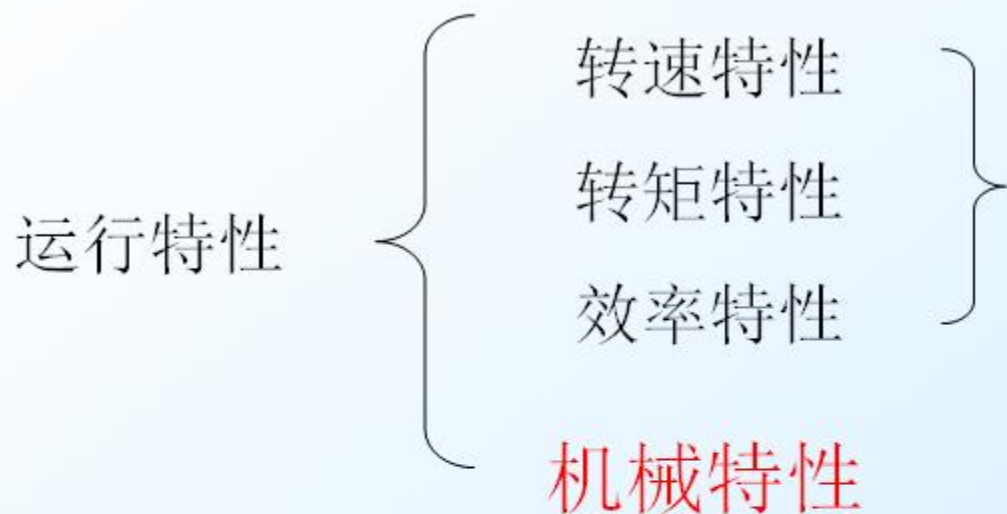


第1章 直流电动机

- ❖ 概述
- ❖ 直流电动机的运行原理
- ❖ 直流电动机的工作特性

他励直流电动机工作特性



工作特性，是指在 $U = U_N$ ， $I_f = I_{fN}$ 时，转速 n 、电磁转矩 T 和效率随输出功率 P_2 而变化的关系。

电压、励磁、转子电枢回路总电阻均为常数的情况下，电机转速和电磁转矩的关系曲线。分为**自然机械特性**和**人工机械特性**。

(1) 转速特性

当 $U = U_N$, $I_f = I_{fN}$, 电枢回路无外串电阻时,
 $n = f(I_a)$ 的变化关系。

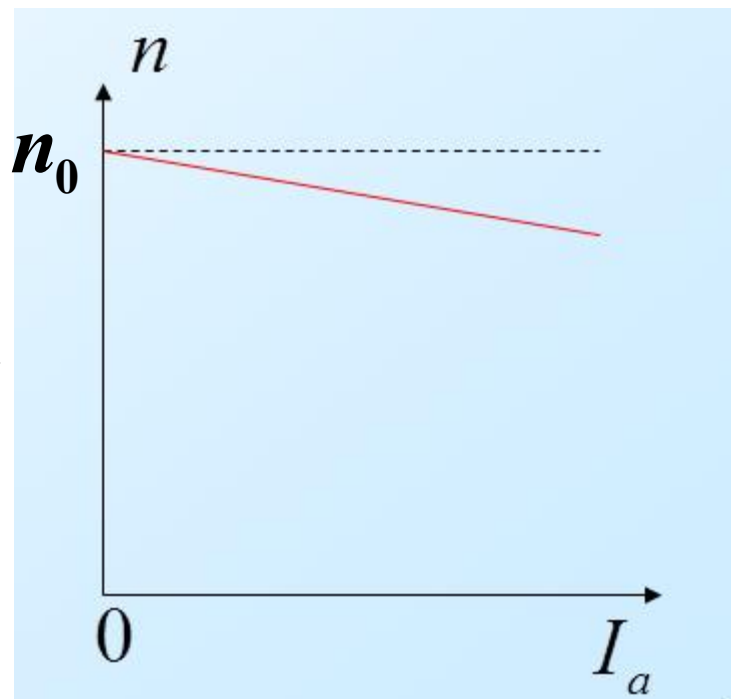
由电压平衡方程可得

$$E_a = U_N - I_a R_a$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a = n_0 - \beta I_a$$

n_0 为理想空载转速

$\Delta n = \beta I_a$ 为转速降



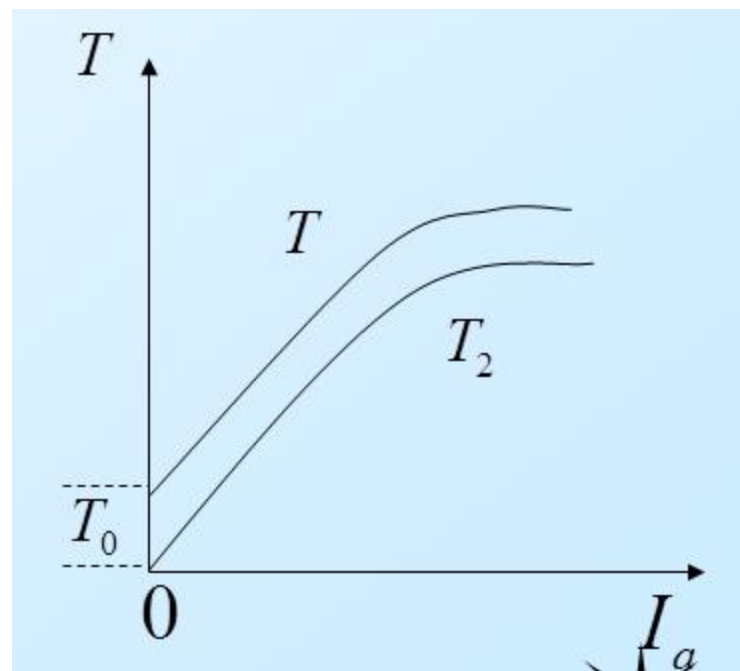
(2) 转矩特性

当 $U = U_N$, $I_f = I_{fN}$, 电枢回路无外串电阻时,
 $T = f(I_a)$ 的变化关系。

由电磁转矩公式可得

$$T = C_T \Phi I_a$$

考虑 I_a 较大时电枢反应去磁作用, 特性曲线可偏离直线略有下降。

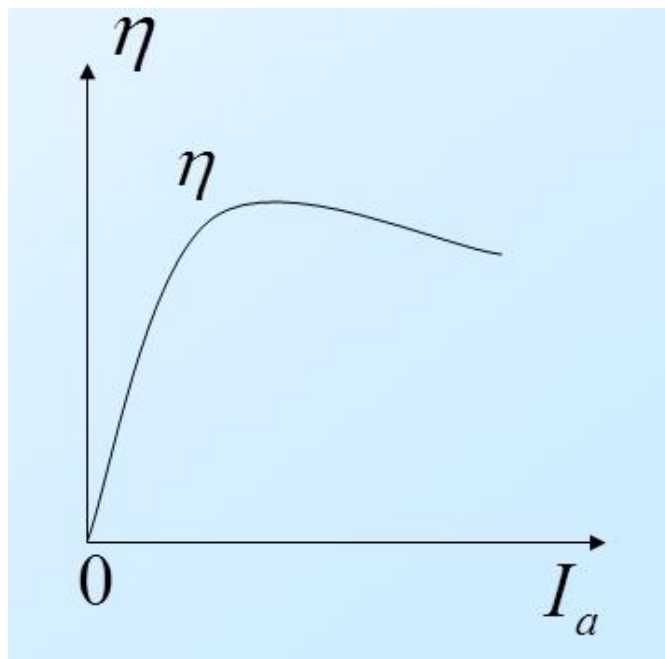


(3) 效率特性

当 $U = U_N$, $I_f = I_{fN}$, 电枢回路无外串电阻时, $\eta = f(I_a)$ 的变化关系。根据效率定义

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{p_0 + R_a I_a^2}{U_N I_a}$$

p_0 为不变损耗, $I_a^2 R_a$ 为可变损耗, 令 $d\eta / dI_a = 0$ 可得, 可变损耗等于不变损耗时, 效率最高。

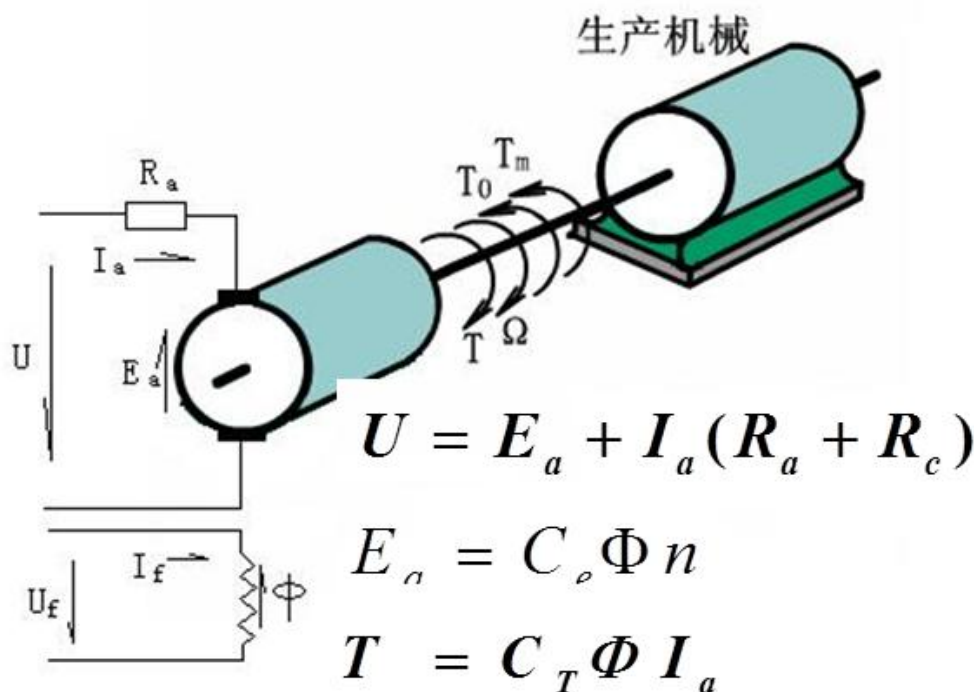


他励直流电动机机械特性

1. 一般概念

当电源电压 U 、气隙磁通 Φ 以及电枢回路总电阻 $R_a + R_c$ 均为常数时，电动机电磁转矩与转速之间的函数关系。

$$\text{即 } n = f(T)$$



1.一般概念

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e \Phi C_t \Phi} T$$

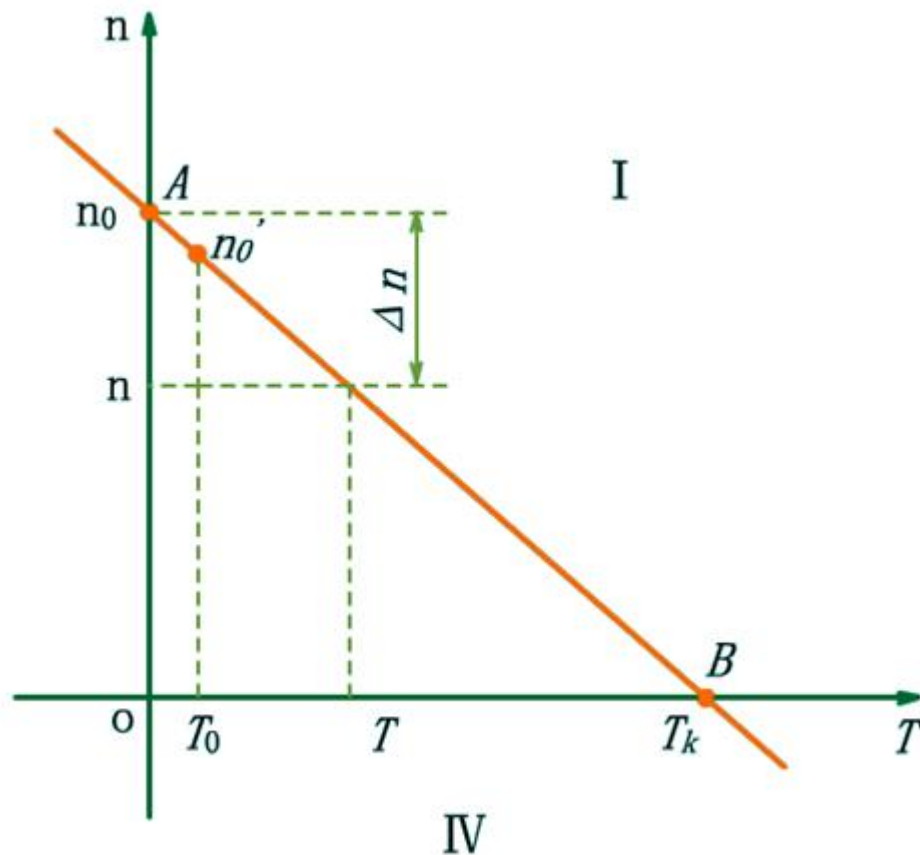
$$n = n_0 - \beta T$$

n_0 为理想空载转速

β 为机械特性斜率

n_0' 实际空载转速

T_k 堵转转矩



1.一般概念

第 I 象限, T 和 n 方向一致, T 为拖动转矩。

当 T 从 0 增加到 T 时, 电机转速降 Δn 为:

$$\Delta n = n_0 - n = \beta T$$

第 II 象限, T 和 n 方向相反, T 为制动转矩。

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

第 IV 象限, $n < 0$, 电机反转, $E_a < 0$, 与电网电压同向。 T 与 n 方向相反, 为制动转矩。

$$I_a = \frac{U - (-|E_a|)}{R_a + R_c} > 0$$

1.一般概念

硬特性和软特性：

β 越大，机械特性越陡，相同转矩下降速度越大，电机转速就越低，称为软特性。

为表述不同条件的机械特性，引入**硬度**概念。
特性曲线上某一点电磁转矩对该点转速的导数。

$$\alpha = dT / dn$$

硬度是机械特性斜率的倒数， β 越小，硬度就越大。

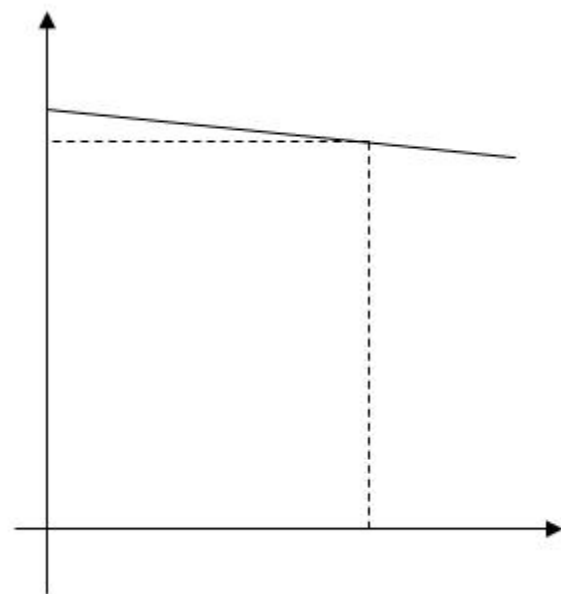
2. 固有机机械特性

当 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, $R = R_a$ 时电动机转速与电磁转矩的关系

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N C_t \Phi_N} T$$

$$n = n_0 - \beta_N T$$

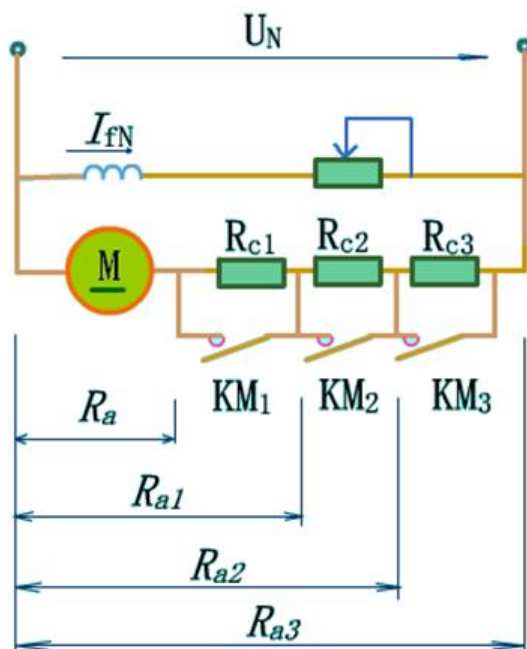
$$n_N = n_0 - \beta_N T_N = n_0 - \Delta n_N$$



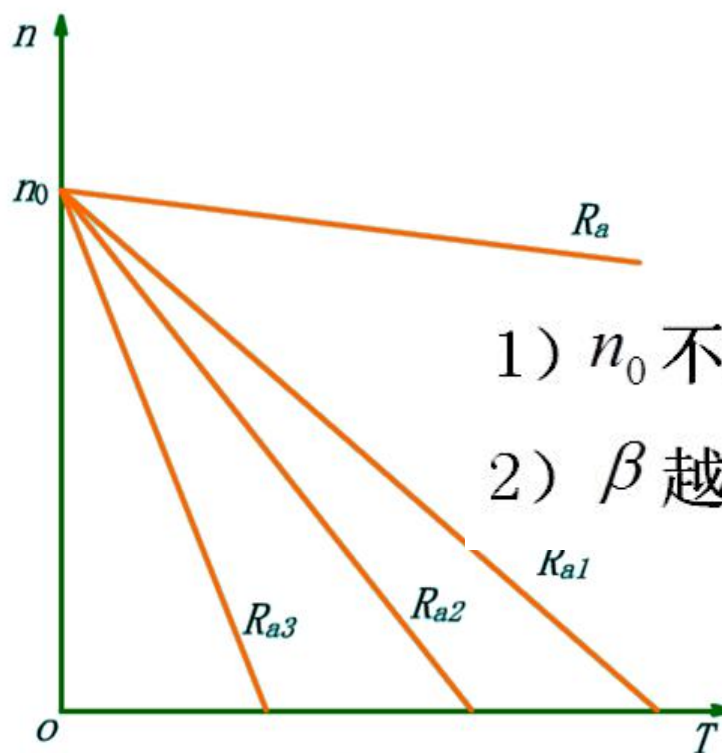
3. 人为机械特性

(1) 电枢串电阻时的人为特性 ($U = U_N, \Phi = \Phi_N$)

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_c}{C_e \Phi_N C_t \Phi_N} T$$



a)



b)

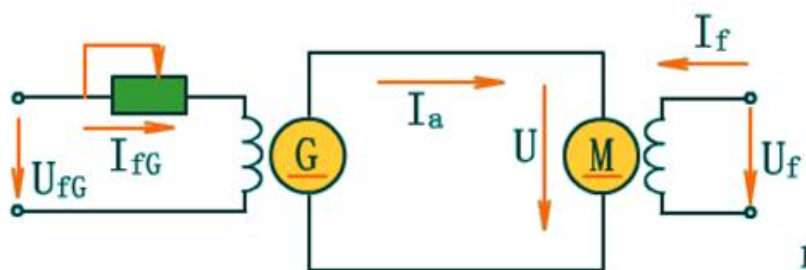
- 1) n_0 不变, β 变大;
- 2) β 越大, 特性越软。

3.人为机械特性

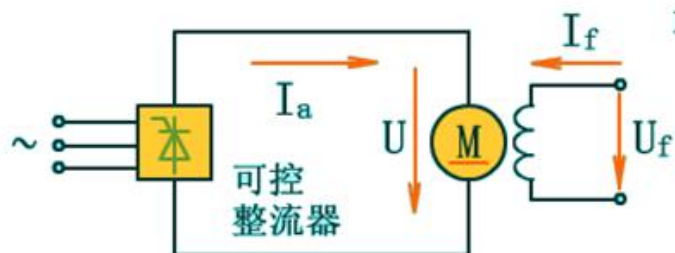
(2) 改变电源电压的人为特性

$$(R = R_a, \Phi = \Phi_N)$$

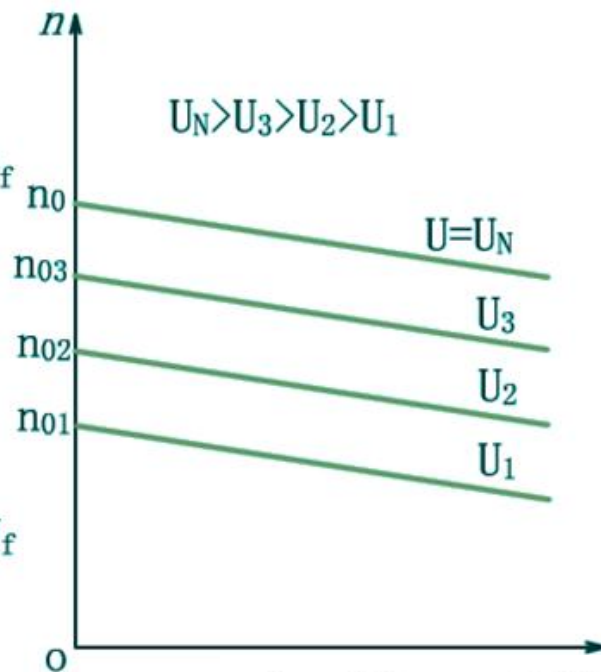
$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N C_t \Phi_N} T$$



a) 用他励直流发电机供电



b) 用可控整流器供电



1) n_0 随 U 变化, β 不变;

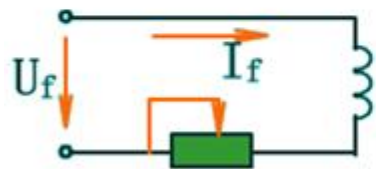
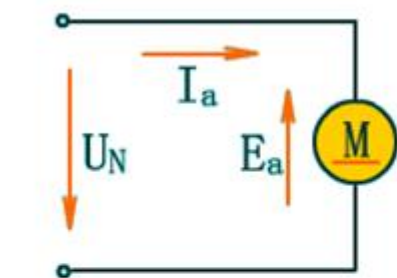
2) U 不同, 曲线是一组平行线。

3. 人为机械特性

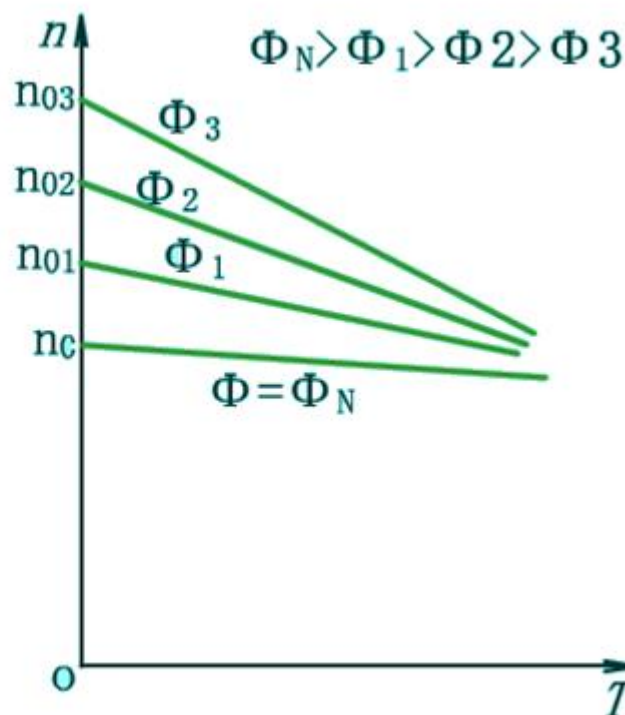
(3) 减弱气隙磁通的人为特性

$$(R = R_a, U = U_N)$$

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi C_t \Phi} T$$

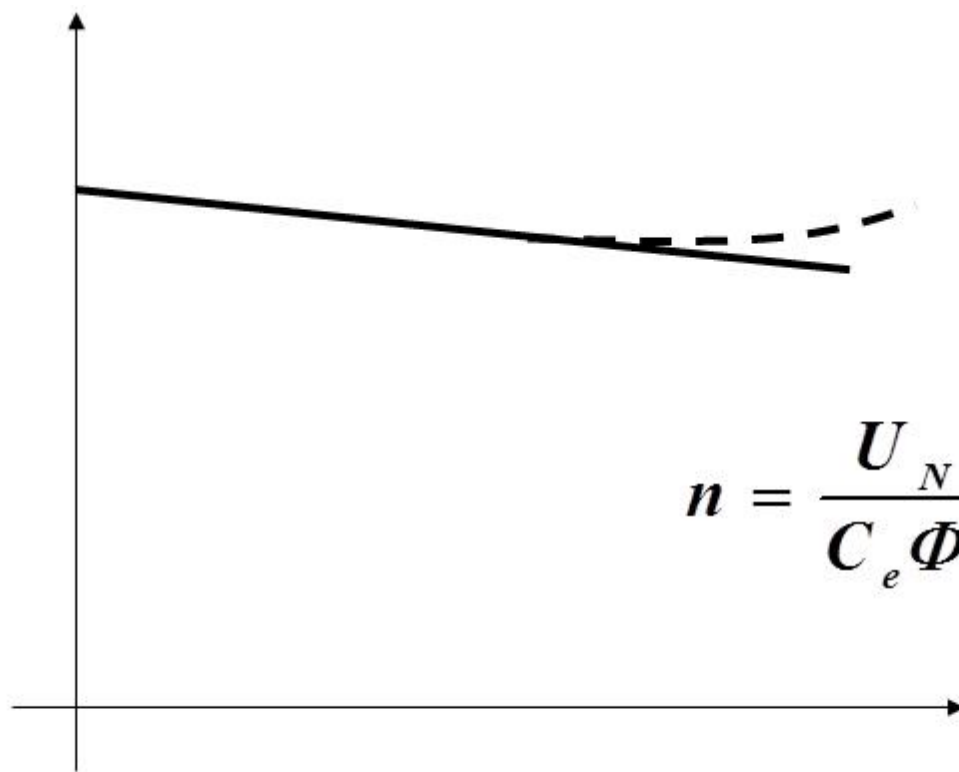


接线图



- 1) 弱磁, n_0 增大;
- 2) 弱磁, β 增大

电枢反应对机械特性的影响



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

解决曲线上翘的方法是在主磁极绕组串联一个助磁的稳定绕组以抵消电枢反应的影响。

4. 他励直流电动机机械特性的计算

(1) 固有机械特性

已知 P_N, U_N, I_N, n_N , 求两点: 理想空载点

$(T=0, n=n_0)$ 和额定运行 $(T=T_N, n=n_N)$

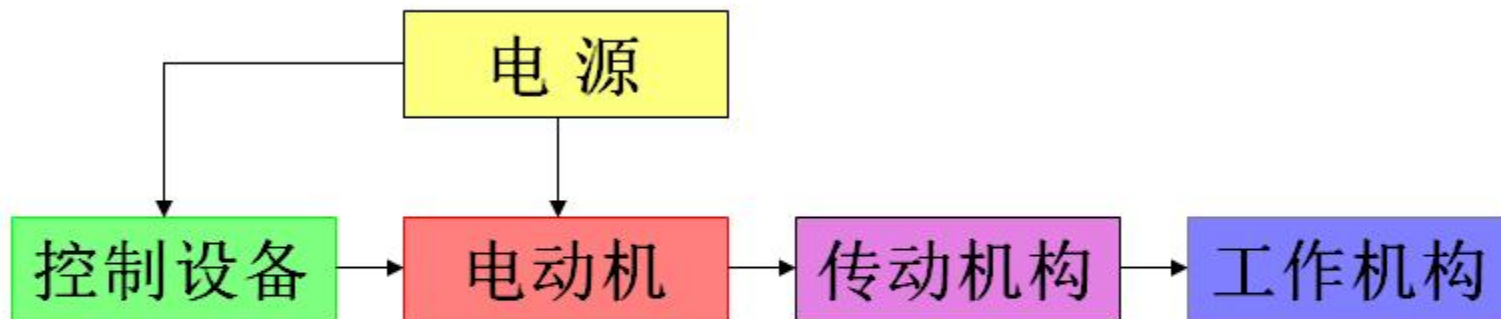
(1) 估算 R_a :
$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3} \right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

(2) 计算 $C_e \Phi_N$ 和 $C_T \Phi_N$:
$$C_e \Phi_N = \frac{U_N I_N - P_N}{n_N} \quad C_T \Phi_N = 9.55 C_e \Phi_N$$

(3) 计算理想空载点:
$$T=0, n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}$$

(4) 计算额定工作点:
$$T_N = C_T \Phi_N I_N, n = n_N$$

5. 电力拖动系统



电力拖动系统的构成

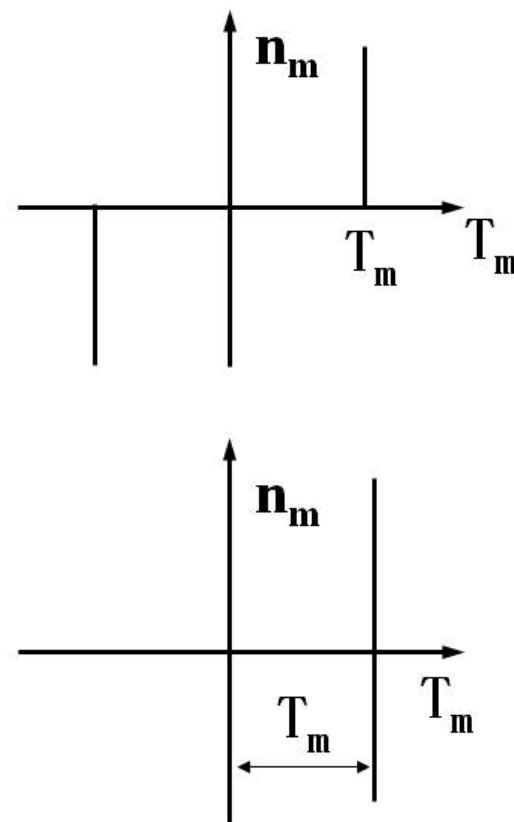
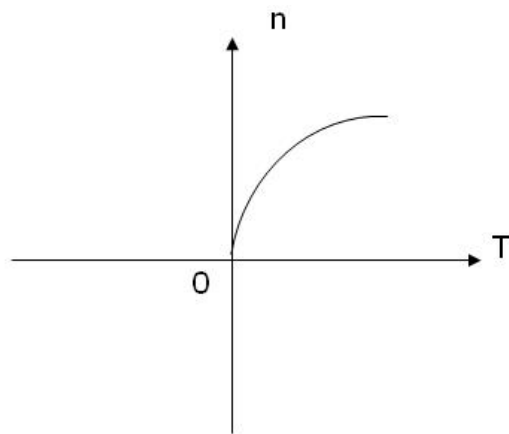
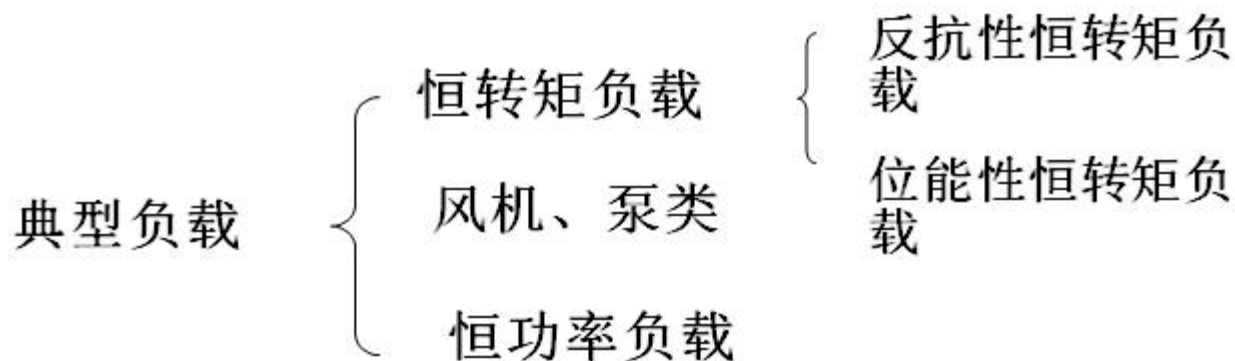
(1) 运动方程式

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt}$$

GD^2 飞轮矩，反映惯性大小，对多轴拖动系统可折算成单轴进行处理。

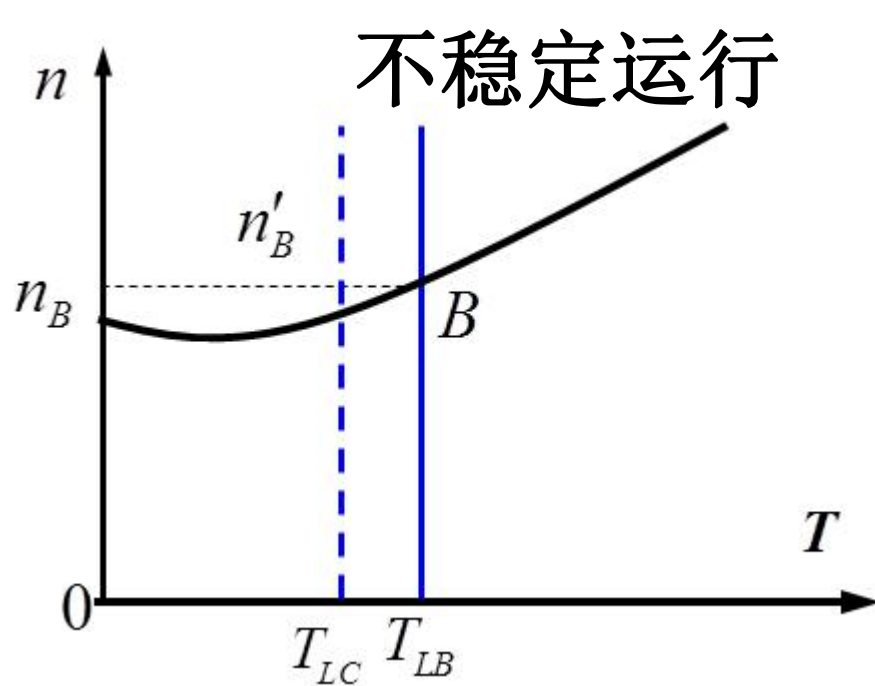
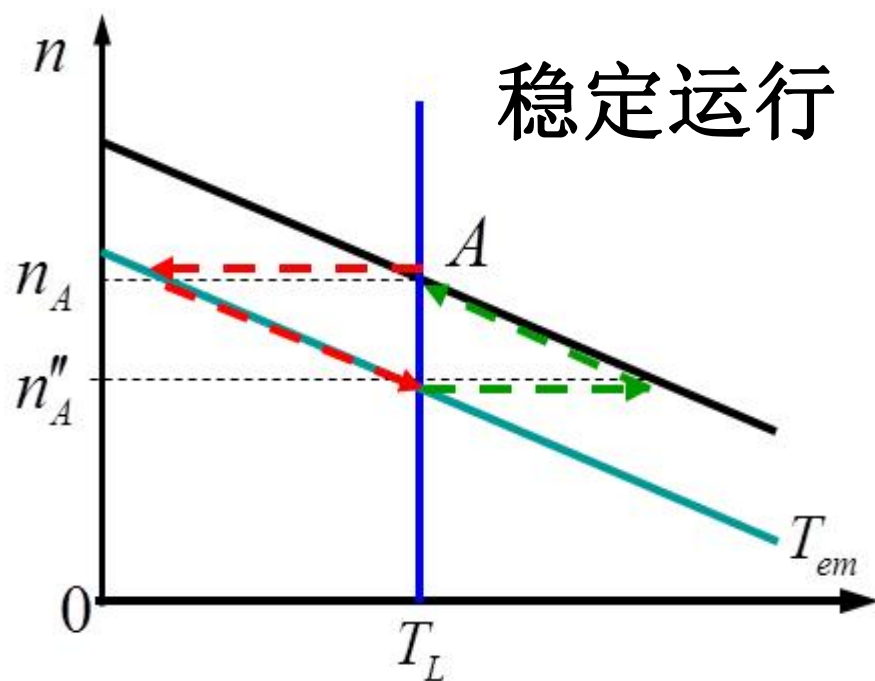
(2) 负载特性

负载转矩与转速关系 $n = f(T_L)$



(3) 电力拖动系统稳定运行条件

处于某一转速下运行的电力拖动系统，由于受到某种扰动，导致系统的转速发生变化而离开原来的平衡状态，如果系统能在新的条件下达到新的平衡状态，或者当扰动消失后系统回到原来的转速下继续运行，则系统是稳定的，否则系统是不稳定的。



1. 必要条件:

电动机的机械特性与负载转矩特性有交点, 即存在 $T = T_L$

2. 充分条件:

在交点 $T = T_L$ 处满足 $\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$ 。或者说, 在交点的转速以上存在 $T < T_L$, 在交点的转速以下存在 $T > T_L$ 。

直流电动机起动、调速和制动

一.他励直流电动机的起动

将静止状态的电动机接通电源后，拖动负载转动起来，达到要求的转速稳定运行，称为起动。

电动机起动基本要求：

- (1) 起动转矩要大：快速可靠
- (2) 起动电流要小：防止冲击电网，保护电机
- (3) 起动设备简单、经济、可靠。

1.直接起动

将电动机电枢绕组直接接到额定电压的电压源上。

起动瞬间，转速 $n = 0$, $E_a = 0$, 电枢电流 $I_a = U / R_a$ ，由于 R_a 很小，所以起动电流将达到额定值的10~20倍。

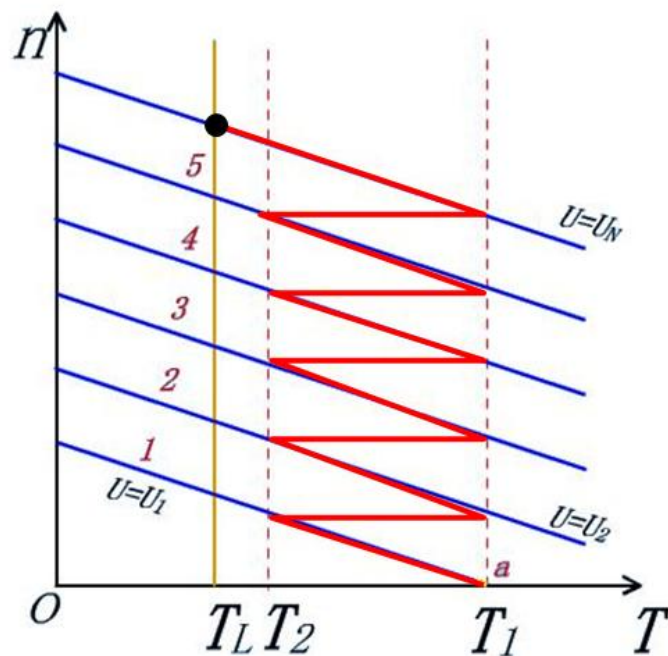
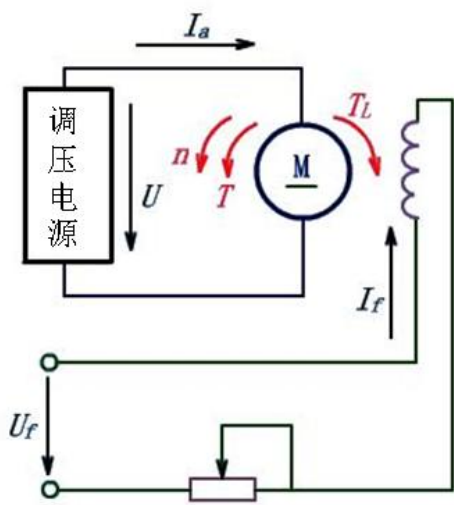
会影响电网电压下降，使换向恶化，甚至烧毁换向器，过大的转矩冲击会造成传动机构损坏。

只有小容量的直流电动机，由于转动惯量小、转速上升快、电枢绕组相对较大，才允许直接起动。

一般的，应限制起动电流，将其限制在 $(1.5 \sim 2)I_a$ ，为此常采用降低电源电压起动，或在电枢回路串电阻起动。

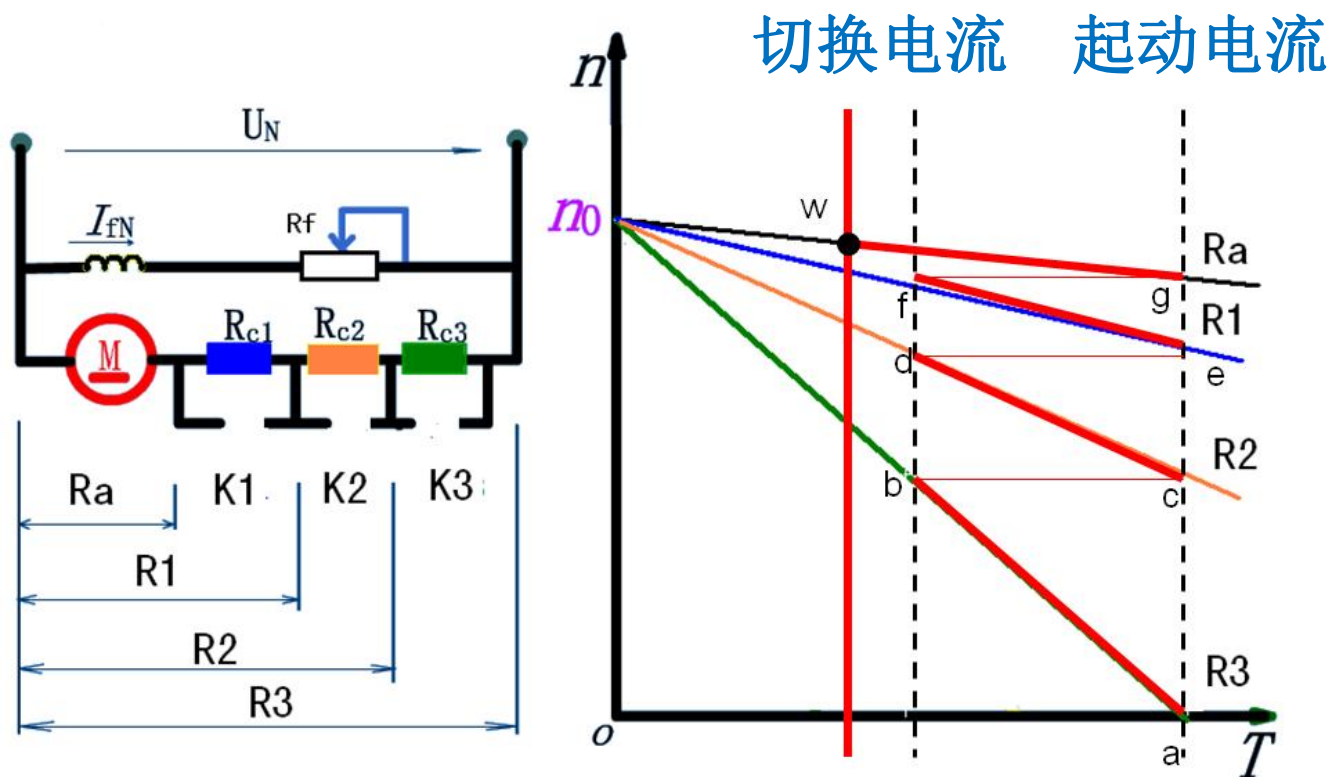
2.降低电源电压起动

启动瞬间，降低供电电源电压，随着转速的升高，反电势增大，再逐步提高供电电压，使起动电流和转矩保持在一定数值上，按需要的加速度升速，最后达到额定电压时，电动机达到所要求的转速。

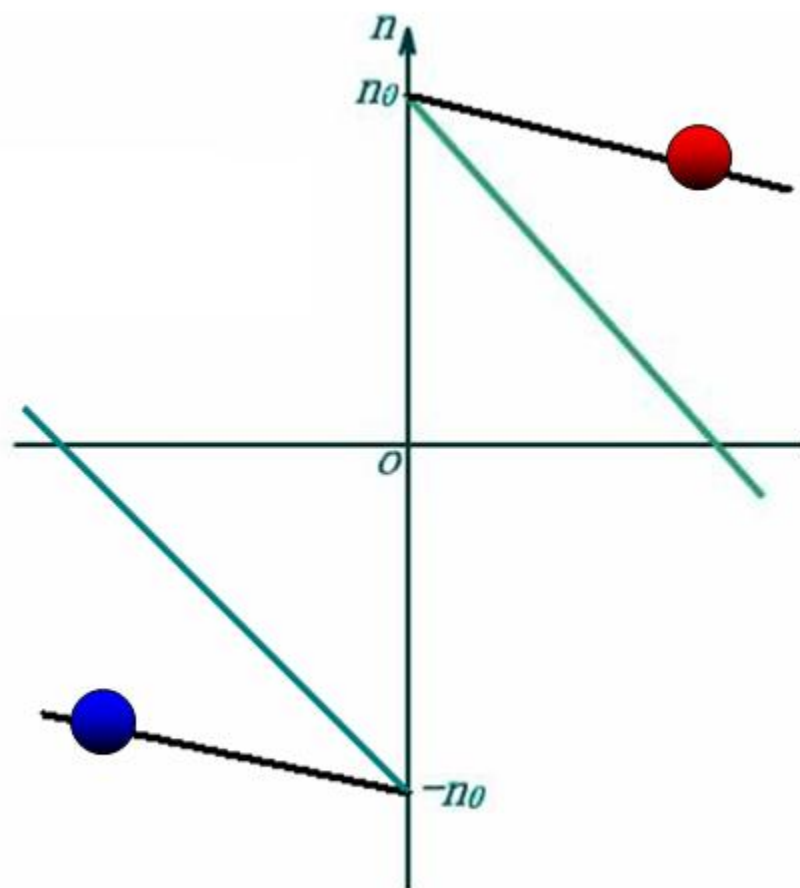
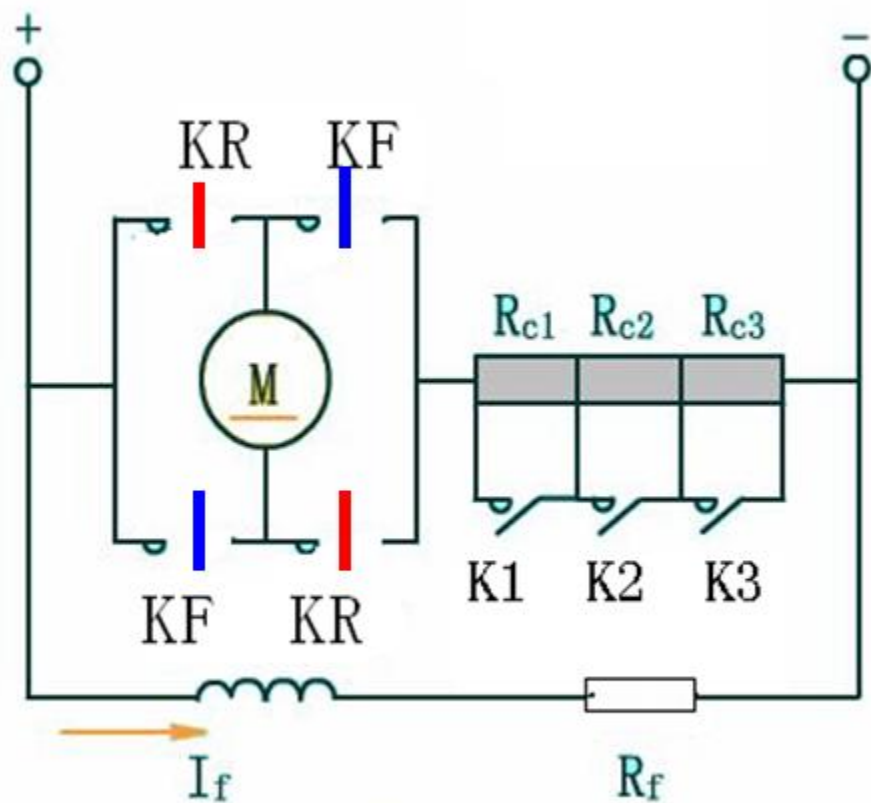


3. 电枢回路串电阻起动

启动时，电枢回路串接启动电阻 R_{st} ，此时启动电流 $I_{st}=U_N/(R_a+R_{st})$ 将受外加启动电阻的限制。随着转速的升高，反电势增大，再逐步切除外加电阻直到全部切除，电动机达到所要求的转速。



4. 他励直流电机的反转



直流电动机的调速

电力拖动系统调速可以采用机械调速、电气调速或二者配合调速。

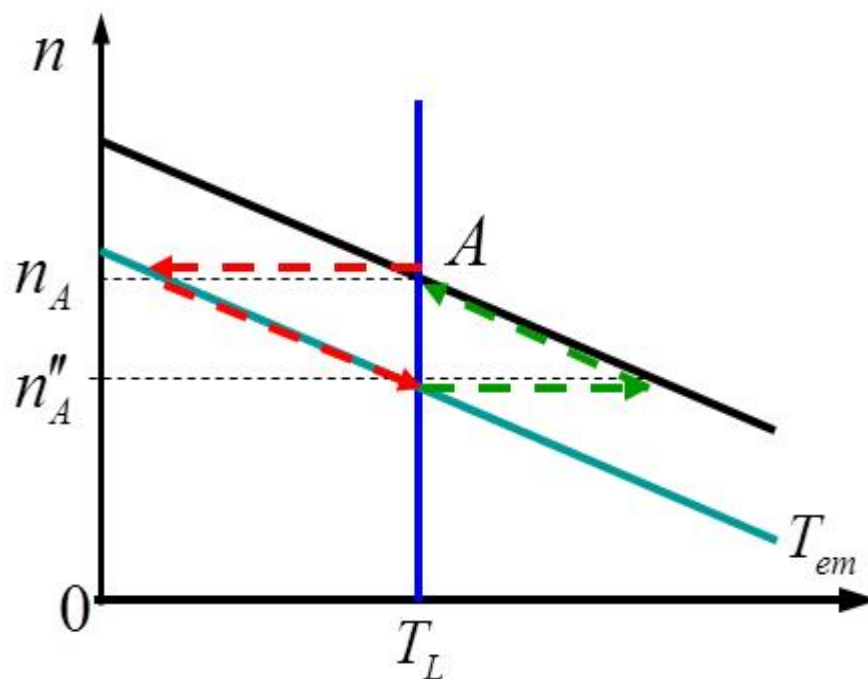
改变转动机构的传动比来改变工作机构的速度，称为**机械调速**。

人为改变电动机的参数（如端电压、励磁电流或电枢回路电阻），使同一机械负载得到不同的转速，称为**电气调速**。

他励直流电动机的调速

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_c}{C_e \Phi C_t \Phi} T$$

1. 电枢串电阻调速；
2. 降低电源电压调速；
3. 减弱磁通调速。



直流电动机的制动

1. 一般概念

制动，是使拖动系统从某一稳定转速开始减速至停止，或者限制位能性负载的速度，使其在某一稳定转速下运行。

切断电源——自由停车

机械抱闸——机械制动

能耗制动

反接制动

回馈制动

—电气制动

电动机的运行状态

电动状态：电磁转矩方向与转速方向一致，电动机从电网吸收电能并转变为机械能带动负载。

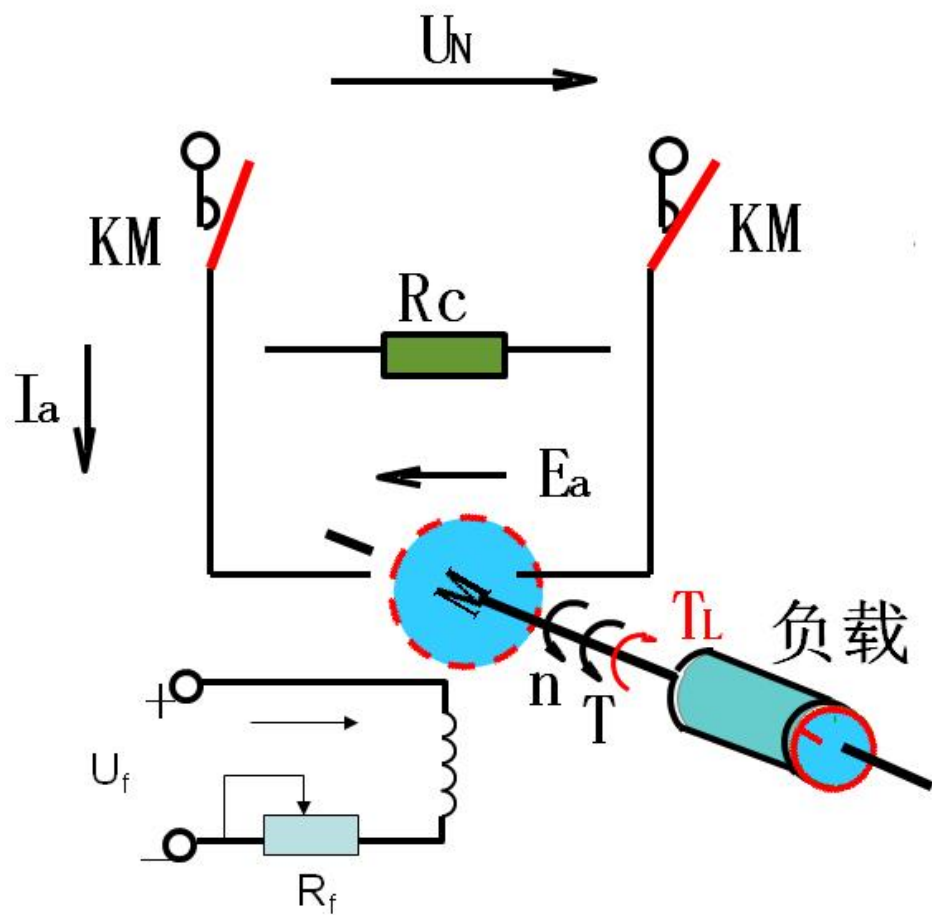
制动状态：电磁转矩方向与转速方向相反，电动机吸收机械能并转变为电能。电阻消耗或回馈电网。

制动运行过程——用于拖动系统的减速停车。

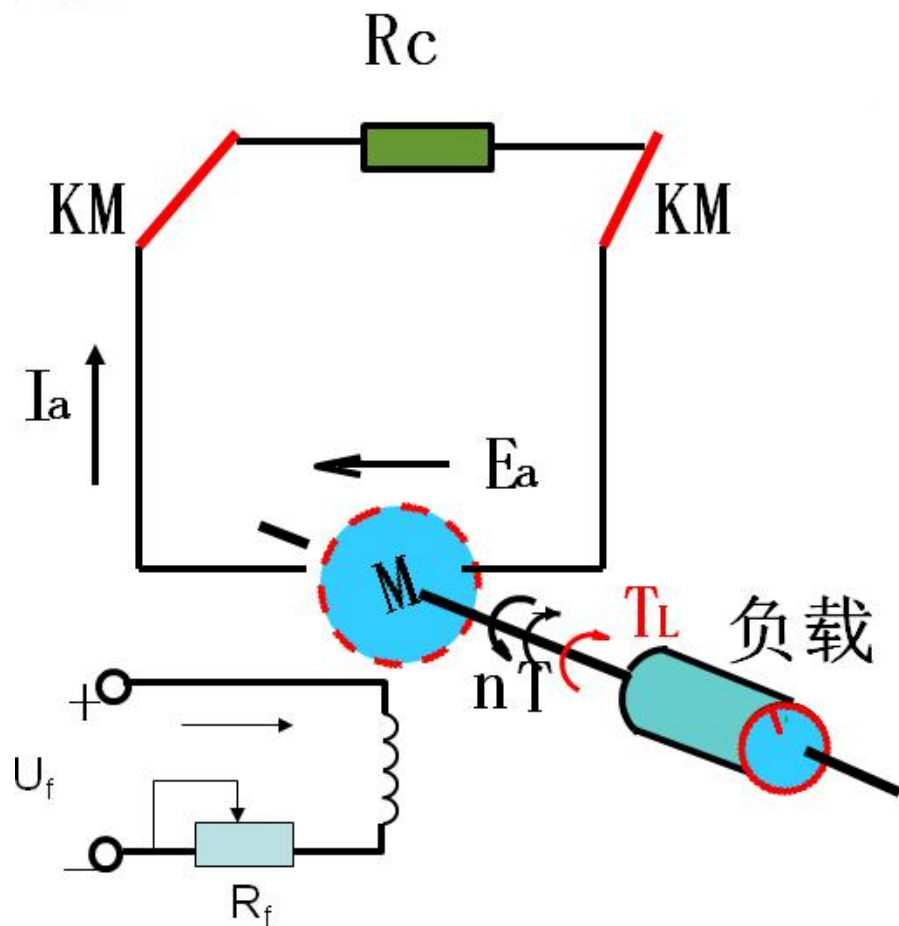
制动运行状态——用于位能性负载限速运行。

2. 能耗制动

(1) 能耗制动过程



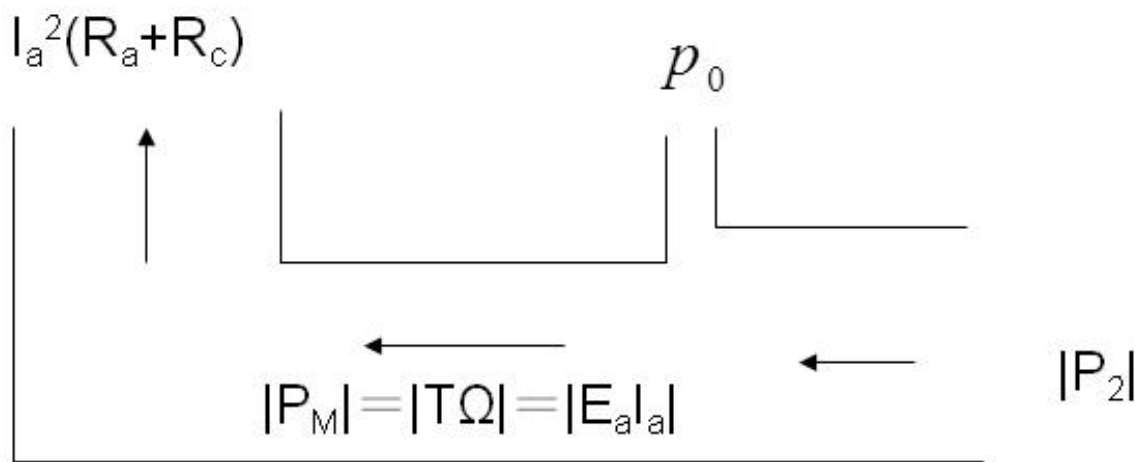
电动状态



能耗制动过程

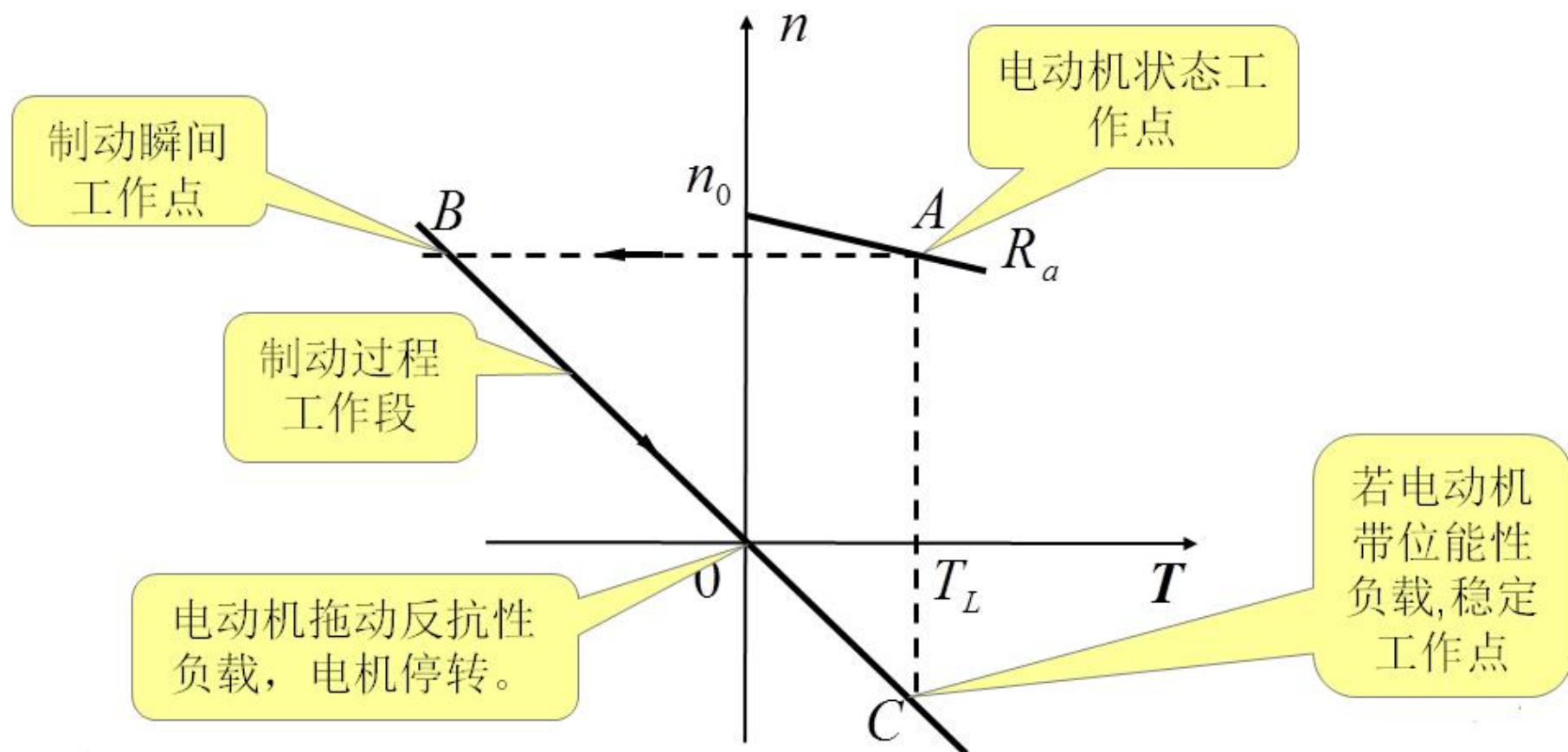
$$U = 0, \quad I_a = -E_a / (R_c + R_a)$$

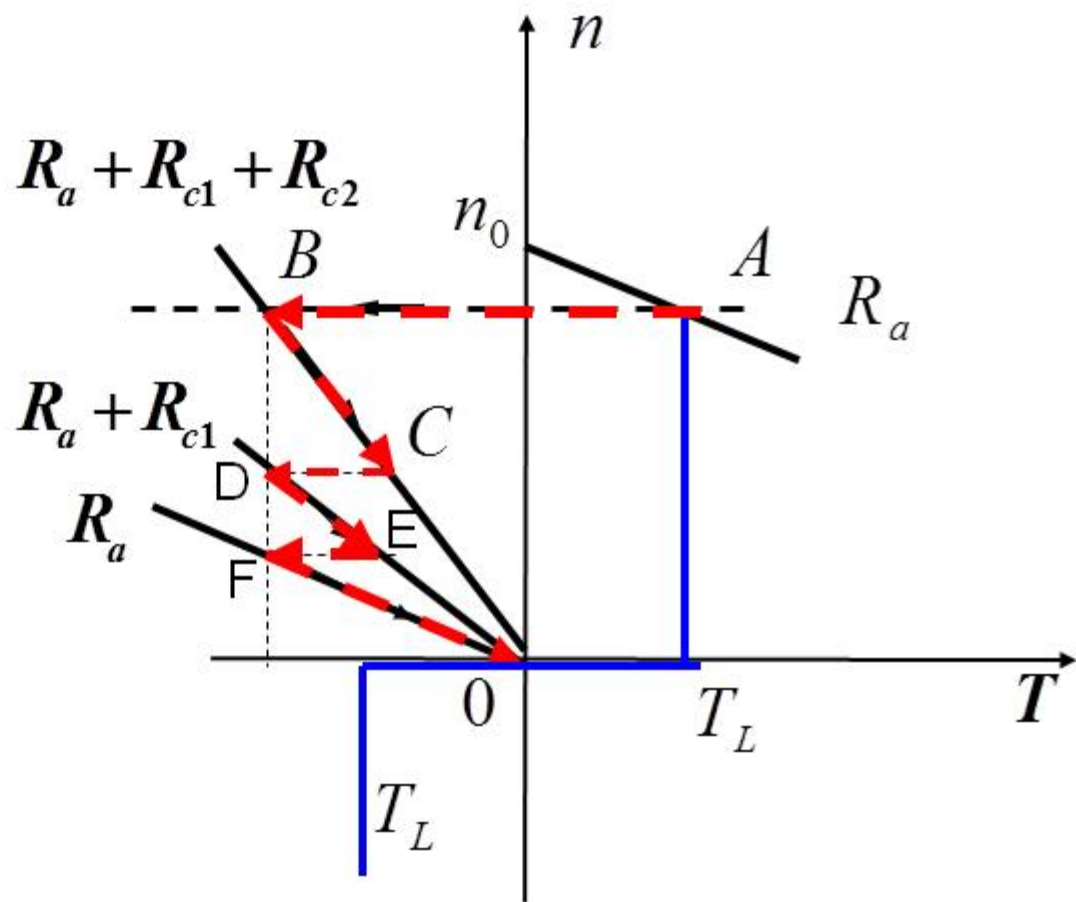
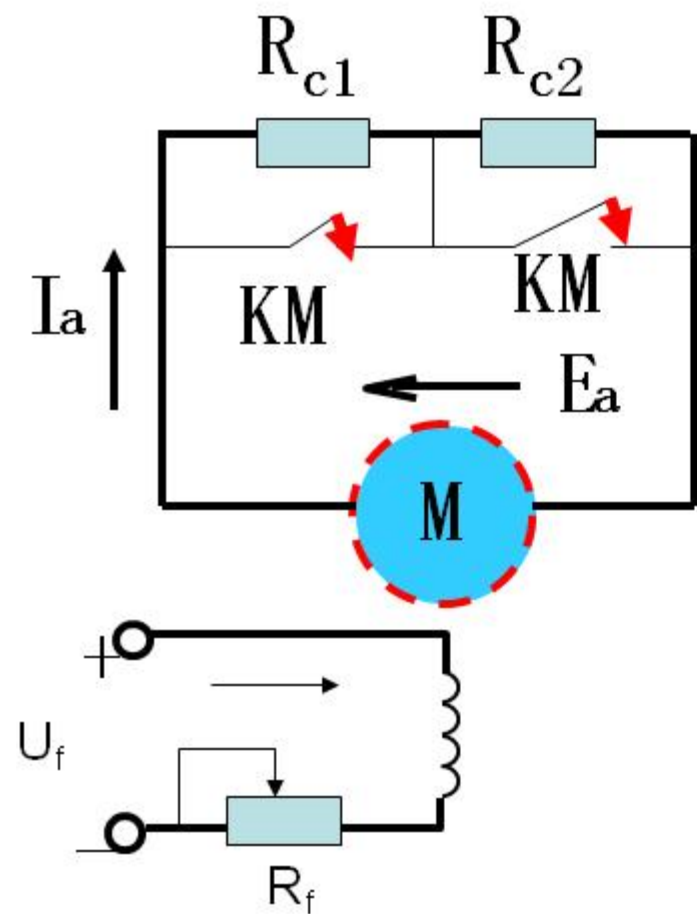
电磁功率 $P_M = E_a I_a = T\Omega < 0$ ，电动机从轴上输入机械功率（降速过程中释放的动能），去除空载损耗，其余功率通过电磁作用转变成电功率，消耗在电枢回路电阻上。



能耗制动功率流程图

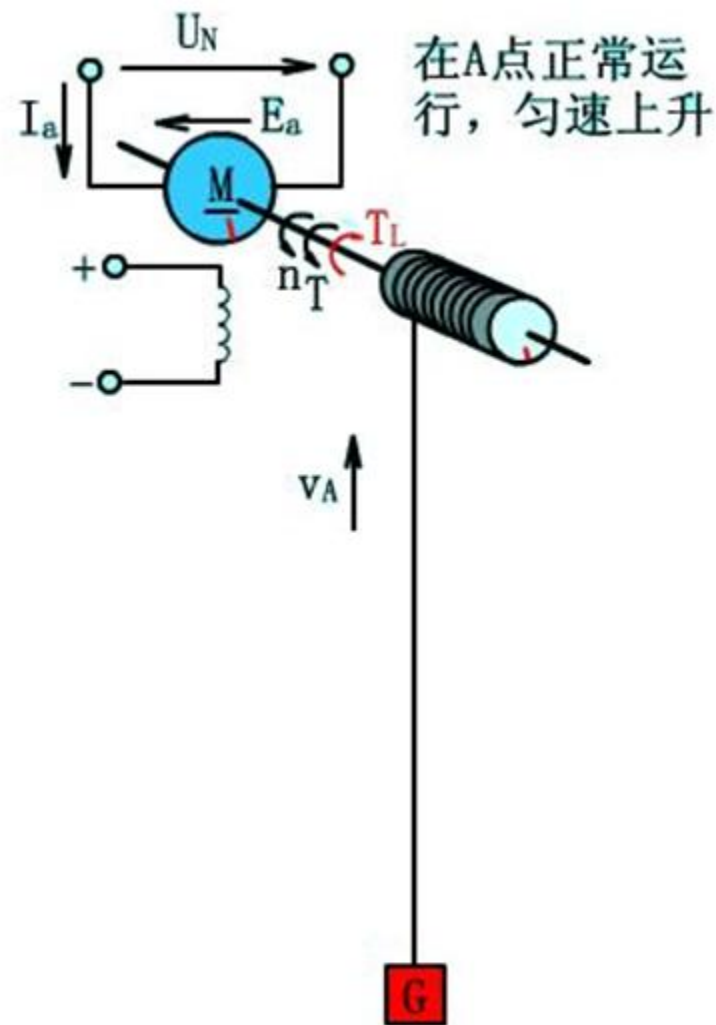
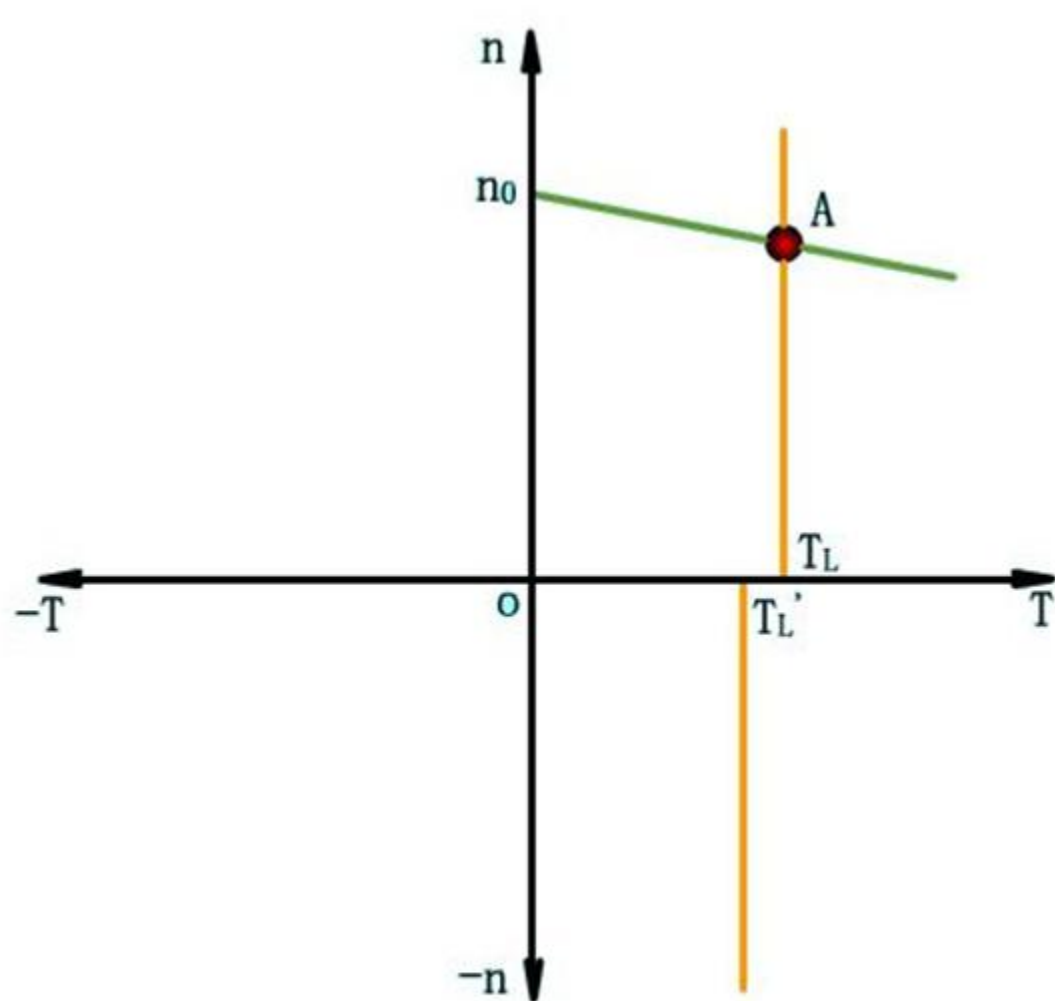
$$U = 0, \Phi = \Phi_N, \quad n = -\frac{R_a + R_c}{C_e \Phi C_t \Phi} T$$



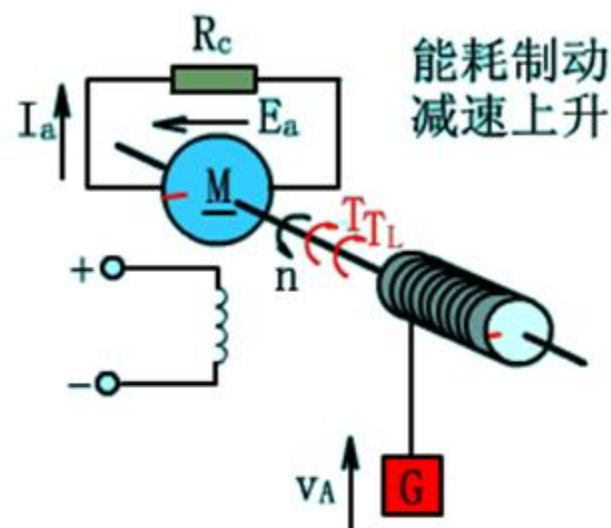
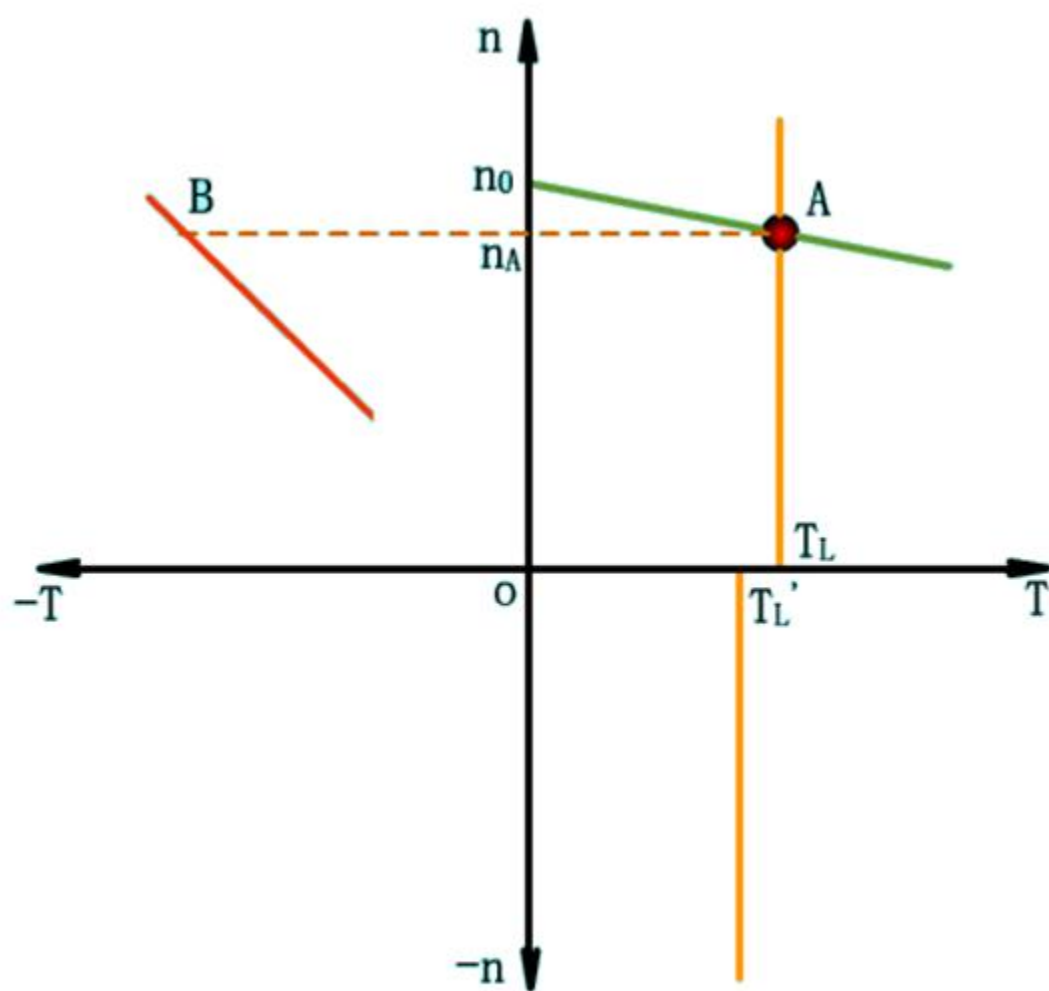


两级能耗制动线路及机械特性

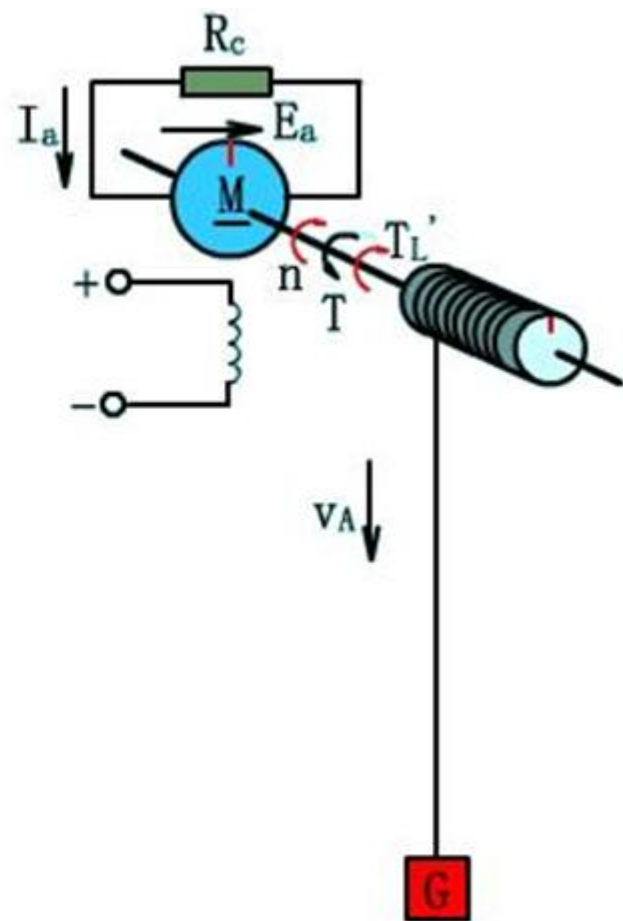
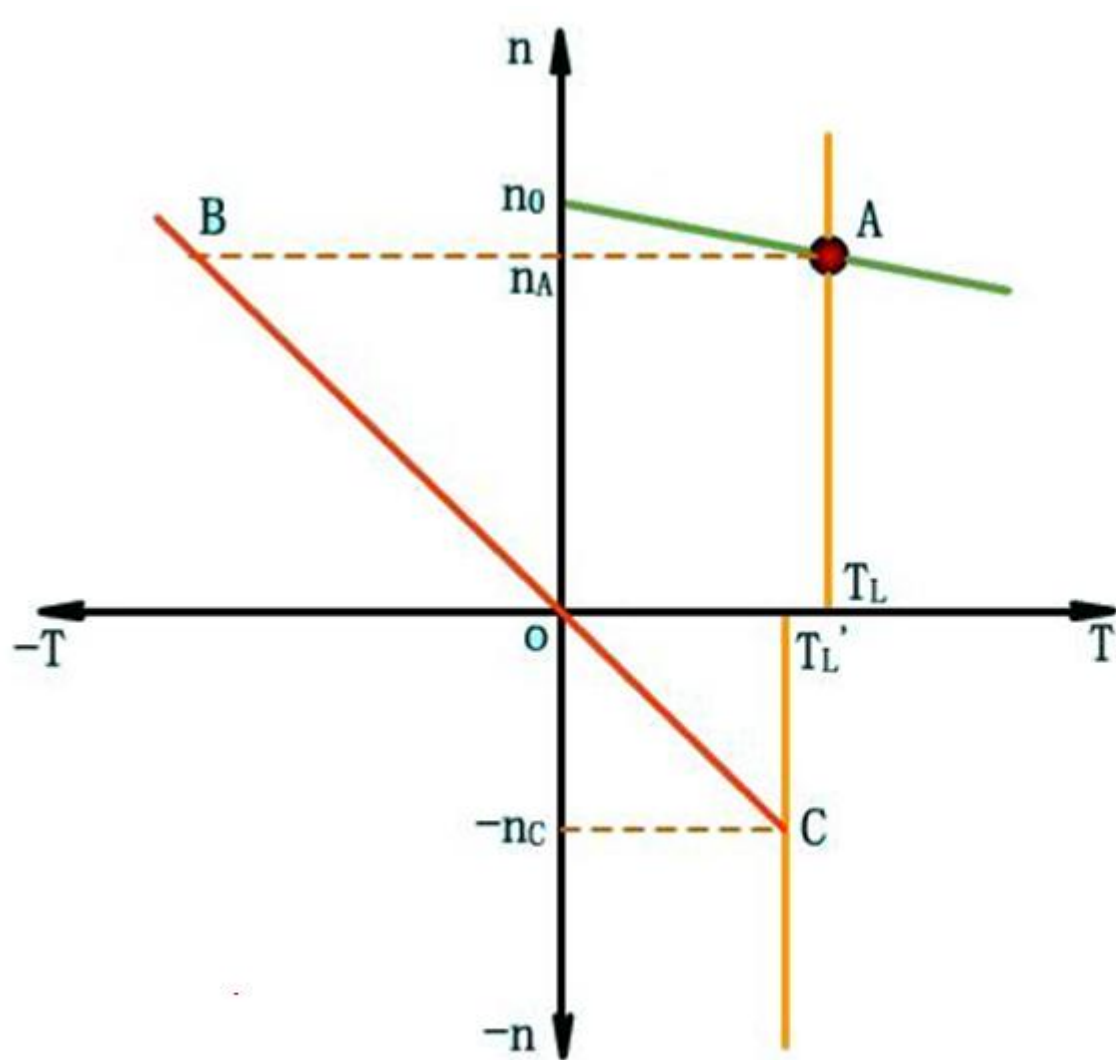
(2) 能耗制动运行



能耗制动以前在第1象限

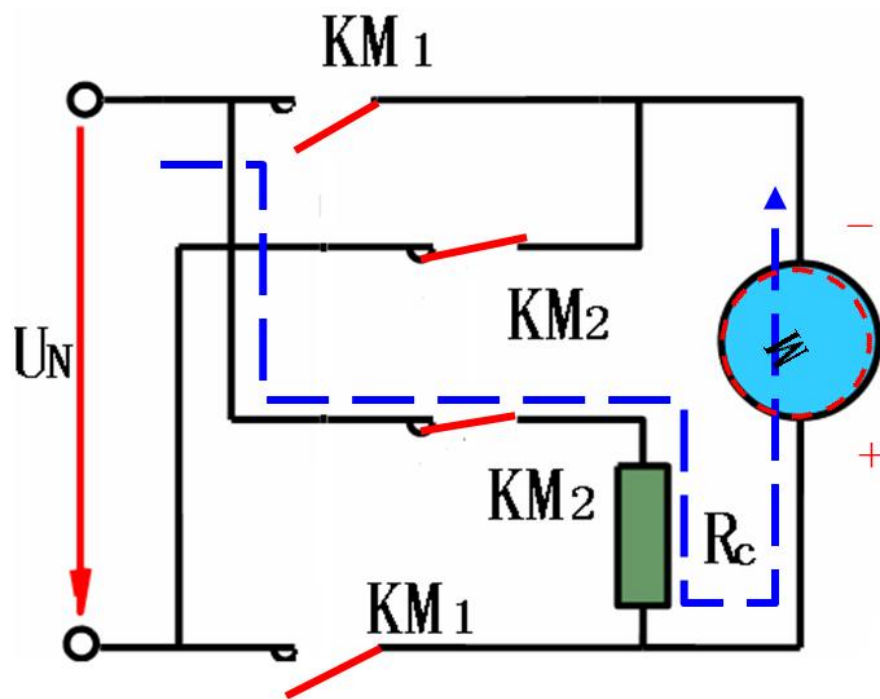
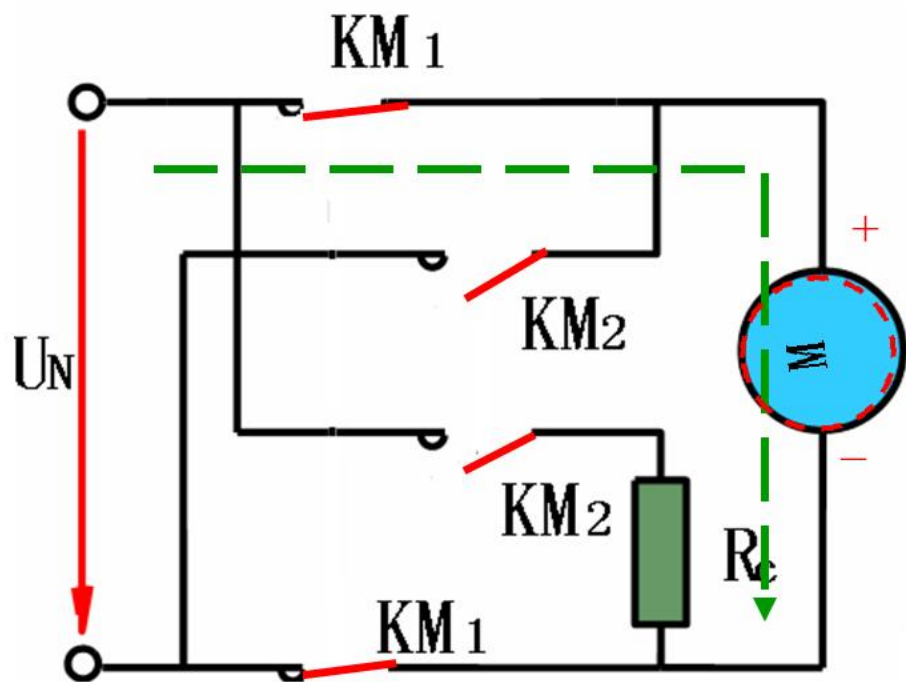


能耗制动过程在第2象限



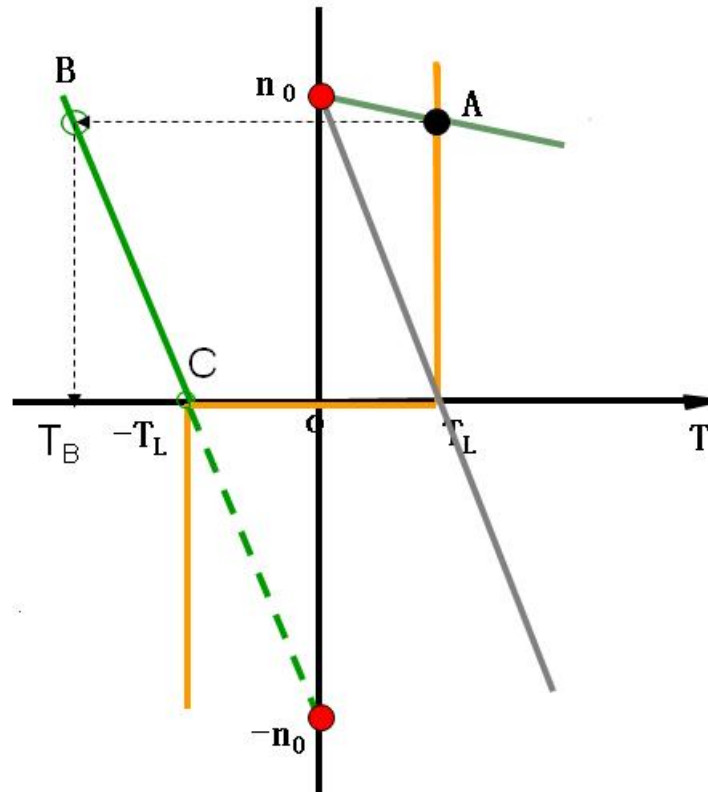
能耗制动运行在第4象限

3. 电压反接制动



$$U = -U_N \quad \Phi = \Phi_N$$

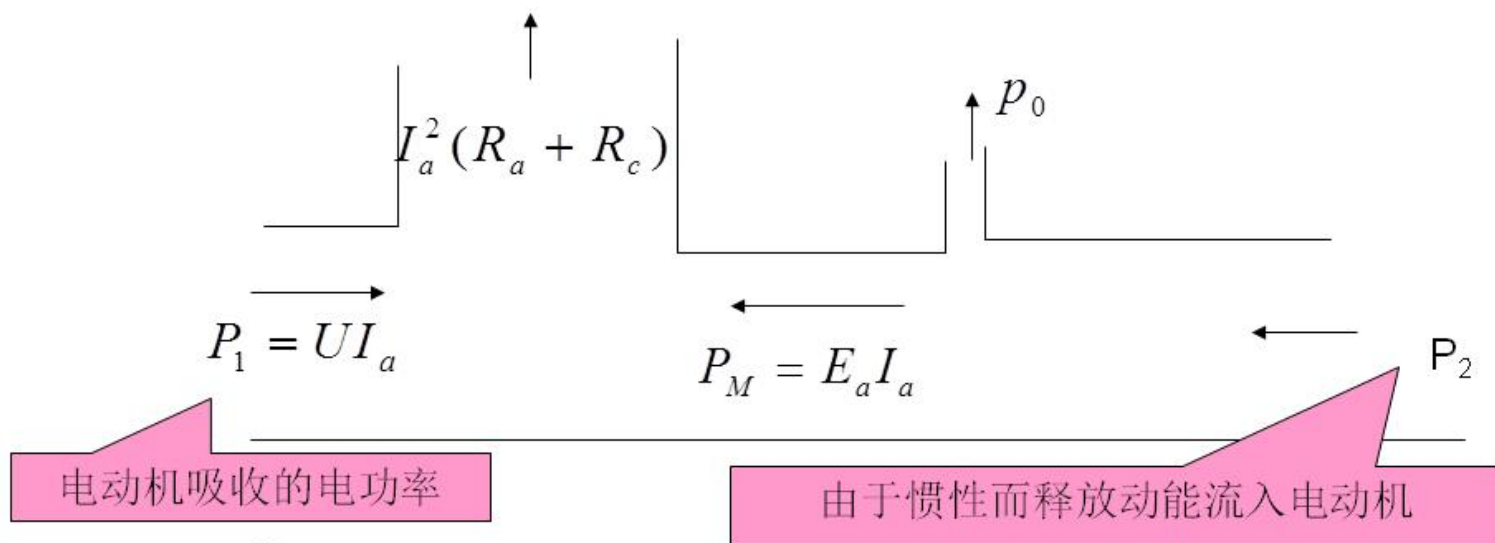
$$n = -\frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_c}{C_e \Phi_N C_t \Phi_N} T = -n_0 - \beta T$$



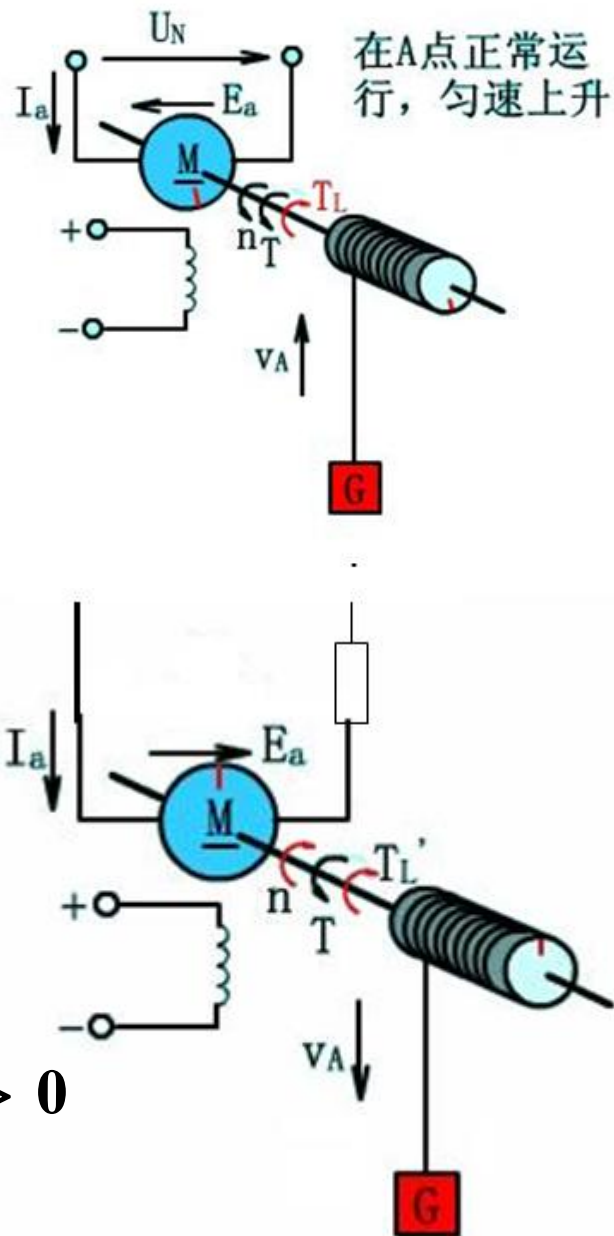
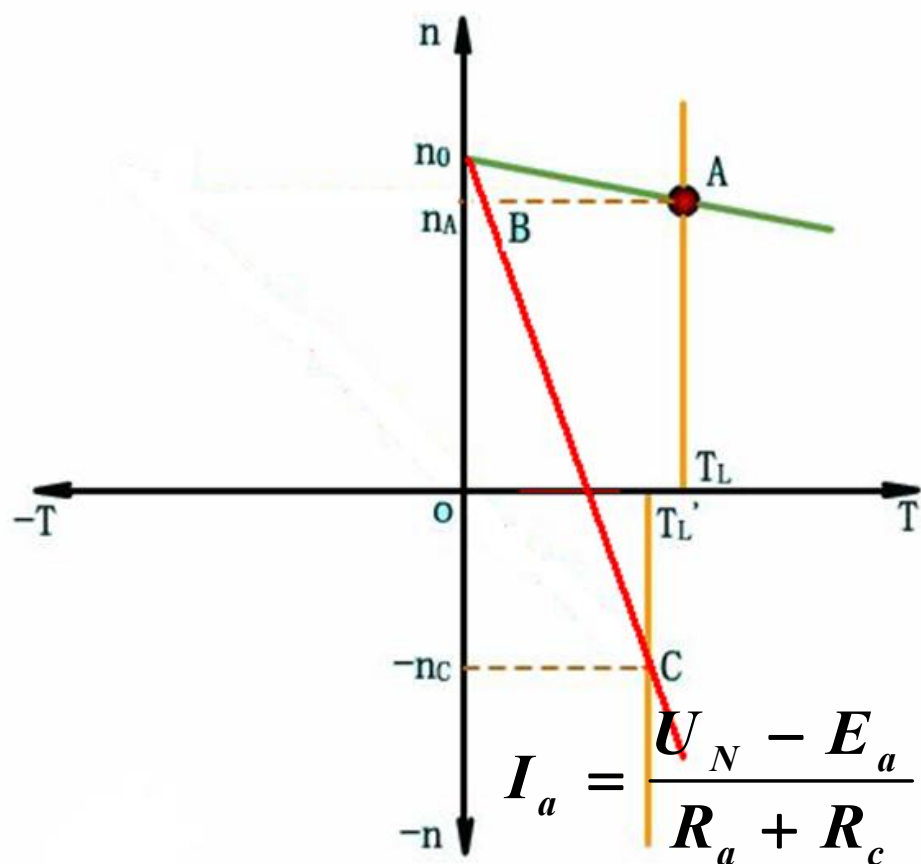
$$U = -U_N \quad n > 0 \quad E_a > 0 \quad I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_c} < 0$$

$$P_1 = -U_N I_a > 0 \quad \text{从电源吸收电功率}$$

$$P_2 = T_2 \Omega \approx T \Omega = E_a I_a < 0 \quad \text{轴上输入机械功率转变为电枢回路电功率}$$



4. 电动势反接制动(倒拉反转)



4. 电动势反接制动(倒拉反转)

只适用于位能性恒转矩负载。

制动时机械特性方程是电动状态时电枢串电阻时的人为机械特性，由于串入电阻足够大，可以在第四象限与位能负载特性曲线相交，稳定运行，处于制动运行状态。

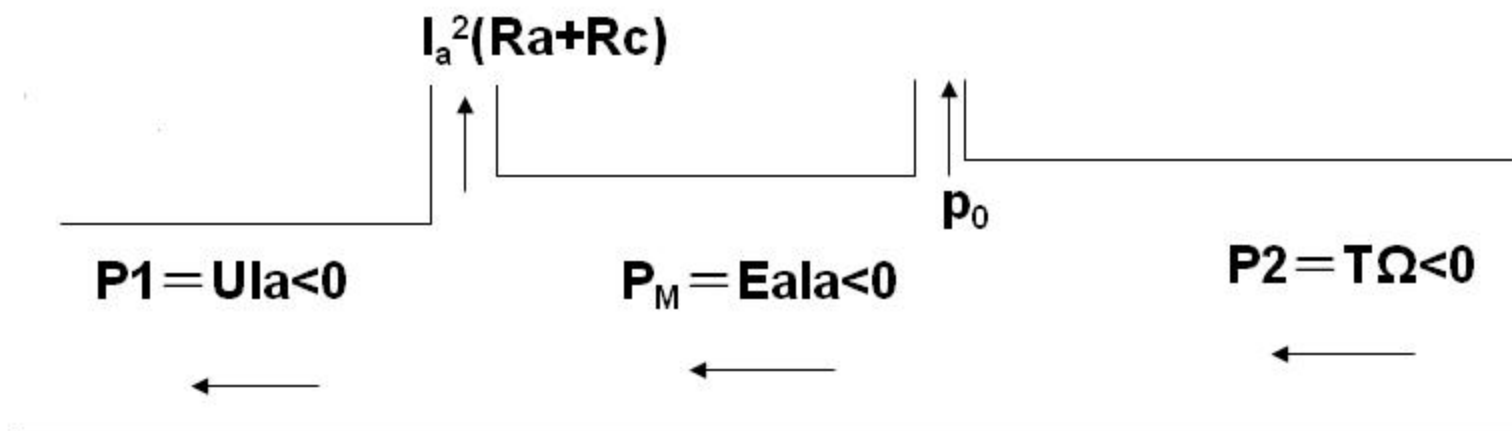
电势反接制动机械能量的输入是由系统位能的减少提供的。

5. 回馈制动

(1) 一般概念

当电枢电动势高于电源电压，电枢电流改变方向，电磁转矩变为制动转矩，电机进入制动状态。

由于 $UI_a < 0$ ，电机成为与电网并联运行的发电机，向电网馈送功率，称为**回馈制动**。与能耗制动和反接制动比，具有较高的经济性。

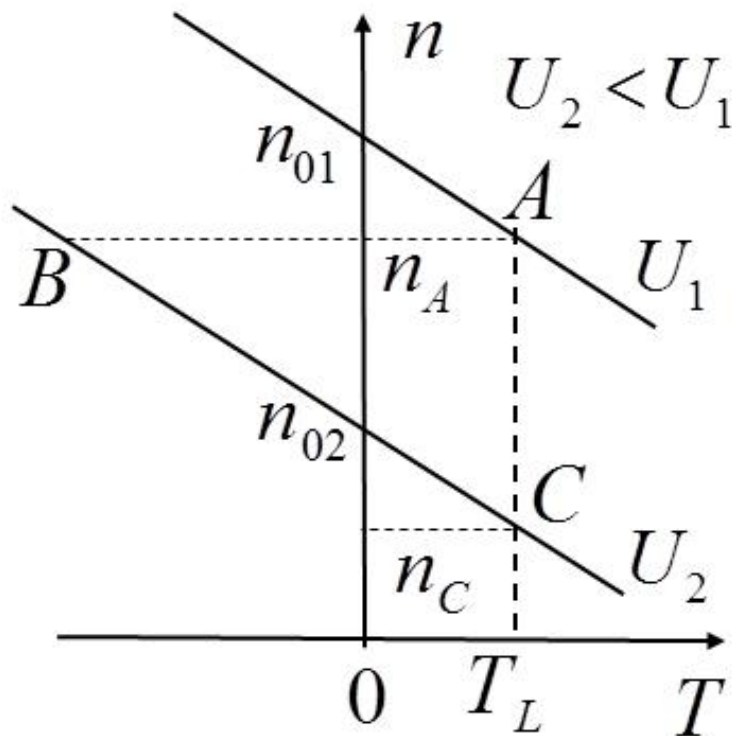


5. 回馈制动

(2) 降低电源电压的回馈制动

转速高于理想空载转速

$$I_a = \frac{U_2 - E_a}{R_a + R_c} < 0$$



5. 回馈制动

(3) 位能负载下放重物时的回馈制动

