



- 一. 他励直流电动机的启动
- 二. 他励直流电动机的调速
- 三. 他励直流电动机的电动与制动运行
- 四. 直流拖动系统的过渡过程



三. 他励直流电动机的电动与制动运行

本节学习要点：

1. 熟悉制动的概念
2. 掌握他励直流电动机**电动与制动**方法的原理及特点

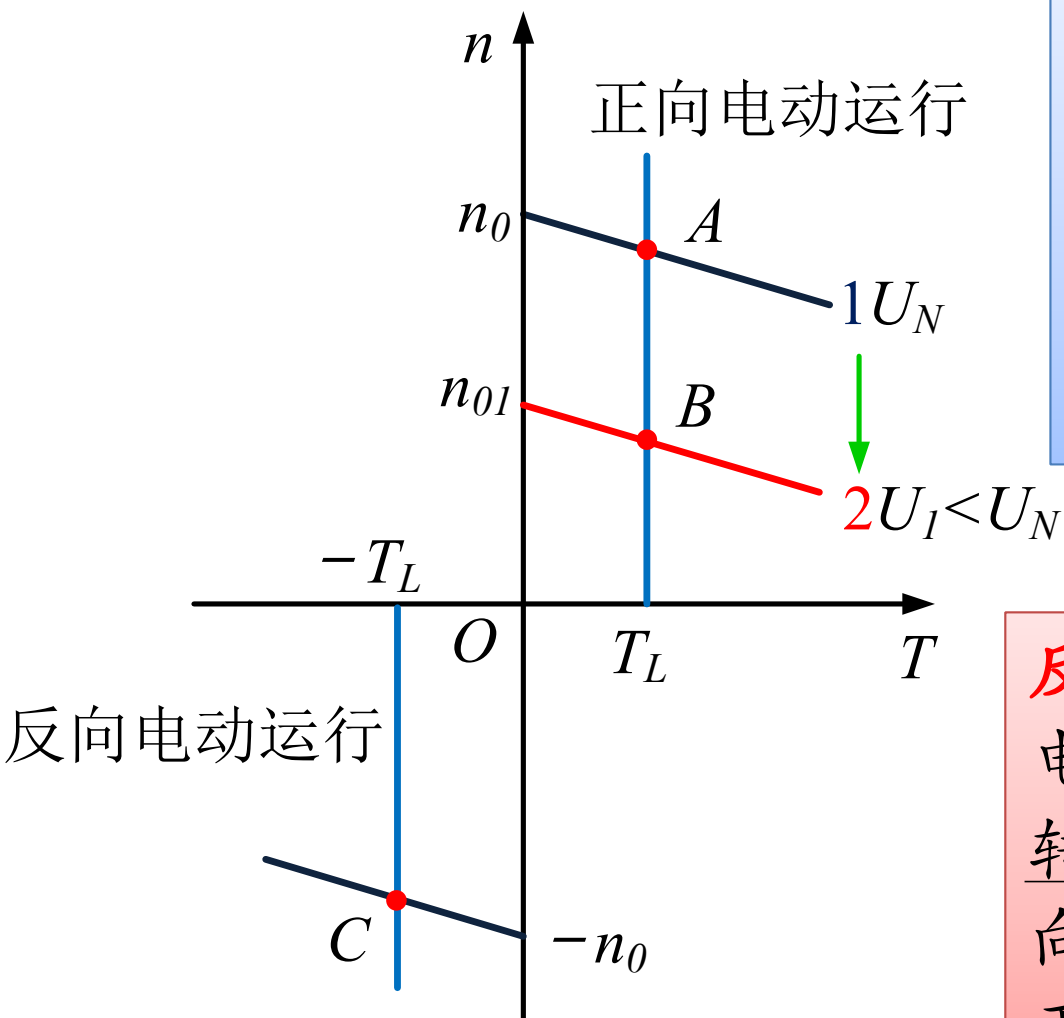


概述:

- ① 电动机在负载特性与机械特性的交点上的恒速运行，称为**稳态运行**；
- ② 在工作点之外的机械特性上的运行时，称为**过度过程**；
- ③ 他励直流电动机的**固有特性**、**人为特性**分布在直角坐标的**四个象限**内。
- ④ 各类生产机械的**负载转矩特性**都分布在直角坐标的**四个象限**内。



1、电动运行 (I 和 III 象限)



正向电动运行

电动机的电磁转矩 $T > 0$,
转速 $n > 0$, T 与 n 同方向,
 T 为拖动性转矩。
工作点在第 I 象限。

反向电动运行

电动机的电磁转矩 $T < 0$,
转速 $n < 0$, T 与 n 同方向,
 T 乃为拖动性转矩。
工作点在第 III 象限。



他励直流电动机稳态电动运行时的功率关系

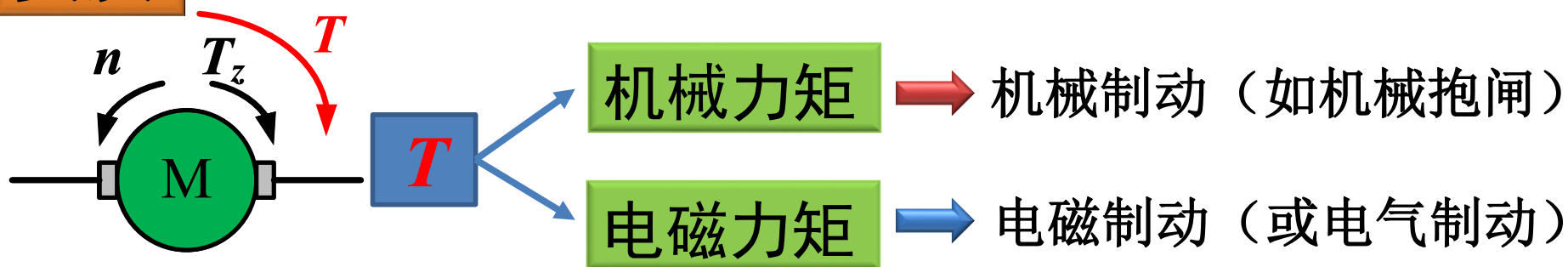
输入	电枢回路	电磁功率	电动机	输出
电功率	总损耗	(电→机)	空载损耗	机械功率
P_1	p_{cua}	P_M	p_0	P_2
$UI_a = I_a^2(R_a + R) + E_a I_a$				
$T\Omega = T_0\Omega + T_2\Omega$				
+	+	+	+	+

制动状态： 电动机的电磁转矩 T 与转速 n **反向**，
 T 为 **制动性阻转矩**。工作点在第II、IV象限。

什么是制动？

定义：电力系统中，电动机尽快停机，或从高速运行很快进入低速运行，称电动机的制动运行。

实质：



电磁制动的实质：是电动机本身产生一个与转向相反的电磁转矩。

由 $T = C_t \Phi_N I_a$ 他励 →
 改变 I_a 方向
 改变 n 方向
 → 使 T 与 n 反向

实现方法：

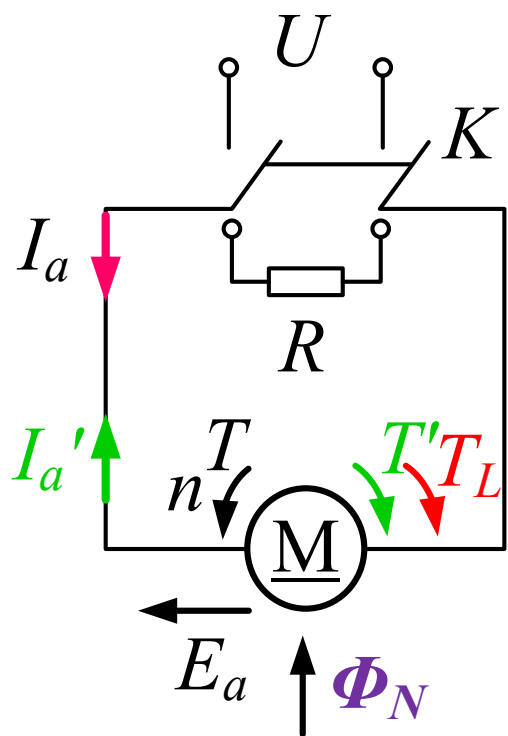
能耗制动

反接制动

回馈制动

2、能耗制动 (Ⅱ、Ⅳ象限)

能耗制动过程



原理：

电动机原接在电源上运行



保持 I_{fN} 不变

从电源断开接到制动电阻R上



他励发电机

产生的电磁转矩 T 与转向相反
 T 与 T_L 共同制动

方程式：

$$0 = E_a + I_{aB}(R_a + R)$$

$$I_{aB} = \frac{-E_a}{R_a + R} < 0$$

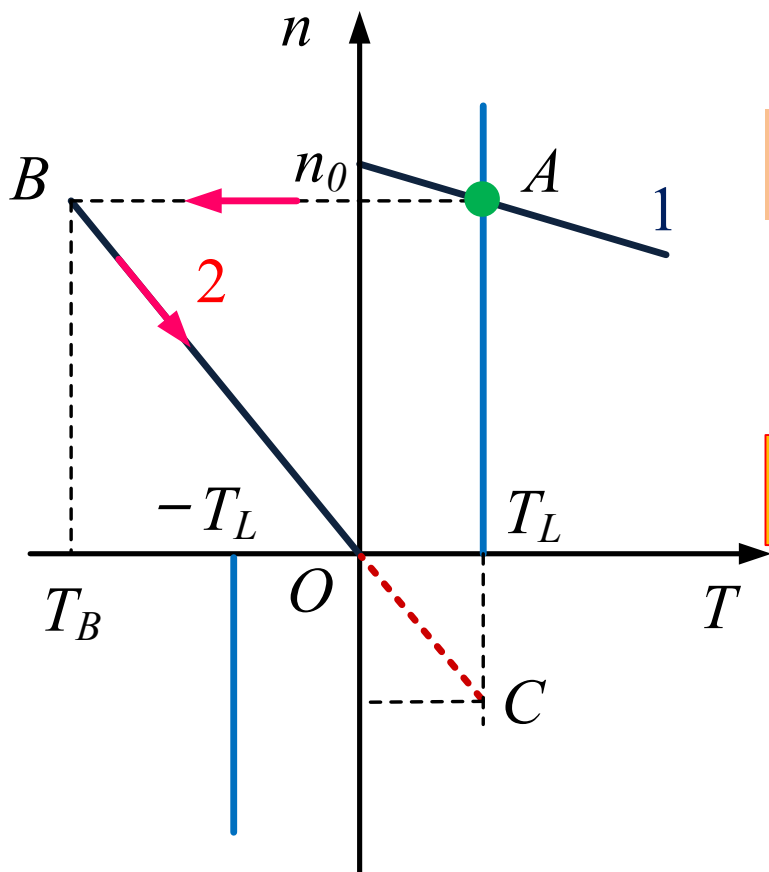
$$T_B = C_T \Phi_N I_{aB} < 0$$

① 能耗制动停机过程-- II象限

拖动反抗性恒转矩负载

能耗制动的机械特性：

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



能耗制动过程

过程：

n 不突变

$A \rightarrow B$

$n > 0$

$T_B < 0 < T_L$

$n \downarrow$
 $\rightarrow O$

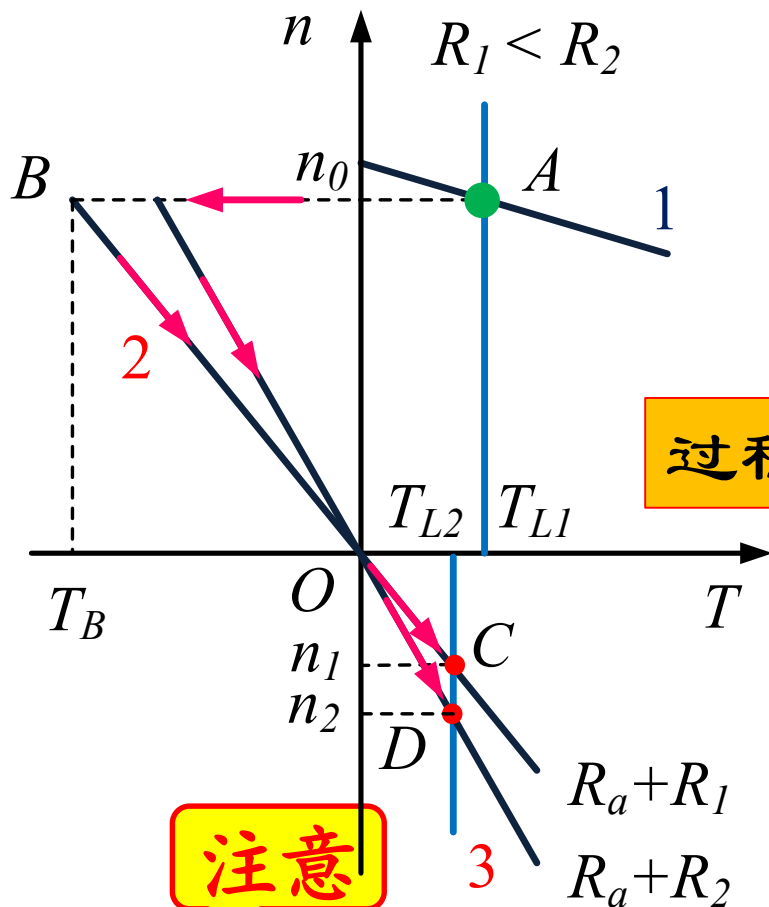
$n = 0$

$T_O = 0$

$T_L = 0$

可靠停机

能耗制动运行



注意

机械功率的输入靠位能性负载减少位能贮存提供

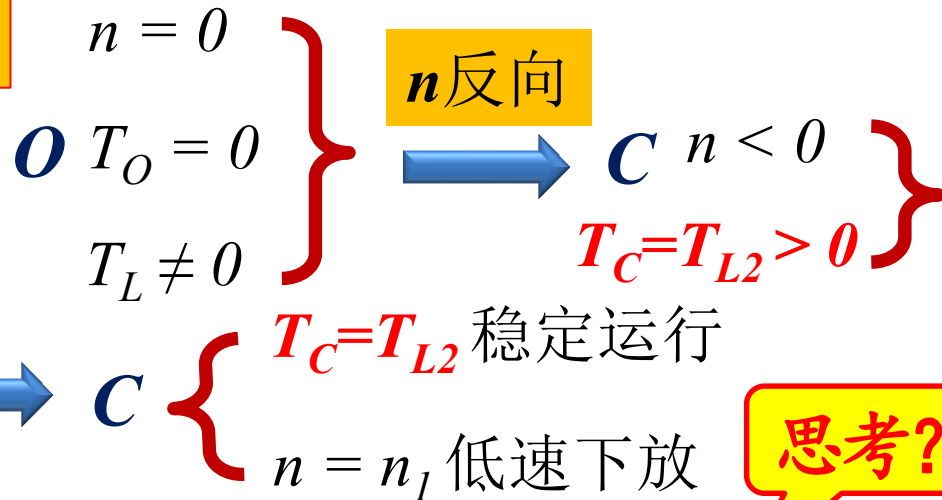
② 位能负载稳速下放—IV象限

拖动位能性负载

能耗制动运行的机械特性：

$$n_z = -\frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2} T = -\frac{R_a + R}{C_e \Phi_N} I_z$$

过程：



思考？

外接电阻 R 越小还是越大，停车越快？



能耗制动的特点

✓ $n = 0$ 时 $T = 0$ ，因此对于反抗性负载能可靠停机，不会反向起动。

✓ 能量关系

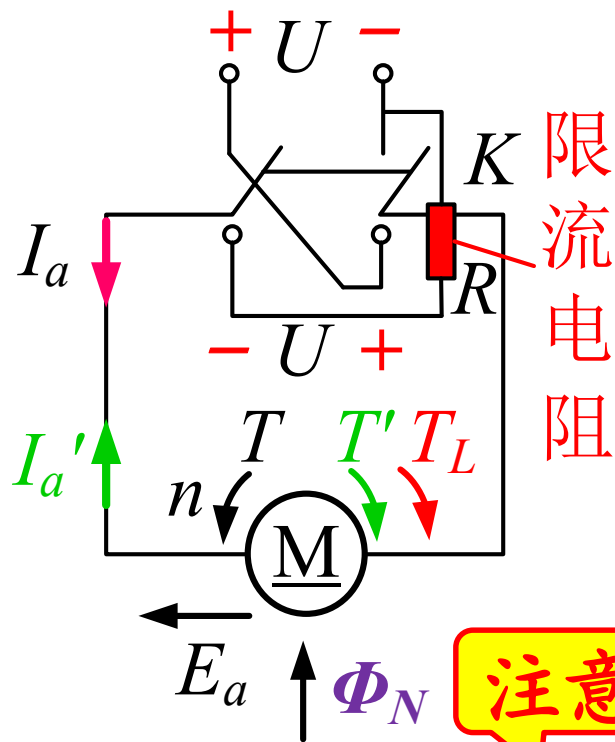
转子机械能（系统释放的动能）



电阻上的损耗 $I_a^2(R_a + R)$

3、反接制动过程-加速停车

(电压反向的反接制动)



原理：

电动机原接在电源上运行

保持 I_{fN} 不变

将电枢绕组经**限流电阻R**反接到电源上

I_a 反向，产生与转向相反的电磁转矩 T 与 T_L **共同制动**

方程式：

$$-U_N = E_a + I_{aB}(R_a + R)$$

$$I_{aB} = \frac{-U_N - E_a}{R_a + R} < 0$$

反接制动过程比能耗制动过程电枢串入电阻的最小值**大一倍**。



① 反接制动停机状态--II象限

拖动反抗性恒转矩负载

电压反向的反接制动的机械特性:

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

过程：

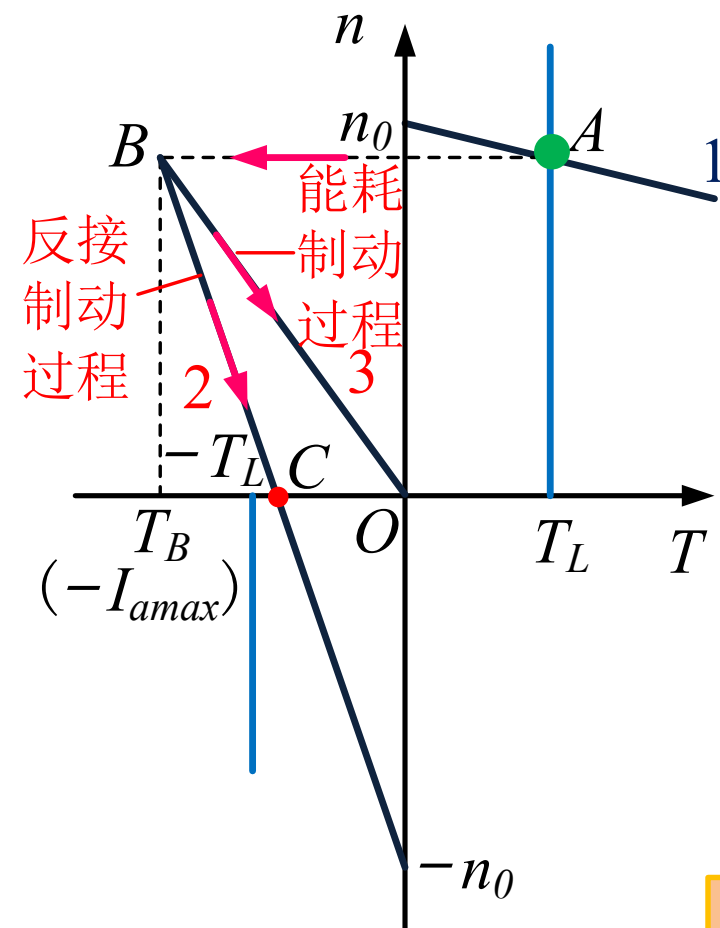
n 不突变

$A \longrightarrow B \quad \left. \vphantom{A \longrightarrow B} \right\} T_B < 0 < T_L$

$n \downarrow$  $C \left\{ \begin{array}{l} n_c = 0 \\ T_C \neq 0 \end{array} \right.$ 切断电源 停机

串入电阻最小值:

$$R_{min} = \frac{-U_N - E_a}{-I_{amax}} - R_a = \frac{U_N + E_a}{I_{amax}} - R_a$$



反接制动过程

② 反向电动状态— III象限

拖动反抗性恒转矩负载

过程：

C

停机后不
切断电源

$$T_C > T_L$$

反向
启动



D

$$n_D < 0$$

$$T_D < 0$$

$$T_D = T_L$$

T 为驱
动转矩

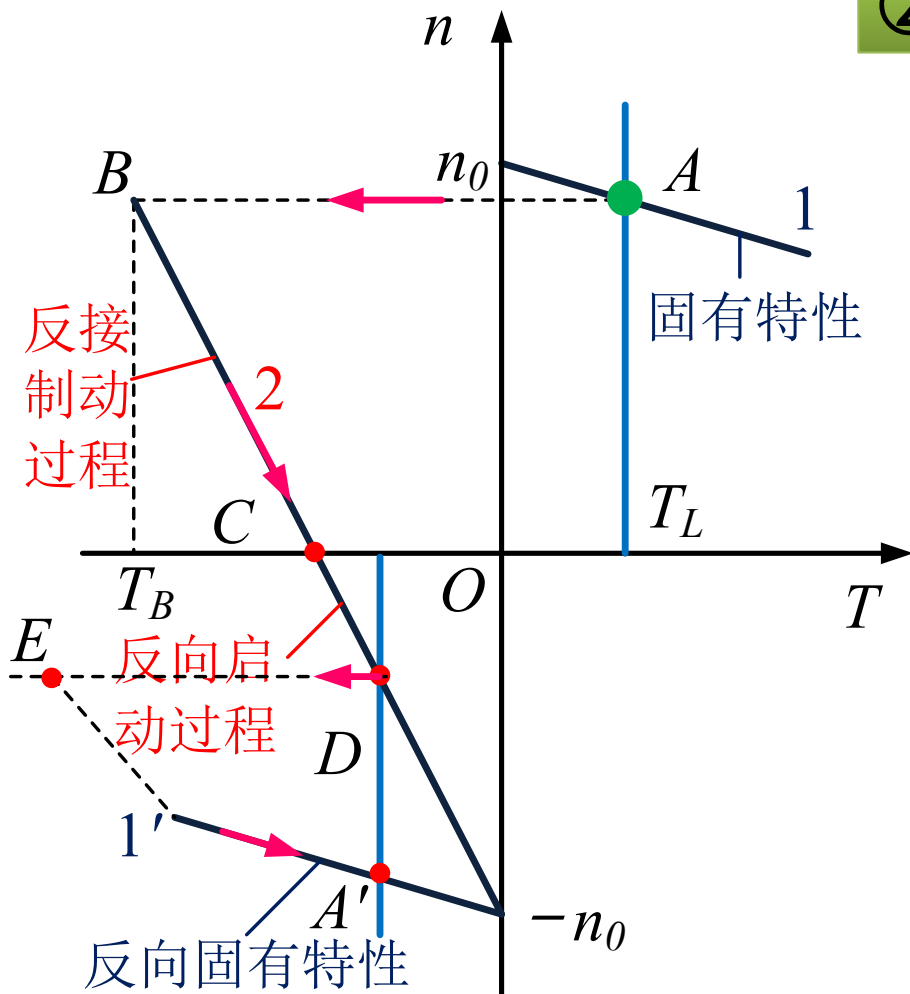
切除 R



E



A'



反接制动接着反向启动

4. 倒拉反转运行

(电动势反向的**反接制动**)

原理：

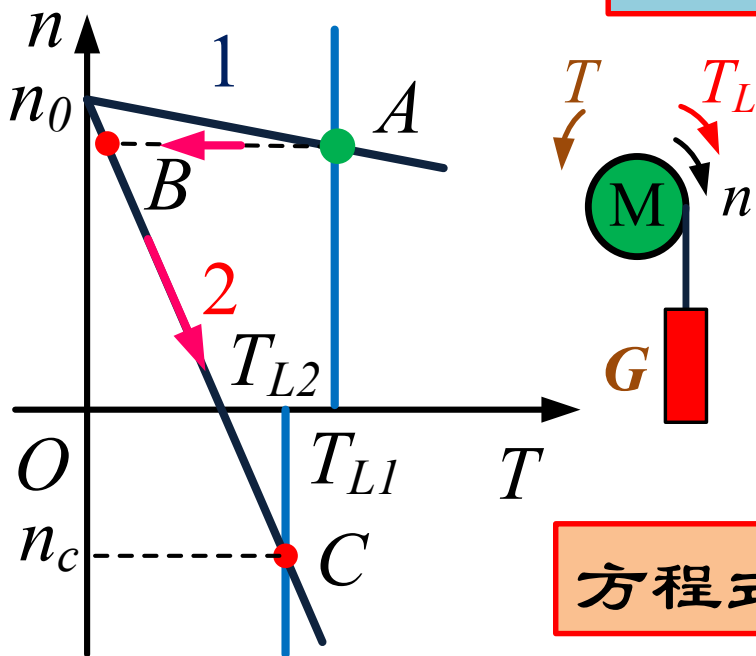
电动机原接在电源上运行

保持 U_N I_{fN} 不变

在电枢回路串入足够大的电阻 R

第III象限

转速 n 反向，则 E_a 反向，
电磁转矩起制动作用



方程式：

$$U_N = E_a + I_{aB}(R_a + R)$$

$$E_a = C_e \Phi_N n < 0$$

$$n_c = n_0 - \frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{L2} = n_0 - \frac{R_a + R}{C_e \Phi_N} I_z$$

注意

下放速度：

选择适当的 R ，可获得**极低**的稳定下放速度。



反接制动的特点

✓ 制动过程中的实际转向与理想空载转速方向相反

电压反向 (II象限)

$$n_0 < 0, n > 0$$

电动势反向 (IV象限)

$$n_0 > 0, n < 0$$

✓ 能量关系

电压反向 (II象限)

$$U < 0, I_a = \frac{-U_N - E_a}{R_a + R} < 0$$

电动势反向 (IV象限)

$$U > 0, I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a + R} > 0$$

$$P = UI_a > 0$$



从电源输入电功率

$$P_M = E_a I_a < 0$$



从轴上输入机械功率
转换成电枢中电功率



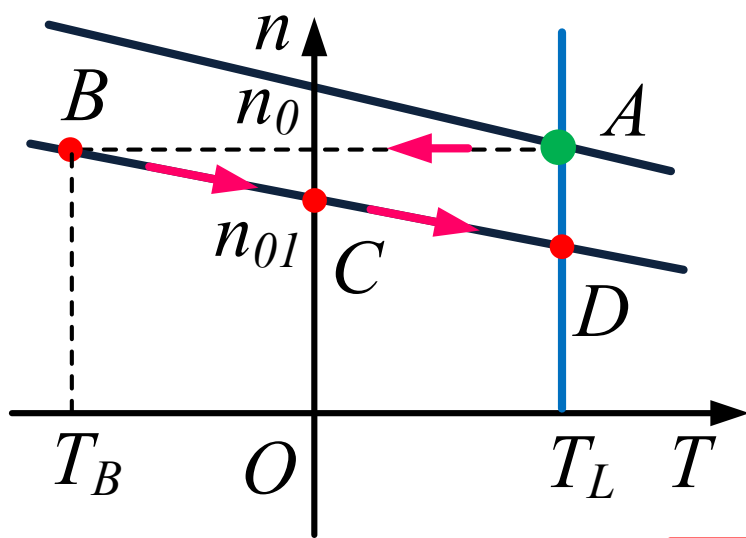
电阻上的损耗

$$I_a^2(R_a + R)$$

5. 回馈制动运行

➡ 正向回馈制动运行 (电压不反向的回馈制动)

① 用于降低端电压调速



原理:

U 降低

$A \rightarrow B$ $\left\{ \begin{array}{l} T_B < 0 \text{ (制动)} \\ n = n_B \\ n_B > 0 \end{array} \right.$

$n \downarrow \rightarrow C$ $n \downarrow \rightarrow D$

BC段：正向回馈制动过程

能量关系:

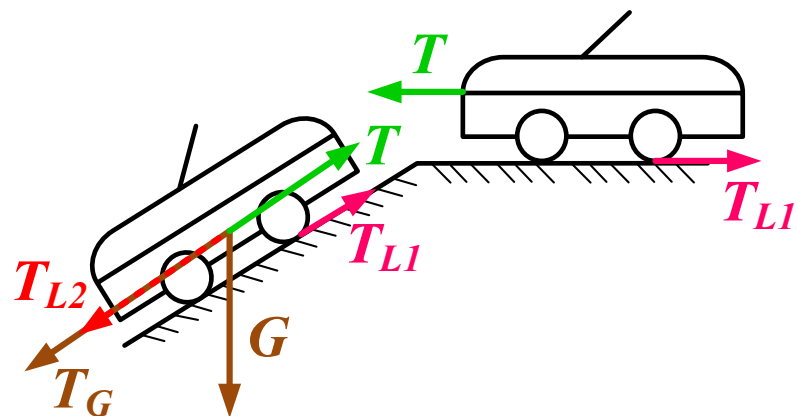
$$P_M = E_a I_a < 0$$

$$P_1 = U I_a < 0$$

动能从轴上输入机械功率
转换成电枢中电功率

向电源发出电功率

② 用于电车下坡

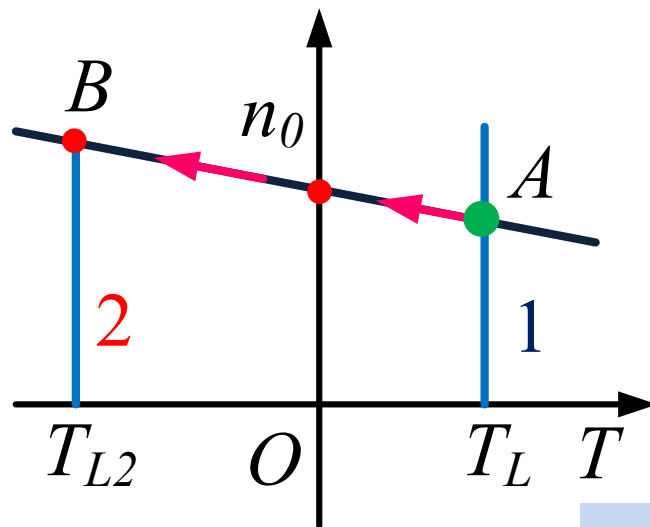


原理：

驱动转矩： T_G
制动转矩： T_{L1}

合成 $T_{L2} < 0$
(驱动)

$$|T_G| > |T_{L1}|$$



$$A \xrightarrow{T - T_{L2} > 0} n \uparrow \rightarrow n_0 \left\{ \begin{array}{l} T_O = 0 \\ T_{L2} \neq 0 \end{array} \right.$$

$$n \uparrow \rightarrow B \left\{ \begin{array}{l} T_B = T_{L2} \\ n_B > n_0 \end{array} \right. \text{稳速下坡 (II象限)}$$

能量关系：

$$P_M = E_a I_a < 0$$

$$P_1 = U I_a < 0$$

位能从轴上输入机械功率
转换成电枢中电功率

向电源发出电功率

反向回馈制动运行 (电压反向的回馈制动)

用于重物高速下放 (IV象限)

原理:

位能负载 $\rightarrow C \begin{cases} n_C < 0 \\ T_C > 0 \end{cases}$ 稳速下放

$R = 0$

$n_C > n_0$ (高速) $\rightarrow D$

能量关系:

$$E_a = C_e \Phi_N n_D$$

$$U = C_e \Phi_N n_0$$

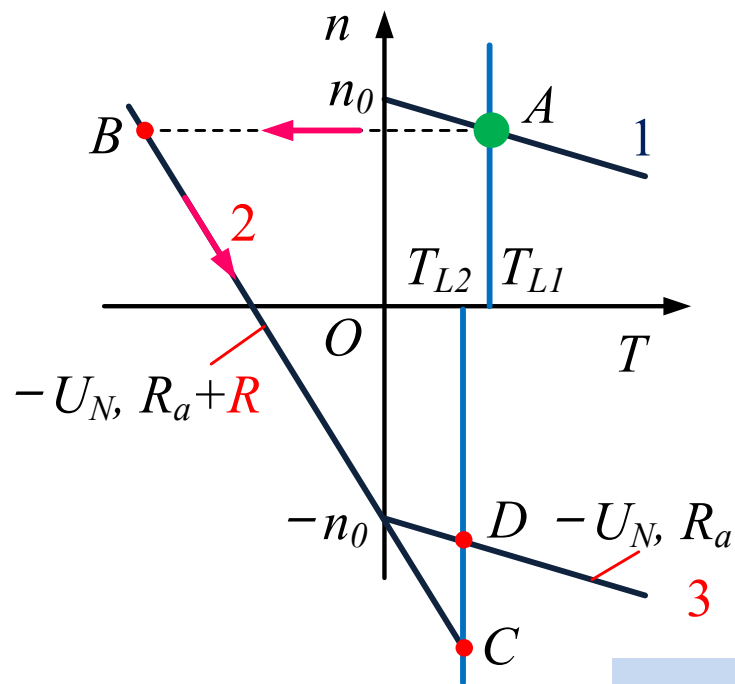
$|n_D| > |n_0| \rightarrow E_a > U$
(发电机状态)

$$P_M = E_a I_a < 0$$

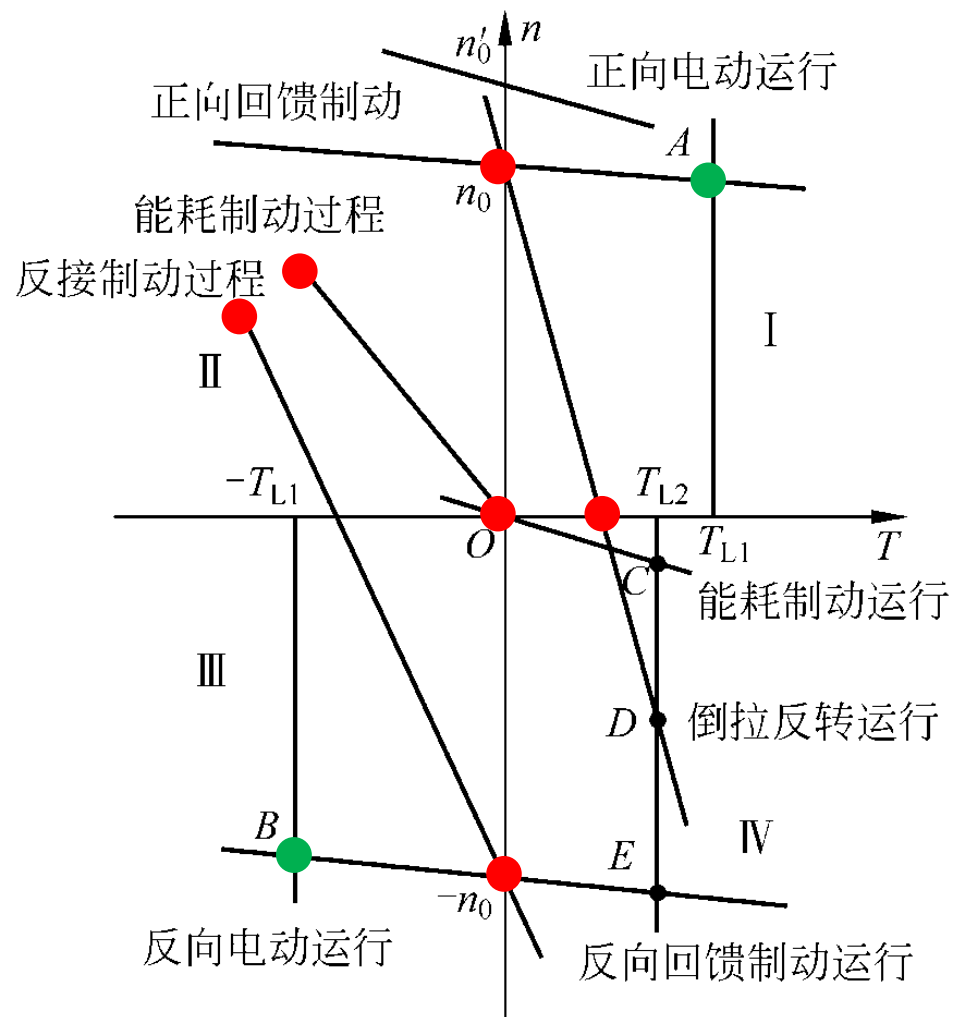
位能从轴上输入机械功率
转换成电枢中电功率

$$P_1 = U I_a < 0$$

向电源发出电功率



直流电动机四象限运行



保持磁场大小、方向不变，改变 I_a 的方向（ T 的方向）或改变 n 的方向，使 T 与 n 方向相反，获得制动转矩。



例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，**忽略空载转矩**，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(1) 负载为反抗性恒转矩时，采用**能耗制动过程**停车时，电枢回路应串入的制动电阻最小值是多少？

解题思路：

B点电压方程式：

$$0 = E_{aB} + I_{aB}(R + R_a)$$

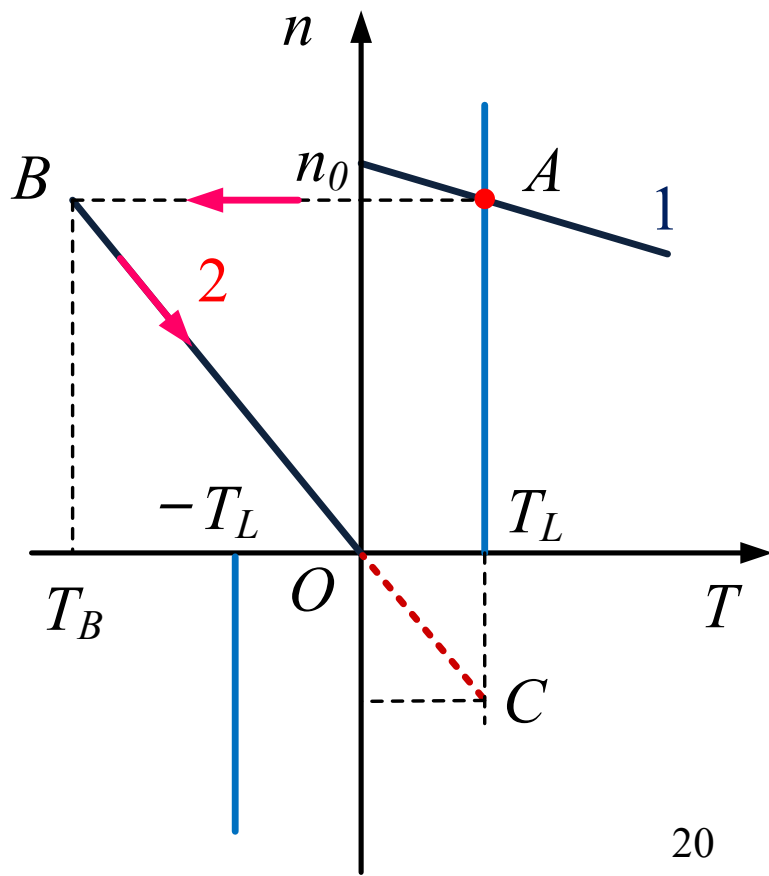
二个未知数，一个方程，无解。

B点与A点**转速相同**， $E_{aA} = E_{aB}$

列A点电压方程： $U_N = E_{aA} + I_a R_a$

由于 $T_L=0.9T_N$ ，结合 $T = C_t \Phi_N I_a$ ，得

$$I_a = 0.9 I_N$$





例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，**忽略空载转矩**，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(1) 负载为反抗性恒转矩时，采用**能耗制动过程**停车时，电枢回路应串入的制动电阻最小值是多少？

解：由于 $T_L=0.9T_N$ ，得： $I_a = 0.9 I_N$

$$E_{aB} = E_{aA} = U_N - 0.9I_N R_a = 209.7 \text{ V}, \text{ 代入 } 0 = E_{aB} + I_{aB}(R + R_a)$$

能耗制动串入的制动电阻最小值：

$$R = \frac{-E_{aB}}{I_{aB}} - R_a = \frac{-209.7}{-2 \times 115} - 0.1 = 0.812 \Omega$$



例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(2) 负载为位能性恒转矩时，传动机构的转矩损耗为 $\Delta T = 0.1T_N$ ，电动机运行在 $n_1 = -200\text{r/min}$ 匀速下放重物，采用能耗制动运行，电枢回路应串入的电阻值是多少？该电阻上的功率损耗是多少？

解题思路：

C点电压方程式：

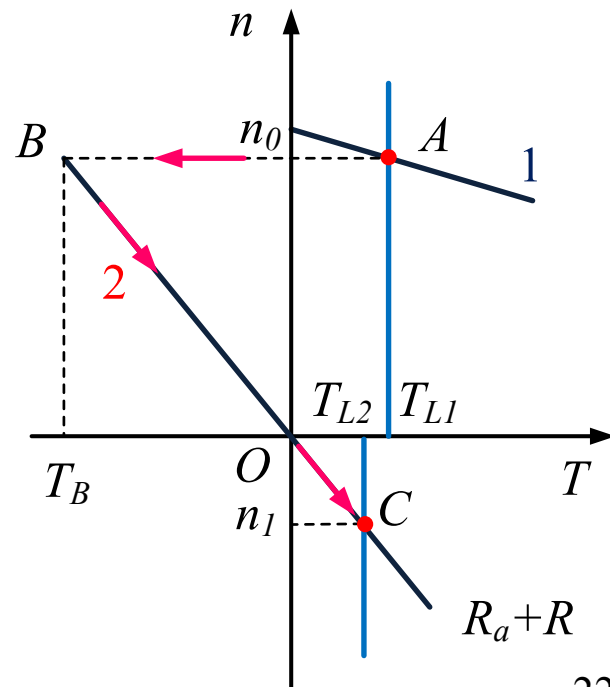
$$0 = E_{ac} + I_{ac}(R + R_a), \quad E_{ac} = C_e \Phi_N n_C,$$

$$T_{L2} = C_t \Phi_N I_{ac} = 0.9T_N - 0.2T_N = 0.7T_N$$

因此， $I_{ac} = 0.7I_N$

补充额点工作点电压方程，求 $C_e \Phi_N$ 。

$$U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$$





例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(2) 负载为位能性恒转矩时，传动机构的转矩损耗为 $\Delta T=0.1T_N$ ，电动机运行在 $n_1=-200\text{r/min}$ 匀速下放重物，采用能耗制动运行，电枢回路应串入的电阻值是多少？该电阻上的功率损耗是多少？

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

计算 E_{ac} ， $E_{ac} = C_e\Phi_N n_C = 0.139 \times (-200) = -27.8 \text{ V}$

反转时的负载转矩： $T_{L2} = T_L - 2\Delta T = 0.7T_N$

负载电流： $I_{ac} = (T_{L2}/T_N)I_N = 0.7I_N = 0.7 \times 115 = 80.5 \text{ A}$

串入电枢回路电阻和功耗：

$$R = E_{ac}/I_{ac} - R_a = 0.245 \Omega, \quad p_R = I_{ac}^2 R = 1588 \text{ W}$$



例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩， 电枢电流 $I_{amax} \leq 2I_N$ ， 若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(3) 负载同题 (1)， 采用反接制动停车， 电枢回路应串入的电阻最小值是多少？

解题思路：

B点电压方程式

$$-U_N = E_{aB} + I_{aB}(R_a + R)$$

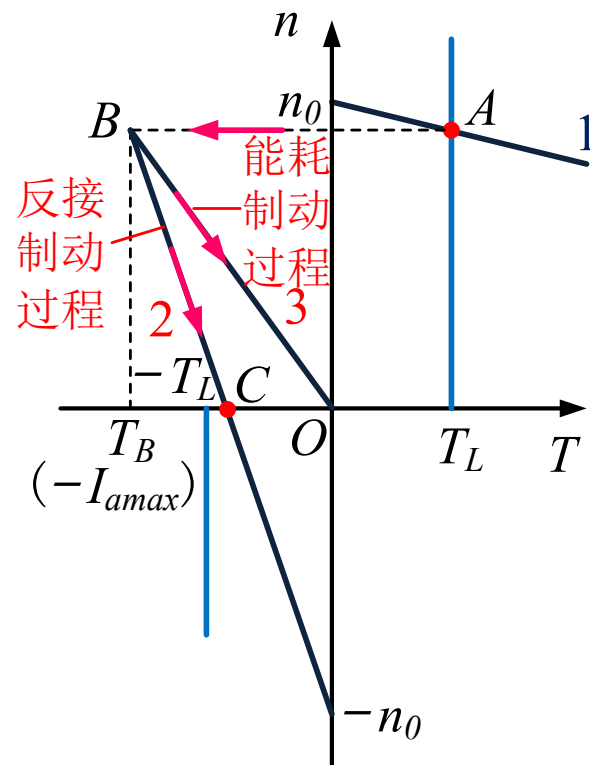
其余与 (1) 思路相同

B点与A点转速相同， $E_{aA} = E_{aB}$

$$\text{列A点电压方程： } U_N = E_{aA} + I_a R_a$$

由于 $T_L=0.9T_N$ ， 结合 $T = C_t \Phi_N I_a$ ， 得

$$I_a = 0.9 I_N$$





例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(3) 负载同题(1)，采用反接制动停车，电枢回路应串入的电阻最小值是多少？

解：由 $-U_N = E_a + I_{aB}(R_a + R)$ 得反接制动停车，电枢回路应串入的电阻最小值：

$$R = \frac{-U_N - E_a}{I_{aB}} - R_a = \frac{-220 - 209.7}{-2 \times 115} - 0.1 = 1.768 \Omega$$



例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(4) 负载同题(2)，电动机运行在 $n_2=-1000\text{r/min}$ 匀速下放重物若采用倒拉反转运行，电枢回路应串入的电阻值是多少？该电阻上的功率损耗是多少？

解题思路：

C点方程式

$$U_N = E_{ac} + I_{ac}(R_a + R)$$

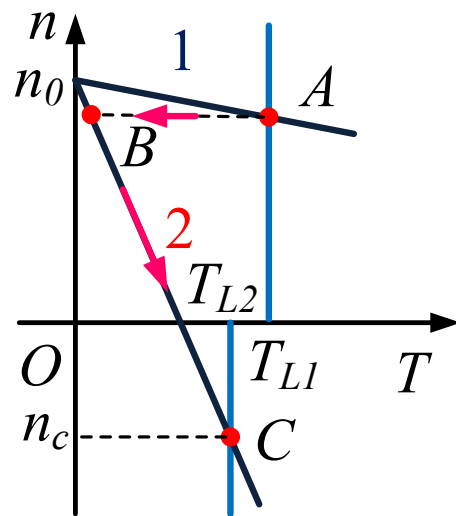
$$E_{ac} = C_e \Phi_N n_c, \text{其余与 (2) 思路相同}$$

$$T_{L2} = C_t \Phi_N I_{ac} = 0.9T_N - 0.2T_N = 0.7T_N$$

$$\text{因此, } I_{ac} = 0.7I_N$$

补充额点工作点电压方程，求 $C_e \Phi_N$ 。

$$U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$$





例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩， 电枢电流 $I_{amax} \leq 2I_N$ ， 若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

（4） 负载同题（2）， 电动机运行在 $n_2 = -1000\text{r/min}$ 匀速下放重物若采用倒拉反转运行， 电枢回路应串入的电阻值是多少？ 该电阻上的功率损耗是多少？

解：

计算 E_{ac} ， $E_{ac} = C_e \Phi_N n_2 = 0.139 \times (-1000) = -139 \text{ V}$

代入： $U_N = E_{ac} + I_{ac}(R_a + R)$

得串入电枢回路电阻和功耗：

$$R = \frac{U_N - E_{ac}}{I_{ac}} - R_a = 4.36 \Omega, \quad p_R = I_{ac}^2 R = 28254 \text{ W}$$



例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ，忽略空载转矩，电枢电流 $I_{amax}\leq 2I_N$ ，若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

(5) 负载同题(2)，采用反向回馈制动运行，电枢回路不串电阻时，电动机转速是多少？

解题思路：

D点方程式

$$-U_N = C_e \Phi_N n_D + I_{aD} R_a$$

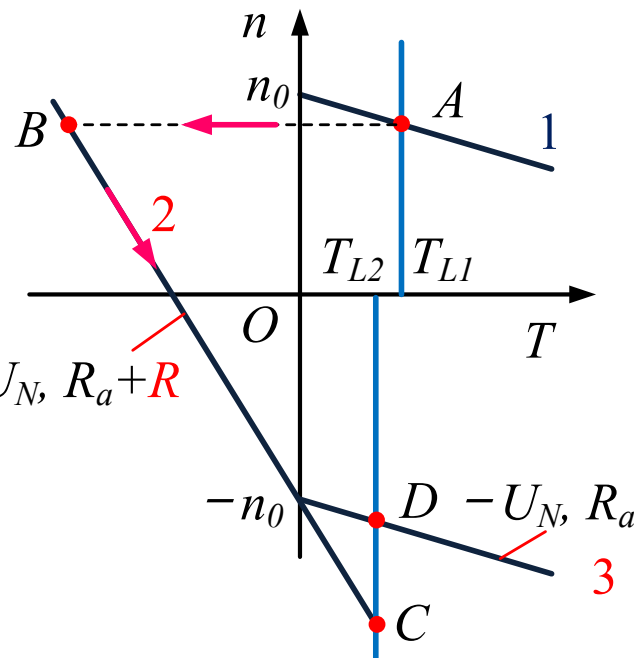
其余与(2)思路相同

$$T_{L2} = C_t \Phi_N I_{aC} = 0.9T_N - 0.2T_N = 0.7T_N$$

因此， $I_{aD} = 0.7I_N$

补充额点工作点电压方程，求 $C_e \Phi_N$ 。

$$U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$$





例题 4-7 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩， 电枢电流 $I_{amax} \leq 2I_N$ ， 若运行于正向电动状态时， $T_L=0.9T_N$ 。

（5） 负载同题（2）， 采用反向回馈制动运行， 电枢回路不串电阻时， 电动机转速是多少？

解：

由D点电压方程式： $-U_N = C_e \Phi_N n_D + I_{aD} R_a$ ， 得
电动机转速：

$$n_D = \frac{-U_N - I_{aD} R_a}{C_e \Phi_N} = \frac{-220 - 80.5 \times 0.1}{0.139} = -1640.6 \text{ r/min}$$



本章结束

作业：4.8、4.12