



第九章 直流电动机的电力拖动

他励直流电动机的机械特性

电动机的机械特性: 指电动机的转速 n 与电磁转矩 T 的关系, $n = f(T)$

基本公式:

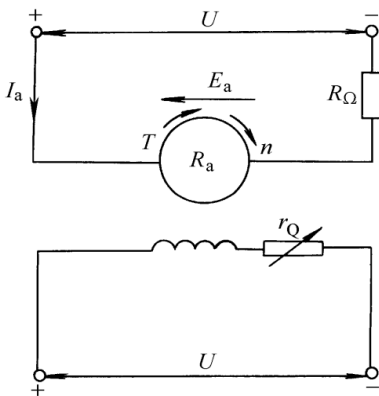
1. 感应电动势: $E = C_E \Phi n$

◦ $C_E = \frac{4pN}{60}$

2. 电磁转矩: $T = C_T \Phi I_a$

◦ $C_T = 9.55 C_E$

机械特性方程式



励磁回路: $U_f = R_f I_f$

电枢回路: $U_a = I_a R_a + E$

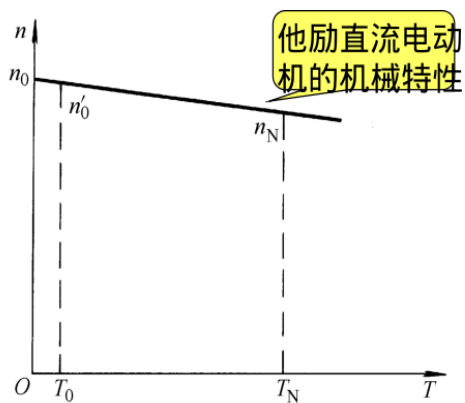
★ 转速: $n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T$

• $\beta = R / (C_e C_T \Phi^2)$ 机械特性的斜率, β 值越大, 机械特性越软

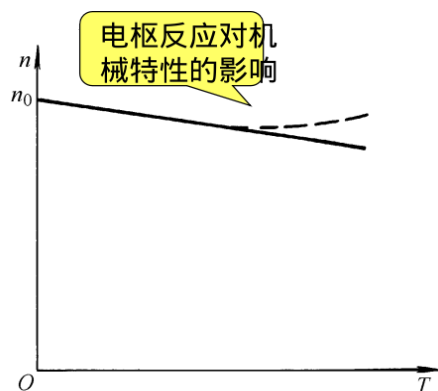
额定转速变化率: $\Delta n_N \% = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$

• n_0 : 理想空载转速, 即 $T = 0$ 时

• n_N : 额定转速



tip: 当电枢电流较大时, 由于饱和的影响, 产生去磁作用

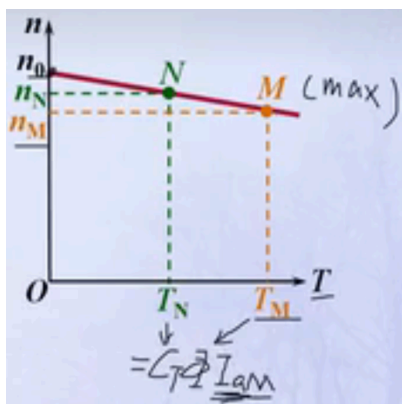


固有机械特性与人为机械特性

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

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

固有特性



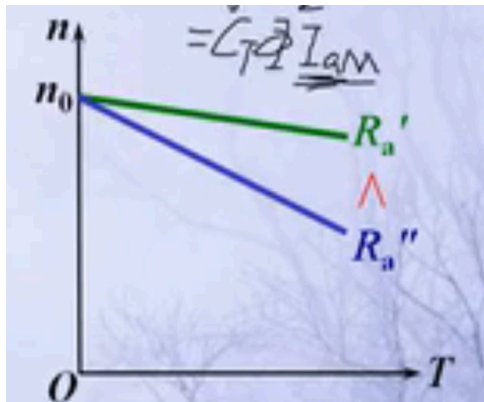
n_0 : 理想空载转速

n_N : 额定状态N点时的转速

n_M :临界状态(最大值)M点时的转速

人为特性

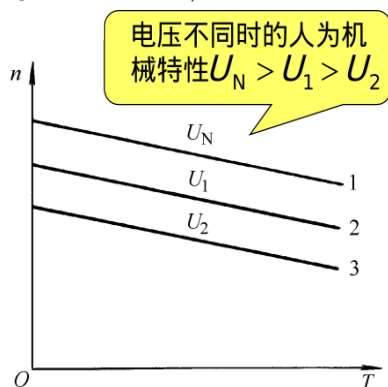
增加电枢电路电阻时的人为特性



R_a 增加时，斜率 β 增大，机械特性的硬度变软

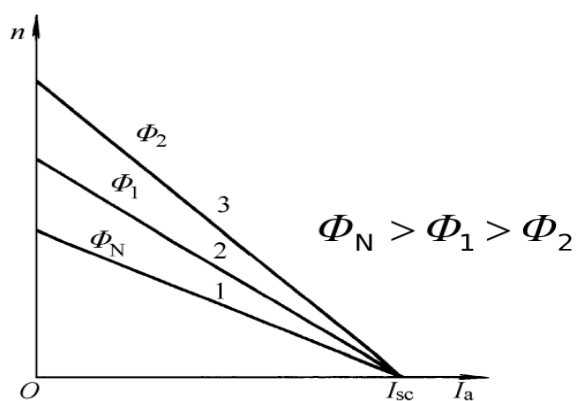
改变电枢电压时的人为机械特性

n_0 降低，斜率 β 不变



减弱电动机磁通时的人为机械特性

改变电动机磁通 Φ ，即改变励磁电流



机械特性曲线的绘制

...

电力拖动稳定运行的条件

必要条件: $n = f(T)$, $n = f(T_Z)$ 两种特性曲线有交点

充分条件: 原在交点处 **稳定运行**，由于 **出现某种干扰作用**（如电网电压波动、负载转矩的微小变化等），使原来两种特性的平衡变成不平衡，电动机转速便稍有变化，这时，当 **干扰消除后**，拖动系统必须有能力使转速 **恢复到原来交点处的数值**。

他励直流电动机的起动

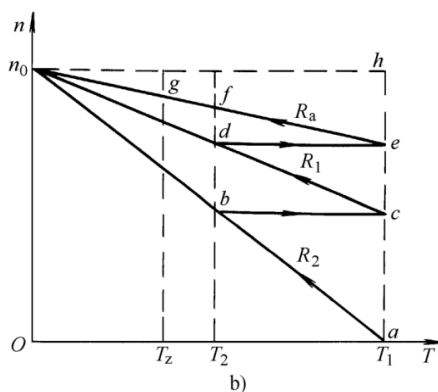
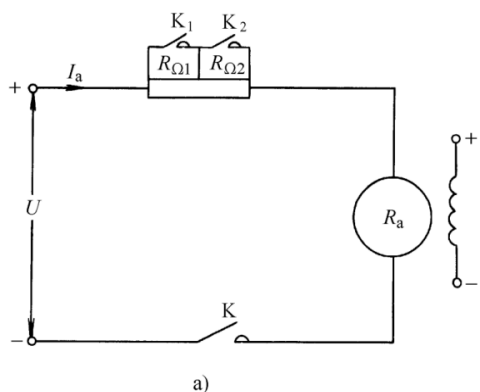
起动: 使处于静止状态的电机，逐渐旋转起来，达到所需要的运动状态

起动性能

起动瞬间: $n = 0, E = 0$, 则有 $U_a = R_a I_{ST}$

有: $I_{ST} = \frac{U_a}{R_a} = (10 \sim 20) I_N > I_{amax}$

- tip: 直接 **起动电流过大**，因此 **禁止直接起动**
- 解决办法: 降低电枢电压起动(需要可调直流电源)
- 解决办法: ★增加电枢电阻起动, 在 **起动过程中** 再将 **起动电阻逐步切除**



分析:

1. 有电流 I_1 产生的起动转矩 T_1 , 如图 a 点所示。电机开始起动, 转矩 T 下降
2. 到达 b 点后, 切除电阻 $R_{\Omega 2}$, 转速不能突变, 因此电流增大, 转矩增大, 到达 c 点

3. 沿cd段进行变换，达d点后，切除电阻 R_{Ω_1} ,到达e点
4. 拖动系统继续加速到g点稳定运转，此时转速为 n_2 ,转矩 $T_e = T_z$

起动电阻的计算

图解解析法

...

解析法(根据上图进行分析)

I_1 : 起动过程中最大电流,需自己选取,如 $I_1 = 2I_N$

I_2 : 切换电流

ab段电阻: $R_2 = R_a + R_{\Omega_1} + R_{\Omega_2}$

cd段电阻: $R_1 = R_a + R_{\Omega_1}$

eg段电阻: $R = R_a$

$$\text{b点: } I_2 = \frac{U - E_b}{R_2}$$

$$\text{c点: } I_1 = \frac{U - E_c}{R_1}$$

b,c点转速相等: $E_b = E_c$

$$\text{得: } \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a}$$

★推广到m级起动的情况: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_m}{R_{m-1}} = \frac{R_{m-1}}{R_{m-2}} = \dots = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a}$

$$\beta = \sqrt[m]{\frac{R_m}{R_a}}$$

因此只要知道 $\beta = \frac{I_1}{I_2}$,就可以算出各级的起动电阻

他励直流电动机起动的过度过程

电力拖动系统中一般存在一下三种惯性:

1. 机械惯性: 反映在系统的飞轮惯量上，他使转速不能突变
2. 电磁惯性: 使电枢迪奥尼路和励磁电流不能突变，从而使磁通不能突变
3. 热惯性: 电动机的温度不能突变

电力拖动的过度过程一般分为两种:

1. 机械过渡过程

2. 电气-机械过度过程

他励直流电动机的制动

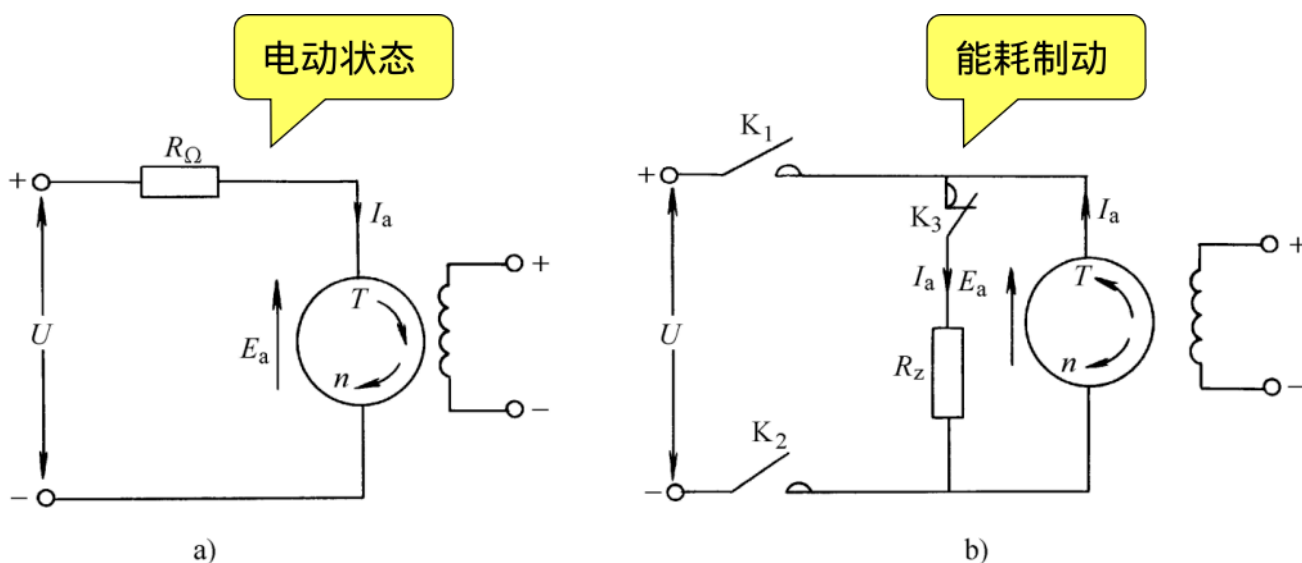
他励直流电动机的两种运转状态:

1. 电动运转状态:电动机转矩的方向与转速的方向相同,此时电网向电动机输入电能,并变为机械能以带动负载。
2. 制动运转状态:电动机转矩与转速的方向相反,此时,用电动机吸收机械能并转化为电能。

电气制动分类:能耗制动,反接制动,回馈制动

能耗制动

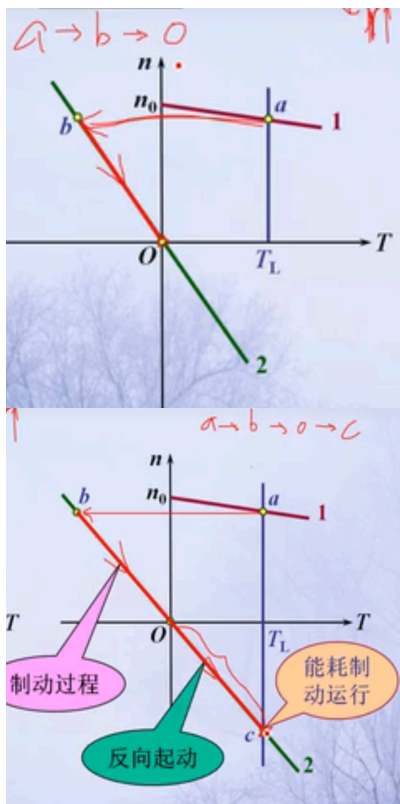
tip: 转速是负值



特征: $U = 0, R = R_a + R_z$

能耗制动: 动能转换成电能, 被电阻消耗掉

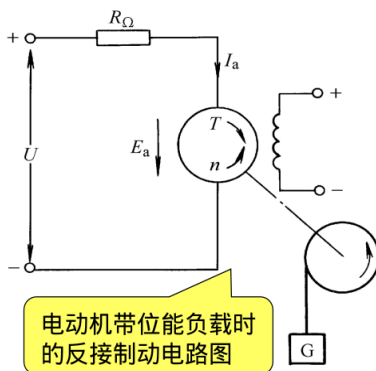
能耗制动机械特性方程: $n = -\frac{R_a + R_z}{C_e C_T \Phi^2} T_e$



解题须知

1. 能耗制动时 **最大电流** 出现在制动开始时

反接制动

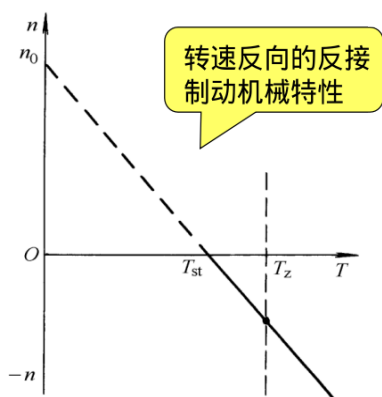


转速反向的反接制动

转速反向而励磁磁场没变，则感应电动势方向改变，感应电动势实际方向应朝上(与图片并不一样)

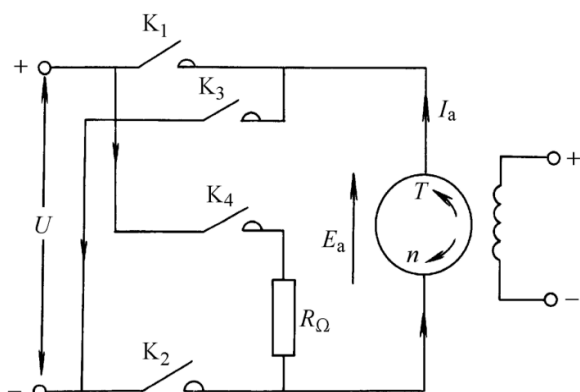
路电压平衡方程式: $I_a(R_a + R_\Omega) = U + E_a$

转速反向的反接制动特性方程式为: $n = n_0 - \frac{R + R_\Omega}{C_e C_T \Phi^2} T$



电枢反接的反接制动

电枢电压反向而励磁磁场没变，因此感应电动势方向不变，感应电动势实际方向应正常朝下(与图片并不一样)



断开K1,K2,接通K3,K4

电枢回路电压平衡方程式: $I_a(R_a + R_\Omega) = -U - E_a$

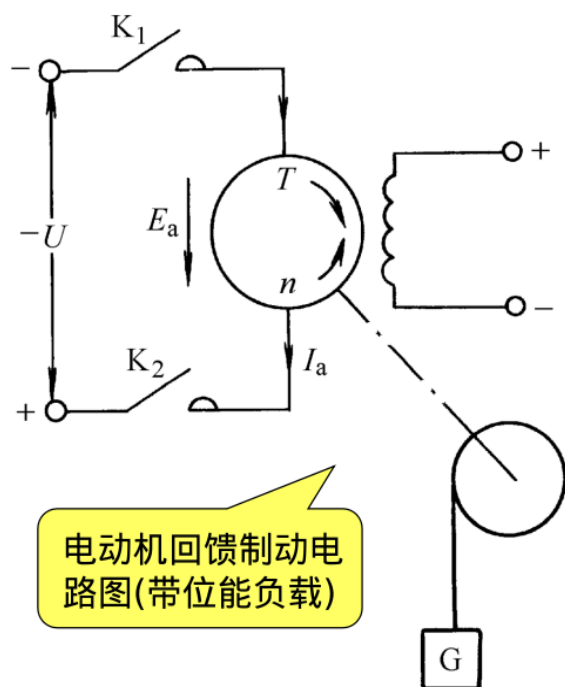
电枢反接的反接制动特性方程式为: $n = -n_0 - \frac{R+R_\Omega}{C_e C_T \Phi^2} T$

解题步骤

1. 画出不同情况的反接制动的电路图
2. 写出电动势平衡方程
3. 根据题目进行分析

回馈制动(或称再生制动)

位能负载拖动电动机



特性:转速反向,电压反向,感应电动势方向向上(由转动方向和励磁磁场决定)

他励电动机改变电枢电压调速

在降低电压的降速过程中,当突然降低电枢电压,感应电动势还来不及变化时,就会发生的情况,亦即出现了回馈制动状态。

他励直流电动机的调速

调速:采用一定的方法来改变生产机械的工作速度,以满足生产的需要

调速标准

分类:技术指标和经济指标

调速的技术指标

1. 调速范围: $D = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{v_{max}}{v_{min}}$

。最大转速 n_{max} ,最小转速 n_{min}

◦ 线速度 v

2. 静差率: $\delta = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\%$

◦ 电动机的机械特性愈硬，则静差率愈小，相对稳定性就愈高

3. 平滑性: $\phi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$

◦ 在一定的调速范围内，调速的级数越多，则认为调速月平滑

◦ ϕ 越接近于1,平滑性越好

4. 调速时的容许输出: 指电动机在得到充分利用的情况下，在调速过程中轴上所能输出的功率和转矩。

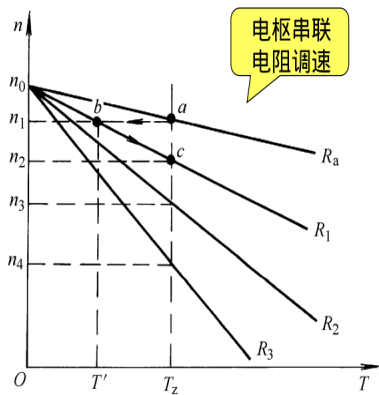
调速的经济指标

调速的经济指标决定于调速系统的设备投资及运行费用，而运行费用又决定于调速过程的损耗，它可用设备的效率来说明。

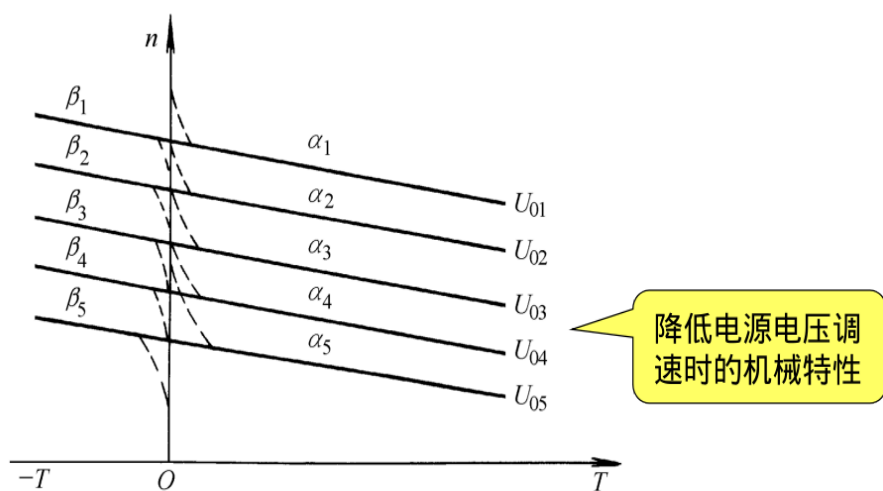
设备的效率: $\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$

降低电枢端电压调速

电枢串联电阻调速



降低电源电压调速



弱磁调速

减弱磁通:

- 小容量系统:励磁电路中串联可调电阻 r_Ω
- 大容量系统:单独的晶闸管蒸馏装置想电动机的励磁电路供电