



电机与拖动**课件**之三

# 直流电机 电力拖动

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



# 章节目录

2.1 电力拖动系统的运动方程和负载转矩特性

2.2 他励直流电动机的机械特性

2.3 他励直流电动机的起动

**2.4 他励直流电动机的制动**

2.5 他励直流电动机的调速

2.6 串励直流电动机的电力拖动

### 1、他励直流电动机的两种基本的运行状态

(1) **电动运行状态**：电磁转矩 $T$ 与转速 $n$ 同方向， $T$ 为拖动性质的转矩，电动机从电网吸收功率，向轴上的负载输出机械能。机械特性位于坐标平面第I、III象限。

(2) **制动运行状态**：电磁转矩 $T$ 与转速 $n$ 方向相反， $T$ 为制动性质的转矩。电动机从轴上所带负载吸收机械能，将之转化为电能。机械特性位于坐标平面第II、IV象限。

### 2、制动目的

(1)使电力拖动系统迅速减速停车，即**快速停车**；

(2)限制位能性负载的下降速度，即**匀速下放重物**。

### 3、制动方法

(1)机械制动：如抱闸停车

(2)电气制动：能耗制动、反接制动和回馈制动

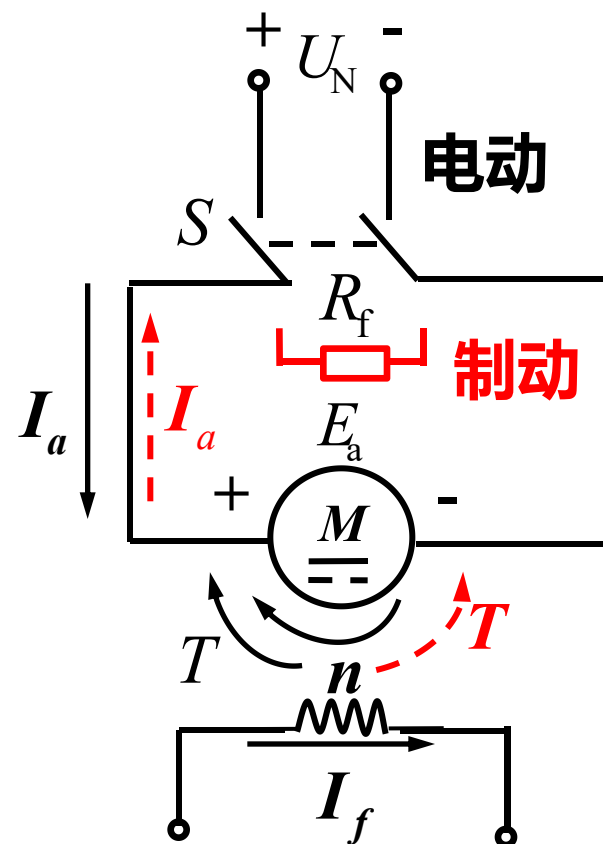


## 一、方法

制动时，保持励磁不变 $I_f=I_N$ ，将投向电源 $U_N$ 侧的开关改投向制动电阻 $R_b$ 侧，如下图所示。

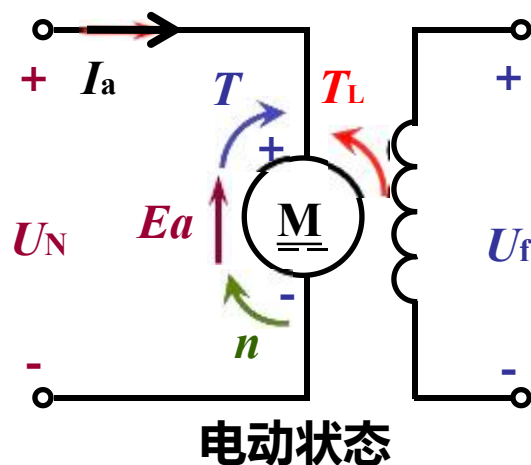
①开关S投向电源侧，为电动状态。

②开关S投向制动电阻 $R_f$ 侧，为能耗制动状态。



## 二、电动运行状态回顾

(1) 开关投向电源侧，为电动状态。

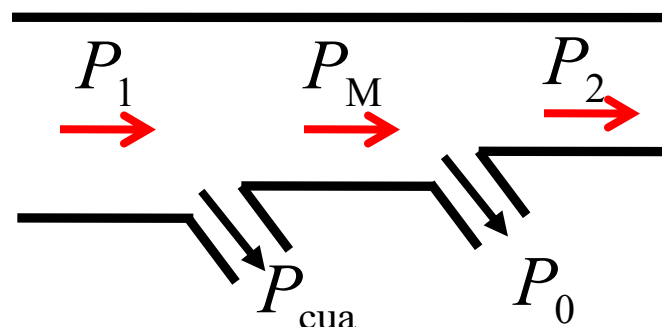


(2) 机械特性

$$U_N = I_a R_a + E_a$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

(3) 功率关系


 $P_1 = U_N I_a > 0$ , 从电源获得电能

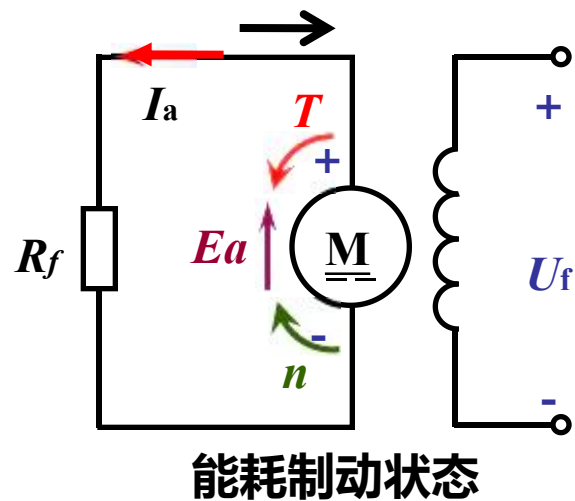
 $P_M = E_a I_a = 9.55 T n > 0$ , 电能转化为机械能

 $P_2 = 9.55 T_2 n > 0$ , 负载机械能增加

电动状态：电动机将输入的电功率转化为机械功率输出。



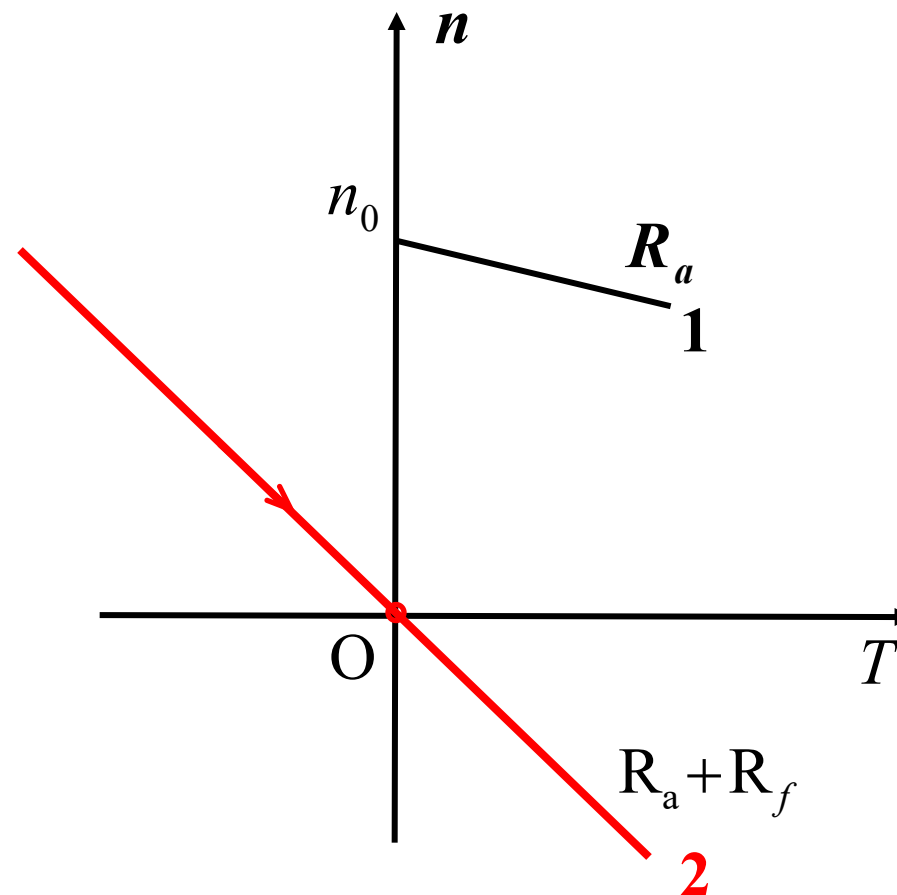
## 三、能耗制动分析

1、开关投向制动电阻 $R_b$ 侧，为能耗制动状态

## 2、机械特性

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

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



制动前：特性1

制动后：特性2



## 三、能耗制动分析

## 3、能耗制动过程（电动机带摩擦类恒转矩负载）

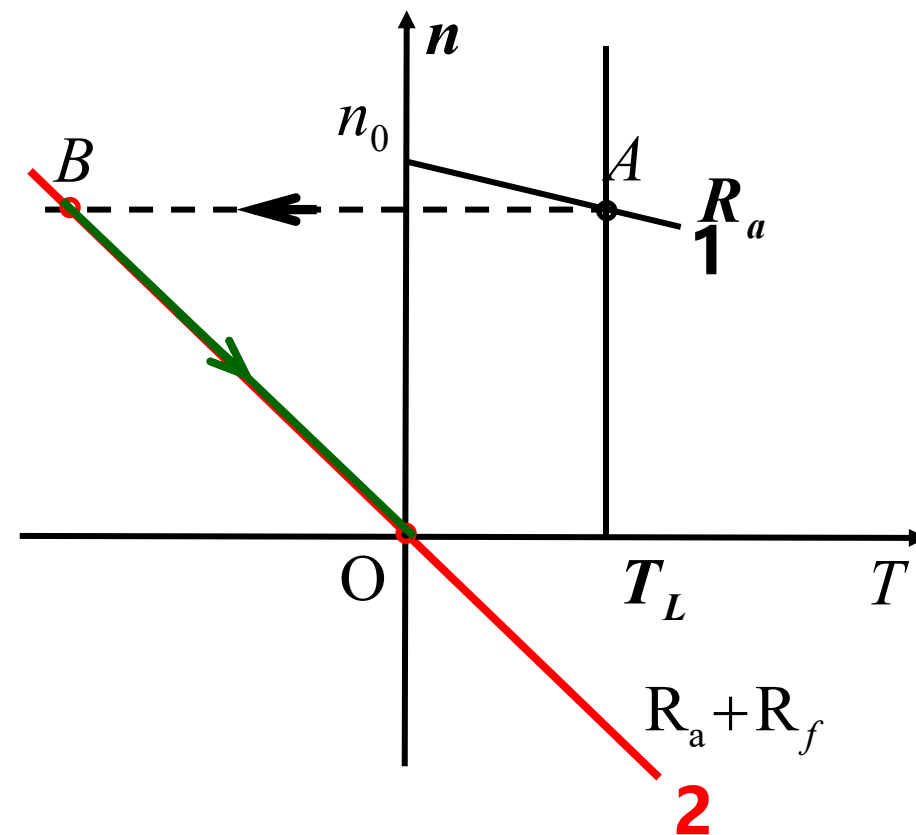
电动运行  
状态 A点  $\rightarrow$  断开电源，接入  
制动电阻瞬间  $\xrightarrow{\text{电机惯性}}$

$$\begin{array}{l} n_A = n_B \\ E_A = E_B \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} T_B < 0 (T \text{ 反向}) \\ I_a < 0 (I_a \text{ 反向}) \end{array} \xrightarrow{-|T_B| - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0}$$

$$n \downarrow \rightarrow O \text{ 点} \rightarrow n = 0, E = 0 \rightarrow I_a = 0, T = 0$$

**O点:**  $T=0, n=0, I_a=0$ , 系统停车。

**BO段:**  $T$ 与 $n$ 反向,  $T$ 为制动转矩, 机械特性BO与负载转矩特性 $T_L$ 没有交点, 没有稳定工作点, 这种制动称为**能耗制动过程**。



## 三、能耗制动分析

## 4、能耗制动运行状态（电动机带位能性恒转矩负载）

A点：电动运行状态，匀速提升重物；

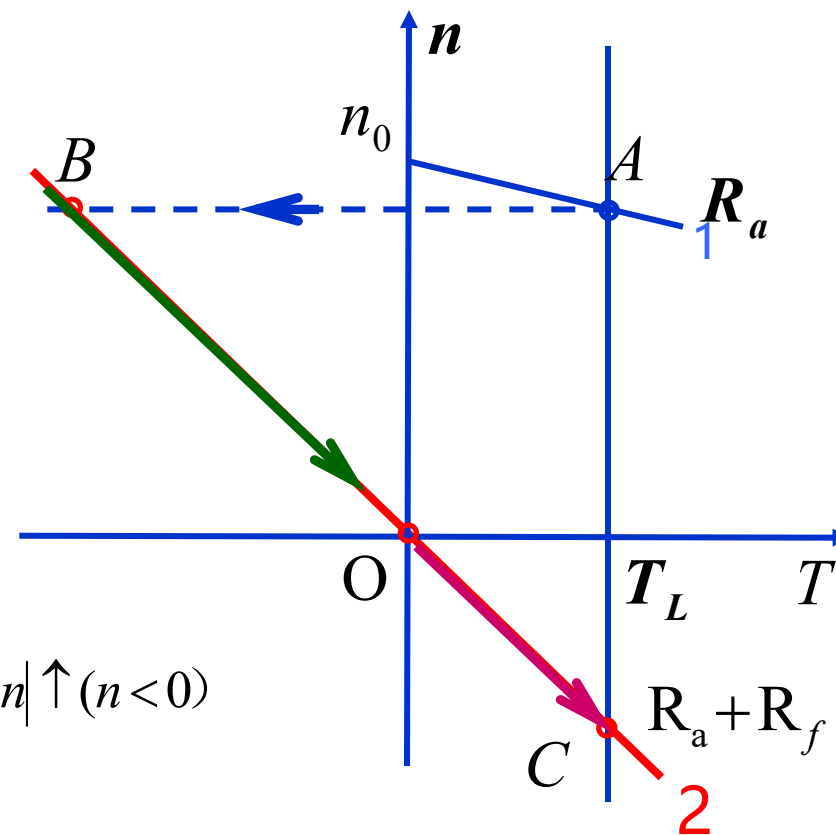
BO段：能耗制动过程，减速提升重物；

O点： $n=0$ ,  $T=0$ ,  $T_L \neq 0$

$$O \text{ 点 } \begin{pmatrix} n = 0 \\ T = 0, T_L \neq 0 \end{pmatrix} \xrightarrow{0 - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0}$$

$$|n| \uparrow \begin{pmatrix} n \text{ 反向, } n < 0 \\ E \text{ 反向, } E < 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} I_a > 0 (I_a \text{ 再次反向}) \\ T > 0 (T \text{ 再次反向}) \end{pmatrix} \xrightarrow{T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0} |n| \uparrow (n < 0)$$

$$\rightarrow |E| \uparrow (E < 0) \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow T \uparrow \rightarrow T = T_L \rightarrow C \text{ 点 (匀速下放重物)}$$



**C点：**  $T$ 与 $n$ 反向， $T$ 为制动转矩，机械特性 $OC$ 与负载转矩特性 $T_L$ 有交点（ $T = T_L$ ），这种制动称为**能耗制动运行状态**。

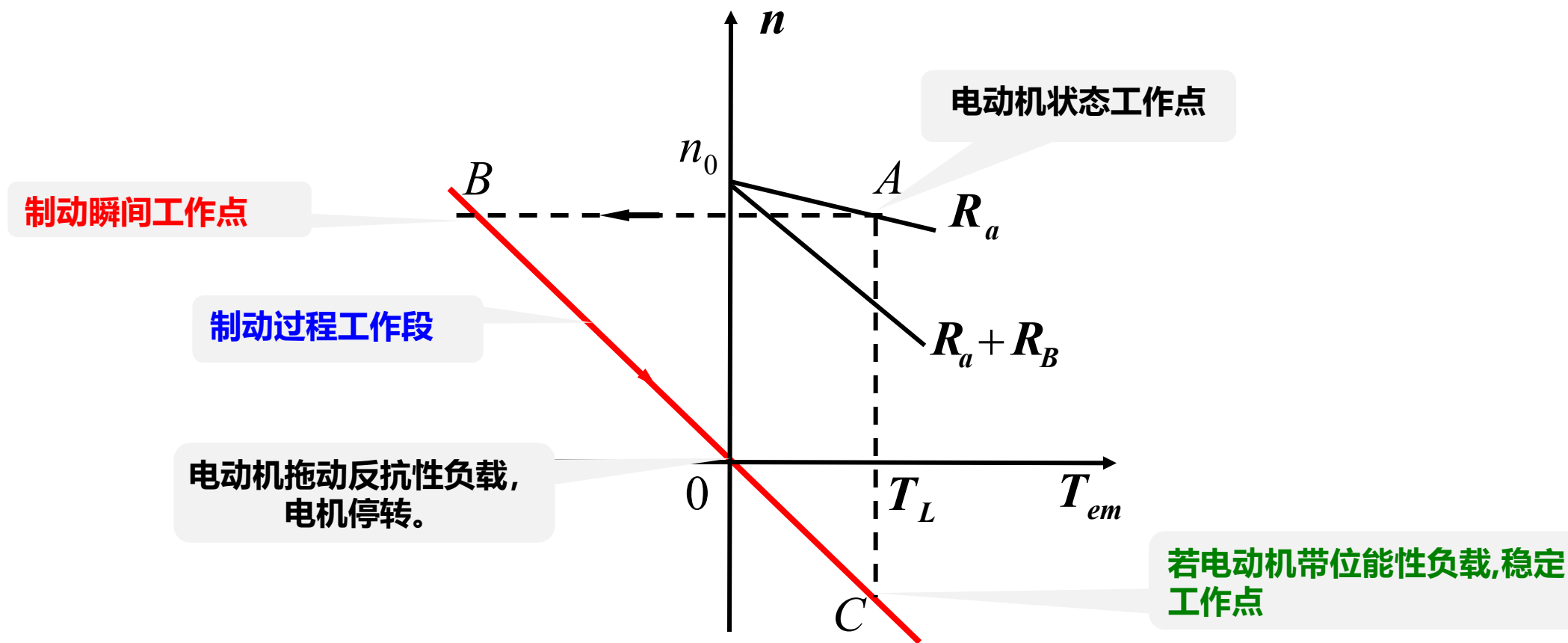






能耗制动时的机械特性为：

$$n = -\frac{R_a + R_B}{C_E C_T \Phi_N^2} T_{em} = 0 - \beta T_{em}$$



## 四、制动电阻和制动效果

### 1、制动电阻的计算

#### ①能耗制动过程

选制动开始点B点计算：

$$E_{aB} = |I_a| (R_a + R_f) \quad E_{aB} \text{ 为制动瞬间电动势}$$

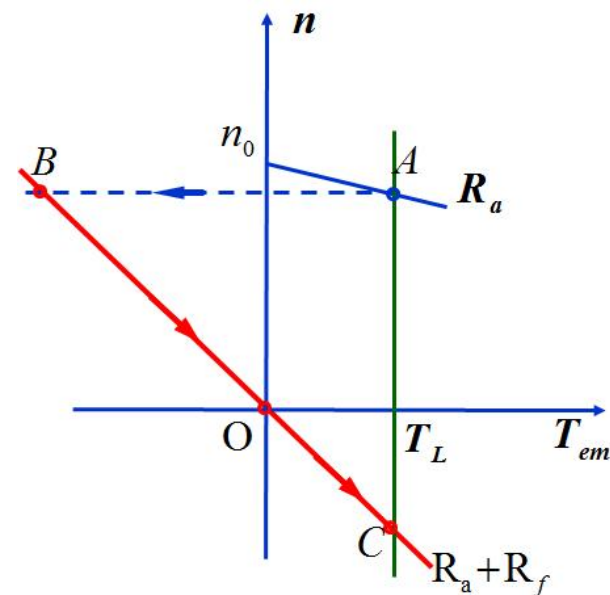
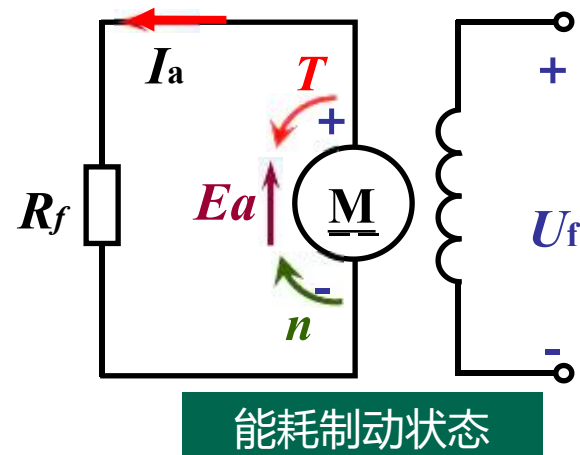
$$|I_a| = \frac{E_{aB}}{R_a + R_f} \leq \lambda_m I_N \quad (\lambda_m = 2.0 \sim 2.5) \quad \Rightarrow R_f \geq \frac{E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a$$

#### ②能耗制动运行状态

选匀速下放重物工作点C点计算 $R_f$  (各量取绝对值)

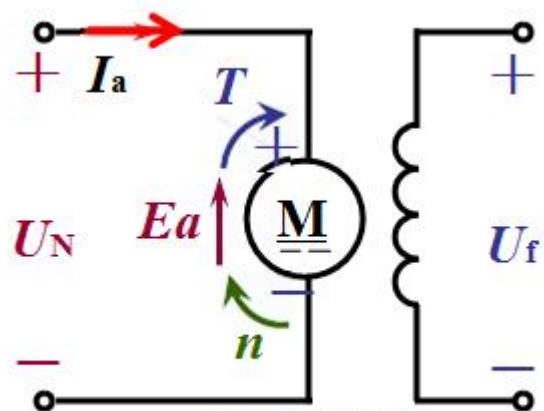
$$E_{aC} = I_{aC} (R_a + R_f) \quad \Rightarrow R_f = \frac{E_{aC}}{I_{aC}} - R_a$$

$$\text{校验 } R_b: \quad R_f \geq \frac{E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a \quad (\text{对切换点B点电流的限制})$$

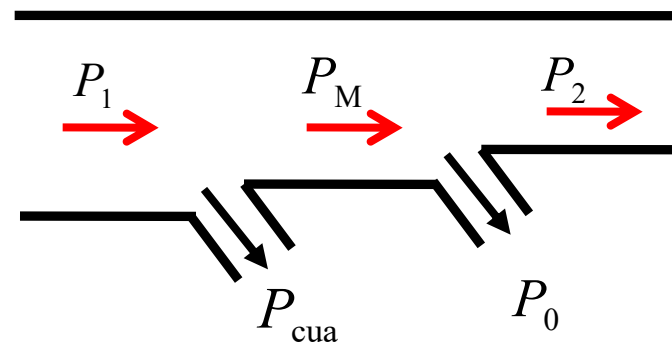




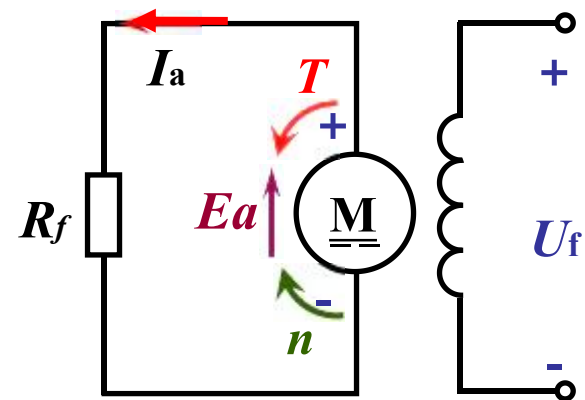
## 五、功率关系



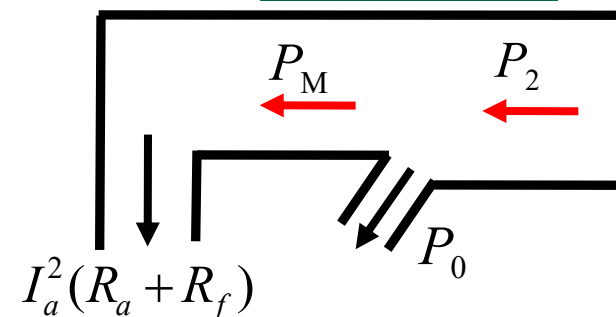
电动状态



电动状态功率流程



能耗制动



能耗制动功率流程

制动时生产机械动能减少， $P_2 = 9.55T_2n < 0$        $P_1 = 0$ , 与电源断开

$P_M = 9.55Tn = E_a I_a < 0$ , 机械能转化为电能

**能耗制动：**电动机将生产机械减少的动能（或位能）转化为电能消耗在电枢电阻和制动电阻上，因此称为能耗制动。

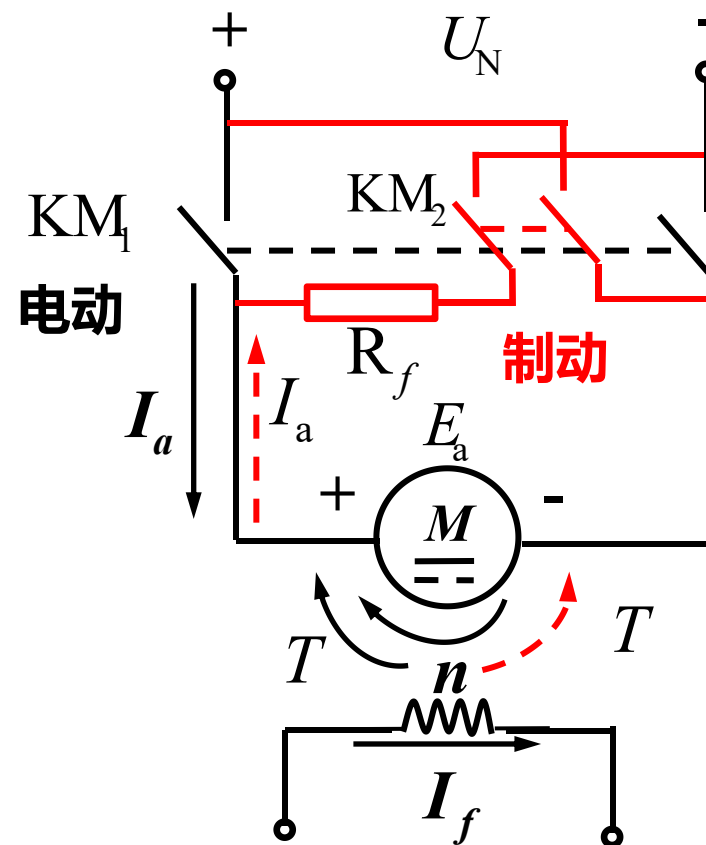


### 一、电压反接制动

**1、方法：**制动时，保持励磁不变 $I_f=I_N$ ，接上极性相反的电源电压，并在电枢回路中串入制动电阻 $R_f$ ，如下图所示。

①开关KM1闭合，开关KM2断开，为**电动状态**。

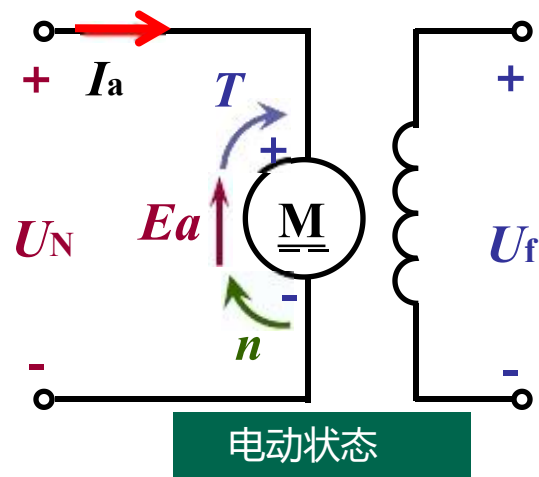
②开关KM1断开，开关KM2闭合，为**电压反接制动状态**。



## 一、电压反接制动

## 2、电动运行状态

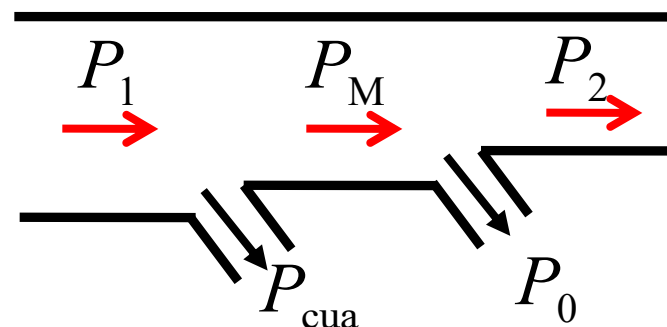
①电路



②机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T \quad \text{特性1}$$

③功率关系



$$P_1 = U_N I_a > 0, \text{从电源获得电能}$$

$$P_M = E_a I_a = 9.55 T n > 0, \text{电能转化为机械能}$$

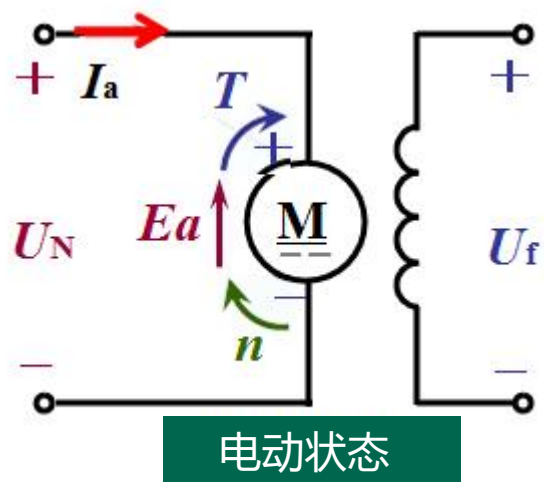
$$P_2 = 9.55 T_2 n > 0, \text{负载机械能增加}$$

**电动状态：电动机将从电网输入的电能转化为电机轴上的机械能输出。**

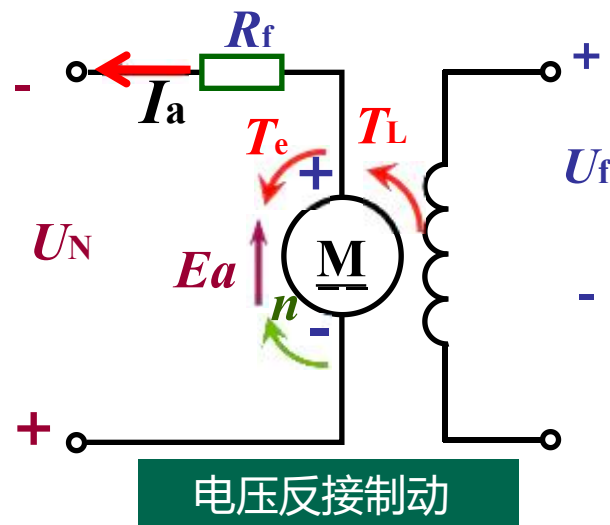


## 一、电压反接制动

## ①电路



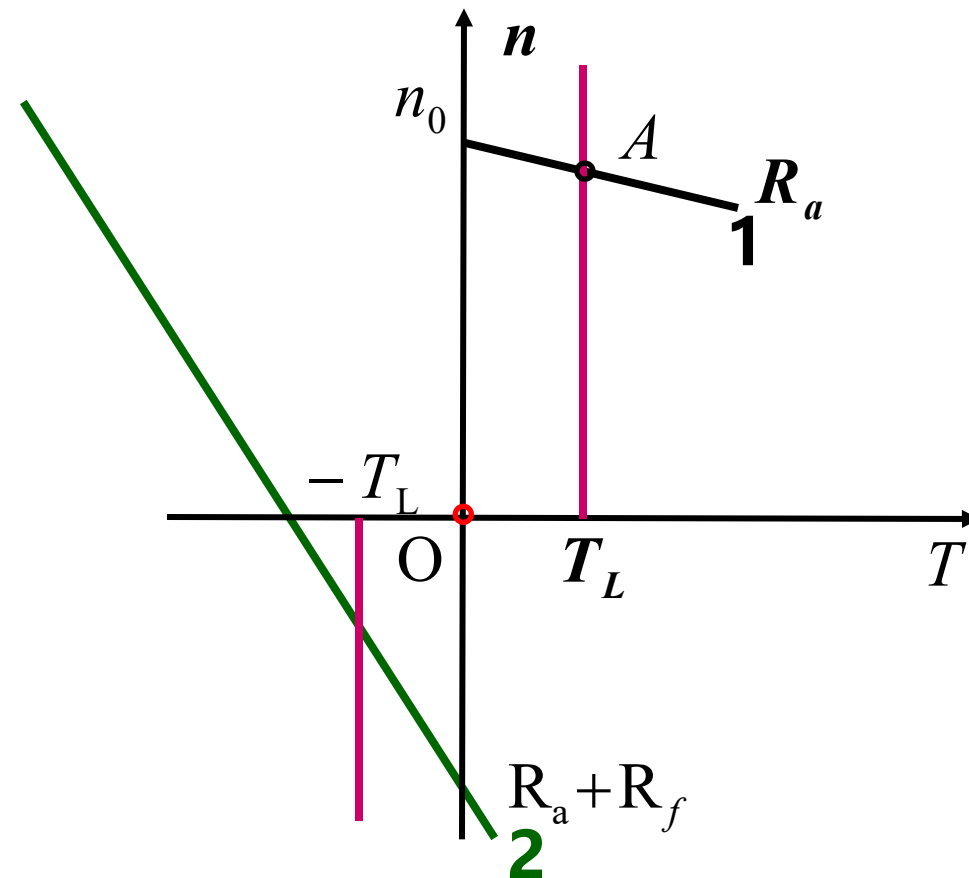
## 3、电压反接制动状态



## ②机械特性

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

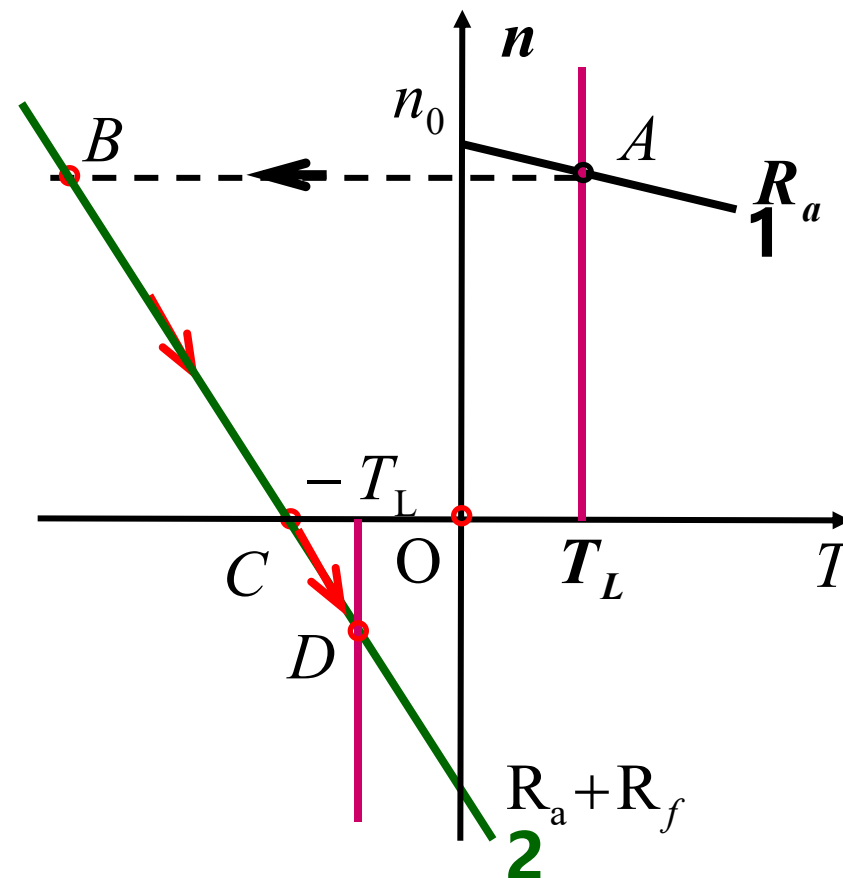
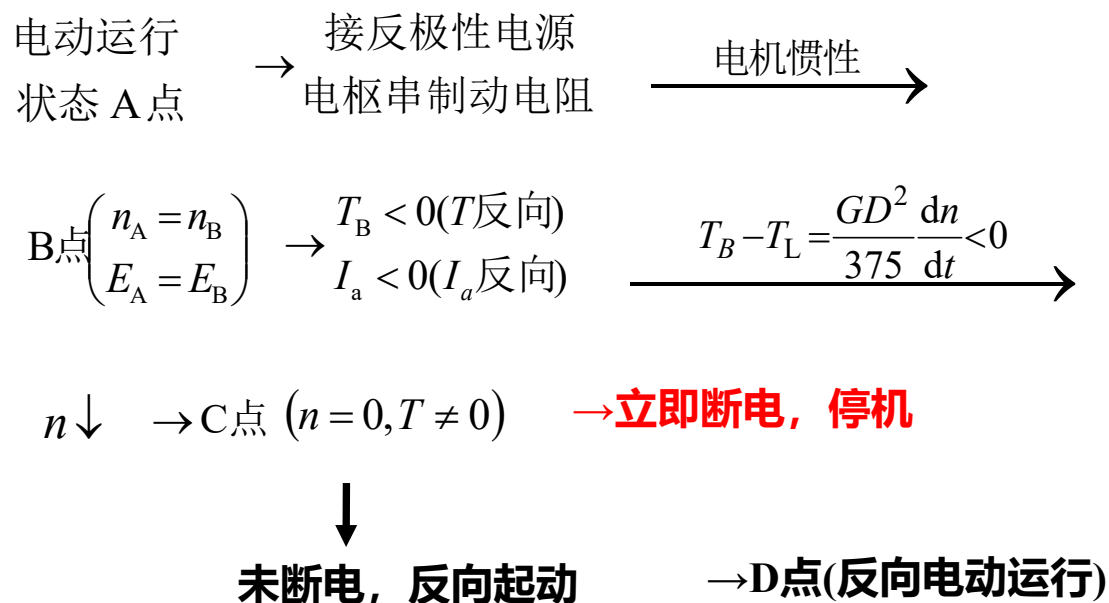
$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$



## 一、电压反接制动

## 3、电压反接制动状态

③电压反接制动原理（电动机带摩擦类恒转矩负载）





## 一、电压反接制动

### 3、电压反接制动状态

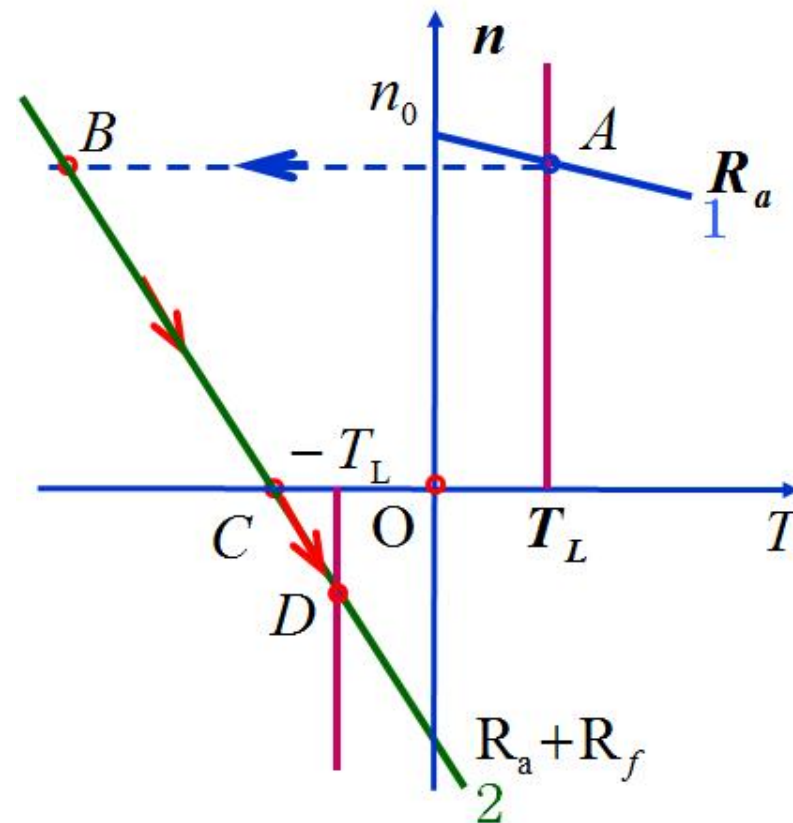
#### ④制动电阻的计算

选制动开始点B点计算：

$$U + E_{aB} = |I_a| (R_a + R_f)$$

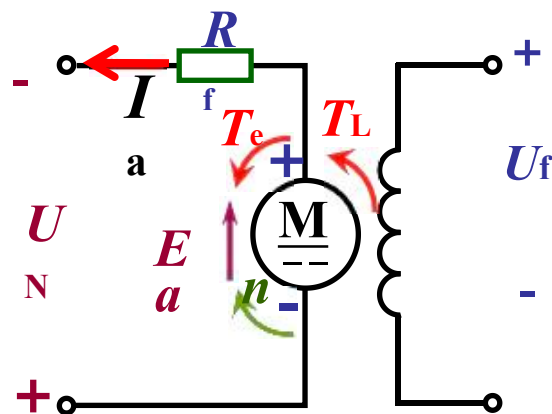
$$|I_a| = \frac{U + E_{aB}}{R_a + R_f} \leq \lambda_m I_N \quad (\lambda_m = 2.0 \sim 2.5)$$

$$\Rightarrow R_f \geq \frac{U + E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a$$



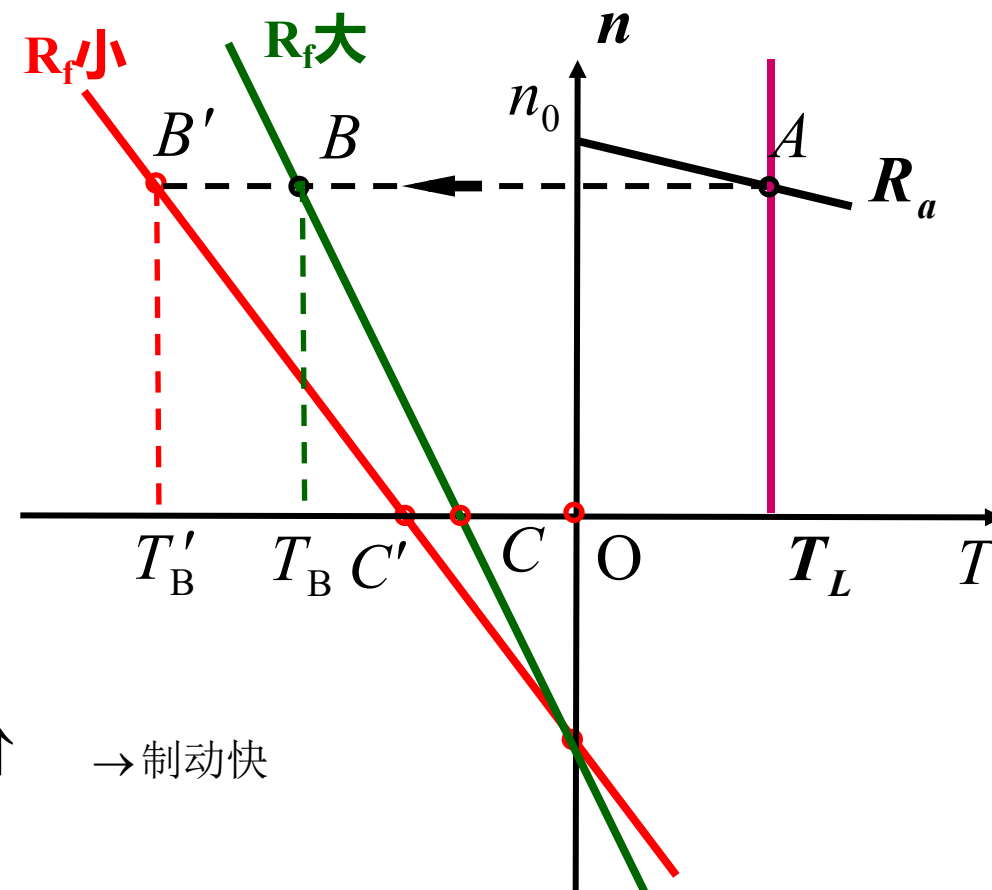
## 一、电压反接制动

## 3、电压反接制动状态



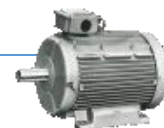
⑤制动效果

$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$



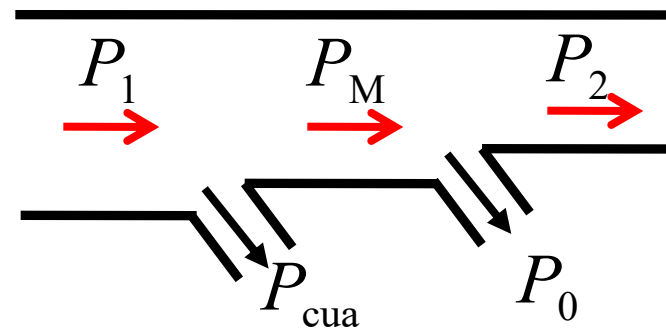
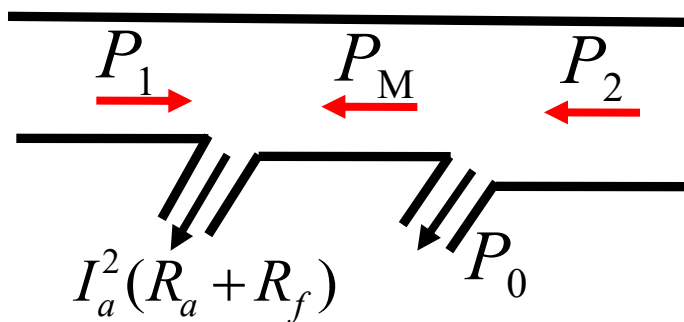
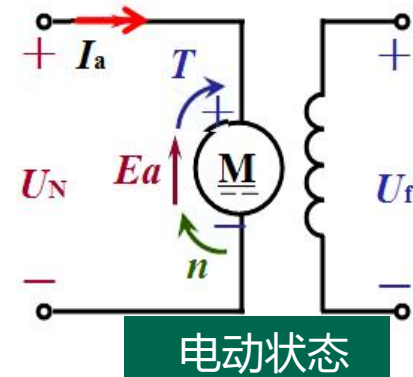
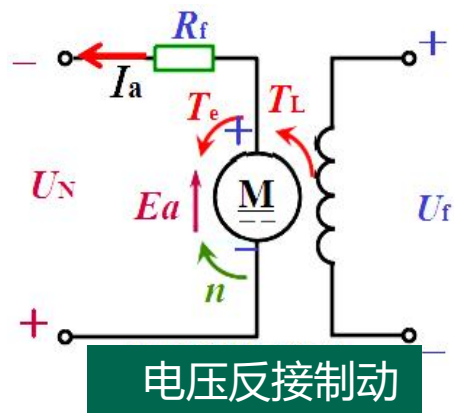
$$R_f \downarrow \rightarrow |I_a| \uparrow \rightarrow |T_B| \uparrow \xrightarrow{-|T_B| - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0} \left| \frac{dn}{dt} \right| \uparrow \rightarrow \text{制动快}$$

结论：制动电阻越小，制动越快，但  $R_f \geq \frac{U + E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a$



## 一、电压反接制动

## 4、功率关系



$$P_2 = 9.55 T_2 n < 0 \quad \text{电动机从轴上吸收机械功率}$$

$$P_1 = -U_N \cdot (-I_a) > 0 \quad \text{电动机从电网吸收电功率}$$

$$P_M = 9.55 T n = E_a I_a < 0 \quad \text{电动机将机械功率转化为电功率}$$

**电压反接制动：**从电源输入的电功率和从轴上输入的机械功率一起消耗在电枢回路电阻上。

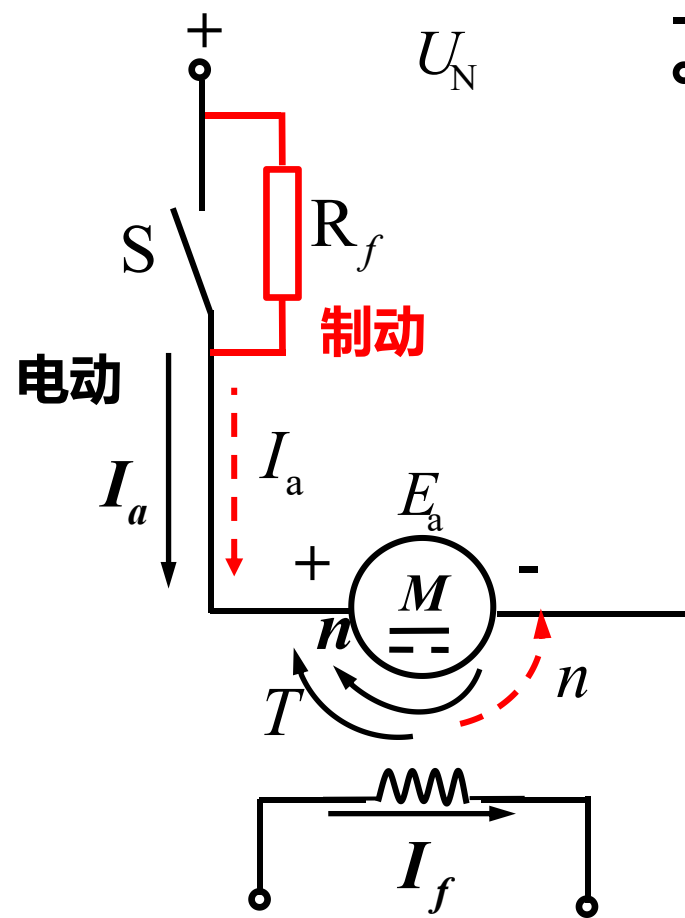


## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

- 1、**适用对象：**只适用于位能性恒转矩负载。
- 2、**方法：**制动时，保持励磁不变 $I_f=I_N$ ，在电枢回路中串入制动电阻 $R_f$ ,如下图所示。

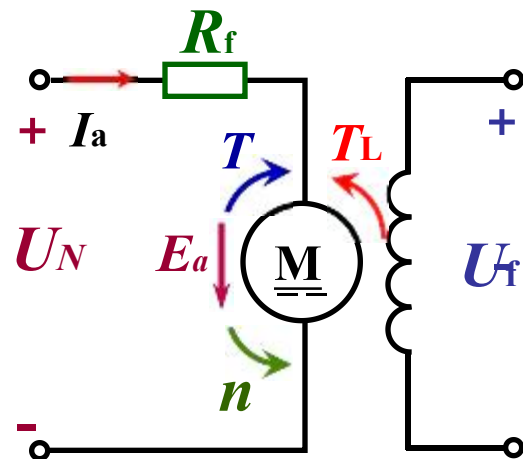
①开关S闭合，为电动状态。

②开关S断开，制动电阻串入电枢回路，为倒拉反转制动。



## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

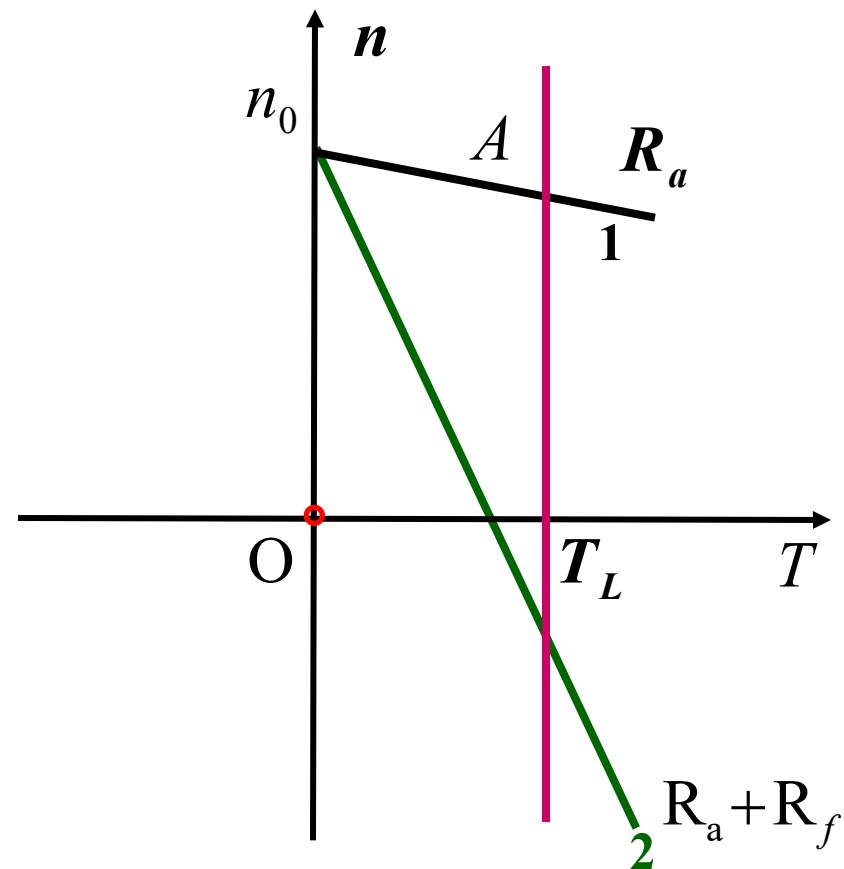
## 3、电路



## 4、机械特性

$$U_N = I_a (R_a + R_f) + E_a$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$



制动前，特性1

制动后，特性2（ $T_e$ 和 $I_a$ 始终没改变方向）



## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

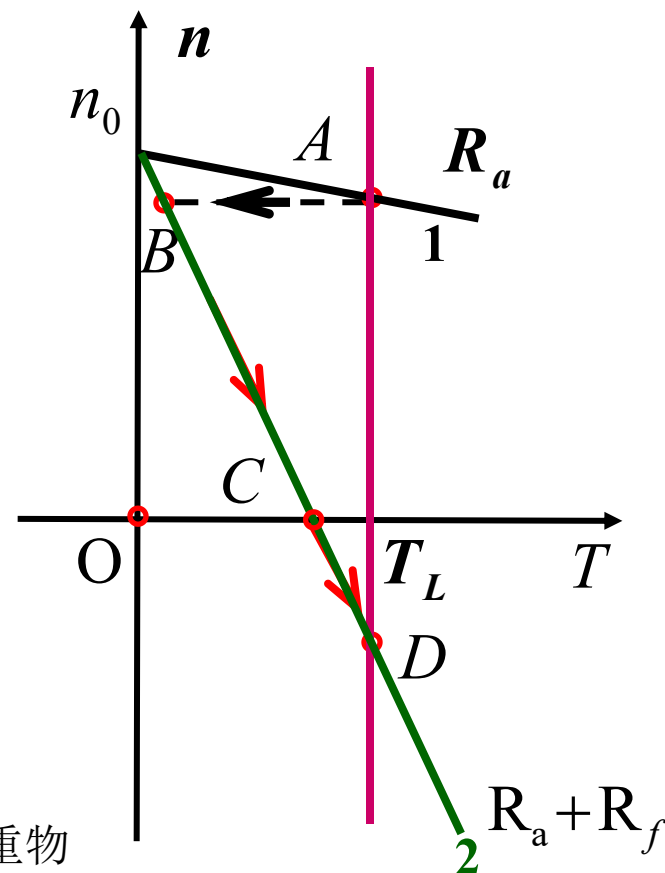
## 5、倒拉反转运行原理

电动运行  
状态 A 点  $\rightarrow$  电枢串制动电阻  $\xrightarrow{\text{电机惯性}}$  B 点  $\begin{pmatrix} n_A = n_B \\ E_A = E_B \end{pmatrix}$

$\rightarrow T_B < T_L \xrightarrow{T_B - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0} n \downarrow \rightarrow$  C 点  $(n = 0, T_C < T_L)$

$\xrightarrow{T_C - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0} n < 0, |n| \uparrow, \text{反向起动} \rightarrow |E_a| \uparrow, E_a < 0$

$\xrightarrow{U_N = -|E_a| + I_a(R_a + R_f)} I_a \uparrow, T \uparrow \rightarrow$  D 点  $(T_D = T_L)$ ，匀速下放重物



D点：倒拉反转运行点



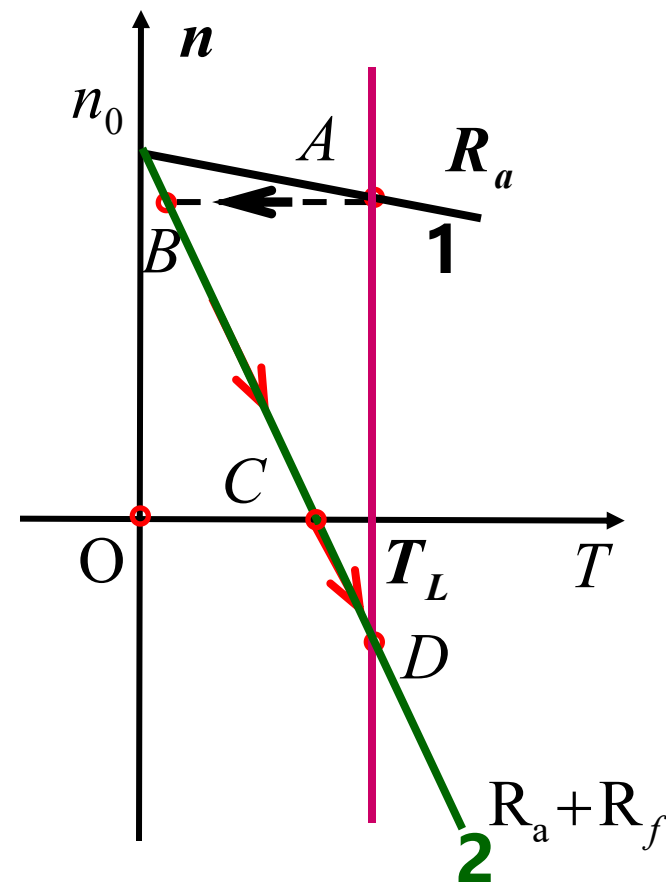
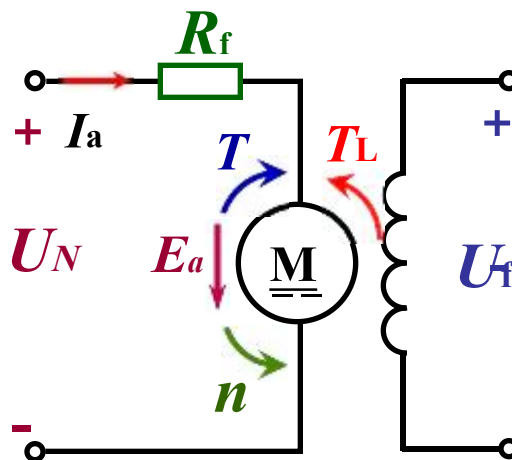
## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

## 6、制动电阻的选择

选倒拉反转运行D点计算（各量取绝对值）：

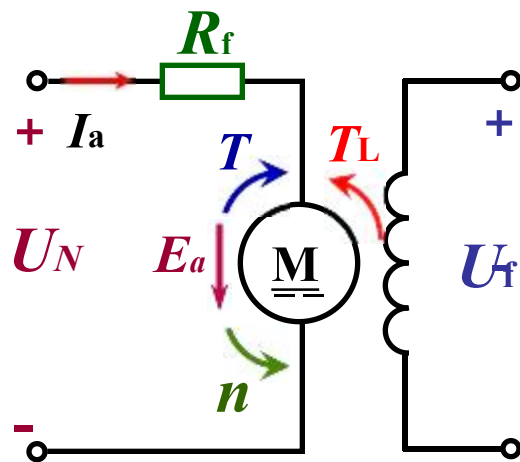
$$U + E_{aD} = I_{aD} (R_a + R_f)$$

$$R_f = \frac{U + E_{aD}}{I_{aD}} - R_a$$

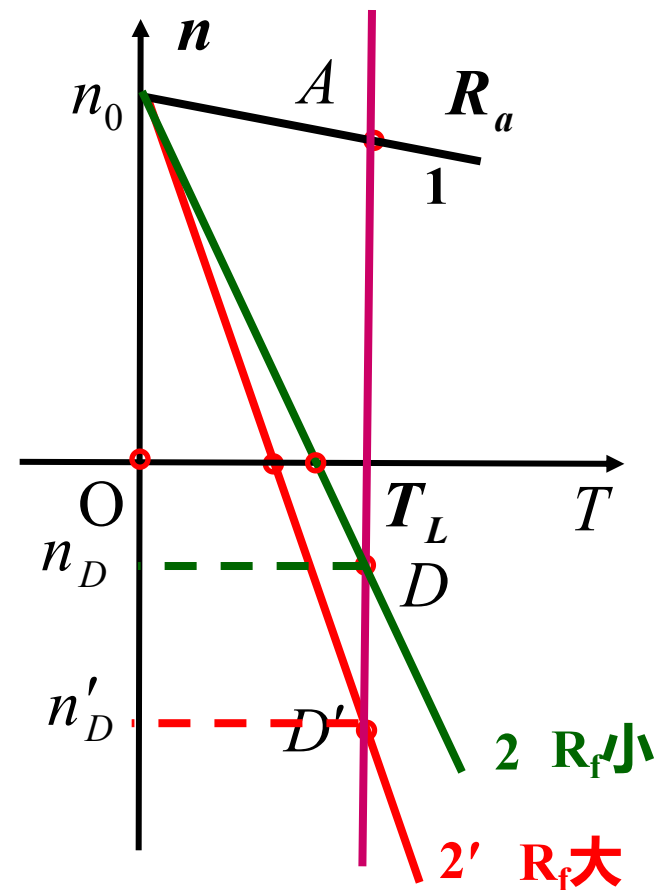


## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

## 7、制动效果



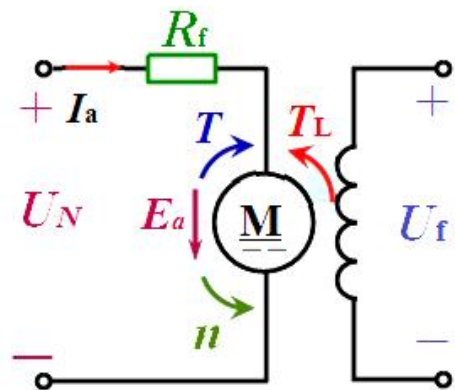
$$R_f \uparrow \quad \xrightarrow{n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_f}{C_e C_T \Phi_N^2} T}$$

特性斜率越陡 $\uparrow$   $\rightarrow$ 下放速度 $\uparrow$ **结论：制动电阻越大，下放重物越快。**

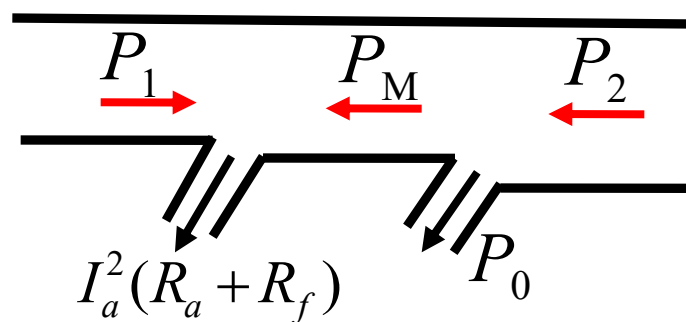


## 二、倒拉反转运行（转速反向的反接制动）

## 8、功率关系：



倒拉反转运行

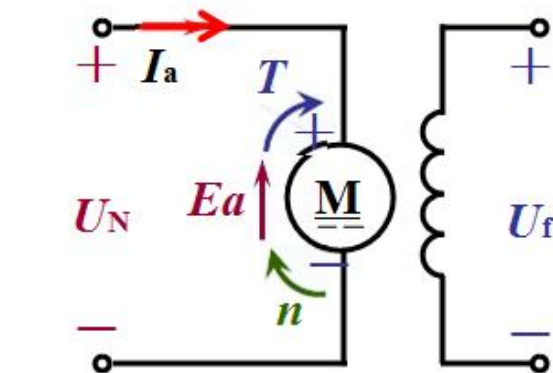


$$P_2 = 9.55 T_2 n < 0$$

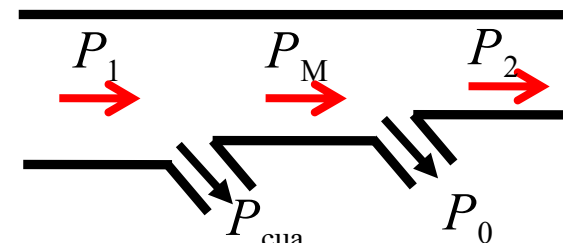
电动机从轴上吸收机械功率（位能减小）

$$P_M = 9.55 T n = E_a I_a < 0$$

电动机将机械功率转化为电功率



电动状态



$$P_1 = -U_N \cdot (-I_a) > 0$$

电动机从电网吸收电功率

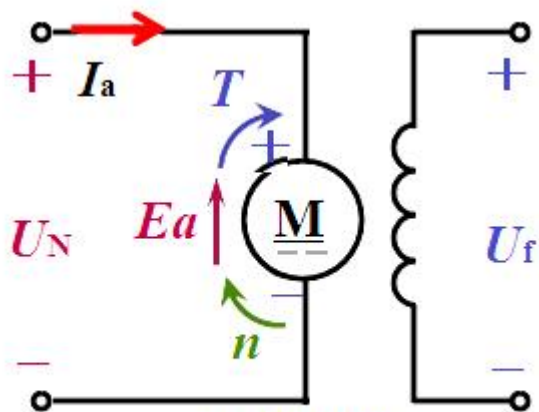
**倒拉反转运行：**从电源输入的电功率和从轴上输入的机械功率一起消耗在电枢回路电阻上。和电压反接制动功率关系相同，因此又称转速反向的反接制动。



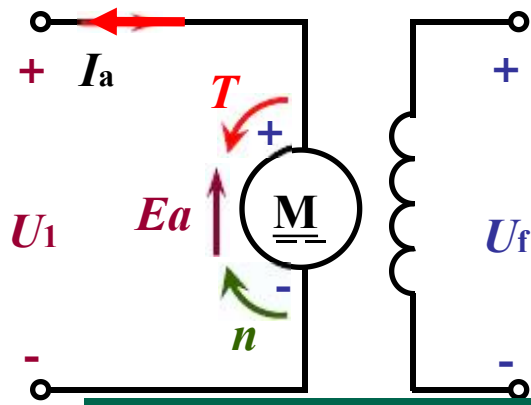
特点:  $|n| > |n_0| \rightarrow E_a > U$ , 电动机处于发电状态, 动能转换为电能回馈电网。

## 一、正向回馈制动过程

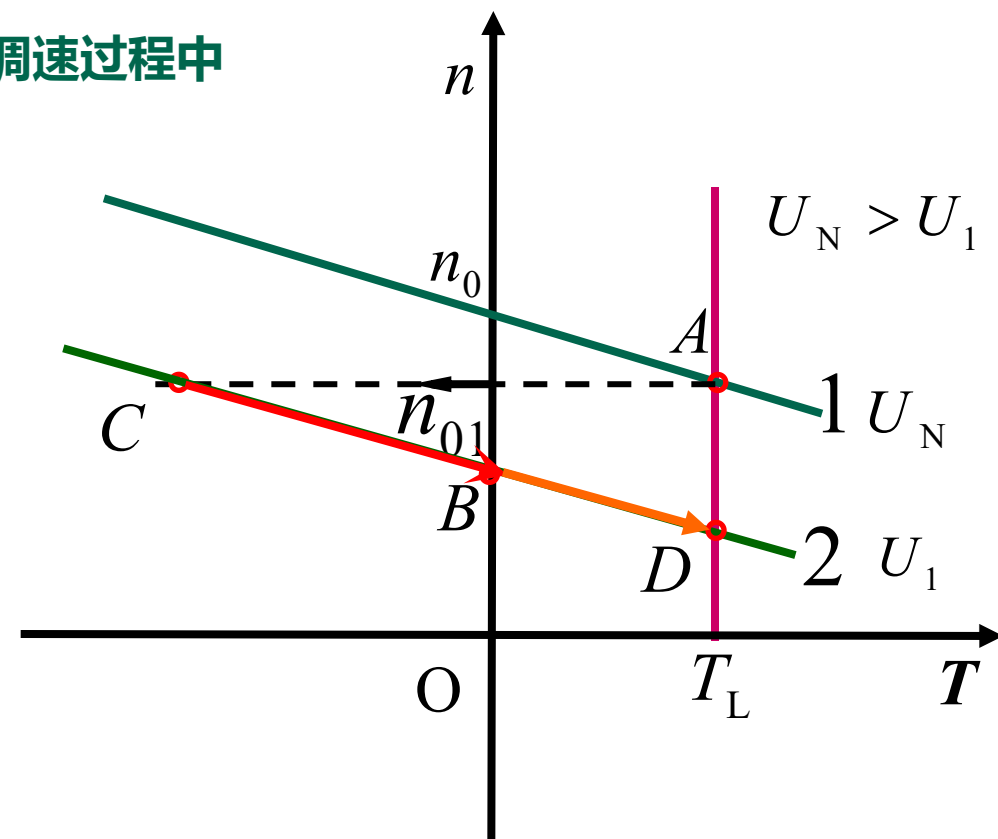
### 1、在降低电枢电压调速过程中



电动状态



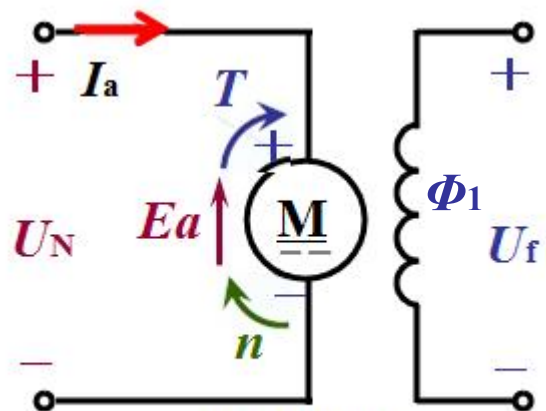
正向回馈制动过程



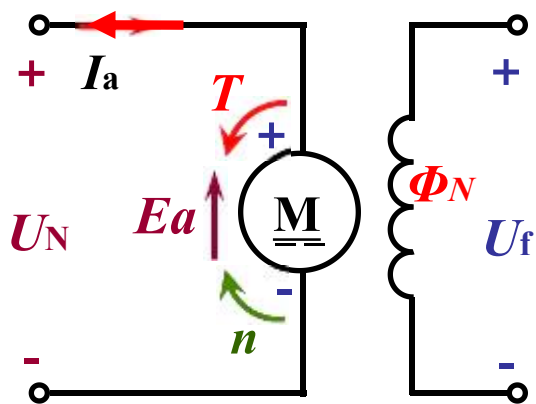
回馈制动时由于有功率回馈到电网, 因此与能耗和反接制动相比, 回馈制动是比较经济的。



## 一、正向回馈制动过程

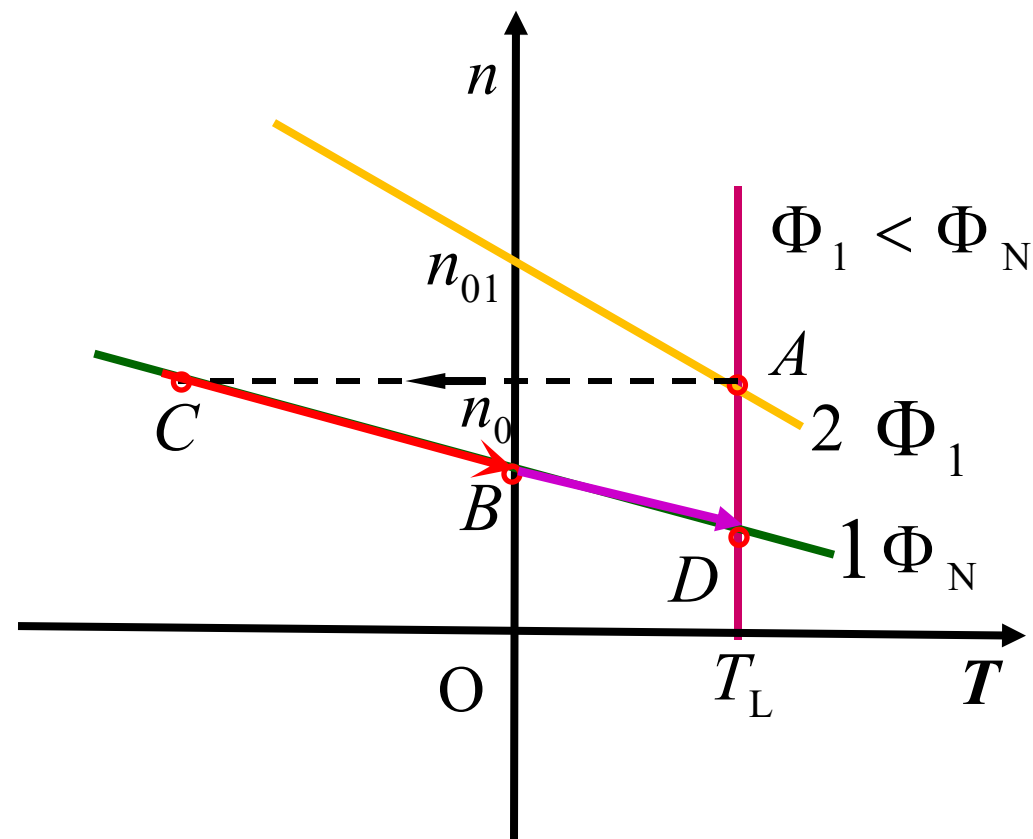


电动状态



正向回馈制动过程

## 2、在增加励磁磁通调速过程中



## 二、正向回馈制动运行——电车上坡

(1) 平地或上坡行驶时，工作在A点；

(2) 下坡行驶时，工作在B点。

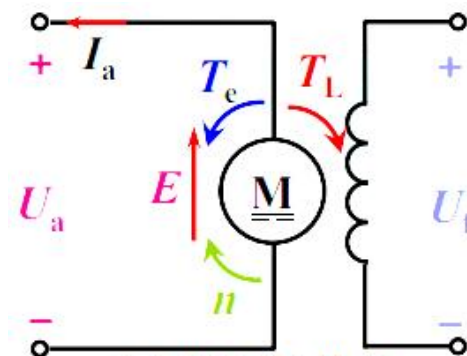
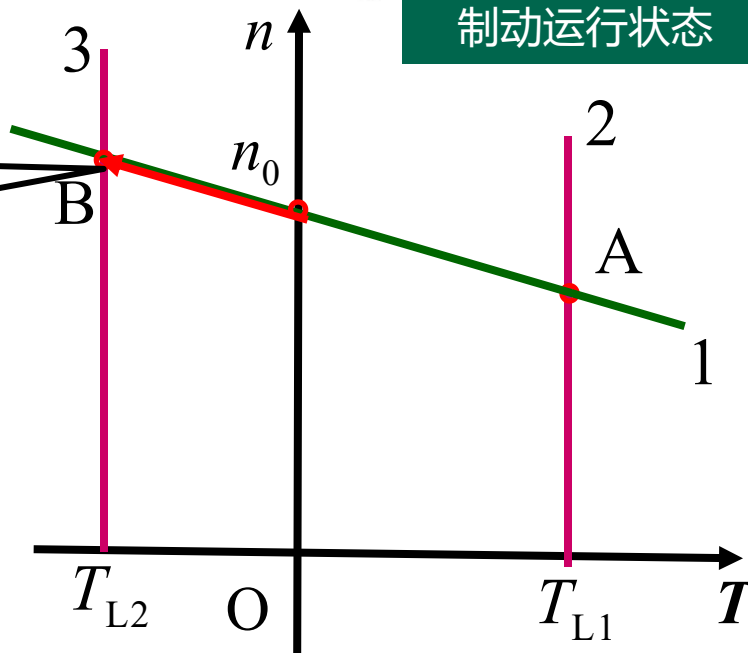
$$T_{L1} \xrightarrow{T_L \text{ 反向}} T_{L2}$$

$$\xrightarrow{T - T_{L2} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} > 0} n \uparrow \rightarrow n > n_0$$

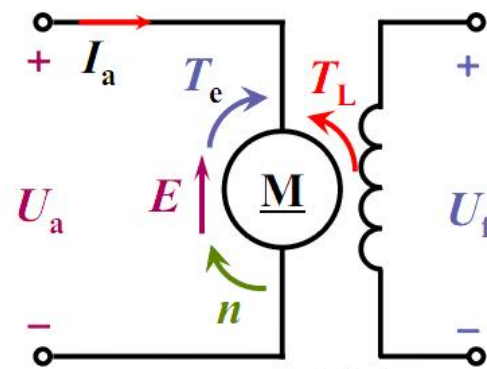
$$\rightarrow E > U_N \rightarrow I_a, T < 0 (I_a, T \text{ 均反向})$$

$$\xrightarrow{T - T_{L2} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} > 0} n \uparrow \rightarrow \text{B点 } (T_B = T_{L2}), \text{ 匀速下坡。}$$

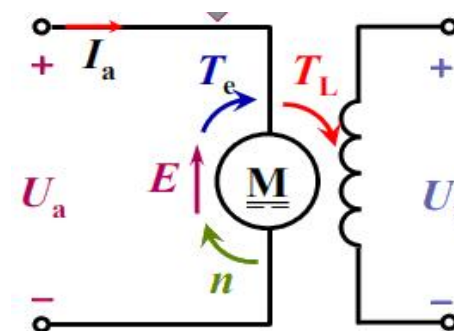
正向回馈  
制动运行



制动运行状态



电动状态



电车上坡

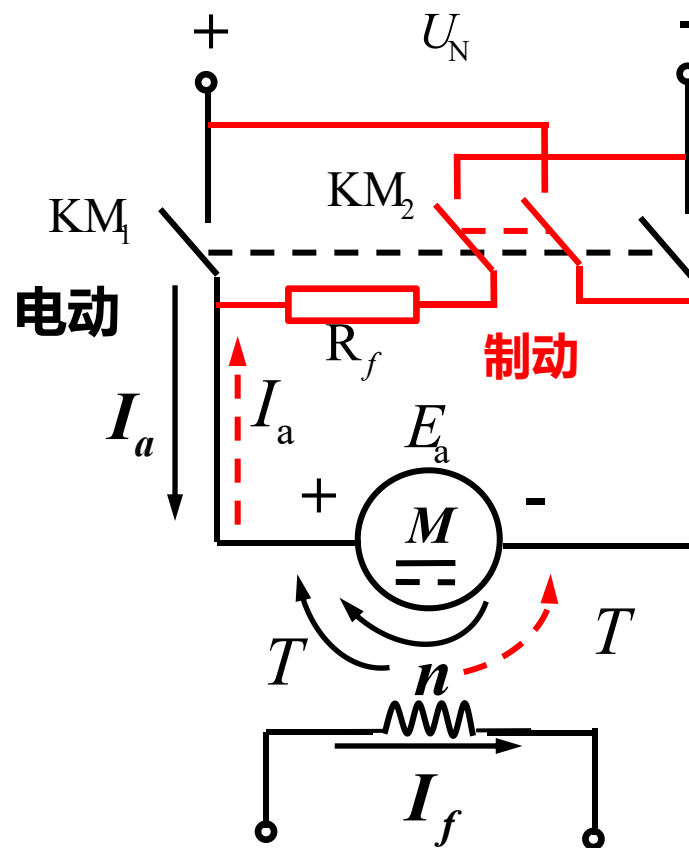


### 三、反向回馈制动运行

**1、方法：**电动机带位能性负载电动运行，制动时，保持励磁不变 $I_f=I_N$ ，接上极性相反的电源电压，并在电枢回路中串入制动电阻 $R_f$ ，如下图所示。

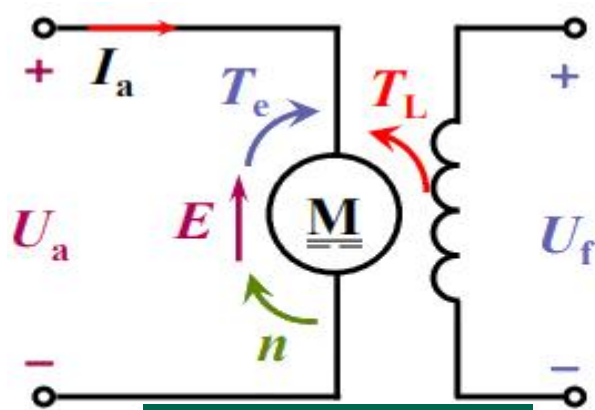
①开关KM1闭合，开关KM2断开，为电动状态。

②开关KM1断开，开关KM2闭合，为电压反接制动状态。

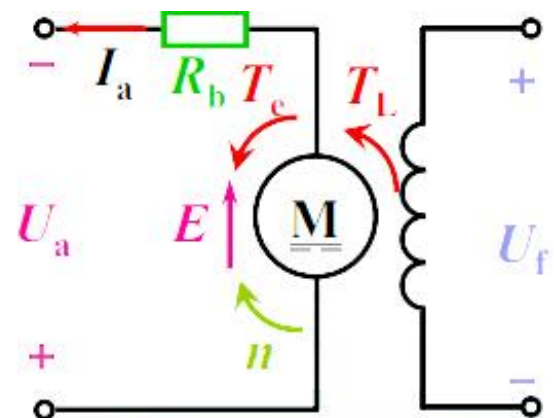


## 三、反向回馈制动运行

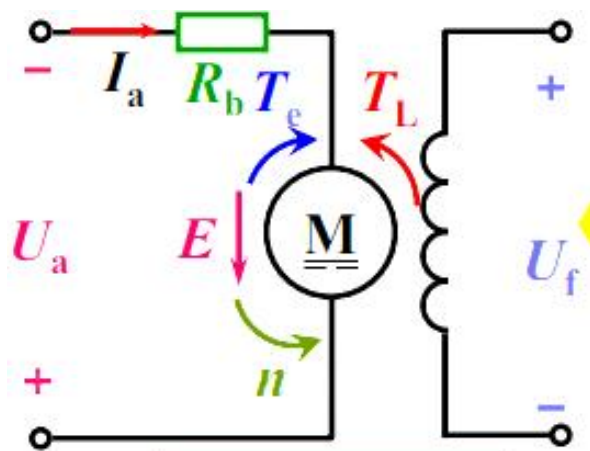
## 2、电路



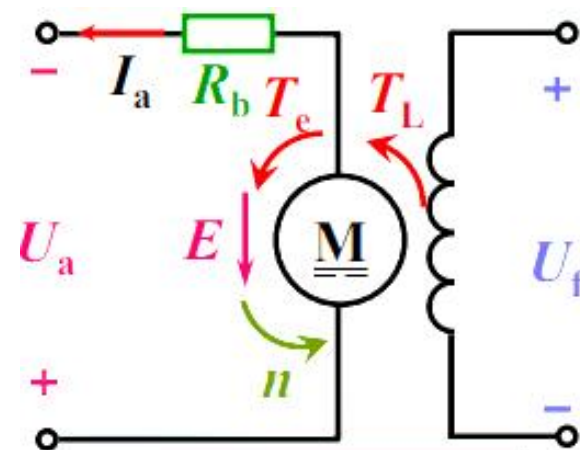
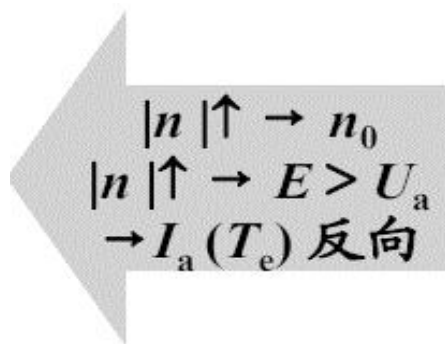
电动状态



制动状态



制动状态

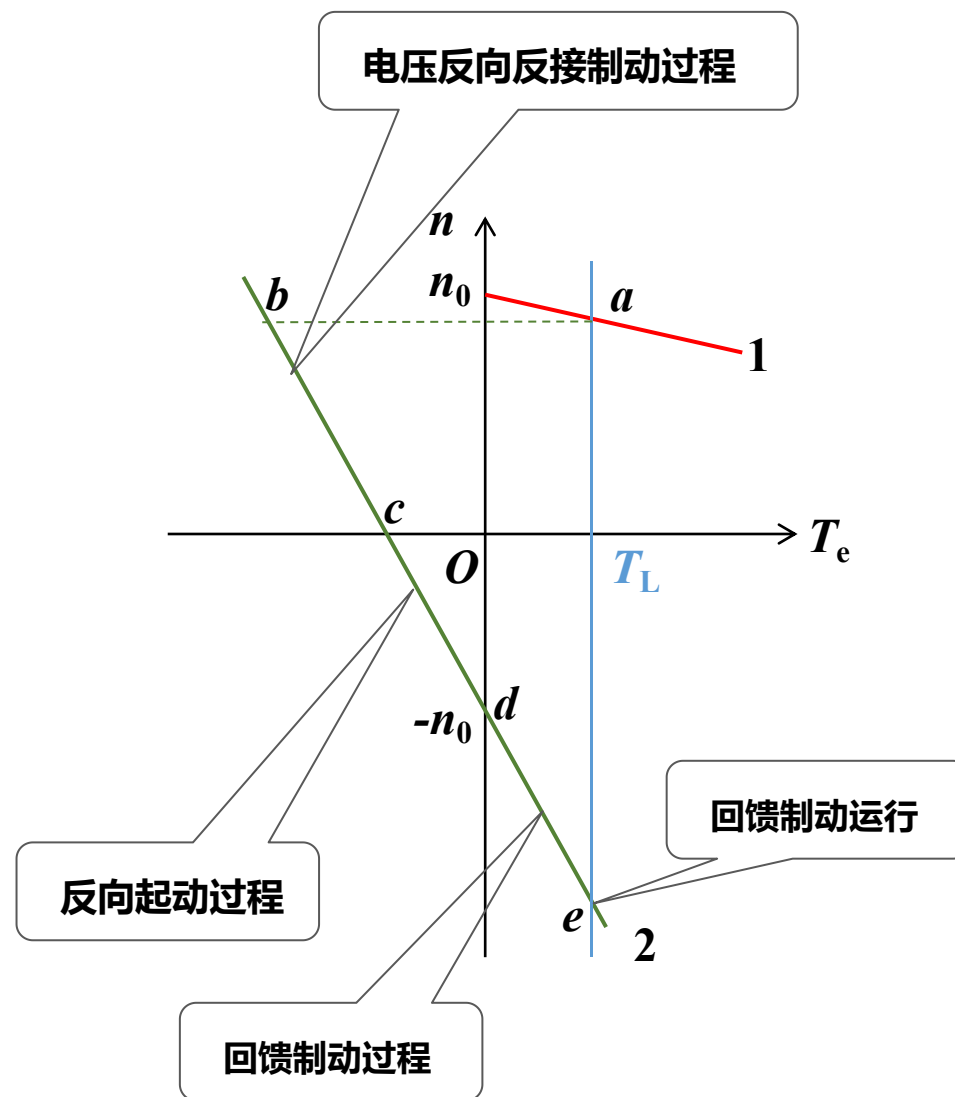
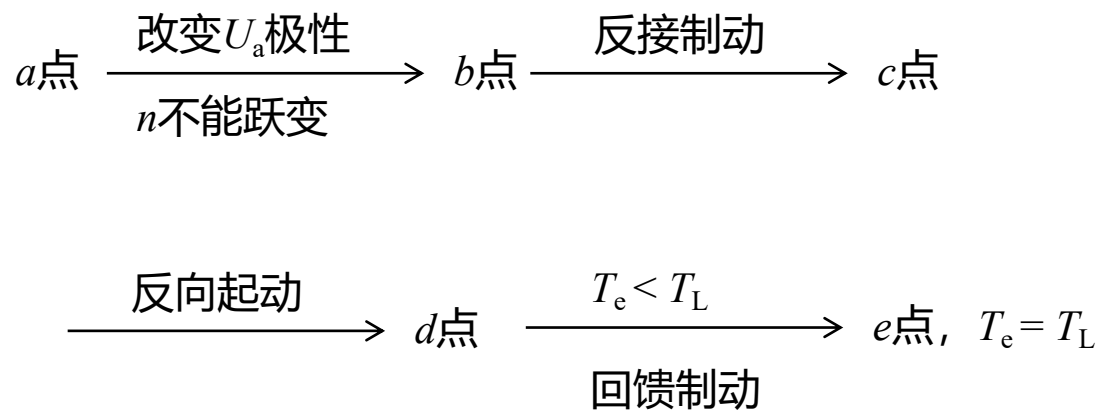


反向起动



## 三、反向回馈制动运行

## 3、制动分析



## 总结：各种制动方法的比较

## 1、直流电动机各种运行状态的基本方程

$$(1) \text{ 电压方程 } U = E + I_a R_a \quad (2) \text{ 机械特性方程 } n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

## 2、使用上述公式时的注意事项

## (1) 外部条件的改变

- ① 能耗制动时,  $U=0$ ,  $n_0=0$ ;
- ② 电源反接时, 以 $-U$ 代替 $U$ , 以 $-n_0$ 代替 $n_0$ ;
- ③ 倒拉反转和正向回馈没有改变电源的极性,  $U$ 和 $n_0$ 的符号不变;
- ④ 反向回馈制动运行(重物下放), 以 $-U$ 代替 $U$ , 以 $-n_0$ 代替 $n_0$ 。

## (2) 机械特性曲线图

在计算某一运行点(过渡状态或稳定状态)的转速或电阻值, 应先画出机械特性曲线图, 找出运行点, 才能正确运用公式。

## (3) 运行点象限

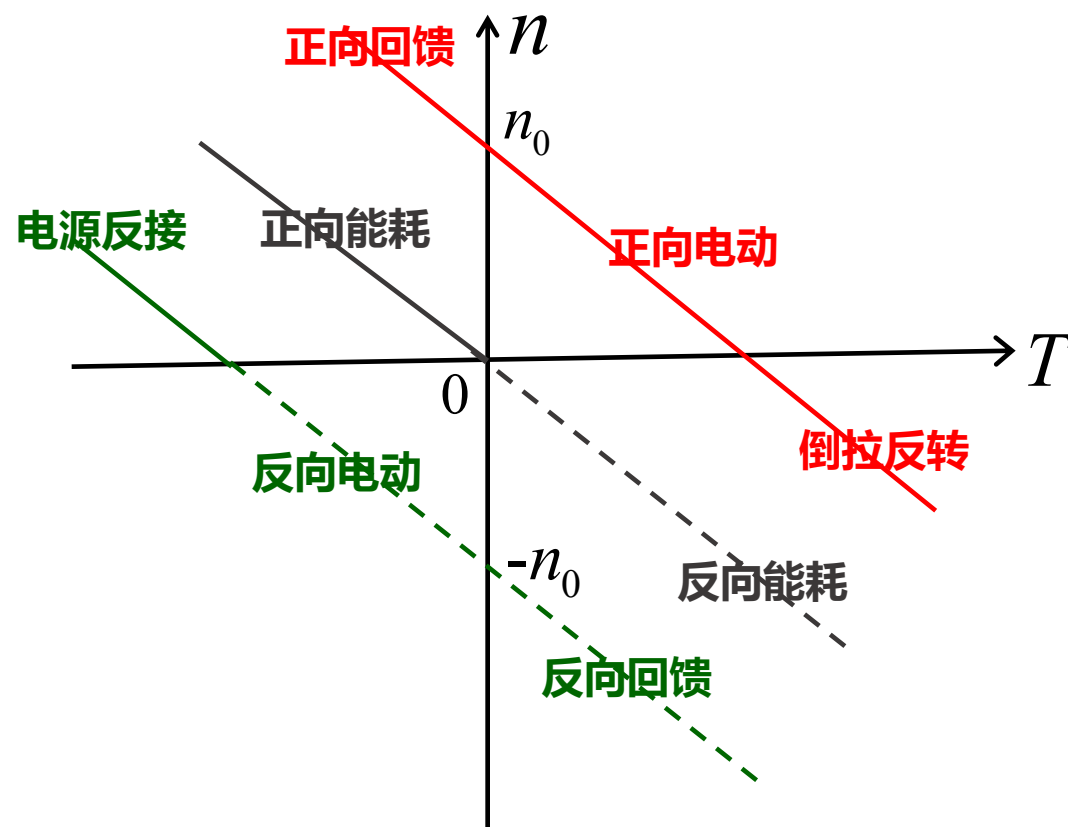
注意运行点所在的象限, 判别  $n(E_a)$  和  $I_a(T)$  的正负。





## 总结：各种制动方法的比较

## 3、各种运行状态的机械特性图



(1) 能耗制动时,  $U=0$ ,  $n_0=0$ ;

(2) 电动机接到电网上, 按规定正方向运行,  
 $n_0=U/C_e\Phi$  特性向上平移至  $n_0$ , 得红色直线

(3) 如将电源反接, 则特性向下移至  $-n_0$ ,  
得绿色直线。



#### 总结：各种制动方法的比较

#### 4、各种制动的作用

##### (1) 能耗制动和电源反接制动

- 电动机转速有运行值下降到0，属于刹车过程；
- 在制动过程中没有稳定运行点。

##### (2) 重物下放的倒拉反转制动和回馈制动

- 起止限速的作用，与稳定的工作点。

#### 5、制动状态下电动机作为发电机运行

##### (1) 能耗制动

- 电动机变为独自向电枢电路电阻供电的发电机；

##### (2) 回馈制动

- 电动机变为与电网并联的发电机，向电网反馈电能；

##### (3) 反接制动

- 电动机变为与电网串联的发电机，
- 与电网共同对电枢电路电阻供电。



#### 总结：各种制动方法的比较

#### 6、各种制动的优缺点及应用场合

##### (1) 能耗制动

优点：

- 平稳可靠；控制线路简单；转速减到零时，制动转矩也为零，便于准确停车。

缺点：

- 制动转矩随转速成正比地减小，影响制动效果。

适用范围：

- 用于不可逆运行，制动减速要求较平稳的情况下。

##### (2) 回馈制动

优点：

- 不需要改接线路；电能可回馈电网，简单可靠而经济。

缺点：

- 制动只能出现在 $n > n_0$ 时，应用范围较窄。

适用范围：

- 用于位能性负载的稳定高速下降；降压、增磁调速过程中可能出现。

##### (3) 反接制动

优点：

- 制动过程中，制动转矩较恒定，制动效果较强烈，效果好。经济。

缺点：

- 需从电网吸收大量电能，不经济；转速为零时不及时切断电源会反向加速。

适用范围：

- 用于要求迅速反转的场合；倒拉反转制动可用于吊车较慢稳定下放重物。



**【例】** 一台他励直流电动机铭牌数据为：  $P_N = 22\text{kW}$ ，  $U_N = 220\text{V}$ ，  $I_N = 115\text{A}$ ，  $n_N = 1500\text{r/min}$ ， 电枢回路电阻  $R_a = 0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩  $T_0$ ， 电动机带  $T_L = 0.9T_N$ 运行时， 要求  $I_{\max} \leq 2I_N$ ， 若运行于正向电动状态， 要求计算：

- (1) 负载为反抗性恒转矩， 采用能耗制动过程停车时， 电枢回路应串入的制动电阻的最小值是多少？
- (2) 负载为位能性恒转矩， 忽略传动机构损耗， 要求电动机以  $-200\text{r/min}$  匀速下放重物， 采用能耗制动， 电枢回路应串入的制动电阻值是多少？ 该电阻上的功率损耗是多少？
- (3) 负载同 (1)， 采用反接制动停车， 电枢回路应串入的制动电阻的最小值是多少？
- (4) 负载同 (2)， 电动机以  $-1000\text{r/min}$  匀速下放重物， 采用倒拉反转运行， 电枢回路应串入的制动电阻值是多少？ 该电阻上的功率损耗是多少？
- (5) 负载同 (2)， 采用反向回馈制动， 电枢回路串  $0.2\Omega$  电阻， 电动机的转速是多少？



解：(1) 反抗性恒转矩负载能耗制动过程中应串入的电阻：

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139 \text{V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

$$\text{理想空载转速: } n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1582.7 \text{r/min}$$

$$\text{额定转速降落: } \Delta n_N = n_0 - n_N = 1582.7 - 1500 = 82.7 \text{r/min}$$

$$\text{额定运行状态的感应电动势: } E_{aN} = C_e \Phi_N n_N = 0.139 \times 1500 = 208.5 \text{V}$$

$$\text{负载转矩 } T_L = 0.9 T_N \text{ 时的转速降落: } \Delta n = \frac{0.9 T_N}{T_N} \Delta n_N = 0.9 \times 82.7 = 74.4 \text{r/min}$$

$$\text{负载转矩 } T_L = 0.9 T_N \text{ 时的转速: } n = n_0 - \Delta n = 1582.7 - 74.4 = 1508.3 \text{r/min}$$

$$\text{制动开始时的电枢感应电动势: } E_a = \frac{n}{n_N} E_{aN} = \frac{1508.3}{1500} \times 208.5 = 209.7 \text{V}$$

$$\text{能耗制动应串入的制动电阻最小值为: } R_{\min} = \frac{E_a}{I_{a\max}} - R_a = \frac{209.7}{2 \times 115} - 0.1 = 0.812$$



(2) 位能性恒转矩负载能耗制动过程中应串入的电阻及其功率损耗计算:

忽略传动机构损耗, 下放时的负载转矩:  $T_L = 0.9T_N$

负载电流:  $I_{a1} = \frac{T_L}{T_N} I_N = 0.9 \times 115 = 103.5$

转速为-200r/min时电枢感应电动势:  $E_{a1} = C_e \Phi_N n = 0.139 \times (-200) = -27.8V$

串入电枢回路的电阻 $R_1$ :  $R_1 = \frac{-E_{a1}}{I_{a1}} - R_a = \frac{27.8}{103.5} - 0.1 = 0.169\Omega$

$R_1$ 上消耗的功率:  $P_{R1} = I_{a1}^2 R_1 = (103.5)^2 \times 0.169 = 1813.3W$

(3) 反接制动过程中应串入的电阻最小值:  $R'_{\min} = \frac{U_N + E_a}{I_{\max}} - R_a = \frac{200 + 209.7}{2 \times 115} - 0.1 = 1.768\Omega$



(4) 位能性恒转矩负载倒拉反转运行中应串入的电阻及其功率损耗计算：

转速为-1000r/min时电枢感应电动势： $E_{a2} = C_e \Phi_N n = 0.139 \times (-1000) = -139\text{V}$

串入电枢回路的电阻 $R_2$ ： $R_2 = \frac{U_N - E_{a2}}{I_{a1}} - R_a = \frac{220 + 139}{103.5} - 0.1 = 3.369\Omega$

$R_2$ 上消耗的功率： $P_{R2} = I_{a1}^2 R_2 = (103.5)^2 \times 3.369 = 36089.6\text{W}$

(5) 位能性恒转矩负载反向回馈制动运行时，电枢回路串0.2Ω电阻，电动机转速为：

$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_3}{C_e \Phi_N} I_{a1} = \frac{-220}{0.139} - \frac{0.1 + 0.2}{0.139} \times 103.5 = -1806.1\text{r/min}$$



## 小结

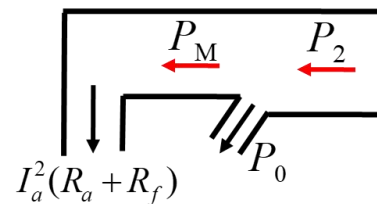
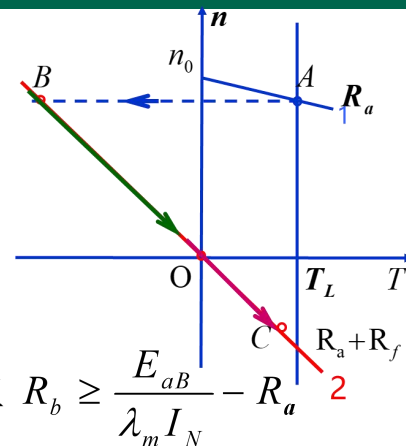
目的：快速停车、匀速下放重物

$$-|T_B| - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

$$0 = E_a + I_a (\mathbf{R}_a + R_f)$$

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

制动电阻和制动效果：制动电阻越小，制动越快，但  $R_b \geq \frac{E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a$



制动  
(他励)

## 分类

## 能耗制动

### 摩擦类恒转矩负载

### 位能性恒转矩负载

制动电阻和制动效果：制动电阻越小，制动越快，但  $R_b \geq \frac{E_{aB}}{\lambda_m I_N} - R_a$

## 反接制动

## 电压反接制动

倒拉反转运行 只适用于位能性恒转矩负载

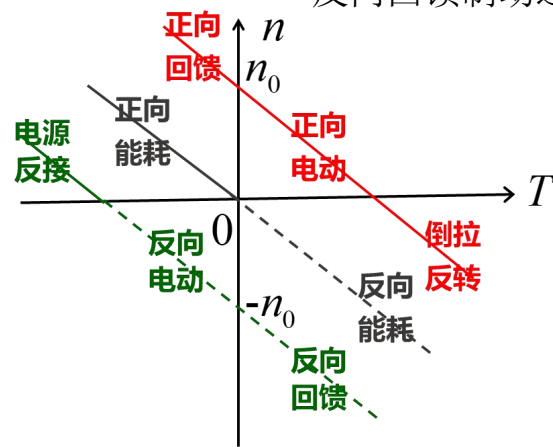
## 回馈制动

正向回馈制动过程 { 降低电压调速过程中  
增加励磁磁通调速过程中

### 正向回馈制动运行——电车上坡

**特点:**  $|n| > |n_0| \rightarrow E > U_a$ , 电动机处于发电状态, 动能转换为电能回馈电网。

### 反向回馈制动运行



## 对比