

3.8 直流电动机的起动、调速和制动

3.8.1 电力拖动系统的稳定运行

3.8.2 他励直流电动机的机械特性

3.8.3 他励直流电动机的起动

3.8.4 他励直流电动机的调速

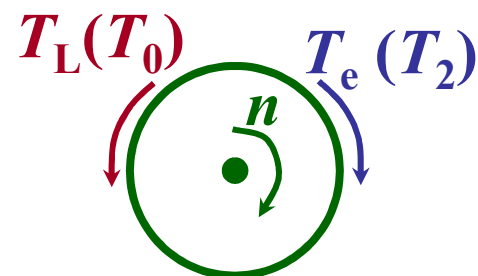
3.8.5 他励直流电动机的制动

3.8.1 电力拖动系统的稳定运行

一、负载的机械特性

$$n = f(T_L)$$

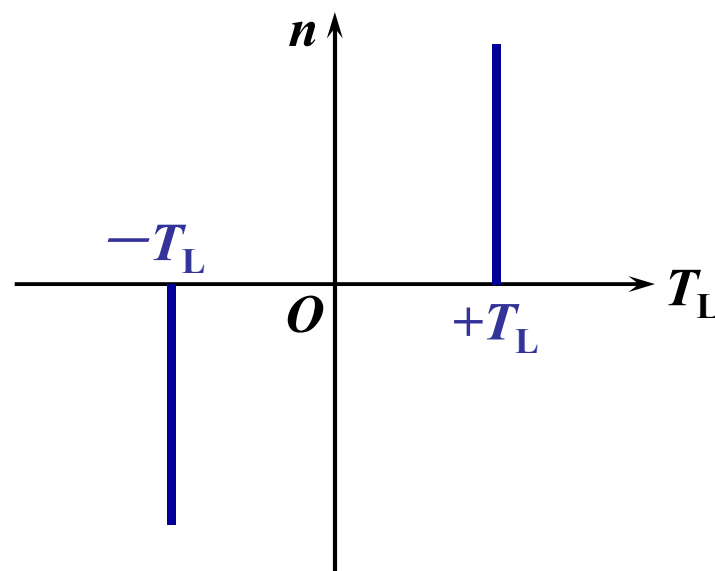
- 转速和转矩的参考（正）方向：



1. 恒转矩负载特性

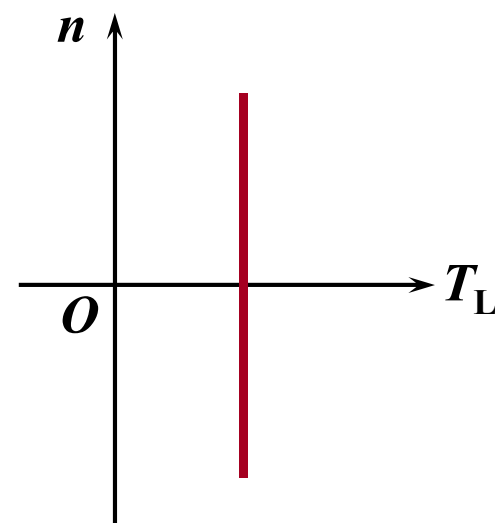
(1) 反抗性恒转矩负载

- 由摩擦力产生的。
- 当 $n > 0$, $T_L > 0$ 。
- 当 $n < 0$, $T_L < 0$ 。
- 如机床平移机构、压延设备等。



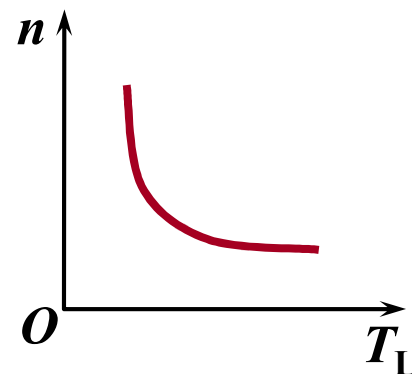
(2) 位能性恒转矩负载

- 由重力作用产生的。
- 当 $n > 0$, $T_L > 0$ 。
当 $n < 0$, $T_L > 0$ 。
- 如起重机的提升机构和矿井卷扬机等。



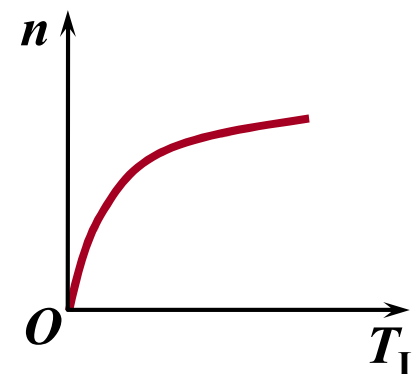
2. 恒功率负载特性

- $T_L \propto \frac{1}{n}$
- $T_L n = \text{常数}$ 。
- 如机床的主轴系统等。



3. 通风机负载特性

- $T_L \propto n^2$
- T_L 的方向始终与 n 的方向相反。
- 如通风机、水泵、油泵等。



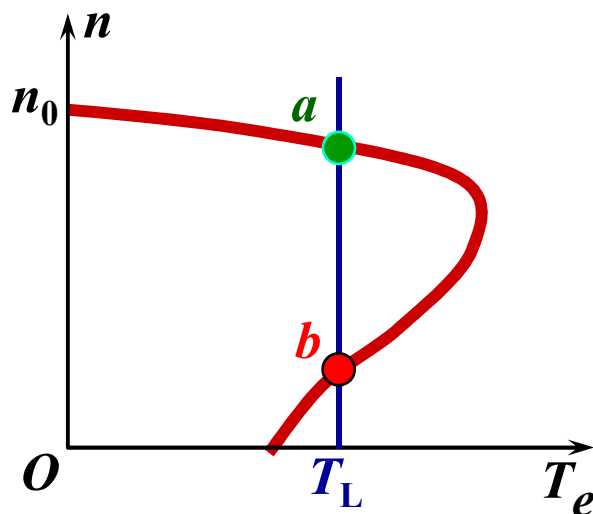
二、稳定运行的条件

运动方程: $T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$

稳定运行: $n = \text{常数}$ 即: $T_e - T_L = 0$

当 $T_e = T_L$ 时, $\frac{d\Omega}{dt} = 0$, 电力拖动系统处于稳定状态

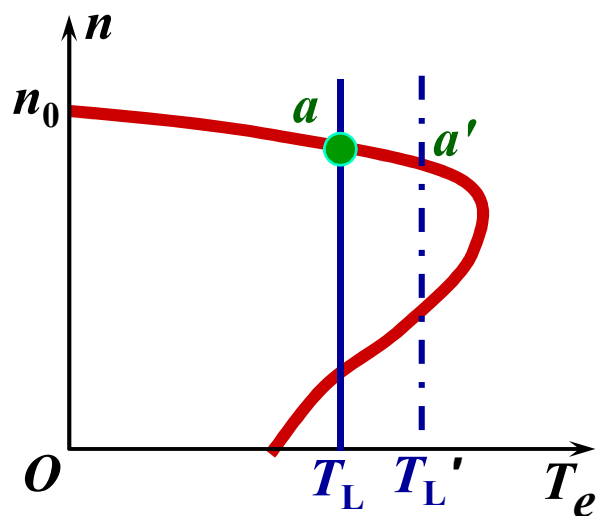
过渡过程: $T_e > T_L \rightarrow \text{加速}$
 $T_e < T_L \rightarrow \text{减速}$



工作点:

在电动机的机械特性与负载的机械特性的交点上(a 、 b)。

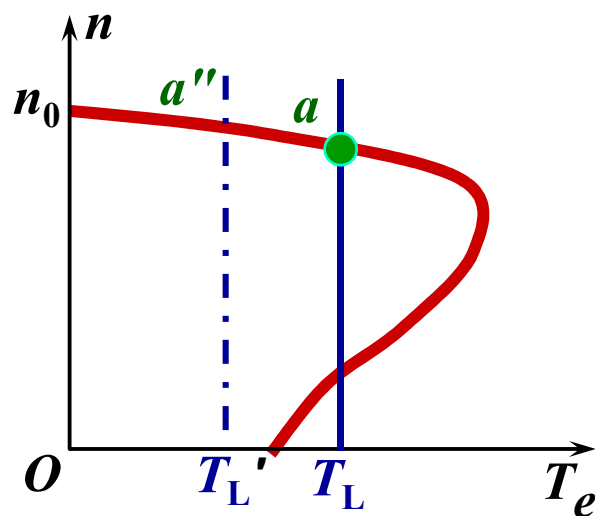
当系统在某一工作点稳定运行时，扰动作用会导致系统的转速发生变化。如果在扰动持续期间，系统能在新的条件下达到新的平衡，在新的工作点稳速运行，而且在扰动消失后能够自动回到原来的工作点稳速运行，这样的系统是稳定的。否则，系统是不稳定的。



a 点:

● 干扰使 $T_L \uparrow \xrightarrow{T_e < T_L'} n \downarrow \rightarrow T_e \uparrow \rightarrow T_e = T_L' \rightarrow a'$ 点。

干扰过后 $T_e > T_L \rightarrow n \uparrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow T_e = T_L \rightarrow a$ 点。



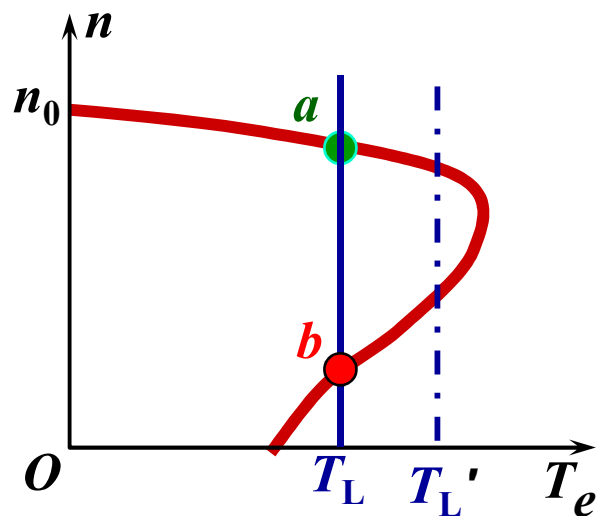
a 点:

● 干扰使 $T_L \uparrow \xrightarrow{T_e < T_L'} n \downarrow \rightarrow T_e \uparrow \rightarrow T_e = T_L' \rightarrow a'$ 点。

干扰过后 $T_e > T_L \rightarrow n \uparrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow T_e = T_L \rightarrow a$ 点。

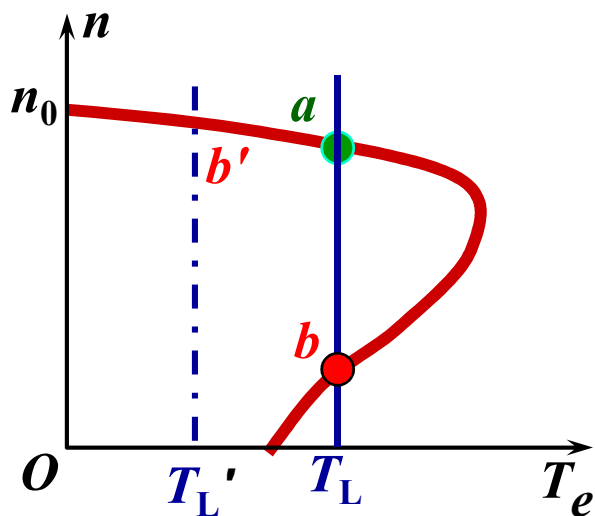
● 干扰使 $T_L \downarrow \xrightarrow{T_e > T_L'} n \uparrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow T_e = T_L' \rightarrow a''$ 点。

干扰过后 $T_e < T_L \rightarrow n \downarrow \rightarrow T_e \uparrow \rightarrow T_e = T_L \rightarrow a$ 点。



***b* 点:**

● 干扰使 $T_L \uparrow \xrightarrow{T_e < T_L'} n \downarrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow n = 0 \rightarrow$ 堵转。
 干扰过后 $T_e < T_L$, 不能运行。



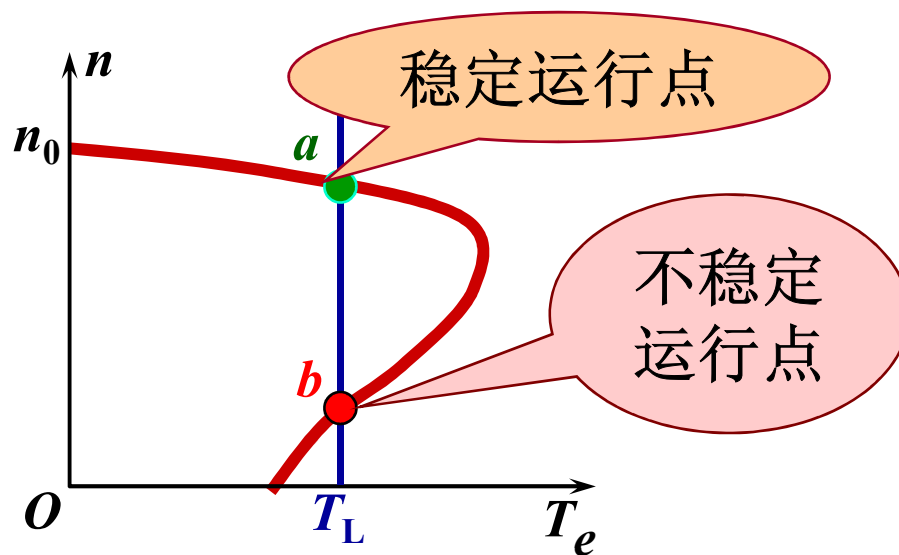
***b* 点:**

● 干扰使 $T_L \uparrow \xrightarrow{T_e < T_L'} n \downarrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow n = 0 \rightarrow$ 堵转。

干扰过后 $T_e < T_L$ ，不能运行。

● 干扰使 $T_L \downarrow \xrightarrow{T_e > T_L'} n \uparrow \rightarrow T_e \uparrow \rightarrow n \uparrow \uparrow \rightarrow b'$ 点。

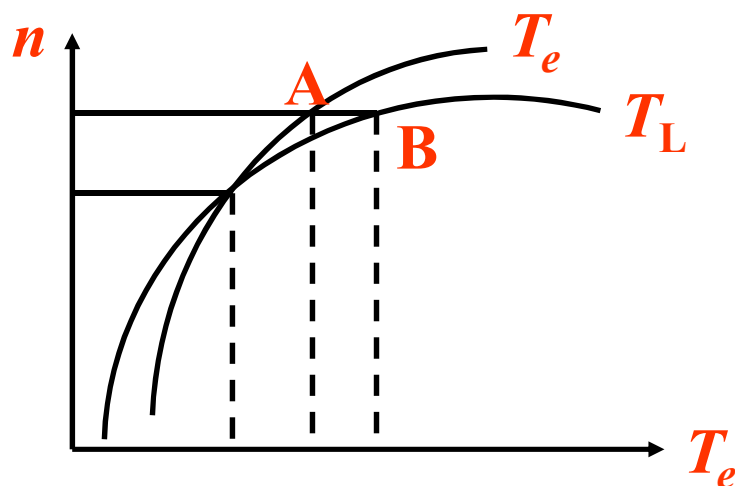
干扰过后 $T_e < T_L \rightarrow n \downarrow \rightarrow T_e \downarrow \rightarrow a$ 点。



● 稳定运行的充分条件:

$$\frac{dT_e}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

● 电力拖动系统稳定运行的简便判定法

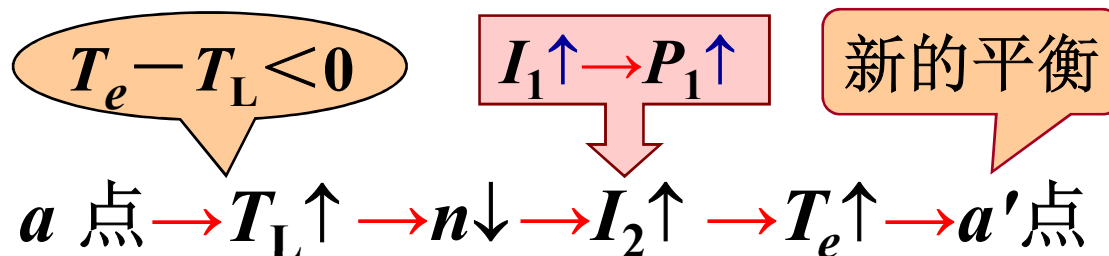
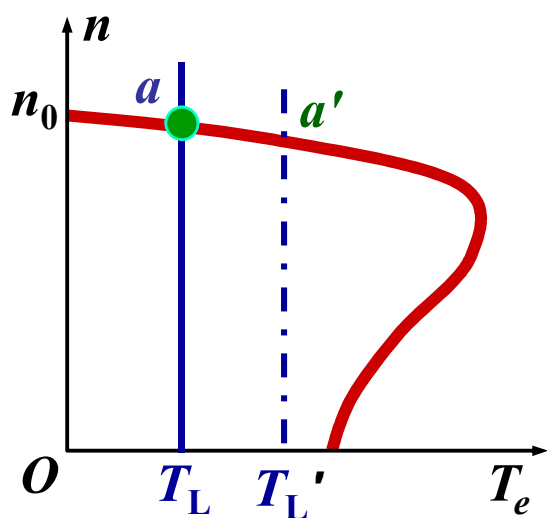


$$\frac{dT_e}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

- ◆ 在工作点上方做一条水平直线，分别交 T_e - n 曲线于A点， T_L - n 曲线于B点，若A点在B点左侧，则系统稳定，否则，系统不稳定。

● 电动机的自适应负载能力

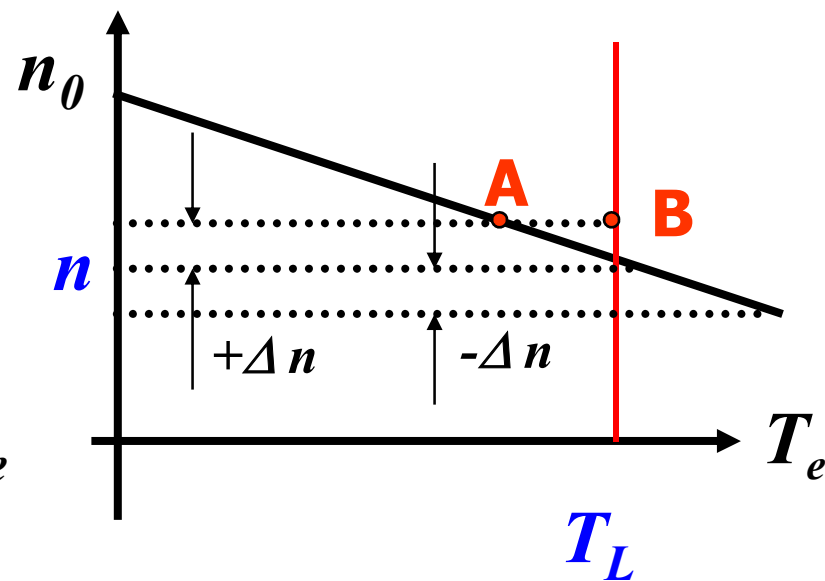
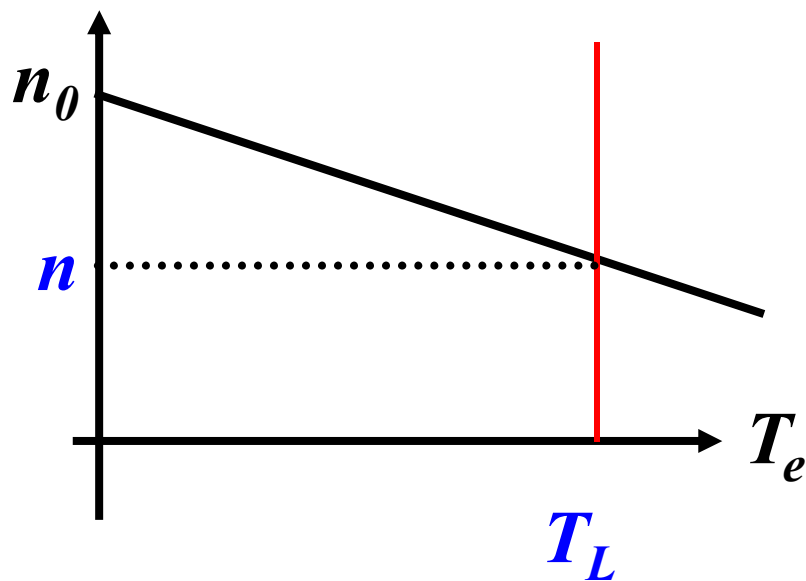
电动机的电磁转矩可以随负载的变化而自动调整这种能力称为自适应负载能力。



自适应负载能力是电动机区别于其他动力机械的重要特点。

如：柴油机当负载增加时，必须由操作者加大油门，才能带动新的负载。

●问题：判断下面的系统能否稳定运行？





3.8.2 他励直流电动机的机械特性

当 U_a 、 R_a 、 $I_f = \text{常数}$ 时:

$n = f(T_e)$ —— 机械特性

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$$

$$= n_0 - \gamma T_e$$

$$= n_0 - \Delta n$$

$$\gamma = \left| \frac{dn}{dT_e} \right| = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2}$$

$$n_0 = \frac{U_a}{C_e \Phi}$$

理想空
载转速

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \text{ —— 机械特性的硬度}$$

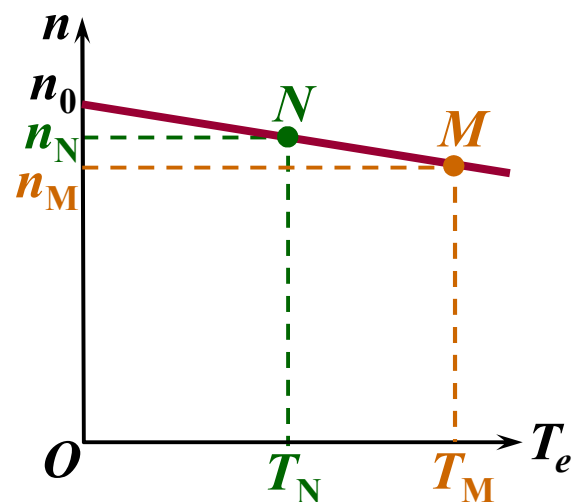


一、固有特性

$$n = f(T_e) \Big|_{U_{aN}, I_{fN}, R_a}$$

N 点：额定状态。

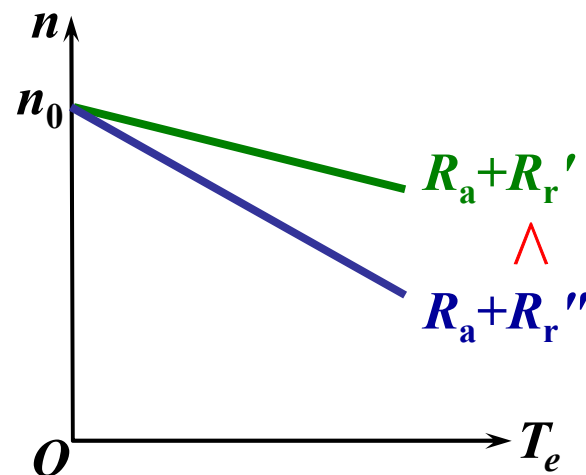
M 点：临界状态。



二、人为特性

1. 增加电枢电路电阻时的人为特性

$$n = \frac{U_{aN}}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_r}{C_e C_T \Phi_N^2} T_e$$



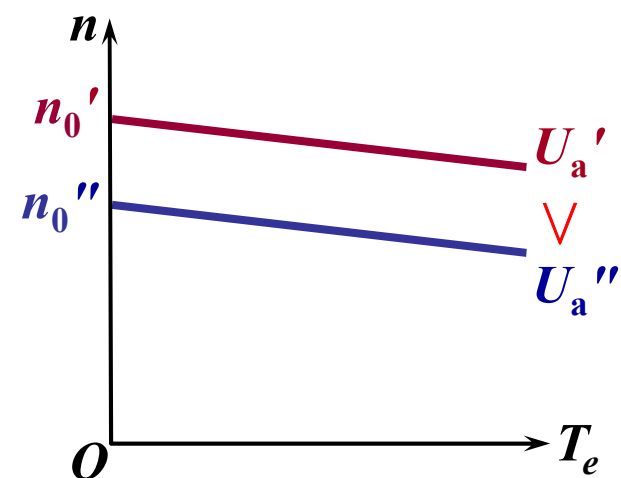
$(R_a + R_r) \uparrow \rightarrow \gamma \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow$ 即机械特性变软。

2. 降低电枢电压时的人为特性

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_e$$

$U_a \downarrow \rightarrow n_0 \downarrow$ 但 γ 、 α 不变

\rightarrow 机械特性的硬度不变。



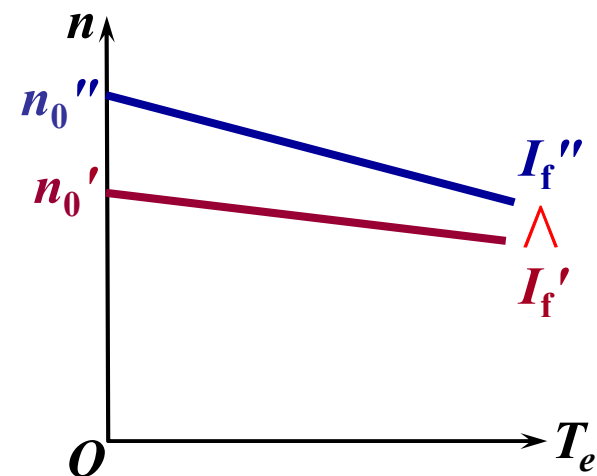
3. 减小励磁电流时的人为特性

$$n = \frac{U_{aN}}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$$

$I_f \downarrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow n_0 \uparrow$

$\rightarrow \gamma \uparrow$ 、 $\alpha \downarrow$

\rightarrow 机械特性变软。





【例1】 一台他励直流电动机， $P_N = 10 \text{ kW}$ ，
 $U_{aN} = 220 \text{ V}$ ， $I_{aN} = 210 \text{ A}$ ， $n_N = 750 \text{ r/min}$ ， 求 (1) 固有特性；
(2) 固有特性的斜率和硬度

解： (1) 固有特性

忽略 T_0 ， 则

$$T_N = \frac{60}{2\pi} \frac{P_N}{n_N} = \frac{60}{6.28} \times \frac{40 \times 10^3}{750} \text{ N}\cdot\text{m} = 509.55 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$C_T \Phi = \frac{T_N}{I_{aN}} = \frac{509.55}{210} = 2.426$$

$$C_e \Phi = \frac{2\pi}{60} C_T \Phi = \frac{6.28}{60} \times 2.426 = 0.254$$

$$n_0 = \frac{U_{aN}}{C_e \Phi} = \frac{220}{0.254} \text{ r/min} = 866.25 \text{ r/min}$$



连接 n_0 和 $N(T_N, n_N)$ 两点即可得到固有特性。

(2) 固有特性的斜率和硬度

$$E_a = C_e \Phi n_N = 0.254 \times 750 \text{ V} = 190.5 \text{ V}$$

$$R_a = \frac{U_{aN} - E_a}{I_{aN}} = \frac{220 - 190.5}{210} \Omega = 0.14 \Omega$$

$$\gamma = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} = \frac{0.14}{2.426 \times 0.254} = 0.228$$

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0.228} = 4.39$$



3.8.3 他励直流电动机的起动

● 起动性能

- ① 起动电流 I_{ST}
- ② 起动转矩 T_{ST}

● 直接起动

起动瞬间: $n = 0$, $E_a = 0$, 对于他励电机

$$I_{ST} = \frac{U_a}{R_a} = (10 \sim 20) I_N \text{ —— 不允许!}$$

$$T_{ST} = C_T \Phi I_{ST} = (10 \sim 20) T_N$$

一、降低电枢电压起动

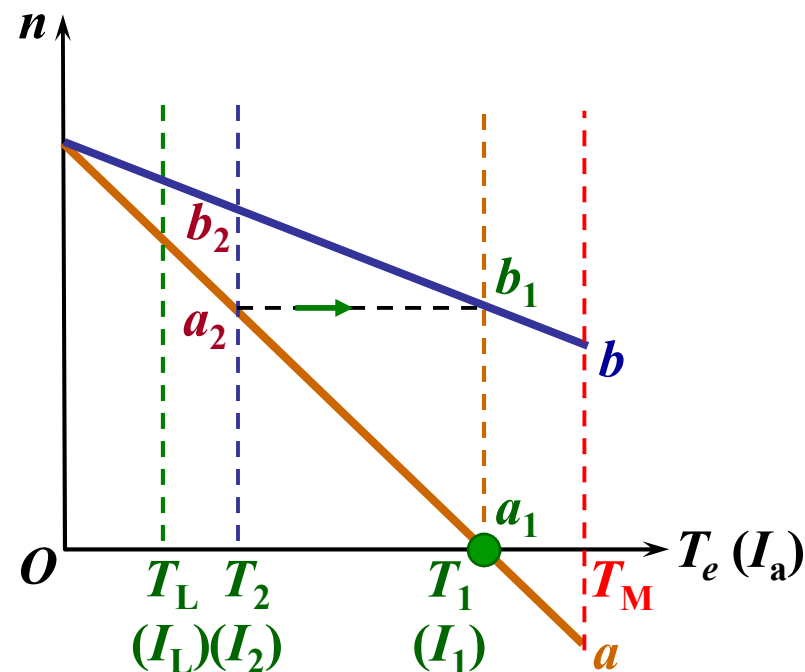
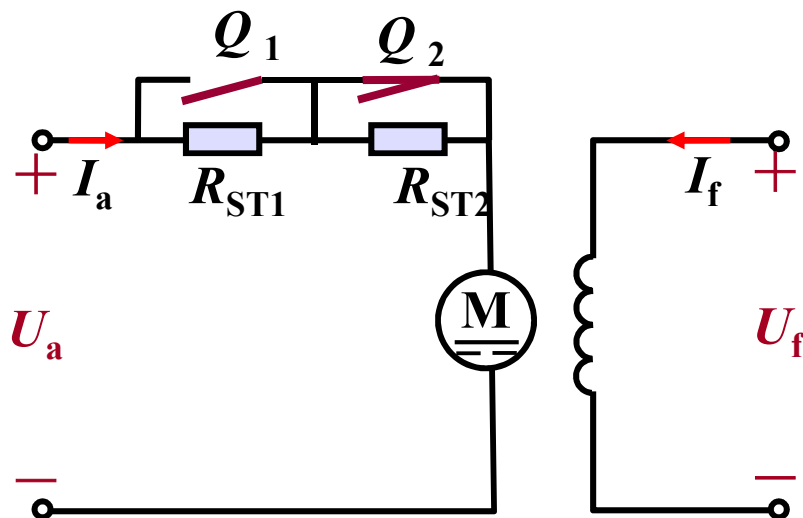
当励磁直流电动机的电枢回路由专用可调电源供电时，可用降低电压的方法来限制最大起动电流。起动电流将随着电枢电压降低而成正比减小。

起动前，先调好励磁，然后使电源电压自动地由低向高调节，电动机就逐步起动。

在手动调节时，应使电源电压慢慢上升，不可使电压升得太快，否则，会发生较大的冲击电流，失去降压起动的意义。

平滑升速、耗能小。

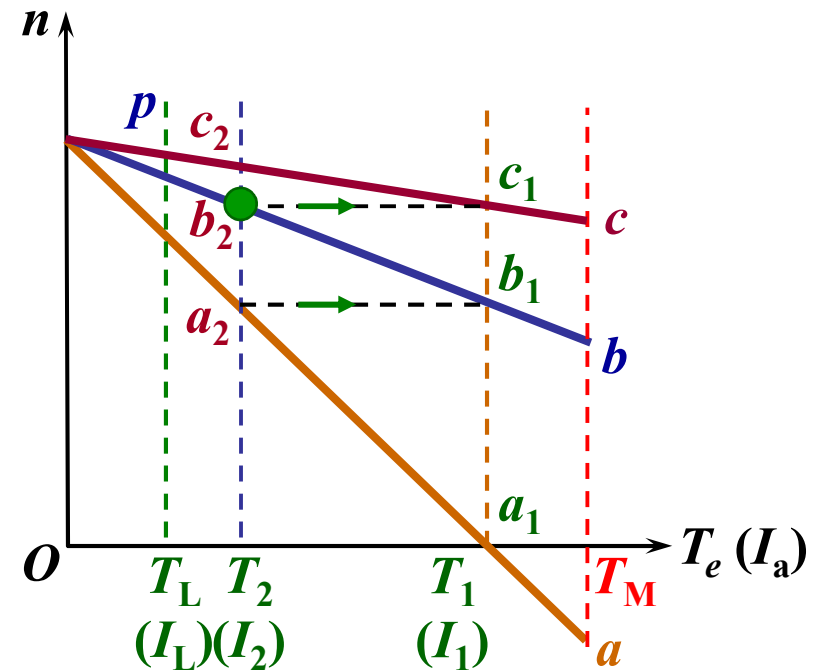
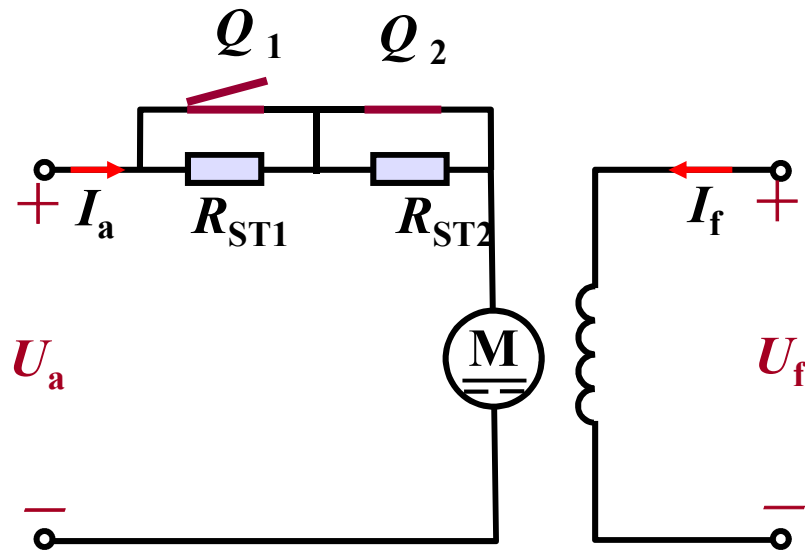
二、增加电枢电阻启动



启动过程:

- ① 串联 $(R_{ST1}+R_{ST2})$ 启动: $R_{a2} = R_a + R_{ST1} + R_{ST2}$
启动转矩 (电流): $T_1(I_1) = (1.5 \sim 2.0) T_N(I_{aN})$
- ② 切除 R_{ST2} : $R_{a1} = R_a + R_{ST1}$
切换转矩 (电流): $T_2(I_2) = (1.1 \sim 1.2) T_L(I_L)$

③ 切除 R_{ST1} : $R_{a0} = R_a$



起动 a_1 点 $\xrightarrow{\text{加速}}$ a_2 点 $\xrightarrow[\text{瞬间 } n \text{ 不变}]{\text{切除 } R_{st2}}$ b_1 点 $\xrightarrow{\text{加速}}$ b_2 点
 $\xrightarrow[\text{瞬间 } n \text{ 不变}]{\text{切除 } R_{ST1}}$ c_1 点 $\xrightarrow{\text{加速}}$ c_2 点 $\xrightarrow{\text{加速}}$ p 点。

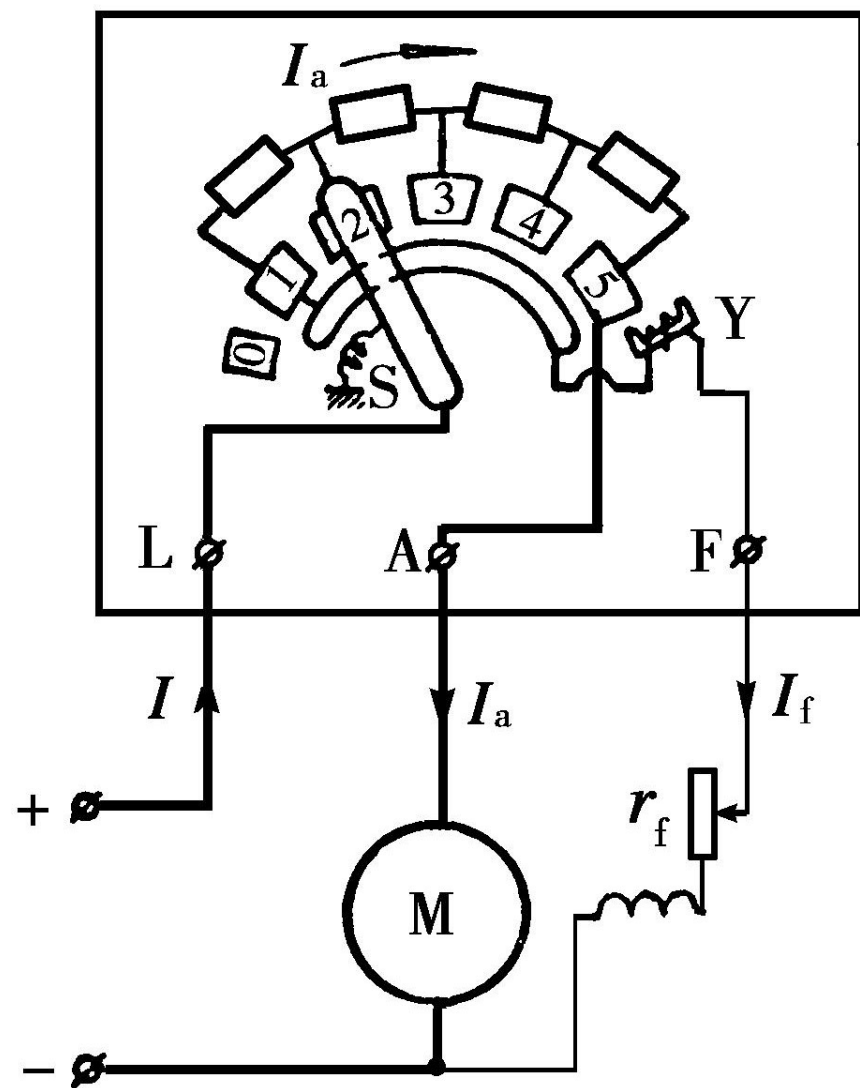


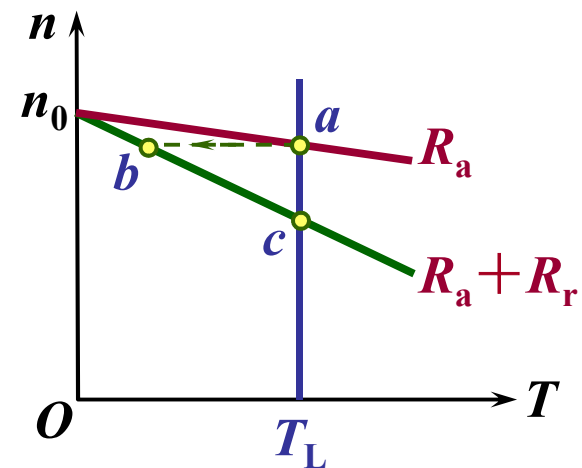
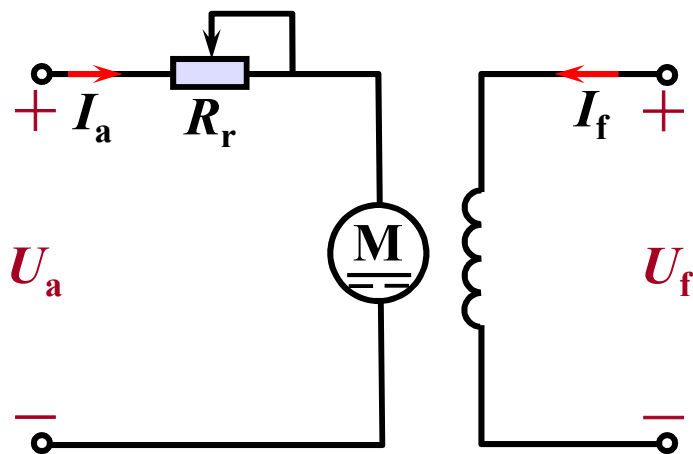
图3-48 三点起动器及其接线图

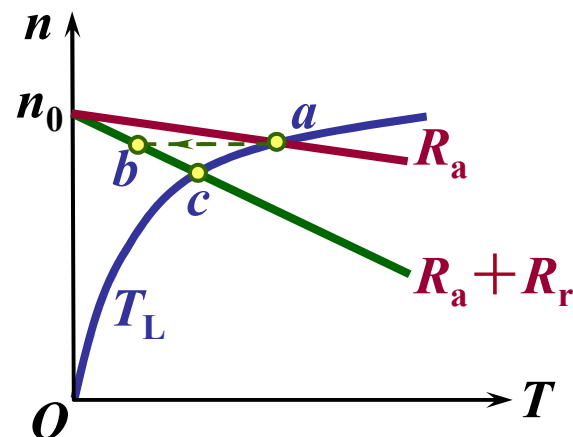
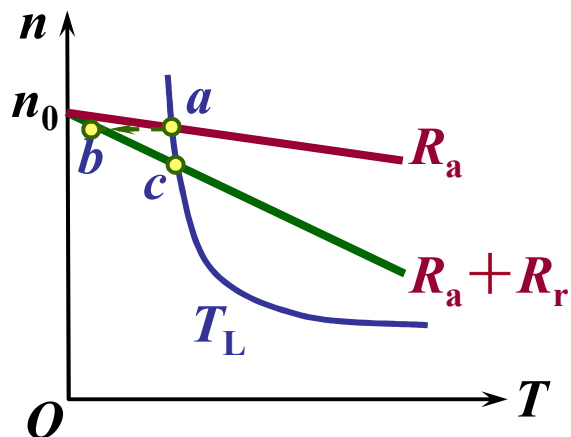


3.8.4 他励直流电动机的调速

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$$

一、改变电枢电阻调速





(1)调速方向：在 n_N 以下调节。

$$R_a + R_r \rightarrow n \downarrow$$

(2)一般为有级调速。

(3)调速的经济性差。

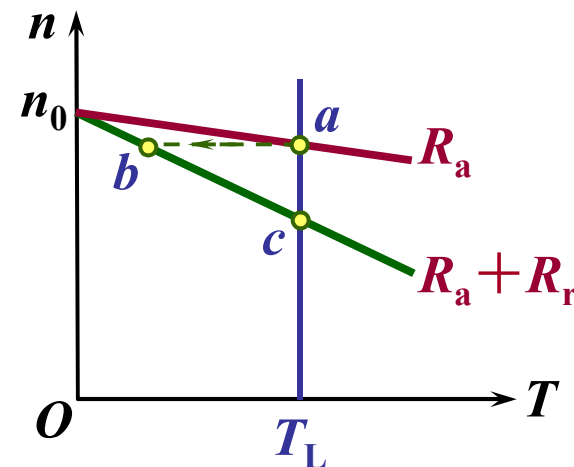
(4) 调速方法简单，控制设备不复杂。

【例1】 一台他励电动机， $P_N = 4 \text{ kW}$ ， $U_{aN} = 160 \text{ V}$ ， $I_{aN} = 34.4 \text{ A}$ ， $R_a = 1.27 \Omega$ ， $n_N = 1\,450 \text{ r/min}$ ， 用它拖动额定恒转矩负载运行。现采用改变电枢电路电阻调速。试问要使转速降低至 $1\,200 \text{ r/min}$ ， 需在电枢电路串联多大的电阻 R_r ？

解： 额定运行时

$$\begin{aligned} E_a &= U_{aN} - R_a I_{aN} \\ &= (160 - 1.27 \times 34.4) \text{ V} \\ &= 116.31 \text{ V} \end{aligned}$$

$$C_E \Phi_N = \frac{E_a}{n_N} = \frac{116.31}{1\,450} = 0.0802$$



$$C_T \Phi_N = 9.55 \quad C_E \Phi_N = 9.55 \times 0.0802 = 0.766$$

$$T_e = T_N = C_T \Phi_N I_{aN} = 0.766 \times 34.4 = 26.35 \text{ N} \cdot \text{m}$$

对于恒转矩负载，调速前后 T_e (I_a) 不变，

根据

$$n = \frac{U_{aN}}{C_E \Phi_N} - \frac{R_a + R_r}{C_E C_T \Phi_N^2} T_e$$

或者

$$n = \frac{U_{aN}}{C_E \Phi_N} - \frac{R_a + R_r}{C_E \Phi_N} I_a$$

求得

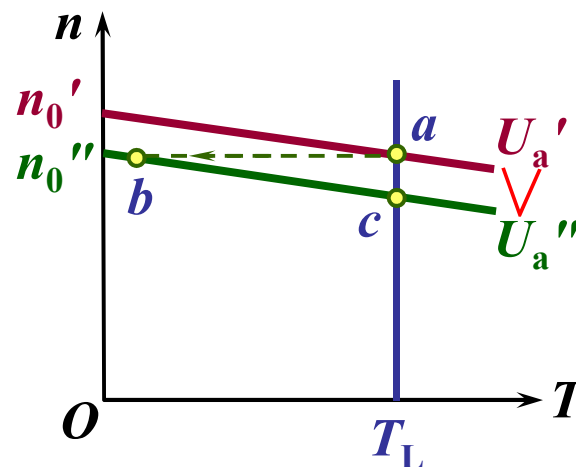
$$R_r = 0.58 \Omega$$

二、改变电枢电压调速

(1) 调速方向:

在 U_N (或 n_N) 以下调节。

$U_a \downarrow \rightarrow n \downarrow$, $U_a \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。



(2) 调速的平滑性:

连续调节 U_a , 可实现无级调速。

(3) 调速的经济性: 需要专用直流电源。

【例2】 例 1 中的他励电动机，拖动恒转矩负载运行， $T_L = T_N$ 。现采用改变电枢电压调速。试问要使转速降低至 1 000 r/min，电枢电压应降低到多少？

解： 已知 $U_{aN} = 160 \text{ V}$, $R_a = 1.27 \Omega$,
 $C_E \Phi = 0.0802$, $C_T \Phi = 0.766$, $T_N = 26.35 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

根据

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_N$$



$$U_a = 123.9 \text{ V}$$

三、改变励磁电流调速

(1) 调速方向

在 n_N 以上 (I_{fN} 以下) 调节。

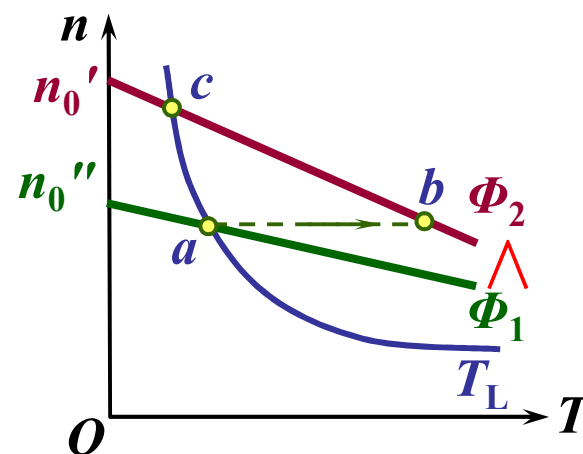
(2) 调速的平滑性

连续调节 U_f (或 R_f) 可实现无级调速。

(3) 调速的经济性

调节 R_f 比较经济；

调节 U_f 则需要专用直流电源。



【例3-2】有一台并励电动机，其数据如下： $P_N=2.6\text{kW}$ ， $U_N=110\text{V}$ ， $I_N=28\text{A}$ （线路电流）， $n_N=1470\text{r/min}$ ，电枢绕组的电阻 $R=0.15\Omega$ ，额定状态下励磁回路的电阻 $R_{fN}=138\Omega$ 。设额定负载时，在电枢回路中接入 0.5Ω 的电阻，若不计电枢电感的影响，并略去电枢反应，试计算：

- （1）接入电阻瞬间电枢的电动势、电枢电流和电磁转矩；
- （2）若负载转矩保持不变，求稳态时电动机的转速。

解：（1）额定负载时，电枢电流

$$I_{aN}=I_N-I_{fN}=I_N-\frac{U_N}{R_{fN}}=28-\frac{110}{138}=27.2\text{A}$$

接入电阻前后瞬间，转速不能突变，电动势不变：

$$E_{aN}'=E_{aN}=U_N-I_{aN}R-2\Delta U_s=103.9\text{V}$$

接入电阻后瞬间，电枢电流： $I_a'=\frac{U_N-E_{aN}'-2\Delta U_s}{R+R_\Omega}=6.308\text{A}$

接入电阻瞬间的电磁转矩：

$$T_e' = \frac{P_e'}{\Omega_N} = \frac{E_{aN}' I_a'}{\Omega_N} = \frac{E_{aN}' I_a'}{2\pi \frac{n_N}{60}} = 4.258 N \cdot m$$

或 $C_e \Phi_N = \frac{E_{aN}'}{n_N}$

$$T_e' = C_T \Phi_N I_a' = 9.55 C_e \Phi_N I_a' = 9.55 \frac{E_{aN}'}{n_N} I_a' = 4.258 N \cdot m$$

(2) 负载转矩不变，则为恒转矩负载，则调速前后的稳态电枢电流不变，都为 I_{aN} 。由于

$$\frac{n''}{n_N} = \frac{E_a''}{E_{aN}}$$

则 $n'' = n_N \frac{E_a''}{E_{aN}} = n_N \frac{U_N - I_{aN}(R + R_\Omega) - 2\Delta U_s}{E_{aN}} = 1278 r / \min$



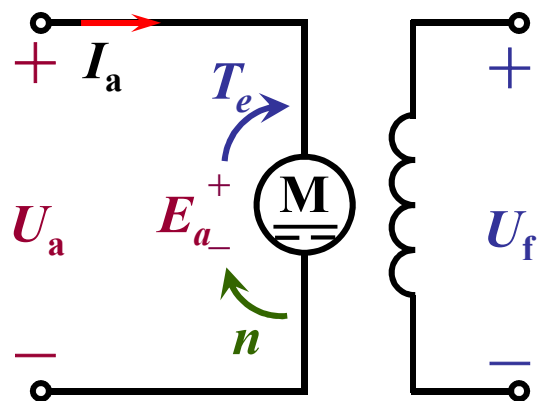


3.8.5 他励直流电动机的制动

目的：快速停车、匀速下放重物等。

制动方法：机械制动、电气制动。

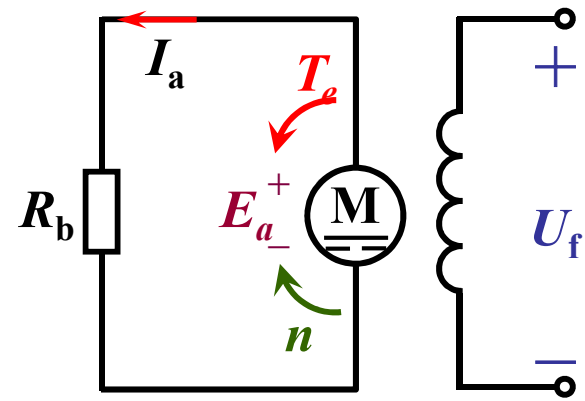
一、能耗制动



电动状态

I_a 的方向？

T_e 的方向？



制动状态

能耗制动时：动能转换成电能，被电阻消耗掉。

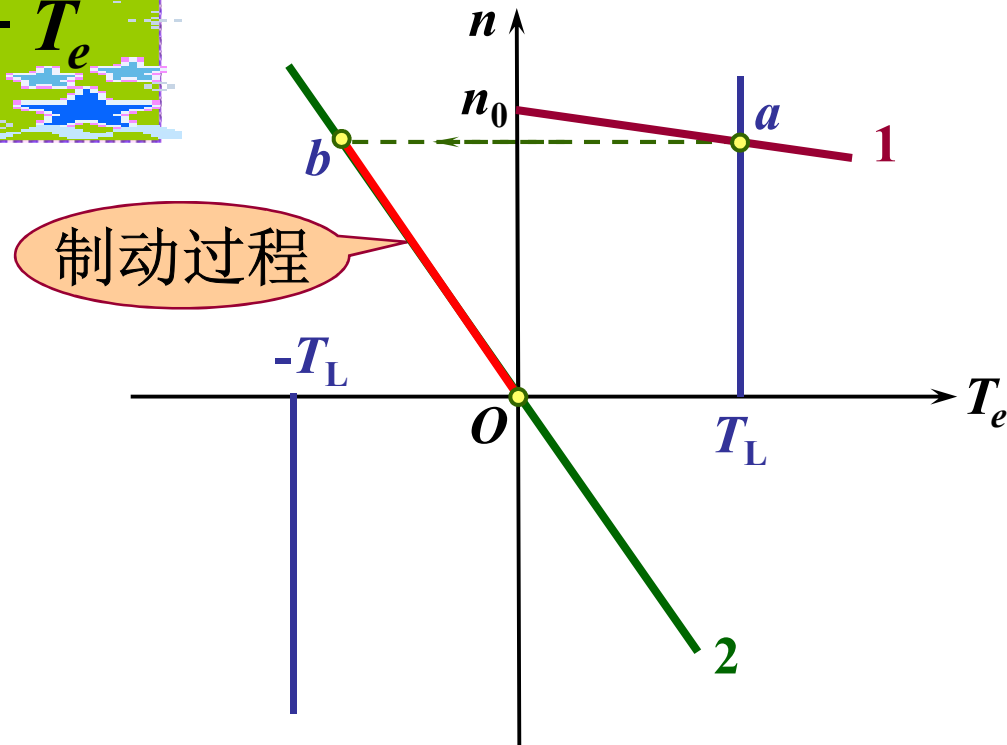
制动前:

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$

制动后:

$$n = -\frac{R_a + R_b}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$

1、能耗制动过程 —— 迅速停机



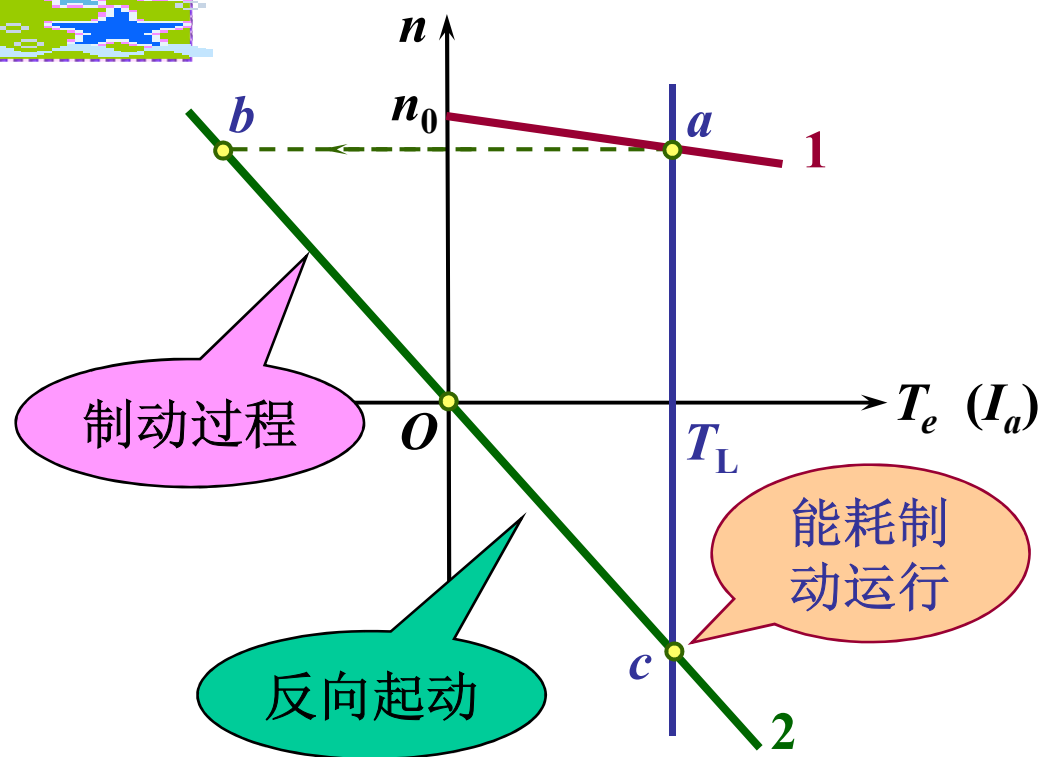
制动前:

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$

制动后:

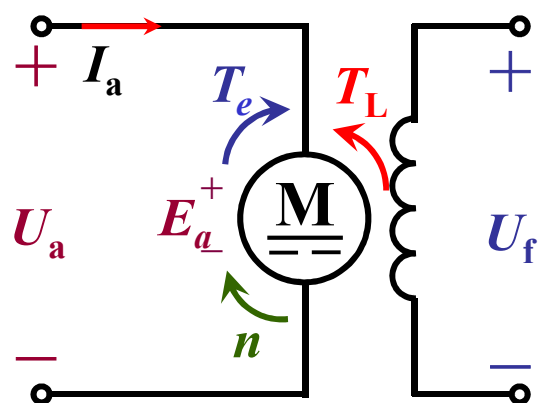
$$n = - \frac{R_a + R_b}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$

2、能耗制动运行 —— 下放重物



二、反接制动

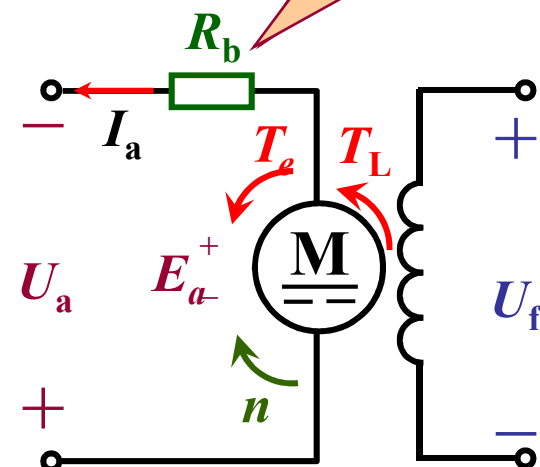
1、电压反向反接制动——迅速停机



电动状态

I_a 的方向?

T_e 的方向?



制动状态

电枢反接时： 动能、电源电能均被 R_b 消耗掉。

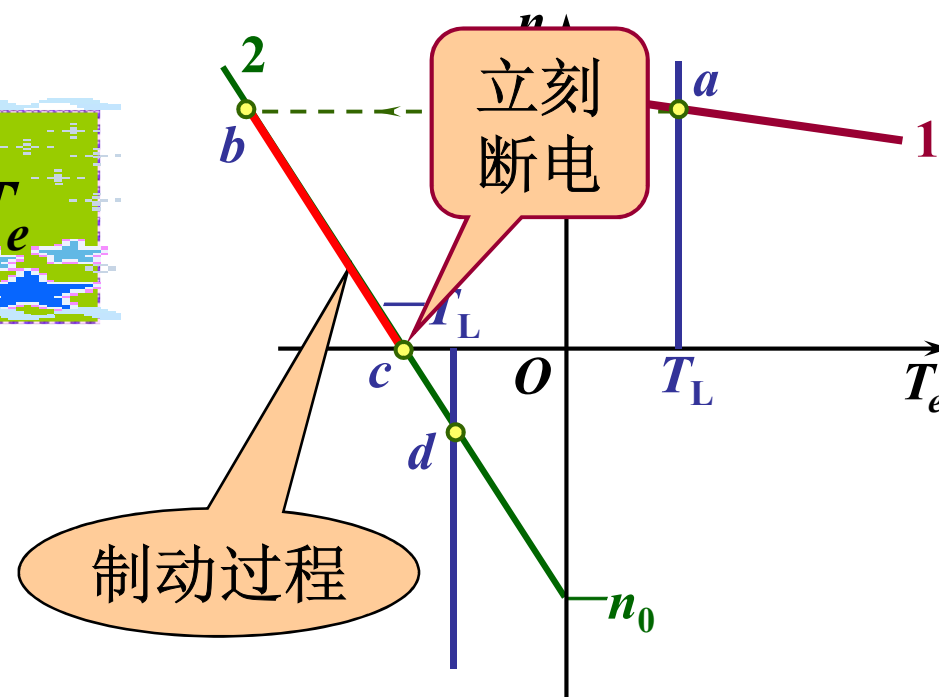
制动前：

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$

制动后：



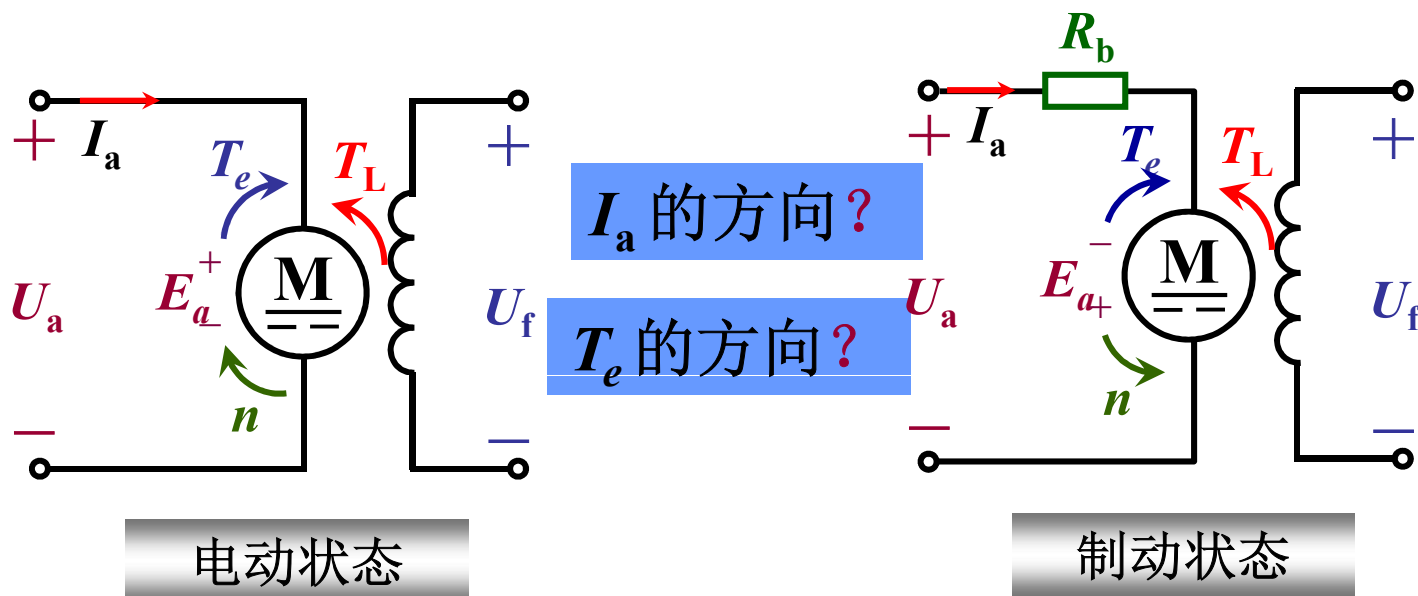
$$n = \frac{-U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_b}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$



→ $n = 0$, $T_e \neq 0$, 立刻断电，停机。

└→ 未断电，反向起动 → 反向电动运行。

2. 电动势反向反接制动 —— 下放重物



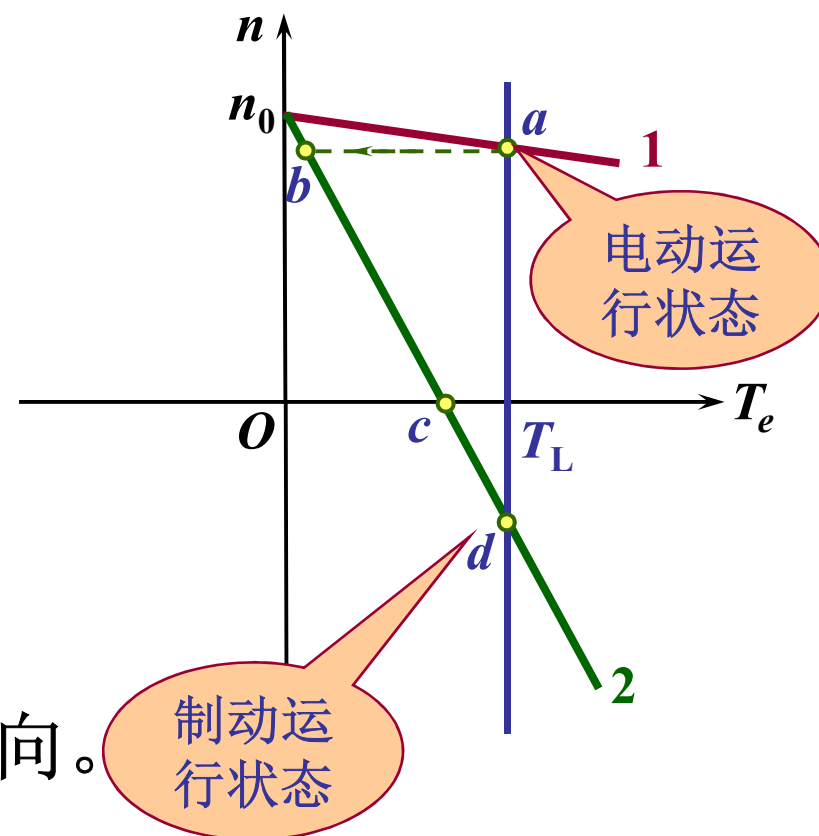
制动前：特性 1

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e$$

制动开始后：特性 2

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_b}{C_e C_T \Phi^2} T_e$$

※ I_a 和 T_e 始终没有改变方向。



三、回馈制动

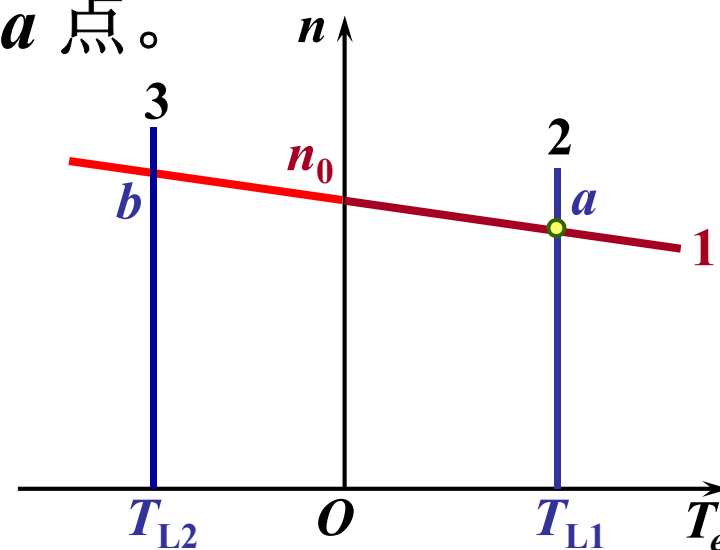
- 特点： $|n| > |n_0| \rightarrow |E_a| > |U_a|$
→ 电动机处于发电状态，
→ 动能转换为电能回馈电网。

1. 正向回馈制动 —— 电车下坡

- 平地或上坡行驶时工作在 a 点。

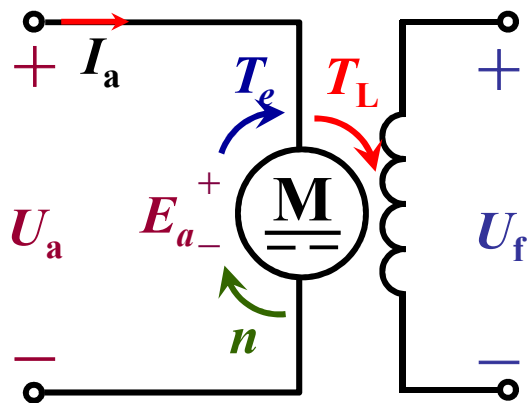
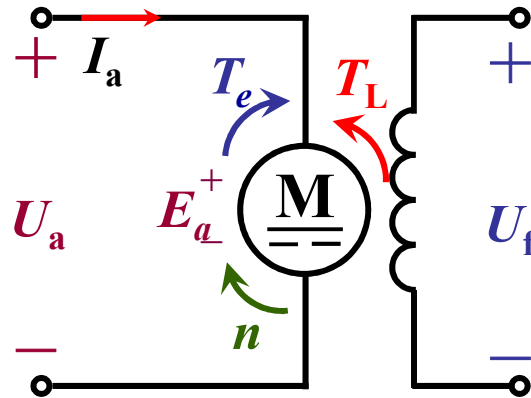
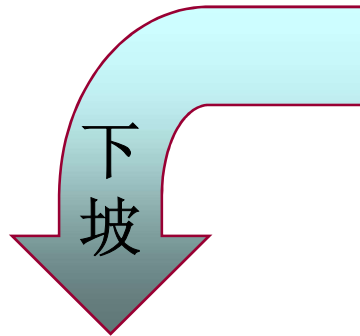
- 下坡行驶时

T_L 反向 $\rightarrow T_{L2} \rightarrow n \uparrow$
 $\rightarrow n > n_0 \rightarrow E_a > U_a$
 $\rightarrow I_a < 0 \rightarrow T_e < 0 \rightarrow n \uparrow$
 $\rightarrow b$ 点 ($T_{L2} = T_e$)。

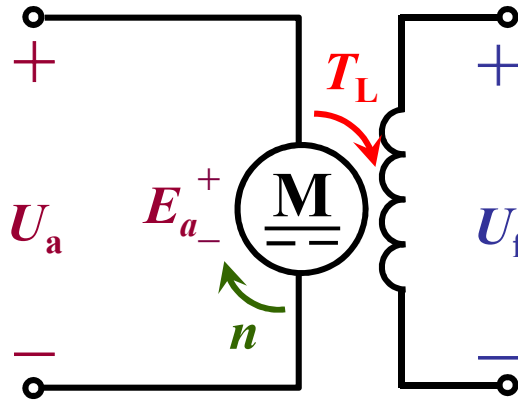




电动状态

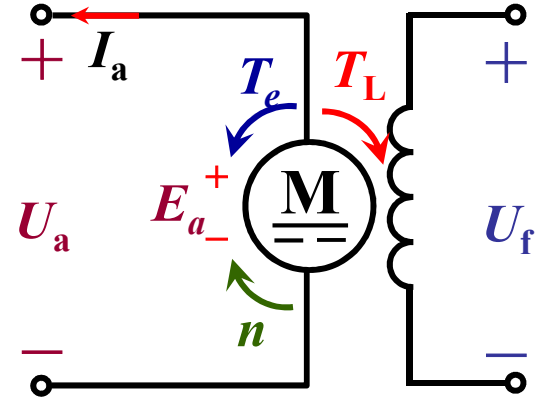


$n \uparrow \rightarrow E_a \uparrow \rightarrow I_a (T_e) \downarrow$



$n = n_0, E_a = U_a, T_e = 0$

$n \uparrow \rightarrow E_a \uparrow$



$I_a (T_e) < 0 \rightarrow |T_e| \uparrow$

$E_a \uparrow (> U_a)$

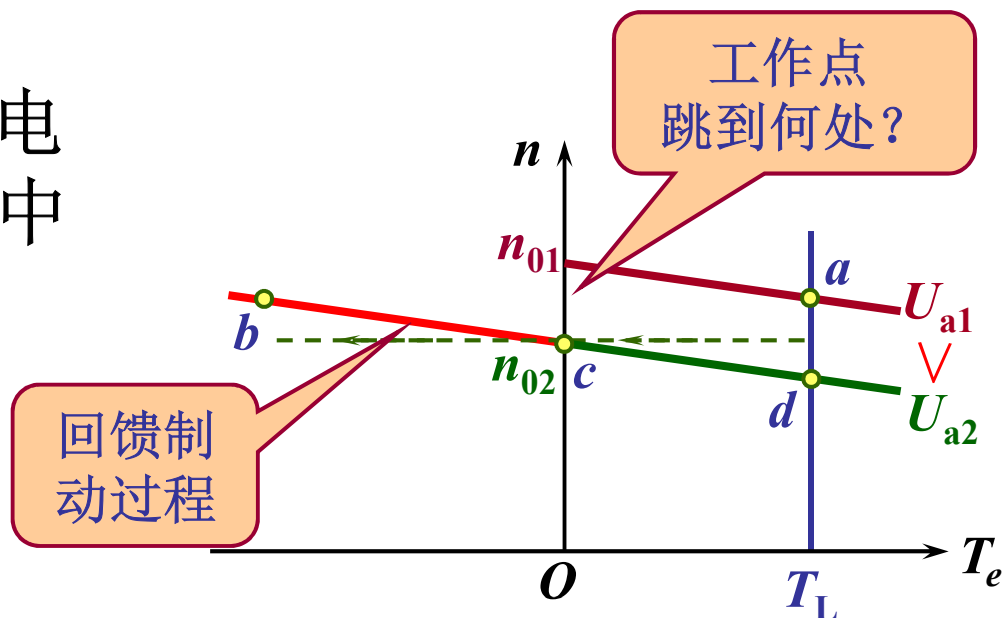
制动状态



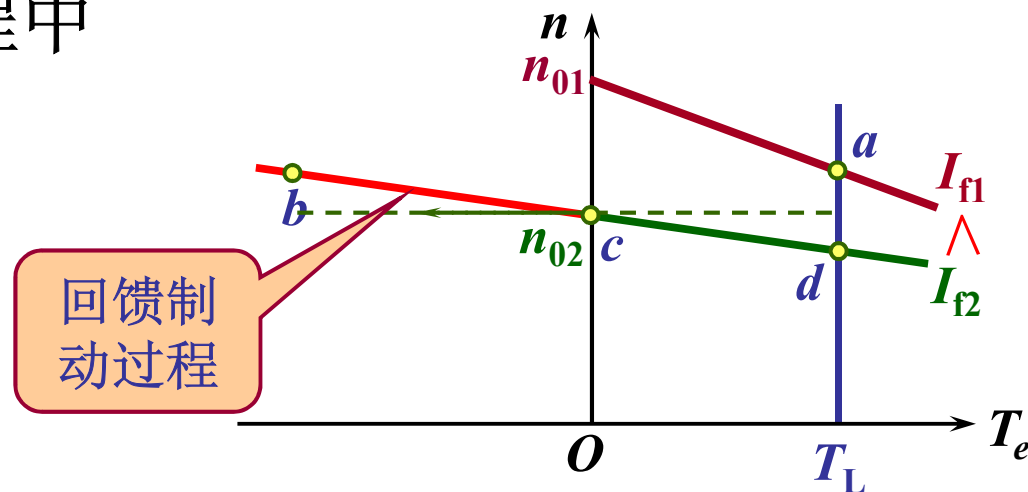
$n > n_0$



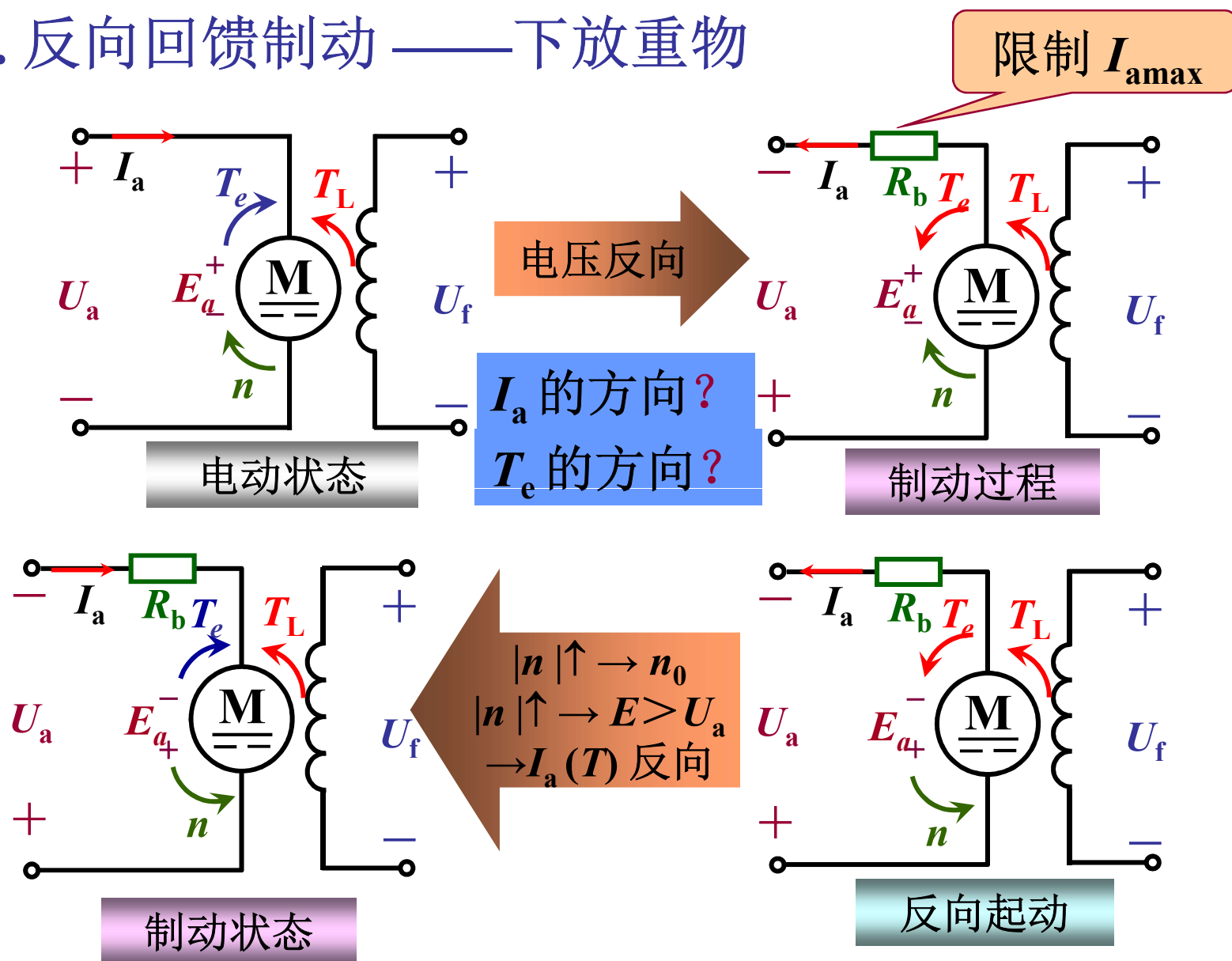
- 在降低电枢电压调速过程中



- 在增加励磁电流调速过程中



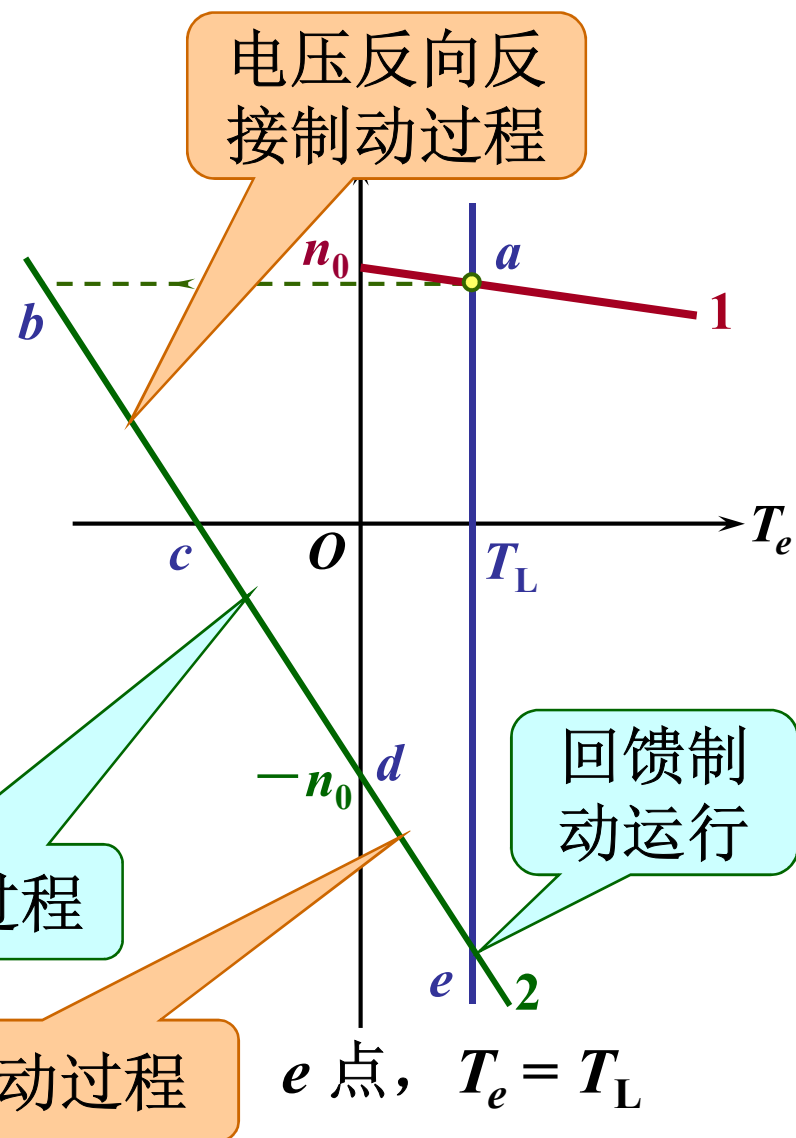
2. 反向回馈制动 —— 下放重物



$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_{eN}$$



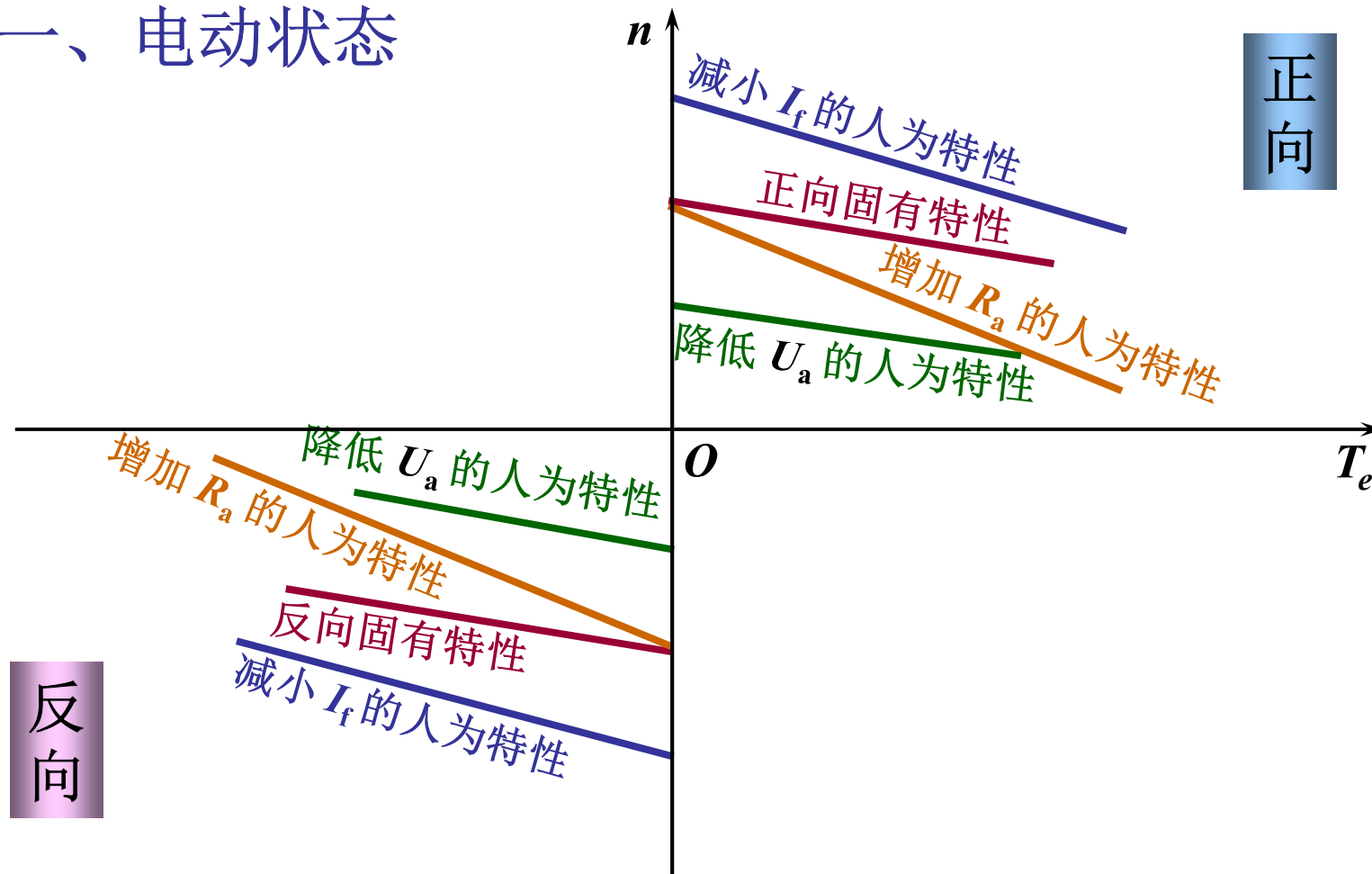
$$n = \frac{-U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_b}{C_E C_T \Phi^2} T_e$$



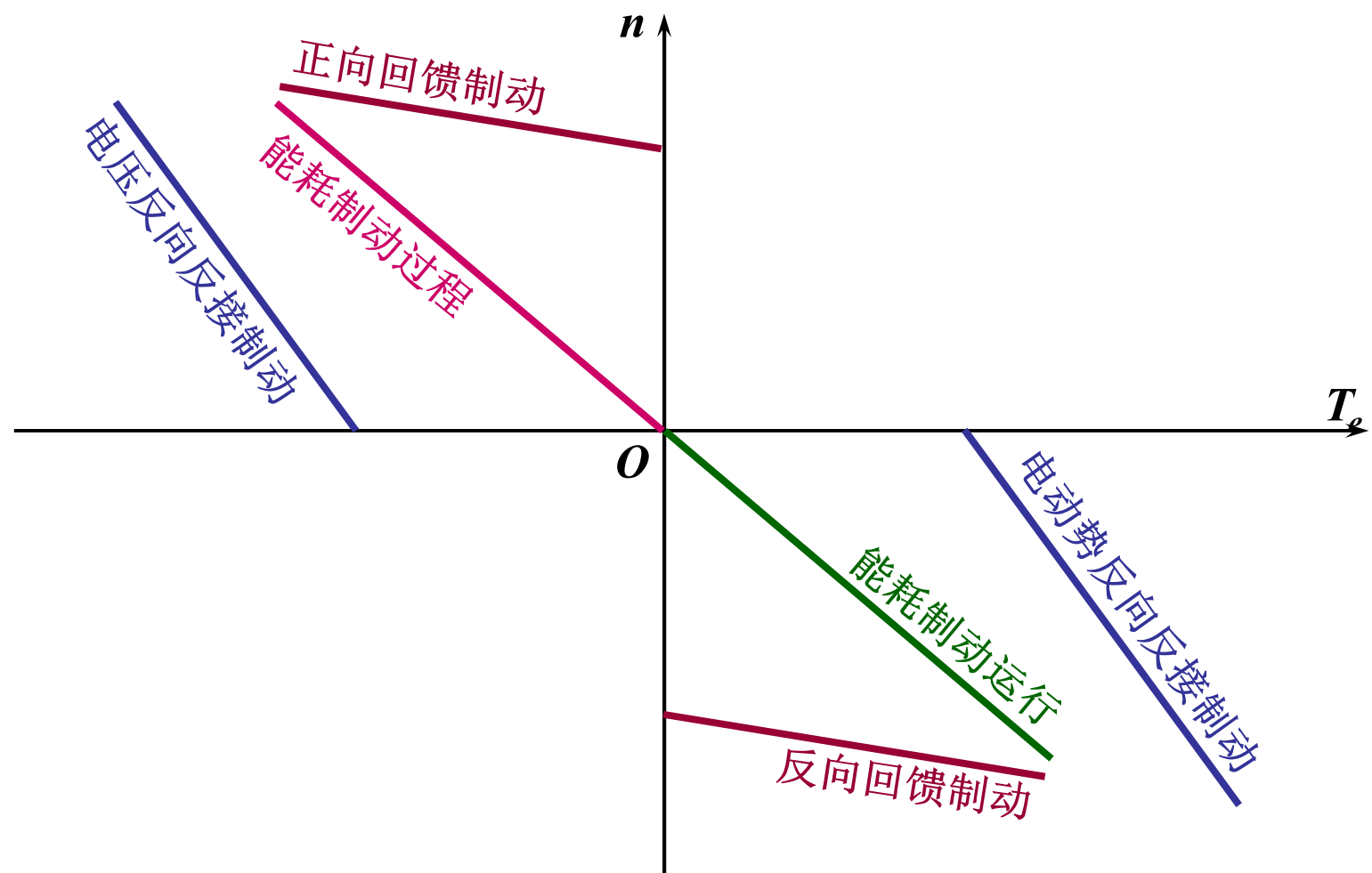


3.8.6 他励电动机在四象限中的运行状态

一、电动状态



二、制动状态



※ 重点与难点

重点:

1. 直流电机的工作原理和励磁方式;
2. 直流电机的空载运行和负载运行、电枢反应;
3. 电枢感应电动势、电磁转矩、电磁功率、功率及损耗的分析与计算;
4. 他励、并励和串励电机的电压、电流方程;
5. 直流电机的运行特性;
6. 起动、调速、制动的几种方法及基本原理。

难点:

1. 电枢绕组、直流电机负载运行的磁场;
2. 电枢感应电动势和电磁转矩。