

高等學校交流講義

金屬切削機床的電氣設備

清華大學電工教研組編

(內部交流 * 僅供參考)

中華人民共和國高等教育部教材編審處

金屬切削機床的電氣設備

第一章	電動機的機械特性 -----	1
第二章	拖動中力學平衡方程式 的介紹，電動機的功率 選擇，速度的調節 -----	14
第三章	金屬切削機床的電氣設 備和控制電路 -----	23
第四章	6H82 萬能銑床的控 制電路 -----	52
附 錄	-----	58

金屬切削機床的電氣設備

第一章 電動機的機械特性

第1—1節感應電動機的特性

1. 工作情形：在普通電工學中我們已詳細研究過感應電動機的構造、工作原理和負載特性。我們已經知道感應電動機之所以能轉是因為轉子導體與旋轉磁場有相對速度，而且轉子比旋轉磁場的轉速慢，所以轉子受力跟着旋轉磁場旋轉。我們可以想像，如果轉子的速度比旋轉磁場的速度大，或者是轉子的旋轉方向與旋轉磁場的方向相反，那麼轉子的工作將是另一種情形，因此感應電機不但可作原動機以拖動負載，而且也可起掣動作用，使旋轉的機械很快停止。

它的工作情形如圖1—1所示。圖中 n 是旋轉磁場的轉速， n

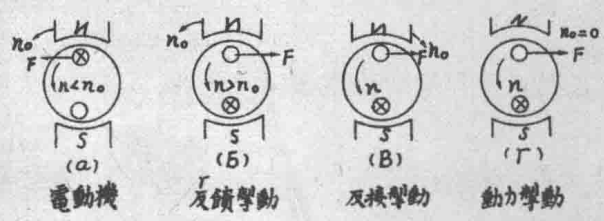


圖 1—1

是轉子的轉速， F 是轉子導體所受的力，(a)是電動機作用。導體所受的力 F 與其旋轉方向相同，(б)是反饋掣動，這時轉子的轉速比 n 大，因此導體切割磁力線的方向及所感應的電勢和電流如圖所示，於是轉子受力的方向與其旋轉方向相反，因此轉子速度將很快的降伏。

(в)是反接掣動，當電動機正以 n 旋轉時，忽然把定子兩條端線互換，這時定子產生的旋轉磁勢立即以 n 的速度向相反的方向旋轉。轉子受力的方向如圖所示，因此轉子即很快的減速。

(г)是耗能掣動 (Плизи ческое торможение)。當轉子正以 n 旋轉時，將交流電源切開。而在定子線圈內加入直流電源，於是定子產生一不動的磁場，這時轉子受到與其旋轉方向相反的

力，很快的停下來。

反饋掣動只有當 $n \rightarrow 0$ 才可能應用，所以要想使電動機很快停止時，一定要用其他兩種方法，反接掣動應在轉子速度快等於零之前利用自動控制設備將電源斷開，以防反轉。耗能掣動沒有反轉的可能，但是它的掣動力矩隨轉子速度的降低而減小。

上述各種工作情形的連接線路如圖 1—2 所示。

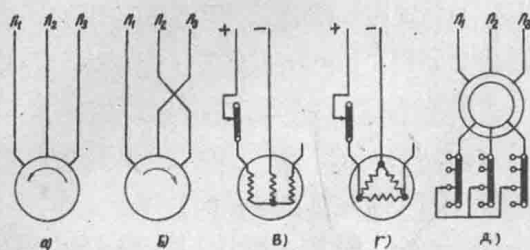


圖 1—2

在金屬切削機床上耗能掣動的應用比較困難，因為直流電源不易得到。

滑環式感應電動機的線路如圖 1—2 (b) 所示，它的轉子電阻可作調速和起動之用。

2. 起動： 鼠籠式感應電動機的起動電流很大（約為定額電流 5—8 倍），所以只有當電動機的容量小於車間變壓器容量 25% 才可直接起動，以免影響其他電機。如果有白熱燈與電動機並聯而且電動機要經常起動時，則電動機能直接起動的容量就降為車間變壓器的 5%。

金屬切削機床一般是在無載情形下起動的，所以不需要很大的起動轉矩，因此滑環式感應電動機在機床上很少採用。

如果必須減小起動電流時，可利用各種降低電壓的起動方法（常用定子串聯可變電阻起動）。

3. 轉速的調節： 感應電動機轉子的轉速可用下式表示：

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (1)$$

式中 n —轉子的轉速，轉分：

f —電源的頻率，週/秒；我國工業頻率為50~

s —轉差率

p —旋轉磁場的極對數，

由公式(1)可以看出要改變 n 可改變 f ， s ， p 中的任何一個即可。

改變 f 可以得到很平滑的調速，但是一個可變頻率的電源是很難得到的。

根據圖1—3可以看出，當負載轉矩不變時，改變轉子電阻 r_2 就可得到不同的 s ，即得到不同的轉速，這種調速也是很平滑的，但是只有在滑環式感應電動機中才能應用，因為 $M = K \phi I_2 \cos \varphi_2$ ，所以轉子允許的電流一定時，其允許轉矩也一定，這種調速是轉矩不變的調速。

在金屬切削機床上最常使用的方法是改變極對數 p ，可用兩種方法達到改變 p 的目的，一種是定子只有一套繞組，但其連接方法可以改變，另一種是定子有兩套繞組，兩者的極對數不同。

圖1—4示定子有一套繞組時的連接情形。(a)是屬於同一相的繞組串聯，而三相接成 Δ ；(b)是屬於同一相的繞組並聯，而

三相接成 Y ；(c)串聯時是4極，而並聯時是二極。這樣調速時速度的變化很大，一個是另一個的二倍（因為極數的改變是成倍數的）而且這樣改變時，兩種速度下，電動機的功率不同，若串連時每相允

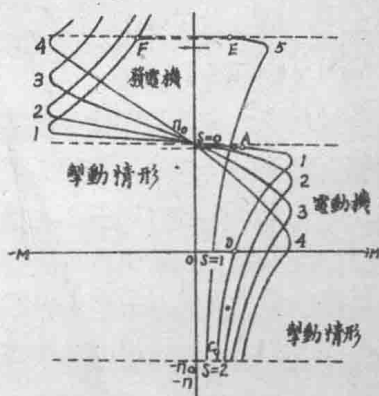


圖 1—3

許的電流為 $I_{\phi II}$ ，則並聯時每相電流為 $2I_{\phi II}$ 串聯 Δ 接時的每相電壓 $U_{\phi 2} = U_{\Delta}$ ，而並聯 Y 接時的每相電壓 $U_{\phi 2} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}$ ，因為輸出功率

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \phi \gamma$$

所以串聯時

$$P_1 = 3U_{\phi I} I_{\phi I} \cos \phi_1 \gamma_1$$

而並聯時

$$P_2 = 3U_{\phi 2} \times 2I_{\phi I} \cos \phi_2 \gamma_2$$

可近似地認 $\cos \phi_1 \gamma_1 = \cos \phi_2 \gamma_2$

所以

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3U_{\phi I} I_{\phi I} \cos \phi_1 \gamma_1}{3U_{\phi 2} \times 2I_{\phi I} \cos \phi_2 \gamma_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866$$

雖然功率有些改變，但其變化並不大，所以這種調速可認為

是功率不變的調速，金屬切削機床上所需要的調速常是功率不變的，

改變極對數的調速方法只能用於鼠籠式感應電動機。

4. 掣動： 各種掣動的方法已如上述，只有在能得到直流電源的地方才可進行熱能掣動。如果沒有直流電源，一般可採用反接掣動。如果為防止反接時電流太大，可在定子電路中串聯電阻。反接掣動應有自動切斷電路的設備，以保證轉速快降到零時電動機與電源脫離而不致發生反轉。

如果有極數變化的可能時，就可採用反饋掣動，當轉子以高速旋轉時，將定子的連接換成多極的，以使旋轉磁場的轉速低於轉子的轉速而起掣動作用（圖1—3）當然這種掣動只能使轉子的轉速降到某一數值，如果希望繼續降速，則應採用反接掣動等。

5. 其他： 感應電動機就其構造而言可分許多種，如開放式，掩護

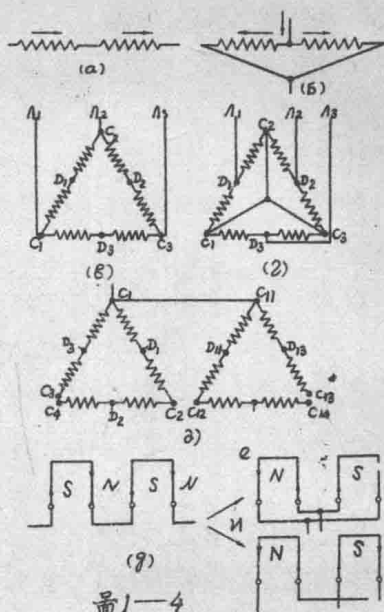


圖1—4

式，全封閉式，管道通風式等。它的具体應用決定于使用地點的情況。在金屬切削機床上最廣泛採用的是有吹風的封閉式電動機。而不用開啟式電動機。因為封閉式電機較為可靠，當然同樣容量，同樣轉速時封閉式的價值與重量都比掩護式者為大。

電動機的尺寸與重量主要是決定于磁通(鐵心的大小)與電流(銅綫的粗細)也就是決定于轉矩。因為功率與轉矩轉速的關係可以下式表示：

$$P_H = \frac{2\pi}{60} n_H M_H \times \frac{1}{1000} = \frac{2\pi}{60} n_H M_H \times 10^{-3} \text{ 千瓦}$$

式中 P_H —— 電動機的額定容量 千瓦

n_H —— 滿載轉速， 轉/分

M_H —— 滿載轉矩， 牛米

所以同樣容量的電動機，若轉速愈高則電動機尺寸與價值就愈小，因此在功率不太大時一般選用1500或3000轉/分的電動機。如果需要轉速低時，可用機械方法，如果功率大時，則用低速的電動機更為經濟。

第1—2節 直流並激電動機的特性

在重型金屬切削機床上常常要使用直流並激電動機，以滿足工作的需要。串激與複激電動機因其特性較軟（即加負載後速度降低的較大）所以不適應于切削機床。

1. 工作情形： 直流並激電機除了可作電動機外，還可作掣動之用。

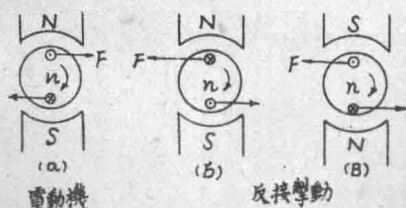


圖 1—5

在電機向某一方向旋轉時，如果把電樞的兩端或磁場的兩端調換，則電樞中的電流和磁場相互作用所生之力矩與旋轉方向相反。其情形如圖1—5(B)與(B)所示，這叫反接掣動。如果電樞轉速很高，我們可把激磁電流加大使反電勢

大于端電壓電樞中的電流改變方向，發生掣動作用，這時電機把運動部份的動能轉換成電能而送回電源，這種掣動法叫反饋掣動。這種掣動只能在速度較高的時候進行，因為磁場不能無限制的增加，所以當速度降到某一程度時，反電勢不再大于端電壓，因此掣動作用即消失。如果要想繼續掣動，則應想別的辦法。

當電動機由于慣性而旋轉時我們可保持磁場仍接入電源，但電樞的兩端脫離電源，並經過電阻後自成通路，這樣電動機就成為他激發電機，電樞中的電流沿其感應電勢的方向流動，于是產生掣動力矩，使電動機很快停止。這種掣動的方法叫耗能掣動。

各種情形的連接電路如圖 1—6 所示。

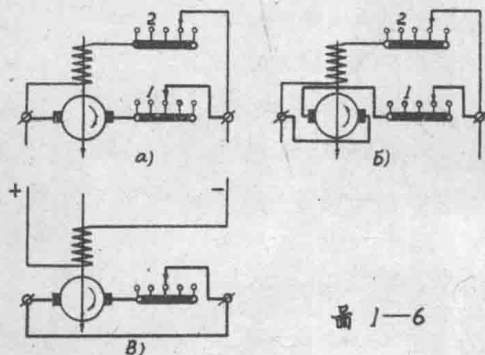


圖 1—6

2. 機械特性： 在電工學中我們已經知道

$$n = \frac{U - I_a R_a}{k_e \Phi} \quad (2)$$

$$M = k_m \Phi I_a \quad (3)$$

把二式合併，則得

$$n = \frac{U}{k_e \Phi} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi^2} M \quad (4)$$

這個式子就是並激電動機的機械特性，當端電壓和並激磁場電路的電

阻不變時，則 U 與 Φ 都是常數所以可寫成

$$n = n_0 - bM$$

式中 $b = \frac{\gamma_a}{k \Phi^2}$ 。 n_0 是理想的無載轉速，由此看出，機械特性是直線的，其斜率的大小，等於 b 。其特性曲線如圖 1—7 所示。

當電樞中沒有外加電阻時，特性曲線如直線 1 所示，這叫自然特性曲線。如果改變電阻器 1 的電阻，則 γ_a 改變，所以直線的斜率改變，如圖中直線 2、3、4 所示，這種特性曲線叫人為的特性曲線。

當 $n > n_0$ 時，由公式中 M 為負值，即電機是在發電情況下工作。

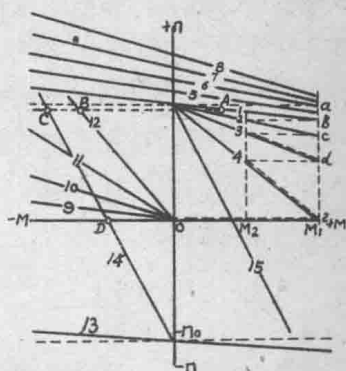


圖 1—7

3. 起動：並激電動機是用電樞串聯電阻的方法起動的，串聯電阻的大小和我們所要求的最大起動轉矩和最小起動轉矩有關。如果希望起動時間短，則起動時的最大轉矩 M_1 應該盡量大即電樞中通過的起動電流要比較更大一些，而最小轉矩 M_2 也不應太小。最大起動轉矩 M_{max} 與額定轉矩 M_H 的比值用 λ 代表，通常 λ 的值在 2 到 2.5 之間即

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_H} = 2 \rightarrow 2.5。$$

可能達到的最大轉矩決定于換向器片與電刷間的火花。

起動的過程如圖 1—7 所示，開始時轉速沿直線 4 而上升，當轉矩降到 M_2 時，改變電阻，使由 d 點開始沿 3 上升，而後沿 2 沿 1 達到最後的工作點 A。起動時所加之附加電阻的大小可以一一求得。

4. 轉速的調節：直流並激電動機的優點就是便于調速。它的轉速已如公式 2 所示。所以調速的方法有三：一是改變電樞中的串聯電阻，二是改變 Φ ，三是改變端電壓 U ，

改變 Y_R 可以得到平滑的轉矩不變的調速，這種方法只能減低轉速，而且因為電樞中串聯有電阻，所以損失功率很大。

改變磁場中的串聯電阻可以改變 Φ ，因而使轉速改變，電阻愈大時，轉速愈大，如圖 1—7 中的直線 5, 6, 7, 8 所示。這樣調速後得到的特性是硬性的，而且是功率不變的調速（因為 Φ 小時 n 大而 M 小了）。這樣的調速方法可以得到平滑的調速，而且能量損失很少，但是當磁通減少後，電機的穩定性下降（即負載有變動時轉速變動較大），因此調速範圍一般限制在

$$\frac{n_{\text{最大}}}{n_{\text{最小}}} = 3:1 \text{ 到 } 4:1.$$

直流電機的價格比感應電機約貴兩倍，而且效率較低，維護麻煩，但是所以在機床上有時仍採用它，就是因為利用它可得到平滑而經濟的調速，

改變電壓的調速方法將在下邊討論。

5. 掣動：常用的掣動方法已如上述，耗能掣動時改變電樞電路中的電阻，即可得到不同的掣動力矩，而且力矩隨轉速的降低而減小，如圖 1—7 中直線 9, 10, 11, 12 所示。由公式 4 也可得出同樣的結果，這時 $U=0$ ，所以

$$n = -bM = -\frac{Y_R}{k_e k_\Phi \Phi^2} M,$$

當 n 相等時， Y_R 愈大則掣動力矩 M 愈小；若 Y_R 一定，則 $M \propto n$ 。

如果需要在最短時間內將機器停止，則 Y_R 愈小愈好，但是要特別注意，電樞電路中一定要串聯電阻，否則 Y_R 太小，因此開始掣動時 I_R 太大， M 太大，在換向器片上發生火花並使機械方面受到損害，掣動

時電樞中應串聯多少電阻？可根據允許的最大電流和當時的反電勢而定，反電勢

$$E = U - I R_{\Sigma}$$

則擊動時電路中的電阻

$$R_{\Sigma} = \frac{E}{I_{\text{允許}}}$$

圖1—7中直線13、14是電動機在相反方向運轉時的特性曲線，13是自然特性曲線，14是電樞中加電阻後的特性曲線。我們作反接擊動時可利用直線14，即反接擊動時電樞中一定要串聯電阻，否則電流太大，開始擊動時工作點由A移到C而後沿14下降，待降到D以前就應將電樞電路斷開，以防反轉。

第1—3節：利用改變電壓而進行調速

1. F-Π系統：

有時候為獲得平滑而範圍較大的調速我們採用發電機與電動機系統（簡稱F-Π系統）這種系統的電路連接如圖1—8所示。

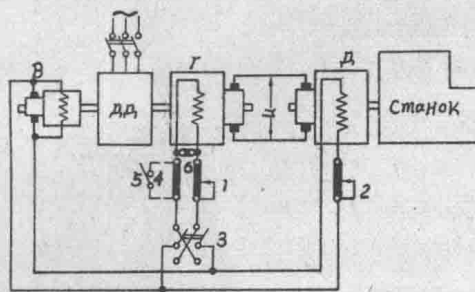


圖 1—8

圖中AΠ——三相感應電動機，

B——激磁機，供給直流發電機與電動機的磁場電流。

Γ——他激直流發電機，

Π——他激直流電動機，

AΠ、B、Γ裝在同一軸上，由AΠ拖着轉動，Γ所發出來的電供給Π。

凸拖着機床旋轉。如果凸的激磁保持不變，而改變 Γ 的激磁，則 U 的大小就隨 Γ 的激磁而變化。根據公式(2)可知 U 改變後，電動機的轉速即可改變。因為 Γ 的激磁可任意改變，所以調速的範圍可以很大，一般限制在5:1的範圍之內。

在這種系統中凸的起動已不再用電樞中串聯電阻的方法，而是用改變 Γ 的激磁，即改變 U 的方法，這就使起動時的功率損耗減小。如果倒換二投開關3，可改變電動機的旋轉方向。

這種系統也可以用來製動，加大凸的激磁而減少 Γ 的激磁就把凸變成了發電機而 Γ 變成電動機，使 $A\Gamma$ 超過同步速而將電能送回電源。

這種系統的設備費較貴，價值約為同容量鼠籠式感應電動機的7—8倍。因為電機較多，所以效率較低，額定功率為4到40 十瓦時效率約為60—65%。若容量再小則效率更低。

雖然有上述缺點，但是在重型切削機床（如龍門鉋）上仍然採用這種系統，以期得到很好的工作性能。在重型機床上電機約佔總價值的30%，所以就電機本身說來費用增加了許多，但就總的看來費用增加不大，然而却得到了良好的工作性能。

如果以所需要的功率容量為100%，則各電動機的容量是

$$\Gamma - 100\% ; \Gamma - \frac{100}{\gamma_A} \% ; B - 8\% ; A\Gamma - \left(\frac{100}{\gamma_A \gamma_B} \% + \frac{8}{\gamma_B} \% \right),$$

2. 交磁電磁放大機：

Γ —凸系統的調速範圍有一定的限制，主要因為速度範圍變化太大時，其特性將不穩定。例如在改變端電壓調速的情況下，端電壓已很低時，而電樞電阻不變，所以當負載變動時（即 I_a 變動時）則 $U - I_a \gamma_a$ 的變化很大，即轉速變化很大，然而切削機床上所需要的特性是轉速保持不變，這樣便不能很好地滿足要求。為了擴大調速範圍，而且得到穩定的運行特性，就要有其他的設備，常用的有交磁電磁放大機和自激電磁放大機。

交磁放大機（ $\Sigma M \gamma$ ）是具有幾個激磁繞組和二對電刷的直流電機

(圖1—9)，它由交流電動機AP拖着旋轉，當有電流 i_1 通入第一個激磁繞組時，就產生磁通 ϕ_1 ，電樞的導體切割 ϕ_1 就產生感應電勢，所以在與 ϕ_1 垂直放着的電刷 $a\delta$ 間就有電勢產生。我們把 $a\delta$ 用導線直接連起來，電樞內就有電流通過，由於電樞反應的結果，產生一很強的磁通 ϕ_2 ，與 ϕ_1 相垂直，電樞的導體切割 ϕ_2 於是產生較大的電勢（因為 $\phi_2 > \phi_1$ ），所以與 ϕ_2 垂直放置的電刷 $B\Gamma$ 之間出現了電壓，所以可由 $B\Gamma$ 引出導線而供給負載。

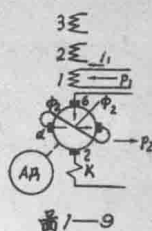


圖1—9

輸入功率 $P_1 = U_1 i_1$ ，而輸出功率 $P_2 = U_B i_2$ ，兩者的比值 $\frac{P_2}{P_1}$ 叫作 ΣMY 的放大係數，可以大達10000，功率是由AP供給的，所以當輸入電流 i_1 或磁通 ϕ_1 有變化時，就會大大影响到輸出電壓和 ϕ_2 ，為了補償由於電樞反應對 ϕ_1 所造成的影响，所以加一補償繞組K，

產生磁通 ϕ_1 的各個繞組1、2、3.可以用輸出的電流或電壓加以控制，從而控制輸出功率。

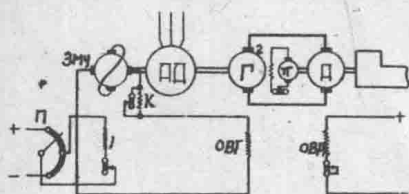


圖1—10

圖1—10是應用交磁 ΣMY 使 $\Gamma-\Delta$ 系統調速範圍擴大的實際情形， ΣMY 是供給發電機 Γ 的激磁繞組的小發電機。 ΣMY 的激磁繞組1是由直流分壓器供電的；而第二個激磁繞組是由轉速發電機 $\Gamma\Gamma$ 供電的。

$\Gamma\Gamma$ 是一個永久磁鐵作為磁極的發電機，它和電動機 Δ 連在同一軸上，所以它兩端電壓的高低與 Δ 的轉速成正比。因此繞組2內電流的大小與 Δ 的轉速成正比。

繞組2的磁勢（ $W_2 I_2$ ）比繞組1的（ $W_1 I_1$ ）小，而且兩者的方向相反。所以當 Δ 的轉速減小時， I_2 也減小，於是 ϕ_1 加大， ΣMY 的輸

當電壓升高，發電機激磁繞組 OB 中的電流加大，這就使 Γ 的電壓加大，而使 Π 的速度升高。

當 Π 的轉速加大時，情形與此相反，所以應用 $\Sigma M Y$ 後，就可自動地保持電動機 Π 的轉速是某一個恒定數值，而不隨負載改變。

電動機 Π 的激磁繞組是由另外的直流電源供給的。

調節繞組 1 中的電流和與繞組 2 串聯的電阻可以調節電動機 Π 的轉速。

這種調速系統和改變電動機的 Φ 的方法一同使用時，可使調速範圍大大增加，可達 $400:1$, $600:1$, $1000:1$ 或更大。

蘇聯出品的交磁放大機普通有四個激磁繞組，功率最大到 8 千瓦，3000 轉/分，一般的容量都比 8 千瓦要小些，而個別的地方有大的。

3. 自激電磁放大機是一個容量很小而有四個激磁繞組的直流發電機（圖 1—11a）其中 1、2、3 三個激磁繞組產生的磁勢方向相同，而激磁繞組 4 所產生的磁勢與它們相反。放大機是電感應電動機拖着旋轉的。

圖 1—11b 是 $\Sigma M Y$ 用于 Γ — Π 系統中的電路圖，激磁機 B ，發電機 Γ 和放大機 P 由同一個電動機 A 拖動。發電機的激磁繞組分為相等的兩半

各自與 P 的激磁繞組 1、2 相串聯，並與 R_1 , R_2 及 P 作成電橋，由 B 供電。 P 的激磁繞組 3 與電動機電樞串聯，而繞組 4 跨接在 Γ 的兩端。

調整 $R_1 R_2$ 等使電橋達到平衡，即 $R_1 R_2 = (Y_1 + Y_{1r})(Y_2 + Y_{2r})$ (其中 $Y_1, Y_2, Y_{1r},$

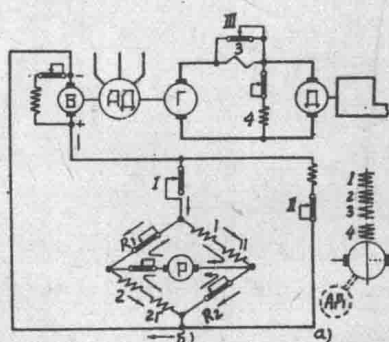


圖 1—11

Y_2r 分別為繞組 1、2、1f、2f 的電阻)，此後再調可變電阻 I 時並不改變這種平衡狀態，而只改變繞組中所通過的電流。即發電機的電壓。

當電動機無載時，調整繞組 4 的串聯電阻，使 4 產生的磁勢與 1、2、3 產生的磁勢完全抵消，所以 P 的兩端沒有電壓，因此 P 的電樞中沒有電流通過。

若電動機的負載增加了，則繞組 3 的磁勢加大，所以 P 的磁勢不再平衡于是產生電勢，推動電流流經繞組 1、2、1f、2f，使發電機的電勢加大，使電動機的轉速加大，適當地調整可變電阻 III 後可以使電動機的轉速自動地保持不變。

如果想使發電機的電壓降到很低，這時可加大 I ，但到一定程度時，雖然 1f、2f 中的電流減小了，但由于餘磁的關係發電機的電壓仍不很低，這時繞組 4 中的電流就比較大，它生之磁勢比 1、2、3 所生者還大，于是 P 產生與原先相反的電勢，推動一相反電流，以抵消 r 的餘磁，而使電壓降到所要求的數值。

這種調速的準確度為 2—3%，調速範圍是 $1:30-1:40$ ，

第二章 拖動中力學平衡方程式的介紹，電動機的功率選擇，速度的調節

第2—1節 拖動中力學平衡方程式：我們應用電動機來拖動切削機床，免不了要進行起動與停車，在生產率不斷提高的今天，起動時間與停車時間的長短我們都應仔細考慮，因為它能直接影響我們的生產率。在這一節中我們只介紹一些拖動中力學平衡的概念，和各部份慣量，摩擦等對起動與停車時間的影響，而並不去詳細計算。

在電機拖動的系統中，最根本的轉矩平衡方程式是

$$M_a = M_c + M_J = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-1)$$

式中 M_a ——電動機所產生的轉矩，

M_c ——阻力轉矩，包括各種摩擦，和機床工作時所產生的反抗轉矩。

M_J ——慣性轉矩，可寫成 $M_J = J \frac{d\omega}{dt}$ ，這是由於各運動部份有速度變化時，其本身所儲動能的變化而引起。

ω ——旋轉速度。

J ——各運動部份的轉動慣量。

由(2-1)式可以看出，如果電動機所生轉矩 M_a 比阻力轉矩大時，則 $\frac{d\omega}{dt}$ 是正，那麼整個系統就加速；若 $M_a < M_c$ 時，則 $\frac{d\omega}{dt}$ 是負，整個運動系統即減速，若 $M_a = M_c$ ，則 $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，即速度不變，是為穩定運行。

根據(2-1)我們就可求出起動或停車時所需要的時間，即

$$dt = \frac{J d\omega}{M_a - M_c}$$

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{M_a - M_c} \quad (2-2)$$

如果 J ， M_a 與 M_c 都和轉速沒有關係時，則時間很易求得。但事實上 M_a 與 M_c 都是 ω 的函數，所以要準確的計算 t 必須進行複雜的計算。

機床通常是在無載情形下起動，因此 M_c 是只包括各部分摩擦阻力所產生的反抗轉矩，因此 M_c 的大小與設備的性質（傳動情形），潤滑油的質量，運動部分的溫度等有關。摩擦力愈小則起動時間愈短。如果加大 M_2 也可縮短起動時間。常常起動的龍門鉋和各種作短暫週期工作的機床都力求縮短起動時間。

如果讓機器自然停車，即把電動機與電源斷開（即 $M_2=0$ ），而只靠阻力轉矩使之停車。那麼停車時間

$$t_T = \int_{\omega_1}^0 \frac{J d\omega}{-M_c}$$

如果機器的慣性很大，停車的時間太長（大於8秒），那就要利用各種製動方法，迫使它很快停車。因為在製動時電動機所產生的轉矩與旋轉方向相反，所以其值為負，用 M_T 代表之。這時停車時間將是

$$t_T = \int_{\omega_1}^0 \frac{J d\omega}{-(M_T + M_c)}$$

M_T 愈大則 t_T 愈小。

在公式（2-2）中除了 M_2 與 M_c 影響起動或停止時間外， J 也很重要。 J 包括各運動部分的轉動慣量，由於轉動慣量所產生的轉矩與其轉速有關，所以計算時應將各部分的 J 歸化到電動機轉子上，求得歸化為轉子速度時的總轉動慣量。在普通機床上因為各運動部分的速度比電動機的低速度很多，所以總的 J 仍以電動機轉子的轉動慣量為主。但是在高速切削機床上，主軸的轉速與電動機轉速差不多，所以總的 J 就會很大。可能比電動機轉子的轉動慣量大15—20倍。這就會大大影響起動或停車時間。

一個運動系統的轉動慣量的計算是以整個系統所儲動能為依據的。如果有一運動系統如圖2-0所示，質量為 m 的直線運動部份的速度是 v ；中間傳動機構的轉速是 ω_1 ，轉動慣量是 J_1 ；電動機的轉速是 ω_2 ，轉動慣量（包括齒輪在內）是 J_2 ，設直線運動部分歸化于 ω_2 時的轉動慣量是 J_2' ；而傳動部分的是 J_1' ，總的是 J ，則