

# 直流电机的感应电势与电磁转矩

## 一、电枢电动势：

电枢电动势是指直流电机正负电刷之间的感应电动势，也就是电枢绕组里每条并联支路的感应电动势。所以，我们可以先求一根导体的在一个极距范围内所产生的平均电动势，再求一条支路的。

一个磁极极距范围内，平均磁密用  $B_{av}$  表示，极距为  $\tau$ ，电枢的轴向有效长度为  $l$ ，每极磁通为  $\Phi$ ，则



# 感应电动势

如果设 $N$ 为电枢绕组的总导体数， $a$ 为并联支路对数， $B_{av}$ 为一个磁极内的平均磁密， $l$ 为导体的有效长度， $v$ 为导体切割磁场的速度，则电枢电动势为

支路数 感应电动势

$$E_a = \frac{N}{2a} B_{av} l v = \frac{N}{2a} \frac{\Phi}{\tau l} l \times 2p\tau \frac{n}{60} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n$$

即有  $E_a = C_e \Phi n$  式中  $C_e = \frac{pN}{60a}$  称为电动势常数，它是与电机结构有关的参数。

$$E_a = C_e \Phi n$$

$p$ : 极数,  $N$ : 导体数  
 $a$ : 并联支路数.



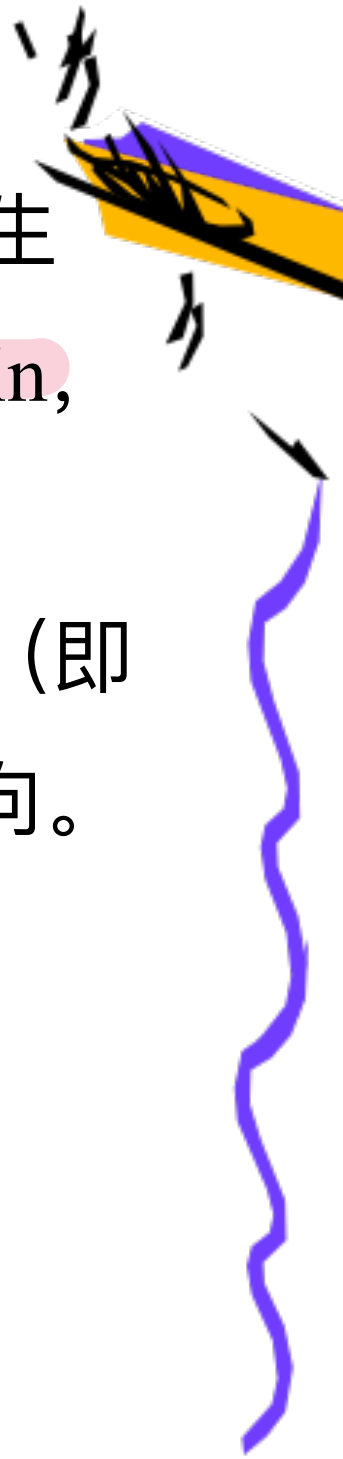
# 分析

①  $E_a \propto \Phi n$ ，改变 $\Phi$ 或 $n$ 的大小，可使 $E_a$ 大小发生变化，当磁通 $F$ 单位为Wb，转速 $n$ 单位为r/min，则电枢电动势 $E_a$ 单位为V；

②  $E_a$ 方向取决于 $F$ 和 $n$ 的方向，改变 $F$ 的方向（即改变励磁电流 $I_f$ 的方向），就可改变 $E_a$ 的方向。

③  $E_a$ 表达式虽然在整距绕组情况下推导出，但对短距、长距也适用。

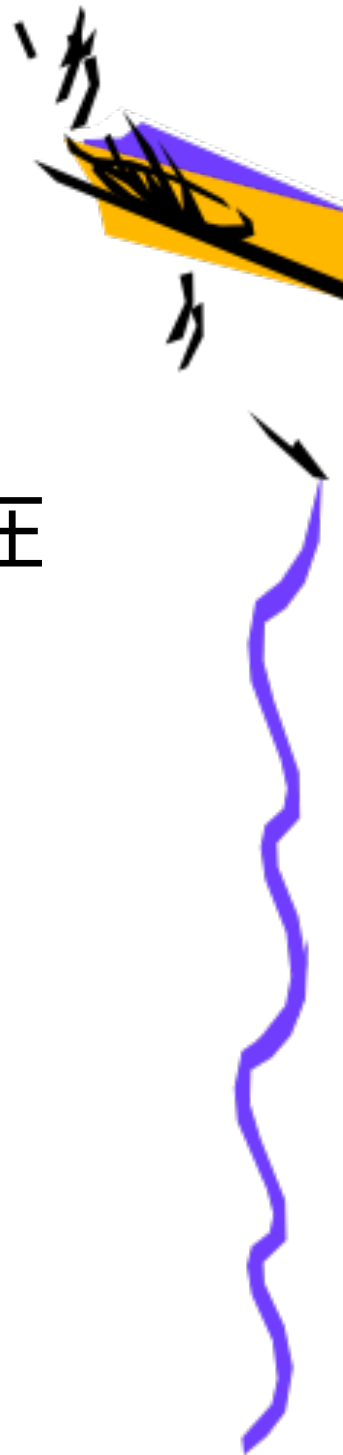
④ 若电刷不在几何中性线时， $E_a$ 将减小。



# 电磁转矩

电磁转矩是指电枢上所有载流导体在  
磁场中受力所形成的转矩的总和。

$$F \times \text{半径}$$



先求一根导体所受的平均电磁力为:

$$f_{av} = B_{av} l i_a$$

式中:  $i_a = \frac{I}{\sum a}$  是导体里流过的电流;

$I_a$  是电枢电流;  $a$  是支路对数

一根导体受的转矩为:

$$T_x = f_{av} \frac{D}{2}$$

刀叉验证



式中

$D$  是电枢的直径.

总电磁转矩用  $T$  表示, 为

$$T = B_{av} L_i \frac{I_a}{2a} N \frac{D}{2}$$

把  $B_{av} = \frac{\Phi}{\tau_i}$  代入上式, 得

$$T = \frac{pN}{2a\pi} \Phi I_a = C_T \Phi I_a$$

$C_T = \frac{pN}{2a\pi}$  为转矩常数

$$C_T = 9.55 C_e$$



分析

$F$  即  $\Phi$

①  $T \propto F I_a$ , 改变  $F$  或  $I_a$  的大小, 可使  $T$  大小发生变化, 当磁通  $F$  单位为 Wb, 电枢电流  $I_a$  单位为 A,

则电磁转矩  $T$  单位为  $N \cdot m$ ;

②  $T$  方向取决于  $F$  和  $I_a$  的方向, 改变  $F$  的方向 (即改变励磁电流  $I_f$  的方向), 就可改变  $T$  的方向。



## 两常数间的关系

电势常数与转矩常数之间的关系式:

$$\frac{C_T}{C_e} = \frac{\frac{pN}{2\pi a}}{\frac{pN}{60a}} = \frac{60}{2\pi} = 9.55$$

所以有

$$C_T = 9.55 C_e$$





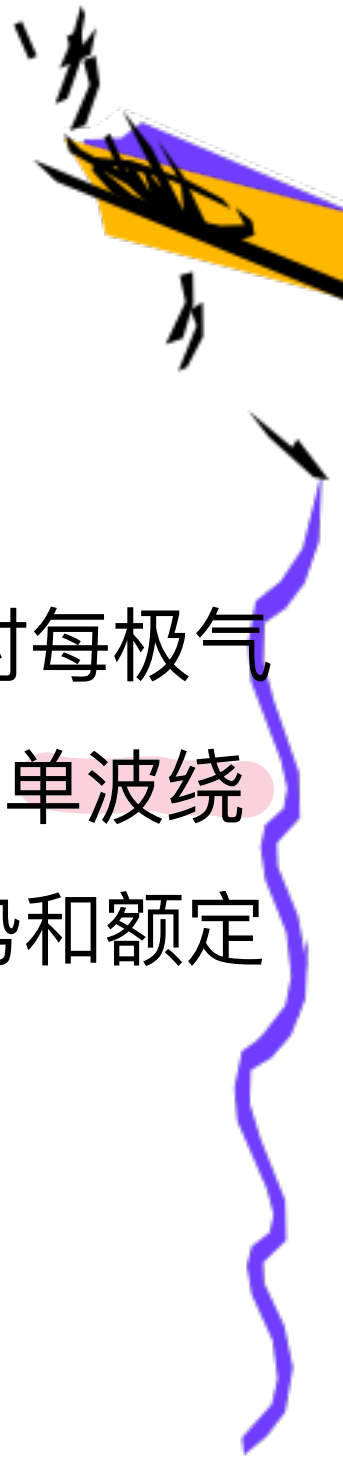
## 直流电机的电磁功率

$$\begin{aligned} P_M &= E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\Omega}{2\pi} I_a \\ &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \Omega = T\Omega \end{aligned}$$



# 【例】

已知某四极他励直流电动机的额定功率  
 $P_N=100\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=330\text{V}$ ，额定转速  
 $n_N=730\text{r/min}$ ，额定效率 $\eta_N=91.5\%$ 额定运行时每极气  
隙磁通 $F_N=6.98\times 10^{-2}\text{Wb}$ ，电机电枢绕组采用单波绕  
组，电枢总导体数 $N=186$ 。求额定感应电动势和额定  
电磁转矩。



# 【例】

解：

(1) 计算额定感应电动势

极对数为  $p=2$ ，支路对数

$\alpha=1$  绕组

电动势常数为

感应电动势为

$$C_e = \frac{pN}{60a} = \frac{2 \times 186}{60 \times 1} = 6.2$$

$$E_a = C_e \Phi_N n = 6.2 \times 6.98 \times 10^{-2} \times 730 = 316V$$

(2) 计算额定电磁转矩

电枢电流为

电磁转矩为

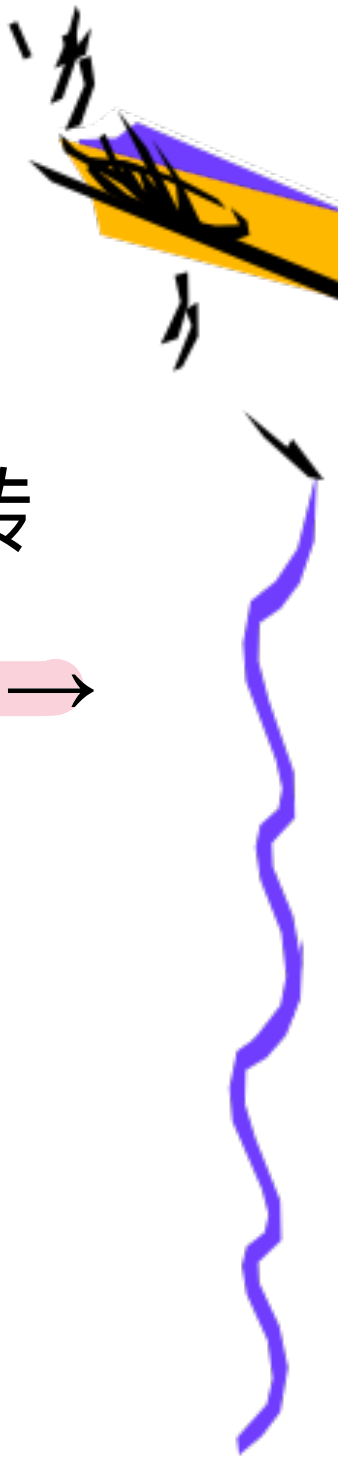
$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{100 \times 10^3}{330 \times 0.915} = 331A$$

$$T_N = C_T \Phi_N I_N = 9.55 \times 6.2 \times 6.98 \times 10^{-2} \times 331 = 1378 N \cdot m$$

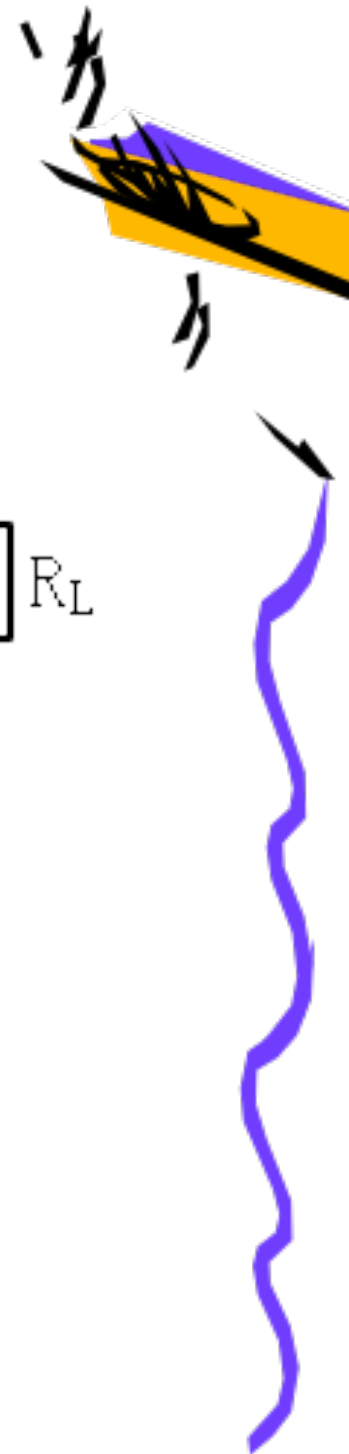
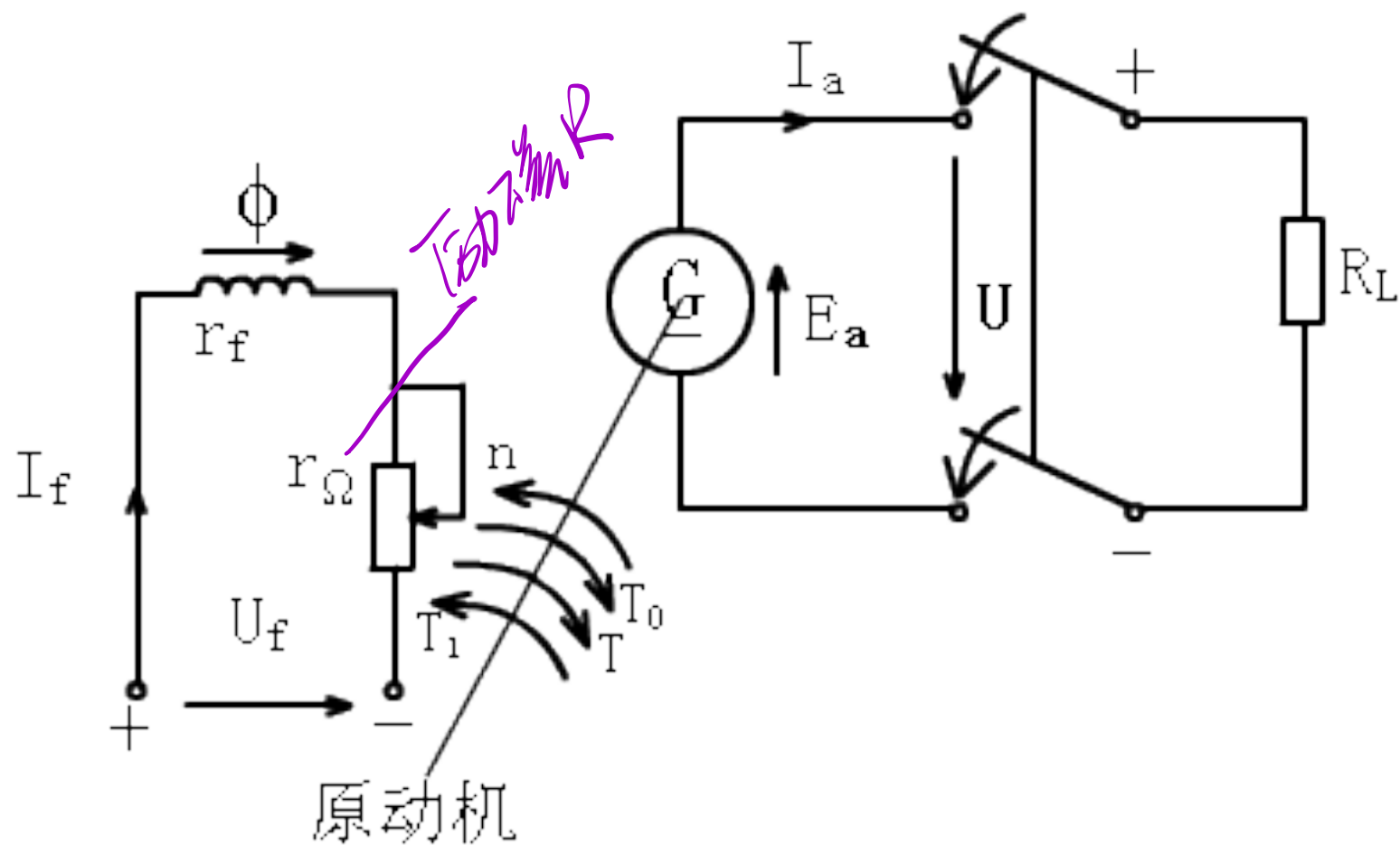


# 直流发电机

直流发电机是将原动机输入的机械能转变为直流电能的电气设备，即：机械能→直流电能。



# 直流发电机惯例



## 电压方程

电枢回路方程为

$$E_a = U + I_a \cdot R_a$$

式中 $R_a$ 为电枢回路总电阻，它包括电刷接触电阻和电枢绕组内阻。

$$\frac{\Delta U}{I}$$

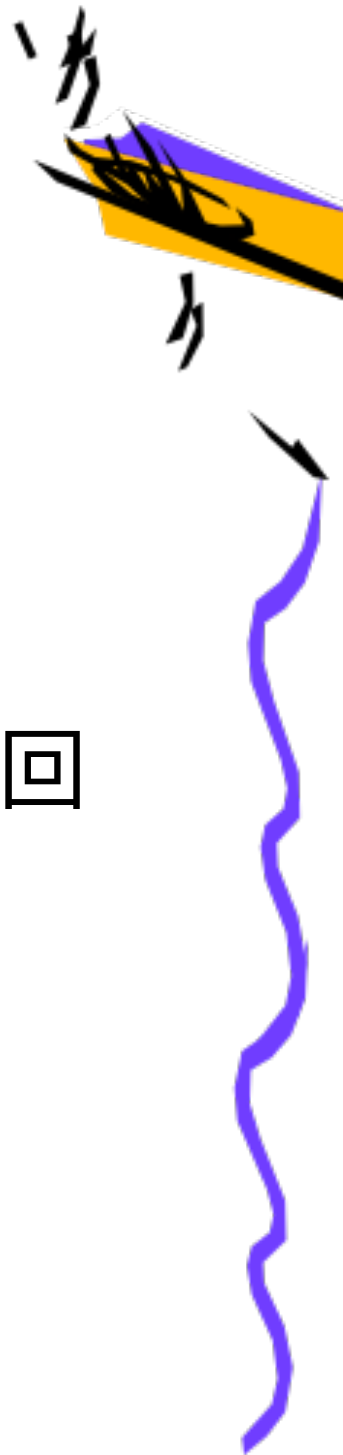


# 励磁回路方程

励磁回路方程为

$$U_f = I_f \cdot R_f$$

式中 $R_f$ 为励磁回路总电阻，它包括励磁回路外串电阻和励磁绕组内阻。



# 转矩方程

当发电机处于恒定转速运行时，转矩平衡方程式为

$$T_1 = T + T_0$$

式中， $T_1$ 为原动机的拖动转矩； $T$ 为发电机中产生的电磁转矩，其性质为制动转矩； $T_0$ 为空载转矩，它由电机的机械摩擦和铁损引起的转矩。

发电机的转向由原动机决定， $T_1 > T$ ，故电磁转矩为制动转矩，是阻碍原动机的阻力矩。



与T1方向相反



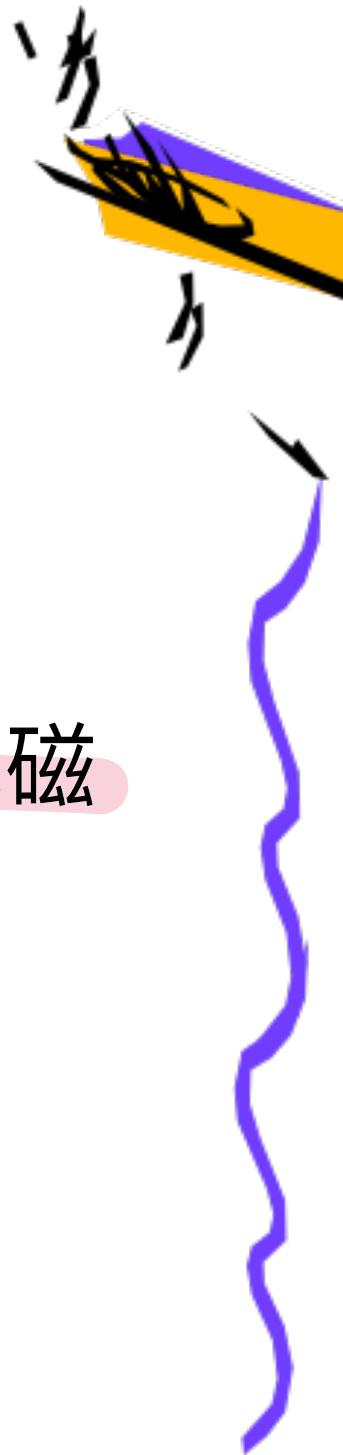


# 功率平衡关系

从原动机输入的机械功率为

$$P_1 = P_{em} + p_0$$

式中， $P_1$ 为输入的机械功率； $P_{em}$ 为电磁功  
率； $p_0$ 为空载损耗。

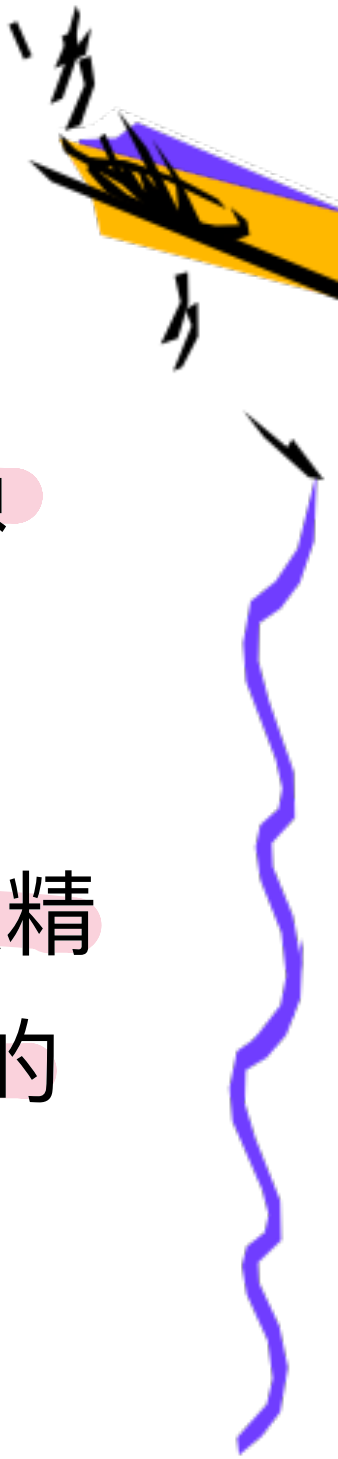


## 功率平衡关系

空载损耗等于铁损 $p_{Fe}$ 、机械摩擦损耗 $p_m$ 、附加损耗 $p_{ad}$ ，即有

$$p_0 = p_{Fe} + p_m + p_{ad}$$

其中附加损耗又称杂散损耗，一般难以精确计算。靠经验估算约为额定功率 $P_N$ 的0.5%~1%。



电磁功率为

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

从中可见电磁功率可表示为

$$P_{em} = T\Omega$$

上式说明电磁功率具有机械功率性质。

电磁功率又可表示为

$$P_{em} = E_a I_a$$

此表达式说明电磁功率又具有电功率性质，所以电磁功率是机电能量转换的桥梁。



发电机输出的电功率为

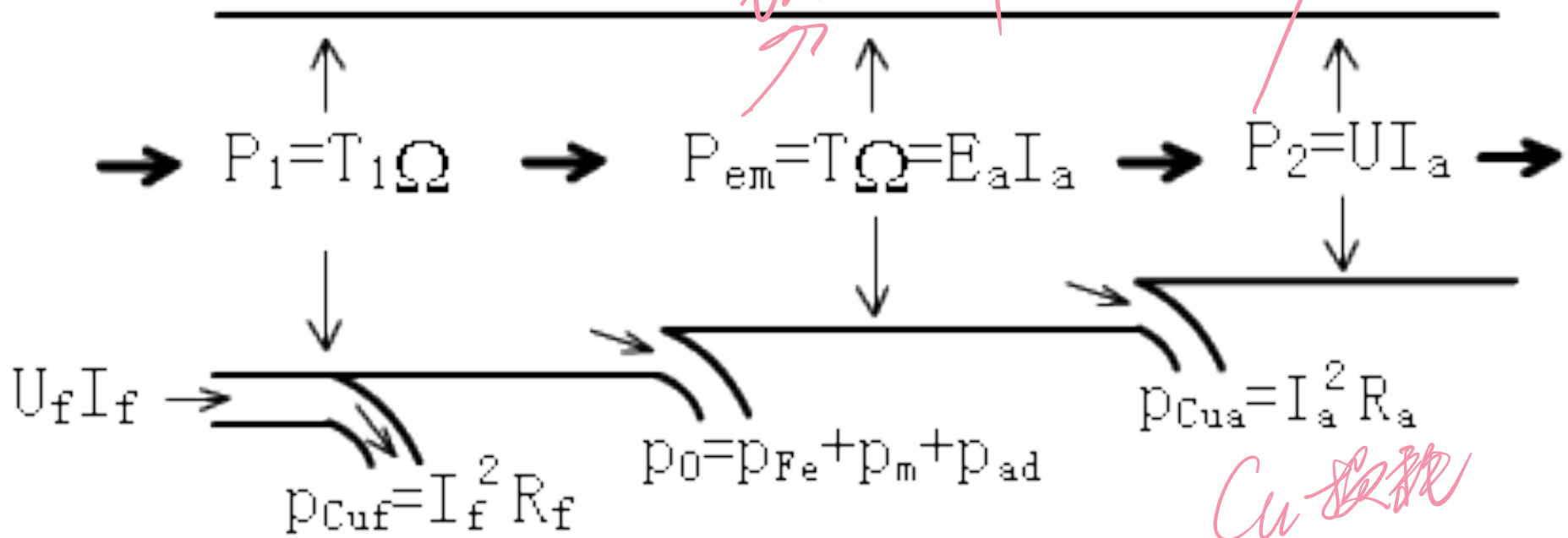
$$P_2 = P_{em} - p_{Cua}$$

式中 $p_{Cua}$ 为电枢回路铜耗； $P_2$ 为输出的电功率，

同时输出功率又可表示为

$$P_2 = UI_a$$





$$P_2 = P_1 - P_{em} - P_o - P_{cua}$$

$\Omega$ : 角速度

# 效率

他励直流发电机的总损耗为

$$\Sigma p = p_{Fe} + p_m + p_{ad} + p_{Cua}$$

即有

$$\Sigma p = p_0 + p_{Cua}$$

效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}$$

实际  
总

即有

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}$$

可变损耗与不变损耗相等，效率最高  $P_0 = I_a^2 R_a$



# 直流电动机

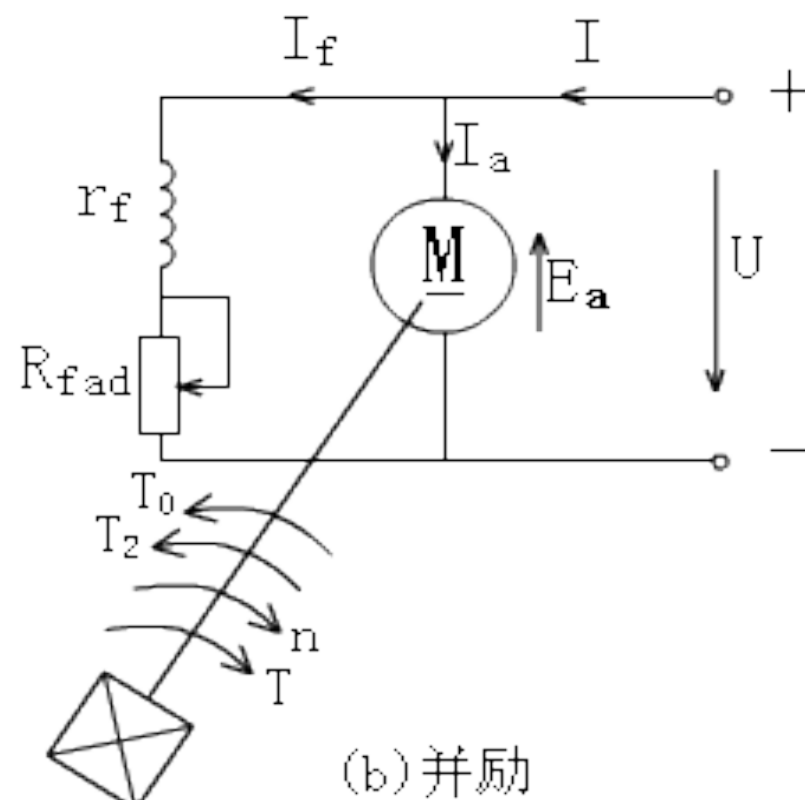
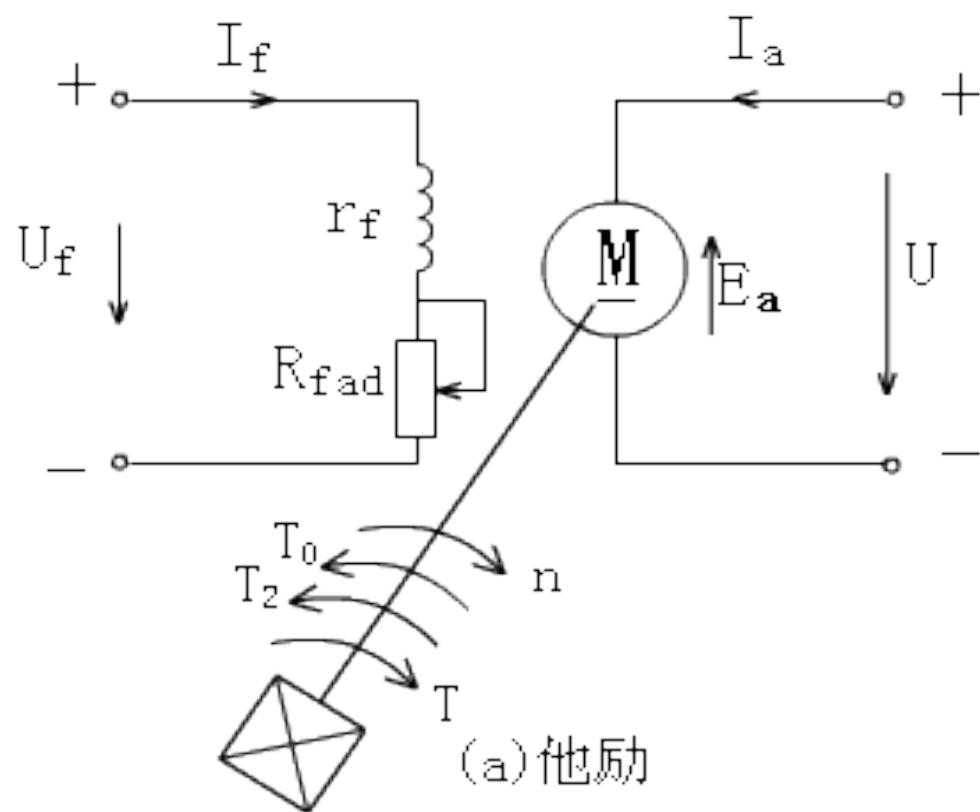
直流电动机是将输入的直流电能转  
变为机械能的电气设备，

即有：

直流电能→机械能。



# 电动机惯例





# 电压方程

他励时有： $I=I_a$ ；并励时有： $I=I_a+I_f$ 。

电枢回路电压方程式为

$$U=E_a+I_a\cdot R_a$$

其中反电动势 $E_a=C_e\Phi\cdot n$ ，若为并励时，还存在

$$U=I_f(r_f+R_{fad})=I_f\cdot R_f$$

由于 $R_a$ 很小，电枢回路上电阻压降很小，电源电压大部分降落在反电动势 $E_a$ 上。



# 转矩方程

电动机空载时，轴上输出转矩 $T_2=0$ ，则有

$$T=T_0$$

当负载转矩为 $T_L$ ，轴上输出有 $T_2=T_L$ ，电动机匀速稳定运行时有

$$T=T_2+T_0$$

其中电磁转矩为拖动性质转矩，可用公式 $T=C_T\Phi I_a$ 计算， $(T_2+T_0)$ 为总的阻转矩，方向与 $T$ 相反。



# 功率平衡关系

他励直流电动机输入功率为

$$P_1 = UI = UI_a = (E_a + I_a R_a) I_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu}$$

式中电磁功率 $P_{em}$ 的功率性质为电功率， $p_{Cu} = I_a^2 R_a$ 为电枢回路上的铜耗。



# 功率流程图

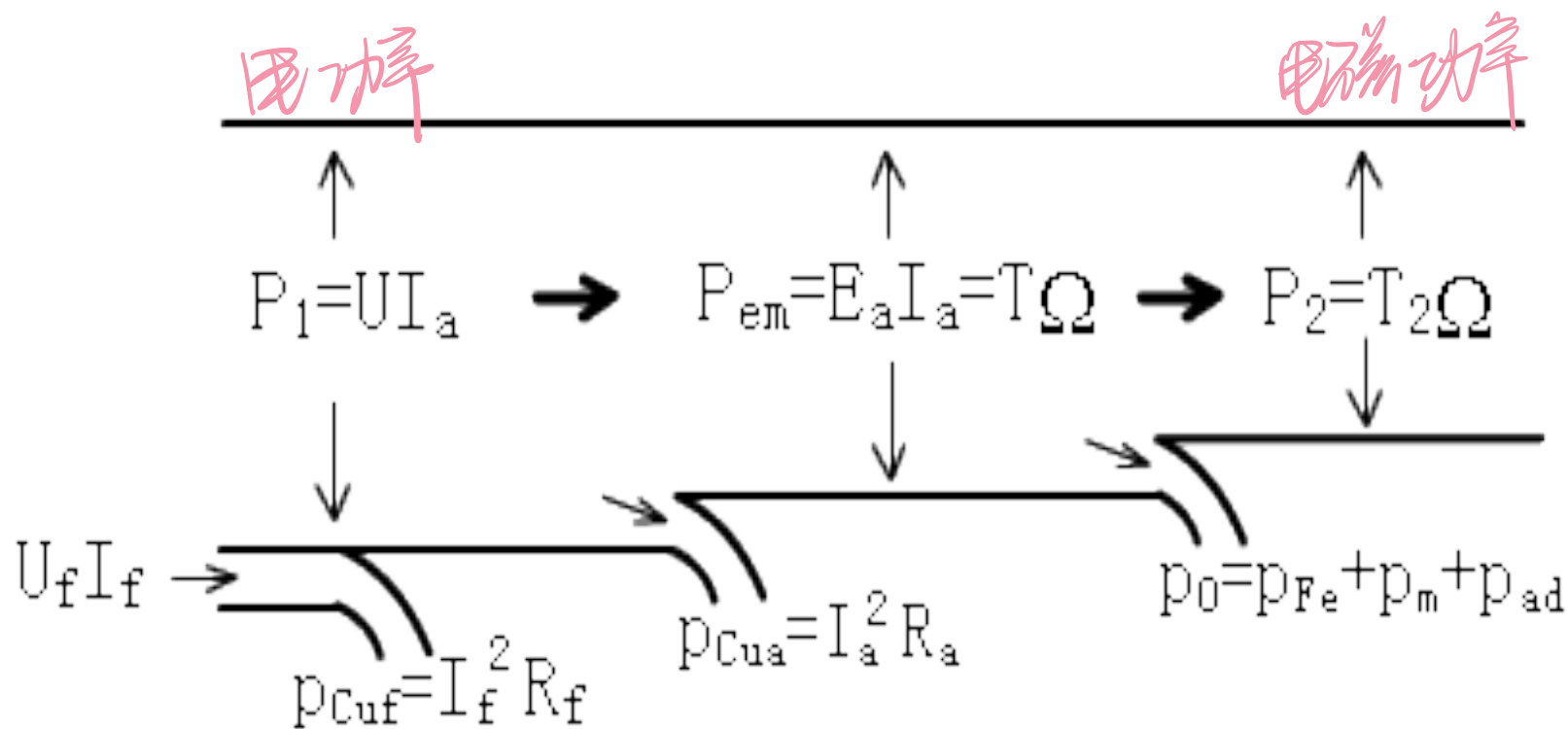


图1-34他励直流电动机功率流程图



$$U = E \pm I_a R_a$$

电动机 +

发电机 -

## 【例】

一台并励直流发电机数据为  $P_N=82\text{kW}$ ,  $U_N=230\text{V}$ ,  $n_N=970\text{r/min}$ , 电枢绕组总电阻  $R_a=0.0259\ \Omega$ , 并励绕组内阻  $r_f=22.8\ \Omega$ , 额定负载时, 并励回路串入的调节电阻  $R_{f\Omega}=3.5\ \Omega$ , 一对电刷压降  $2\Delta U=2\text{V}$ ,  $p_{Fe}+p_m=2.5\text{kW}$ , 附加损耗  $p_{ad}=0.005P_N$ , 试求额定负载时, 发电机的输入功率、电磁功率、电磁转矩和效率。

电磁功率 = 电磁转矩 = 电枢功率

不考虑电枢反应

$$\frac{C_e \phi_n}{C_e \phi_m} = \frac{U}{U_N}$$