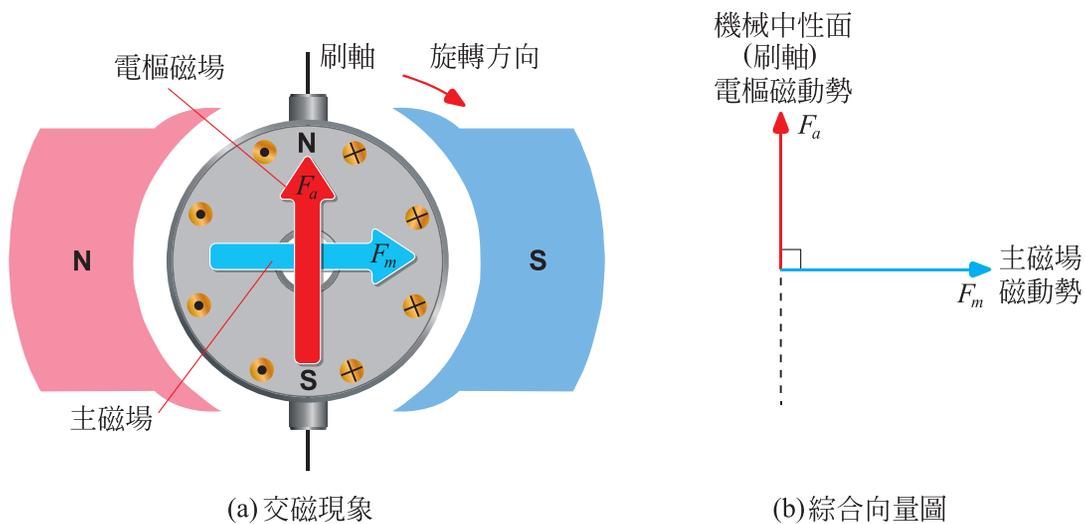


圖 10-4 電刷不移位

2. 電刷移位正確：若將電刷同樣逆著轉向移到新的磁中性面。如圖 10-5(a) 所示，此時電樞磁場方向偏左上方而非垂直向上。爲了方便分析，可將移位後的電樞磁動勢 (F_a) 分解成兩部分，如圖 10-5(b) 所示。

(1) 去磁效應：去磁磁通 (F_d) 與主磁通方向 (F_m) 相反，導致主磁通 (ϕ) 減弱，造成電動機的轉矩 ($T = K_T \phi I_a$) 降低、轉速 ($n = \frac{E}{K_n \phi}$) 增加。

(2) 交磁效應：交磁磁通 (F_c) 與主磁通方向 (F_m) 垂直，造成主磁場扭斜，導致換向困難。

電動機電刷移位正確，被電刷短路的線圈沒有感應電勢，可以避免發生火花。

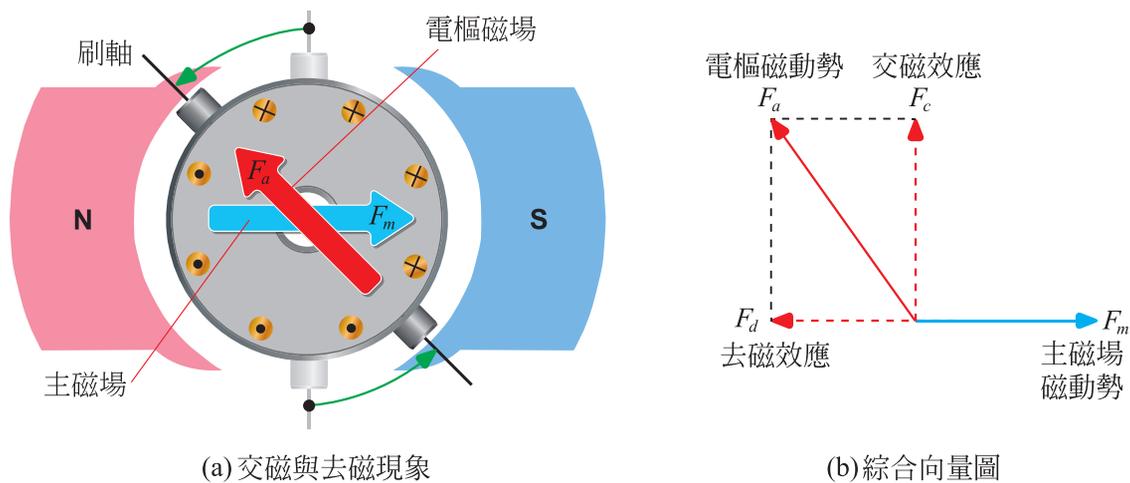


圖 10-5 電動機的電刷逆轉向移動

3. 結論：電樞反應對直流電動機的影響

- (1) 前極尖磁通增多，後極尖磁通減少，受限於磁通飽和限制，總磁通減少。
 - (2) 磁中性面逆著旋轉方向偏移，因此電刷必須逆著轉向移動。
 - (3) 交磁效應，使得合成磁場發生畸斜，造成換向困難。
 - (4) 去磁效應，使得總磁通量減少，造成電動機轉矩降低，轉速上升。
4. 直流發電機與直流電動機構造相同，因此有關電樞反應計算內容可以參考第五章的說明。至於電樞反應的影響有所差異，結果如表 10-1 所示。

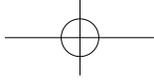


表 10-1 電樞反應對於直流電機的影響

機種		直流電動機	直流發電機
極尖磁通變化		前極尖磁通增多、後極尖磁通減少	前極尖磁通減少、後極尖磁通增多
磁中性面		逆著旋轉方向偏移	順著旋轉方向偏移
電 刷 位 置	不移動	交磁；電刷火花	交磁；電刷火花
	順著轉向移動	交磁與助磁；電刷嚴重火花	交磁與去磁
	逆著轉向移動	交磁與去磁	交磁與助磁；電刷嚴重火花
去磁造成的影響		轉矩變小、轉速變快	應電勢降低

隨堂練習

- () 1. 直流電機電樞反應之交磁與去磁部分，分別與主磁場方向
(A) 垂直、相反 (B) 相反、垂直 (C) 相同、相反 (D) 相同、垂直。
- () 2. 有關直流電動機電樞反應的影響，下列敘述何者錯誤？
(A) 造成磁中性面偏移 (B) 總磁通方向發生畸斜 (C) 轉速增加 (D) 轉矩增加。

10-2 電樞反應的對策

為了降低電樞反應對於直流電動機所造成的影響，常有的做法與直流發電機相同，有下列幾種方式：

(一) 改良主磁極結構，增加電樞磁路磁阻

包括增加主磁極數目、增加磁極尖部的空氣隙、磁極鐵心採用單極尖的薄片疊製或是楞德爾磁極法。

(二) 增設繞組

大型直流電機為了妥善解決電樞反應，在空間允許下會加裝新的繞組，包括：

1. 裝設補償繞組

補償繞組採用線徑粗、匝數少之導線繞製後，裝在主磁極極面上特設的槽內(參考圖 5-11)，並與電樞繞組串聯，但電流方向相反，因此無論負載大



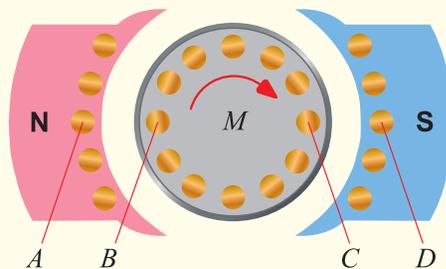
小，補償繞組所產生的磁勢都能即時抵消電樞繞組產生磁勢，是抵消電樞反應最有效的方法。缺點是體積大，成本高。

2. 中間極法

爲了使中間極發揮功能，直流電動機主磁極 (N、S) 與中間極 (n、s) 的順序爲 NnSs。換言之，直流電動機中間極的極性與逆著旋轉方向所遇到的主磁極之極性相同。

隨堂練習

- () 1. 如右圖所示，電樞導體 B 的電流方向為
 (A) 無電流 (B) \odot
 (C) \oplus (D) 無法判斷。



- () 2. 同上題，補償繞組導體 D 的電流方向為
 (A) 無電流 (B) \odot
 (C) \oplus (D) 無法判斷。

- () 3. 直流電動機需裝設換向磁極以消除電樞反應，該換向磁極之極性
 (A) 沿旋轉方向遇同極性之主磁極 (B) 沿旋轉方向遇異極性之主磁極
 (C) 旋轉反方向遇異極性之主磁極 (D) 與主磁極之極性無關。

10-3 換向

爲了讓直流電動機電樞繞組在不同的磁極下都能產生方向不變的電磁力，以維持同方向的轉矩。電樞繞組內部的電流必須爲交流電，因此必須透過換向器將外部的直流電轉變成交流電後提供給電樞使用。

(一) 換向期間

依據上述說明，電源輸入的電流始終維持大小 ($2I_c$) 與方向不變，但是線圈 b 由 N 極往 S 極旋轉過程中，電流方向由流入紙面 ($+I_c$) 變成 0 最後換成流出



紙面 ($-I_c$)。由於線圈每次經過磁中性面時電流都會改變方向，因此直流電動機電樞繞組內部的電流型態為交流電，有關電流變化情形如圖 10-6 所示。

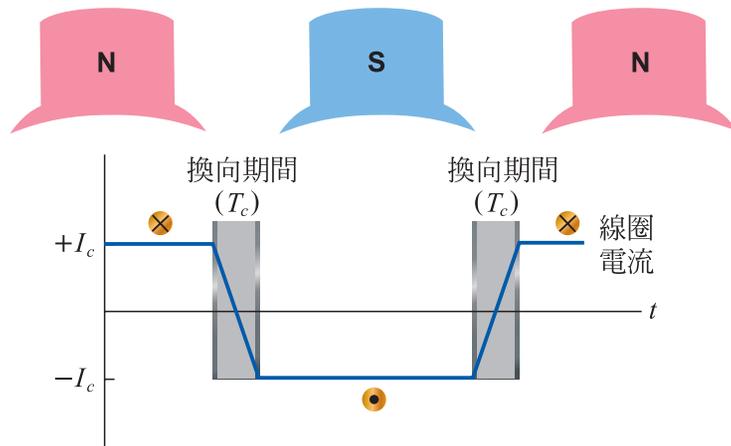


圖 10-6 換向線圈內電流的變化

(二) 換向曲線

直流電動機換向期間電流變化過程如圖 10-7 所示，有 4 種情形：

1. 直線換向：如曲線①所示，忽略電樞反應及線圈電感量影響，電流變化平穩，電刷不會產生火花，是最理想的換向曲線。

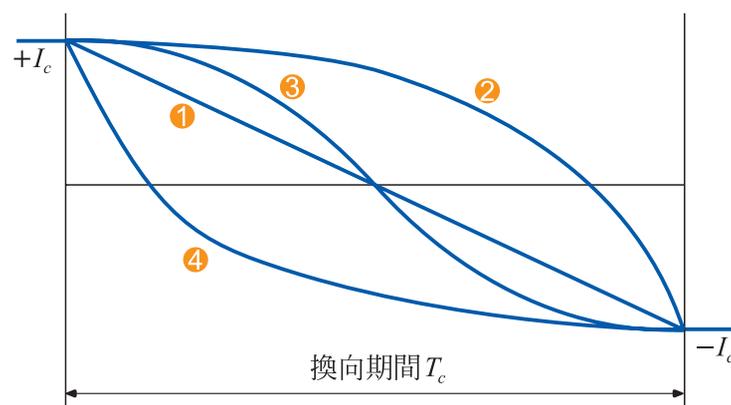
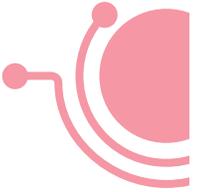


圖 10-7 四種換向曲線

2. 欠換向：如曲線②所示，受到線圈電抗電壓影響，電流變化先慢後快，造成電刷後刷邊電流密度過大，容易燒燬。



對於直流電動機而言，電樞反應造成磁中性面逆著轉向偏移，若電刷逆轉向移位過度，則會導致線圈於磁中性面之前就被電刷短路，造成後刷邊電流過大而產生火花。

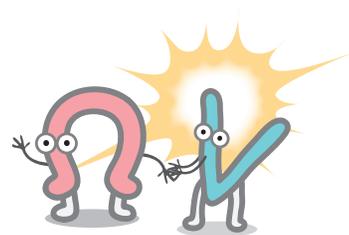
3. 正弦換向：如曲線③所示，又稱為電壓換向，透過移動電刷或是中間極等方式，產生換向電勢來抵消線圈電抗電壓。換向開始與結束時電流變化較慢，電刷不致產生火花。
4. 過換向：如曲線④所示，倘若直流電動機電刷沒有逆著轉向移動或是移位不足；或是換向電勢大於線圈本身的電抗電壓，則電流變化先快後慢，造成電刷前刷邊電流密度過大，容易燒燬。

(三) 改善換向的方法

要改善直流電動機的換向，常用的方法與直流發電機相同，可以透過移動電刷、裝置中間極、設置補償繞組、延長換向週期、減少線圈電感量或是增加電刷電阻等方式。

隨堂練習

- () 1. 直流電動機低速換向時，將使得電刷
(A) 前端發生火花 (B) 後端發生火花 (C) 不發生火花 (D) 不一定。
- () 2. 下列何者不是直流機獲得良好換向的條件？
(A) 減少電感 (B) 減少電刷接觸電阻 (C) 降低轉速 (D) 移動電刷。
- () 3. 直流機使用中間極的主要目的是
(A) 增強主磁場 (B) 改善換向 (C) 抵消電樞反應 (D) 減少噪音。



自我評量

一、選擇題

- 10-1** () 1. 無補償繞組之直流電動機，其電樞反應將造成
- (A) 前、後極尖磁通均減弱
 - (B) 前極尖磁通減弱、後極尖磁通增強
 - (C) 前、後極尖磁通均增強
 - (D) 前極尖磁通增強、後極尖磁通減弱。
- () 2. 電樞反應結果，使直流電動機的電機中性面
- (A) 順著轉向移動一個角度
 - (B) 逆著轉向移一個角度
 - (C) 維持不變
 - (D) 視負載種類而定。
- () 3. 無中間極的直流電動機，若電刷順著轉向移動，則電樞反應產生
- (A) 僅有交磁效應
 - (B) 僅有去磁效應
 - (C) 交磁、去磁效應同時存在
 - (D) 交磁、助磁效應同時存在。
- 10-2** () 4. 有關減少電樞反應的方法，下列敘述何者錯誤？
- (A) 減少電樞磁路磁阻
 - (B) 增加主磁極數目
 - (C) 裝設補償繞組
 - (D) 裝設中間極。
- () 5. 有關直流機補償繞組下列敘述何者錯誤？
- (A) 可抵消電樞反應
 - (B) 補償繞組必須與電樞繞組串聯
 - (C) 補償繞組裝設在轉子線槽內
 - (D) 補償繞組的電流方向必須與對應的電樞繞組電流相反。
- () 6. 直流電動機設置中間極之目的為
- (A) 增強主磁場
 - (B) 增強電樞磁場
 - (C) 改善換向
 - (D) 抵消電樞反應。
- () 7. 欲消除電樞反應最有效的方法為下列哪一項？
- (A) 中間極
 - (B) 均壓線
 - (C) 補償繞組
 - (D) 移動電刷位置。

自我評量

- () 8. 一直流電動機 N、S 表主磁極，磁性 n、s 表換向磁極之磁性，則循電機之旋轉方向各極極性依序為
(A) NnSs (B) nNSs (C) nNsS (D) NsSn。
- () 9. 如圖 (1) 所示為一部直流電動機，中間極 C 的極性為
(A) N (B) S
(C) 都可以 (D) 無法判斷。
- () 10. 直流電機若沒有加裝中間極，為了避免換向時產生火花，則電刷移動方向為
(A) 均順著旋轉方向
(B) 均逆著旋轉方向
(C) 發電機：順著旋轉方向、電動機：逆著旋轉方向
(D) 發電機：逆著旋轉方向、電動機：順著旋轉方向。
- () 11. 若有中間極之直流分激發電機當作電動機使用，則
(A) 電刷必須沿旋轉方向向後移動
(B) 電刷必須沿旋轉方向向前移動
(C) 電刷不必移動，但中間極上之線圈兩端要對調
(D) 電刷不必移動，中間極亦不需對調。
- () 12. 下列有關電樞反應的敘述，下列何者錯誤？
(A) 無論發電機或電動機均會有電樞反應
(B) 消除電樞反應最有效的方法為裝置補償繞組
(C) 補償繞組之安匝數應與其涵蓋面積下之電樞反應安匝數相等，方向相反
(D) 補償繞組安裝於轉子槽內。

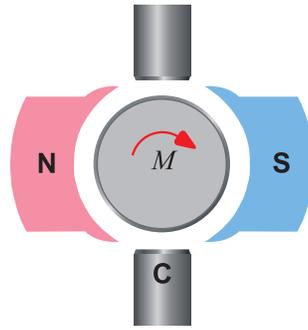


圖 (1)

自我評量

- ()13. 有關電樞反應之敘述，下列何者錯誤？
- (A) 電樞電流越大，電樞反應的影響程度會越明顯
 - (B) 電樞電流越大，會導致發電機磁通下降，電動機磁通上升
 - (C) 裝設中間極的電機，仍然無法全面抵消電樞反應
 - (D) 直流電機若正確移刷，則電樞反應會含有交磁與去磁成分。

10-3 ()14. 換向時線圈之電抗電壓大於換向電勢，稱為

- (A) 欠換向 (B) 過換向
- (C) 直線換向 (D) 正弦換向。

()15. 直流電動機若電刷移位不足，將會產生

- (A) 欠換向 (B) 過換向 (C) 直線換向 (D) 正弦換向。

二、問答題

1. 何謂電樞反應？對直流電動機會造成哪些影響。

2. 爲了降低電樞反應，直流電動機的做法有哪些？

3. 畫圖說明直流電動機的換向曲線？

4. 如圖 (2) 所示為一部直流電動機，已知主磁極及中間極極性，試回答下列問題：

- (1) 電樞旋轉方向為？
- (2) 電樞導體 B 與 C 之電流方向分別為？
- (3) 裝置於主磁極面槽內的 A 、 D 導體名稱為何？
- (4) 導體 A 、 D 的電流方向分別為？

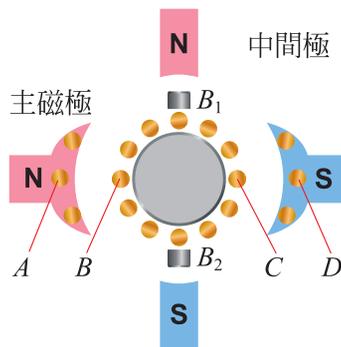


圖 (2)



CHAPTER
11

直流電動機之分類、特性及運用

» 本章重點

為了因應不同的負載需要，直流電動機的電樞繞組與磁場繞組也會有不同的設計或組合方式。本章將依序介紹各種直流電動機的基本特性、用途以及控制方式。

11-1 直流電動機之分類

直流電動機跟直流發電機的構造完全相同，相關繞組位置與功能考參考圖 6-1。依據磁場來源，直流電動機分成如圖 11-1 所示的幾種類型。

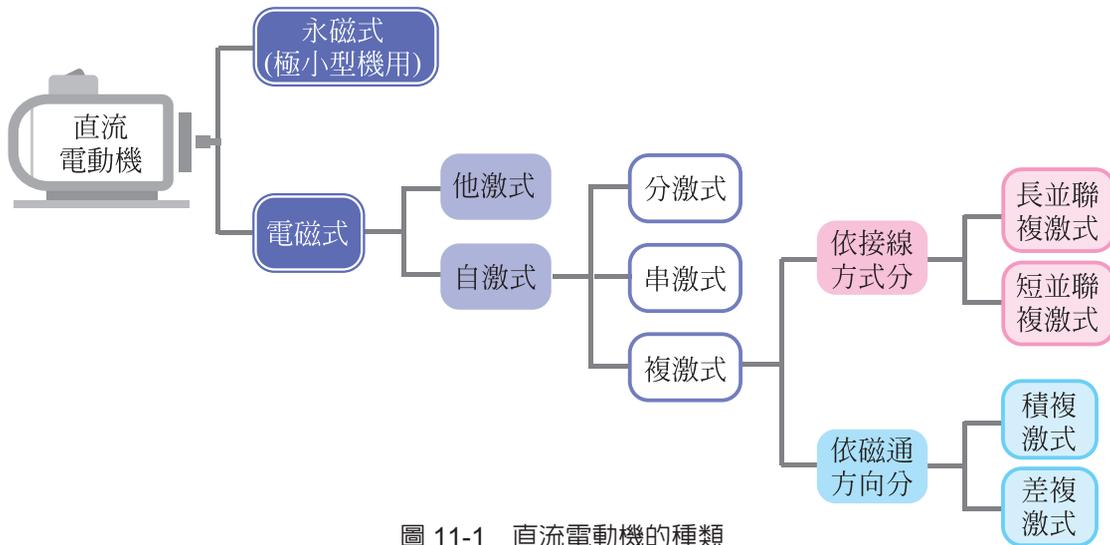
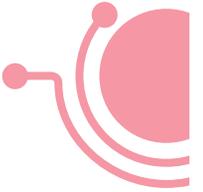


圖 11-1 直流電動機の種類

將直流電動機の種類與直流發電機 (圖 6-2) 比較，兩者重要差別在於**積複激發電機會依據串激場磁通的升壓特性細分為過複激、平複激與欠複激三種類別**；而積複激電動機並不會如此細分。



隨堂練習

- () 1. 直流電機中之串激磁場繞組，其
 (A) 線徑粗，匝數少 (B) 線徑細，匝數多
 (C) 線徑粗，匝數多 (D) 線徑細，匝數少。
- () 2. 直流電機中沒有與電樞繞組串聯的繞組為
 (A) 串激磁場繞組 (B) 分激磁場繞組 (C) 補償繞組 (D) 中間極繞組。

11-2 直流電動機的反電勢

(一) 反電勢的形成原因

將圖 11-2(a) 電動機外加電壓後，電流經過電刷、換向器由電樞右側導體流入，再由左側流出。依據弗萊明左手定則，電樞朝順時針方向旋轉。

旋轉瞬間由於電樞導體在磁場中移動 (左側導體向上、右側導體向下)，依據弗萊明右手定則，圖 11-2(b) 的電樞導體會產生感應電勢，其方向使得電流由左側導體流入、右側導體流出。由於電樞導體應電勢產生的電流方向與外加電壓的電流方向相反，因此將其稱為反電勢 (counter or back electromotive force)，以 E_c 或是 E_b 表示，本書以 E_c 代表反電勢。

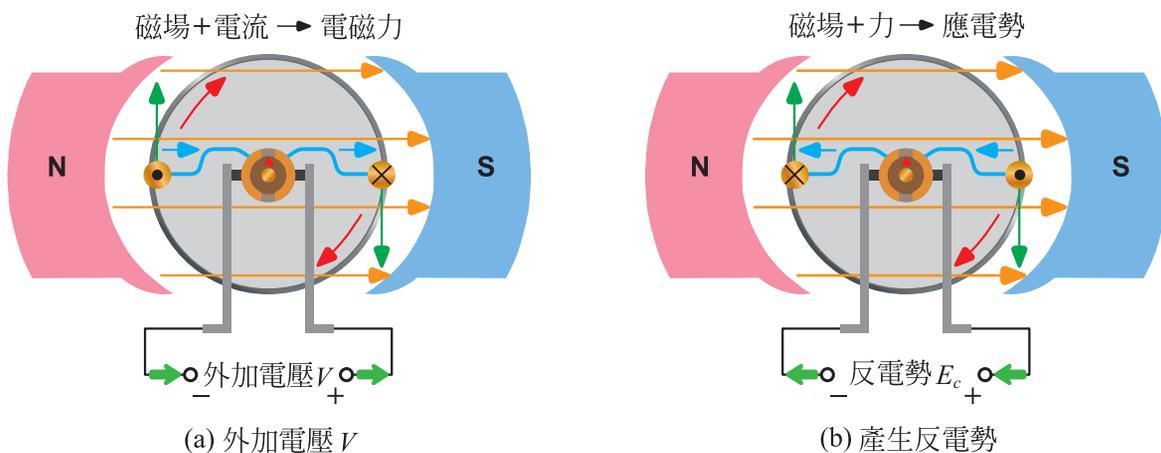


圖 11-2 直流電動機反電勢的形成



直流電動機反電勢形成的原因與直流發電機相同，都是電樞繞組在磁場中旋轉而產生，差別在於發電機是由外力帶動，而電動機是自行轉動。因此電動機反電勢與發電機應電勢的公式相同，即：

$$E_c = \frac{PZ}{60a} n\phi = K_n n\phi \quad (11-1)$$

將圖 11-2 簡化成圖 11-3(a)，當直流電動機外加電壓 V 後，電樞電流 I_a 在繞組內流動，整個電樞以轉速 n 持續旋轉，而電樞繞組與磁場作用產生反電勢 E_c 。

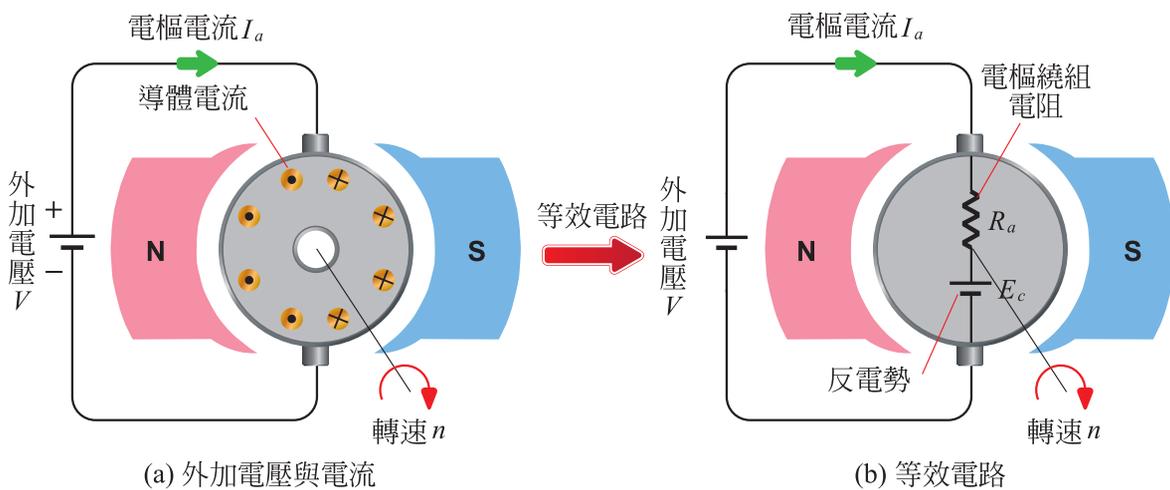


圖 11-3 直流電動機等效電路圖

以圖 11-3(b) 為例，反電勢為外加電壓減去電樞繞組壓降的值，即：

$$E_c = V - I_a R_a \quad (11-2)$$

E_c ：反電勢 (V)

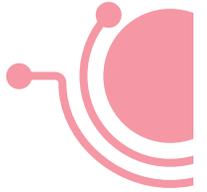
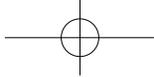
V ：電源電壓 (V)

I_a ：電樞電流 (A)

R_a ：電樞繞組電阻 (Ω)

(二) 反電勢的影響

直流電動機隨著轉速升高，反電勢也會隨之增加，其現象造成：



1. 限制電樞電流

電動機轉速 n 越快，反電勢 $E_c = K_n n \phi$ 變大，依據公式 11-2，此時流入電樞繞組的電流 $I_a = \frac{V - E_c}{R_a}$ 會降低。

因此當直流電動機軸端沒有連接負載（無載）時，轉速較高，此時反電勢會非常接近外加電壓，只有少量電流進入電樞繞組，所消耗的電能及損失很小，是個不錯的特性。

2. 產生機械功率

圖 11-3(b) 為例，電動機之輸入功率扣除電樞繞組銅損後，可得內生功率 (internal power) 或電磁功率 (electromagnetic power, P_m) 為：

$$P_m = VI_a - I_a^2 R_a = (V - I_a R_a) I_a = E_c \times I_a \quad (11-3)$$

P_m : 內生功率或電磁功率 (W) E_c : 反電勢 (V)

I_a : 電樞電流 (A)

將電動機的電磁功率 P_m 再扣除鐵損與機械損後，才是電動機輸出的機械功率 P_o 或稱為軸功率 (shaft power)。

(三) 轉速與反電勢的關係

將反電勢的公式 $E_c = K_n n \phi$ 與 $E_c = V - I_a R_a$ 合併後，可得直流電動機的轉速：

$$n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_n \phi} \quad (11-4)$$

由上式得知電動機轉速 n 與反電勢 E_c 成正比，與磁通 ϕ 成反比。

爲了瞭解電動機轉速因爲外部負載輕重而變化的情形，會以速率調整率 (speed regulation, $S.R.$) 來表示，即

$$\text{速率調整率 } (S.R. \%) = \frac{\text{無載轉速 } n_0 - \text{滿載轉速 } n_f}{\text{滿載轉速 } n_f} \times 100 \% \quad (11-5)$$

速率調整率越小代表電動機轉速越穩定，理想電動機的速率調整率爲 0。



範例

01

有台 100 V，1 hp 永磁式直流電動機，其電樞電阻為 1Ω ，滿載時輸入電流為 10 A，轉速為 1200 rpm，若不計電樞反應，求滿載時：

(1) 輸入功率、(2) 輸出功率、(3) 反電勢、(4) 電樞內生功率。

解 依照題意畫出等效電路圖，並將已知數值填入：

(1) 輸入功率： $P_{in} = V \times I_a = 100 \times 10 = 1000 \text{ W}$

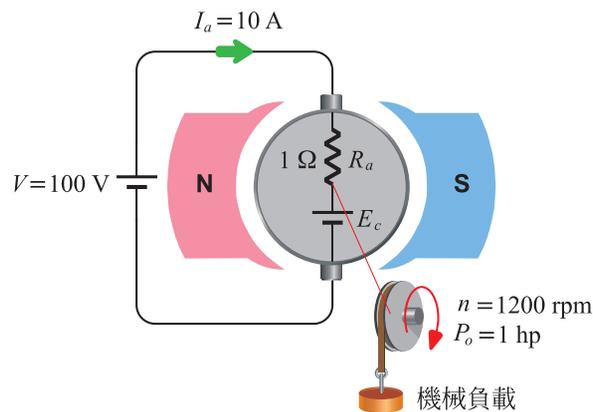
(2) 輸出功率： $P_o = 1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$

(3) 反電勢： $E_c = V - I_a R_a = 100 - 10 \times 1 = 90 \text{ V}$

(4) 電樞內生功率： $P_m = E_c \times I_a = 90 \times 10 = 900 \text{ W}$



將電樞內生功率 (P_m) 扣除鐵損及機械損後，即為輸出功率 1 馬力。



範例

02

同上題，倘若無載時測得輸入電流為 1 A，轉速為 1320 rpm，試求無載時：

(1) 輸入功率、(2) 反電勢、(3) 電樞內生功率、(4) 速率調整率。

解 將軸端機械負載移開後稱為無載，已知 $I_a = 1 \text{ A}$ ，因此

(1) 輸入功率： $P_{in} = V \times I_a = 100 \times 1 = 100 \text{ W}$

(2) 反電勢： $E_c = V - I_a R_a = 100 - 1 \times 1 = 99 \text{ V}$

(3) 電樞內生功率 $P_m = E_c \times I_a = 99 \times 1 = 99 \text{ W}$

(4) 速率調整率 $S.R. \% = \frac{\text{無載轉速} - \text{滿載轉速}}{\text{滿載轉速}} \times 100 \%$
 $= \frac{1320 - 1200}{1200} \times 100 \% = 10 \%$

**隨堂練習**

- () 1. 有關直流電動機之敘述，下列何者錯誤？
 (A) 先有端電壓才有反電勢 (B) 磁通加倍、反電勢加倍
 (C) 轉速加倍、反電勢加倍 (D) 電流加倍、反電勢加倍。
- () 2. 直流電動機端電壓 220 V，電樞電阻為 0.5 Ω，測得反電勢為 200 V，則電樞電流為
 (A) 40 A (B) 20 A (C) 10 A (D) 5 A。
- () 3. 額定轉速 1200 rpm 之電動機，已知轉速變動率為 5%，則無載速率為
 (A) 1140 rpm (B) 1143 rpm (C) 1225 rpm (D) 1260 rpm。

11-3 直流電動機之特性

購置電動機的目的是為了提供機械能，因此對於電動機而言，最重要的特性有：

- 轉速特性：依據公式 11-4 轉速 $n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_n \phi}$ 。當電動機轉軸上的負載增加時，電樞電流變大，反電勢與轉速會隨之變動，將過程中**電樞電流 (I_a) 與轉速 (n) 的關係記錄後並繪成曲線，即稱為轉速特性曲線。**
- 轉矩特性：依據公式 8-5 轉矩 $T = \frac{PZ}{2\pi a} \phi I_a = K_T \phi I_a$ 。當電動機轉軸上的負載增加時，電樞電流變大，轉矩也隨之增加以因應負載所需，將過程中**電樞電流 (I_a) 與轉矩 (T) 的關係記錄後並繪成曲線，則稱為轉矩特性曲線。**

直流電動機依據電樞繞組與磁場繞組的組合方式分為外激、分激、串激、複激等不同類型。各機運轉時性能差異很大，使用者必須依據負載特性選擇適合的電動機使用。

(一) 外激式直流電動機

1. 構造與電路計算

外(他)激式電動機磁場繞組與電樞繞組分別使用獨立電源供電。構造如圖 11-4(a) 所示，爲了方便表示與計算，可簡化成圖 11-4(b) 的等效電路圖。

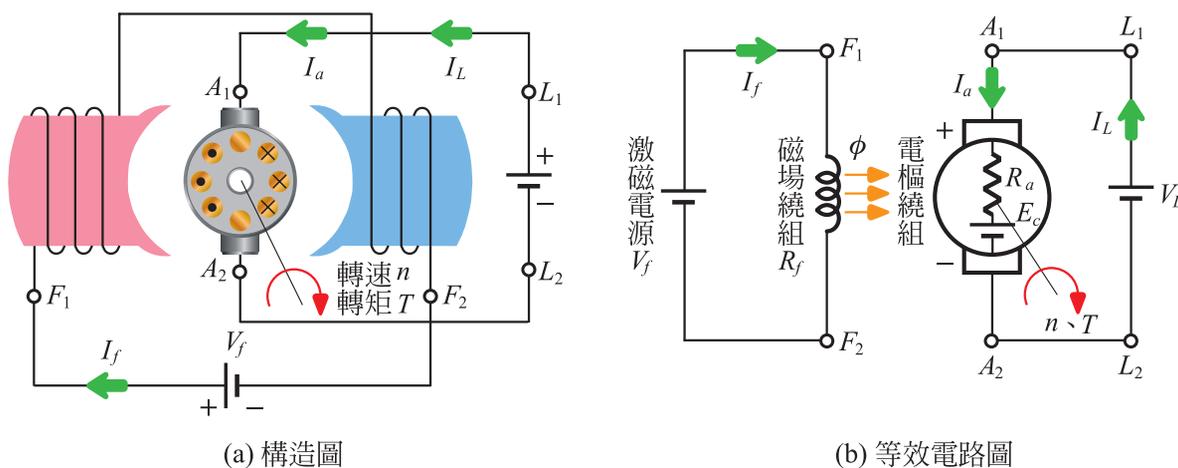


圖 11-4 外激式直流電動機

由圖 11-4(b) 可得外激式直流電動機基本公式如下：

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (11-6)$$

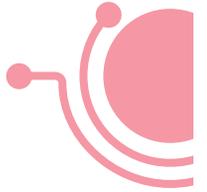
$$I_a = I_L \quad (11-7)$$

$$E_c = V_L - I_a R_a \quad (11-8)$$

I_f ：激磁電流 (A) V_f ：激磁電壓 (V) R_f ：磁場繞組電阻值 (Ω)

E_c ：反電勢 (V) V_L ：電源電壓 (V) R_a ：電樞繞組電阻值 (Ω)

I_a ：電樞電流 (A) I_L ：線路電流或輸入電流 (A)



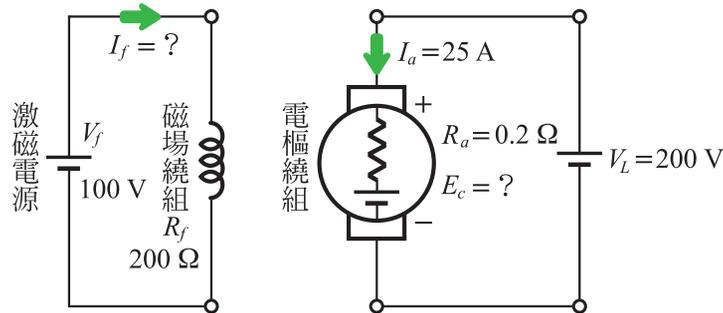
範例

03

有一台他激式直流電動機，已知磁場繞組電阻為 $200\ \Omega$ ，激磁電壓 $100\ \text{V}$ ，電樞電阻為 $0.2\ \Omega$ ，電樞外加電壓 $200\ \text{V}$ ，電樞電流為 $25\ \text{A}$ 。求本機：

(1) 激磁電流、(2) 反電勢、(3) 電樞內生功率。

解 依照題意畫出他激式直流電動機等效電路圖，並將已知數值填入：



$$(1) \text{ 激磁電流 } I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{100\ \text{V}}{200\ \Omega} = 0.5\ \text{A}$$

$$(2) \text{ 反電勢 } E_c = V_L - I_a R_a = 200 - (25 \times 0.2) = 195\ \text{V}$$

$$(3) \text{ 電樞內生功率 } P_m = E_c \times I_a = 195 \times 25 = 4875\ \text{W}$$

2. 轉速特性

電動機轉速 $n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V_L - I_a R_a}{K_n \phi}$ ，依據圖 11-4(b) 所示，外激式電動機激磁電壓 V_f 維持不變時，磁通量 ϕ 為定值，加上電源電壓 V_L 以及電樞繞組電阻 R_a 也是定值，因此唯一會影響轉速的變量只有電樞電流 I_a ，故：

(1) 無載時，電樞電流 I_a 很小，所造成的電樞壓降 $I_a R_a$ 很小，轉速 $n \doteq \frac{V_L}{K_n \phi}$ ，其值很穩定。



(2) 負載增加，電動機取用的電樞電流 I_a 變大，造成電樞壓降 $I_a R_a$ 升高，但電樞繞組電阻值很低，造成的壓降有限，所以轉速會隨著負載增加而些微下降，由於幅度不大可視為恆定速率。轉速特性如圖 11-5 所示。若是考慮電樞反應的去磁效應使得磁通量 ϕ 減少，則外激式電動機轉速下降幅度更為減輕。

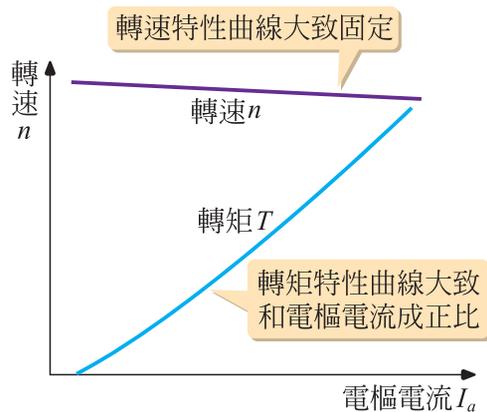


圖 11-5 外(分)激式直流電動機特性曲線

3. 轉矩特性

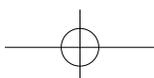
電動機轉矩 $T = \frac{PZ}{2\pi a} \phi I_a = K_T \phi I_a$ ，當外激式電動機磁通量 ϕ 為定值，轉矩與電樞電流 I_a 成正比，故

- (1) 無載時，電樞電流 I_a 很小，電動機轉矩很小，即 $T \doteq 0$ 。
- (2) 當軸端機械負載增加，電動機取用的電樞電流上升，轉矩 $T = K_T \phi I_a$ 隨電樞電流成正比增加，以因應負載運轉所需。轉矩特性曲線如圖 11-5 所示為直線，若是考慮電樞反應的去磁效應造成磁通量 ϕ 減少，則轉矩會稍微降低。

4. 應用

外激式電動機的優點是轉速可以透過調整電樞端電壓或是激磁電壓作大範圍且精準的控制；缺點則是必須要使用兩個直流電源，投資成本高。

外激式電動機早期用在大型壓縮機、高級升降機、華德黎翁納德 (Ward-Leonard system) 系統等需要精密轉速控制的機械上。



(二) 分激式直流電動機

1. 構造與電路計算

分(並)激式電動機構造如圖 11-6(a) 所示，輸入電流 (I_L) 由電源出發後分成兩個路徑，其中一部分進入分激磁場繞組 ($F_1 - F_2$) 產生磁通者稱為激磁電流 (I_f)，大部分的電流進入電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 產生轉矩者稱為電樞電流 (I_a)。

由圖 11-6(b) 等效電路圖可以看出，分激電動機的磁場繞組與電源並聯，因此激磁電流 I_f 為定值，所產生的磁通也為定值。至於電樞電流 I_a 則會由電樞因應軸端負載輕重而自行調整，以產生適切的轉矩。

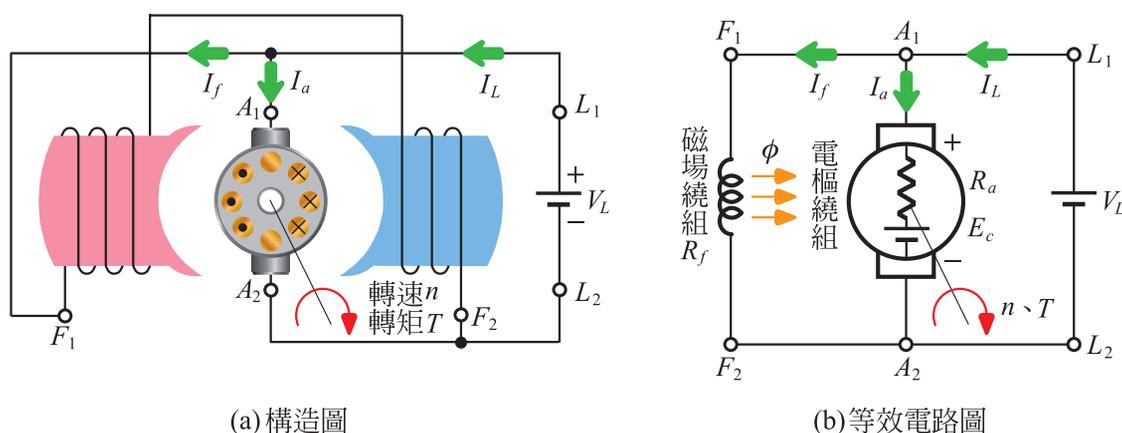


圖 11-6 分激式直流電動機

由圖 11-6(b) 等效電路可得，分激式直流電動機基本公式如下：

$$I_f = \frac{V_L}{R_f} \quad (11-9)$$

$$I_a = I_L - I_f \quad (11-10)$$

$$E_c = V_L - I_a R_a \quad (11-11)$$

I_f ：激磁電流 (A) V_L ：電源電壓 (V) R_f ：分激磁場繞組電阻值 (Ω)

I_a ：電樞電流 (A) I_L ：線路電流或輸入電流 (A)

E_c ：反電勢 (V) R_a ：電樞繞組電阻值 (Ω)

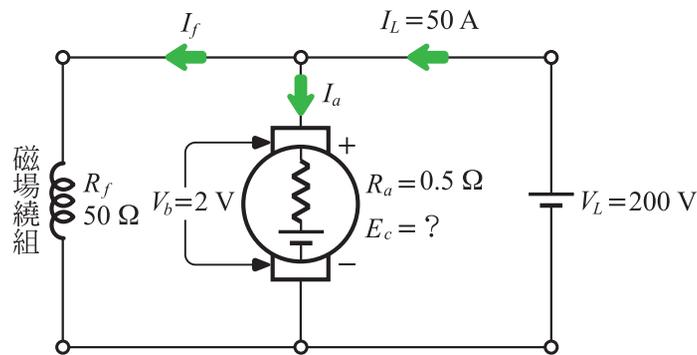
範例

04

有一部 200 V 直流分激式電動機，其分激場電阻 50Ω ，電樞電阻 0.5Ω ，滿載時線路電流為 50 A，電刷壓降為 2 V，求滿載時：

- (1) 分激磁場電流、(2) 電樞電流、(3) 反電勢、(4) 輸入功率、
- (5) 電樞內生功率為何？

解 依照題意畫出分激式直流電動機等效電路圖，並將已知數值填入：



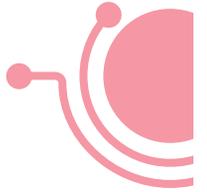
- (1) 分激磁場電流 $I_f = \frac{V_L}{R_f} = \frac{200 \text{ V}}{50 \Omega} = 4 \text{ A}$
- (2) 電樞電流 $I_a = I_L - I_f = 50 - 4 = 46 \text{ A}$
- (3) 反電勢 $E_c = V_L - I_a R_a - V_b = 200 - (46 \times 0.5) - 2 = 175 \text{ V}$
- (4) 輸入功率 $P_{in} = V_L \times I_L = 200 \times 50 = 10000 \text{ W}$
- (5) 電樞內生功率 $P_m = E_c \times I_a = 175 \times 46 = 8050 \text{ W}$

2. 轉速特性

分激式電動機電源電壓 V_L 不變時，場電流 I_f 不變，磁通量 ϕ 為定值，只有電樞電流 I_a 會影響轉速。因此**轉速特性與外激式相同**，隨著負載增加會略微下降。但變化不大，稱為定速電動機，特性曲線如圖 11-5 所示。

3. 轉矩特性

分激式的轉矩特性也與外激式相同。無載時，電樞電流 I_a 很小，電動機轉矩很小。負載增加時，電動機取用的電樞電流上升，轉矩 $T = K_T \phi I_a$ 隨電樞電流成正比增加。特性曲線如圖 11-5 所示。



4. 重要特性

分激電動機正常運轉時特性很穩定，但是突然發生磁場繞組斷路時，如圖 11-7 所示，由於磁場電流 $I_f = 0$ A，鐵心中僅剩下微量的剩磁 ϕ_r ，而電樞繞組仍然與電源連接，因此電樞電流 I_a 持續流經電樞繞組，造成轉速

$$n = \frac{V_L - I_a R_a}{K_n \phi_r}$$

變得很高，此現象稱為飛脫 (runaway)。

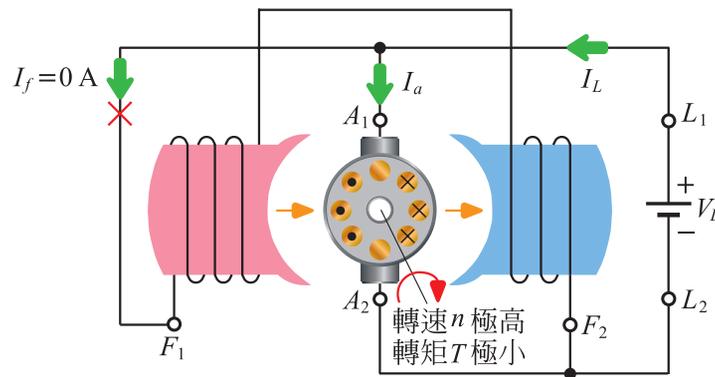


圖 11-7 分激式電動機磁場斷路

分 (外) 激電動機如果在無載或輕載狀態下發生磁場斷路，電動機會立刻以**高速旋轉**，產生很大的離心力造成設備損害。倘若是在重載狀態下發生磁場斷路，由於無法產生足夠轉矩，因此電動機會停止轉動，此時反電勢為 0，電樞電流很大導致電樞繞組產生高熱而燒毀。因此分 (外) 激電動機必須加裝失磁保護設備。

5. 應用

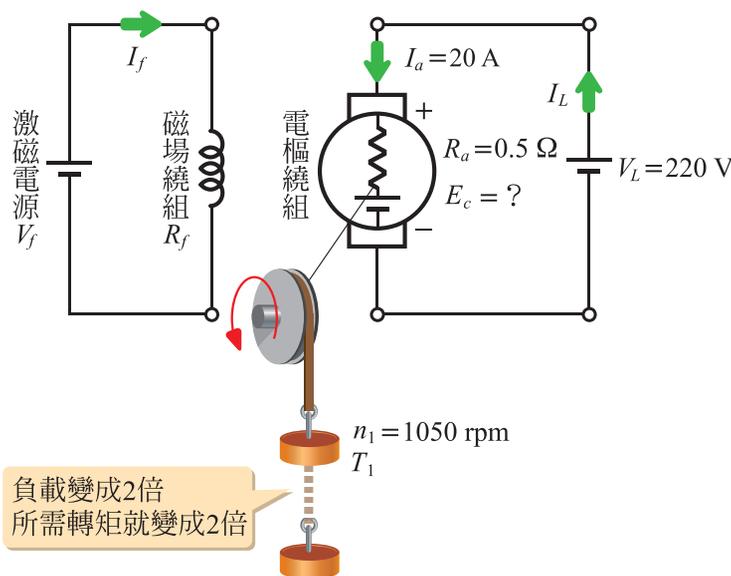
分激電動機的特性與外激電動機相似，而且只需要一組電源同時供應磁場與電樞運轉所需，投資成本較外激式低。但是缺點是轉速控制的範圍不如外激電動機寬廣準確。一般用在需要恆定速率或是調整速率小的場所，如車床、紡織機、鼓風機等機械。

範例

05

運轉中直流他激式電動機已知電樞電壓 220 V，電樞電流 20 A，電樞電阻 0.5 Ω，轉速 1050 rpm，則 (1) 反電勢大小為？ (2) 若負載轉矩變為 2 倍，反電勢變為？ (3) 改變後的轉速約為？

解 依照題意畫出他激式直流電動機等效電路圖，並將已知數值填入：



- (1) 原本負載時，反電勢 $E_{c1} = V_L - I_a R_a = 220 - 20 \times 0.5 = 210 \text{ V}$
- (2) 負載變成 2 倍，電動機所需要供應的轉矩 T 也要變成 2 倍，
由於 $T = K_T \phi I_a$ ，在磁通 ϕ 不變下，電樞會向電源取用 2 倍的電流，
故 $I_{a2} = 2 \times 20 = 40 \text{ A}$
反電勢 $E_{c2} = V_L - I_{a2} R_a = 220 - 40 \times 0.5 = 200 \text{ V}$
- (3) 直流電動機轉速 $n = \frac{E_c}{K_n \phi}$ ，可得轉速與反電勢成正比
因此 $\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_{c2}}{E_{c1}} \Rightarrow \frac{n_2}{1050} = \frac{200 \text{ V}}{210 \text{ V}} \Rightarrow n_2 = 1000 \text{ rpm}$
由結果可知，當他 (分) 激式電動機負載加倍，轉速只有稍微降低，變化不大。

隨堂練習

- () 1. 直流分激式電動機端電壓 V_t 、電樞電流 I_a 、電樞電阻 R_a 及磁通量 ϕ_f ，若鐵心無磁飽和，且其 K_f 為常數，則電動機轉軸轉速 N_r 與上述的關係，何者正確？

$$(A) N_r = \frac{K_f \phi_f}{V_t - R_a I_a}$$

$$(B) N_r = \frac{V_t}{K_f \phi_f + R_a I_a}$$

$$(C) N_r = \frac{V_t - R_a I_a}{K_f \phi_f}$$

$$(D) N_r = \frac{K_f \phi_f}{V_t + R_a I_a}$$

- () 2. 200 V 直流分激式電動機，電樞電阻 0.12Ω ，滿載時電樞電流 50 A，轉速 1000 rpm，若不計電樞反應，則無載時（忽略電樞壓降）轉速約為多少？

(A) 500 rpm (B) 970 rpm (C) 1030 rpm (D) 2000 rpm。

(三) 串激式直流電動機

1. 構造與電路計算

串激式電動機構造如圖 11-8(a) 所示，串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$) 與電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 及直流電源 ($L_1 - L_2$) 相互串聯，由電源流出的電流 (I_L) 會先經過串激磁場繞組後再流入電樞繞組，因此串激磁場繞組所產生的磁通會隨著電樞電流大小而變動。

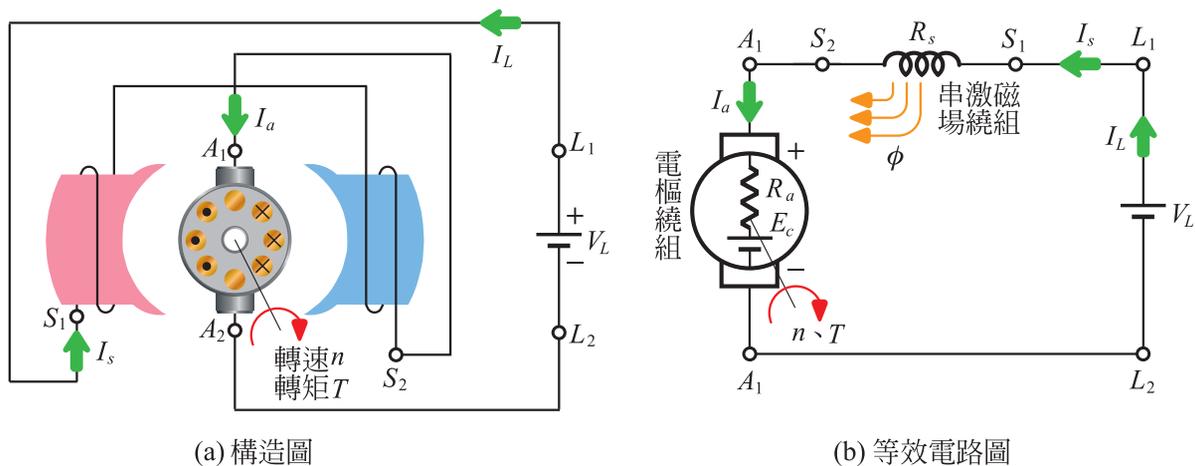


圖 11-8 串激式直流電動機

由圖 11-8(b) 等效電路圖可得，串激式直流電動機基本公式如下：



$$I_L = I_s = I_a \quad (11-12)$$

$$E_c = V_L - I_a(R_a + R_s) \quad (11-13)$$

其中 I_L : 線路電流或輸入電流 (A)

I_s : 串激磁場電流 (A)

I_a : 電樞電流 (A)

E_c : 反電勢 (V)

V_L : 電源電壓 (V)

R_a : 電樞繞組電阻值 (Ω)

R_s : 串激磁場繞組電阻 (Ω)

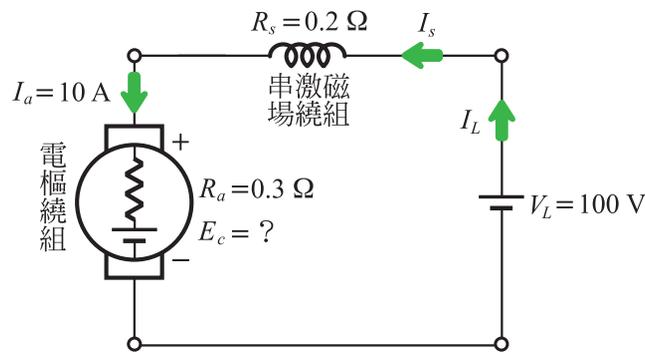
範例

06

有一部串激電動機，已知電樞電阻為 0.3Ω ，串激繞組電阻為 0.2Ω ，電源電壓為 100 V ，滿載時電樞電流為 10 A ，則此機：

(1) 反電勢、(2) 輸入功率、(3) 電樞內生功率為何？

解 依照題意畫出串激式直流電動機等效電路圖，並將已知數值填入：



(1) 反電勢 $E_c = V_L - I_a(R_a + R_s) = 100 - 10 \times (0.3 + 0.2) = 95 \text{ V}$

(2) 輸入功率 $P_{in} = V_L \times I_L = 100 \times 10 = 1000 \text{ W}$

(3) 電樞內生功率 $P_m = E_c \times I_a = 95 \times 10 = 950 \text{ W}$

2. 轉速特性

串激電動機的磁場繞組與電樞繞組以及電源相互串聯，因此磁通量 ϕ 會隨著電樞電流 I_a 而產生變動，其中：

$$n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V_L - I_a(R_a + R_s)}{K_n \phi} \quad (11-14)$$

- (1) 無載時，電樞電流 I_a 很小，所造成的電阻壓降很小，但是磁場繞組所產生的磁通量 ϕ 也很低，由公式 11-14 可知無載時轉速極高，非常危險。
- (2) 負載增加，電樞電流 I_a 變大，所造成的電阻壓降增加；而磁場繞組所產生的磁通量 ϕ 隨著電樞電流 I_a 成正比增加，轉速快速下降，特性曲線如圖 11-9 所示為一條雙曲線。
- (3) 負載持續增加，電樞電流 I_a 持續變大，電阻壓降持續增加；但是磁場因為飽和，磁通量 ϕ 幾乎維持定值，轉速緩慢降低，特性曲線變為直線。

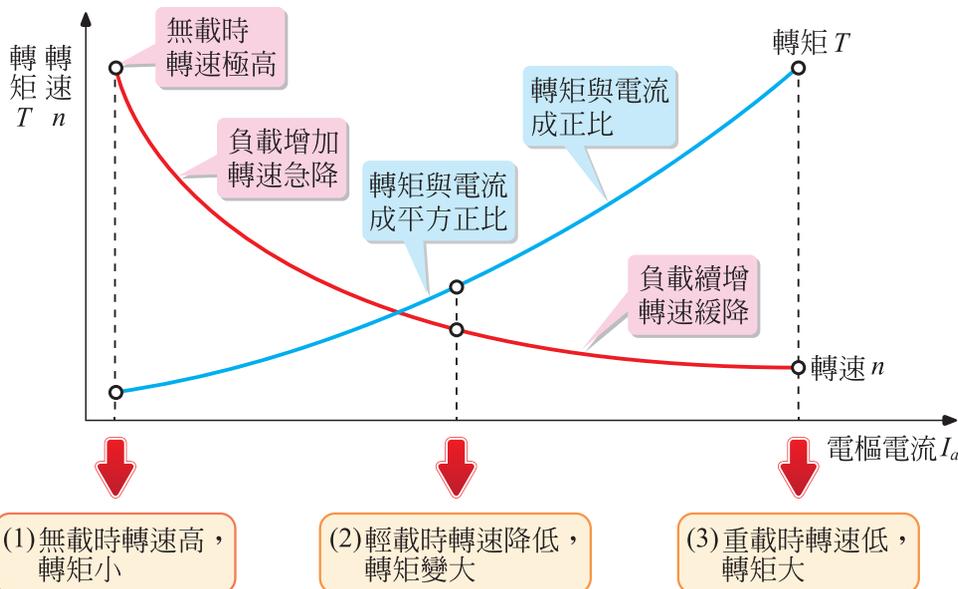


圖 11-9 串激式直流電動機特性曲線



3. 轉矩特性

電動機的轉矩 $T = K_T \phi I_a$ ，由於串激場磁通量 ϕ 會受到電樞電流影響，因此：

- (1) 無載時，電樞電流 I_a 很小，磁通量 ϕ 很低，因此轉矩很小。
- (2) 負載增加，電樞電流 I_a 變大，磁通量 ϕ 隨著電樞電流 I_a 成正比增加，因此轉矩：

$$T = K_T \phi I_a = K_T (I_a) I_a = K_T I_a^2 \quad (11-15)$$

依據公式 11-15 可得，串激電動機輕載時由於磁通尚未飽和，轉矩與電樞電流成平方正比，特性曲線如圖 11-9 所示為一條拋物線。

- (3) 負載持續增加，電樞電流 I_a 持續變大，但是磁場飽和使得磁通量幾乎維持不變，轉矩 $T = K_T \phi I_a$ 。即串激電動機重載時由於磁通飽和，轉矩與電樞電流成正比，轉矩特性曲線變成直線。

4. 重要特性

由特性曲線可以看出串激電動機無載時，轉速極高非常危險。因此串激電動機應該避免空載運轉；與負載連接時，必須以直接連結或齒輪方式為之，切忌使用皮帶傳動，避免斷裂時造成飛脫 (run away)，導致人員或是設備損傷。隨著負載增加，串激電動機轉速降低、轉矩變大，此種低速時高轉矩、高速時低轉矩的特性又稱為定馬力電動機。由於串激電動機無載與滿載時轉速差距大，速率調整率很高，因此也被稱為變速電動機。

5. 應用

串激電動機由於輕載時轉速極高，而且轉矩隨著電流成平方正比，加上可以交、直流兩用的特性，可以說是目前應用最為廣泛的直流電動機。常用於起重機、升降機、電車等需要大起動轉矩的場所，或是吸塵器、果汁機、吹風機、電鑽、縫紉機等需要高速轉動的電器用品中。

範例

07

有一台 250 V 直流串激式電動機，串激場電阻 0.1Ω ，電樞電阻 0.4Ω ，滿載時測得電樞電流 80 A，轉速 630 rpm，轉矩為 220 N-m；若磁路未飽合且不計電樞反應，當電樞電流降為 40 A 時，求：(1) 轉矩、(2) 轉速分別變為何？

解 依照題意畫出等效電路圖，並將已知數值填入：

(1) 串激電動機在磁路未飽合時，轉矩與電樞電流成平方正比，

$$\text{因此 } I_a = 40 \text{ A 時， } T_2 = 220 \times \left(\frac{40}{80}\right)^2 = 55 \text{ N-m}$$

(2) 電樞電流 80 A 時，

$$\text{反電勢 } E_{c1} = V_L - I_a(R_a + R_s) = 250 - 80 \times (0.4 + 0.1) = 210 \text{ V}$$

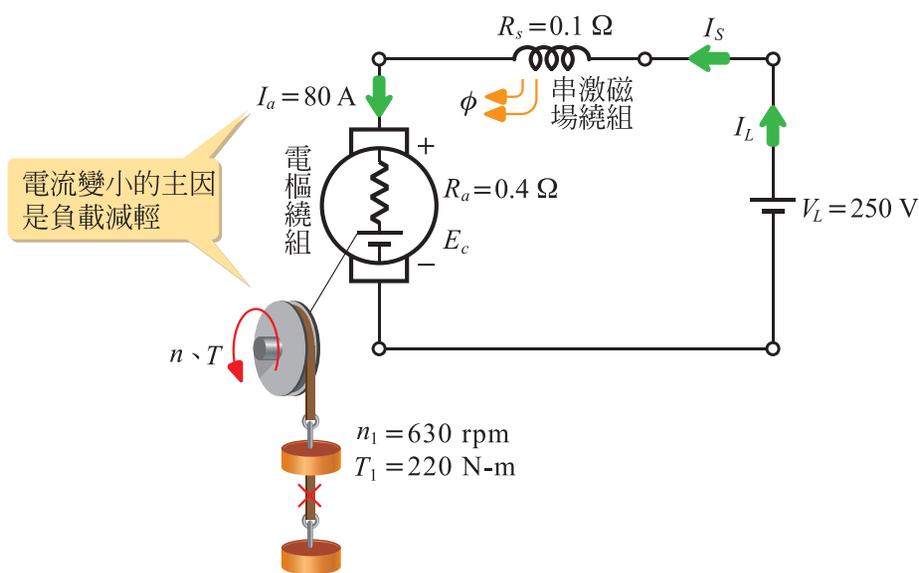
電樞電流 40 A 時，

$$\text{反電勢 } E_{c2} = V_L - I_{a2}(R_a + R_s) = 250 - 40 \times (0.4 + 0.1) = 230 \text{ V}$$

串激電動機的磁通量與電樞電流成正比，因此電樞電流減半，磁通量也減半

$$\text{電動機轉速 } n = \frac{E_c}{K\phi} \text{ : 所以 } \frac{n_2}{n_1} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \Rightarrow \frac{n_2}{630} = \frac{0.5\phi}{\phi} \Rightarrow n_2 = 1380 \text{ rpm}$$

由結果可知，當串激電動機負載減半，轉速快速增加，變動非常劇烈





隨堂練習

- () 1. 直流串激式電動機，若外加電壓不變，當負載變小時，下列關於轉速與轉矩變化的敘述，何者正確？
- (A) 轉速變小，轉矩變大 (B) 轉速與轉矩都變大
(C) 轉速變大，轉矩變小 (D) 轉速與轉矩都變小。
- () 2. 直流串激電動機運轉時，若鐵心無磁飽和， K_T 為常數，則電磁轉矩 T_e 與電樞電流 I_a 關係何者正確？
- (A) $T_e = \frac{K_T}{I_a^2}$ (B) $T_e = \frac{K_T}{I_a}$ (C) $T_e = K_T I_a$ (D) $T_e = K_T I_a^2$ 。

(四) 複激式直流電動機

1. 構造與電路計算

複激式直流電動機是指在磁極上分別繞有分激磁場繞組 (線細、多匝、電阻高) 及串激磁場繞組 (線粗、少匝、電阻低)，分類如圖 11-10 所示，其中：

- (1) 依據繞組接線方式：分為長並聯及短並聯，兩者電路計算稍有差異，但是運轉特性非常接近。
- (2) 依據繞組磁通方向：分為積複激與差複激，兩者運轉特性差異很大，須特別留意。

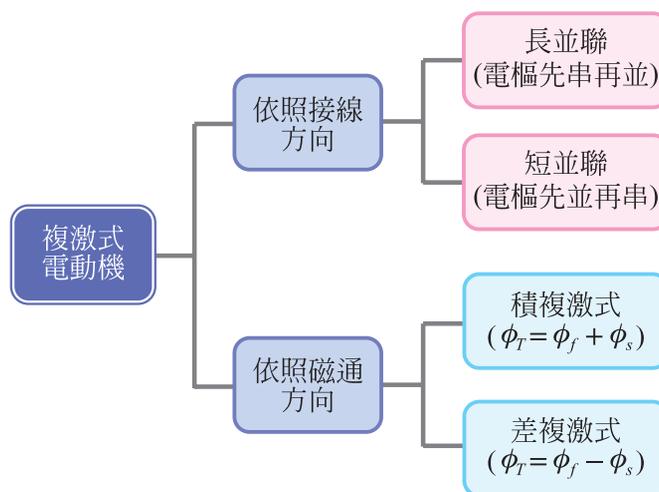
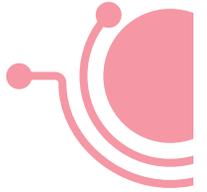


圖 11-10 複激式電動機的分類方式



a. 長並聯複激式直流電動機

圖 11-11(a) 為長並聯複激式電動機的等效電路圖，其中電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 先與串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$) 串聯後，再與分激磁場繞組 ($F_1 - F_2$) 並聯，最後再與直流電源 ($L_1 - L_2$) 連接，圖 11-11(b) 所示則為其構造圖。

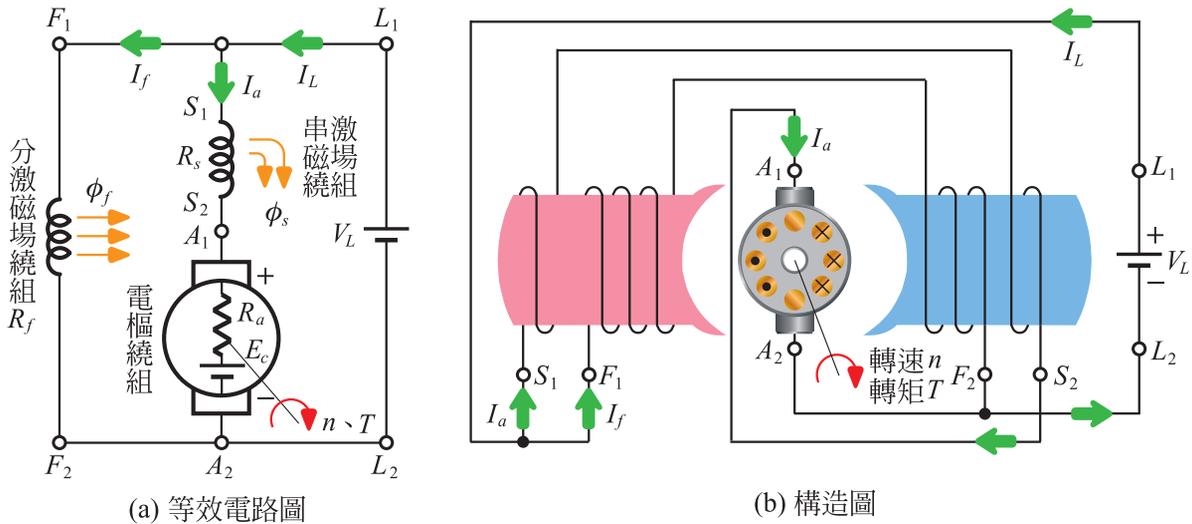


圖 11-11 長並聯複激式直流電動機

由圖 11-11(a) 等效電路可得，長並聯複激式直流電動機基本公式如下：

$$I_f = \frac{V_L}{R_f} \quad (11-16)$$

$$I_a = I_L - I_f \quad (11-17)$$

$$E_c = V_L - I_a(R_a + R_s) \quad (11-18)$$

I_f ：激磁電流 (A)

V_L ：電源電壓 (V)

R_f ：分激磁場繞組電阻值 (Ω)

I_a ：電樞電流 (A)

I_L ：線路電流或輸入電流 (A)

R_a ：電樞繞組電阻值 (Ω)

E_c ：反電勢 (V)

R_s ：串激磁場繞組電阻值 (Ω)

b. 短並聯複激式直流電動機

圖 11-12(a) 為短並聯複激式直流電動機的等效電路圖，電樞繞組 ($A_1 - A_2$) 先與分激磁場繞組 ($F_1 - F_2$) 並聯，再與串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$) 串聯，組合完成後再與直流電源 ($L_1 - L_2$) 連接。圖 11-12(b) 所示則為其構造圖。

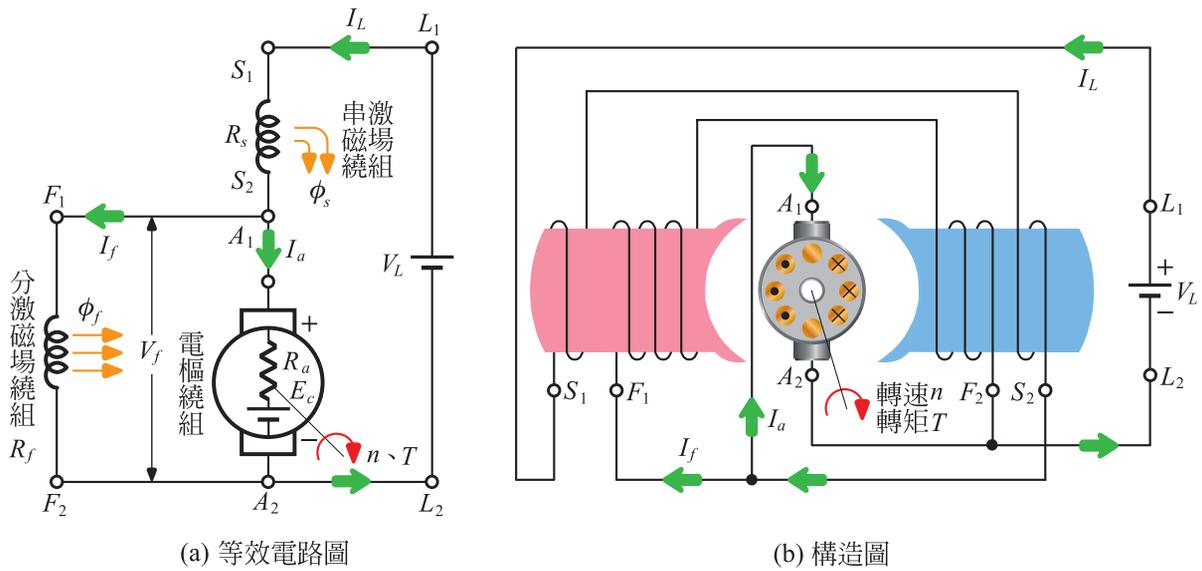


圖 11-12 短並聯複激式直流電動機

由圖 11-12(a) 等效電路可得，短並聯複激式直流電動機基本公式如下：

$$V_f = V_L - I_L R_s \quad (11-19)$$

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (11-20)$$

$$I_a = I_L - I_f \quad (11-21)$$

$$E_c = V_f - I_a R_a \quad (11-22)$$

V_f ：分激磁場繞組電壓 (V)

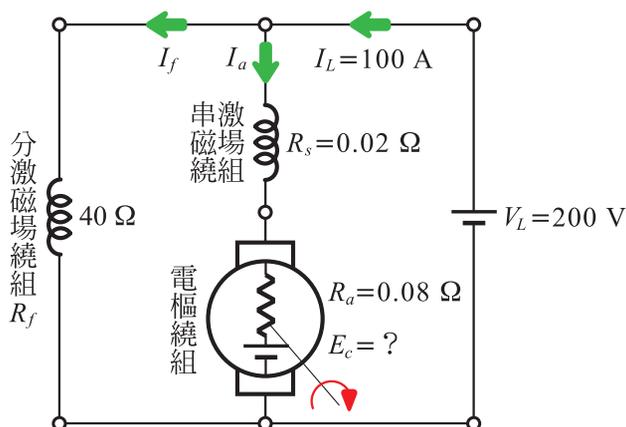
範例

08

有一部長並聯複激式直流電動機，其端電壓 200 V，滿載時輸入電流 100 A，電樞繞組電阻 0.08Ω ，分激繞組電阻 40Ω ，串激繞組電阻 0.02Ω ，試求該電動機滿載時：

- (1) 分激磁場電流、
- (2) 電樞電流、(3) 反電勢、
- (4) 輸入功率、(5) 內生功率。

解 依照題意畫出長並聯複激式電動機等效電路圖，並將已知數值填入：



- (1) 分激磁場電流

$$I_f = \frac{V_L}{R_f} = \frac{200 \text{ V}}{40 \Omega} = 5 \text{ A}$$

- (2) 電樞電流 $I_a = I_L - I_f = 100 - 5 = 95 \text{ A}$

- (3) 電樞反電勢 $E_c = V_L - I_a(R_a + R_s) = 200 - 95 \times (0.08 + 0.02) = 190.5 \text{ V}$

- (4) 輸入功率 $P_{in} = V_L \times I_L = 200 \times 100 = 20 \text{ kW}$

- (5) 電樞內生功率 $P_m = E_c \times I_a = 190.5 \times 95 = 18.09 \text{ kW}$

隨堂練習

將範例 08 改為短並聯複激式直流電動機，所有數值均不變，試求該電動機滿載時：

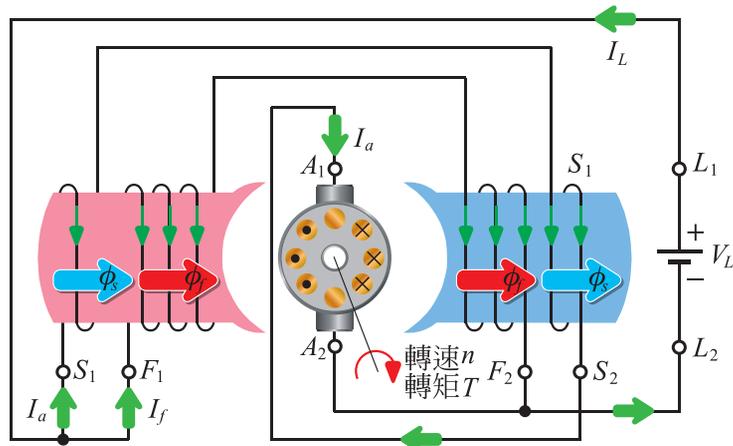
- (1) 分激磁場電流、(2) 電樞電流、(3) 反電勢、(4) 輸入功率、(5) 內生功率。

並比較計算結果。

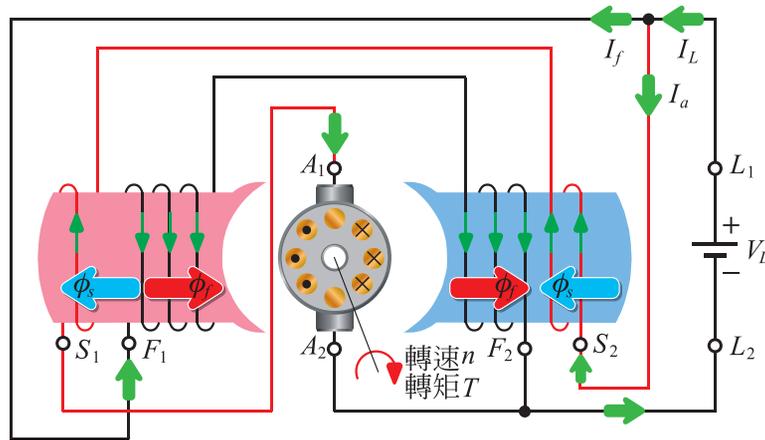
2. 轉速特性

複激式電動機 (以長並聯為例)，依據兩磁場繞組所產生的磁通方向分為：

- (1) 積複激電動機：由圖 11-13(a) 可知，分激磁場繞組 ($F_1 - F_2$) 與串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$)，兩繞組產生的磁場方向相同 ($\phi_T = \phi_f + \phi_s$)。
- (2) 差複激電動機：由圖 11-13(b) 可知，將串激磁場繞組 ($S_1 - S_2$) 接線位置對調，使得兩繞組產生的磁場方向不同 ($\phi_T = \phi_f - \phi_s$)。



(a) 積複激式



(b) 差複激式

圖 11-13 複激式電動機依據磁通方向分類

a. 積複激電動機速率特性

積複激電動機的分激場磁場與串激場磁場方向相同，因此轉速：

$$n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V - I_a (R_a + R_s)}{K_n (\phi_f + \phi_s)} \quad (11-23)$$

- (a) 無載時，電樞電流 I_a 很小，電阻壓降很小，串激場磁通量 ϕ_s 很低；分激場繞組則因為跟電源並聯供應大量且穩定的磁通量 ϕ_f ，因此轉速如同分激電動機很穩定。
- (b) 負載增加，電樞電流 I_a 變大，電阻壓降增加；而串激場磁通量 ϕ_s 也隨著電樞電流 I_a 成正比增加，造成轉速迅速降低，**下降幅度介於分激電動機與串激電動機之間**，特性曲線如圖 11-14 所示。

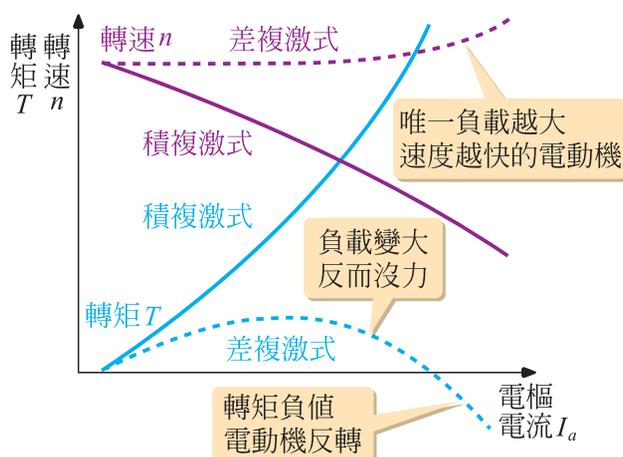


圖 11-14 複激式直流電動機特性曲線

b. 差複激電動機速率特性

差複激電動機的分激場磁場與串激場磁場方向相反，因此轉速：

$$n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V - I_a (R_a + R_s)}{K_n (\phi_f - \phi_s)} \quad (11-24)$$

- (a) 無載時，電樞電流 I_a 很小，串激場磁通 ϕ_s 遠低於分激場磁通量 ϕ_f ，電動機轉速如同分激電動機穩定。
- (b) 負載增加，電樞電流 I_a 變大電阻壓降增加；而串激場磁通量 ϕ_s 隨著電樞電流 I_a 增加，使得總磁通量減少，因此**轉速反而隨負載增加而上升**，**差複激電動機是唯一速率調整率為負值的電動機**，特性曲線如圖 11-14 所示。



3. 轉矩特性

(1) 積複激電動機轉矩特性

積複激電動機的分激場磁場與串激場磁場方向相同，因此轉矩：

$$T = K_T \phi I_a = K_T (\phi_f + \phi_s) I_a \quad (11-25)$$

- 無載時，電樞電流 I_a 很小，轉矩很低。
- 負載增加，電樞電流 I_a 變大，串激場磁通 ϕ_s 隨電樞電流 I_a 成正比增加，轉矩隨著負載增加而快速上升，**上升幅度介於分激電動機與串激電動機之間**，特性曲線如圖 11-14 所示。

(2) 差複激電動機轉矩特性

差複激電動機的分激場磁場與串激場磁場方向相反，因此轉矩

$$T = K_T \phi I_a = K_T (\phi_f - \phi_s) I_a \quad (11-26)$$

- 無載時，電樞電流 I_a 很小，轉矩很低。
- 負載增加，電樞電流 I_a 變大，串激場磁通 ϕ_s 隨電樞電流 I_a 增加使得總磁通量逐漸下降，因此**轉矩隨負載增加呈現先升後降的曲線**。當串激場磁通 ϕ_s 與分激場磁通 ϕ_f 相等時，總磁通為零，轉矩為零。而串激場磁通大於分激場磁通時，總磁通量反向，電動機將會反轉。

4. 重要特性

- 積複激電動機同時擁有分激磁場繞組提供穩定的磁通 ϕ_f 以及串激磁場繞組提供隨負載成正比增加的磁通 ϕ_s ，因此**積複激電動機如同分激與串激電動機的綜合體，轉矩與轉速特性都介於二者之間**。
- 差複激電動機是唯一負載越大、轉速越快的電動機，而轉矩卻會隨負載先升後降甚至可能反轉，非常不穩定，不適合使用**。另外，差複激電動機起動前，必須先**將串激場繞組短路**，以分激電動機的狀態起動後，等到轉速上升才可以將串激場繞組打開，以避免起動時電樞電流太大，導致電動機反轉起動以及發生脫速的危險。

5. 應用

- (1) 積複激電動機兼具有串激電動機的大起動轉矩以及分激電動機轉速穩定的優點，因此常用於需要大起動轉矩或是負載可能變成輕載之場所，如吊車、電梯、工作母機以及高爾夫球車等場所。但由於構造比較複雜，價格稍高，目前有逐漸被擁有強磁力的永磁式電動機取代的趨勢。
- (2) 差複激電動機由於不易控制，且可能在運轉過程中反轉，目前還沒有實用價值，只會在試驗或研究工作中偶而採用。

有關各式直流電動機的轉速特性曲線與重要特性整理成圖 11-15 所示：

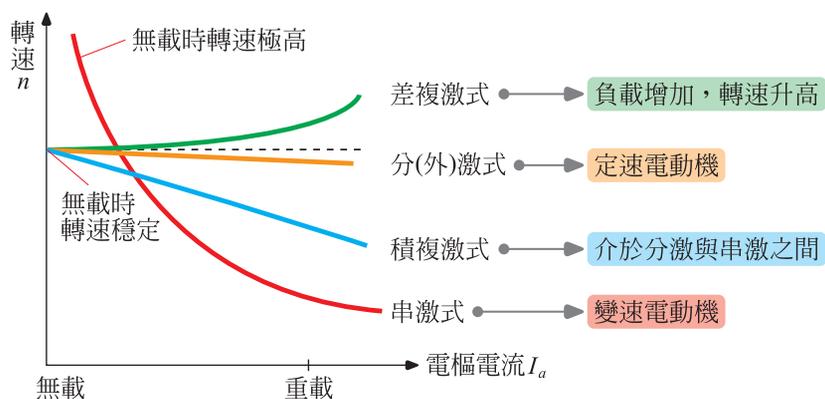


圖 11-15 直流電動機轉速特性曲線

各式直流電動機的轉矩特性曲線與重要特性整理成圖 11-16 所示。

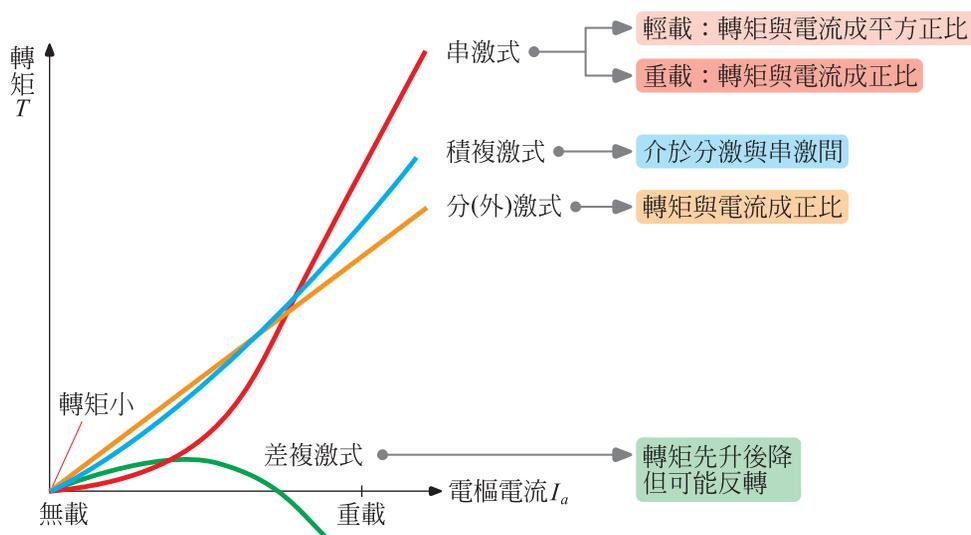
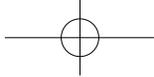


圖 11-16 直流電動機轉矩特性曲線



隨堂練習

- () 1. 有一長並聯複激電動機外加電壓 120 V，滿載時輸入電流 100 A，分激場電阻 120 Ω ，串激場電阻 0.03 Ω ，電樞電阻 0.07 Ω ，則電樞內部所生之機械功率為
(A) 10.9 kW (B) 11.5 kW (C) 12 kW (D) 13 kW。
- () 2. 下列有關積複激電動機之敘述，何者錯誤？
(A) 轉速介於定速與變速之間 (B) 輕載時轉速穩定
(C) 速率調整率較分激小 (D) 適用於負載時常變動之處所。
- () 3. 下列關於直流電動機敘述，何者錯誤？
(A) 分激的轉矩為一直線 (B) 串激不可以無載運轉
(C) 積複激負載增加、轉速快速下降 (D) 差複激之速率調整率為正。

11-4 直流電動機的控制

電動機都會進行四種基本控制，就如同駕駛汽車也必須學習相關控制技能，各種控制的目的與關聯如表 11-1 所示。

表 11-1 控制的目的

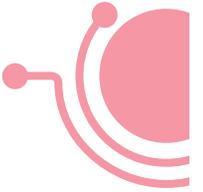
機種 控制 項目	汽車	電動機
1. 起動控制	入檔、踩油門、將車輛開動	降低起動電流、增加起動轉矩
2. 轉速控制	踩、放油門使車輛維持預期速度	以特定轉速持續穩定旋轉
3. 轉向控制	前進或是倒退	順時針或逆時針旋轉
4. 制動控制	踩、放煞車進行減速或是緊急停車	急減速或是緊急停止

電動機的種類很多，運轉原理各有不同，因此控制方式也會有所差異。有關直流電動機的控制目的與做法如下：

(一) 起動控制

1. 起動特性

對於所有的電動機而言，**最理想的起動特性是起動電流小、起動轉矩大。**



但是直流電動機的轉矩 $T = K_T \phi I_a$ ，式中轉矩 T 與電流 I_a 成正比，因此勢必無法以小起動電流、大起動轉矩的理想方式進行起動。

直流電動機的反電勢 $E_c = K_n n \phi$ ，當電動機通電起動瞬間轉速 $n = 0$ ，反電勢尚未建立，故 $E_c = 0$ 。將 $E_c = 0$ 代入公式 $E_c = V - I_a R_a$ 中，可得起動瞬間電樞電流：

$$I_{a(st)} = \frac{V - E_c}{R_a} \doteq \frac{V}{R_a} \quad (11-27)$$

$I_{a(st)}$ ：起動瞬間電樞電流 (A) V ：電源電壓 (V) R_a ：電樞繞組電阻值 (Ω)

由於電樞繞組電阻值 R_a 非常小，因此起動時電樞電流 $I_{a(st)}$ 非常大，轉矩則以最大值 $T_{st} = K_T \phi I_{a(st)}$ 開始起動，如圖 11-17 所示，隨著電動機轉速 n 上升，反電勢 $E_c = K_n n \phi$ 持續增加，電流則會逐漸降低到穩定值，此時才稱為起動完成。

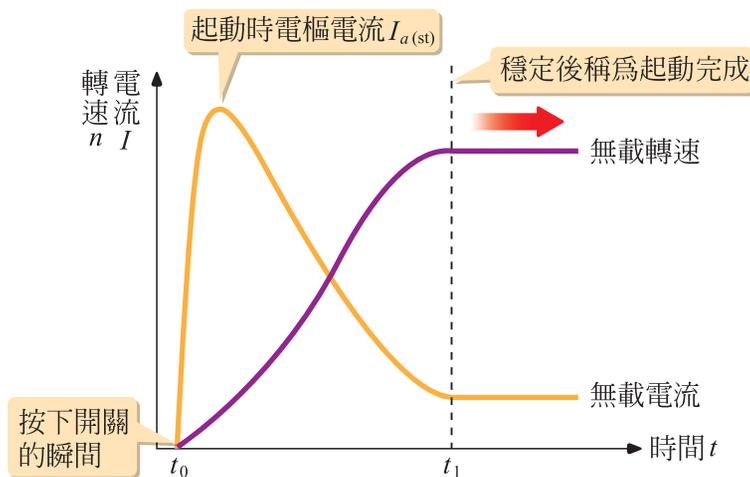


圖 11-17 電動機起動特性

2. 起動狀態與電流變化

電動機起動時如果轉軸端已經接有額定負載 (例如客滿的升降機或電車) 稱為滿載起動。倘若轉軸端沒有連接 (或少量) 負載，必須等到起動完成後，負載才會逐漸增加者稱為無載起動 (例如輸送帶或手扶梯)。



直流電動機無論採用哪種方式起動，起動時的電樞電流 $I_{a(st)}$ 值都相同，差別在於電動機本身必須具備足夠的起動轉矩才可以進行滿載起動；另一方面滿載起動時，由於轉速上升較慢，因此起動時間長，大電流持續時間較久，會對機器或是週邊器具造成干擾。因此**電動機多採無載方式起動，等轉速穩定後才開始增加機械負載**。至於串激電動機則要避免無載起動，以免轉速過快造成危險。

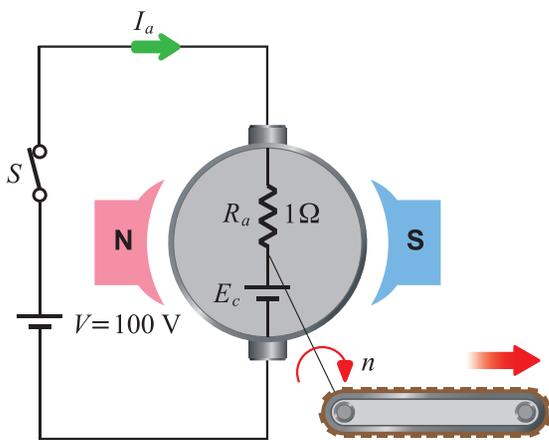
範例

09

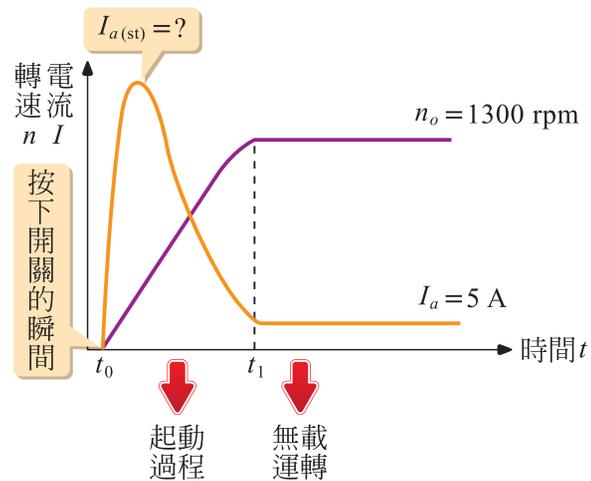
有台 100 伏特，1 馬力永磁式直流電動機，電樞電阻為 1 歐姆，以無載方式起動完畢後，測得輸入電流為 5 安培，轉速為 1300 rpm，試求此機

- (1) 起動時電樞電流？ (2) 起動電流與無載電流之比？

解 如下圖 (a) 所示，電動機軸端與輸送帶 (摩擦損失不計) 連接，確認輸送帶上沒有負載後才將開關 S 閉合，稱為無載起動。



(a) 等效電路圖



(b) 電流與轉速特性曲線

- (1) 起動瞬間，轉速 $n = 0$ ，因此反電勢 $E_c = K_n n \phi = 0$ ，

$$\text{由於 } E_c = V - I_a R_a, \text{ 因此起動瞬間電樞電流 } I_{a(st)} = \frac{100 \text{ V} - 0}{1 \Omega} = 100 \text{ A}$$

$$(2) \frac{I_{a(st)}}{I_{a(\text{無載})}} = \frac{100 \text{ A}}{5 \text{ A}} = 20 \text{ 倍}$$

3. 降低起動電流的方法

爲了降低起動時的電樞電流，**直流電動機會在電樞繞組上串聯一個起動電阻 (starting resistor)**，隨著轉速上升、反電勢建立後，就必須將電阻移去，否則會造成很大的功率損失，影響運轉時的性能。

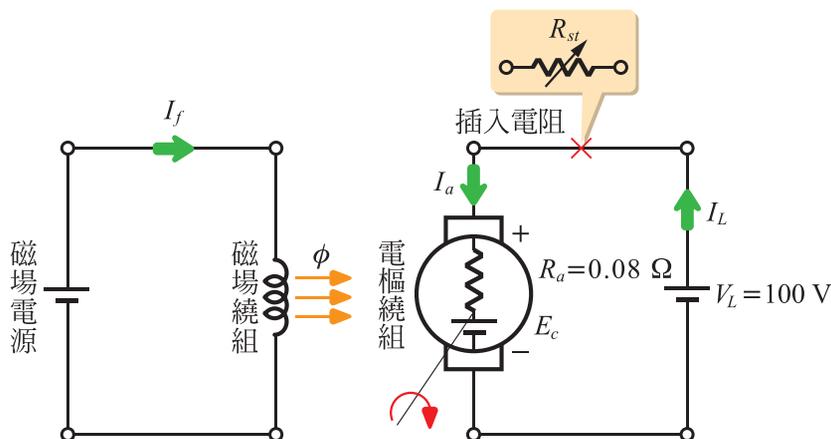
串接電阻可以降低起動時電樞電流 $I_{a(st)}$ ，但是起動轉矩 $T_{(st)} = K_T \phi I_{a(st)}$ 也會降低，因此在設定起動電阻值時，必須考量電動機必須維持足夠的起動轉矩，至於小型直流電動機，由於電樞繞組線徑細、電阻大及轉速上升快，可不須串加起動電阻器，直接以正常電壓進行起動。

範例

10

直流外激式電動機，額定電壓 100 V，額定輸入功率為 5 kW，電樞電阻為 0.08Ω ，倘若忽略損失，求本機：(1) 滿載時輸入電流、(2) 起動時電樞電流、(3) 欲降低起動電流為滿載電流的 2 倍時，電樞繞組應串聯多少歐姆的起動電阻器？

解 依照題意畫出等效電路圖，並將已知數值填入：



$$(1) \text{ 滿載時輸入電流 } I_L = \frac{P_{in}}{V_L} = \frac{5 \text{ kW}}{100 \text{ V}} = 50 \text{ A} \quad (\text{※ } I_L = I_a)$$

(2) 起動瞬間 $n = 0$ ，反電勢 $E_c = 0$ ，可得起動瞬間電樞電流

$$I_{a(st)} = \frac{100 \text{ V} - 0}{0.08 \Omega} = 1250 \text{ A}$$

(3) 欲使起動電流降為滿載電流的 2 倍時，即 $I_{a(st)'} = 2 \times 50 \text{ A} = 100 \text{ A}$

$$\text{配合起動電流而需要串聯的電阻為：} 100 \text{ A} = \frac{100 \text{ V} - 0}{0.08 \Omega + R_{st}} \Rightarrow R_{st} = 0.92 \Omega$$



隨堂練習

- () 1. 有一部 1 HP、100 V 分激電動機，電樞電阻 $R_a = 1 \Omega$ ，若忽略磁場電流與損耗，起動時欲使起動轉矩為滿載之 200%，需串聯多大之起動電阻？
(A) 2.7Ω (B) 5.7Ω (C) 8.7Ω (D) 11.7Ω 。

4. 降低起動電流的設備

直流電動機為了降低起動電流會在電樞繞組上串聯起動電阻，隨著轉速上升，必須將電阻逐漸移開，以減少損失並維持足夠轉矩與轉速，常用設備分為：

(1) 手動起動器 (manual starter)

又稱為人工起動器，分為三點式與四點式兩種。圖 11-18 為利用三點式起動器控制分激電動機，起動器中的 L (line) 接於電源正端， F (field) 接於分激磁場繞組， A (armature) 接於電樞。

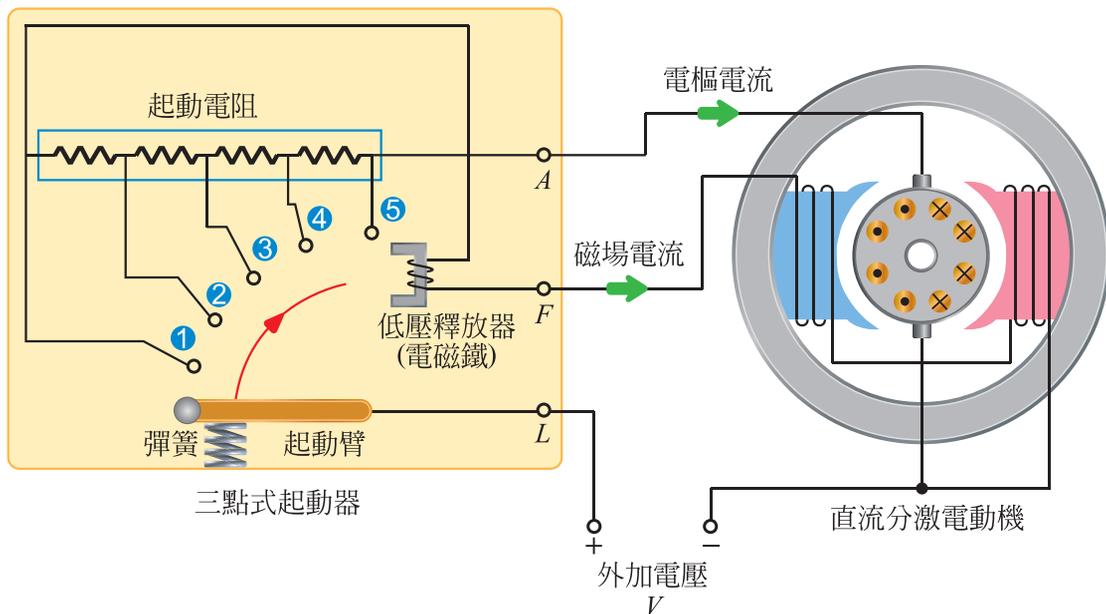


圖 11-18 三點式起動器接線圖

操作人員手握起動臂，依據經驗由①號位置向⑤號位置滑動，將起動電阻逐漸從電樞繞組中移出。當滑到⑤號位置時，起動電阻器完全脫離電樞電路改與磁場繞組串聯，同時電磁鐵將起動臂吸住，操作人員可將手移開，完成起動工作。

萬一場繞組斷路或電源電壓過低時，電磁鐵吸力降低，起動臂被彈簧拉回原點，將電動機切離電源，具有低壓釋放與失磁保護作用。爲了避免人爲誤差，在自動起動器陸續出現後，手動起動器已幾乎被淘汰。

(2) 自動起動器 (automatic starter)

自動起動器可分爲反電勢型、限流型與限時型等三種方式。其中圖 11-19 所示爲限時型的接線圖，利用限時電驛 (time limit relay) 的延時特性，將起動電阻器依次短路，以完成限制起動時電樞電流之目的。分激或複激電動機會加裝失磁保護電驛 (field loss relay)，當磁場電流因故消失時，電驛動作將電動機切離電源，避免轉子飛脫造成危險。

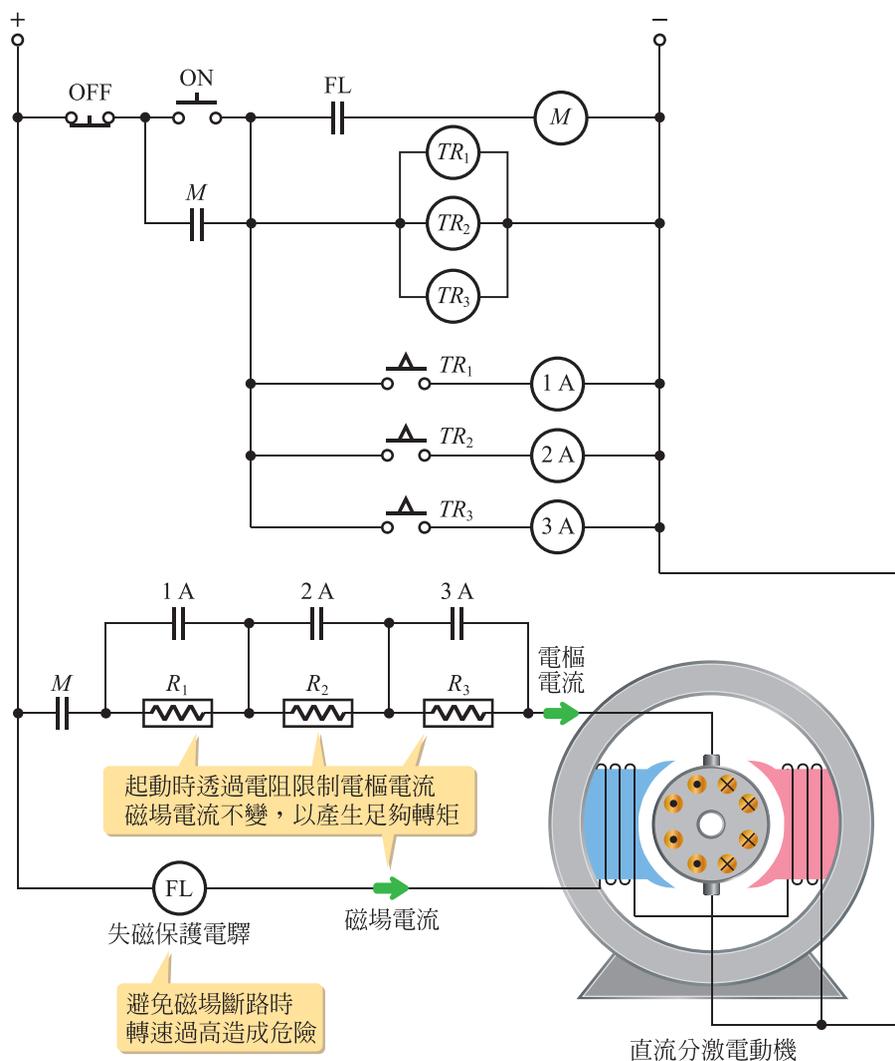


圖 11-19 限時型自動起動器接線圖



隨堂練習

- () 1. 有一部 110 V 直流電動機滿載時之電樞電流為 30 A，電樞電阻為 0.2 Ω，若在起動時限制起動電流為 55 A，則起動器應有電阻值為何？
 (A) 5 Ω (B) 3 Ω (C) 1.8 Ω (D) 1 Ω。
- () 2. 220 V 分激電動機之額定電流為 250 A，電樞電阻 0.04 Ω，欲起動時產生兩倍額定之負載轉矩，其起動器之初步電阻應為
 (A) 0.84 Ω (B) 0.8 Ω (C) 0.44 Ω (D) 0.4 Ω。

(二) 轉速控制

電動機起動完成後，為了符合用戶需求常需要進行轉速調整。依據公式 11-4 直流電動機的轉速：
$$n = \frac{E_c}{K_n \phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_n \phi}$$

上式中，除了電樞電流 I_a 是由電動機依據負載決定、無法由使用者控制外，其他包含電樞電壓 V 、電樞電阻 R_a 以及磁通 ϕ 都是可以控制的項目，因此直流電動機轉速控制的方式主要包含下列幾種：

1. 磁通控制法

由轉速公式 $n = \frac{E_c}{K_n \phi}$ 可得轉速 n 與磁通 ϕ 成反比。除了永磁式電動機無法調整磁通外；其餘直流電動機都可以藉由調整激磁電流來控制磁通量，進行轉速控制。但不同類型的電動機控制方式也略有差異：

(1) 分激電動機

分激電動機會在磁場繞組上串聯可變電阻 R_f ，又稱為場電阻器，接線方式如圖 11-20。

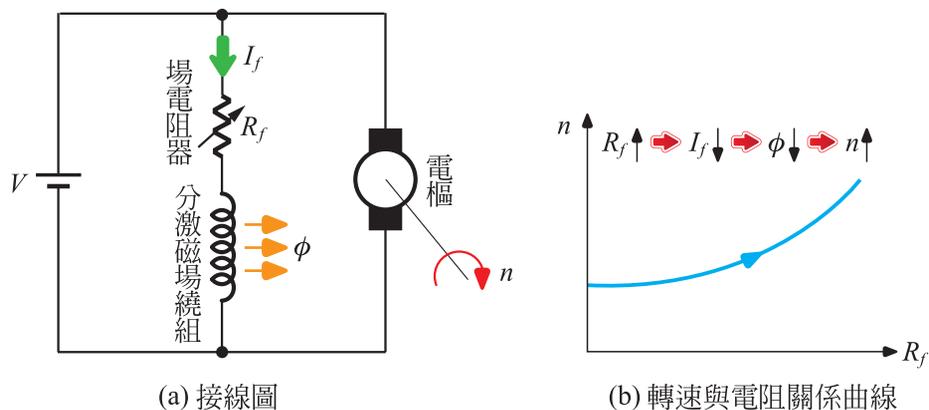


圖 11-20 分激電動機磁場控速法

- 起動時：將場電阻器 R_f 調到最小值，使激磁電流 I_f 維持最大，產生大量磁通 ϕ ，讓電動機有足夠的轉矩 ($T = K_T \phi I_a$) 開始起動。
- 正常運轉中：將場電阻器 R_f 調高，則激磁電流 I_f 下降，磁通 ϕ 減弱，電動機轉速 $n = \frac{E_c}{K_n \phi}$ 上升。

(2) 串激電動機

串激電動機則是在磁場繞組旁並聯一個可變電阻 R_x ，又稱為分流器，接線方式如圖 11-21。

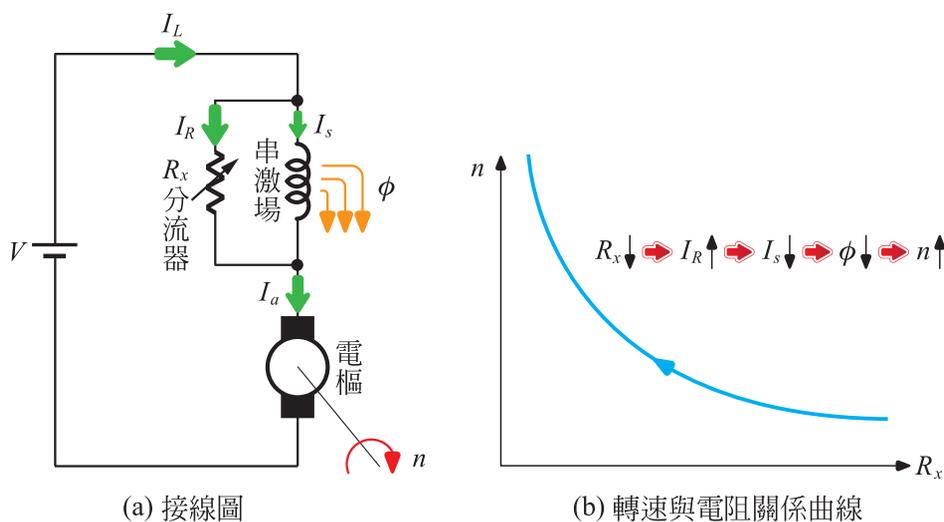


圖 11-21 直流串激電動機磁場控速法

- 起動時：將分流器 R_x 調到最大值，讓電流盡量通過串激磁場繞組，以產生大量的磁通 ϕ ，讓電動機有足夠的起動轉矩。
- 正常運轉中：若將分流器 R_x 降低，電阻電流 I_R 增加，磁場電流 I_s 相對降低，磁通 ϕ 減弱，造成轉速 $n = \frac{E_c}{K_n \phi}$ 上升。

直流電動機採用磁場控制法的特性整理如下：

優點	缺點
(1) 設備費用低、效率高。 (2) 速率調整率佳。 (3) 磁通降低，轉速成反比上升，轉矩成正比降低，具有定馬力特性。	(1) 只能將轉速控制在額定轉速之上。 (2) 主磁場減弱太多，電樞反應增強，會造成換向困難、速率不穩定。

範例

11

有一台直流他激式電動機，電樞電阻為 0.5Ω ，當電樞電壓 100 V 時，電樞電流為 20 A ，轉速為 1100 rpm ；若將磁通加大 10% ，機械負載變動使得電樞電流變成 38 A ，則轉速變為多少？

- 解 (1) 原本 ($I_a = 20 \text{ A}$) 時反電勢 $E_{c1} = V - I_{a1}R_a = 100 - 20 \times 0.5 = 90 \text{ V}$
 (2) 負載加大 ($I_a = 38 \text{ A}$) 時反電勢 $E_{c2} = V - I_{a2}R_a = 100 - 38 \times 0.5 = 81 \text{ V}$

$$(3) \text{ 轉速 } n = \frac{E_c}{K_n \phi} \quad \therefore \frac{n_2}{n_1} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \Rightarrow \frac{n_2}{1100} = \frac{1.1 \phi}{90 \text{ V}} \Rightarrow n_2 = 900 \text{ rpm}$$

2. 電樞電阻控制法

電樞繞組製造完成後，內部電阻值已經固定無法改變，因此電樞控速法會以分接頭或如圖 11-22 所示，在電樞繞組外部串聯一個可變電阻器 R_x ，其功能為：

- (1) 起動時：將電阻器 R_x 調到適當值，以限制起動時電樞電流。
- (2) 正常運轉中：負載不變下，電樞電流 I_a 不變，若將電阻器 R_x 調大，則電阻器兩端壓降 V_R 增加，使得電樞繞組兩端電壓 V_A 降低，轉速 $n = \frac{V_A - I_a R_a}{K_n \phi}$ 下降。

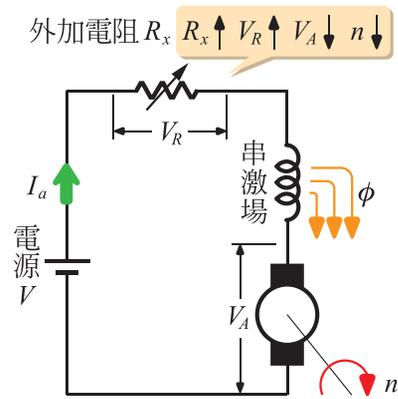
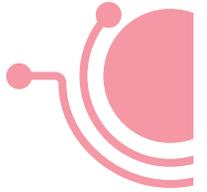


圖 11-22 直流串激電動機電樞電阻控速法

直流電動機採用電樞電阻控制法的特性整理如下：

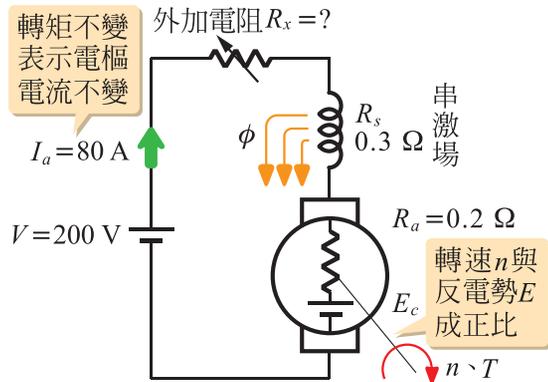
優點	缺點
(1) 構造簡單，連接容易。 (2) 一個電阻可以兼做起動控制與轉速控制。	(1) 只能將轉速控制在額定轉速之下。 (2) 輕載時因為電流小，速率控制效果差。 (3) 重載時因為電流大，造成電阻器功率損失大、效率低。



範例

12

有一台串激式直流電動機，電樞電阻為 0.2Ω ，場電阻為 0.3Ω ，電源電壓為 200 V ，且省略電刷壓降。已知電樞電流為 80 A 時，轉速為 640 rpm ；若轉矩不變，希望電動機穩態轉速為 400 rpm 時，則電樞應該串加多大的電阻？



解 依照題意畫出等效電路圖，並將已知數值填入。

(1) 原本 (640 rpm) 時反電勢

$$E_{c1} = V - I_a(R_a + R_s) = 200 - 80 \times (0.2 + 0.3) = 160 \text{ V}$$

(2) 反電勢 $E_c = K_n n \phi$ ，故 $\frac{E_{c2}}{E_{c1}} = \frac{n_2}{n_1}$

$$400 \text{ rpm 時反電勢必須控制在 } E_{c2} = 160 \times \frac{400}{640} = 100 \text{ V}$$

(3) $E_{c2} = V - I_a(R_a + R_s + R_x) \Rightarrow 100 = 200 - 80 \times (0.2 + 0.3 + R_x)$

$$\text{可得必須串聯電阻 } R_x = 0.75 \Omega$$

3. 電樞電壓控制法

電樞電壓控制法是指在不影響磁通情況下，**單獨改變電樞兩端電壓**，讓轉矩在不受影響下進行轉速控制，因此又稱為定轉矩控制。電樞電壓控制法包括華德 - 黎翁納德 (Ward-Leonard) 法或是升壓機 (booster system) 等方式。傳統華德 - 黎翁納德控制法是以電動發電機組 (M-G)，提供電動機運轉所需的電樞電壓，控速範圍寬廣，但所需設備多、控制效率低。隨著半導體控速法運用普及後，取而代之的是如圖 11-23 所示，利用觸發電路控制矽控整流器 (SCR) 的導通角，來改變輸出直流電壓的調速驅動系統，可獲得高效率及大範圍轉速控制，被稱為靜態華德 - 黎翁納德控速法。

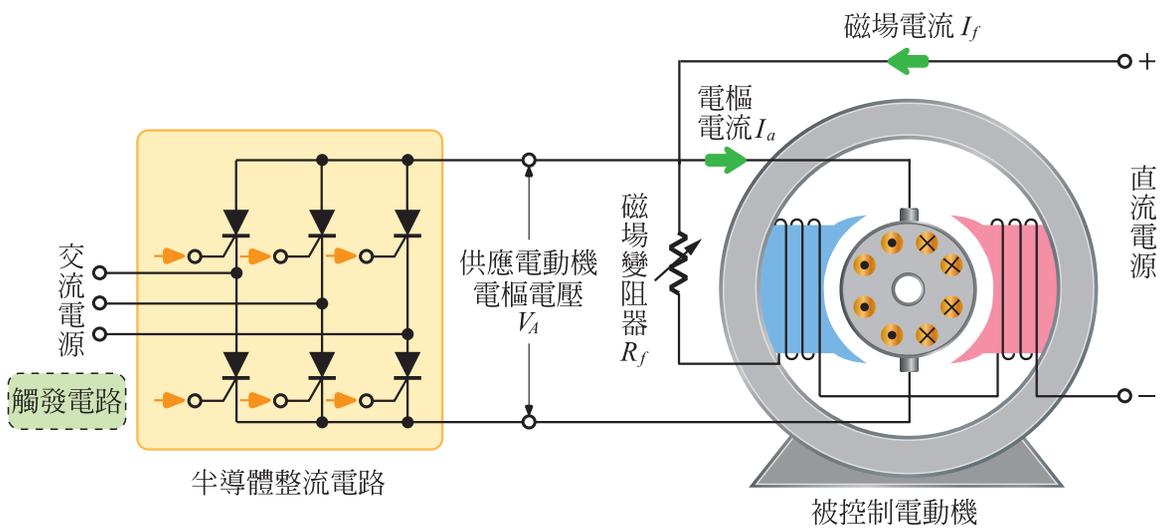


圖 11-23 半導體控速法

4. 串並聯控制法

串並聯控制法是用於多部串激電動機的控制方式。由於串激電動機轉矩與電流成平方正比，在起動電流相同下，兩機串聯時的起動轉矩是並聯時的 4 倍。正常運轉時，轉速與電壓約成正比，兩機並聯的轉速是串聯時的 2 倍，此種方法常用於早期電車等需要大起動轉矩的場所，目前已很少使用。

隨堂練習

- () 1. 有關直流分激電動機之速率控制方法，下列何者正確？
 (A) 增大電樞串聯電阻，可使轉速升高 (B) 減低磁場的磁通量，可使轉速升高
 (C) 減少磁場的激磁電流，可使轉速降低 (D) 增大電樞電壓，可使轉速降低。
- () 2. 220 V 直流分激式電動機，電樞電阻 0.2Ω ，滿載時電樞電流為 100 A，速率為 1400 rpm，使用華德 - 黎翁納德法將電樞電壓降至 140 V 時，若轉矩不變，速率為多少？
 (A) 840 rpm (B) 890 rpm (C) 980 rpm (D) 1400 rpm。

(三) 轉向控制

1. 基本原則

直流電動機的旋轉方向依據弗萊明左手定則得知，只要電樞電流或是磁場電流其中一個方向改變，則導體受力方向將隨之改變，電動機將會反轉。

圖 11-24 的永磁式 (或外激式) 電動機由於磁通方向固定，若將電源極性反接，電樞電流反向，旋轉方向隨之改變。

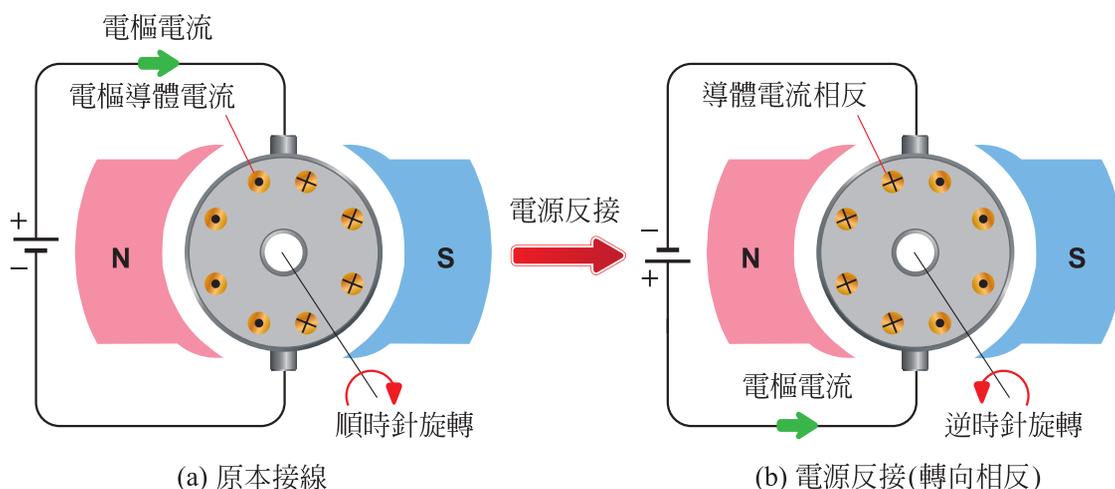


圖 11-24 永磁式電動機電源極性改變

至於分激、串激及複激等電動機由於繞組已經連接妥當，當電源反接，會使得電樞電流與磁場電流同時反向，轉向維持不變。如圖 11-25 所示，將分激電動機電源反接，結果轉向維持不變。

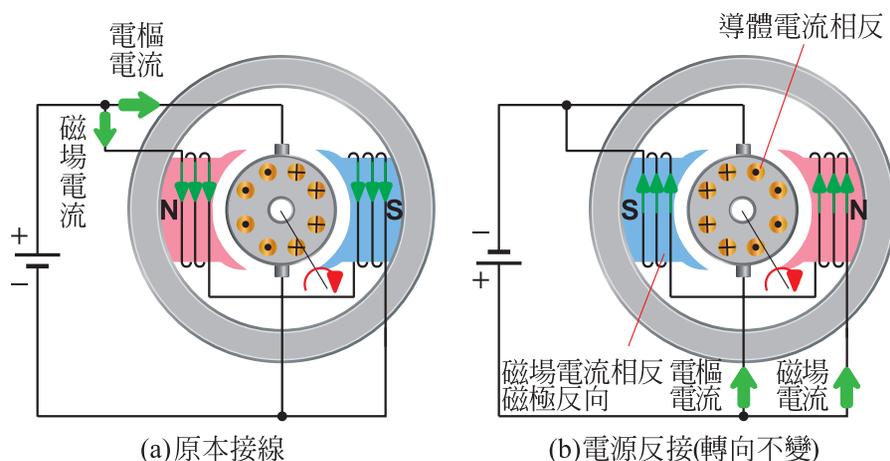


圖 11-25 分激式電動機電源極性改變



2. 控制方法

欲改變直流自激式(包含分激、串激及複激)電動機的轉向時,必須將電樞繞組或是磁場繞組其中一個繞組反接。**一般直流電動機是以改變電樞繞組接線為主**,以免磁場繞組打開瞬間,磁通量瞬間降低,造成轉速過高以及電樞電流過大的危險。

3. 控制電路

直流電動機的轉向控制常用的設備,可以使用圖 11-26 的雙極雙投開關(double-pole double throw switch, DPDT)或是圖 11-27 的鼓型開關等兩種人工操作方式。

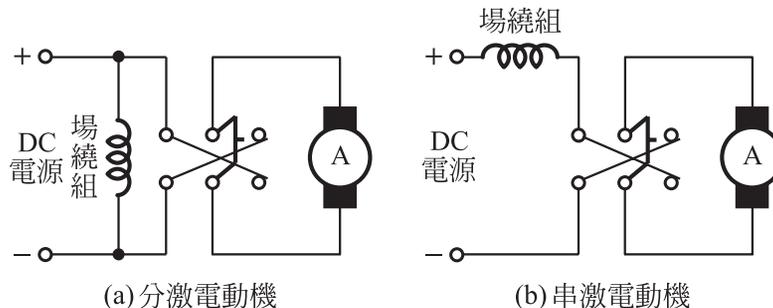


圖 11-26 閘刀開關控制電動機轉向

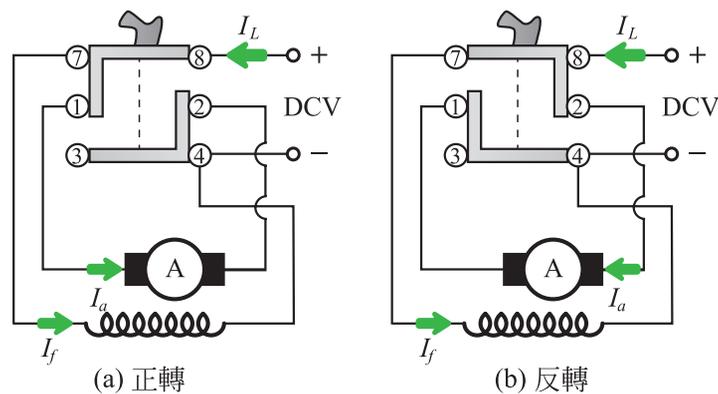
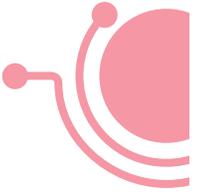


圖 11-27 鼓型開關控制分激電動機轉向

上述方式必須由控制人員以手動方式來切換開關,操作上較不方便。隨著半導體以及電子材料的進步,許多傳統控制方式也逐漸被電子控制電路所取代。這種應用電子電路來進行精準、安全、節能的電機控制也是目前的發展主流。

**隨堂練習**

- () 1. 下列直流電動機中，若只改變電動機電源之正負極性，何者會改變旋轉方向？
 (A) 永磁式 (B) 積複激式 (C) 串激式 (D) 分激式。
- () 2. 要讓直流分激式電動機之轉向改變，其作法是
 (A) 改變電源極性 (B) 改變電樞繞組電流方向
 (C) 串接起動電阻 (D) 改變電樞繞組與場繞組電流方向。

(四) 制動控制

運轉中的電動機切離電源後，受到慣性影響，仍會持續轉動一段時間後才停止，越大型電動機所需的時間越長。倘若電動機遇到緊急狀況需要快速停止或是急減速時，就必須安裝制動(煞車)設備，常用方式分成：

1. 機械制動：利用煞車器 (brake) 摩擦的方式，將電動機與負載的轉動能量轉換成熱能，使電動機達成停止或限制速度之目的。
2. 電氣制動：
 - (1) 動力制動：又稱為發電制動。將圖 11-28(a) 原本運轉中的電動機切離電源後，如圖 11-28(b) 在原本電源位置改裝電阻器，電動機變為發電機將慣性動能轉換成電能後，經由電阻器消耗以迅速停機。電阻器的阻值越小，所消耗的能量越大，制動力量越強。

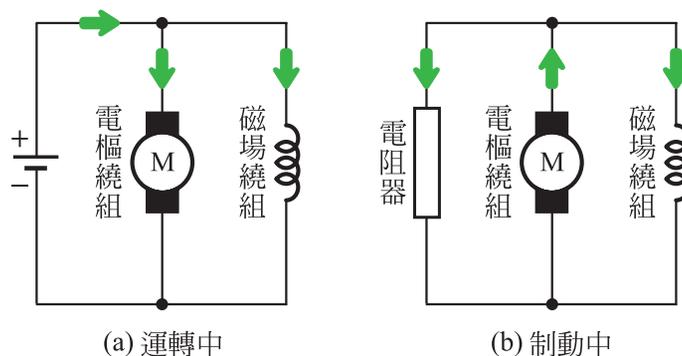


圖 11-28 動力制動



- (2) 逆轉制動：又稱為插塞制動。圖 11-29(a) 為正常運轉時電樞電流的方向。遇到緊急事故需要快速停止時，如圖 11-29(b) 先將運轉開關打開後改將制動開關閉合，由於電樞電流反向，電動機會立刻減速準備反轉，再利用插塞電驛 (plugging realy) 讓電動機在正、反轉轉矩抵消時切離電源。電阻器則用以避免反向瞬間電樞電流太大造成電樞燒毀。

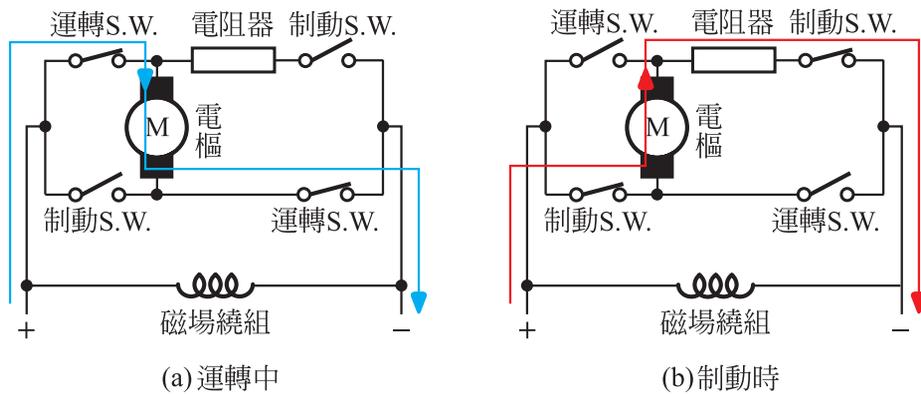


圖 11-29 分激電動機運轉與逆轉制動控制圖

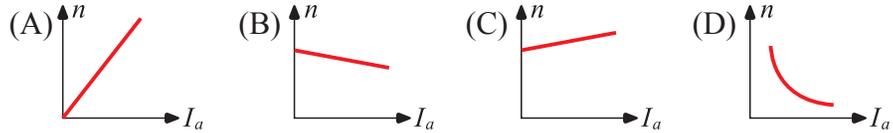
- (3) 再生制動：倘若**電動機之負載具有下滑特性者**，如起重機下降或是電動車輛下坡時，可能因為負載重力導致速度增加，造成電動機的反電勢 ($E_c = K_n n \phi$) 超過外加電壓。此時電動機產生發電機作用，除了將動能變成電能送還電源外；電動機也會因此得到制動轉矩，使得轉速降低。但是一旦**下滑狀況結束後，發電機作用又會消失**，故此法只能使電動機減速無法使其停止，必須搭配其他制動方式。

一、選擇題

- 11-2** () 1. 一 110 V，1 hp，900 rpm 的直流分激式電動機，電樞電阻為 0.08 Ω ，滿載時之電樞電流為 7.5 A，則此電動機滿載時之反電動勢為多少？
(A) 108.2 V (B) 109.4 V (C) 110.0 V (D) 116.8 V。
- () 2. 有一台分激式直流電動機，電樞電阻為 0.2 Ω ，場電阻為 200 Ω ，外接電源電壓為 200 V 已知電動機之感應電勢 (單位為伏特) 大小是場電流 (單位為安培) 大小的 179.2 倍，假設電刷壓降為 1 V，則電源電流應為何？ (A) 70 A (B) 85 A (C) 100 A (D) 115 A。
- 11-3** () 3. 有一直流分激電動機，產生 50 N-m 之轉矩，若將其場磁通減少至原來的 50%，且電樞電流由原來的 50 A 提高至 100 A，則其產生的新轉矩為多少？
(A) 25 N-m (B) 50 N-m (C) 75 N-m (D) 100 N-m。
- () 4. 某 200 V 直流分激電動機，電樞電阻為 0.1 Ω ，當電樞電流為 80 A 時，轉速為 1500 rpm，若不考慮電樞反應，在電樞電流為 30 A 時，轉速約為多少？
(A) 1464 rpm (B) 1502 rpm (C) 1521 rpm (D) 1539 rpm。
- () 5. 某分激式直流電動機之無載轉速 1300 rpm，已知其速率調整率為 5%，則滿載轉速約為多少？
(A) 1220 rpm (B) 1238 rpm (C) 1254 rpm (D) 1267 rpm。
- () 6. 直流分激電動機若沒有保護設備，當運轉中，磁場繞組突然發生斷路，將發生
(A) 電動機停轉，有大電流
(B) 磁通量降到零，電動機停轉
(C) 轉速變得很快
(D) 重載時，電動機停轉，有大電流；輕載時，電動機轉速變得很快，會損壞。

自我評量

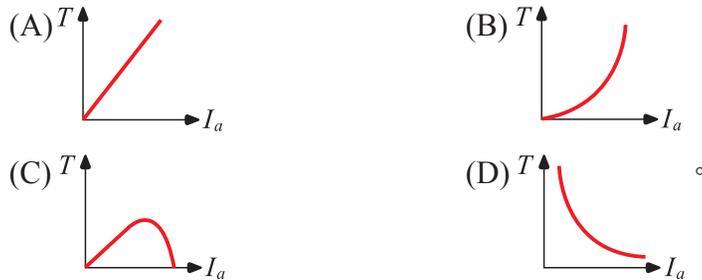
() 7. 下列何者是直流分激電動機之轉速 (n) 與電樞電流 (I_a) 的特性曲線？



() 8. 直流串激式電動機在運轉時，若鐵心已經飽和，且 K_T 為常數，則此電動機之電磁轉矩 T_e 與電樞電流 I_a 的關係，下列何者正確？

(A) $T_e = \frac{K_T}{I_a^2}$ (B) $T_e = \frac{K_T}{I_a}$ (C) $T_e = K_T I_a$ (D) $T_e = K_T I_a^2$ 。

() 9. 直流串激式電動機的輸出轉矩 T 與電樞電流 I_a 的關係，可表示為何？



() 10. 直流串激式電動機，若外加電壓不變，當負載變大時，下列關於轉速與轉矩變化的敘述，何者正確？

- (A) 轉速變小，轉矩變大 (B) 轉速與轉矩都變大
(C) 轉速變大，轉矩變小 (D) 轉速與轉矩都變小。

() 11. 一串激式直流電動機運轉時，輸入額定電樞電流為 50 A，產生轉矩為 200 N·m，且無載磁化曲線為直線關係。若將電樞電流降低至 25 A，產生的轉矩應該為何？

- (A) 50 N·m (B) 100 N·m (C) 200 N·m (D) 400 N·m。

() 12. 某一長分路複激直流電動機，其端電壓 200 V，線路電流 10 A，電樞繞組的電阻 0.3 Ω ，串激繞組的電阻 0.2 Ω ，分激場電阻 100 Ω ，試求該電動機之反電勢為多少？

- (A) 195 V (B) 196 V (C) 198 V (D) 204 V。

自我評量

- ()13. 當額定容量與電壓相同時，下列直流電動機中，何者起動轉矩最大？
(A) 差複激式 (B) 串激式 (C) 分激式 (D) 外(他)激式。
- ()14. 下列直流電動機中，哪一種的轉矩有可能變為零或者負的時候？
(A) 串激式 (B) 積複激式 (C) 差複激式 (D) 分激式。
- ()15. 欲打一杯均勻細緻(需高速攪拌)的木瓜牛奶，下列何種直流電動機較恰當？
(A) 直流分激電動機 (B) 直流他激電動機
(C) 直流串激電動機 (D) 直流積複激電動機。
- ()16. 下列敘述何者為正確？
(A) 分激電動機轉矩特性為一雙曲線
(B) 串激電動機用於恆速運轉
(C) 積複激式電動機為定速電動機
(D) 差複激電動機之轉矩特性為先增後減。
- 11-4** ()17. 直流分激式電動機起動時，加起動電阻器的目的為何？
(A) 增加起動轉矩 (B) 降低磁場電流
(C) 增加電樞轉速 (D) 降低電樞電流。
- ()18. 將直流分激電動機之磁場電阻調小，則其轉速
(A) 增快 (B) 減慢 (C) 固定 (D) 磁場電流與轉速無關。
- ()19. 有關分激式(並激式)直流電動機之速率控制方法，下列何者正確？
(A) 增大電樞串聯電阻，可使轉速升高
(B) 減低磁場的磁通量，可使轉速升高
(C) 減低磁場的磁通量，可降低轉速
(D) 增大電樞電壓，可降低轉速。
- ()20. 有一直流串激電動機，供給電壓為 525 V，電樞電流 50 A，轉速每分 1500 轉，現供給電壓減少為 400 V，(假設電樞線圈及激磁線圈的總電阻是 0.5 Ω) 對同一電流而言，轉速為
(A) 1315 rpm (B) 1215 rpm (C) 1125 rpm (D) 1075 rpm。

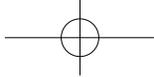
自我評量

二、問答題

1. 有一部直流他激式電動機，電源電壓 220 V，電樞繞組電阻 0.2Ω ，電樞電流 20 A 時，測得轉速 1510 rpm，如其負載轉矩變成 2 倍，則 (1) 電樞電流、(2) 反電勢、(3) 轉速分別為多少？

2. 有一部 120 V 直流分激電動機，電樞電阻為 0.2Ω ，電刷壓降為 2 V，額定電樞電流為 75 A，磁場繞組忽略不計，則該機 (1) 起動時電樞電流？ (2) 起動時電樞電流為額定電流的幾倍？ (3) 欲限制起動電流為額定電流之 150 %，應串聯起動電阻值為何？ (4) 欲使起動轉矩為額定轉矩之 2 倍，應串聯起動電阻值為何？

3. 有一部 200 V 直流串激電動機，電樞電阻為 0.2Ω ，串激場電阻為 0.3Ω ，省略電刷壓降。已知電樞電流為 80 A 時，轉速為 640 rpm，則 (1) 反電勢為？ (2) 轉矩不變下，欲將轉速降為 400 rpm，則場電阻應改變為多少？



CHAPTER 12

直流電動機之耗損及效率

» 本章重點

直流電動機的目的是將直流電能轉變成機械能後帶動外部負載。礙於材料特性，因此部分能量會在過程中轉變成熱能，除了造成高溫降低電機壽命外，也造成能量浪費。本章除了複習耗損的形態外，也會針對直流電動機耗損與效率的關係做詳細說明。

12-1 直流電動機之耗損

直流電動機與直流發電機構造相同，都是由：(1) 銅線組成的電路部分、(2) 鐵心組成的磁路部分、(3) 旋轉的機構所共同組合而成。受限於材料本身特性，在能量轉換過程中各個部分都會產生耗損，主要包含：

(一) 銅損

銅損 (P_c) 又稱為電阻損，是指電流 (I) 通過繞組時，由於繞組本身電阻 (R) 所產生的發熱耗損 ($P = I^2R$)，因此**銅損大小與所通過的電流平方成正比**。

分激磁場繞組由於跟電源並聯，所通過的電流與負載大小無關視為固定損外，其餘銅損會隨負載變動而改變，因此歸類成變動損失。

(二) 鐵損 (P_i)

電機鐵心大多採用矽鋼薄片疊置而成，以形成低磁阻的路徑讓磁通 ϕ 順利通過。但是鐵心本身因為磁滯特性及導電性也會造成損失而發熱，統稱為鐵損 (P_i)。依據發生的原因分為磁滯損 (P_h) 與渦流損 (P_e) 二種：

1. 磁滯損 (P_h)：磁滯損與磁滯迴線內所含面積成正比。在鐵心中加矽可以降低磁阻，使鐵心不易老化並可減少磁滯損失，磁滯損可用下列公式表示：

$$P_h = K_h B_m^X f G \quad (12-1)$$

2. 渦流損 (P_e)：直流電動機的電樞旋轉時，電樞鐵心因為切割磁通感應產生交流電，因而引發渦流在鐵心內流動，導致鐵心發熱的現象稱為渦流損。將電機鐵心採用絕緣薄片疊製，可以有效降低渦流損，渦流損可用下列公式表示：

$$P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G \quad (12-2)$$

範例

01

一直流電動機在轉速 500 rpm 時之鐵損為 200 瓦特，在 1000 rpm 時之鐵損為 500 瓦特，在磁通密度保持不變時，試求轉速 500 rpm 時磁滯損與渦流損分別為多少？

解 (1) 假設 500 rpm 時磁滯損為 P_h ，渦流損為 P_e ，依據題意可得

$$P_h + P_e = 200 \text{ W} \dots\dots\dots ①$$

(2) 由於電樞內部的頻率 (f) 與轉速 (n) 成正比，而

磁滯損 $P_h = K_h B_m^X f G$ ，可得磁滯損與轉速成正比；

渦流損 $P_e = K_e B_m^2 f^2 t^2 G$ ，渦流損與轉速成平方正比。

當轉速由 500 rpm 變為 1000 rpm，頻率也會變為 2 倍。

$$\text{故 } 2P_h + 4P_e = 500 \text{ W} \dots\dots\dots ②$$

將 ①、② 解聯立後，可得

$$500 \text{ rpm 時，磁滯損 } P_h = 150 \text{ W，渦流損 } P_e = 50 \text{ W}$$

(三) 耗損對電動機的影響

1. 損失造成溫度上升、絕緣劣化

損耗全都轉變成熱能，導致運轉時溫度上升，除了可能造成線圈燒毀外，絕緣材料的電阻值隨著溫度上升而降低，可能會引發漏電或燒毀。

2. 損失造成效率降低、電費增加

在負載不變下採用較佳的材料或是設計來降低電動機的損失，則電動機運轉所需的電能越低，負擔的電費越低，效率越高。



隨堂練習

- () 1. 直流電動機的負載量由輕載增到滿載，下列哪一種銅損的大小不變？
 (A) 電樞繞組銅損 (B) 分激場繞組銅損
 (C) 串激場繞組銅損 (D) 電刷接觸電阻損失。
- () 2. 直流機運用於 1000 rpm，渦流損 300 W，磁滯損 100 W，現速率為 2000 rpm 且磁通維持不變，則渦流損與磁滯損將變為
 (A) 600 W、200 W (B) 600 W、400 W (C) 1200 W、200 W (D) 1200 W、400 W。

12-2 效率

(一) 效率的定義

電機的效率為輸出功率與輸入功率之比值，一般以百分比來表示，即

$$\text{效率 } \eta = \frac{\text{輸出功率 } P_o}{\text{輸入功率 } P_{in}} \times 100 \% \quad (12-3)$$

(二) 效率的分類

實際計算電動機的效率時，有下列幾種方式：

1. 實測效率：電動機組立後，利用電表測量輸入功率、動力計測量輸出功率，並將結果代入公式 12-3 此結果最準確，但受限於設備因素，只適用於中、小型電機。
2. 公定效率：對於大型電動機而言，很難找到適合的動力計來測量機械功率。

如圖 12-1，將較易測量的輸入功率 (P_{in}) 扣除損耗功率 (P_{loss}) 後就可以得知輸出機械功率 (P_o)，因此公定效率：

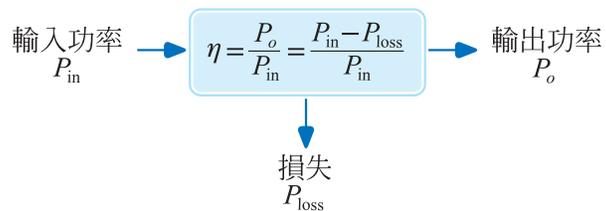


圖 12-1 損失與效率的關係

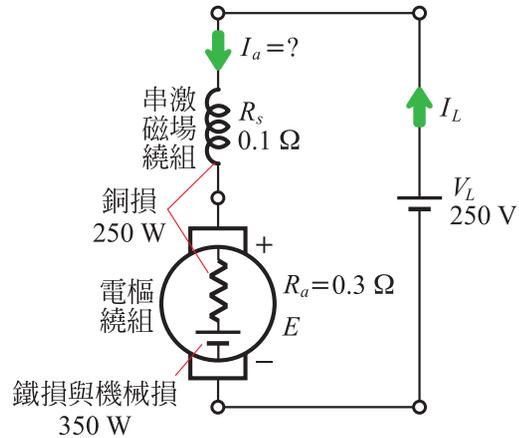
$$\text{公定效率 } \eta(\%) = \frac{\text{輸入功率 } P_{in} - \text{損失 } P_{loss}}{\text{輸入功率 } P_{in}} \times 100 \% \quad (12-4)$$

範例

02

有一台串激電動機額定電壓 250 V，電樞電阻 0.3Ω ，串激場繞組電阻 0.1Ω ，已知滿載銅損合計 250 W，鐵損及機械損共 350 W，求滿載時：
(1) 輸入電流、(2) 輸入功率、(3) 輸出功率、(4) 滿載效率。

解 依照題意畫出等效電路如右圖所示：



(1) 串激電動機的銅損包含電樞繞組銅損與串激磁場繞組銅損，即

$P_c = I_a^2 \times (R_a + R_s)$ ，因此可得本機滿載的電樞電流

$$I_a = \sqrt{\frac{P_c}{R_a + R_s}} = \sqrt{\frac{250}{0.3 + 0.1}} = \sqrt{625} = 25 \text{ A}$$

(2) 滿載時輸入功率 $P_{in} = V_L \times I_L = 250 \text{ V} \times 25 \text{ A} = 6250 \text{ W}$

(3) 輸出功率 $P_o = 6250 - 250 - 350 = 5650 \text{ W}$

(4) 滿載效率 $\eta \% = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100 \% = \frac{5650 \text{ W}}{6250 \text{ W}} \times 100 \% = 90.4 \%$

隨堂練習

() 1. 若直流電動機之輸出功率 P_o 、輸入功率 P_i 及總損失功率 P_l ，則其公定效率 η 的計算，下列何者正確？

(A) $\eta = \frac{P_o}{P_o - P_l}$ (B) $\eta = \frac{P_i - P_l}{P_i}$ (C) $\eta = \frac{P_i - P_l}{P_o - P_l}$ (D) $\eta = \frac{P_i + P_l}{P_o + P_l}$ 。

() 2. 有一部 2.2 kW、110 V 的直流分激電動機，滿載效率為 80%，則其滿載電流約為
(A) 16 A (B) 21 A (C) 25 A (D) 29 A

() 3. 以電動機而言，下列何者功率值最大？

(A) 機械功率 (B) 損失功率 (C) 電磁功率 (D) 電功率。

單元摘要

第八章

- 轉矩 T 是使物體產生迴轉的力量，單位為 N-m。轉速 n 是轉軸每分鐘旋轉次數，單位為 r.p.m。
- 單一線圈通電後在磁場中產生的轉矩呈現脈動現象，轉矩 $T = 2 \times F \times r \times \cos \theta$
- 直流電動機轉矩 $T = \frac{PZ}{2\pi a} \phi I_a = K_T \phi I_a$ ，轉矩 T 與磁通量 ϕ 及電樞電流 I_a 成正比。
- 電機運轉過程中有關電壓、電流、轉速等數值會標示於銘牌上，稱為額定值或滿載值。
- 電動機的輸出功率 P_o 、轉速 n 與轉矩 T 關係為： $P_o = \frac{2\pi n}{60} \times T = \omega \times T$ (瓦特)
- 電動機軸端的機械負載會隨時改變，造成轉速、轉矩、電流及輸入功率隨時變動。

第九章

- 直流電機可依需要做為電動機或發電機使用，以分激式為例，差異在於。

項目	直流分激電動機	直流分激發電機
能量轉移方式	直流電能轉變成機械能	機械能轉變成直流電能
電流方向	$I_L = I_a + I_f$	$I_a = I_L + I_f$
電刷功能	將電源供應的直流電流傳遞給換向器	將電樞換向完成後的直流電傳遞給負載
換向器功能	直流電轉換成交流電後提供給電樞	將電樞感應產生的交流電轉換成直流電

第十章

- 電樞反應造成直流電動機前極尖磁通增多，後極尖磁通減少，磁中性面逆著旋轉方向偏移。
- 電樞反應的交磁效應，使得合成磁場發生畸斜，造成換向困難。去磁效應使得磁通量減少，電動機轉矩降低、轉速增加。
- 中間極的目的是改善換向，直流電動機主磁極與中間極的順序為 \overline{NnSs} 。
- 直流電動機的電刷沒有移動或移動角度不足，使得換向中電流變化先慢後快者稱為低速換向，造成電刷後刷邊燒毀。

第十一章

12. 直流電動機反電勢 $E_c = K_n n \phi = V - I_a R_a$ 。對電動機影響包括：

(1) 限制電樞電流：
$$I_a = \frac{V - E_c}{R_a}$$

(2) 產生機械功率：
$$P_m = E_c \times I_a$$

13. 直流電動機轉速 $n = \frac{V - I_a R_a}{K_n \phi}$ ，與反電勢 E_c 成正比，與磁通 ϕ 成反比。

14. 電動機的轉速特性曲線測量電樞電流 I_a 與轉速 n 的關係。

15. 電動機的轉矩特性曲線測量電樞電流 I_a 與轉矩 T 的關係。

16. 速率調整率 $(S.R. \%) = \frac{n_0 - n_f}{n_f} \times 100\%$ 越小代表轉速越穩定，理想值為 0。

17. 外(分)激式電動機：負載增加時，轉矩與電樞電流成正比上升，轉速略微降低，速率調整率低。運轉過程中磁場斷路會有脫速危險。

18. 串激式電動機：無載時轉速極高。輕載時負載增加，轉矩與電樞電流成平方正比，轉速快速降低；重載時負載增加，轉矩與電樞電流成正比，轉速緩降。速率調整率最大。

19. 串激電動機可以交、直流兩用，廣泛應用於需要大起動轉矩或高速轉動的電器用品。

20. 積複激式電動機如同分激與串激電動機的綜合體，轉矩與轉速特性介於二者之間。

21. 差複激式電動機無載時轉速穩定；負載增加，轉速上升，但是轉矩先升後降並會反轉。速率調整率為負值，實用性差。

22. 電動機理想起動特性為起動電流小、起動轉矩大。

23. 電動機多採無載起動，轉速穩定後才增加負載。串激電動機則要避免無載起動，以免轉速過快造成危險。

24. 電樞繞組上串聯起動電阻 R_{st} ，以降低起動時電樞電流，其關係為

$$I_{a(st)} = \frac{V - E}{R_a + R_{st}}$$

單元摘要

25. 分激電動機在磁場繞組上串聯可變電阻 (場電阻器) 來控制轉速。將場電阻器 R_f 調高，激磁電流下降，磁通 ϕ 減弱，轉速 n 上升。
26. 串激電動機在磁場繞組上並聯可變電阻 (分流器電阻) 來控制轉速。將分流器 R_x 降低，電阻電流增加，磁場電流相對降低，磁通 ϕ 減弱，轉速 n 上升。
27. 電樞電壓控速法只單獨改變電樞兩端的電壓，磁通維持不變，又稱為定轉矩控制。
28. 永磁式電動機由於磁通方向固定，若將電源極性反接，電樞電流反向，轉向隨之改變。
29. 自激式 (分激、串激及複激) 電動機電源反接，轉向維持不變；必須將電樞繞組或磁場繞組其中一個反接，轉向才會改變。
30. 電動機的制動有機械制動及電氣制動兩類，電氣制動包括動力制動、逆轉制動以及發電制動。

第十二章

31. 耗損對直流電動機而言，會造成溫度上升、絕緣劣化、效率降低、電費增加。
32. 鐵心加矽可以減少磁滯損，鐵心採用絕緣薄片疊積可以減少渦流損。
33. 效率為輸出功率與輸入功率之比，其值為 $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}}$ ，無載時效率為零，接近滿載時效率最高。

一、選擇題

- 12-1** () 1. 電工機械的銅損與負載電流的大小關係是
(A) 與負載電流成正比 (B) 與負載電流成反比
(C) 與負載電流成平方正比 (D) 與負載電流無關。
- () 2. 直流電機的鐵心損失是指
(A) 渦流損失及機械損失 (B) 渦流損失及磁滯損失
(C) 磁滯損失及機械損失 (D) 軸承及電刷摩擦損失。
- () 3. 爲了減低磁滯損，直流電機會採用何種措施？
(A) 採用高導磁係數鐵心 (B) 鐵心採用薄矽鋼片疊製而成
(C) 增快轉速 (D) 提高電壓。
- () 4. 一直流電動機在轉速 1000 rpm 時之鐵損爲 1000 W，在 500 rpm 時之鐵損爲 400 W，在磁通密度保持不變時，則下列敘述何者錯誤？
(A) 磁滯損與轉速成正比
(B) 渦流損與轉速平方成正比
(C) 在 500 rpm 時之渦流損爲 100 W
(D) 在 1000 rpm 時之磁滯損爲 400 W。
- () 5. 有 A、B 兩矽鋼片，若 A 厚度僅爲 B 的 $\frac{3}{4}$ ，則 A 渦流損爲 B 的
(A) $\frac{3}{4}$ 倍 (B) $\frac{9}{16}$ 倍 (C) $\frac{4}{3}$ 倍 (D) $\frac{16}{9}$ 倍。
- () 6. 隨負載變化而變化的損失，稱爲
(A) 可變損 (B) 旋轉損 (C) 固定損 (D) 機械損。
- () 7. 鐵心損失，可視同
(A) 可變損 (B) 旋轉損 (C) 固定損 (D) 機械損。
- () 8. 電動機在滿載時的損失，比輕載時
(A) 少 (B) 多 (C) 相等 (D) 不一定。
- 12-2** () 9. 直流電動機之額定容量，一般是指在無不良影響條件下之
(A) 輸入功率 (B) 輸出功率 (C) 熱功率 (D) 損耗功率。
- () 10. 電動機在滿載時的效率，比輕載時
(A) 高 (B) 低 (C) 相等 (D) 不一定。

自我評量

- ()11. 容量越大的電動機，其效率通常越
(A) 低 (B) 高 (C) 相等 (D) 不一定。
- ()12. 動力計可用以測量電動機的
(A) 輸入電功率與轉矩 (B) 輸出電功率與電磁功率
(C) 機械功率與轉矩 (D) 溫升。
- ()13. 200 V、20 hp 直流分激電動機之效率為 82 %，滿載電流為
(A) 61.1 A (B) 74.6 A (C) 82 A (D) 91 A。
- ()14. 某分激電動機，自 220 V 電源取用 60 A 電流，若其效率為 80 %，
則其總損失為
(A) 600 W (B) 1600 W (C) 2640 W (D) 10560 W。
- ()15. 某直流電動機，自 120 V 電源取用 11 A 電流，若其效率為 85 %，
則其輸出馬力數約為 (A) 1 hp (B) 1.5 hp (C) 2 hp (D) 2.5 hp。

二、問答題

1. 說明耗損對直流電動機的影響。
2. 有一部 4 hp、200 V、額定電流為 17 A 的直流電動機，試求此機滿載時：
(1) 輸入功率、(2) 輸出功率、(3) 損失、(4) 效率分別為多少？

自我評量

3. 有一台 200 V 直流長並聯積複激電動機，滿載時測得輸入電流 30 A，已知串激場電阻 $0.2\ \Omega$ ，電樞電阻 $0.3\ \Omega$ ，分激場電阻 $50\ \Omega$ ，鐵損為 62 W，其餘損失忽略不計，試求此機滿載時：(1) 輸入功率、(2) 分激磁場電流、(3) 電樞電流、(4) 反電勢、(5) 總銅損、(6) 總耗損、(7) 輸出功率、(8) 輸出馬力數、(9) 效率分別為多少？

4. 有一台 250 V、5 kW 直流分激電動機，滿載效率為 80 %，激磁電流為 1 A，電樞電阻為 $0.5\ \Omega$ ，轉速 1200 rpm，忽略電刷及機械損，求電動機滿載時：(1) 輸入功率、(2) 輸入電流、(3) 電樞電流、(4) 反電勢、(5) 總耗損、(6) 總銅損、(7) 鐵損、(8) 輸出轉矩分別為多少？

