



电机与拖动**课件**之二

直流电机

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

1.1 直流电机的基本工作原理与结构

1.2 直流电机电枢绕组简介

1.3 直流电机的电枢反应

1.4 直流电机的电枢电动势和电磁转矩

1.5 直流电机的换向

1.6 直流发电机

1.7 直流电动机

以他励电机为例说明可逆原理：把一台他励直流发电机并联于直流电网上运行保持电源电压不变。

$$E_a = C_e \Phi n = U + I_a R_a \quad (E_a = U, I_a = 0, P_a = 0)$$

- 减少原动机的输出功率，发电机转速下降。当转速下降到一定程度时，使得 $E_a = U$ ，此时电枢电流为零，发电机输出电功率为零，原动机输入的机械功率仅用来补偿电机的空载损耗。
- 继续降低原动机的转速，将有 $E_a < U$ ，电枢电流反向，这时电网向电机输入电功率，电机进入电动机状态运行。

同理，上述的物理过程也可以反过来，电机从电动机状态转变到发电机状态。

一台电机既可作为发电机运行，又可作为电动机运行，这就是直流电机的可逆原理。



一、电压平衡方程式

$$\begin{cases} U = E_a + R_a I_a \\ I = I_a \end{cases}$$

二、转矩平衡方程式

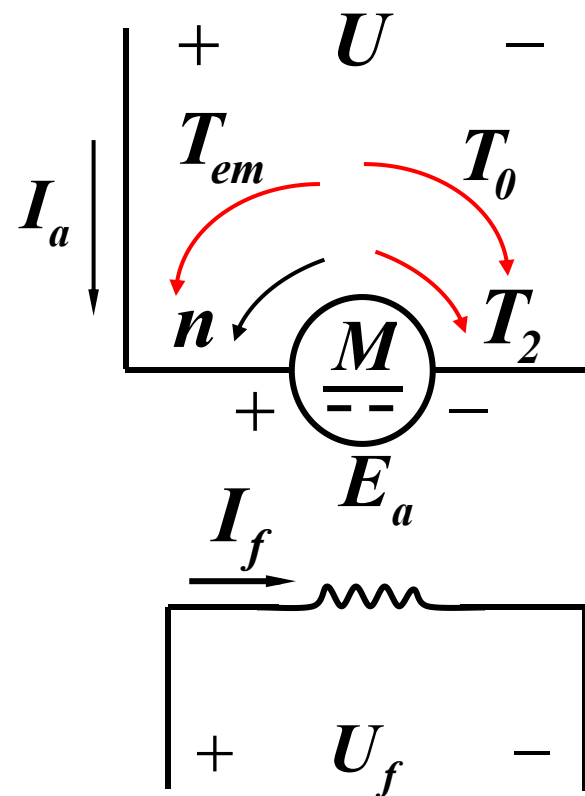
$$T_{em} = T_2 + T_0$$

T_{em} : 电磁转矩。方向与 n 相同, 为拖动转矩

T_0 : 空载损耗转矩。为制动转矩

T_2 : 负载转矩。为制动转矩

以他励直流电动机为例



三、功率平衡方程式

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + R_a I_a) I_a = E_a I_a + R_a I_a^2 = P_{em} + P_{Cua}$$

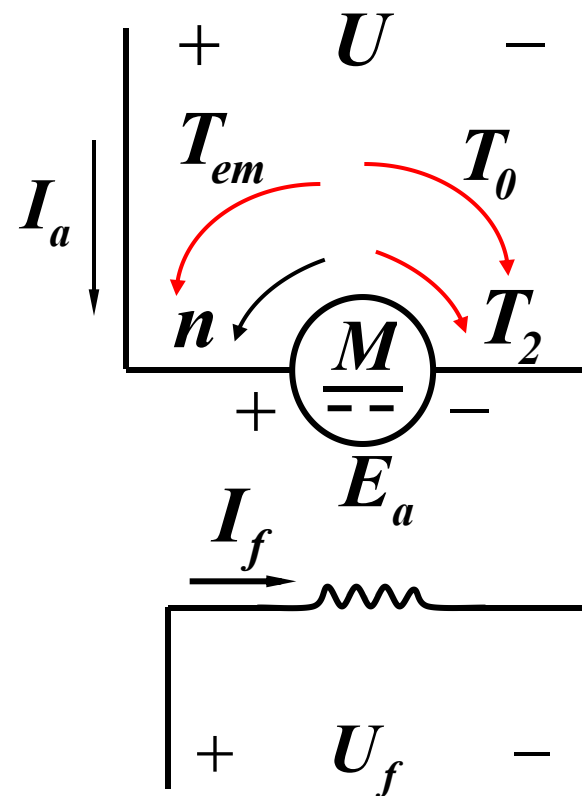
$$P_1 = UI \longrightarrow \text{输入功率}$$

$$P_{em} = E_a I_a \longrightarrow \text{电磁功率}$$

$$P_{Cua} = R_a I_a^2 \longrightarrow \text{电枢回路的铜损耗}$$

$$P_{em} = E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{2a\pi} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = T\Omega$$

其中, $\Omega = 2\pi n/60$ 为电动机的机械角速度, 单位是 rad/s



三、功率平衡方程式

在转矩平衡方程式两边都乘以机械角速度 Ω ，得：

$$T_{em}\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

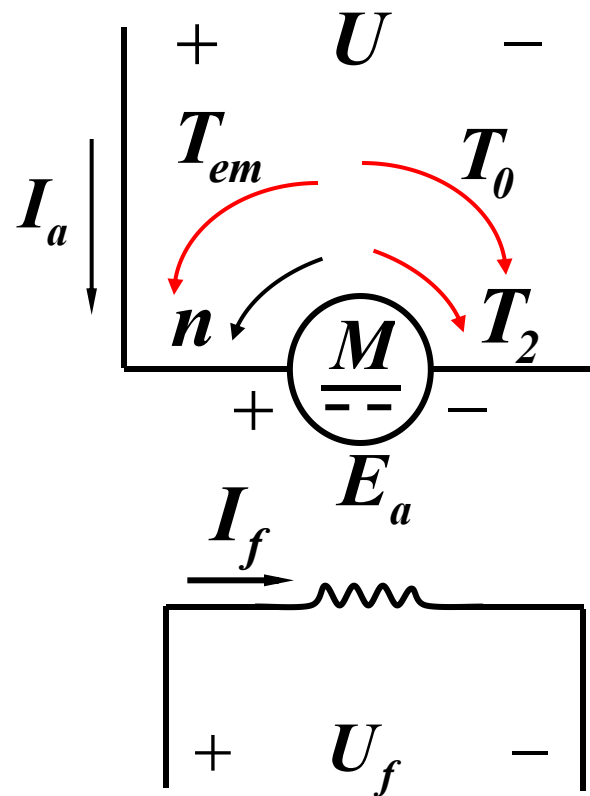
上式可写成：

$$P_{em} = P_2 + P_0 = P_2 + P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}$$

其中： $P_{em} = T\Omega \longrightarrow$ 电磁功率

$P_2 = T_2\Omega \longrightarrow$ 轴上输出的机械功率 P_N

$P_0 = T_0\Omega \longrightarrow$ 空载损耗，包括机械损耗 P_{mec} 、铁损耗 P_{Fe} 、附加损耗 P_{ad}

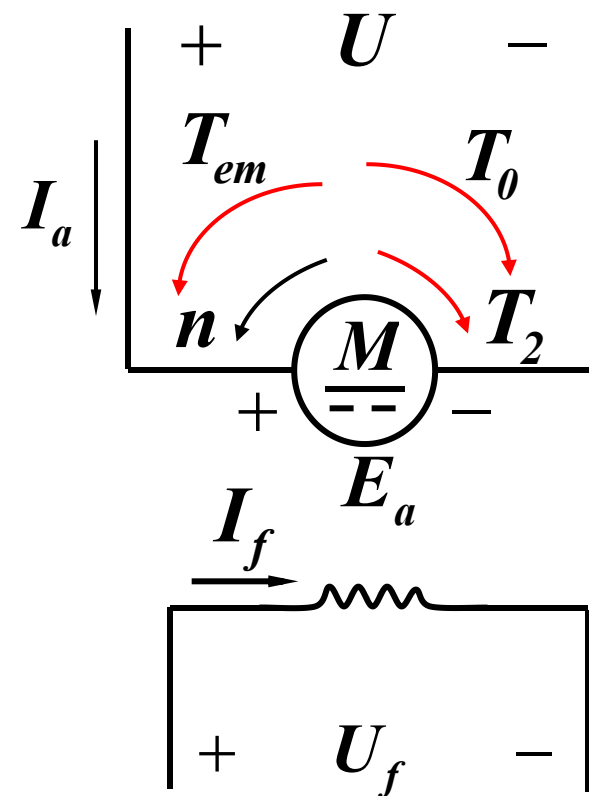
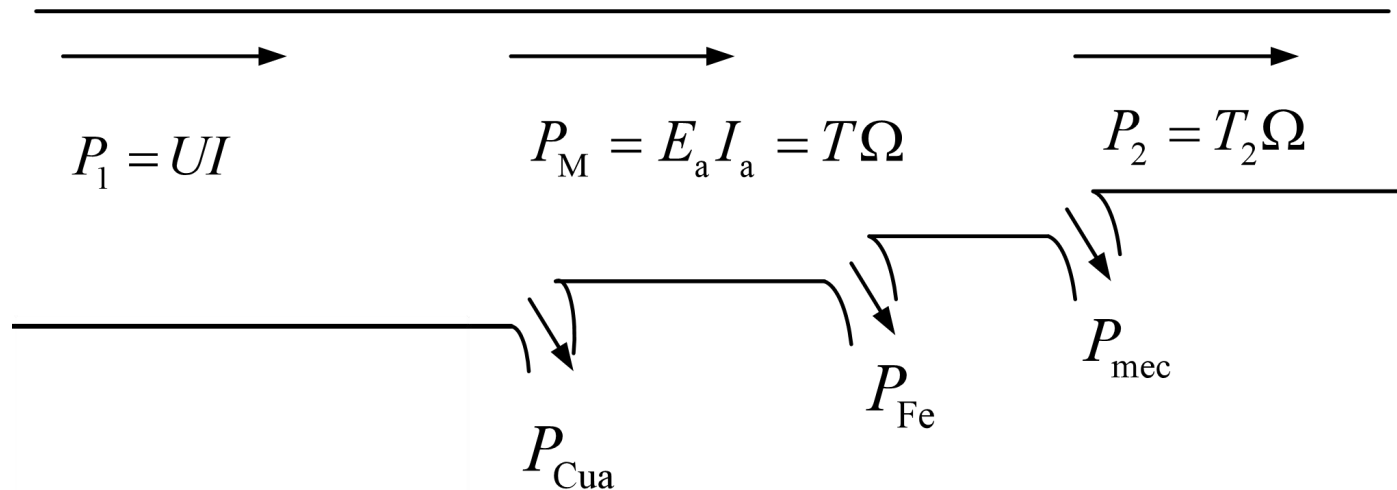


三、功率平衡方程式

他励直流电动机的功率平衡方程式：

$$P_1 = P_{em} + P_{Cua} = P_2 + P_{mec} + P_{Fe} + P_{Cua} = P_2 + \sum P$$

式中： $\sum P = P_{mec} + P_{Fe} + P_{Cua}$ 为他励直流电动机的总损耗



他励直流电动机的功率流程图



三、功率平衡方程式

若为并励直流电动机

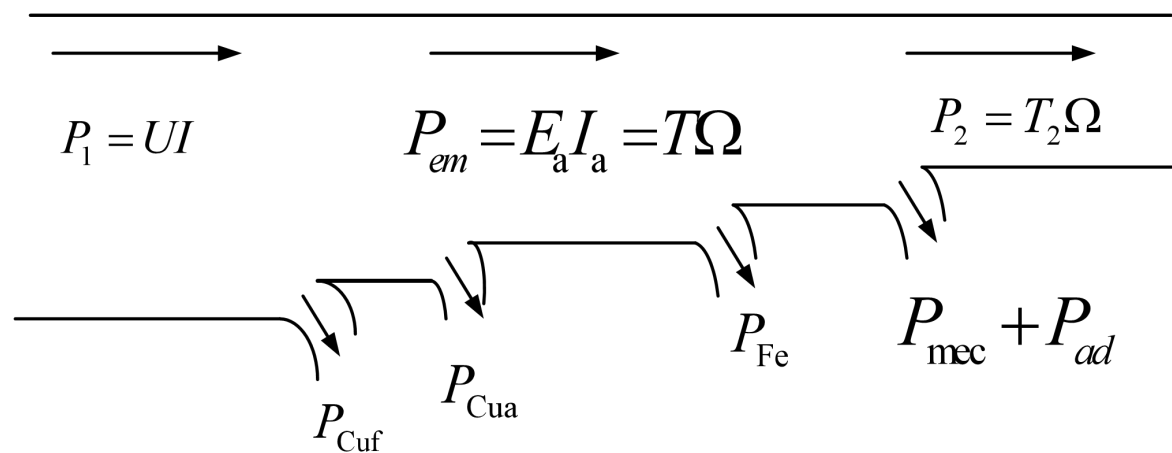
$$P_1 = UI = U(I_a + I_f) = UI_a + UI_f = (E_a + R_a I_a)I_a + P_{cuf}$$

$$= E_a I_a + R_a I_a^2 + P_{cuf} = P_{em} + P_{Cua} + P_{cuf}$$

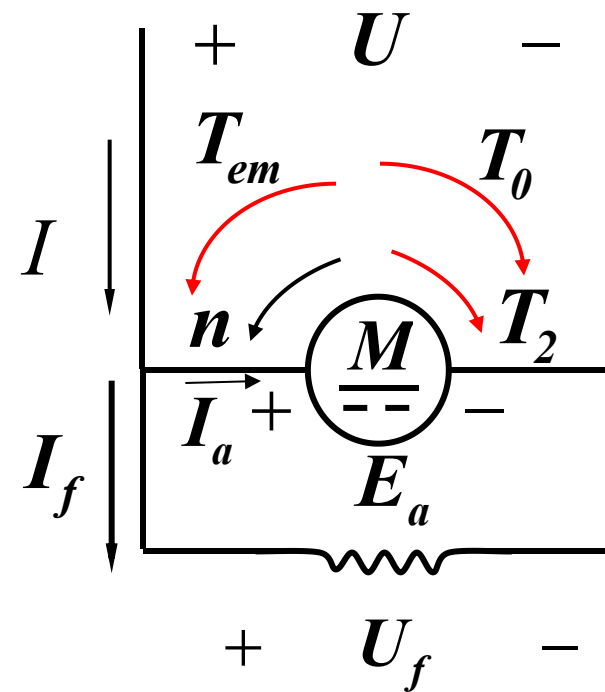
$$= P_2 + P_{mec} + P_{ad} + P_{Fe} + P_{Cua} + P_{cuf}$$

$$= P_2 + \sum P$$

$$\sum P = P_{mec} + P_{ad} + P_{Fe} + P_{Cua} + P_{cuf}$$



并励直流电动机的功率流程图



直流电动机的工作特性是指当电动机的端电压 $U = U_N$ ，励磁电流 $I_f = I_{fN}$ ，电枢回路不串外加电阻时，转速 n ，电磁转矩 T ，效率 η 分别与电枢电流 I_a 之间的关系。

一、转速特性 $n = f(I_a)$

当 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ ($\Phi = \Phi_N$) 时，转速 n 与电枢电流 I_a

之间的关系 $n = f(I_a)$ 称为转速特性。

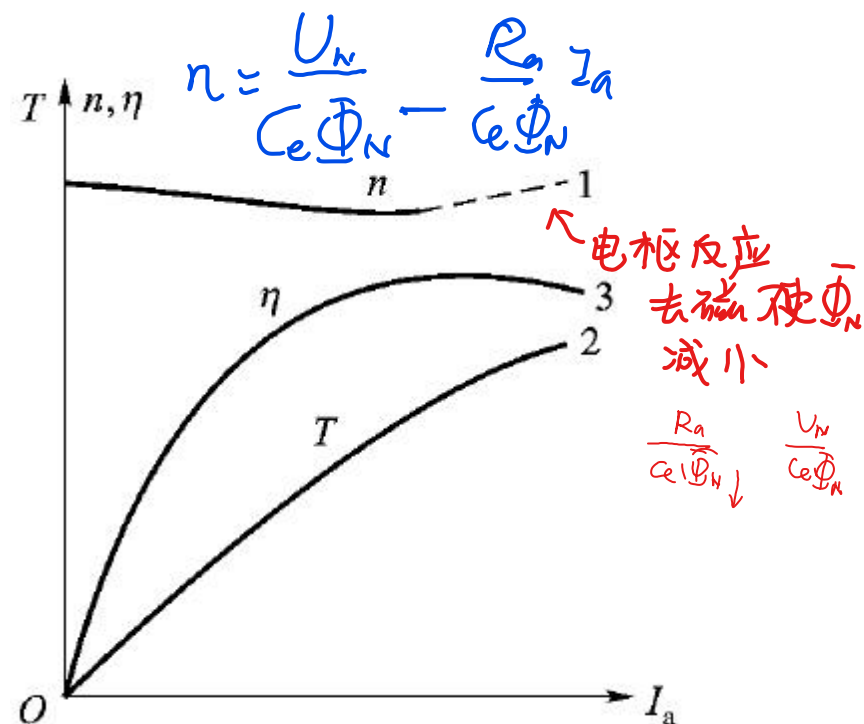
$E_a = C_e \Phi n$ 代入 $U = E_a + R_a I_a$ 得

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

一条稍稍向下倾斜的直线。

$$\begin{cases} E_a = C_e \Phi n \\ T_{em} = C_T \Phi I_a \end{cases}$$

② 电枢回路平衡方程
转矩平衡方程
功率平衡方程



1. 转速特性 2. 转矩特性 3. 效率特性



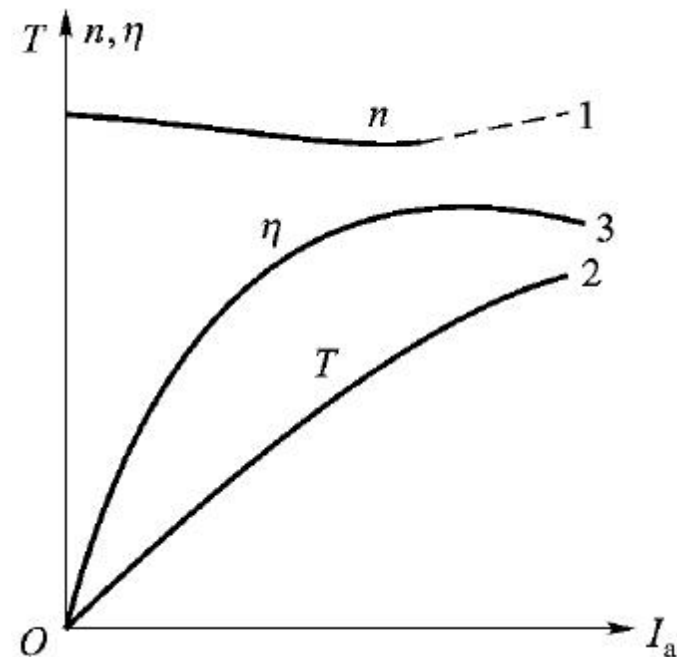
二、转矩特性 $T=f(I_a)$

当 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ ($\Phi = \Phi_N$) 时,

电磁转矩 T 与电枢电流 I_a 之间的关系 $T=f(I_a)$ 称为转矩特性

$$T = C_T \Phi I_a$$

↓ 磁路反应

三、效率特性 $\eta=f(I_a)$

当 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ ($\Phi = \Phi_N$) 时,

效率 η 与电枢电流 I_a 之间的关系 $\eta=f(I_a)$ 称为效率特性

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) \times 100\% = \left[1 - \frac{P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} + P_{Cua}}{U(I_a + I_f)} \right] \times 100\%$$

1. 转速特性 2. 转矩特性 3. 效率特性

↗ $I_a^2 R_a$

输入电流提供两卷



小结

直流电动机

可逆原理

基本方程

$$E_a = C_E \Phi n \quad E_a < U$$

$$U = E_a + I_a R_a + 2 \Delta U_b \approx E_a + I_a R_a$$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad T_{em} = T_2 + T_0$$

$$P_{em} = P_1 - P_{Cua} = T_{em} \Omega = E_a I_a$$

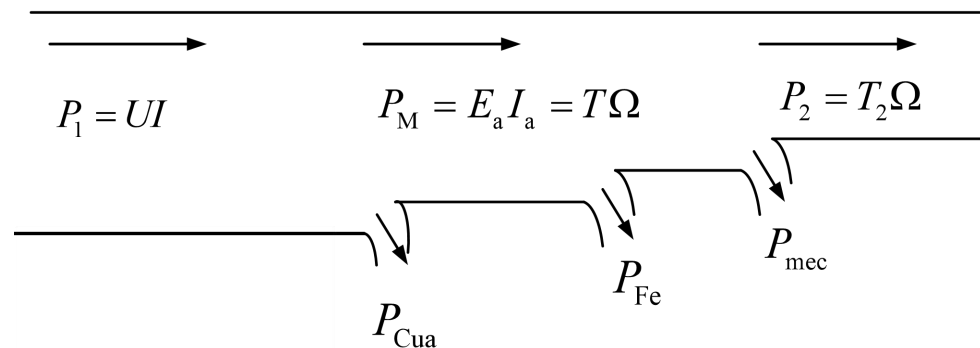
$$P_2 = P_{em} - P_0 = P_{em} - (P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad})$$

工作特性

转速特性 $n = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E \Phi} I_a$

转矩特性 $T_{em} = C_T \Phi_N I_a$

效率特性 $\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + R_a I_a^2}{U_N I_a}$



他励直流电动机的功率流程图

