

他励直流电动机的电动与制动

- (1)电动机稳态工作点是指满足稳定运行条件的那些电动机机械特性与负载转矩特性的交点，电动机在工作点恒速运行。
- (2)电动机运行在工作点之外的机械特性上时，电磁转矩与负载转矩不相等系统处于加速或减速的过渡过程。
- (3)他励直流电动机的固有机械特性与各种人为机械特性，分布在机械特性的四个象限内。
- (4)生产机械的负载转矩特性，有反抗性恒转矩、位能性恒转矩、泵类等典型负载转矩特性，也有由几种典型负载同时存在的各种负载转矩特性，他们分布在四个象限之内。

他励直流电动机的制动运行状态

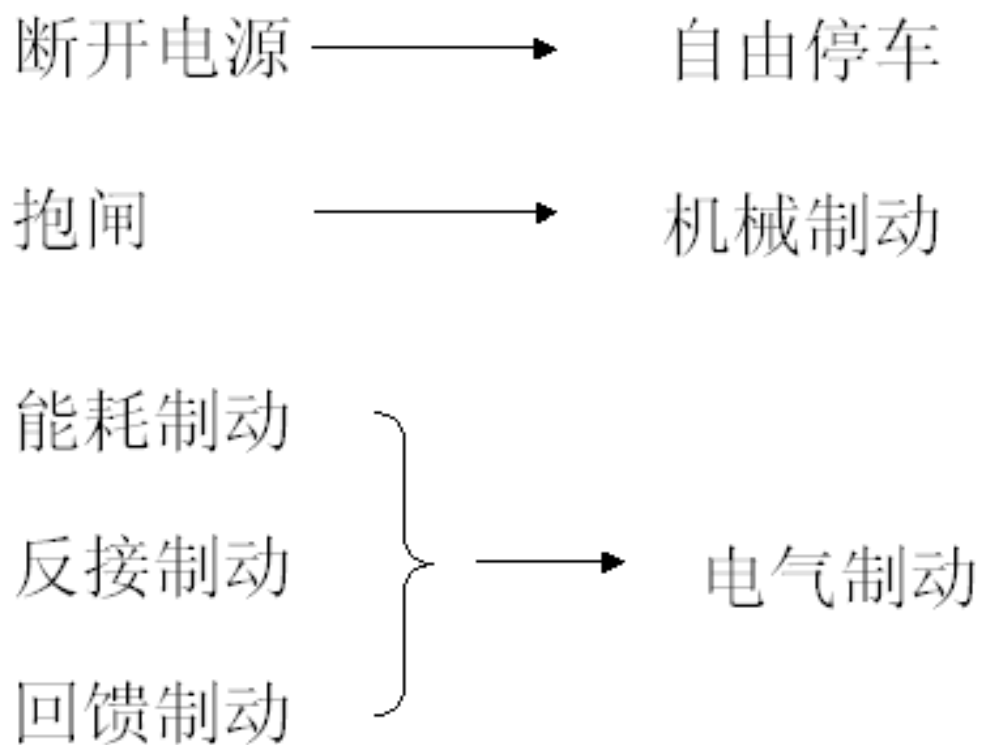
制动：制动状态是电机的一种运行状态。电磁制动是使电机本身产生与其旋转方向相反的电磁转矩，电机从生产机械中吸收机械能，并将机械能转换成电能，消耗在电机内部或回馈到电网。

制动的作用：在生产过程中，使电动机尽快停转，或者从某高速降到某低速值运转，或者限制位能性负载在某一转速下稳定运转。

制动的产生：在电动状态时，如果改变电磁转矩 T 或转速 n 中的任意一个方向，使二者方向相反， T 就成为制动转矩了。

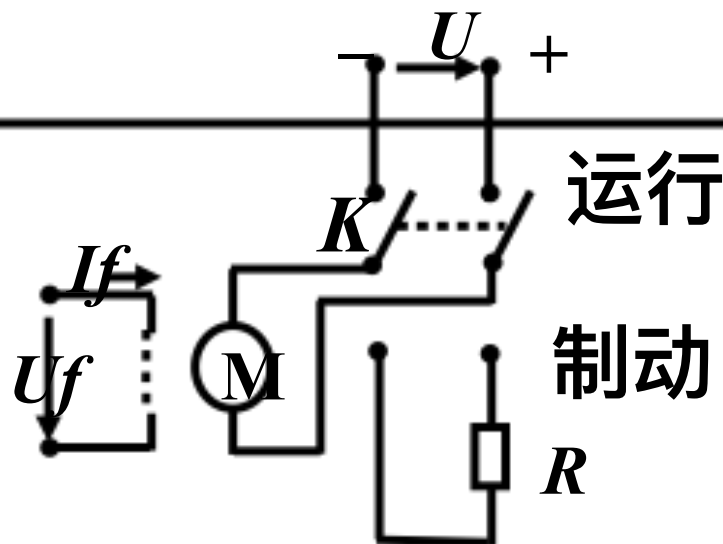
他励直流电动机的制动运行状态

制动的方法：



能耗制动

接线图



原理

停车时，电枢从电源断开,接到电阻上，这时：由于惯性电枢仍保持原方向运动，感应电动势方向也不变，电动机变成发电机，电枢电流的方向与感应电动势相同，从而电磁转矩与转向相反，起制动作用。这种制动是把贮存在系统中的动能变换成电能，消耗在制动电阻中，故称为能耗制动

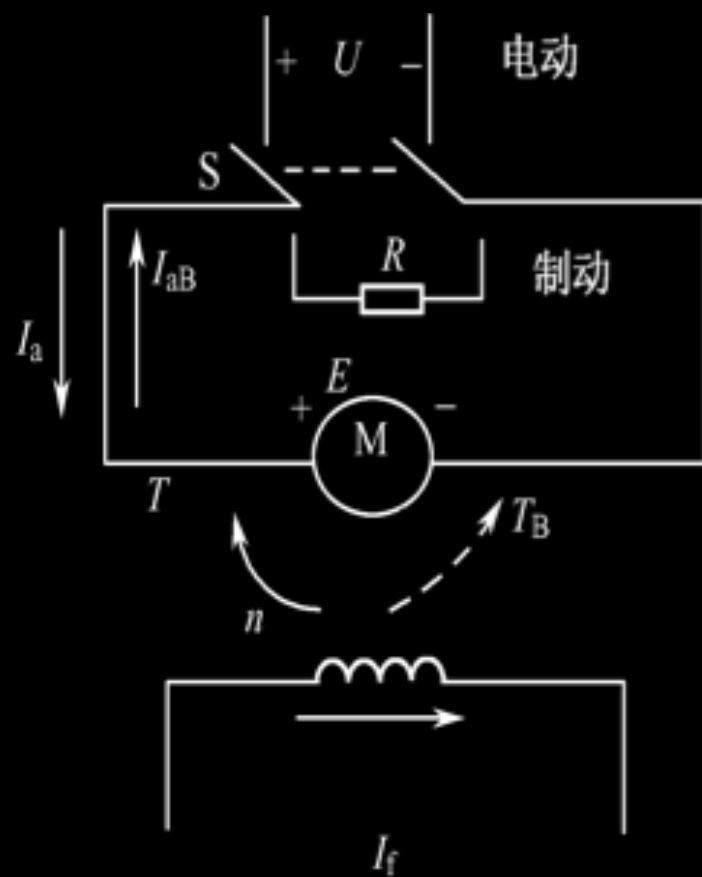
特点

能耗制动的机械特性是一条电枢电压为零、电枢串电阻的人为机械特性。改变制动电阻的大小，可以得到不同斜率的特性曲线。 R_z 越小，特性曲线的斜率越小，曲线就越平，制动转矩就越大，制动作用就越强。

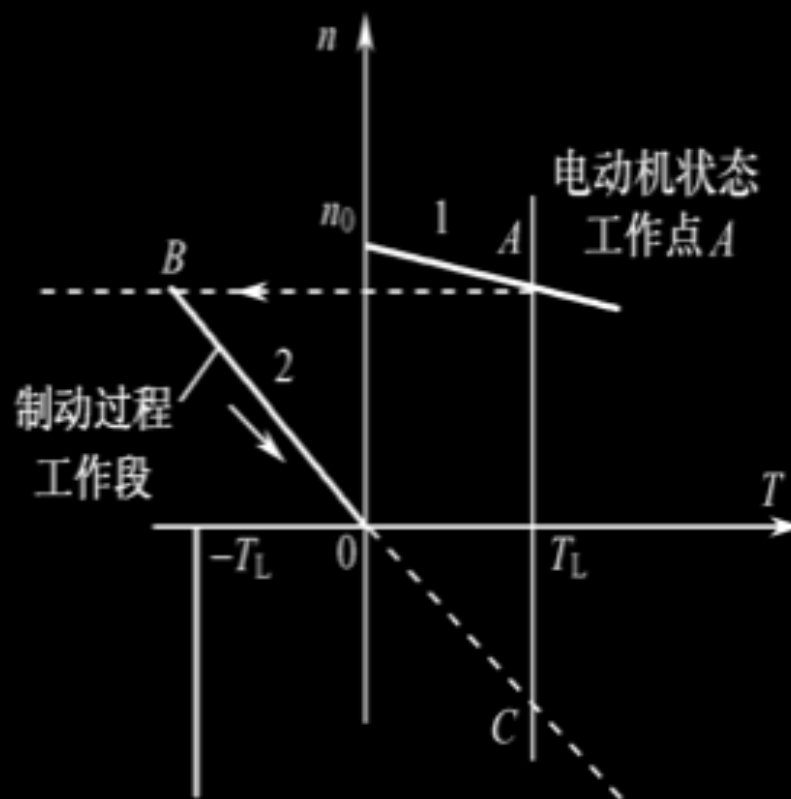
他励直流电动机的制动

能耗制动

能耗制动过程



(a)



(b)

能耗制动过程

他励直流电动机的制动运行状态

能耗制动

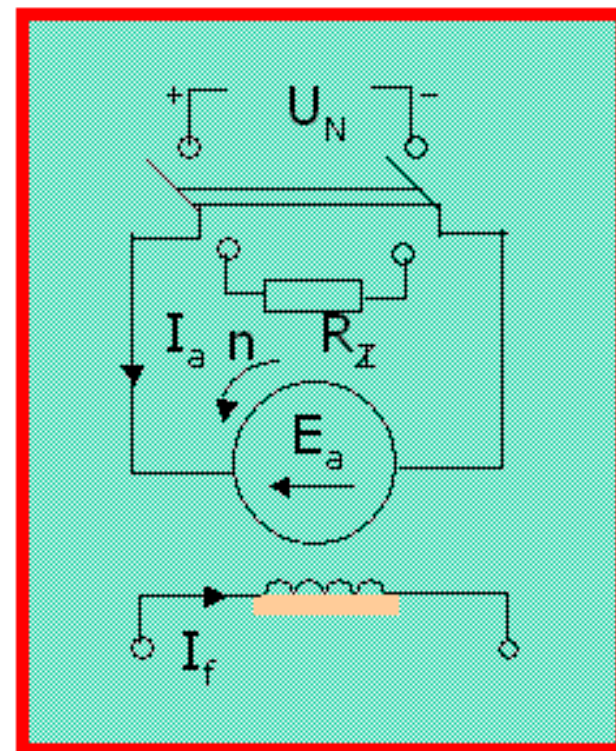
保持励磁电流 I_f 的大小和方向不变，将电源开关倒向RZ端，使电枢从电网脱离而经制动电阻RZ闭合。

参数特点：

$$\Phi = \Phi_N$$

$$U = 0$$

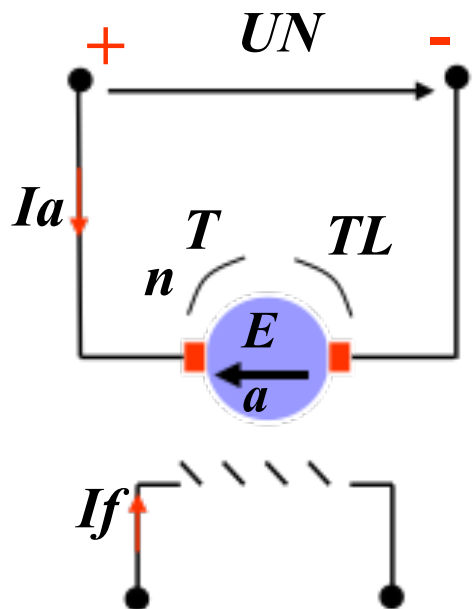
$$R = R_a + R_Z$$



他励直流电动机的制动运行状态

1、能耗制动的工作原理

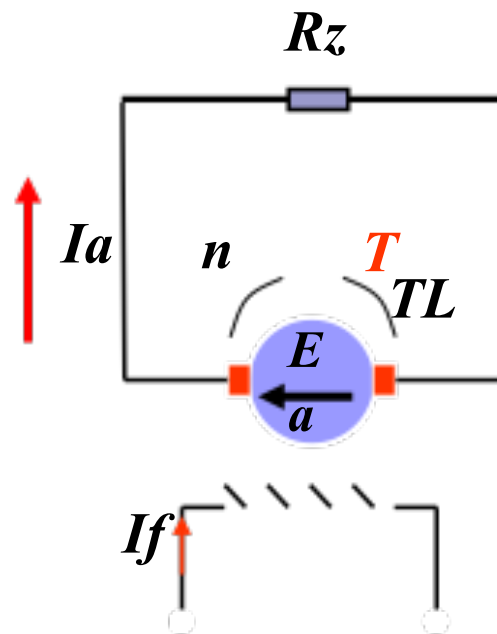
电动状态



$$U_N = E_a + I_a R_a$$

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a}$$

能耗制动



$$0 = E_a + I_a (R_a + R_z)$$

$$I_a = -\frac{E_a}{R_a + R_z} = -\frac{C_e \Phi_N \cdot n}{R_a + R_z}$$

E_a 方向不变, I_a 反向, T 反向, 成为制动转矩。

保护R

他励直流电动机的制动运行状态

2、能耗制动的机械特性

$$n = -\frac{R_a + R_z}{C_e \cdot C_T \cdot \Phi_N^2} \cdot T = -\beta_z \cdot T$$

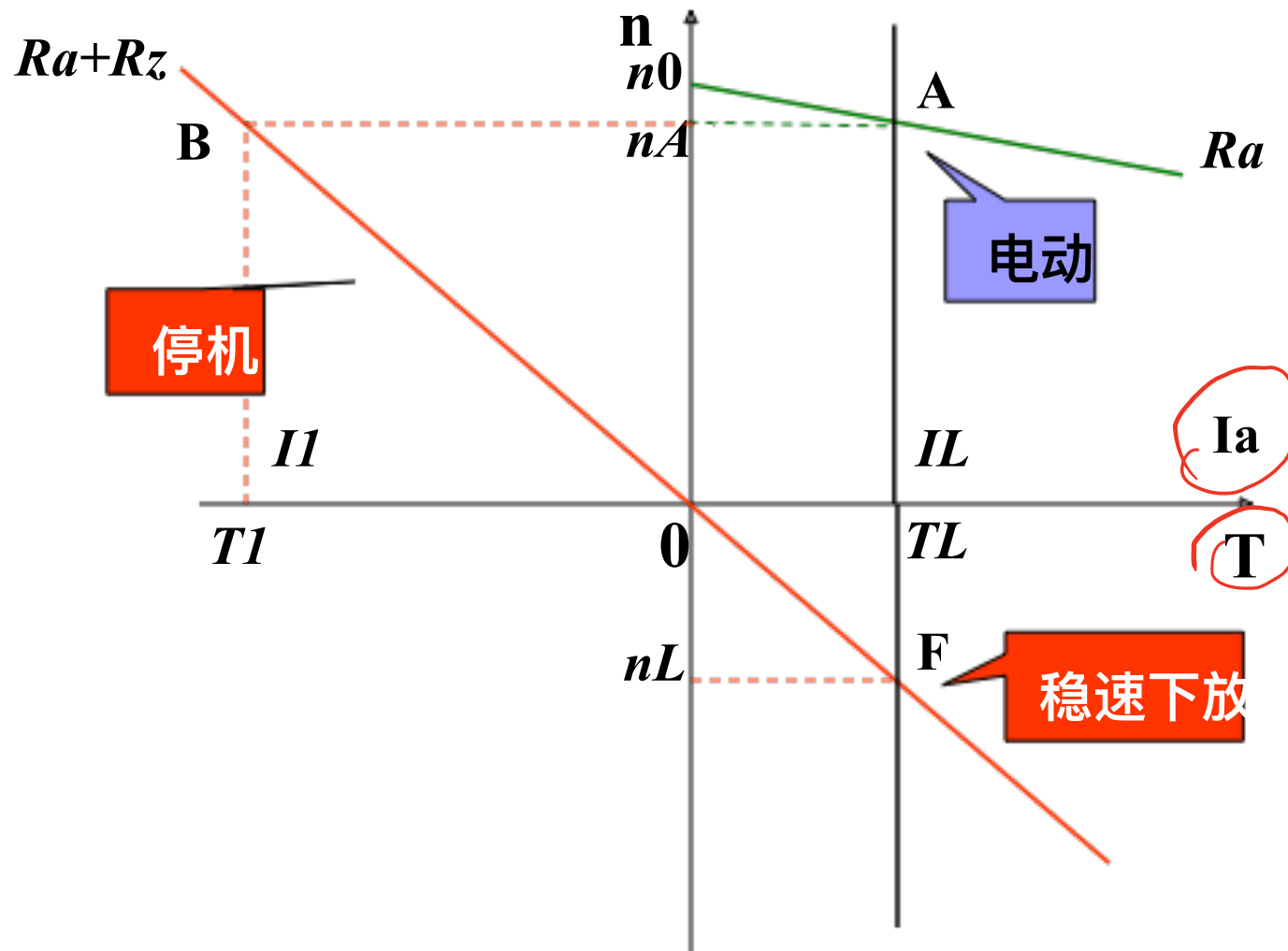
能耗制动机械特性是一条通过原点穿过第二和第四象限的直线。

对于反抗性负载，当 $n=0$ 时， $T=0$ ， $TL=0$ ，即实现准确停车。

对于位能性负载，当 $n=0$ 时， $T=0$ ， $TL \neq 0$ ，电机反转，实现重物的稳速下放。

$$n_L = -\frac{R_a + R_z}{C_e \cdot C_T \cdot \Phi_N^2} \cdot T_L = -\frac{R_a + R_z}{C_e \cdot \Phi_N} \cdot I_L$$

他励直流电动机的制动运行状态



他励直流电动机的制动运行状态

制动初瞬的电枢最大电流（一般取 $2I_N$ ）：

$$I_{\max} = I_B = -\frac{E_A}{R_a + R_z} = -\frac{C_e \Phi_N \cdot n_A}{R_a + R_z}$$

能耗制动电阻：

$$R_z \geq \left| \frac{E_A}{I_{\max}} \right| - R_a$$

对于反抗性负载，当工作点下移至转速较低时，对应电磁转矩也很小，制动效果差。这时通常借助电磁抱闸而使系统准确停车，也可以用逐级切除制动电阻的方法增大低速时的制动转矩。

他励直流电动机的制动运行状态

能耗制动的特点

能耗制动过程中，电动机与电源脱离，在电机内，电磁作用把机械功率转变为电功率。从功率角度讲，好像一台发电机，但与一般发电机又不相同，表现在：1)没有原动机输入机械功率，其机械能靠的是系统转速从高到低，制动时所释放出来的动能；2)电功率没有输出，而是消耗在电枢回路的总电阻 ($R=R_a+R_Z$) 上，所以称为“能耗”制动。

能耗制动特点：

- a)操作简单，停车准确；
- b)低速时制动转矩小，停转慢；
- c)动能大部分消耗在制动电阻上。

他励直流电动机的制动运行状态

二、反接制动

反接制动

- 电压反向（用于快速停机）
- （电枢反接）
- 电动势反向（用于位能负载稳定低速下放）
- （转速反接）

反接制动

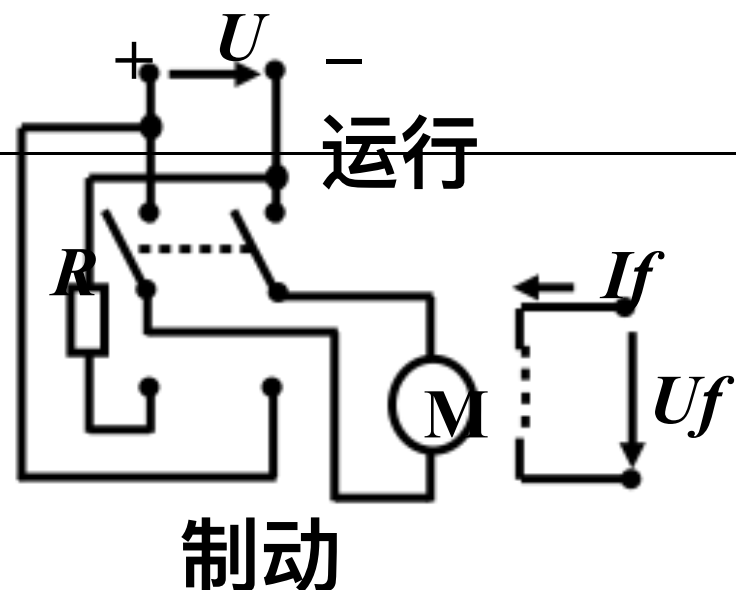
分类

电枢反接制动

倒拉反接制动

电枢反接制动接线图

电枢反接制动原理



制动时加到电枢绕组两端的电压极性与电动机正转时相反。因旋转方向未变，磁场方向未变，感应电势方向也不变。电枢电流为负值，表明其方向与正转时相反。由于电流方向改变，磁通方向未变，因此电磁转矩方向改变了。电磁转矩与转速方向相反，产生制动作用使转速迅速下降。这种因电枢两端电压极性的改变而产生的制动，称为电枢反接制动。

特点

电枢反接制动的最初瞬时，作用在电枢回路的电压 $(U+E_a) \approx 2U$ ，因此必须在电枢电压反接的同时在电枢回路中串入制动电阻 R_z ，以限制过

他励直流电动机的制动运行状态

(一) 电压反向的反接制动

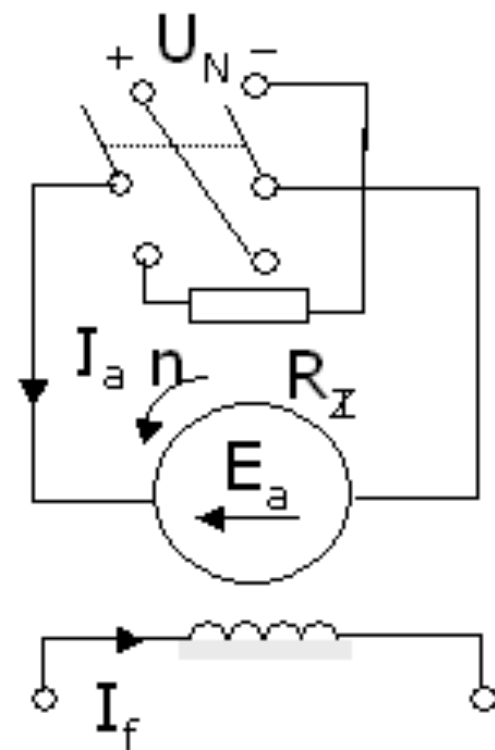
保持励磁电流 I_f 的大小和方向不变，将电源开关向下合闸，使电枢经制动电阻 R_Z 反接于电网上。

参数特点：

$$\Phi = \Phi_N$$

$$U = -U_N$$

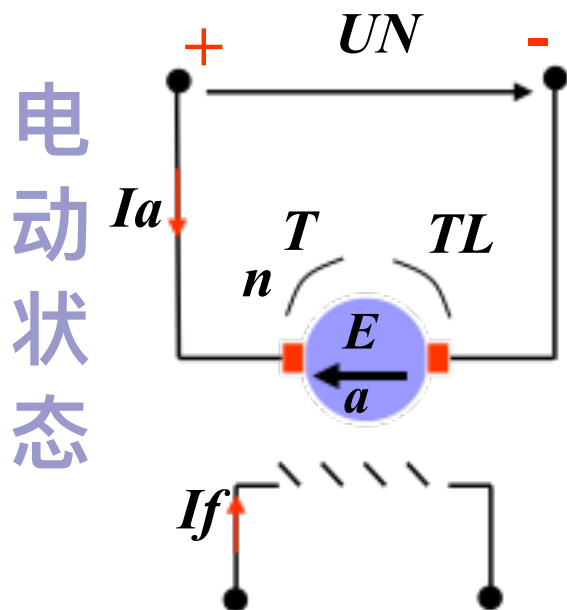
$$R = R_a + R_Z$$



他励直流电动机的制动运行状态

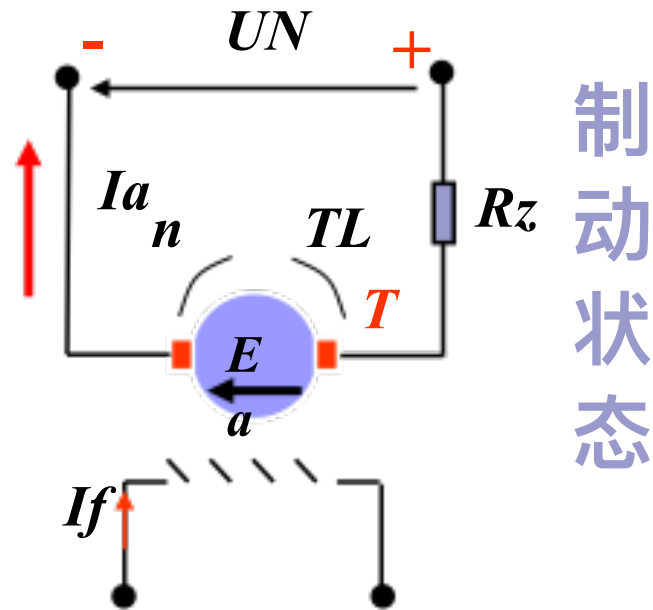
1、工作原理

R_z 反接 $\Rightarrow 2R_z$ 能耗



$$U_N = E_a + I_a R_a$$

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a}$$



$$-U_N = E_a + I_a (R_a + R_z)$$

$$I_a = -\frac{U_N + E_a}{R_a + R_z} = -\frac{U_N + C_e \Phi_N \cdot n}{R_a + R_z}$$

UN反向, E_a 方向不变, I_a 反向, T反向, 成为制动转矩。

他励直流电动机的制动运行状态

2、机械特性:

$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi_N^2} \cdot T = -n_0 - \beta_z \cdot T$$

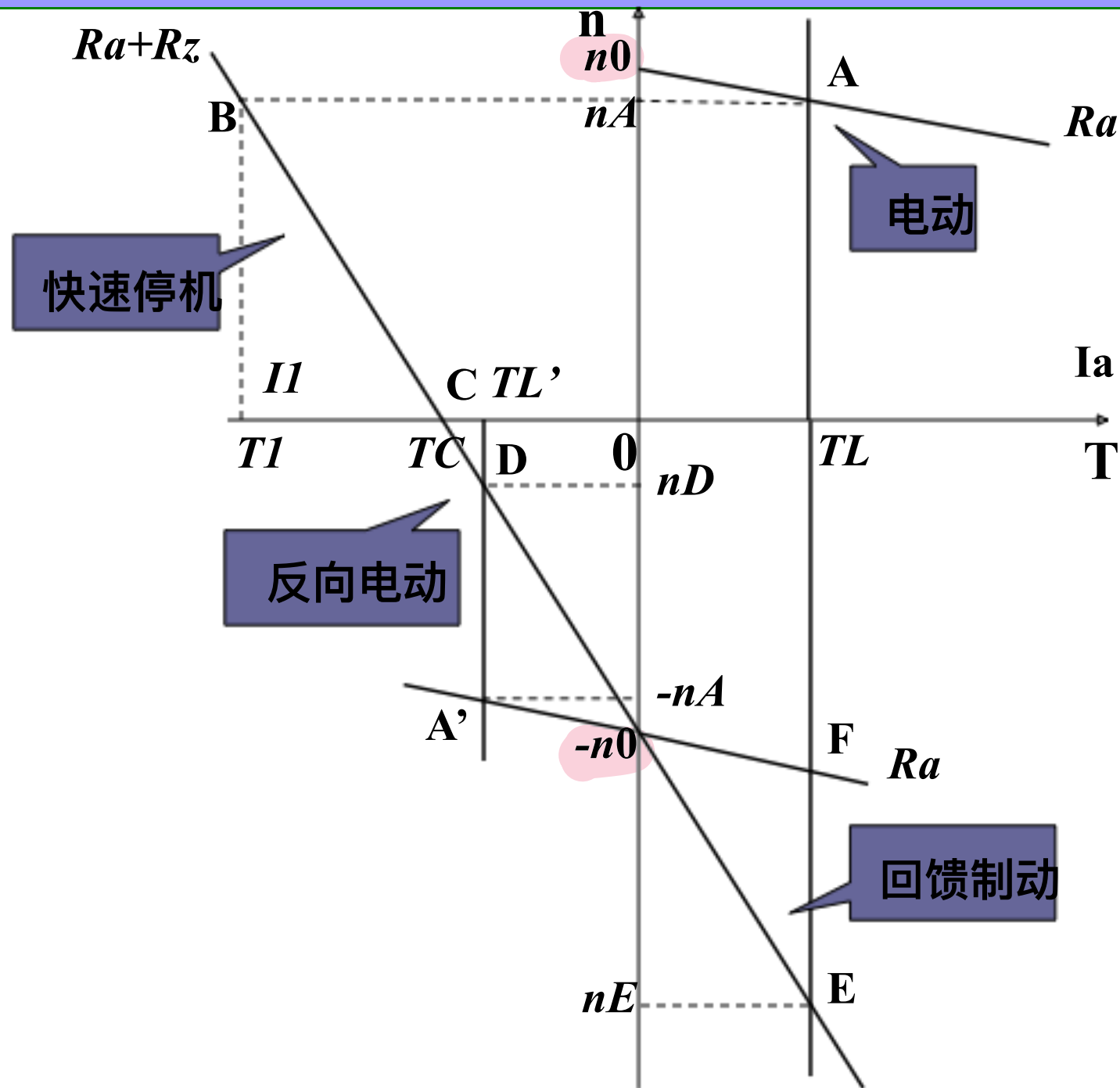
电压反向后机械特性是一条穿过第二、第三和第四象限的直线。三个象限中，分别对应三种状态：

(1) 反接制动停机状态（二象限）

对于反抗性负载，当 $n=0$ 时， $T = TC \neq 0$ ，若 $|TC| > |TL|$ ，电动机反向起动。故必须及时切断电源，才能实现准确停车。

对于位能性负载，反接制动是过渡过程，电动机必然反转。

他励直流电动机的制动运行状态



他励直流电动机的制动运行状态

(2) 反向电动状态（三象限）

对于反抗性负载，若 $|TC| > |TL|$ ，又不及时切断电源，电动机反向起动，稳定运行于D点。

对于位能性负载，反向电动是过渡过程，电动机反向加速，进入第四象限。

(3) 回馈制动状态（四象限）

只对于位能性负载才存在。系统在E点达到新的平衡，重物以 n_E 的速度稳速下放。

$$n_E = -n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi_N^2} \cdot T_L = -n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e \Phi_N} \cdot I_L$$

他励直流电动机的制动运行状态

制动初瞬的最大电枢电流：

$$I_{\max} = I_B = -\frac{U_N + E_A}{R_a + R_z} = -\frac{U_N + C_e \Phi_N \cdot n_A}{R_a + R_z}$$

反接制动电阻：

$$R_{Z\min} = \left| \frac{U_N + E_A}{I_{\max}} \right| - R_a \approx \left| \frac{2U_N}{I_{\max}} \right| - R_a$$

相对于能耗制动电阻：

$$R_{Z\min} = \frac{E_A}{I_{\max}} - R_a \approx \frac{U_N}{I_{\max}} - R_a$$

对同一台电动机，在同一 I_{\max} 规定下，反接制动过程比能耗制动过程电枢串入的电阻最小值几乎大一倍。

他励直流电动机的制动运行状态

3、特点

电压反向的反接制动过程中，电机仍从电源吸收功率，而电机轴上的机械功率被转换为电功率，这两部分功率又一起消耗到电阻 ($R_a + R_Z$) 上。

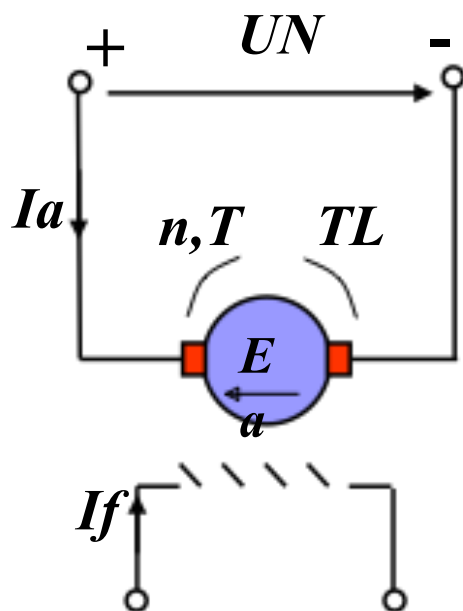
电压反向的反接制动特点：

- a) 可以很快使机组停机；
- b) 需要加入足够的电阻，限制电枢电流；
- c) 适于频繁正、反转的电力拖动系统（可迅速制动并反转）；
- d) 反抗性负载，转速至零时，需切断电源。

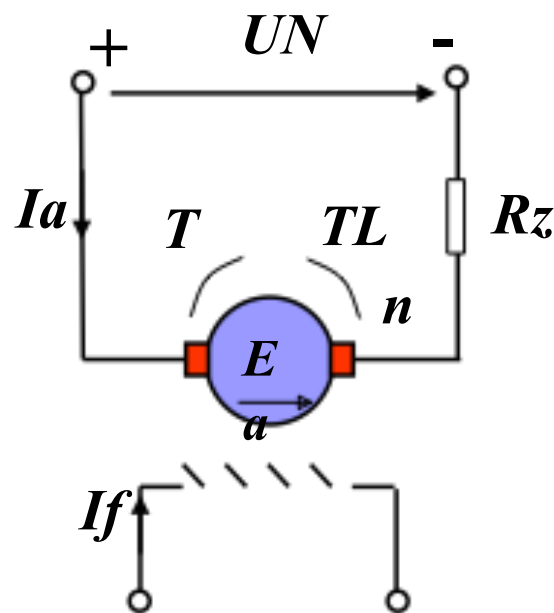
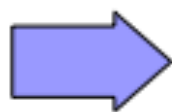
他励直流电动机的制动运行状态

(二) 电动势反向的反接制动(倒拖制动)

保持励磁电流 I_f 和端电压 UN 不变，仅在回路中串入足够大的电阻 R_Z ，使机械特性与负载特性的交点处于第四象限。

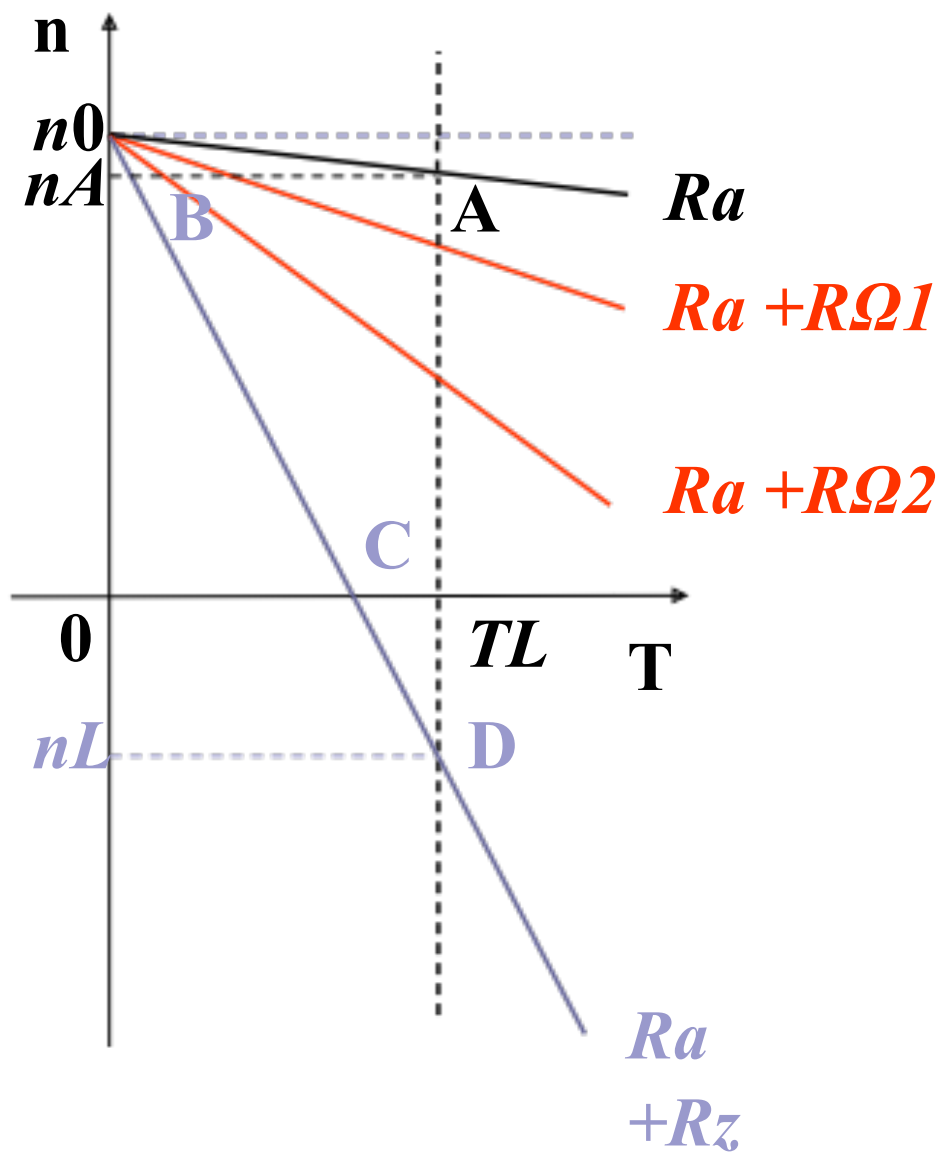


电动状态



制动状态

他励直流电动机的制动运行状态



机 械 特 性 :

$$n = n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi_N^2} \cdot T$$

D点 机械特性 :

$$\begin{aligned} n_L &= n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi_N^2} \cdot T_L \\ &= n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e \Phi_N} \cdot I_L \end{aligned}$$

他励直流电动机的制动运行状态

特点

电动势反向反接制动的能量关系与电压反向反接制动时相同。电机从电源吸收功率，而电机轴上的机械功率被转换为电功率，这两部分功率又一起消耗到电阻 $(R_a + R_Z)$ 上。

电动势反向的反接制动特点：

- a) 只在位能性负载作用下才会出现；
- b) 需加入足够的电阻，使机械特性进入第四象限时才会出现；
- c) 当 R_Z 选择得当时，可使转速接近于零。所以反接制动使重物下放时，可以获得极低的稳定下放速度。

他励直流电动机的制动运行状态

三、回馈制动（再生发电制动）

如外部条件发生变化，使电机转速 n 高于理想空载转速 n_0 ，致使 $E_a > U$ ，迫使 I_a 改变方向，电机进入发电状态，向电网馈电。

回馈制动

电压反向

电车上坡

电压不反向

降低端电压

回馈制动

E_a : 感应电动势
 U : 电枢回路电压

原理

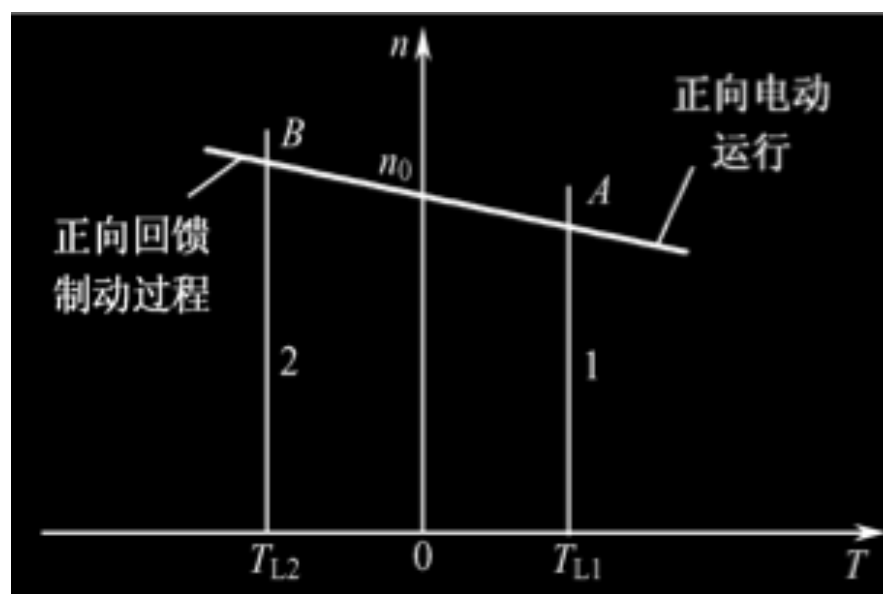
当电动机在电动状态运行时，由于某种因素，如用电动机拖动机车下坡，使电动机的转速高于理想空载转速，此时 $n > n_0$ ，使得 $E_a > U$ ，电枢电流为与电动状态时相反，因磁通方向未变，则电磁转矩 T 的方向随着 I_a 的反向而反向，对电动机起到制动作用。在电动状态时电枢电流从电网的正端流向电动机，而在制动时，电枢电流从电枢流向电网，因而称为回馈制动。

特点

回馈制动时， $n > n_0$ ， I_a 和 T 均为负值，所以它的机械特性曲线是电动状态的机械特性曲线向第二象限的延伸。电枢回路串电阻将使特性曲线的斜率增大。

回馈制动运行

如图所示。负载机械特性为曲线1和曲线2。这样走平路时电动机则运行在正向电动运行状态，工作点为固有机械特性与曲线1的交点A；走下坡路时电动机则运行在正向回馈运行状态，工作点为固有机械特性与曲线2的交点B。



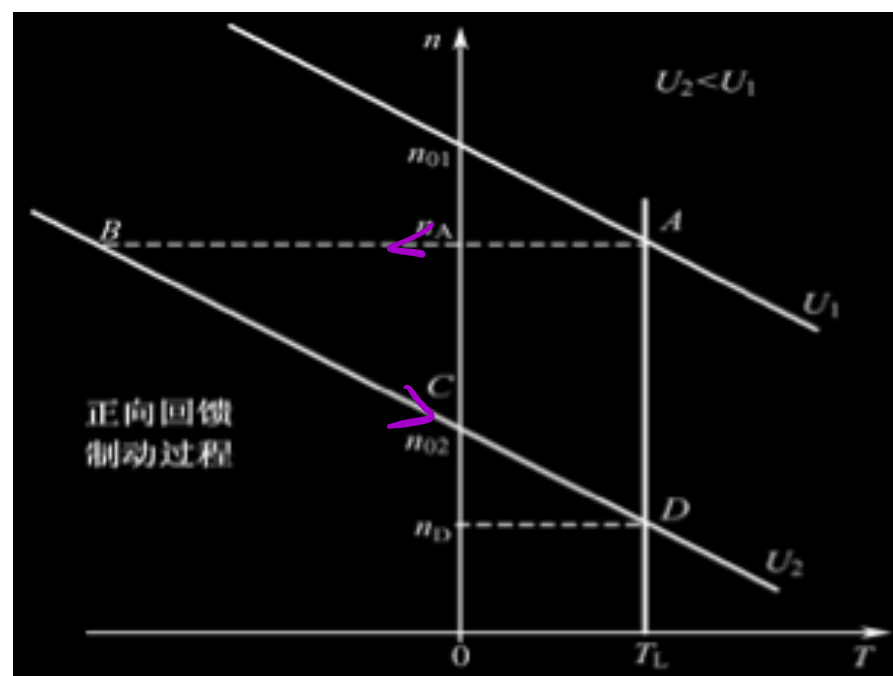
正向回馈制动运行

回馈制动运行

正向回馈制动运行

图所示为他励直流电动机电源电压降低，转速从高向低调节的过程。

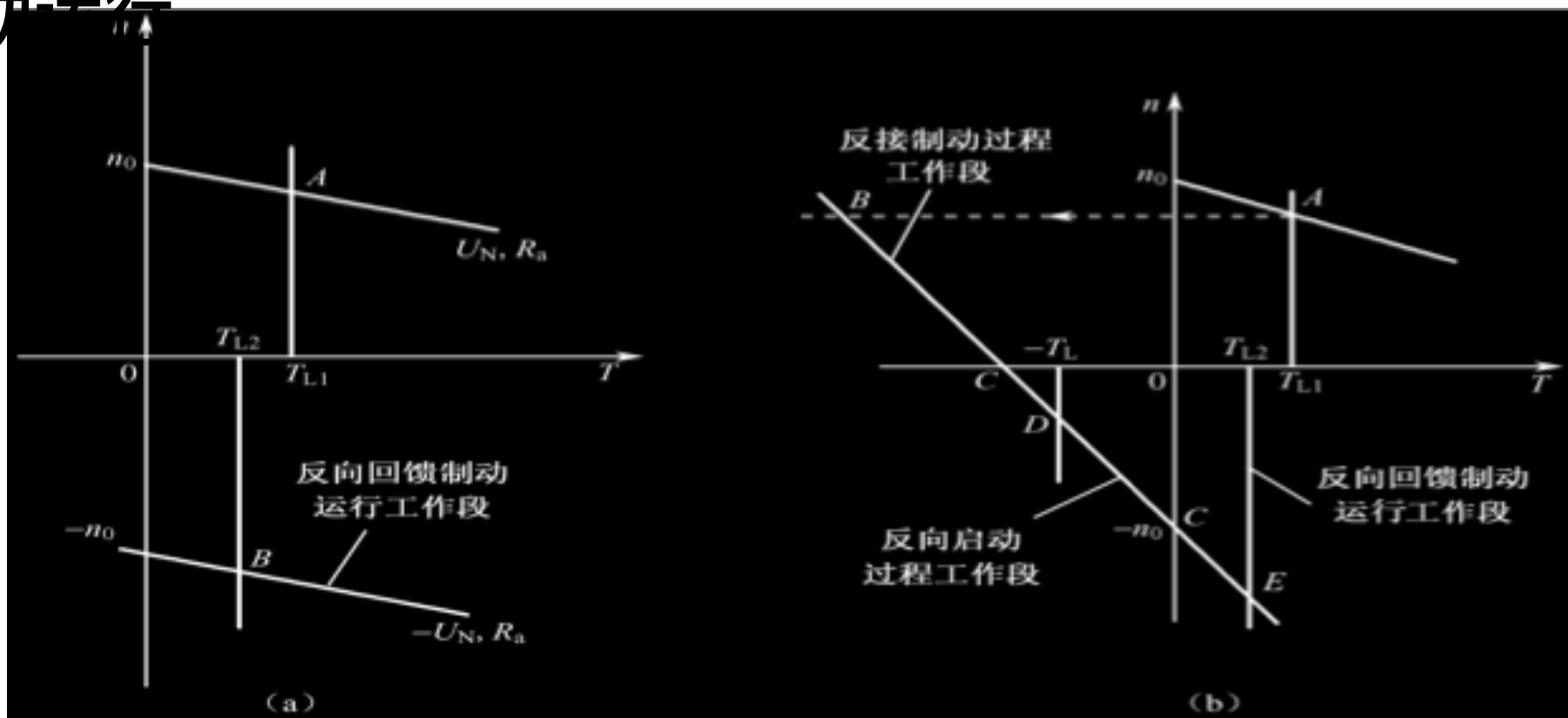
$A \rightarrow B \rightarrow D$



降压调速时的回馈制动过程

反向回馈制动运行

如果他励直流电动机拖动位能性负载，当电源电压反向时，工作点在第IV象限，见图 (a)所示的B点，这时电磁转矩 $T > 0$ ，转速 $n < 0$ ， T 与 n 反方向，称为反向回馈制动运行



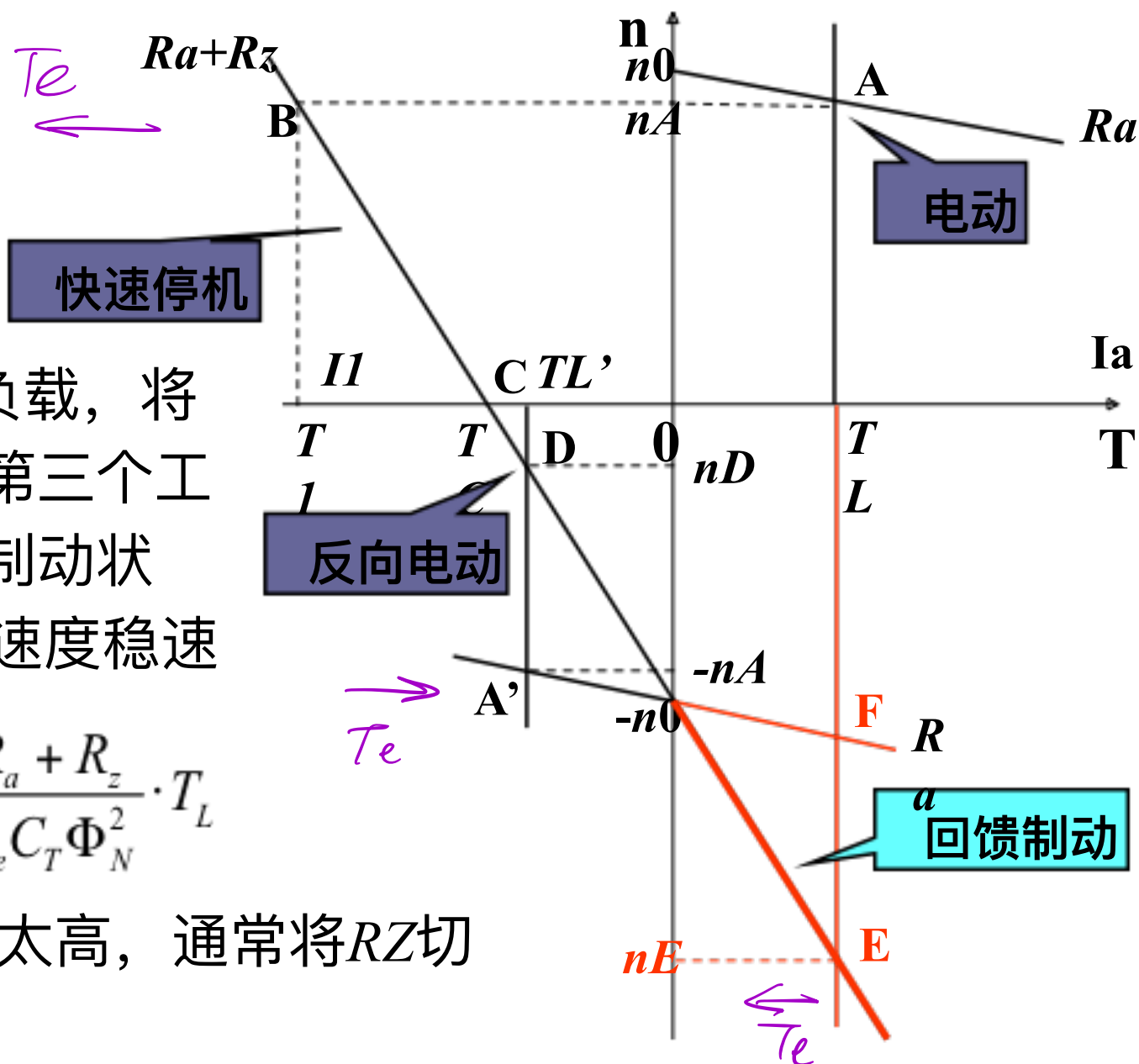
他励直流电动机的制动运行状态

(一) 电压反向的回馈制动

对于位能性负载，将电压反接之后，第三个工作状态就是回馈制动状态。重物以 n_E 的速度稳速下放：

$$n_E = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi_N^2} \cdot T_L$$

为使下放速度不太高，通常将 RZ 切除。

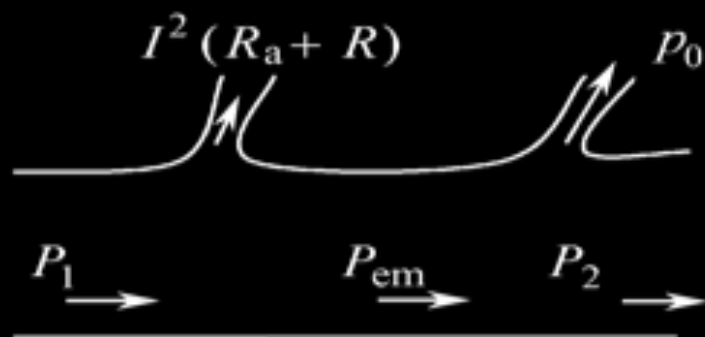


他励直流电动机的制动运行状态

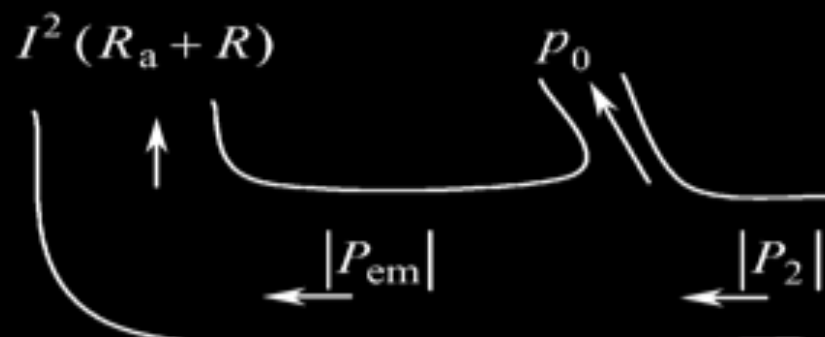
回馈制动特点

- (1) 电机转速 $n > n_0$ ，即 $E_a > U$ ，电机工作在发电机状态。
- (2) 电磁功率 $P = E_a I_a < 0$ ，电机从轴上输入机械功率，转换成电功率；
- (3) $P_1 = U I_a < 0$ ，电机发出电功率，将电能回馈给电网；
- (4) 电枢回路能量损耗 $I_a^2(R_a + R_Z)$ 。

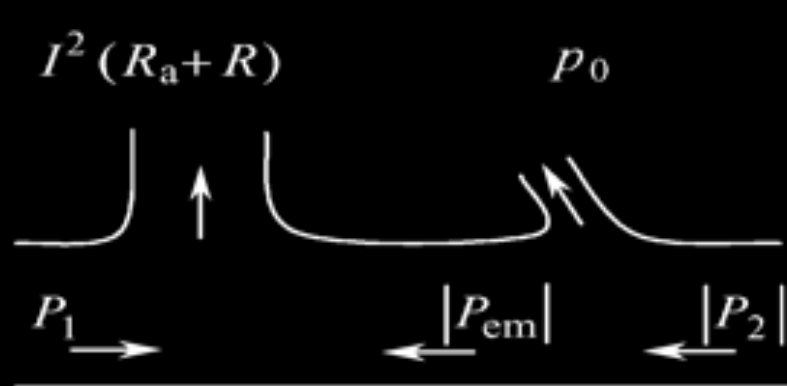
功率流程图



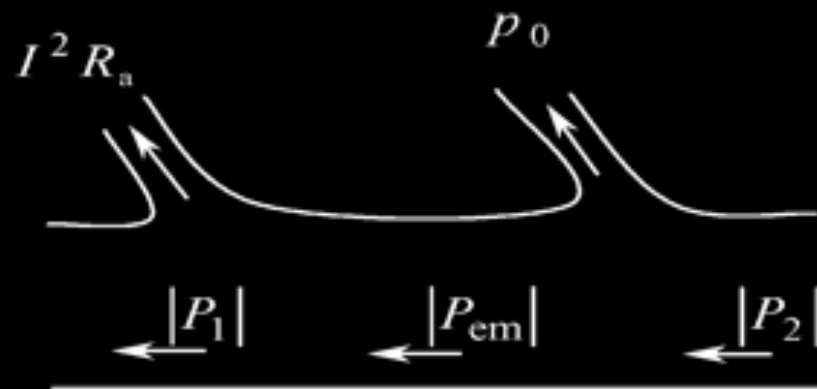
(a) 电动运行



(b) 能耗制动



(c) 倒拉反转和反接制动



(d) 回馈制动

(a)电动运行 (b)能耗制动 (c)倒拉反转和反接制动 (d)回馈制动

他励直流电动机各种运行状态下功率流程图

