浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

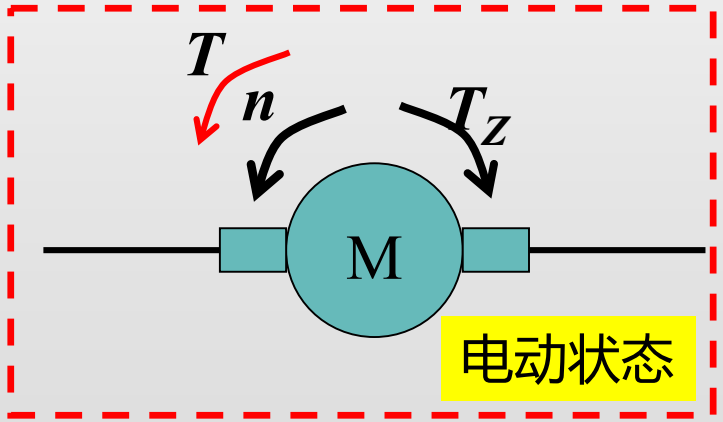
5

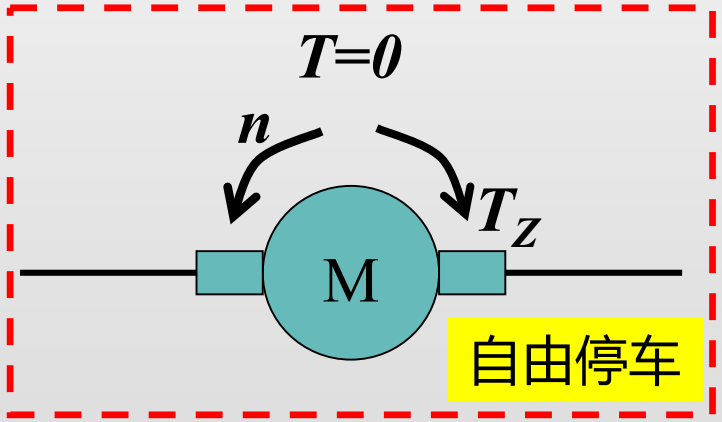
他励直流电动机的制动（上）

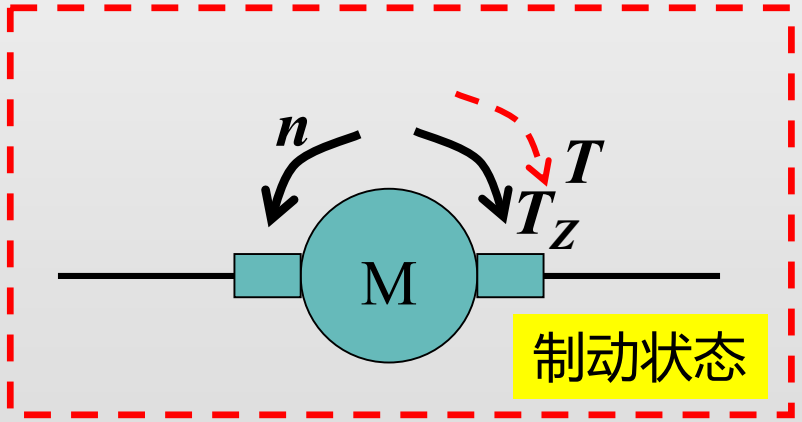
最简单的办法：断开电枢电源，在总负载转矩下，转速渐停至停机，称为“自由停车”

缺点：　　时间长（尤其是空载时）

某些场合要求：快速停车（或降速），或位能性负载以稳定的速度下放，这就要求在电机的轴上加一个与转向相反的制动转矩



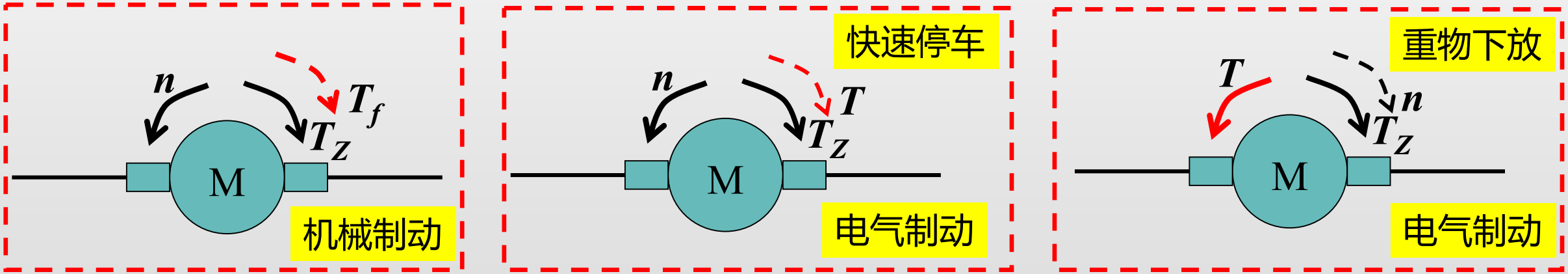




1. 最简单的办法：用机械动作刹车，依靠摩擦力

2. 抱闸制动，采用电磁制动器

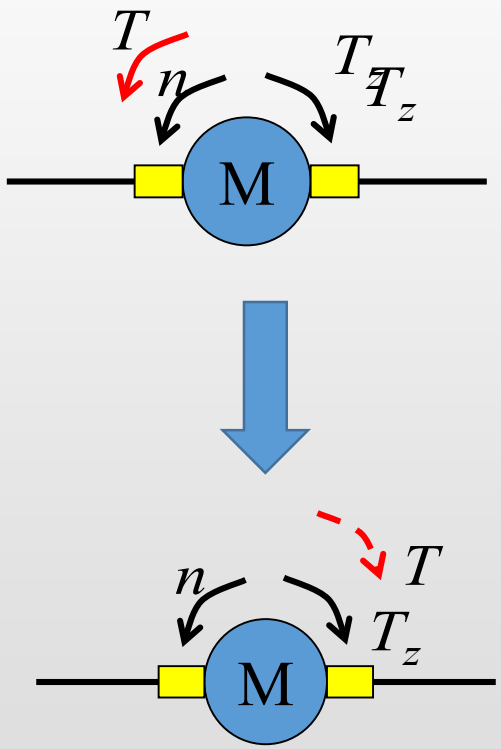
3. 最好的办法：电气制动 ，依靠电动机本身产生一个与转向相反的电磁转矩



制动状态的运行特点

1 轴上的机械能 ⇨ 电能（消耗在电机内部或反馈电网）

2 T与n方向相反



制动状态时电磁参数之间的关系

快速停车（降速):

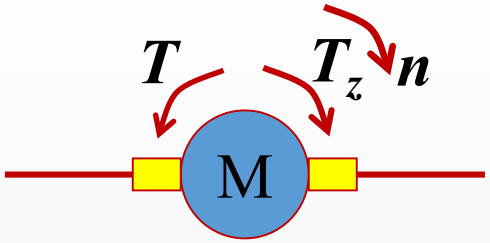
n方向与电动状态时相同,改变I_a的方向

$$\phi = c\left(I_f = c\right)$$

$$\therefore T = C_M \phi I_a \rightarrow \text{改变} I_a \text{的方向}, T\text{的方向改变}$$

位能性负载稳速下放:

n方向与电动状态时相反，I_a的方向与电动时相同



具体实现的方法：

- 能耗制动
- 反接制动
- 回馈制动

讨论前提： 各制动方式的物理过程与运行特性，仍采用原电动机状态的正方向规定

⇒ 基本方程式与机械特性表达式，各物理量的大小及正负，根据实际情况而定

例：位能性负载匀速下放

$n<0$ ⇒ $P_M = T\Omega < 0$ ⇒ 机械能 $\Rightarrow$ 电能

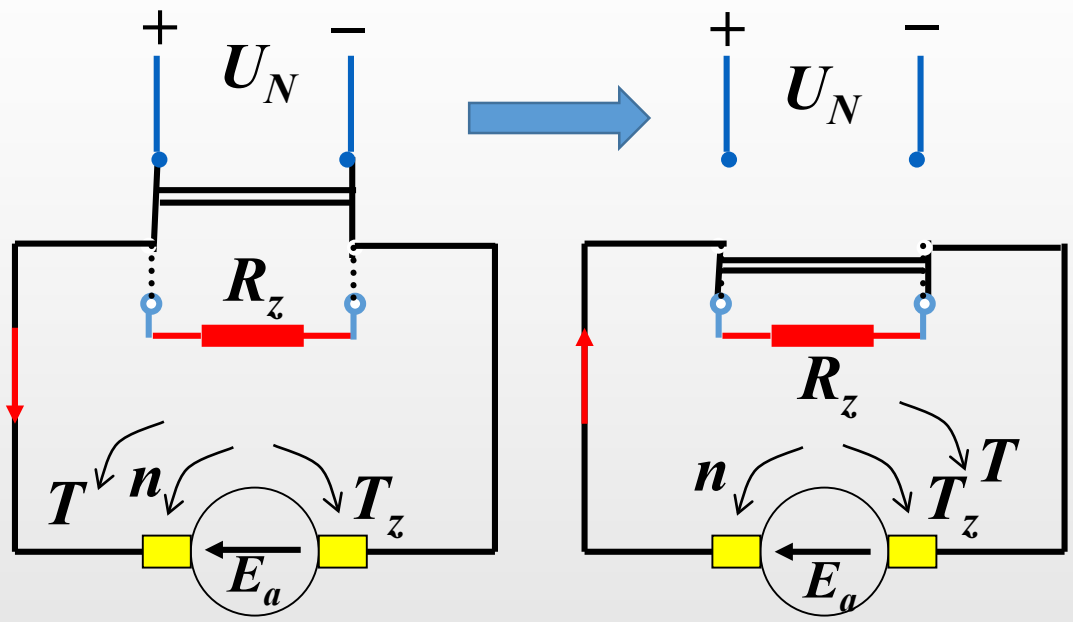
1. 原理及方法

励磁不变，把电动机的电枢脱离电网，而经过一个电阻R_z闭合

参数： $\phi = \phi_N, U = 0, R = R_a + R_z$

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

运行： 制动瞬间，n不变，I_a<0，T<0，系统在T_z与T共同制动下减速，直至停车



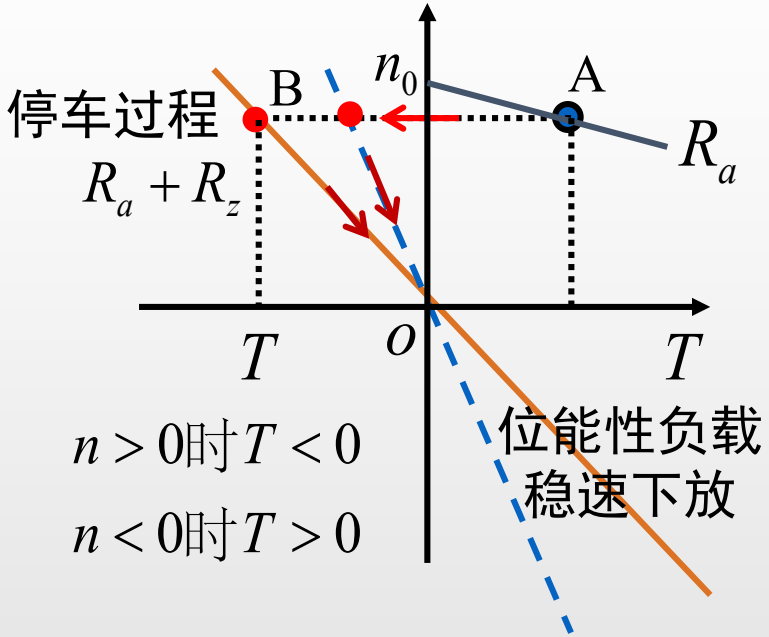
制动过程中，实际上成为一台他励直流发电机，把机械能转化为电能，消耗在电枢回路上，所以称为**能耗制动**

2. 机械特性

把能耗制动的参数特点，代入电动状态时的机械特性表达式即得到**能耗制动时机械特性**

$$n=-\frac{R_a+R_z}{C_eC_M\phi^2}\cdot T=-\beta_z\cdot T$$

R_z 影响能耗制动机械特性的斜率



（1）能耗制动停车过程

原先工作于A点 $\xrightarrow{\text{制动}}$ $n=n_A$，工作点变为B

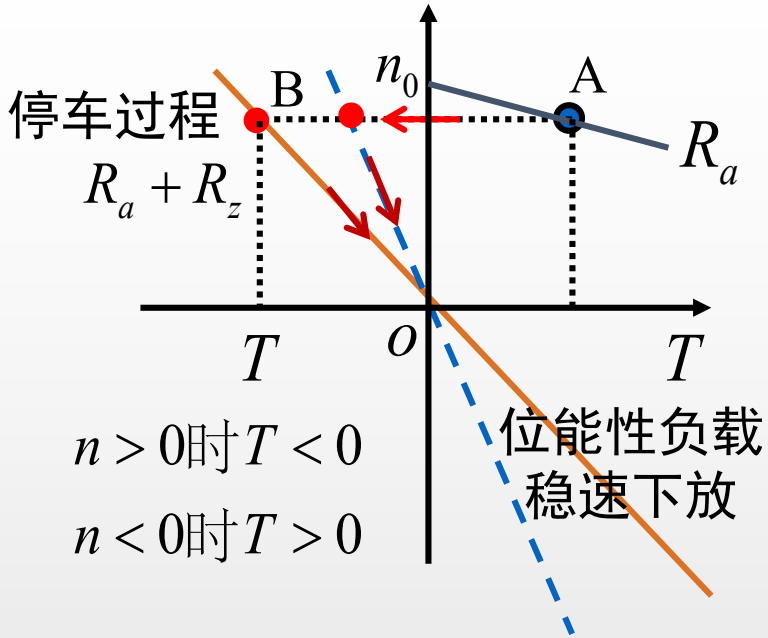
⇨ $T<0$，转速从n_A~0的过程方向不变，T_z的方向不变

⇨ 在T与T_z的共同作用下，系统很快减速 ⇨ 沿Bo段下移至$n=0$

$$E_A = U_N - I_N R_a \approx U_N$$

$$\therefore I_a = \frac{-E_A}{R_a + R_z} = -\frac{C_e \phi_N n_A}{R_a + R_z} \approx \frac{U_N}{R_a + R_z}$$

$$\therefore I_1 = I_B = -\frac{U_N}{R_a + R_z}$$



若R_z=0 ⇨ $I_1 \approx -\frac{U_N}{R_a}$ ⇨ **直接起动电流**

若R_z大 ⇨ I_1小 ⇨ $\beta_z = \frac{R_a + R_z}{C_e C_M \phi^2}$大 ⇨ $\bar{T}$小 ⇨ t长

若R_z小 ⇨ I_1大

R_z的作用：将制动瞬间的电流限制在允许范围内

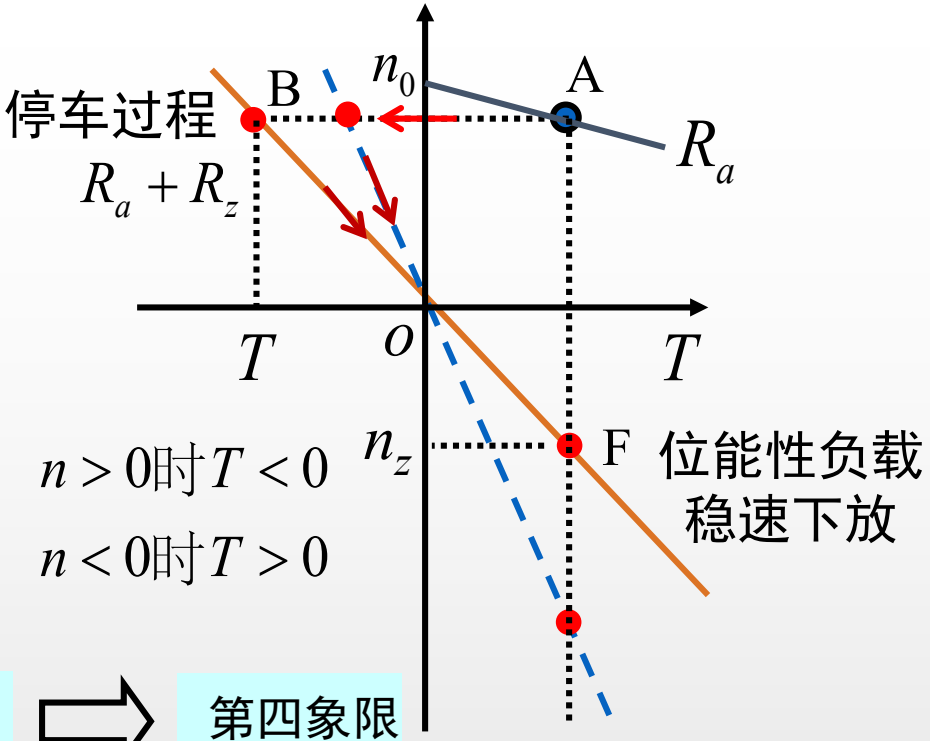
R_z的选择：取I_1=2I_N代入能耗特性表达式

分段切除制动电阻

$$n \downarrow \Rightarrow T \downarrow \Rightarrow \text{制动效果差} \Rightarrow \begin{cases} \text{电磁抱闸} \\ \text{切除电阻} \end{cases}$$

能耗制动的特点：$n=0, T=0$ ⇨

- 反抗性负载：系统可靠停车，不会重新起动
- 位能性负载稳速下放



（2）位能性负载稳速下放

$n=0, T_z\neq 0$，大小方向均不变 ⇨ 重物下降 ⇨ n<0，反向 ⇨ 第四象限

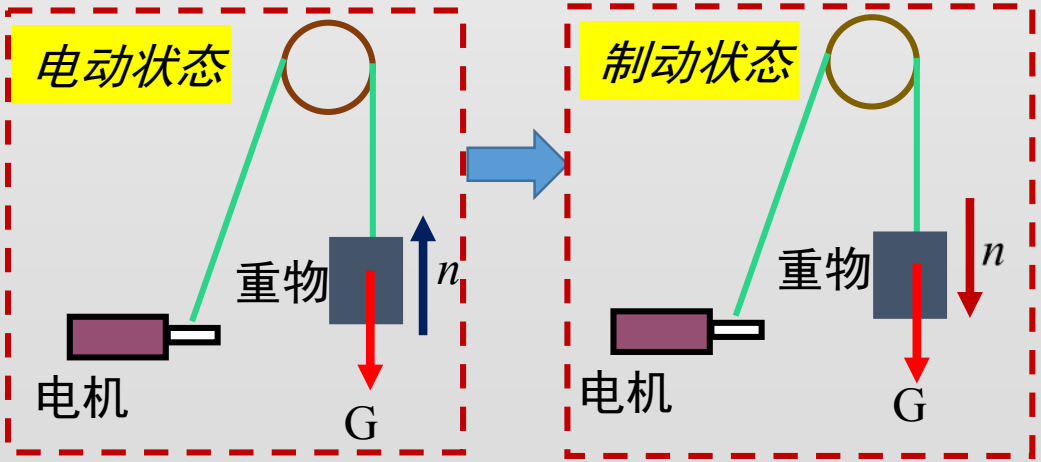
⇨ $T>0$，与电动状态一致 ⇨ 限制重物下放 ⇨ n上升

⇨ T增大 ⇨ F点，$T=T_z$，系统达到新的平衡

⇨ n_z稳速下放

$$n_z=-\frac{R_a+R_z}{C_eC_M\phi^2}\cdot T_z=-\frac{R_a+R_z}{C_e\phi}\cdot I_z$$

稳定时的电枢电流，不计传动机构的损耗



浙江大学电气工程学院

THANKS

主讲：浙江大学卢琴芬

5

他励直流电动机的制动（下）

二、反接制动

反接制动特点：

1）电动机的实际转向与其理想空载转速相反。

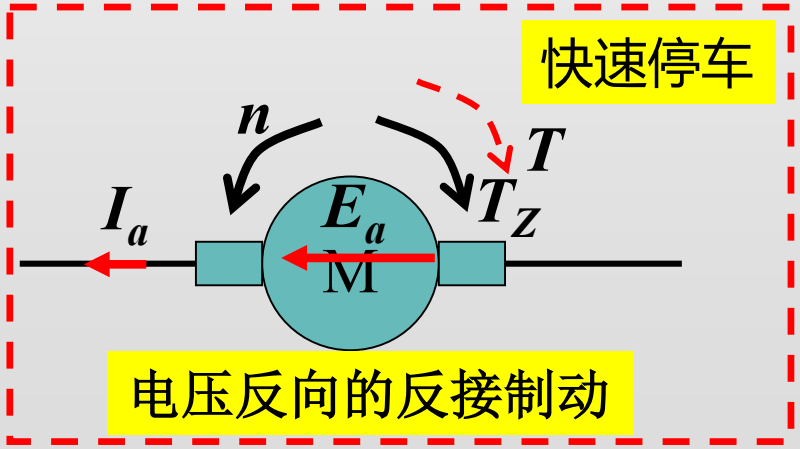
2）机械能变为电能：

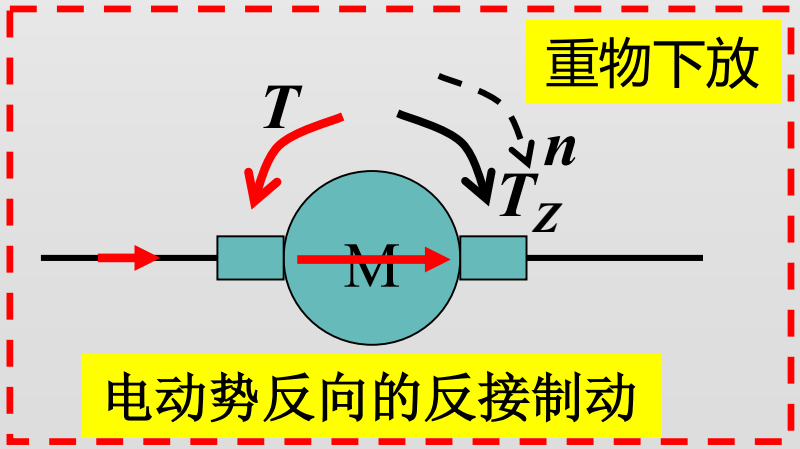
方法：

电动机的外加电枢电压与感应电动势的方向在外界的作用下由相反变为相同

在反接制动中，把改变电枢电压的方向所产生的反接制动称为电压反向的反接制动；

而把改变电枢电动势的方向所产生的反接制动称为电动势反向的反接制动。





（1）电压反向的反接制动（用于快速停机)

电动状态：开关K闭合接上电压U

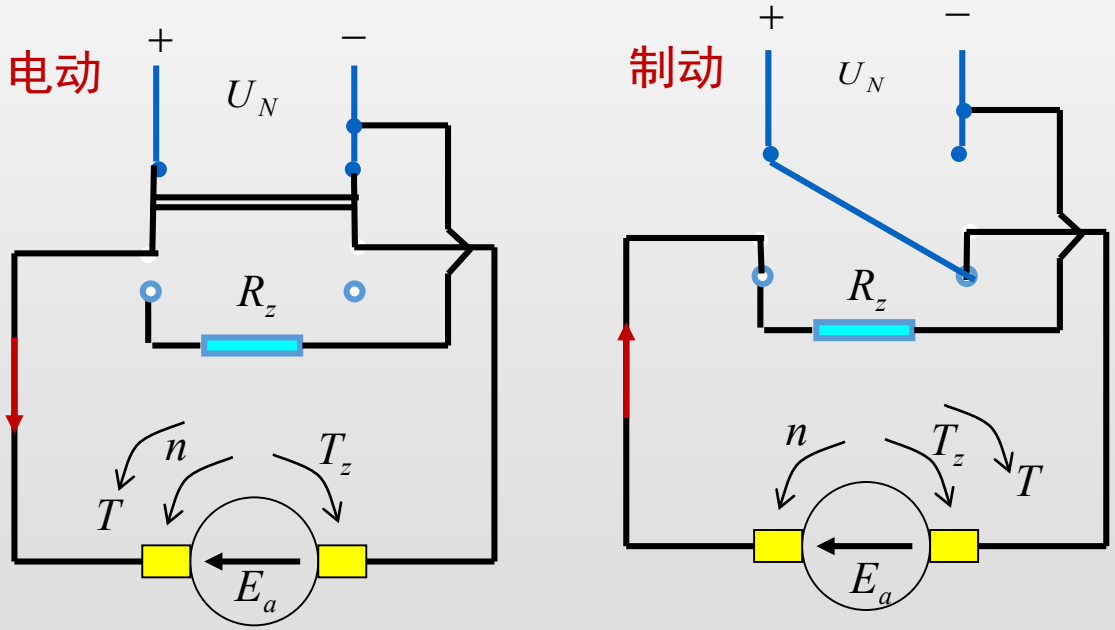
电压反向的反接制动状态：保持I_f不变，将开关向下合闸，使电枢经制动电阻而反接于电网上

参数特点

$$\phi = \phi_N, U = -U_N, R = R_a + R_z$$

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

$$\therefore \quad I_z = \frac{-U_N - E_a}{R_a + R_z} = -\frac{U_N + E_a}{R_a + R_z}$$



三个象限对应三种状态

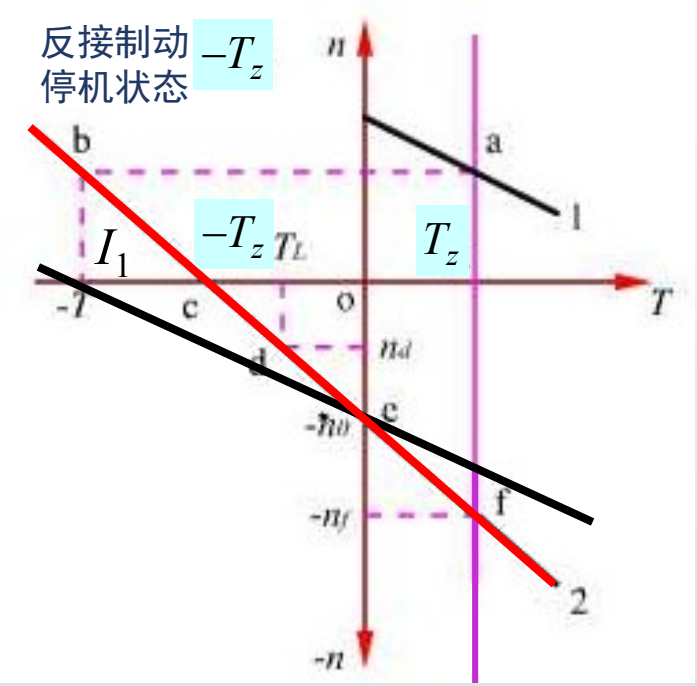
制动瞬间 n不变 $E_a > 0$ ⇨ $I_a < 0$ $T < 0$ ⇨ 在T与T_z共同制动下，系统很快减速至停机

将参数特点代入电动势平衡方程式

$$n = -\frac{U_N}{C_e\phi_N} - \frac{R_a + R_z}{C_e C_M \phi_N^2}\cdot T$$

$$= -n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e C_M \phi_N^2}\cdot T = n_0' - \frac{R_a + R_z}{C_e \phi_N}\cdot I_a$$

固有机械特性的理想空载转速



（1）反接制动停机状态

电动状态，a点（n_a）$\xrightarrow{\text{反接后}}$ $\overline{bcdef}$ $\xrightarrow{n = n_a}$ b点

⇨ $T < 0$，但n与T_z不变，T与T_z均为制动转矩 $\xrightarrow{\text{共同作用}}$ 沿bc段下移直至c点停机

bc段符合反接制动的特点

bc段的$n>0$，理想空载转速$n_0<0$

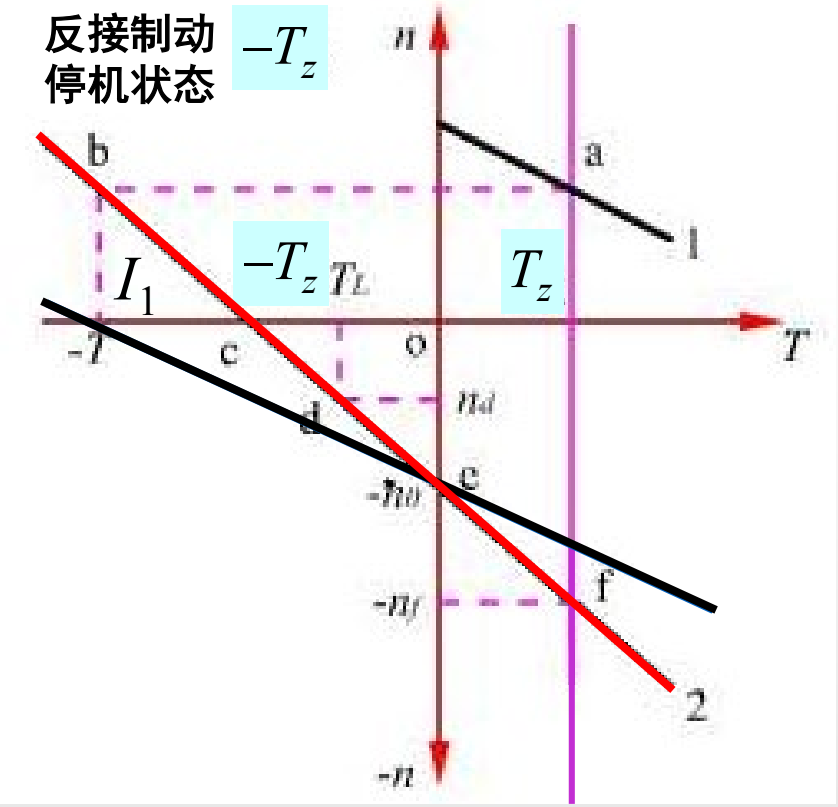
$U<0$，$I_a<0$，$P_1>0$,输入电能

$E_a>0, I_a<0, P_M<0$，输入机械能

$$UI_a - E_aI_a = I_a^2(R_a + R_Z)$$

制动瞬间电流 $$I_1 = -\frac{U_N + C_e\phi_N n_A}{R_a + R_z}$$

将I_1限制于允许的范围内，若取I_1=-2I_N



$U_N \approx E_A$,∴相同的I_1,反接制动的R_z为能耗制动的2倍

$n_A \to 0$的过程中,T都很大,当$n=0, T=T_c$(制动转矩)

制动效果比较好（与能耗制动相比），

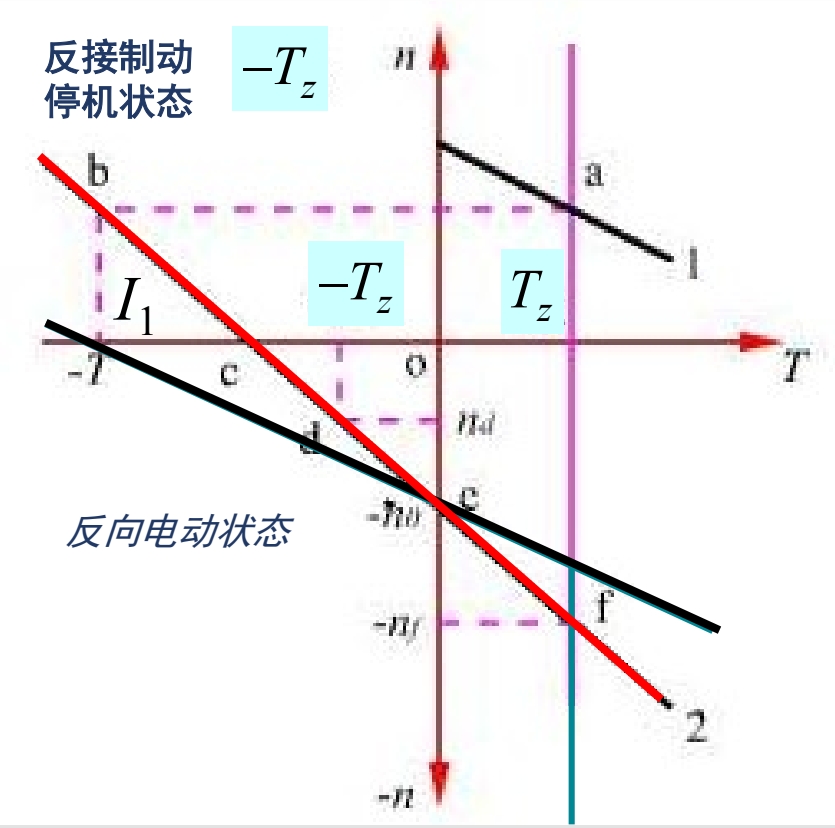
可用于快速停机

仅要求制动时，应在$n=0$切断电源，
否则在T_c的作用下系统有可能反向起动

(2)系统反向起动

$\overline{沿cdn_0'}$,运行于d点

T与n都与电动时相反,T与n方向相同,
是驱动转矩,电动机处于反向电动状态.



A.对反抗性负载而言，若停机后，不切断电源，而且有

$|T_c|>|T_z'|$ **反向电动状态**

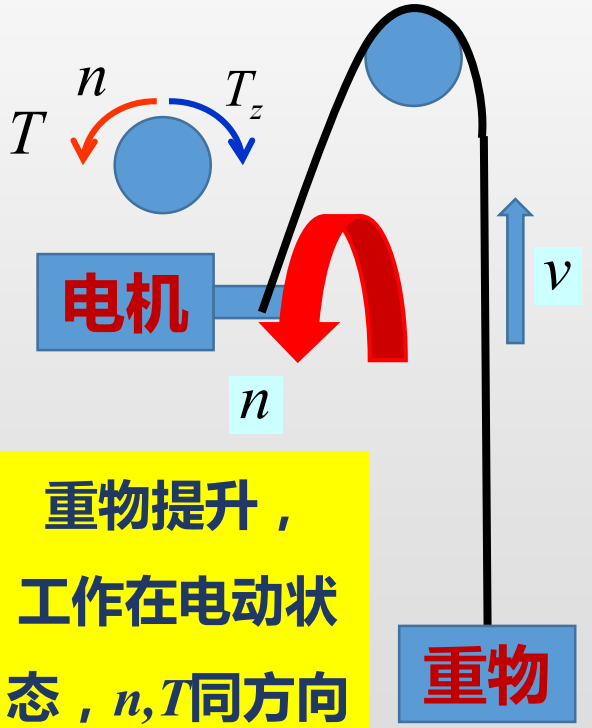
反向起动过程 中，亦可仿照正向电动的方法，逐级切除电枢回路中的电阻R_z，使系统稳定运行在反向固有特性d点上。因此对于要求快速停机而且随后即反向起动的场合，采用电枢反接的反接制动是较合适的。

回馈制动状态

B.对位能性负载而言

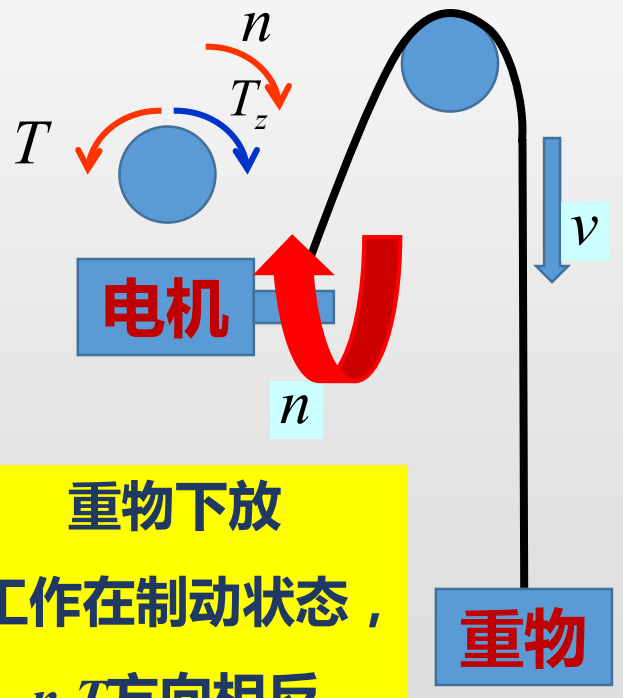
$n=0$不切断电源,必然反向起动(重物下放),在T与T_z共同作用下,系统不断加速

而且由于T_z方向不变，系统不能稳定运行于第三象限



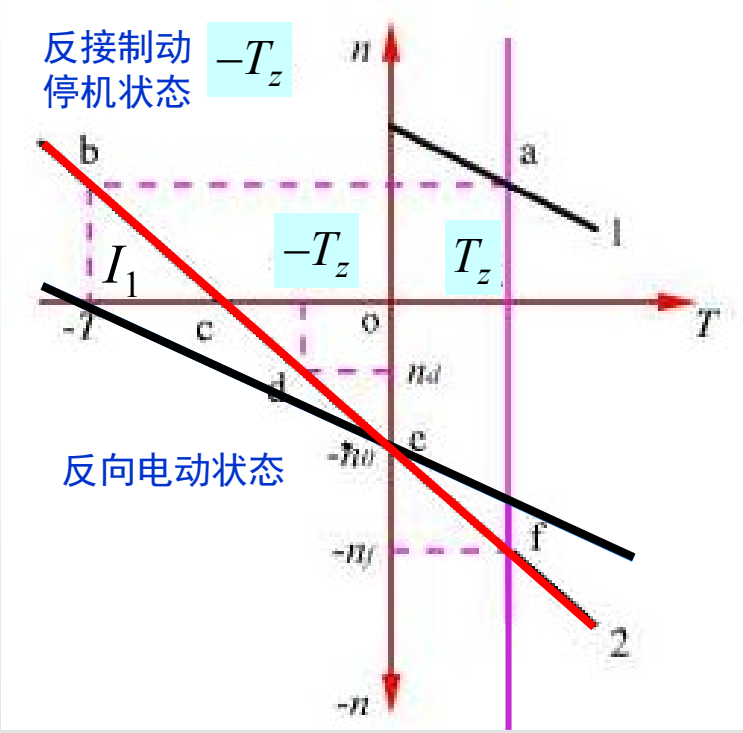
重物提升，工作在电动状态，n,T同方向

第一象限



重物下放工作在制动状态，n,T方向相反

第四象限

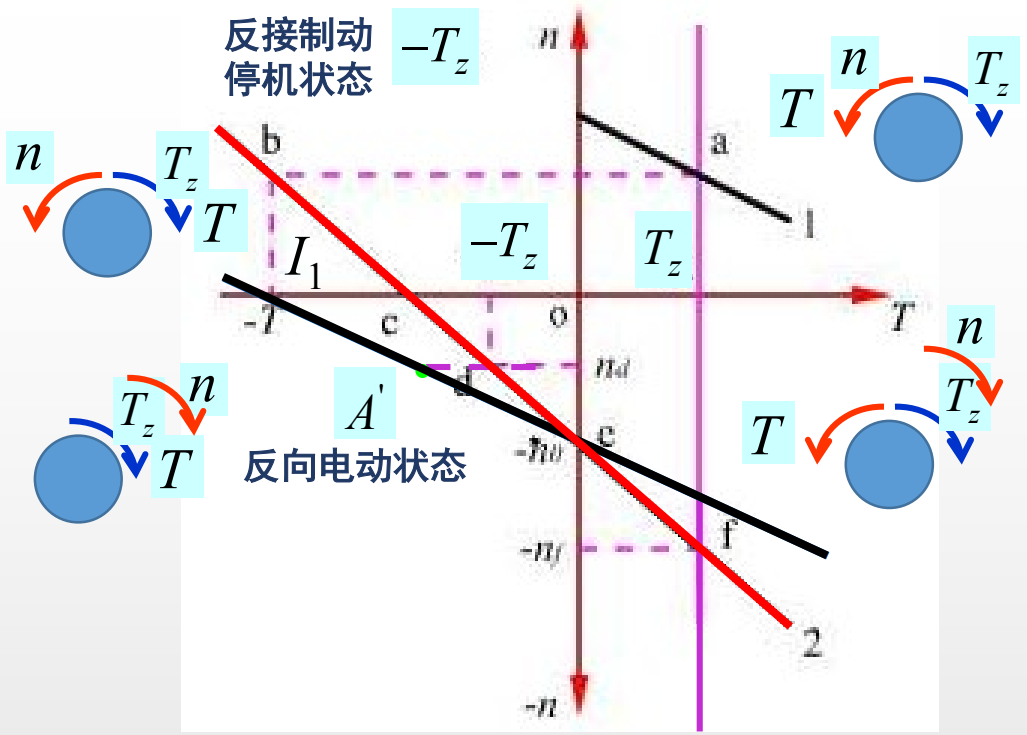


回馈制动状态

反向加速至$n_0^{'}$,$T=0$,但在T_z作用下,
下放速度继续增加,使$|n|>|n_0^{'}|$,进入第四象限

$|n|>|n_0^{'}|$而进入第四象限,工作点沿$\overline{n_0^{'}f}$下移,
此时$T>0$(与电动状态相同),因而对重物下放起制动作用。
至f点时,$T=T_z$,系统平衡,重物以n_f下放

$U<0, I_a>0, P_1=UI_a<0$,输出电功率到电网
$n<0, P_M=E_aI_a<0$,机械能转换成电能



电机将轴上的机械能（即系统所储的位能）转移成电能而返回电源，处于再生发电机状态，称之为回馈制动

（2）电动势反向的反接制动（用于位能性负载稳速下放)

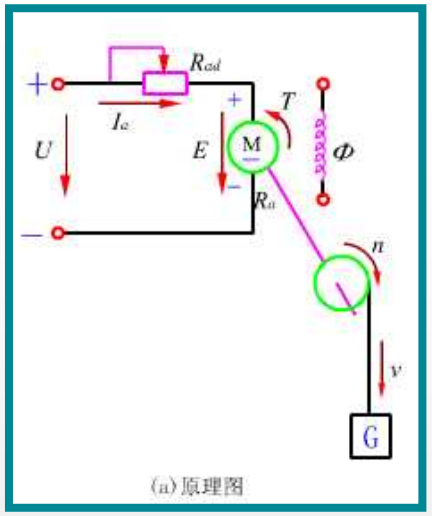
他励电动机带位能性负载的拖动系统，设该机运行于固有机械特性上的A点，若需稳速下放，可采用

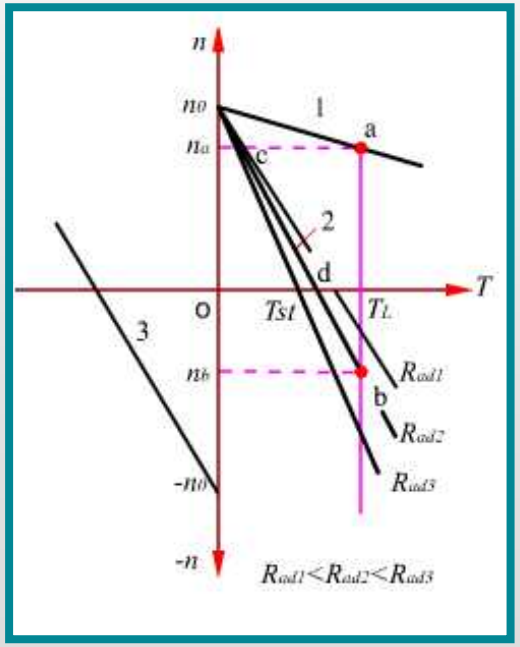
下述办法：

$I_f = c, U_N = c$,仅在电枢回路中串入足够大的制动电阻R_z,使之对应的人为特性与负载转矩特性的交点位于第四象限内

电阻串入瞬间,$n = n_a$不变,工作点a突变到c点

$T_c < T_z \Rightarrow \therefore$ 系统减速 $\Rightarrow$ 工作点沿$\overline{cdb}$下移 $\Rightarrow n = 0$ $\Rightarrow d$点,$T_d < T_z \Rightarrow$ 重物开始下放,$n < 0 \Rightarrow$ 工作沿$\overline{db}$段下移而进入第四象限 $\Rightarrow T > 0, n < 0$,起制动作用 $\Rightarrow$ 最后在b点平衡,$T = T_z$,最后以n_b速度下放



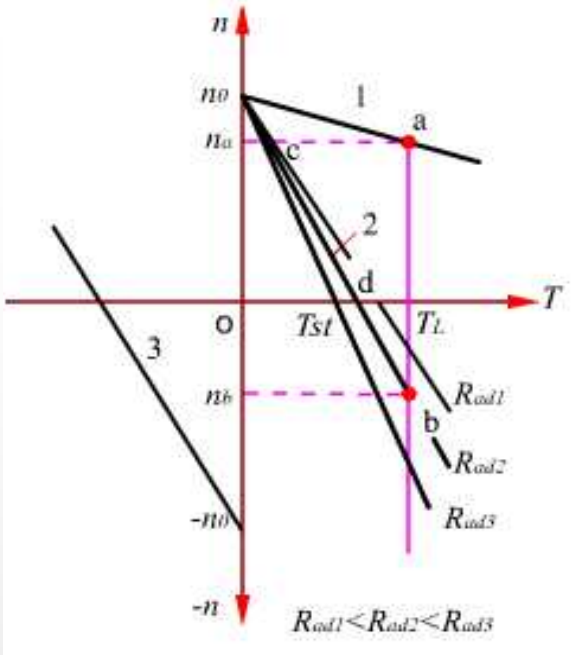


转速从$n_a \to 0$时，T与n方向均未变，所以仍是正向电动(提升），只是速度越来越慢而已。

$$n_b = n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e C_M \phi_N^2} \cdot T_z = n_0 - \frac{R_a + R_z}{C_e \phi_N} \cdot I_z$$

下放时的电枢电流
不计传动机构的损耗,等于提升时a点的电枢电流

若R_z选择得当，可使n约等于0(很低的速度）



这种制动，电枢不反接，但E_a反向了，所以称为**电动势反向的反接制动**

具有反接制动的特点：

db段的$n<0$，理想空载转速$n_0>0$，两者相反

$U>0$, $I_a>0$, $P_1>0$,输入电能

$E_a<0$, $I_a>0$, $P_M<0$，输入机械能

$$UI_a - E_a I_a = I_a^2 (R_a + R_Z)$$

可以使系统快速停机或使位能性负载以极低速下放，但制动过程消耗能量最大，是要付出代价的。

（3）总结

电压反向：第二象限bc段
电动势反向：第四象限db段

三、回馈制动(再生发电制动)

$U - E_a = RI_a$ ⇨ $C_e\phi n_0 - C_e\phi n = RI_a$ ⇨ $|n_0| < |n|$

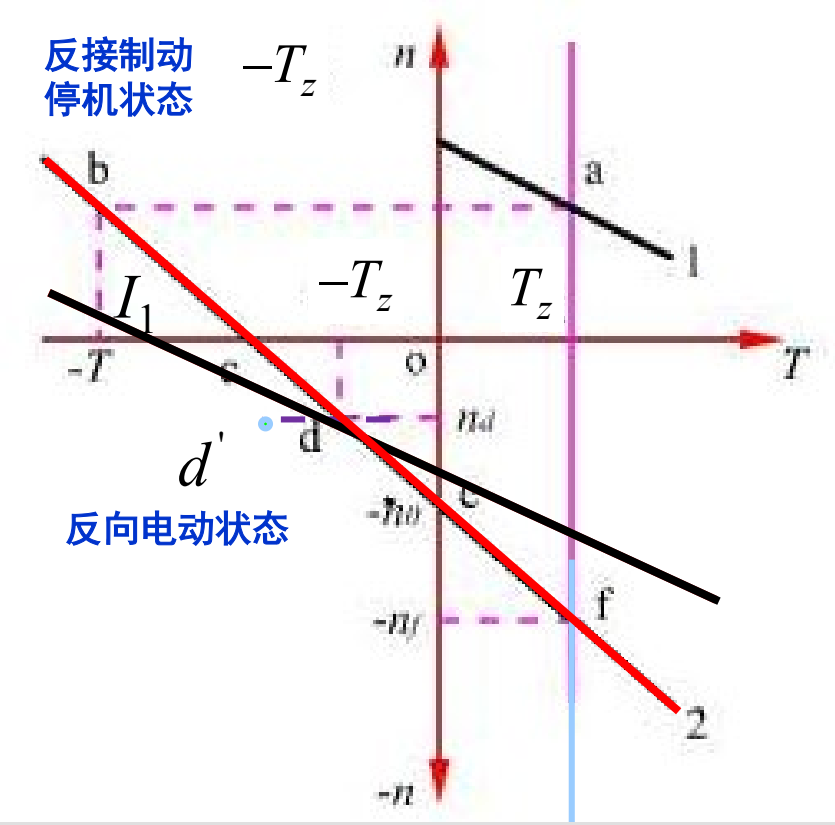
（1）电压反向的回馈制动

位能性负载，如将电枢反接，系统在回馈制动状态下将重物下放，如 f点回馈制动的运行特点

A.n与n_0的方向一致，且$|n_0| < |n|$

⇨ $|E_a = C_e\phi_N n| > |U = C_e\phi_N n_0|$

⇨ E_a与I_a方向一致,呈发电机状态



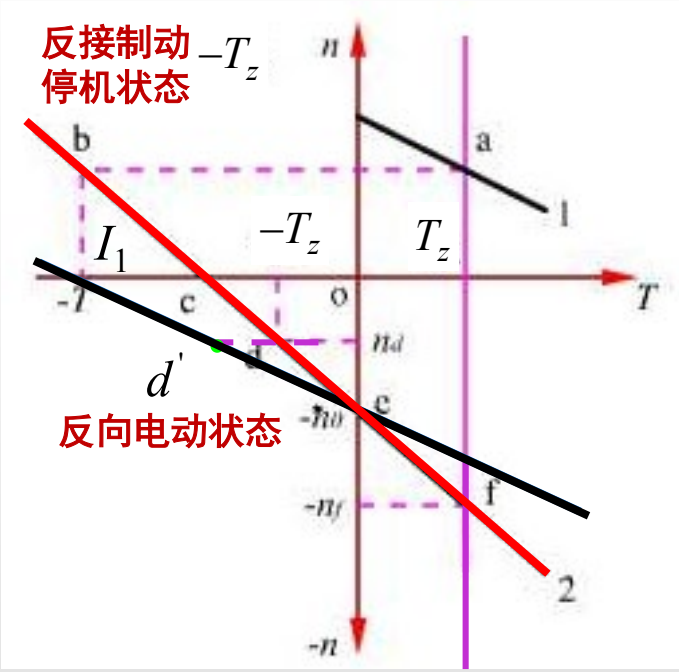
B.能量关系

$P_M = E_a I_a < 0,$ 表示从轴上输入机械功率转化为电枢回路的电功率

$P_1 = UI_a < 0$ 将电能输回电网

⇨ 系统将储的动能或位能转换成电能而送回电网

⇨ 再生发电制动状态回馈制动状态



$$n_f = -\frac{U_N}{C_e\phi_N} - \frac{R_a + R_z}{C_e\phi_N} \cdot I_z$$

$$I_z = \frac{T_z}{C_M\phi_N}$$

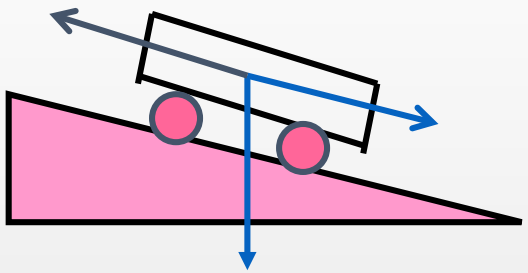
越大，下放速度越高

$|n_f| > |n_0|$,且R_z越大,$|n_f|$越大,通常取$R_z = 0$

（2）电压不反向的回馈制动

电车下坡

电机的机械特性仍为固有机械特性1，n 方向不变，车重沿斜坡的分力将产生一个与n方向一致的驱动转矩，称为**位能性拖动转矩**。



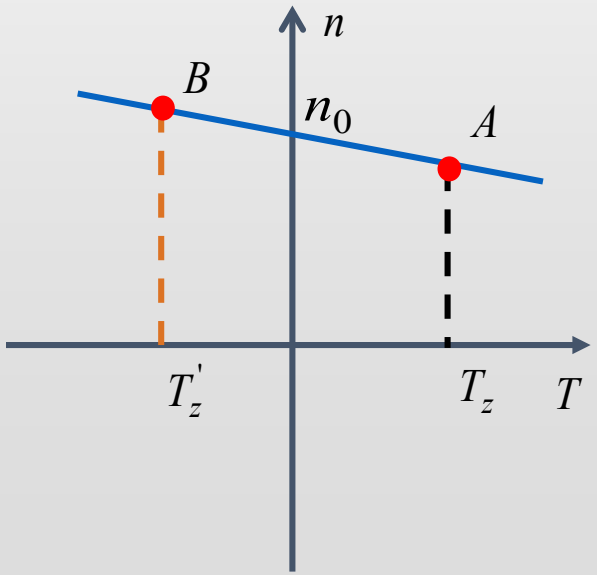
摩擦性转矩 ＋ **位能性拖动转矩** ＝ **总负载转矩** $T_z' < 0$

系统在T与T_z'共同作用下，车速越来越高，工作点沿$\overline{An_0B}$

当$n = n_0$时，$T = 0$，但在T_z'的驱动下，$n \uparrow$ ➡ $n > n_0$

➡ 工作点进入第二象限的$\overline{n_0B}$ ➡ $T < 0$

➡ B点，T与T_z'平衡 ➡ $n_B > n_0$



过渡性回馈制动状态 （降低端电压时的降速过程）

原工作点A，电动状态，固有机械特性1 $\xrightarrow{U_N\text{降为}U'}$ $n=n_A$,工作点变为B

机械特性2

$\xrightarrow{T<0}$ T与T_z共同制动,$n\downarrow$ $\Rightarrow$ $\overline{Bn_0'}$回馈制动 $\Rightarrow$ $\overline{n_0'C}$正向电动 $\Rightarrow$ C点,新的平衡

回馈制动停机，逐步切除电压，直至停机。
F-D系统采用回馈制动停机，最经济

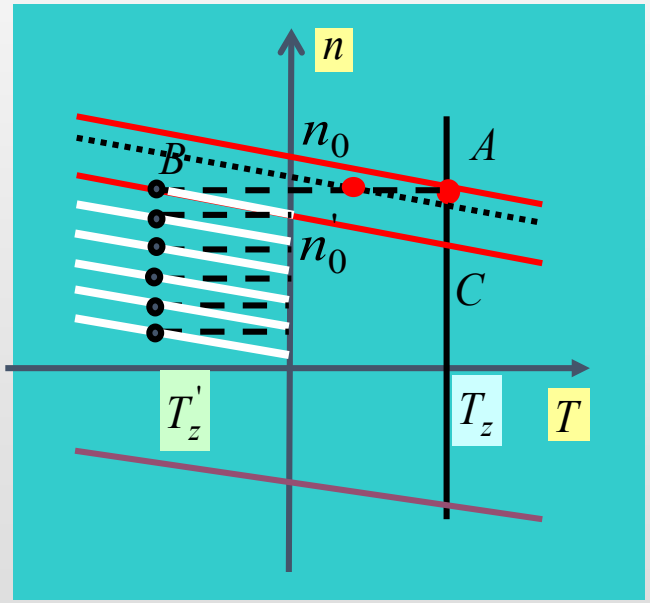
例 $U\downarrow$,判断是否为回馈制动

降压瞬间,n不变;$n_0'=\dfrac{U'}{C_e\phi_N}\Rightarrow n>n_0'\Rightarrow$回馈制动

降压瞬间,n不变,E_a不变$\Rightarrow E_a>U'\Rightarrow$回馈制动

$$I_a=\frac{U-E_a}{R_a}<0$$

$$n_z=-\frac{U_N}{C_e\phi_N}-\frac{R_a+R_z}{C_e\phi_N}I_z$$



浙江大学电气工程学院

THANKS