



浙江大学电气工程学院

电机与拖动

主讲：卢琴芬

6

直流电机的运行原理

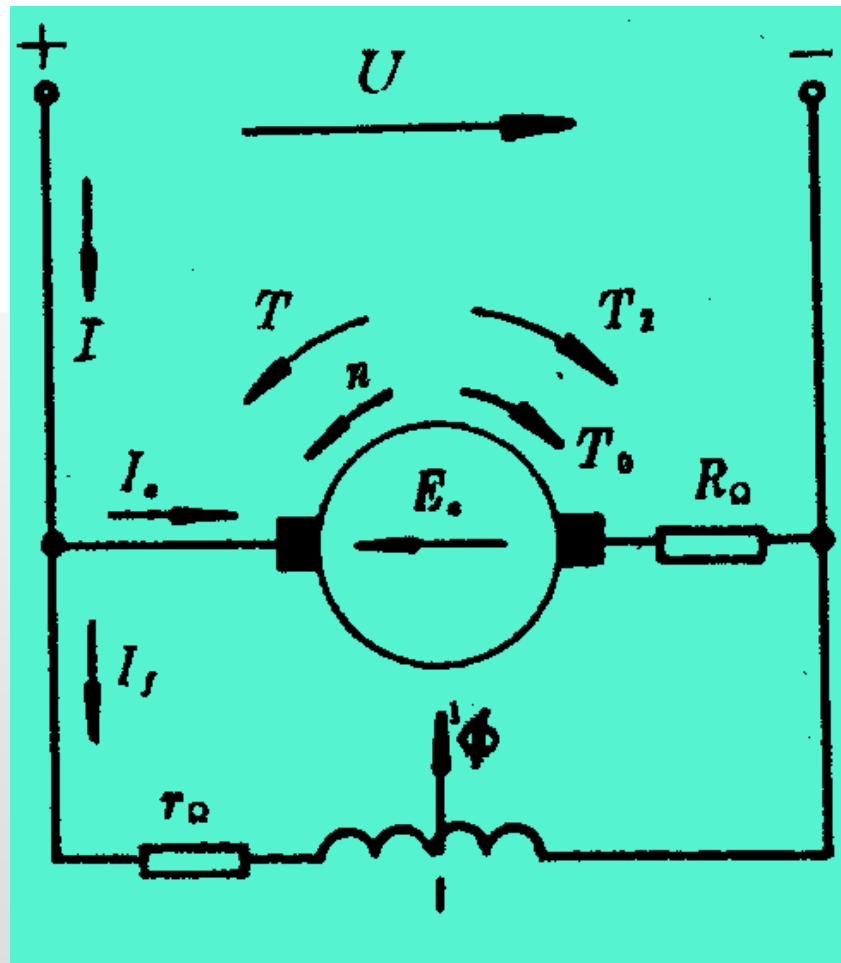
一、直流电动机的基本方程式

电压、电流、电动势都是有方向的，要写**基本方程式**，必须先规定好这些物理量的**正方向**。

电动机的 E_a 的正方向与 I_a 相反

T 与 n 同向，驱动转矩

轴上机械负载转矩 T_2 及 T_0 与 n 相反，是制动转矩



$$UI > 0$$

该机从电源吸收电功率

$$UI < 0$$

该机将电能输给电源

$$P_M > 0$$

电能转化为机械能

$$P_M < 0$$

机械能转化为电能

1. 电动势平衡方程式

A. 电枢回路

$$U = E_a + I_a (R_a + R_\Omega)$$

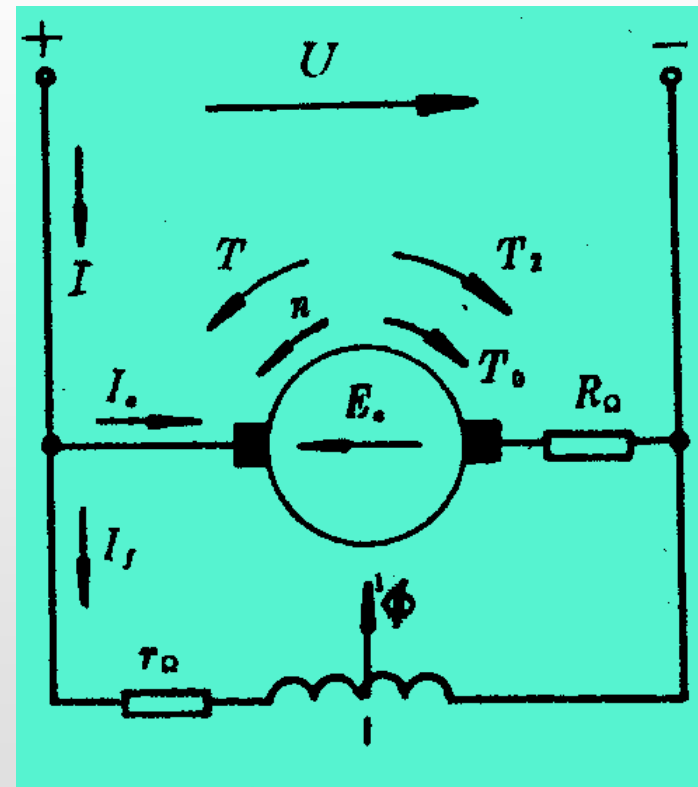
电动机中, $U > E_a$

$$U = C_e \phi n + I_a (R_a + R_\Omega)$$

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_\Omega)}{C_e \phi}$$

B. 励磁回路

$$U = I_f (r_f + r_\Omega) = I_f \cdot R_f$$



2. 转矩平衡方程式

当电枢恒速旋转，有

$$T = T_2 + T_0 = T_z$$

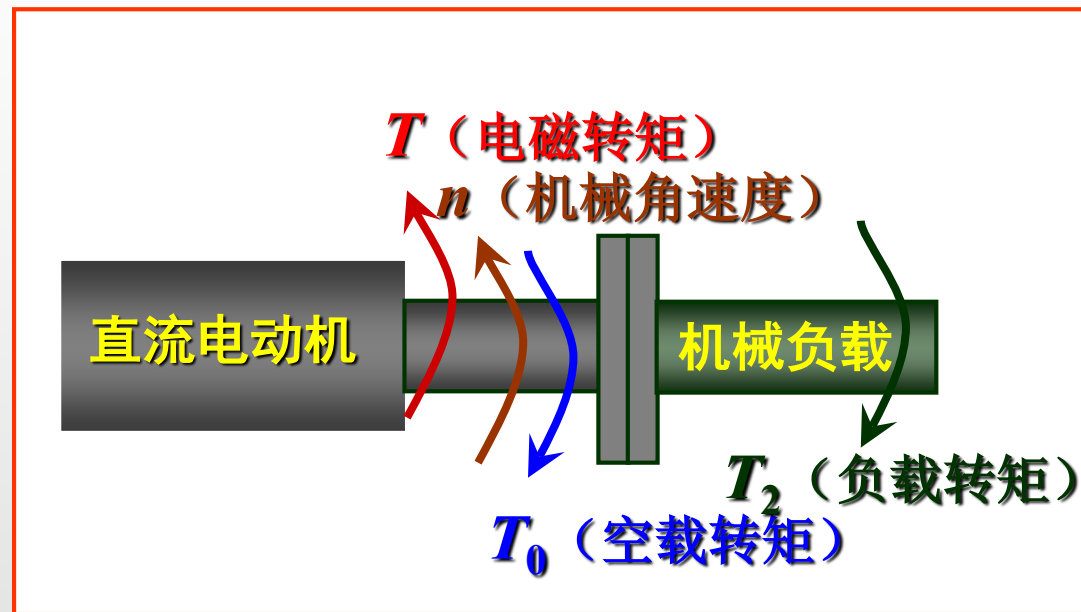
$$I_a = \frac{T_z}{C_M \phi}$$

$$\phi = c \rightarrow I_a \propto T_z$$

$$\phi = c, T_2 = c \rightarrow I_a = c$$

理想空载： $T_z=0$, $I_a=0$

实际空载： $T_2=0$, $T_0 \neq 0$, $I_{a0} \neq 0$



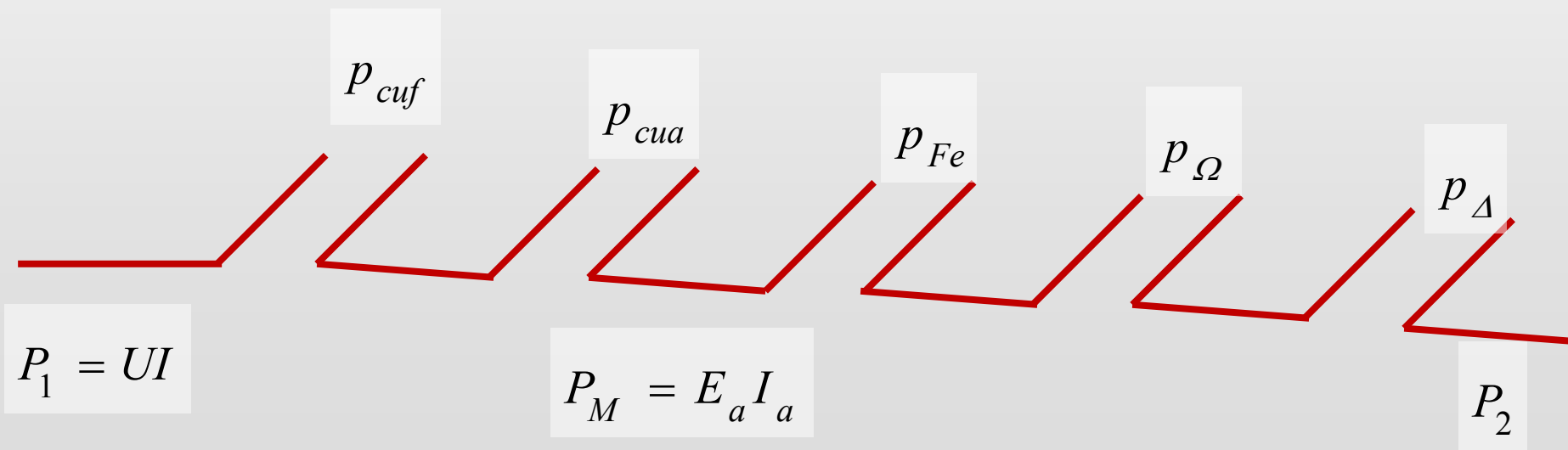
3.功率平衡方程式(并励DC电动机)

$$P_1 = UI = U(I_a + I_f) = UI_a + UI_f$$

$$UI_a = [E_a + I_a(R_a + R_\Omega)]I_a = E_a I_a + I_a^2(R_a + R_\Omega) = P_M + p_{cua}$$

$$UI_f = p_{cuf} \quad P_M = E_a I_a = T\Omega = (T_2 + T_0)\Omega = P_2 + p_0$$

$$p_0 = p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta$$



二、直流电动机的工作特性

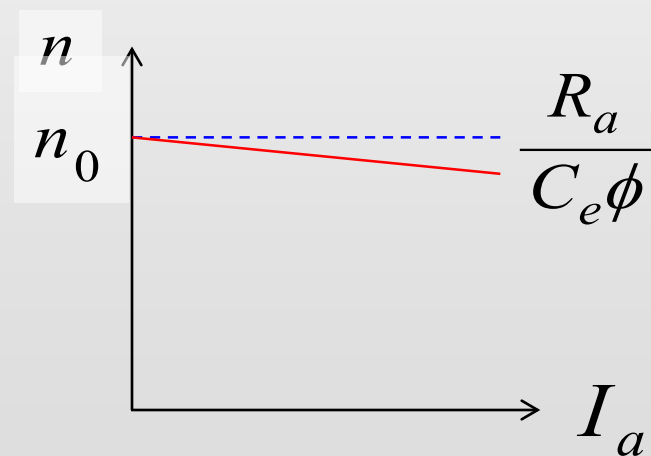
是指在一定的条件下，转速 n ，电磁转矩 T 和效率 η 随输出功率 P_2 而变化的关系

一定的条件 $U = U_N, R_\Omega = 0, I_f = I_{fN}$ 时 $\rightarrow n, T, \eta = f(P_2)$

由于 P_2 是输出的机械功率，不容易测量，而

$P_2 = T_2 \Omega = C_M \phi I_a \Omega \propto I_a$ (可以直接测量) $\Rightarrow n, T, \eta = f(I_a)$

$$n = \frac{U_N}{C_e \phi} - \frac{R_a + R_\Omega}{C_e \phi} I_a = n_0 - \frac{R_a + R_\Omega}{C_e \phi} I_a$$

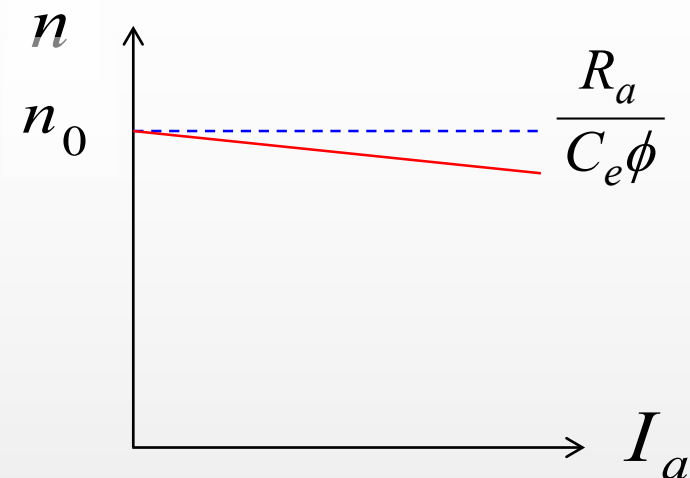


1. 他励（并励）直流电动机的工作特性

$U = U_N, R_\Omega = 0, I_f = I_{fN}$ 时, $n = f(I_a)$ 的关系叫转速特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \phi} - \frac{R_a}{C_e \phi} I_a$$

式中: $n_0 = \frac{U_N}{C_e \phi}$ 为 $I_a = 0$ 时的转速, 即理想空载转速



转速变化率:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\%$$

对于并励电动机, 一般 $\Delta n = 3\% \sim 5\%$, 基本为恒速电机。

1

$\phi = \phi_N$ (不计电枢反应的去磁作用) 不变

R_a 小, $\therefore$ 转速 n 下降不多 (特性比较好)

2

如果考虑电枢反应的去磁作用, 在 $I_f = I_{fN}$ 不变的条件下,

$I_a \uparrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow n$ 下降更少甚至可能上升 $\rightarrow$ 运行不稳定

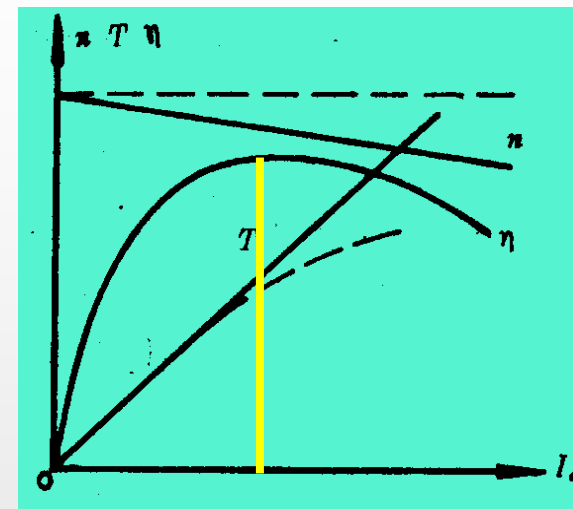
2. 效率特性

$U = U_N, R_\Omega = 0, I_f = I_{fN}$ 时, $\eta = f(I_a)$ 的关系叫效率特性

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \left(1 - \frac{\sum p}{P_1} \right) 100\% = \left[1 - \frac{p_{cuf} + p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta + I_a^2 R_a}{U(I_a + I_f)} \right] 100\%$$

$$I_f \ll I_a, I = I_a + I_f \approx I_a$$

$$\therefore \eta = \left[1 - \frac{p_{cuf} + p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta + I_a^2 R_a}{UI_a} \right] 100\%$$



不变损耗

$U = U_N, I_f = I_{fN}$ 且 n 变化小 $\rightarrow p_{cuf}, p_{Fe}, p_\Omega$ 及 p_Δ 不随 I_a 而变化

可变损耗

电枢回路铜耗 $p_{cua} = I_a^2 R_a$

不变损耗=可变损耗, 效率最大

$$\frac{d\eta}{dI_a} = 0 \Rightarrow$$

$$p_{cuf} + p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta = I_a^2 R_a$$

效率存在最大值

他励电机

直流电机通常运行于**额定状态**时，效率最大

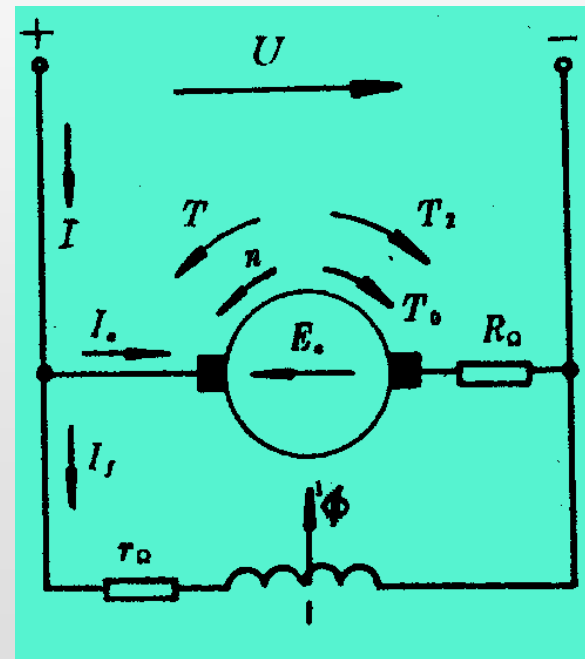
$$\left. \begin{array}{l} \Sigma p = 2I_N^2 R_a \\ \Sigma p = U_N I_N - P_N \end{array} \right\} \Rightarrow R_a = \frac{1}{2} \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

例 题

并励直流电机额定数据如下： $P_N=96\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=255\text{A}$ ，
 $I_{fN}=5\text{A}$ ， $n_N=500\text{r/min}$ 。电枢回路总电阻 $R_a=0.078\Omega$ 。电枢反应忽略不计。
1. 额定输出转矩 T_N 与电磁转矩 T ？

解：

$$T_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = \frac{96000 \times 60}{2\pi \times 500} = 1833.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$



例题

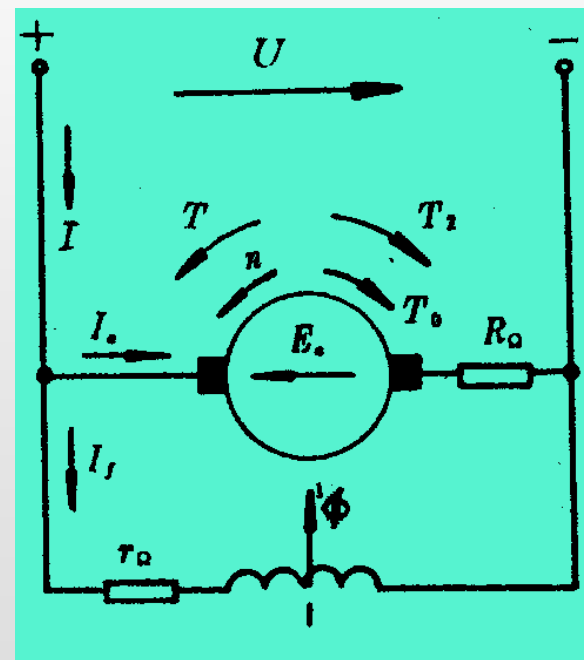
并励直流电机额定数据如下： $P_N=96\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=255\text{A}$ ， $I_{fN}=5\text{A}$ ，
 $n_N=500\text{r/min}$ 。电枢回路总电阻 $R_a=0.078\Omega$ 。电枢反应忽略不计。

1. 额定输出转矩 T_N 与电磁转矩 T ？

解： $I_{aN} = I_N - I_{fN} = 250\text{A}$

$$E_{aN} = U_N - I_{aN} R_a = 420.5\text{V}$$

$$T = \frac{P_M}{\Omega_M} = \frac{E_{aN} I_{aN}}{\frac{2\pi n_N}{60}} = 2008\text{N} \cdot \text{m}$$



2. 理想空载转速 n_0 与实际空载转速 n_0' ?

解： 不计电枢反应，磁通 Φ 保持不变 $\Rightarrow \phi_0 = \phi_N$

$$C_e \phi_0 = C_e \phi_N = \frac{E_{aN}}{n_N} = 0.841$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \phi_0} = 523.2 \text{ r/min}$$

磁通 Φ 保持不变 $\Rightarrow p_0 = p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta}$ 不变

转速 n 变化不大

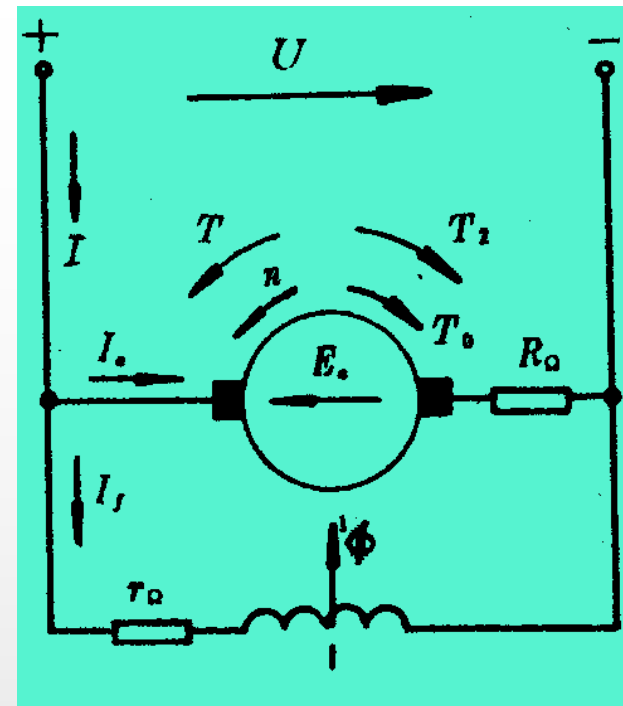
$\Rightarrow T_0$ 不变

$$T_0 = T - T_N = 2008 - 1833.5 = 174.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$I_{a0} = \frac{T_0}{C_M \phi} = \frac{T_0}{9.55 C_e \phi} = \frac{174.5}{8.032} = 21.73 \text{ A}$$



$$n_0' = \frac{U_N - I_{a0} R_a}{C_e \phi} = \frac{440 - 21.73 \times 0.078}{0.841} = 521.2 \text{ r/min}$$



3. 在额定运行时在电枢回路中串入电阻 $R_{\Omega}=0.122\ \Omega$ ，则电阻刚串入瞬间电枢电流和转速各为多少？

转速 n 不变

$$E_a = C_e \phi n = E_{aN}$$

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_{\Omega}} = 97.5\text{A}$$

4. 在（3）条件下，保持负载不变，稳定后的电枢电流及转速为多少？

T_Z 不变, I_a 不变

$$n = \frac{U_N - I_a (R_a + R_{\Omega})}{C_e \phi} = 463.7\text{r/min}$$



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