



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

3

他励直流电动机的机械特性

一、直流电动机机械特性的一般形式 $n=f(T)$

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_\Omega)}{C_e \phi} = \frac{U - \frac{T}{C_M \phi}(R_a + R_\Omega)}{C_e \phi} = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a + R_\Omega}{C_M C_e \phi^2} \cdot T$$

$n = f(T)$ 与 U, ϕ, R_Ω 有关

I_f 不同, ϕ 与 $T(i_a)$ 的关系不相同 $\Rightarrow$ 机械特性不相同

二、他励直流电动机的固有机机械特性

$T \neq c$, 只要 $I_f = c$ 且忽略电枢反应 $\Rightarrow \phi$ 是不变的

$U = U_N, \phi = \phi_N (I_f = I_{fN})$ 且 $R_\Omega = 0 \Rightarrow n = f(T)$

$$n = \frac{U_N}{C_e \phi_N} - \frac{R_a}{C_M C_e \phi_N^2} \cdot T = n_0 - \beta_N \cdot T$$

固有机机械特性的斜率

理想空载转速

二、他励直流电动机的固有机械特性

(1) 理想空载点 ($T=0, n=n_0$),

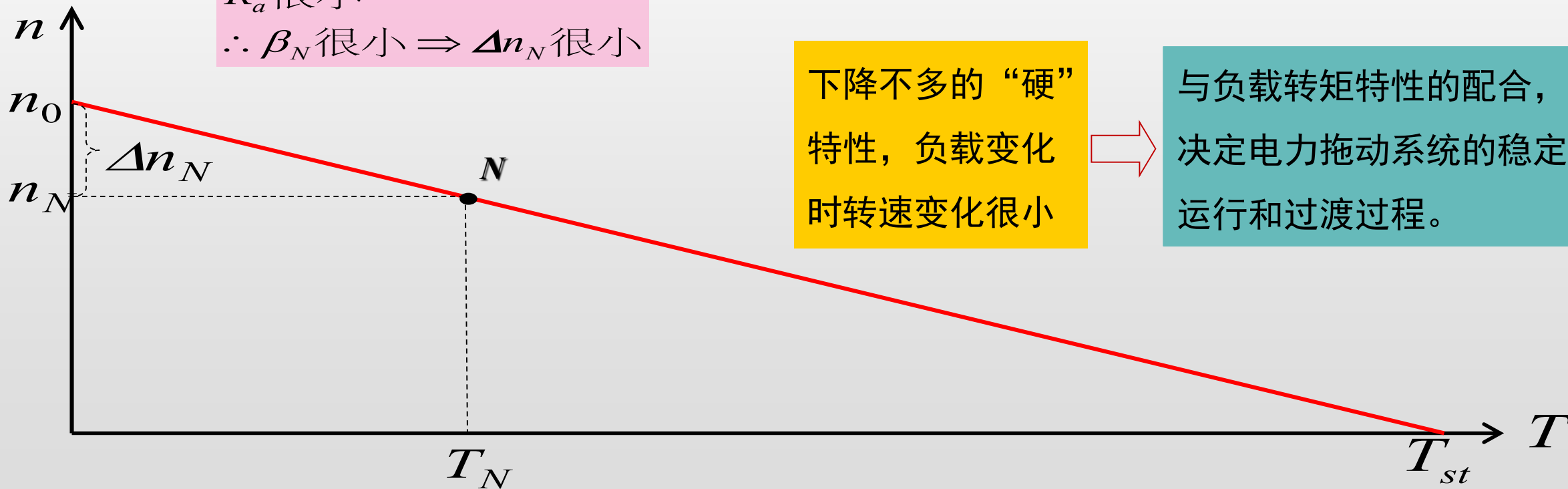
$$I_a=0, E_a=U_N$$

(2) 额定运行点 N ($T=T_N, n=n_N$),

额定转速降: $\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta_N \cdot T$

R_a 很小

$\therefore \beta_N$ 很小 $\Rightarrow \Delta n_N$ 很小



(3) 起动点 ($T=T_{st}, n=0$)

此时: $E_a = C_e \Phi n = 0$

$$I_{st} = \frac{U_N - E_a}{R_a} = \frac{U_N}{R_a} \quad (\text{起动电流})$$

$$T_{st} = C_M \Phi I_{st} \quad (\text{起动转矩})$$

下降不多的“硬”特性，负载变化时转速变化很小

与负载转矩特性的配合，决定电力拖动系统的稳定运行和过渡过程。

二、他励直流电动机的固有机械特性

分析与设计时，
必须有电动机的机械特性

可实测求得

也可根据额定
数据计算得到

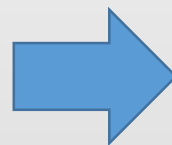
理想空载点 ($n=n_0, T=0$)

额定工作点 ($n=n_N, T_N$)

由铭牌数据估算

$$R_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

额定工作点时，不变损耗=可变损耗



$$E_N = U_N - I_N R_a$$

$$C_e \phi_N = \frac{E_N}{n_N}$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \phi_N}$$

$$\beta_N = \frac{R_a}{C_e C_M \phi_N^2}$$

$$n = n_0 - \beta_N T$$

三、他励直流电动机的人为机械特性

固有的机械特性

$$U, R_{\Omega}, \phi$$

人为机械特性

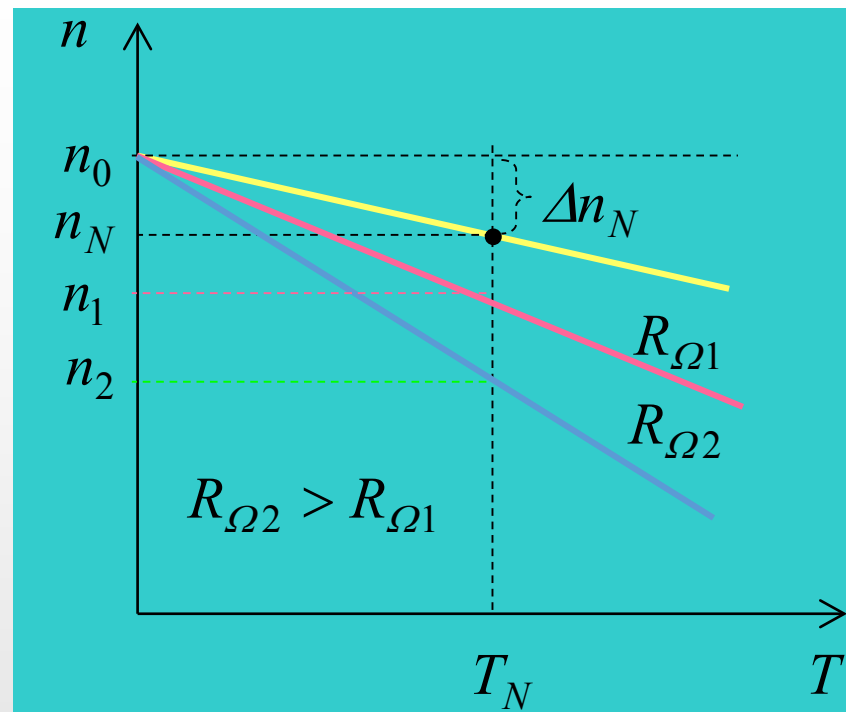
1. 电枢回路串电阻时的人为机械特性

保持 $U = U_N$, 及 $\phi = \phi_N (I_f = I_{fN})$ 不变, 在电枢回路中串入电阻 R_{Ω} , 得到 $n = f(T)$ 关系即电枢回路串电阻人为机械特性

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_N}{C_e \phi_N} - \frac{R_a + R_{\Omega}}{C_M C_e \phi_N^2} \cdot T \\ &= n_0 - \beta \cdot T \end{aligned}$$

特点：理想 n_0 跟固有机械特性相同

$\beta > \beta_N$, 特性变软, 在同一负载转矩下, n 下降更多



$$\text{给定 } R_{\Omega} \Rightarrow \beta = \frac{R_a + R_{\Omega}}{C_e C_M \phi_N^2} \text{ 一定}$$

三、他励直流电动机的人为机械特性

2. 改变端电压时的人为机械特性

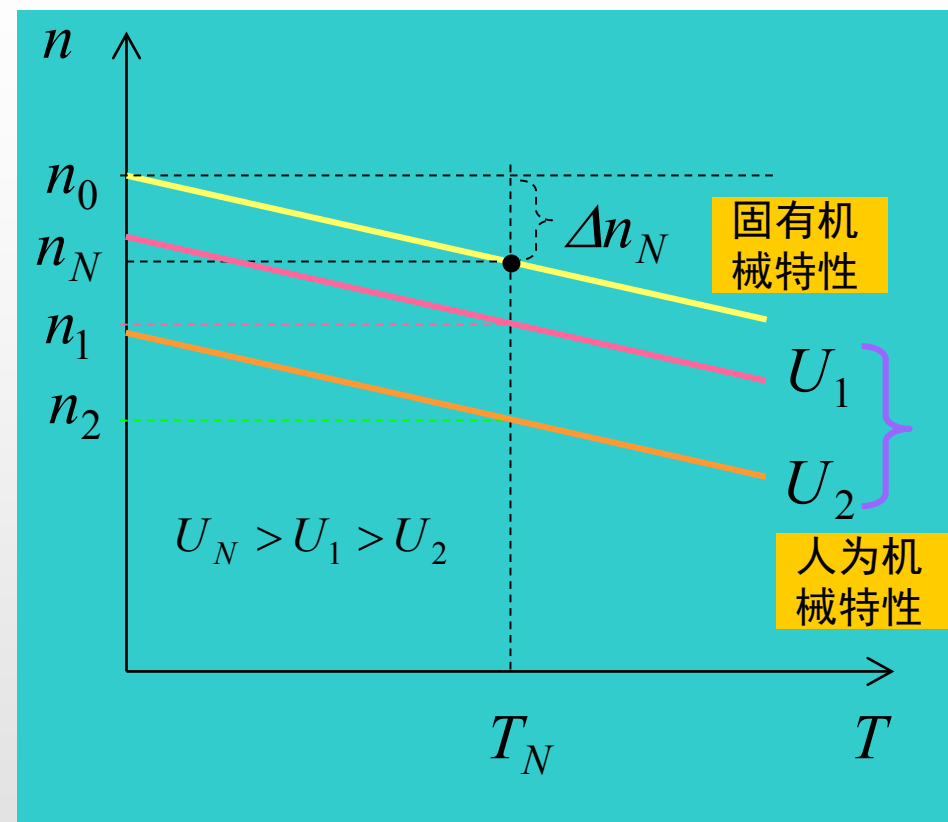
保持 $\phi = \phi_N (I_f = I_{fN})$ 不变且 $R_\Omega = 0$, 改变电动机的 U , 得到 $n = f(T)$ 关系即改变端电压的人为机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \phi_N} - \frac{R_a}{C_M C_e \phi_N^2} \cdot T$$
$$= n'_0 - \beta_N \cdot T$$

端电压改变后的理想空载转速

特点： n'_0 比固有机特性低，且电压越低， n'_0 越低。

U 不同, 斜率相同, 是一组相互平行的直线



$$\Delta n_1 = \Delta n_2 = n'_0 - n = \beta_N T = \Delta n_N$$

三、他励直流电动机的人为机械特性

3. 减弱电动机主磁通的人为机械特性

保持 $U = U_N$ 且 $R_\Omega = 0$, 改变电动机的 I_f , 使 $I_f < I_{fN}$,

从而 $\phi < \phi_N$, 得到 $n = f(T)$ 关系即减弱磁通的人为机械特性

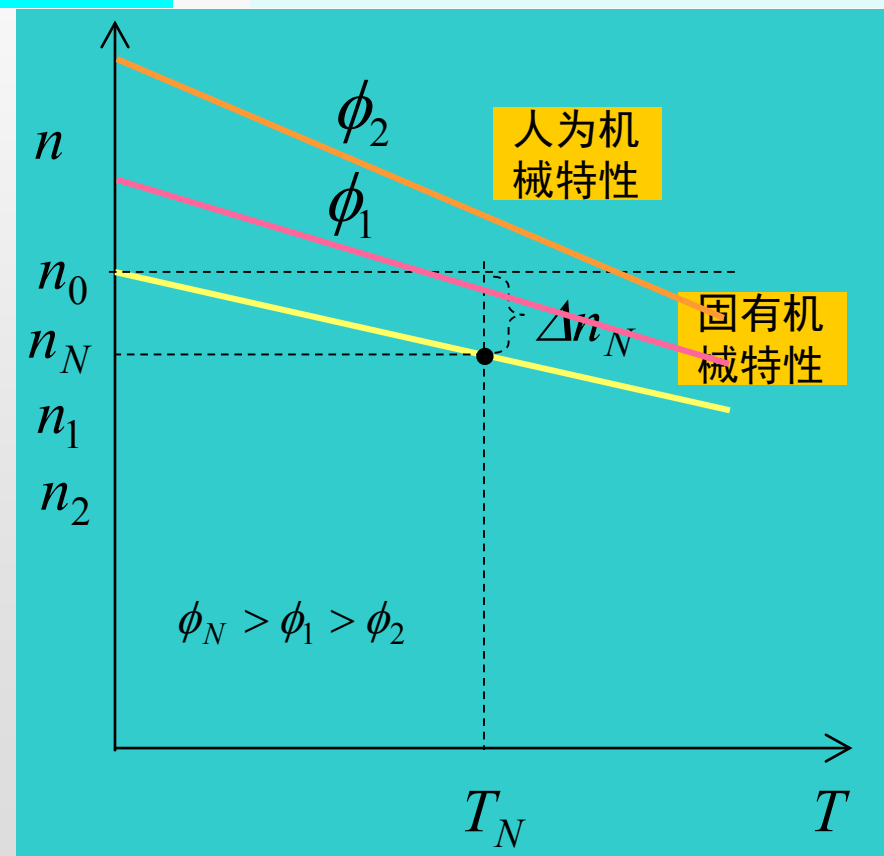
$\Rightarrow \phi \downarrow \Leftrightarrow I_f \begin{cases} \text{改变 } r_\Omega \text{ (小容量电机)} \\ \text{改变 } U_f \text{ (大容量电机)} \end{cases}$

$$n = \frac{U_N}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_M C_e \phi^2} \cdot T$$
$$= n_0'' - \beta'' \cdot T$$

磁通改变后的理想空载转速

特点: n_0' 比固有机特性高, 且磁通越低, n_0' 越高。

ϕ 不同, 斜率不相同, ϕ 越小 β 越大, 特性越软

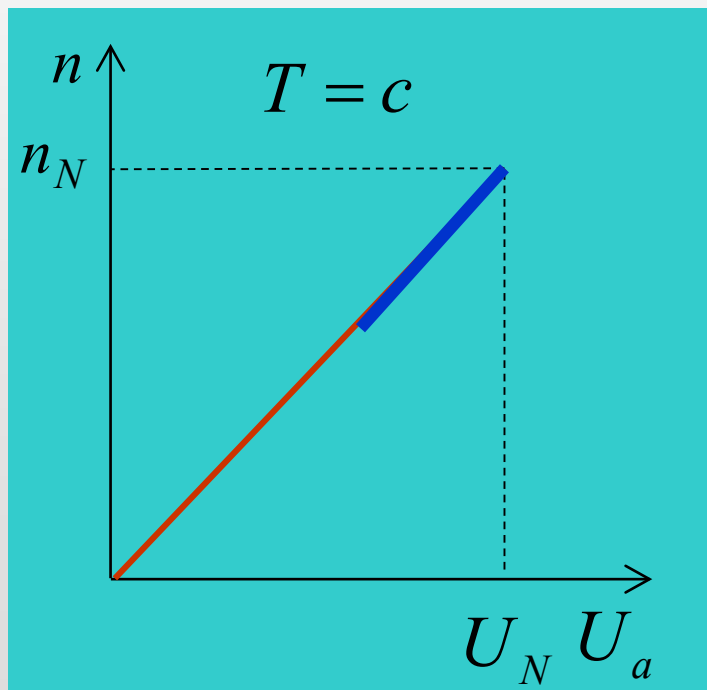


三、他励直流电动机的人为机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R_a + R_\Omega}{C_M C_e \phi^2} \cdot T$$

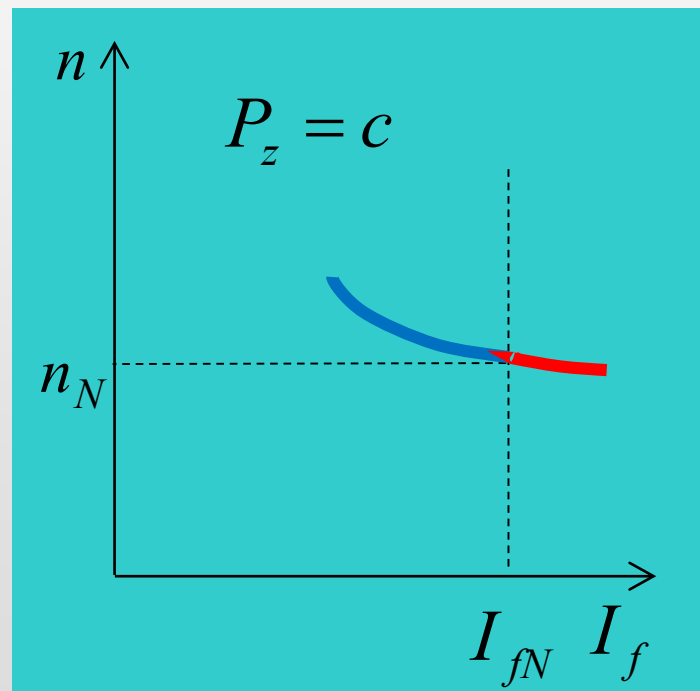
(1)向低速方向调节：

电枢回路串电阻、改变端电压

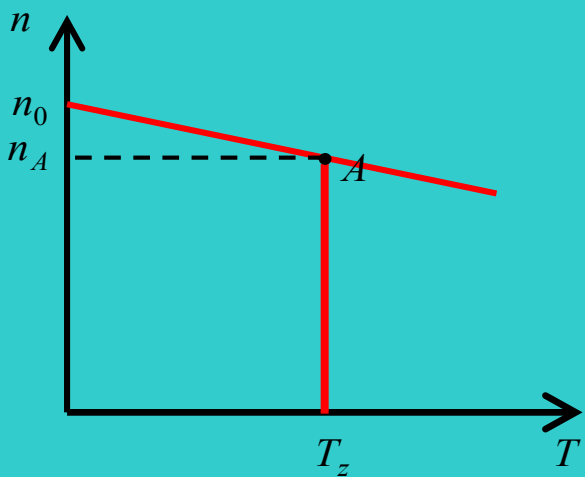


(2)向高速方向调节：

减弱电动机主磁通



四、电力拖动系统的稳定运行条件



他励直流电动机带恒转矩负载

稳定平衡状态：

在平衡状态时

某种原因

离开平衡状态时

达到新的平衡状态

新的条件

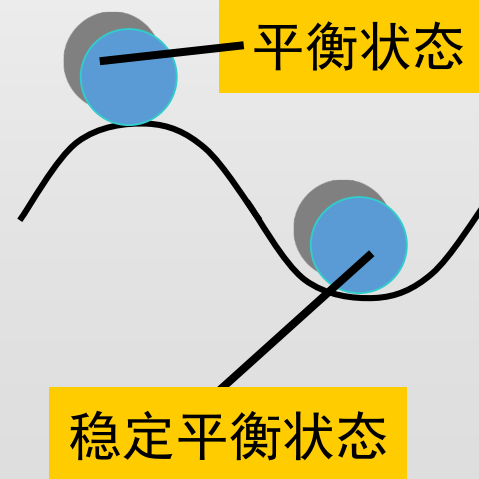
扰动消失

恢复到原来的平衡状态

则原先的状态称为稳态平衡状态

平衡状态： $n = c, I_a = c$

$$T = T_z \Rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow n = n_A$$

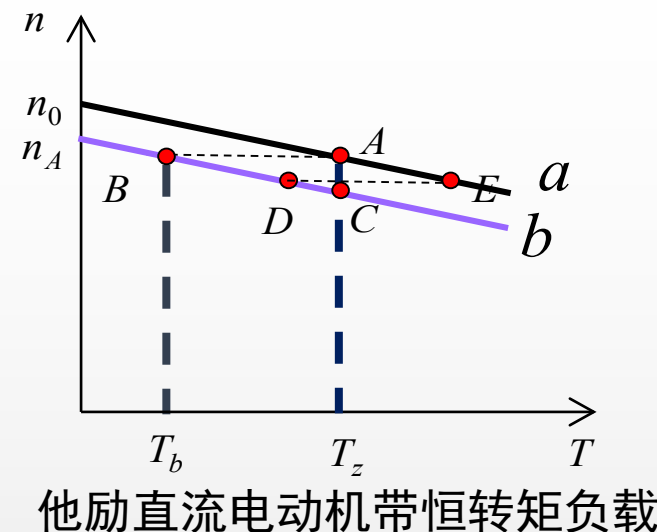


举例1

$U \downarrow 1\% \rightarrow$ 机械特性由 a 变为 b

1. U 变化瞬间, n 不变, 工作点 $A \rightarrow B$, 此时 $T = T_b < T_z \rightarrow \frac{dn}{dt} < 0 \rightarrow$ 系统减速 $\rightarrow T \uparrow \rightarrow$ 到 C 点, $T = T_c = T_z$, $\frac{dn}{dt} = 0 \rightarrow n$ 不变 $\rightarrow$ 处于新的平衡状态

2. 若 $n \downarrow$ 的过程中, D 点 $\rightarrow U$ 恢复 $\rightarrow n$ 不变 $\rightarrow$ 工作点变为 $E \rightarrow T > T_z \rightarrow$ 加速 $\rightarrow A$ 点($T = T_z, n = n_A$)



结论

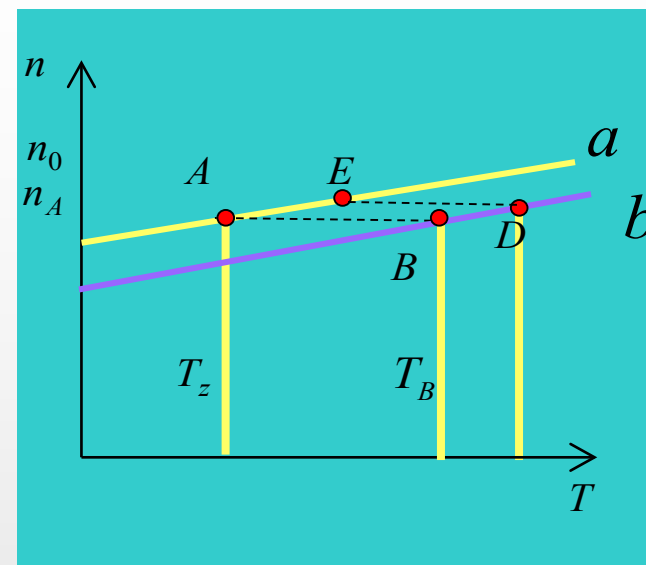
图示的机械特性与负载转矩特性的配合, 系统在原先的状态 A 点运行, 是处于**稳态平衡状态**

举例 2

$U \downarrow 1\% \rightarrow$ 机械特性由 a 变为 b

1. U 变化瞬间, n 不变, 工作点 $A \rightarrow B$, 此时 $T = T_b > T_z \rightarrow \mathrm{d}n/\mathrm{d}t > 0 \rightarrow$ 系统加速 $\rightarrow T \uparrow \rightarrow n$ 越来越快 $\rightarrow$ 达不到新的平衡状态

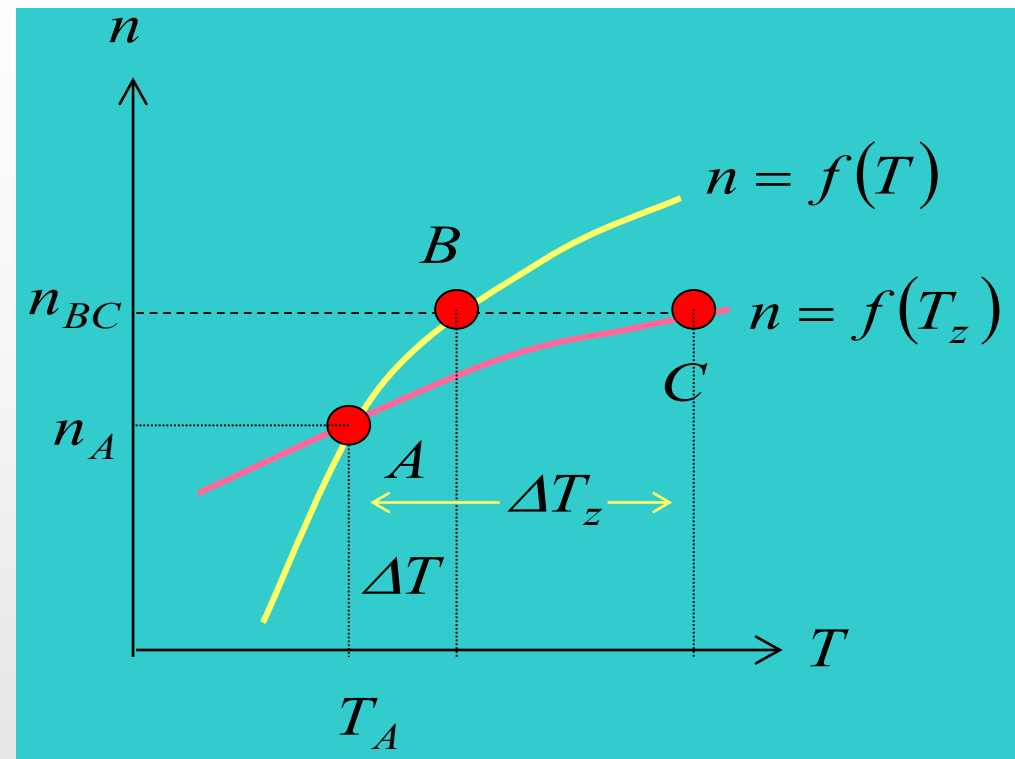
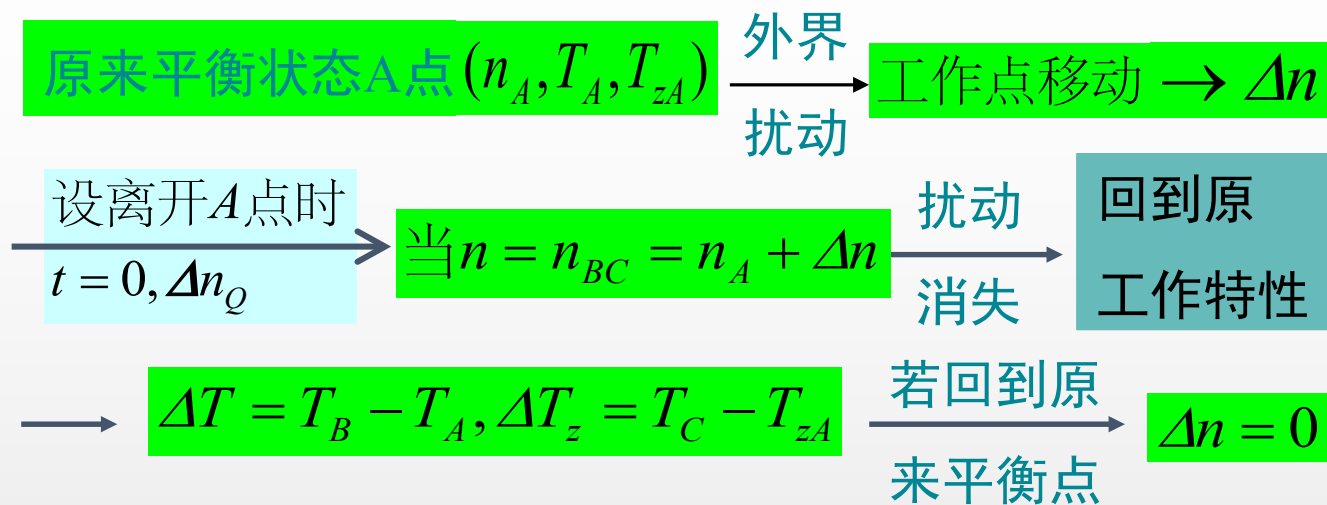
2. 若 $n \downarrow$ 的过程中, D 点 $\rightarrow U$ 恢复 $\rightarrow n$ 不变 $\rightarrow$ 工作点变为 $E \rightarrow T > T_z \rightarrow$ 加速 $\rightarrow$ 不能恢复原来的平衡状态



结论

图示的机械特性与负载转矩特性的配合, 电力拖动系统是**不能稳定平衡运行**的。

稳定运行条件



原来平衡点

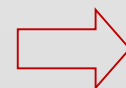
$$T_A - T_{zA} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn_A}{dt} = 0$$

扰动消失后

两式相减

$$(T_A + \Delta T) - (T_{zA} + \Delta T_z) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d(n_A + \Delta n)}{dt}$$

$$\Delta T - \Delta T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{d\Delta n}{dt}$$



$$\frac{\frac{\Delta T}{\Delta n} - \frac{\Delta T_z}{\Delta n}}{\frac{GD^2}{375}} \cdot \Delta n = \frac{d\Delta n}{dt}$$

稳定运行条件

各增量很小, $\frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{dT}{dn}$

$$\frac{\frac{dT}{dn} - \frac{dT_z}{dn}}{GD^2} \cdot \Delta n = \frac{d\Delta n}{dt}$$

$$t = 0, \Delta n = \Delta n_Q$$

$$\Delta n = \Delta n_Q \cdot e^{\left(\frac{dT}{dn} - \frac{dT_z}{dn}\right) \cdot \frac{375}{GD^2} \cdot t}$$

$$\left(\frac{dT}{dn} - \frac{dT_z}{dn}\right) < 0$$

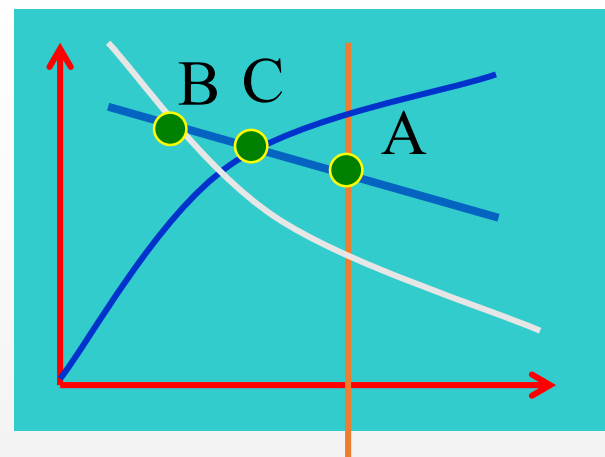
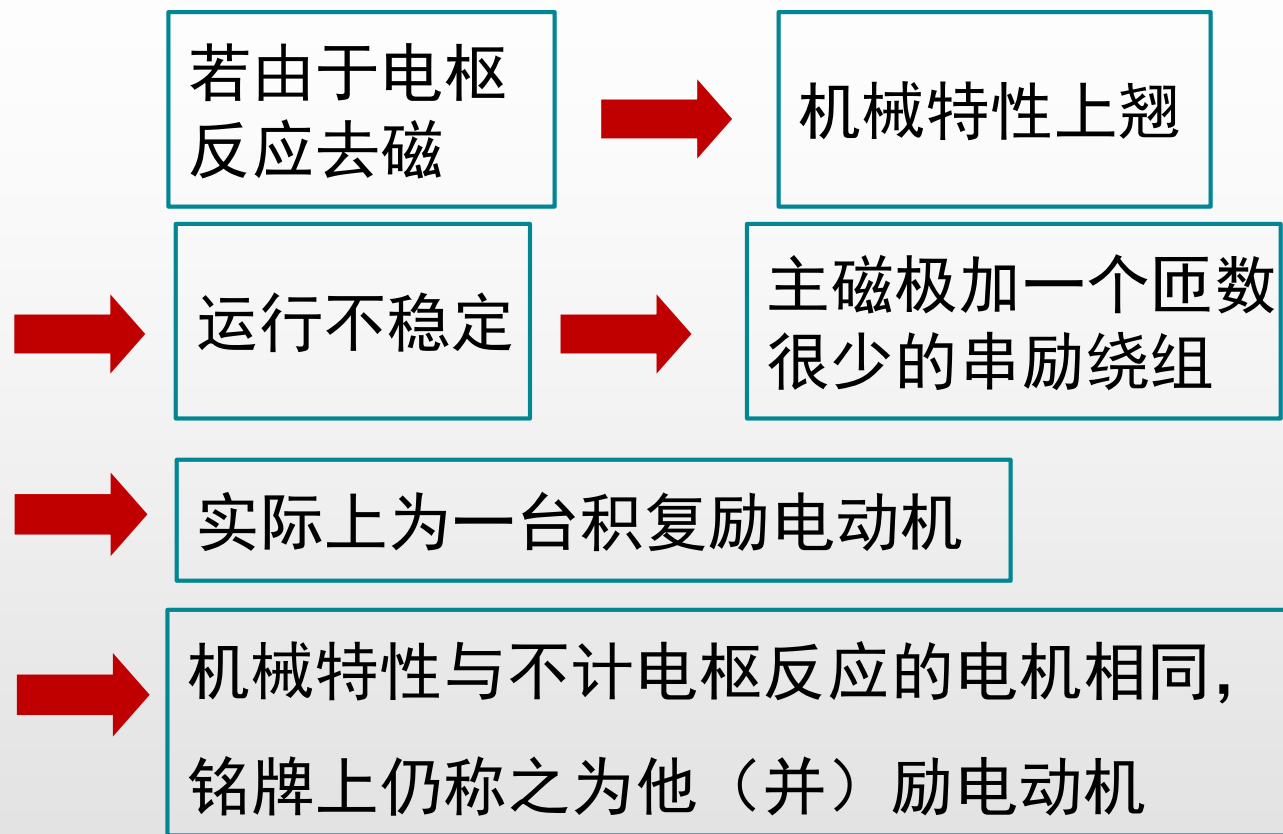
$$\Delta n \rightarrow 0$$

结 论

稳定平衡运行条件: $\left(\frac{dT}{dn} - \frac{dT_z}{dn}\right) < 0 \Leftrightarrow \frac{dT}{dn} < \frac{dT_z}{dn}$

机械特性具有**下降特性**（他励、并励），带 $T=c$, $P=c$, 通风机等不同性质的负载都稳定运行，其交点就是**平衡运行点**

稳定运行条件



大型机称
补偿绕组

抵消电枢反应的去磁作用，使磁通恒定，
下降特性，稳定运行，故常称为**稳定绕组**。



浙江大学电气工程学院

T H A N K S

主讲：浙江大学卢琴芬