

車間電力設備

(自動電力拖动部分)

北京鋼鐵工業學院

電工教研組編

1959.9

目 錄

第一章 電動機的機械特性和轉速調節

§1-1 概述	1.
§1-2 並激電動機的機械特性和啓動	2.
§1-3 直流並激電動機的制動	7.
§1-4 直流並激電動機的轉速調節	16.
§1-5 發電機—電動機組拖動的研充	20.
§1-6 串激電動機的機械特性	26.
§1-7 直流串激電動機的制動	29.
§1-8 直流串激電動機的調速	35.
§1-9 直流複激電動機的特性和調速	41.
§1-10 感應電動機的機械特性	42.
§1-11 感應電動機的制動	47.
§1-12 感應電動機的速度調節	54.

第二章 電力拖動的動力學

§2-1 電力拖動的運動方程式	64.
§2-2 轉動體的飛輪慣量	65.
§2-3 電動機的起動和制動時間	66.
§2-4 阻力矩和飛輪慣量的換算	67.

第三章 電動機的功率選擇

§3-1 概述	70.
§3-2 電動機的發熱和冷卻	72.
§3-3 電動機的運行方式	77.

§3-4 连续运用电动机的容量选择	78
§3-5 短时运用电动机的容量选择	81
§3-6 断续运用电动机的功率选择	82
§3-7 环境温度非标准温度时电动机容量的近似求法	85

第一章 電動機的機械特性和轉速調節

§1-1 概述

首先來看什麼是機械特性，從電工學中知，電動機的機械特性就是它的轉速 n 對轉矩 M 的關係， $n = f(M)$ 。

電動機的機械特性，一方面決定於電動機本身的机电性能，另一方面決定於接入電動機電路中的電阻的大小及其聯結方法。

機械特性有自然特性和人為特性之分。在電動機電路中沒有附加電阻的條件下而接入額定電源時，所得到的特性叫自然機械特性，譬如直流並激電動機的自然機械特性是在電樞電路中沒有附加電阻而電壓和磁通都是額定值時得到的。

如電動機電樞電路中有附加電阻，或將電機接到不同於額定值的電源上時，所得到的特性是為機械特性。

由電工學中知，機械特性因電機不同而異，某些電動機的轉速隨負載力矩的變化而變化甚大，而另外一些電機，當負載力矩變化時它的轉速 n 變化很小或甚至不變。一般我們就按電動機的轉速隨負載的增加而變化的程度來劃分機械特性的種類，用“硬度”來表示 n 隨 M 的變化程度。機械特性的硬度為

$$\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n}$$

根據硬度的不同，機械特性可分下列三類：

(1) 絕對硬度——轉速嚴格恒定，不隨負載轉矩的變化而改變。如同步電動機的機械特性（圖 1-0 曲線 a ）。

$$\text{此時 } \alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n} = \infty$$

(2) 硬特性——負載轉矩增加時，電動機的轉速下降不多，它的硬度 $\alpha = 40-10$ 。屬於這一類的電機有直流他激電動機的特性和异步機特性的直線部分，如圖 1-0 的 b 和 c 。

(3) 軟特性——負載轉矩變化時，其轉速降較大，其硬度為 $\alpha \leq 10$ 。直流串激電動機的特性便屬於這一類，如圖 1-0 曲線 d 。

知道了什麼是機械特性之後，便來討論為何要研究機械特性。電動機是用來拖动工作機的，每一種工作機對電機都有一定的要求，譬如軋制鋼帶的連軋機，和 T-A 機組的原動機，當負載變化時，其轉速應變化甚小。因此，拖动這種負載的電動機要求有很硬的特性。反之，如起重機等，它的負載增加時，要求速度下降較多，這就要求電動機有軟的特性。此外，有的負載不需要改變速度，如鼓風機和水泵等，我們可以選用不能調速或調速性能不好的電動機。另外一些對調速要求嚴格的負載，則應選用調速性能好的直流電動機。只有研究了電動機的機械特性之後，才能知道

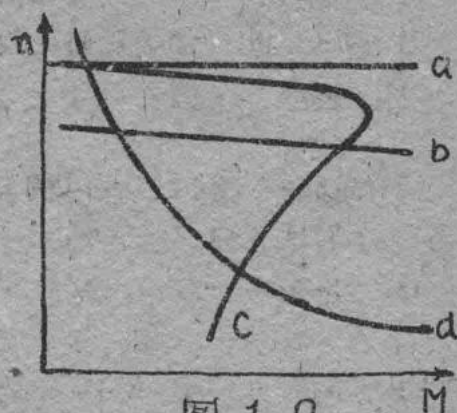


圖 1-0

那种电机的机械特性硬，那些调速性能好，才能正确的为负载选择电机。

此外，只有知道了电机的机械特性之后，才能正确的选择电阻，使电动机在启动和制动过程中符合生产的要求，由此看来，研究电动机的机械特性成为首先的任务。

最后，我们谈一下研究调速的必要和调速的指标。何谓调速，就是随着工作机的需要人为的改变电动机的速度。注意：不要把调速的概念和固有的转速变化混为一谈。固有的转速变化是由于电机轴上负载改变时，电机转速随负载的变化而自然的变化，而调速则是人为的对电机施加某种作用，使其转速发生变化，如改变直流电动机的端电压或励磁回路的电流等。在调速时，不论负载变与不变，转速都可根据工作机的要求而变化。

那末，为什么要调速呢？这完全是由于适应生产上的需要，譬如吊车和炉上的拨扬，在停车前速度应降低，以免发生振动并能准确的在要停车的地方停止。但在运行中速度却应较大，以提高生产率。又如轧钢机，压制的速度太低会降低生产率，速度太高又会影响产品的质量，甚至出产废品，因为速度太快使金属来不及填满轧辊的型孔。

在调速时，为了评价电动机调速性能的好坏，一般定有下述指标：

(1) 调速范围——决定于在拖动工作中所能获得的最大转速与最低转速之比，即

$$K = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

(2) 调速的平滑性——以调节时两相邻速度之比来说明。从一个转速过渡到最近的另一个转速，转速跌落愈小，则平滑性愈高。

(3) 经济性——在电阻器内或其他调速设备中的损失愈小，则调节的经济性愈好。

(4) 稳定性——以在给定负载转矩偏差下的转速比代表之。它与机械特性有关，特性曲线的硬度愈大，则工作的稳定性愈高。

(5) 速度调节的方向——即是由电动机的基本转速向上调或向下调，如直流机的基本转速是指电动机在额定电压，额定磁通，且在电枢电路中没有任何附加电阻时的转速。

如果电动机的基本转速为1500转/分，则自1500转/分调到1600转/分为向上调；反之，为向下调。

31-2 并激电动机的机械特性和启动。

1. 机械特性曲线：并激电动机的接线图如图1-1所示。

由电工学中知，在这样的接线中，电动机的电压方程为： $U = E + I_a R_a$ 。

$$\text{但 } E = K_e \Phi n$$

$$\text{故 } n = \frac{U - I_a R_a}{K_e \Phi} \quad \text{--- 1-1}$$

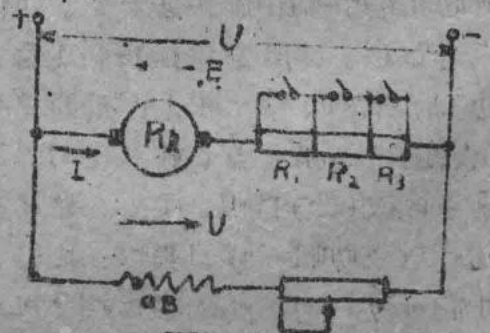


图1-1

因電動機的力矩公式為

$$M = K_M \Phi I \quad \text{-----1-2}$$

將1-2中的 I 代入式1-1中，得

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M \quad \text{-----1-3}$$

式中：

M —— 電動機產生的電磁轉矩；(牛克米)

Φ —— 電動機的磁通；(韋伯)

I —— 電動機的電樞電流；(安)

n —— 電動機的轉速；(轉/分)

U —— 電動機的電壓；

$\Sigma R = R_R + R_1 + R_2 + R_3$ —— 電動机电樞電路的總電阻；

$$K_M = \frac{PN}{9.81 \times 2\pi a} \quad \text{--- 常數；}$$

$$K_e = \frac{PN}{60a} \quad \text{--- 常數。}$$

在並激電動機中，如不考慮電樞反應，可以近似的認為 Φ 是不變的。這時，如保持電壓 U 和電樞電阻 ΣR 不變，則電動機的轉速與轉矩成直線關係，轉矩增加時，轉速下降。如設電動機的電樞電路中沒有接入附加電阻，即 $\Sigma R = R_R$ ，則此時式1-3變為

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_R}{K_e K_M \Phi^2} M$$

據此畫出的曲線為自然機械特性曲線，如圖1-2中的①。

如電樞電路中接有電阻 R_1 ， $R_1 + R_2$ ，或 $R_1 + R_2 + R_3$ 時，則據式1-3可得另外三條不同的機械特性曲線。根據§1-1所述，這些曲線叫作人為機械特性曲線，如圖1-2中的曲線②、③、④所示。

由圖可以看出：

① 所有曲線都在縱坐標上交於一點，這就叫理想零載轉速，用 n_0 表示。實際上，在式1-3中，如設 $M = 0$ 時， $n = n_0 = \frac{U}{K_e \Phi}$ ，或 $U = K_e \Phi n_0$ 。

這就是說，所謂理想零載轉速，是轉矩為零時的轉速，此時， $K_e \Phi n_0 = E = U$ 。

故
$$I = \frac{U - E}{\Sigma R} = 0$$

因而
$$M = K_M \Phi I = 0$$

但電動機的電磁轉矩 $M = M_{\text{負載}} + M_{\text{風阻}}$ 。

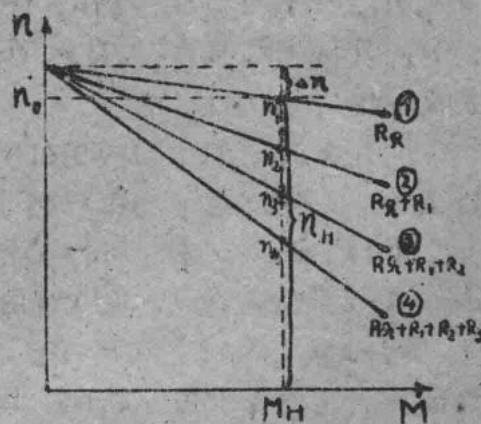


圖1-2

M_K ——使轉的力矩；

M_{fr} ——摩擦和風阻的力矩。

因此，終端使轉力矩 $M_{fr} = 0$ ，電動機即要克服風阻和摩擦的力矩，而這些力矩是不易於變的，因而電動機的轉速不會達到 n_0 ，故我們說電動機使轉力矩： $M = 0$ 時的轉速 n_0 是理想空載轉速。

②在電樞電路中的電阻 ΣR 愈大，電動機的機械特性愈軟，這就是說，用某一較大樞路電阻（如 $R_a + R_1 + R_2$ ）畫出的機械特性曲線比用較小的樞路電阻（如用： $R_a + R_1$ ）所畫的特性曲線較軟。

實際上，在式 $n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{\Sigma R}{K_e K_m \Phi^2} M$ 中，

$\frac{U}{K_e \Phi} = n_0$ 。在 U 和 Φ 不變的情況下， n_0 不變。同時，為了清楚起見，我們令：

$\frac{\Sigma R}{K_e K_m \Phi^2} M = \Delta n$ ，於是，上式可以寫成 $n = n_0 - \Delta n$ ，——1-4

由式1-4可以清楚的看出，在其它不變時，如 ΣR 增加（ M 不變），則 Δn 增加，這使 $n = n_0 - \Delta n$ 變小，設自圖1-2中的 n_2 降到 n_3 ，但 n_0 並未變，因此樞路電阻愈大，人為機械特性愈軟。据此，我們可以用改變樞路電阻的方法來改變人為機械特性的硬度，又因為在同一轉矩下， ΣR 太時， n 小，如圖1-2中， $\Sigma R = R_a$ 時，其轉速為 $n_1 = n_0$ ，但當 ΣR 增到 $R_a + R_1$ ， $R_a + R_1 + R_2$ 和 $R_a + R_1 + R_2 + R_3$ 時，其轉速依次減為 n_2 ， n_3 和 n_4 ，且 $n_4 < n_3 < n_2 < n_1$ ，因此，在外後我們可以利用改變樞路電阻的方法調速。

因為直流並激電動機的機械特性是直線，故畫曲線時，找出兩點即可，一般先找出 n_0 ，其他一點可用電動機未動（ $n = 0$ ）時的轉矩 M_K ，因電動機的電流 $I = \frac{U - E}{\Sigma R}$ ，當 $n = 0$ 時， $E = 0$ ，故 $n = 0$ 時的電流 $I_K = \frac{U}{\Sigma R}$ ，從而 $M_K = K_m \Phi I_K$ ，有此兩點，即可畫出機械特性曲線，如圖1-3所示。

因 n_0 很小，故當 $\Sigma R = R_a$ 時， I_K 和 M_K 很大，這是電機所不許的，因此，在啟動時電動機電樞電路內應加入電阻。

2. 直流並激電動機的啟動。

如上所述，電動機直接啟動的電流很大，因此，為了把啟動電流減小到任意規定值，需把附加電阻與電樞串聯，此電阻叫啟動電阻，用 R_{st} 表示，此時

$$I_K = \frac{U}{R_a + R_{st}}$$

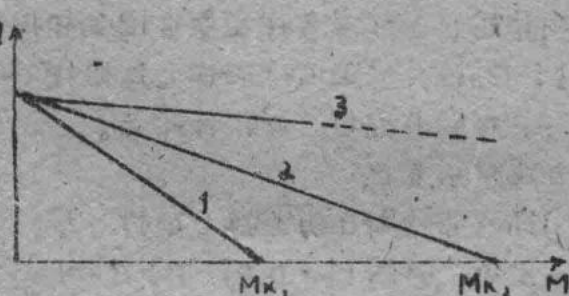


圖1-3。

今討論如圖1-4所示的三級啟動過程如下：當啟動時，全部電阻都接在電樞電

路內，此時 $R_5 = R_0 + r_1 + r_2 + r_3$ 。故電流 $I_1 = \frac{U}{R_0 + r_1 + r_2 + r_3} = \frac{U}{R_3}$ 。當 n 增

加時， E 增加，於是 $I = \frac{U-E}{R_3}$ 減少，

相應的 M 也減少。這時， I 或 n 按特性曲線①變化（即按電樞電路中具有 $R_0 + r_1 + r_2 + r_3$ 的特性變化），如果逐次切除電阻，則速度升到 2' 時即作勻速運轉（設負載力矩為 M_H ，相應電流為 I_H ），但一般為了使電動機起動快些，當转速升到 n_1 時（見 2 處），即 $E = E_1$ ， $I_2 = \frac{U-E_1}{R_0 + r_1 + r_2 + r_3}$ 時，

使 P_1 閉合，短接電阻 r_3 ，此時，電流和轉矩又增加，而切除的 r_3 的數值，要恰使電流升到 I_1 （見 3 處），即 $I_1 = \frac{U-E_1}{R_0 + r_1 + r_2} = \frac{U-E_1}{R_2}$ 。

之後， n 又升高，電動機的電勢也自 E_1 上升，於是 I 又減少（按曲線①），當 n 自 3 升到 4 時（ $n = n_2$ ），令 P_2 切除 r_2 ，又使電流升到 I_1 ，依此類推，最後，將所有附加電阻都切除，於是，转速按自然機械特性曲線①上升到 8' 作穩定運轉。

I_1 （或 M_1 ）稱為最大電流（或轉矩），一般 $I_1 = 1.8 \sim 2.5 I_H$ （或 $M_1 = 1.8 \sim 2.5 M_H$ ）， I_2 稱為切換電流，一般 $I_2 = 1.1 \sim 1.2 I_H$ （或 $M_2 = 1.1 \sim 1.5 M_H$ ）。

由上述可知，在起動時，我們要將起動電流限制在最大值 I_1 和最小值 I_2 之間，這就要正確的選擇起動電阻，今討論如下：

為了正確的確定起動電阻，應先求出電樞電阻 R_0 ，一般在並激機中，我們可根據方程 1-5 確定 R_0 ：

$$R_0 = 0.5 (1 - \eta_n) R_H \quad \text{--- 1-5}$$

式中： η_n ——額定負載時電動機的效率，

$R_H = \frac{U_H}{I_H}$ ——電機的額定電阻。這 R 代表一種概念，實際電阻並不是這大。

U_H 和 I_H ，為額定電壓和電流。

現在求各段的起動電阻。

如圖 1-5 所示，當起動時 $n=0$ ，因此要電流為 I_1 （ $I_1 = 1.8 \sim 2.5 I_H$ ），則此時的全部電阻可求如下（如圖 1-4）：

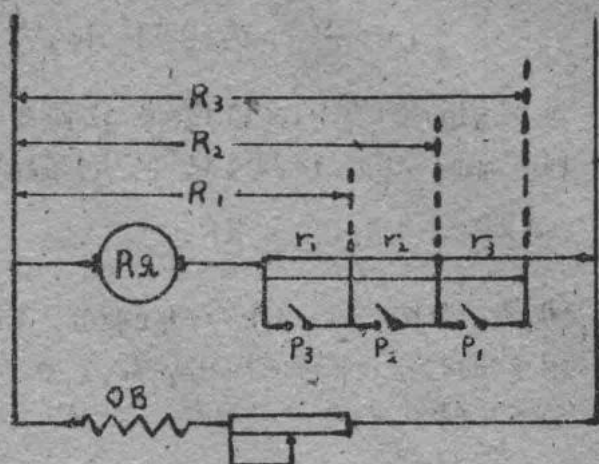


圖 1-4

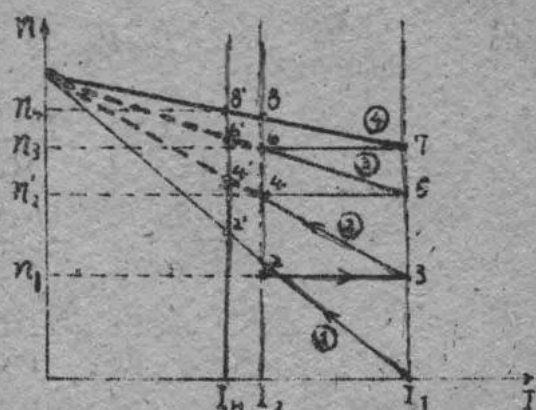


圖 1-5

$$I_1 = \frac{U}{R_3}, \text{由此可得 } R_3.$$

当转速逐渐升高时, E 增加, I 减少, 当 E 增到 E_1 , I 降到 I_2 , 此时 $I_2 = \frac{U-E_1}{R_3}$.

如在此时合 P_1 , 短接电路 R_3 , 则回路电阻为 R_2 , 但当时 n 和 E_1 未变, 故电流 I_1 为 $I_1 = \frac{U-E_1}{R_2}$, 据此, 可求 R_2 .

同理, 当 n 升到 n_2 时, E 升到 E_2 , 电流降到 I_2 , 而 $I_2 = \frac{U-E_2}{R_2}$, 此时切除电阻 R_2 , 则电枢电路中只有电阻 R_1 , 故 $I_1 = \frac{U-E_2}{R_1}$. n 又升高, 当 n 升到 n_3 时, E 升到 E_3 , 故 I 又降到 I_2 .

即 $I_2 = \frac{U-E_3}{R_1}$. 如在此时切除 R_1 , 则回路中只有电阻 R_a , 因此, I 又升到 I_1 .

而 $I_1 = \frac{U-E_3}{R_a}$. 由上列诸式, 得:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U-E_1}{R_2}}{\frac{U-E_1}{R_3}} = \frac{\frac{U-E_2}{R_1}}{\frac{U-E_2}{R_2}} = \frac{\frac{U-E_3}{R_a}}{\frac{U-E_3}{R_1}}.$$

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a} \quad \text{---1-6.}$$

如使 $\frac{I_1}{I_2} = \lambda$.

则由式1-6得:

$$R_1 = \lambda R_a;$$

$$R_2 = \lambda R_1 = \lambda^2 R_a;$$

$$R_3 = \lambda R_2 = \lambda^3 R_a = \lambda^3 R_a;$$

$$R_m = \lambda^m R_a$$

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = \lambda R_a; \\ R_2 = \lambda R_1 = \lambda^2 R_a; \\ R_3 = \lambda R_2 = \lambda^3 R_a = \lambda^3 R_a; \\ \dots \dots \dots \\ R_m = \lambda^m R_a \end{array} \right\} \text{---1-7.}$$

由上, 我们只要知道 R_a 和确定 λ 后, 即可求出所有电阻. λ 可由1-7求出:

$$\text{即 } \lambda = \sqrt[m]{\frac{R_3}{R_a}}, \text{ 或在一般情况下, } \lambda = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_a}} \quad \text{---1-8.}$$

m —— 起动电阻级数; R_m —— 全部起动电阻.

应该指出, 起动电阻级数愈多, 电动机加速过程就愈平滑. 但是从减少常用电器的数量和投资的观点来看, 最好尽量减少起动级数, 一般可采用2级到4级.

选起动电阻可按下述步骤进行 (以三级起动为例).

先决定 $R_3 = \frac{U}{I_1}$, 和 $R_a = 0.5(1-\eta_m)R_H$, 然后确定起动级数 (此处是3)

級),於是,可以根据式1-8求得 r_1 。 r_1 求出后,即可根据1-7求出所有电阻,至於每一段电阻 r_1 、 r_2 和 r_3 ,很易求出,即:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_2 \\ r_2 &= R_2 - R_1 \\ r_3 &= R_3 - R_2 \end{aligned} \right\} \text{-----1-9.}$$

§1-3 直流並激電動機的制動。

在生产过程中,有时需要拖动系统很快的停止,有时在下降重物时避免速度太高,常使电动机产生一个与转动方向相反的力矩,叫做制动力矩。因此,我们可以这样给制動下定义,即:产生和电动机运转方向相反的力矩或力的过程,叫制動过程简称“制動”。

對於經常起動的設備,制動对提高生产率有极大的影响。而且,對於某些設備未說,制動比起動更为重要。因为,如果起動裝置工作不好,最严重是使机器停頓。但是,如果制動裝置工作不好,在很多情况下就会造成严重事故。如起重機下降重物时制動失靈,則重物迅速下降,不能及时停止,可能造成很严重事故。因此,研究在制動状态时电机的机械特性更有重要意义。

制動可分三类:

1. 动力制動 (能耗制動);
2. 发电制動;
3. 反接制動。

今分別討論如下:

1. 动力制動

(1) 如何实现动力制動:

实现动力制動的方法是在磁場不变的情况下,將电动机自电源上断开,並把电阻接到电枢电路中,如图1-6 A和B所示。

在图1-6 A中,刀闸合向1,1,电动机的电势电流、转矩和转速如图中箭头所示。此时, I 与 U 的方向一致,电机作电动机运转。要想制動时,將 P 自1,1拉开而合向2,2,於是,將制動电阻 R_T 接入电枢电路中。此时,电压 $U=0$,但电机因惯性的关系仍按原方向移动,因电动机的激磁未变,故电机感应电势 E 的方向不变,今 $U=0$,

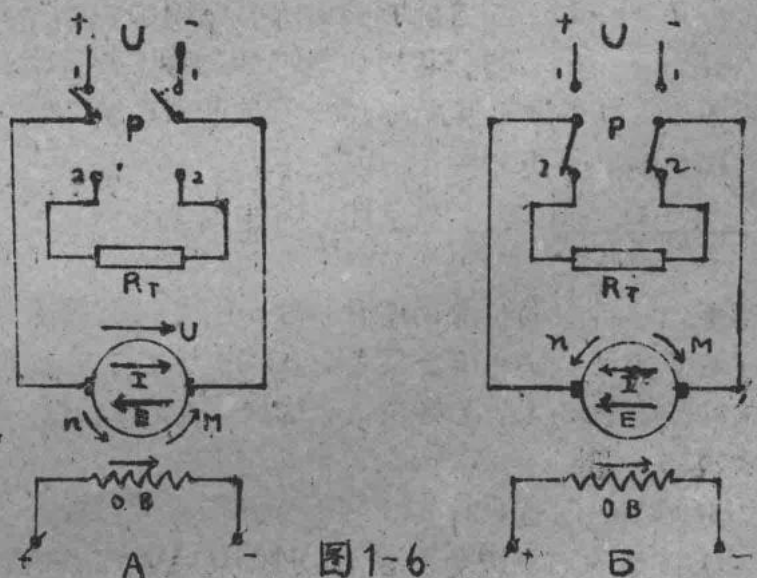


图1-6

故電流的方向與電樞方向相同，即電流的方向改變（圖1-6.5），但電樞的方向不變，故電機產生的力矩方向改變。今 n 的方向不變， M 的方向改變，即 M 與 n 的方向相反，故 M 為制動力矩，此力矩阻止電機轉動，電機很快停止。

此時，電機相當一由“慣性”帶動的發電機，此電機感應電勢 E ，供电給電阻 R_T ，所有電能都消耗在 R_T 中，故也可稱耗制動。

(2) 動力制動時的機械特性

現在，來討論在制動狀態的機械特性曲線。

在制動時，由感應電勢 E 在 R_T 中產生的電流為：

$$I = -\frac{E}{R_a + R_T} = -\frac{K_e \Phi n}{R_a + R_T} \quad 1-10$$

“-”表示電流與電源方向相反。

因 $M = K_M \Phi I$ ，將1-10的 I 代入得

$$M = K_M \Phi \left(-\frac{K_e \Phi n}{R_a + R_T} \right) = -\frac{K_e K_M \Phi^2 n}{R_a + R_T} \quad 1-11$$

由上式可知，因 n 越來越小，故 M 也隨之減小。

$$\text{解1-11得： } n = -\frac{R_a + R_T}{K_e K_M \Phi^2} M \quad 1-12$$

， 從1-11和1-12可以看出，在制動之初，因 n 大故 M 大；隨了 n 的下降， M 也下降，當 $n=0$ 時， $M=0$ ，且在式1-12中， $\frac{R_a + R_T}{K_e K_M \Phi^2}$ 為常數，故 $n = f(M)$ 是一直線方程式，而且，在制動時， M 為負，故 n 應為正，因此，在動力制動狀態，其機械特性在第二象限，如圖1-7所示。

由式1-12還可以看出，在同一制動轉矩 M （如 M_1 ）下，制動電阻 R_T 越大，其轉速 n 應越高。

因此，在不同 R_T 之下，画出不同的特性曲線，如 $R_T = R_{T1}$ 時，所得的特性曲線為曲線①；當 R_T 增到 R_{T2} 、 R_{T3} 時，其特性曲線分別為②和③，如圖1-7所示。其所以如此，是可以理解的，因為制動力矩 $M = K_M \Phi I$ ，而：

$$I = -\frac{E}{R_a + R_T} = -\frac{K_e \Phi n}{R_a + R_T}$$

故要想產生某

一轉矩 M ，即應有某值的電流，今如 R_T 大時，就要有較大的 E ，也就是要有較大的 n 才能產生此值的電流。反之，在同一速度下，即在同一電勢 E 下， R_T 大， I 小， M 小，反之， R_T 小， I 和 M 大，因此，在制動時，適當的選擇 R_T ，即可得到所需要的電流和力矩。

(3) 制動的用途和特點：

從能量消耗的角度來看，這種制動是比較經濟的，因為在制動過程中，只有微

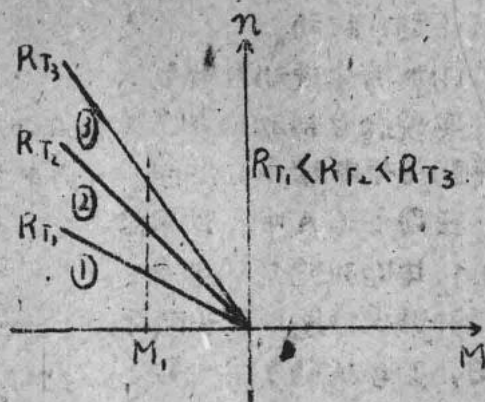


圖1-7.

磁电路自电网中吸取能量，这种制动的特点是可以保证准确的停止，因此，多用于使电机迅速停止，其缺点是速度低时制动力矩太小。

2. 发电制动。

1) 如何实现发电制动。

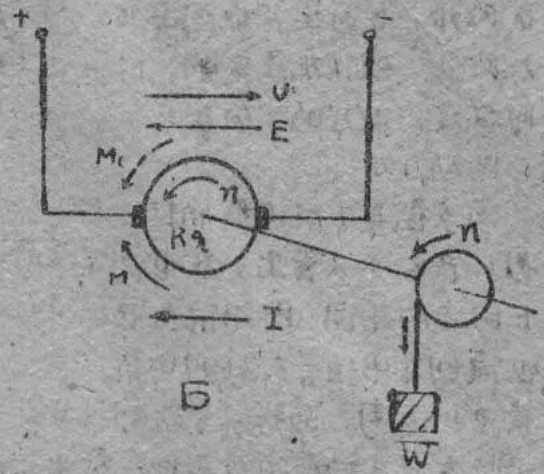
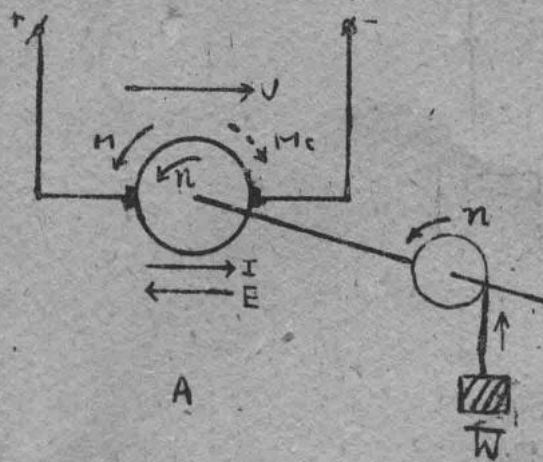


图 1-8

在图 1-8 A 中，为电动机状态，此时，电压 $U < E$ ，电流的方向与 U 同，其大小为

$$I = \frac{U - E}{R_a}$$

力矩 M 与 I 的方向相同，将重物 W 卷上，根据电动机的机械特性曲线可知（图 1-9），当 W 减小时， M_c 减小，于是电动机的转速升高， E 升高， I 减少，当 $W=0$ 时，电动机只要克服摩擦阻转矩即可，这些力矩比 M_H 一般是很小的，因此，电动机的转速接近 n_0 ，此时，如果将 W 的作用力方向改变（图 1-8 B），则由 W 产生的力矩是帮助电动机转动，因此电动机转速又增加，当由 W 产生的力矩恰好抵消摩擦阻转矩时，电动机的转速达到理想空载转速 n_0 ，此时：

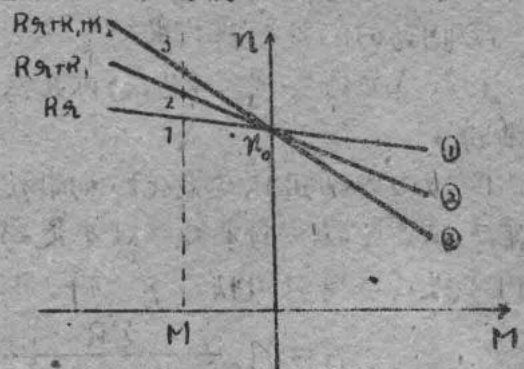


图 1-9

$$E = k_e \Phi n_0 = U, \quad I = \frac{U - E}{R_a} = 0, \quad M = k_m \Phi I = 0.$$

此时， W 的力矩与摩擦阻转矩平衡，故电动机以 n_0 的速度稳定运转，不自电网吸取电能。

现在，如使图 1-8 B 中的 W 增加，转速又会增加，这就使 $n > n_0$ ，因此， $E = k_e \Phi n > k_e \Phi n_0 = U$ ，这样一来，电流将与电动势 E 同方向，即 $I = \frac{U - E}{R_a}$ 为负值，电流改变了方向，但 Φ 并未改变，故根据左手定则， M 也改变了方向， M 与 n 的方向相反，即产生了制动力矩。

在图1-10A中，是表示电动机处于电动状态的情况，此时 $U > E$ ，电流与 U 同方向（ a 向里， b 向外）， M 与 n 同方向，当进入发电制动状态时， $E > U$ ，电流方向改变（ a 向外， b 向里，如图1-10B），于是，根据左手定则， M 方向改变，但 n 的方向未变，故为制动力矩。

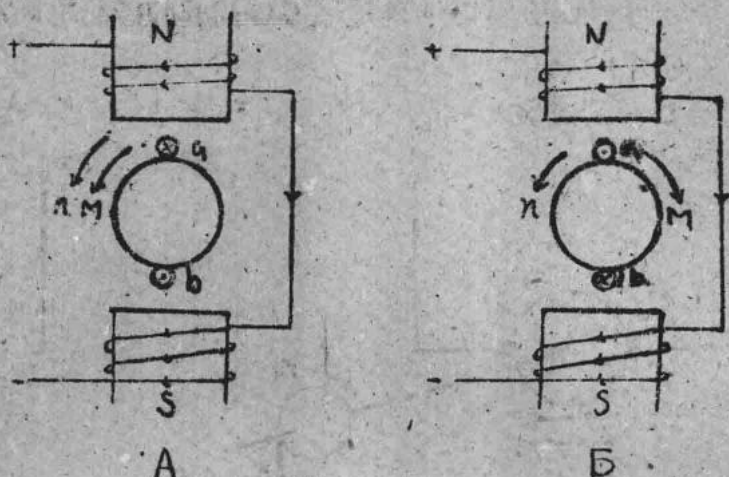


图 1-10

再来看其电能怎样消耗，由图1-8B可以看出，其电流与 E 的方向相同，即电流自低电位流到高电位，故此时电机作发电机运用，而将能量送到

电网中去，由功率的观点也可看出，在作电动机时， $P = UI$ ， U 、 I 均为正， P 为正，是吸收功率。但在发电制动状态时， $P = UI$ ， U 为正， I 为负，故 P 为负。功率为负，故是将功率送入电网，故这种制动叫发电制动。

(2) 制动时的机械特性曲线：

讨论如何实现发电制动以及为何是发电制动之后，再来讨论制动时的机械特性曲线。

因为由电动机状态变化到制动状态并不需要改变电动机与电源联接的方式，也不需要改变电动机的参数，仅仅是对电动机轴偏送了一个补充力矩 W 。所以，机械特性方程式与电动机状态下一样，即

$$n = n_0 - \frac{\Sigma R}{K_e K_m \Phi^2} M$$

在电动机状态时， M 为正。

$$n = n_0 - \frac{\Sigma R}{K_e K_m \Phi^2} M = n_0 - \Delta n$$

此时 $n < n_0$ 。

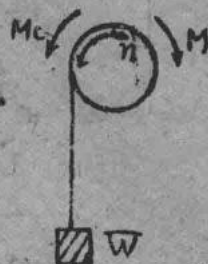
当 $M = 0$ 时， $n = n_0$ 。

当过渡到制动状态时， M 自 $M = 0$ 向“负值”方向增加，因此，如将 M 的负值代入 Δn 中， Δn 将变为负，因此，在制动时 $n = n_0 + \Delta n$ 。即自 $M = 0$ 之后，如 M 向“负值”方向增加时， n 自 n_0 继续增加，因此，在制动时的机械特性曲线相当于电动机特性曲线向第三象限的延长，如图1-9所示，从图可以看出，增加电枢电路的电阻 ΣR ，会加大特性曲线的斜度，所以，当负载电阻大时，如想产生与小电阻时同样的力矩，则其运转应高，这是可以理解的，因为在同一力矩下，即相当于电流不变，今电流

$$I = \frac{U - E}{\Sigma R} = - \frac{E - U}{\Sigma R}$$

故若 I 不變，則 ΣR 增加一定要 E 增加，也就是要 n 增加，也就是說，相路電阻 ΣR 大時，同樣大小的制動力矩發生在轉速較高時。

上述情況也可從物理概念方面加以說明。在捲電制動時，電機的轉動像由外力，例如由重物 W 的下降產生（圖 1-11），若 W 不變時，其使電機轉動的力矩 M_c 也不變，在平衡時電動機的制動力矩 $M = M_c$ ，此時，電動機以高於 n_0 的某轉速穩定運轉（如在圖 1-9 中的 1 處運轉），此時如



將電阻電路內加入電阻 ΣR 增加，則 $I = \frac{E - U}{\Sigma R}$ 減少， M 也相應的

減少，使電機轉動的力矩 M_c 大於電機的制動力矩，因此， n 增加，當 n 增加時， E 增加， I 和 M 也增加，直到電機的制動力矩又與 M_c 相等時，方以一較高的轉速穩定運轉（如圖 1-9 的 2 處或 3 處）。

圖 1-11.

3. 用途和特點

以上，我們談了制動時的機械特性曲線。現在，來看一下這種制動的用途、特點，這種制動多用於起重機下降重物時，如圖 1-11 所示，制動力矩 M 可使重下降不致太快，實際上，如圖 1-9 的特性曲線所示，如果相路電阻很小時，其轉速超過 n_0 不多，但卻可產生相當大的制動力矩，以便使重物下降不致太快。

這種制動的特點是只有在 $n > n_0$ 的情況下才能產生制動力矩，故不像動力制動那樣可使速度下降到零。

此外，這種制動可將電能送回電網，故最為經濟。

3. 反接制動

當把電源的方向反接或負載的力矩超過電機停止時的力矩時，電機產生與轉動方向相反的力矩，實現反接制動。

1. 實現反接制動的方法

實現反接制動的方法有兩種。

第一種是負載力矩大於於電機停止力矩時所實現的制動。

當提升重物時，如電動機的電阻內電阻不大，則作電動機運轉，如圖 1-12A 所示。此時電動機運用於特性曲線①的 A 點，其速度為 n_1 ，但是，如果在電阻電路中接入一很大的電阻 R ，如圖 1-12B 所示，則當電阻接入的瞬間 n 和 E 都未變，故在 $I = \frac{U - E}{\Sigma R}$ 式中，由於 ΣR 的大增，使 I 銳減，以而，電動機的力矩也大減，此時電

機由 A 點過渡到特性曲線②的 B 點，而曲線②是在相路中具有電阻 R 時的機械特性，顯然，此時電動機的力矩 $M < M_c$ ，電動機的轉速按曲線②下降，同時，電動機力矩也上升，當轉速降到零時（圖 B 中的 B 點），力矩 OB 仍小於 M_c ，於是重物 W 拖動電機向相反方向轉動，這就產生了制動力矩，當電機向反方向的速度增加時，電動機的力矩也按曲線②增加。當速度增到 C 點時，電動機力矩和負載力矩相等，則由電動機在 C 點穩定運轉，其速度為 $-n_2$ （圖 1-12B）。

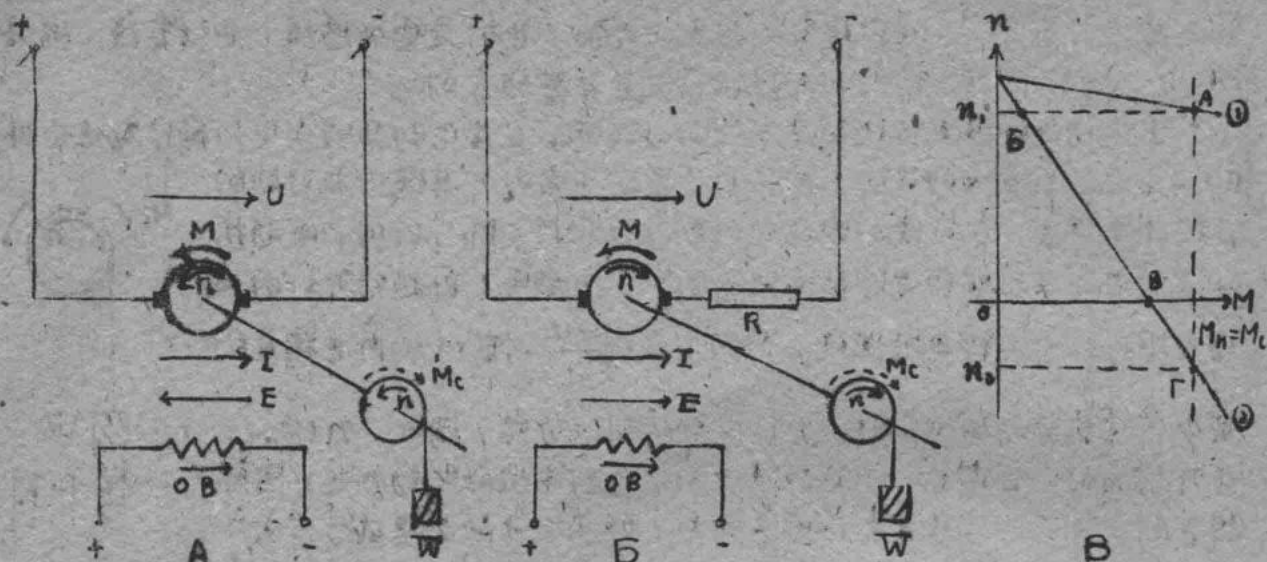


图 1-12

现在，来看这力矩为何是制动力矩：

在图1-12A中， $U > E$ ，电流的方向与 U 相同，力矩 M 与 n 相同，这是电动状态，当接入大电阻后，电动机由拖不动而反转，电机反转后，应电势的方向应改变，即 E 与 U 同方向。因此 $I = \frac{U+E}{\Sigma R} = “+”$ ，即电流仍与 U 同方向，令中不变，因此 M 的方向也不变，可是转动方向 n 却改变了（图1-12B）， M 与 n 的方向相反，故 M 为制动力矩。

第二种方法是连接到电枢上的电源的极性改变。

在讲述这种制动以前，我们先简单讲一下电机的反转，在图1-13A中，电机的A端为正，B端为负，其 M 与 n 的方向如图1-13A所示，也设这个方向是 M 和 n 的正方向时，则相当于A中的机械特性曲线如①、②所示（图1-13B），此时， M 和 n 均为正。

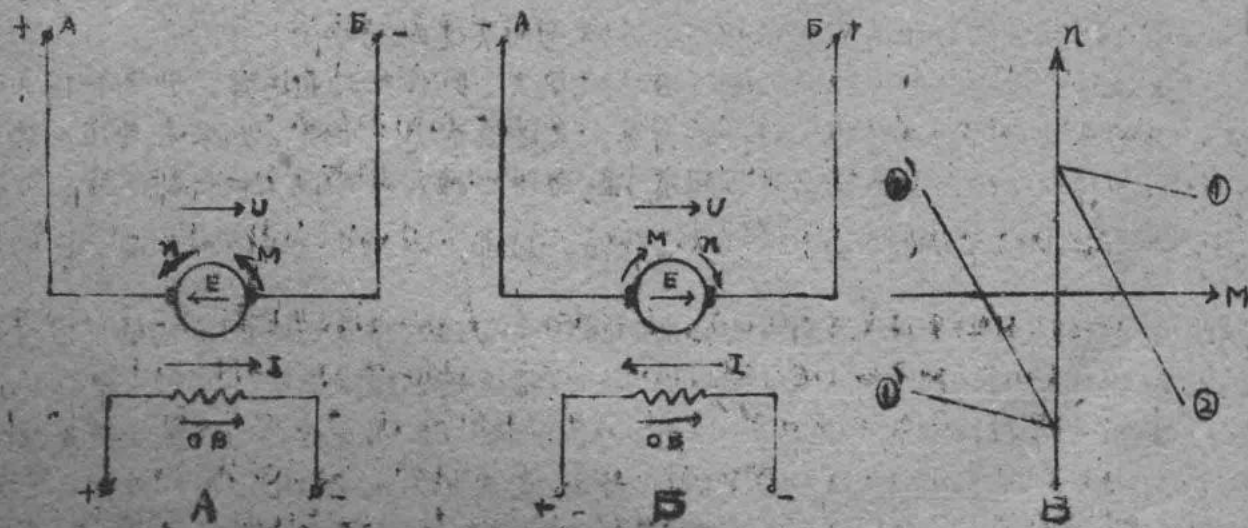


图 1-13

如果電樞電源的極性改變，而磁場的方向不變，則電機的力矩和轉動方向都改變，如圖1-13B所示，顯然這仍是電動機狀態，不過向相反的方向轉動罷了。如果認為在A中M和n的方向為正，那末，則B中M和n的方向便都為負，因此相應的機械特性曲線應在第三象限，如圖1-13B中的③和④。

現在，來看實現這種反接制動的方法。在制動之前，先將電樞電路中接入較大的電阻，並使將刀閘P由1,1'拉開而合到2,2'，使電樞電源的極性改變，但保持磁場不變，如圖1-14A和B所示，這時，便實現了反接制動。

我們來看為何是制動力矩，由圖1-14A可知，當作電動機運行時， $U > E$ ，電流的方向與U相同，M與n的方向相同，但在制動時，U的方向變了，得與E相同，如圖1-14B所示，因此，電流

$$I = \frac{-U - E}{\Sigma R} = \frac{U + E}{\Sigma R}$$

即I的方向改變，但

由來未變，故 $M = K_M \Phi I = \text{“—”}$ 即M的方向改變，在制動時，因慣性之故n的方向未變，因此，M與n反向，是為制動力矩。

(2) 在制動時的機械特性曲線。

在第一種反接制動中，只是增加了極路電阻，並未改變電機與電源的聯接方式，因此，其特性方程式仍可由電動機的特性方程式表示。

$$\omega = \omega_0 - \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M$$

在電動機狀態時

$$\omega_0 > \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M$$

即隨M的上升而下降，這時，M和n均為正，在第一象限。

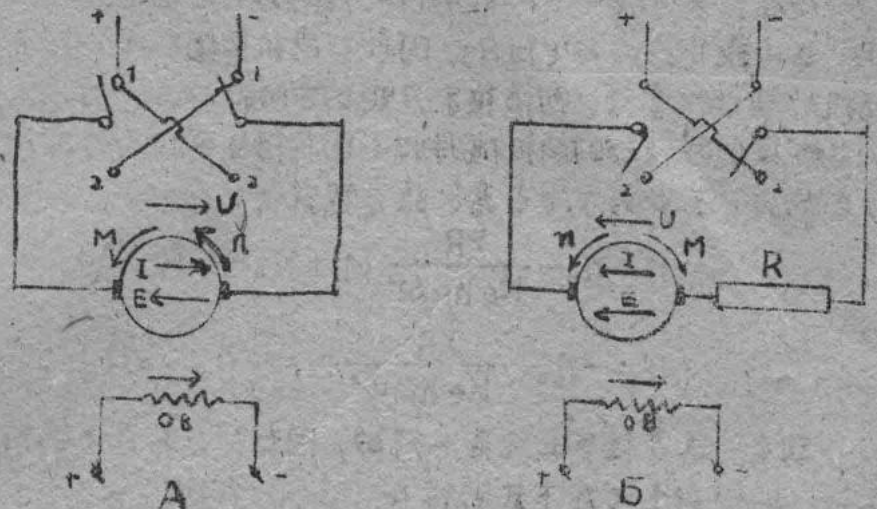


圖1-14

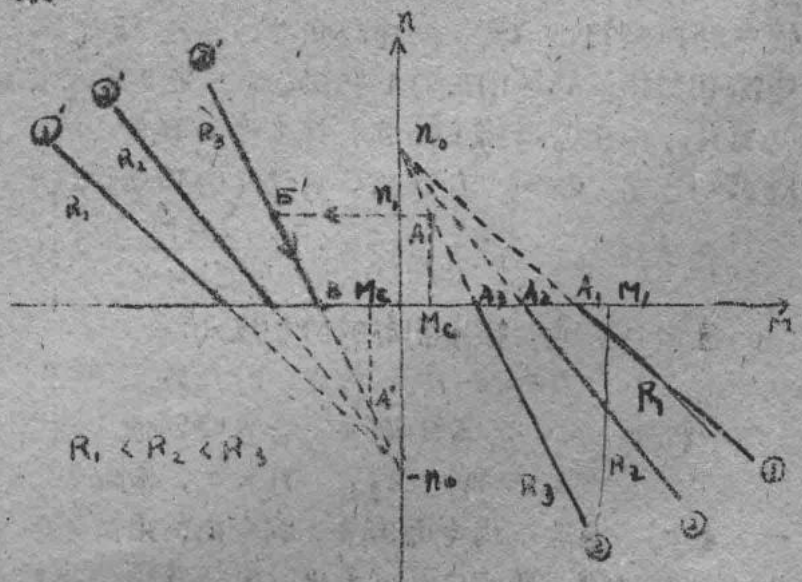


圖1-15

当M增到使 $n_0 = \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M$ 时, $n = 0$, 相当於图1-15的A₁点 (或A₂, A₃)。

如果M再继续增加, 则 $n_0 < \frac{\Sigma R M}{K_e K_M \Phi^2}$ 。

故n为负, 特性延伸到第四象限, 即相当於反接制动状态, 如图1-15①、②、③实线部分所示。

在第二种制动状态中, 实际上相当於反方向转动时的机械特性 (图1-13B①'②')。

现在, 来讨论一下制动时M—n的变化情况, 设在制动之前, 电动机的负载为M_c, 其电枢电路内有电阻R₃, 因此, 电机运行在图1-15之A点 (n = n₁), 今如使电动机的极性改变后, 则电流和力矩的方向都改变, 故第二种制动状态的特性实际上相当於反方向转动时的机械特性 (图1-13B①'②'), 这时因为电压U的方向改变, 即U变为负, 而Φ的方向不变, 故方程式

$$n = n_0 - \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M = n_0 - \Delta n \quad \text{变为}$$

$$n = -n_0 - \frac{\Sigma R}{K_e K_M \Phi^2} M = -n_0 - \Delta n。$$

其实, 这方程与上式是一样的, 因为, 在上式中的M为正, 而下式的M为负, 因此, 如将-M代入下式时得

$$n = -n_0 + \Delta n。$$

这样一来, 这两方程式的变化情况完全相同, 只是一个在1、4象限, 一个在2、3象限罢了。

现在, 我们根据这个方程式来讨论制动时的过程, 设在制动之前, 电动机的负载为M_c, 其电枢电路内有电阻R₃, 因此, 电机运行在图1-15的A点 (n = n₁), 今如使电动机的极性改变, 则电动机应运行在“反转”时的机械特性曲线上, 因此时磁路电阻仍为R₃, 故运行在图1-15的③上, 在制动开始的瞬间, 因惯性关系, n未变, 仍为n₁, 而在③曲线上相当於n₁之点为B点, 因此, 开始制动的瞬间, 电机由A点过渡到B点, 此时, 力矩M与转动方向相反, 故电机的n按曲线③迅速下降。

在最初, 因M很大, 故 $\Delta n = \frac{\Sigma R M}{K_e K_M \Phi^2} > n_0$ 。

因M为负值, 根据制动时的方程式

$$n = n - n_0 \quad \text{为正, 即为} n_1。$$

随着M的减小, Δn减小, 当n降到使

$$\Delta n = n_0 \quad \text{时, } n = 0, \text{ 制动完了, 此时达到曲线③的B点。}$$

此时, 如果不将电源断开, 则电机向相反方向起动, 最后达到A'而作稳定运转。从制动特性曲线中可以看出, 电枢电路的电阻愈大, 曲线的斜度愈大, 也就是说, 在同一力矩之下 (如为M₁), 磁路电阻越大, 所需的n越大, 其道理与上述两