

第八章 直流发电机

8-1 概 述

8-2 直流发电机的基本方程式

8-3 直流电机的电枢反应

8-4 直流发电机的运行特性

小 结

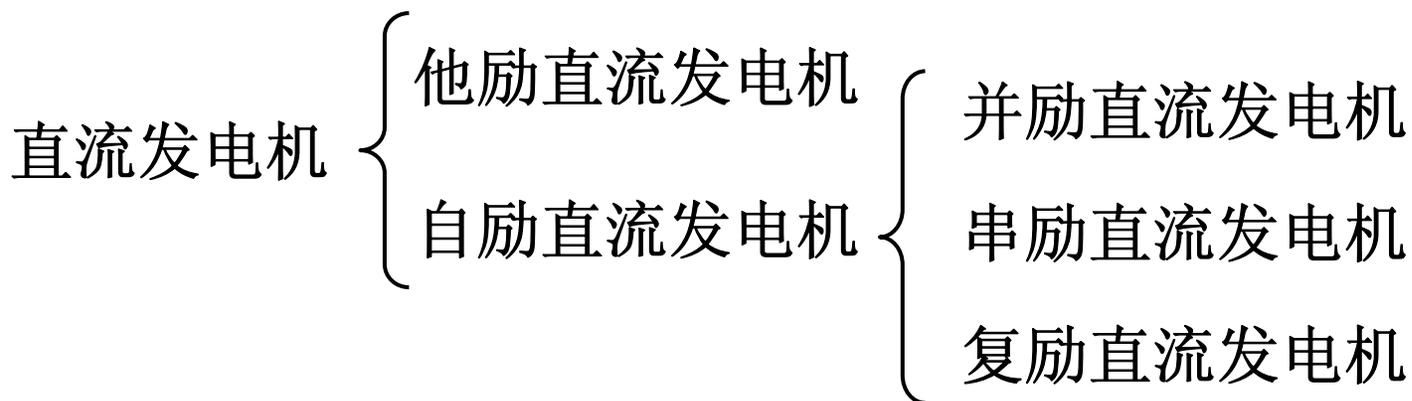
第八章 直流发电机

■基本要求:

- 1.掌握直流发电机的基本方程式，并会利用这些方程式进行计算。
- 2.掌握电枢反应的概念，了解电枢反应的性质。
- 3.了解各种励磁方式的直流发电机外特性曲线的形状，以及影响电压变动的因素。
- 4.掌握并励直流发电机自励建压的条件。

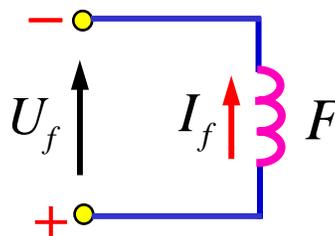
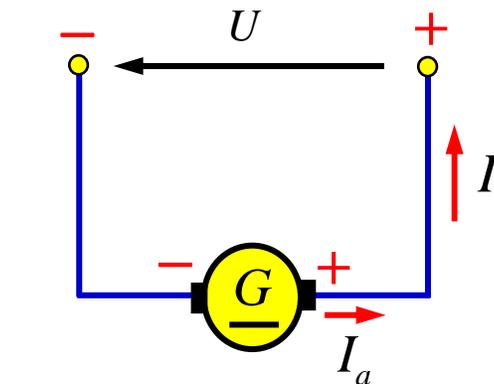
8-1 概述

- **励磁磁场**：励磁绕组通以直流电流建立的磁场，也称为主磁场。
- **励磁方式**：励磁绕组的供电方式。
- 直流电机的励磁方式不同时，其运行特性有很大差别。



1.他励直流发电机

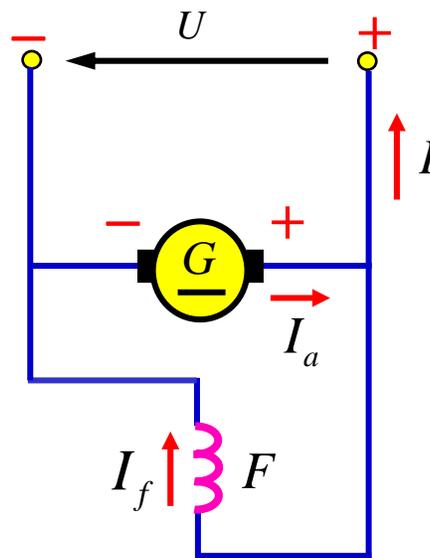
$$I_a = I$$



2.自励直流发电机

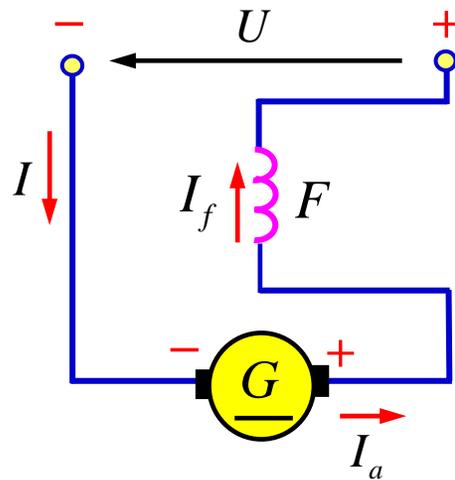
1) 并励直流发电机

$$I_a = I + I_f$$

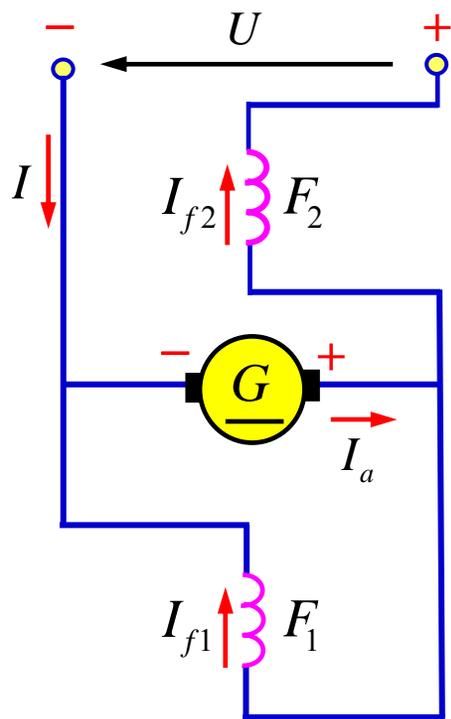


2) 串励直流发电机

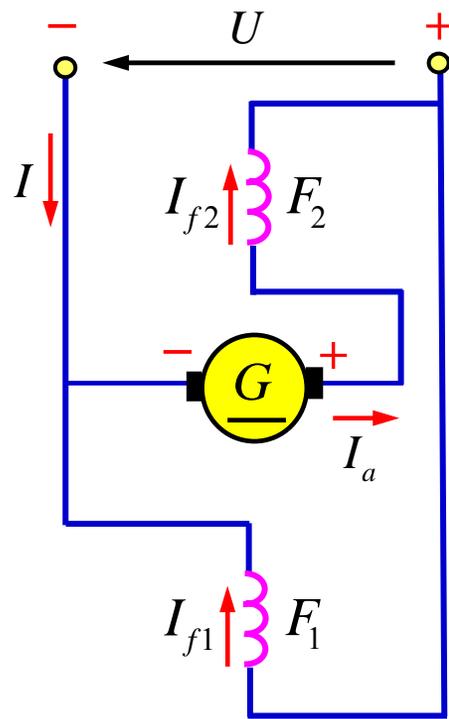
$$I_a = I_f = I$$



3) 复励直流发电机



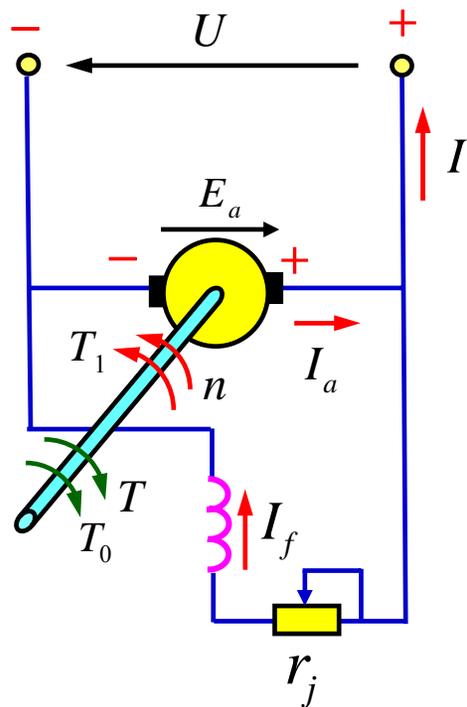
短复励直流发电机



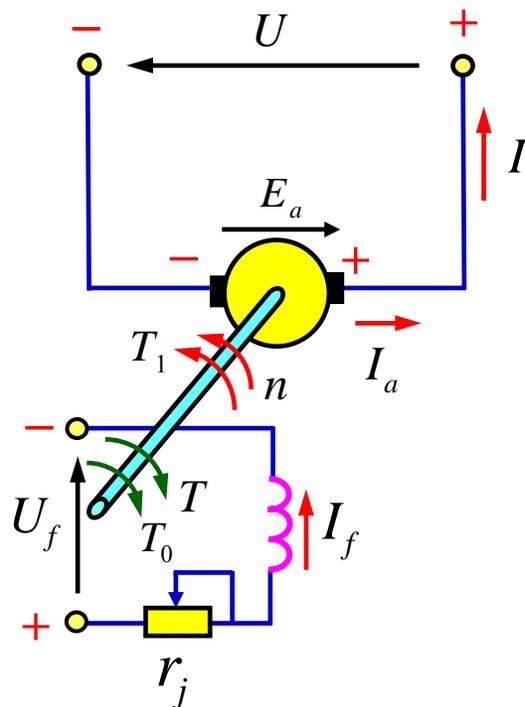
长复励直流发电机

8-2 直流发电机的基本方程式

- **基本方程式：**（1）电压方程式；（2）转矩平衡方程式；（3）功率平衡方程式。
- 各物理量的正方向按发电机惯例规定。



并励直流发电机原理



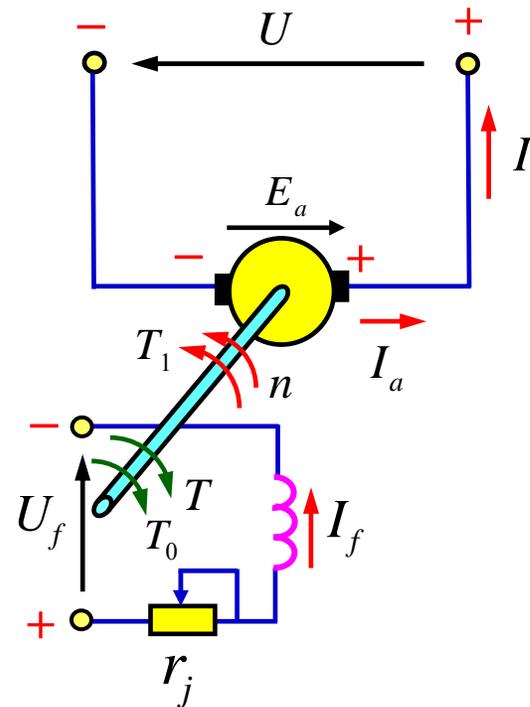
他励直流发电机原理

1.电压方程式

1) 他励直流发电机 $I_a = I$

电枢回路的电压方程式:

$$E_a = U + I_a R_{a\Sigma} + \Delta U_b$$
$$= U + I_a R_a$$



式中, $R_{a\Sigma}$ 为串联于电枢回路中的各种绕组的总电阻;

ΔU_b 为一对电刷上的接触电压降;

R_a 为电枢回路的总电阻, $R_a = R_{a\Sigma} + \frac{\Delta U_b}{I_a}$ 。

$$E_a = U + I_a R_a$$

■ 直流发电机: $E_a > U$

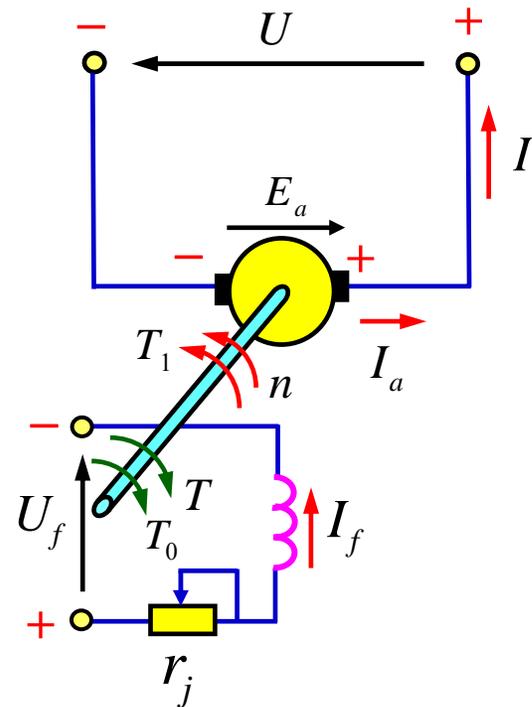
励磁回路的电压方程式:

$$U_f = I_f (r_f + r_j) = I_f R_f$$

式中, $R_f = r_f + r_j$ — 励磁回路的总电阻;

r_f — 励磁绕组本身的电阻;

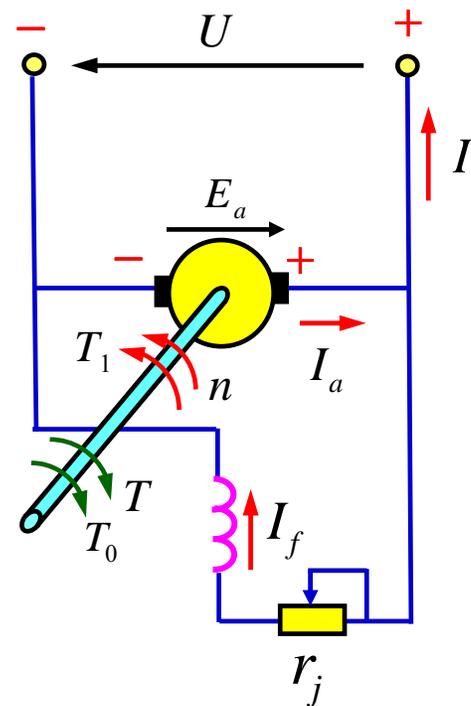
r_j — 励磁绕组的调节电阻。



2) 并励直流发电机

$$U_f = U$$

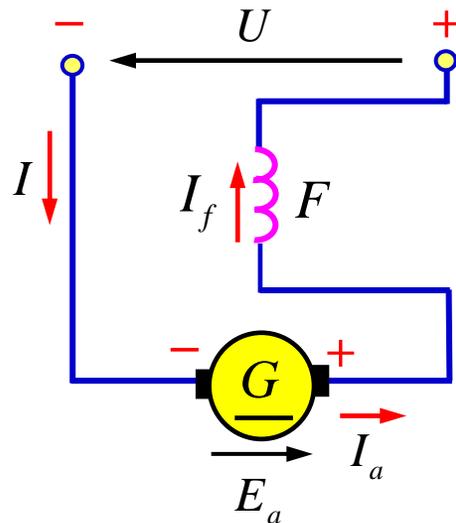
$$I_a = I + I_f$$



3) 串励直流发电机

$$I_a = I = I_f$$

注意：电枢回路的电压方程式中应加入串励绕组的电阻压降。



2. 转矩平衡方程式

作用在直流发电机转轴上的转矩：

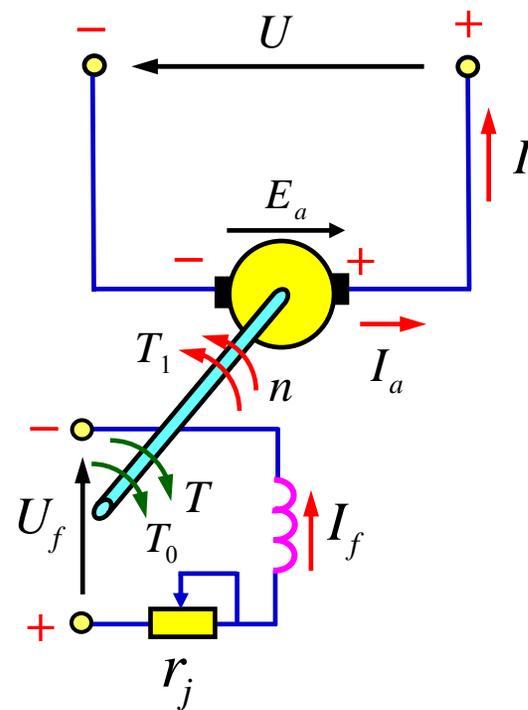
- 原动机输入给发电机的驱动转矩 T_1 ；
- 电磁转矩 T ；
- 机械摩擦及铁耗引起的空载转矩 T_0 。

} 制动转矩

电磁转矩： $T = C_t \Phi I_a$

稳态运行时的转矩平衡方程式：

$$T_1 = T + T_0$$



3. 电磁功率和功率平衡方程式

1) 电磁功率

$$E_a = \frac{pZ}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad T = \frac{pZ}{2\pi a} \Phi I_a = C_t \Phi I_a$$

$$\rightarrow E_a I_a = \frac{pZ}{60a} \Phi n \cdot I_a = \frac{pZ}{2\pi a} \Phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60} = T \Omega$$

电磁功率 $P_M = E_a I_a = T \Omega$

■ **物理意义**：直流发电机转子旋转时克服制动性质的电磁转矩 T 所消耗的机械功率 $T\Omega$ 转换为等量的电枢回路中的电功率 $E_a I_a$ 。

2) 功率平衡方程式

• 并励直流发电机

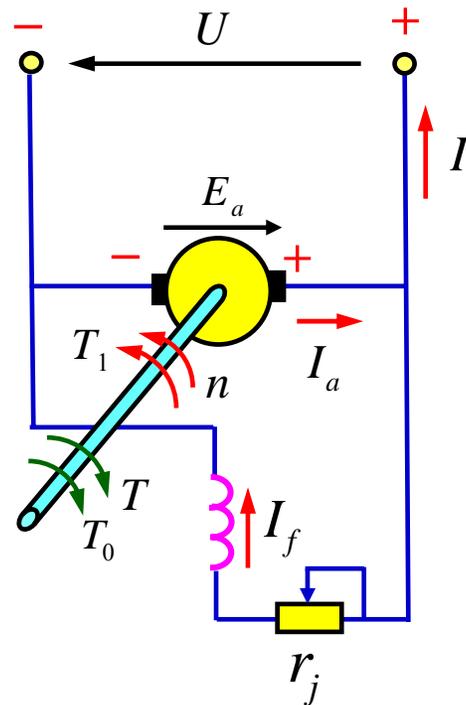
$$T_1 = T + T_0 \Rightarrow T_1 \Omega = T \Omega + T_0 \Omega$$

$$\text{即 } P_1 = P_M + p_0$$

式中, $P_1 = T_1 \Omega$ — 直流发电机的输入功率;

p_0 — 直流发电机的空载损耗, $p_0 = p_m + p_{Fe} + p_a$;

p_a — 直流电机的附加损耗, 国家标准规定有补偿绕组的按 P_N 的**0.5%**, 无补偿绕组的按 P_N 的**1%**估算。



• 并励直流发电机

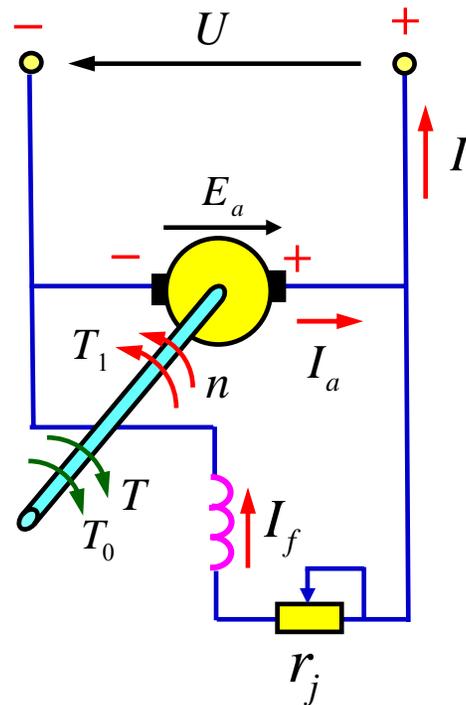
$$\left. \begin{aligned} P_M &= E_a I_a \\ E_a &= U + I_a R_a \\ I_a &= I + I_f \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow P_M &= UI + UI_f + I_a^2 R_a \\ &= P_2 + p_f + P_{cu} \end{aligned}$$

式中， $P_2 = UI$ — 直流发电机的输出功率；

$p_f = UI_f$ — 直流电机的励磁损耗；

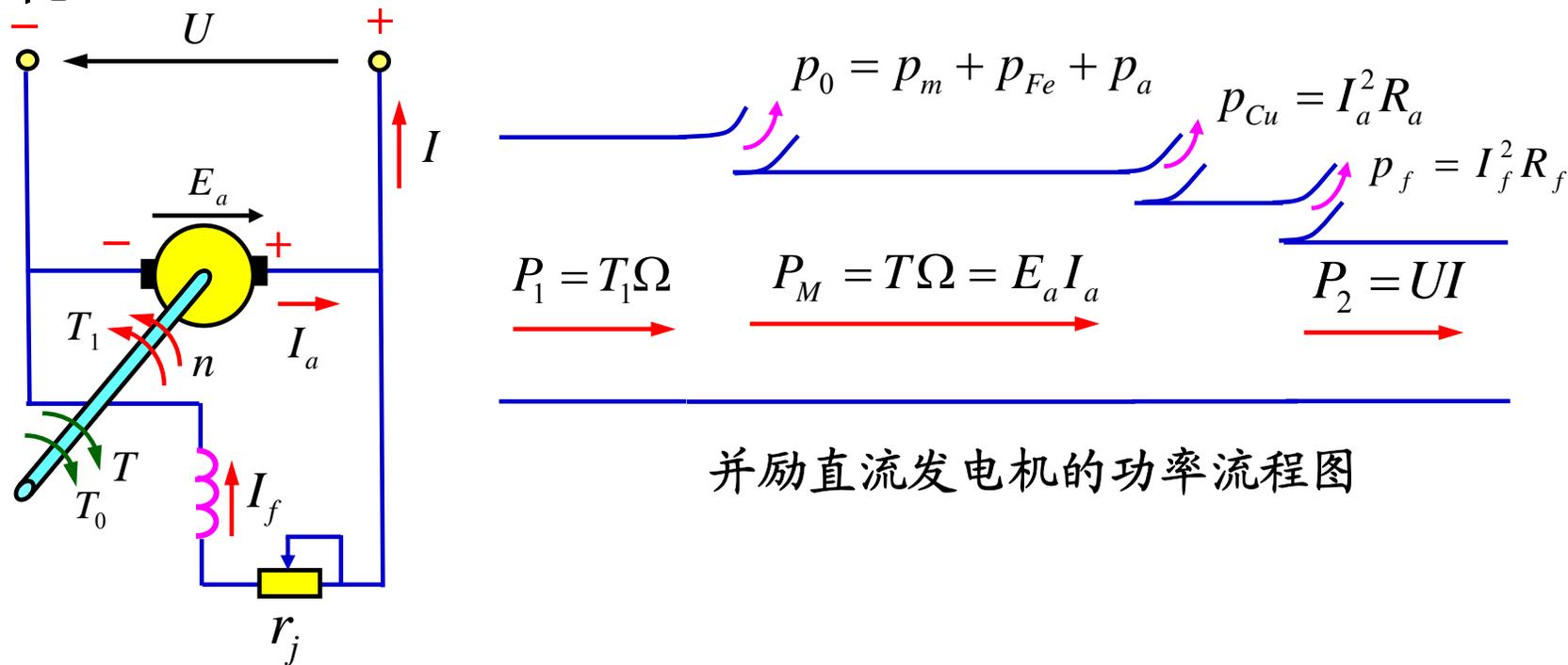
$P_{Cu} = I_a^2 R_a$ — 电枢回路的铜耗。



• 并励直流发电机

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_M + p_0 \\ P_M &= P_2 + p_f + p_{cu} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} P_1 &= P_2 + p_{cu} + p_f + p_m + p_{Fe} + p_a \\ &= P_2 + \sum p \end{aligned}$$

式中， $\sum p = p_{cu} + p_f + p_m + p_{Fe} + p_a$ — 并励直流发电机的总损耗。



并励直流发电机的功率流程图

• 他励直流发电机

$$P_1 = P_M + p_0$$

$$P_M = E_a I_a = (U + I_a R_a) I_a$$

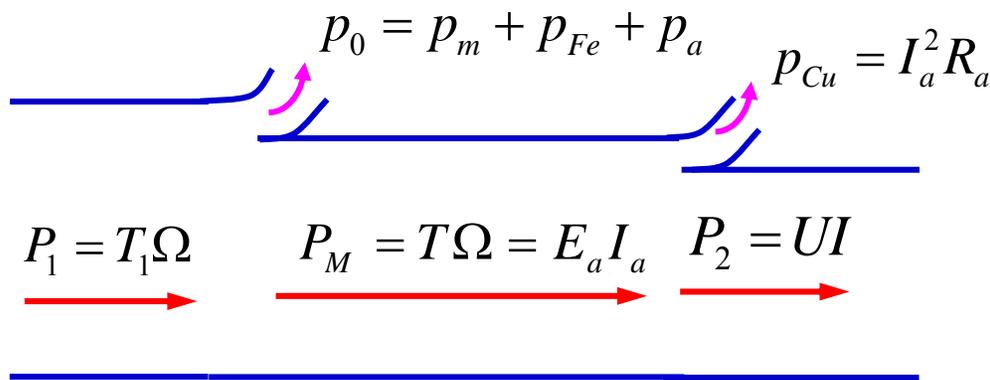
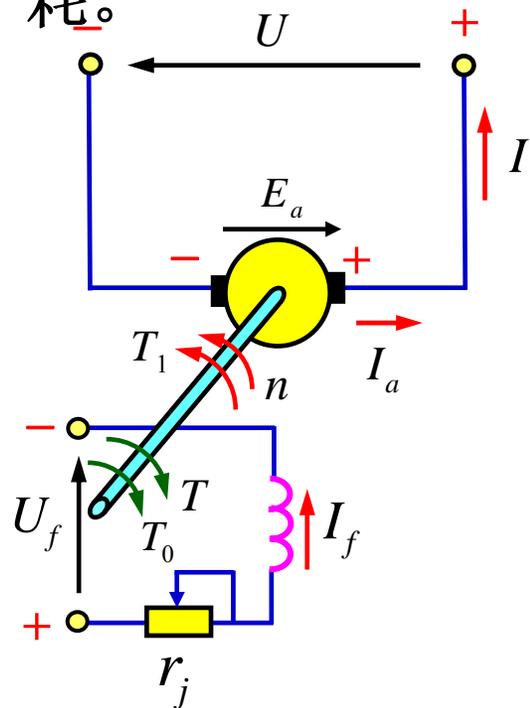
$$= UI + I_a^2 R_a = P_2 + p_{cu}$$

$$\rightarrow P_1 = P_2 + p_{cu} + p_m + p_{Fe} + p_a$$

$$= P_2 + \sum p$$

式中， $\sum p = p_{cu} + p_m + p_{Fe} + p_a$
耗。

— 他励直流发电机的总损耗



他励直流发电机的功率流程图

例 8-1 一台并励直流发电机， $P_N=82\text{kW}$ ， $U_N=230\text{V}$ ， $n_N=970\text{r/min}$ ，电枢回路的总电阻 $R_a=0.0259\Omega$ ，并励绕组的内阻 $r_f=22.8\Omega$ ，一对电刷上的压降 $2\Delta U=2\text{V}$ ，额定负载时，励磁回路串入的调节电阻 $r_j=3.5\Omega$ ， $p_{Fe}+p_m=2.5\text{kW}$ ，附加损耗 $p_a=0.005P_N$ ，求额定负载时的电磁功率、电磁转矩、输入功率和效率。

解：额定励磁电流
$$I_{fN} = \frac{U_N}{r_f + r_j} = \frac{230}{22.8 + 3.5} = 8.75(\text{A})$$

额定电流
$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{82 \times 10^3}{230} = 356.52(\text{A})$$

额定电枢电流
$$I_{aN} = I_N + I_{fN} = 356.52 + 8.75 = 365.27(\text{A})$$

额定负载时的电枢电动势

$$E_{aN} = U_N + I_{aN}R_a + 2\Delta U = 230 + 365.27 \times 0.0259 + 2 = 241.5(\text{V})$$

额定负载时的电磁功率

$$P_{MN} = E_{aN}I_{aN} = 241.5 \times 365.27 = 88213(\text{W}) = 88.213(\text{kW})$$

电磁转矩

$$T_N = 9.55 \frac{P_{MN}}{n_N} = 9.55 \times \frac{88213}{970} = 868.5(\text{N} \cdot \text{m})$$

输入功率

$$P_1 = P_{MN} + p_{Fe} + p_m + p_a$$
$$= 88.213 + 2.5 + 0.005 \times 82 = 91.123(\text{kW})$$

效率

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{82}{91.123} \times 100\% = 89.99\%$$

8-3 直流电机的电枢反应

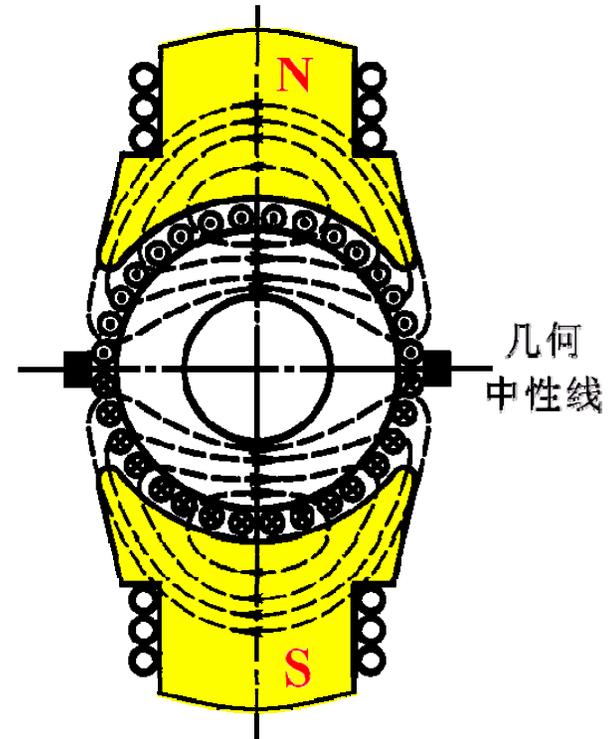
- **电枢磁场：** 电枢电流产生的磁场。
- **电枢反应：** 电枢磁动势对励磁磁场的影响。

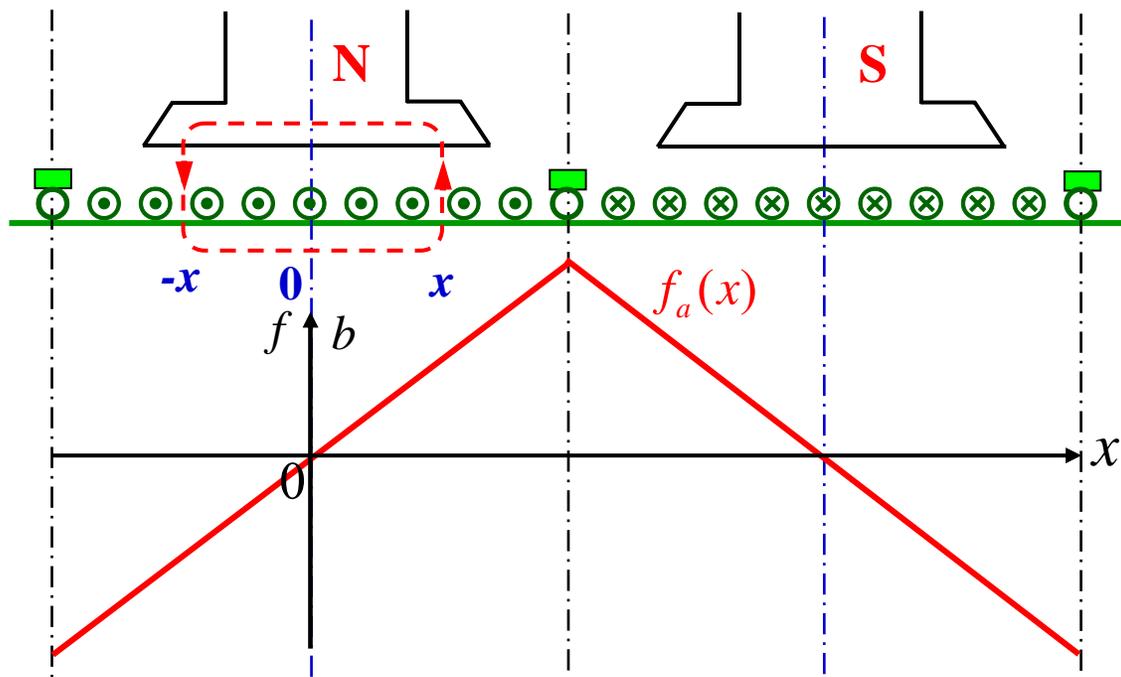
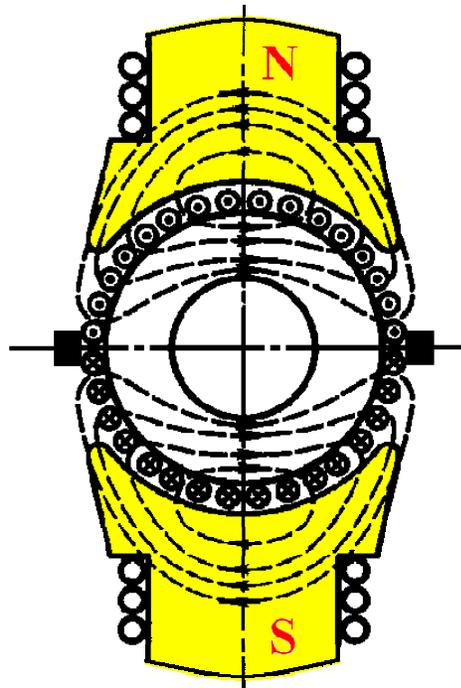
1. 电枢磁动势的空间分布

1) 电刷在几何中性线上

在电枢表面被电刷短路的元件边在电枢的几何中性线上。

规定磁动势的正方向： 磁力线从电枢指向磁极为正，反之为负。

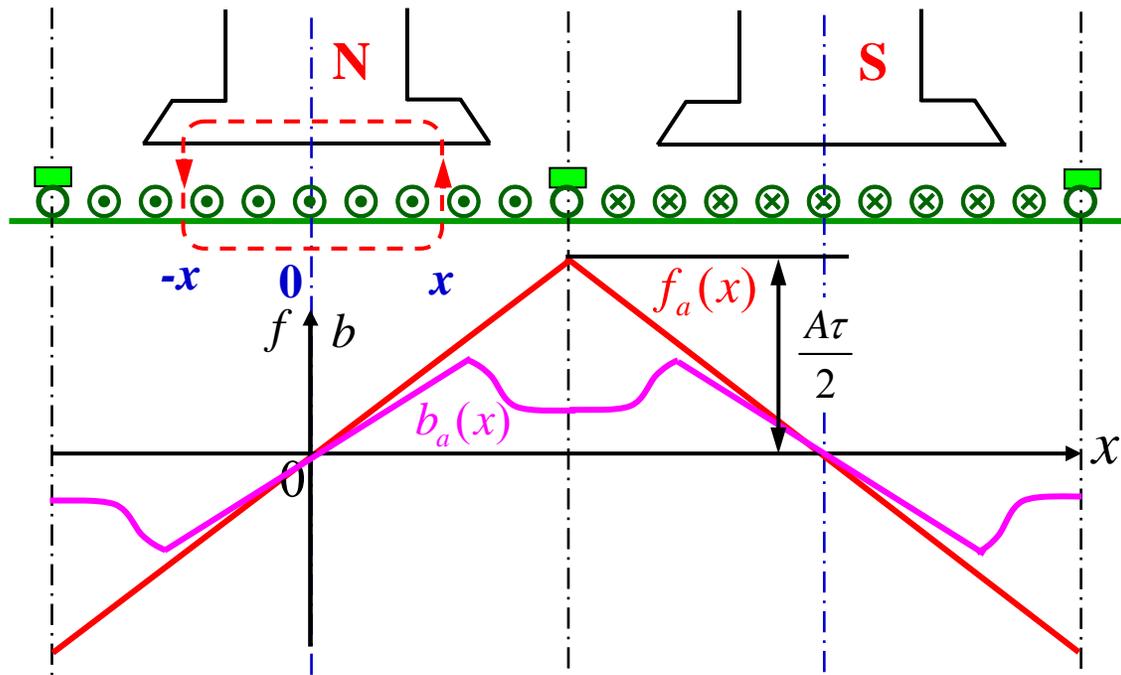
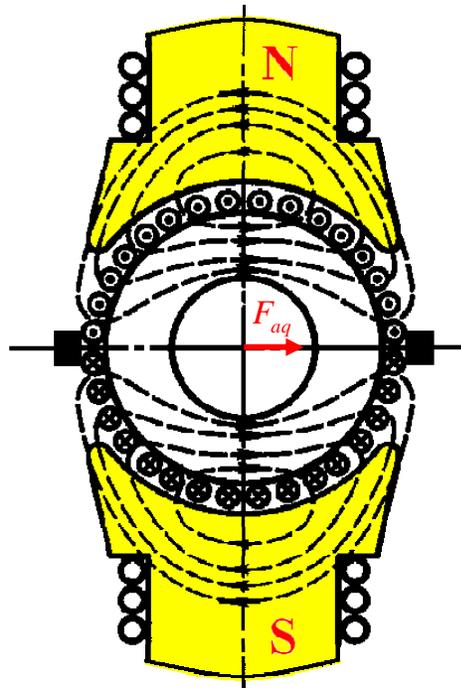




取原点 o 在主极轴线与电枢表面的交点处，则当磁路不饱和时，在距原点 x 处每个气隙的电枢磁动势为

$$f_a(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{2x}{2p\tau} Zi_a \right) = \frac{Zi_a}{2p\tau} x = Ax[A] \quad -\frac{\tau}{2} \leq x \leq \frac{\tau}{2}$$

式中， A —电枢的线负荷(A/m)， $A = \frac{Zi_a}{2p\tau}$ 。



电刷位于几何中性线上时的电枢磁动势为**交轴电枢磁动势**

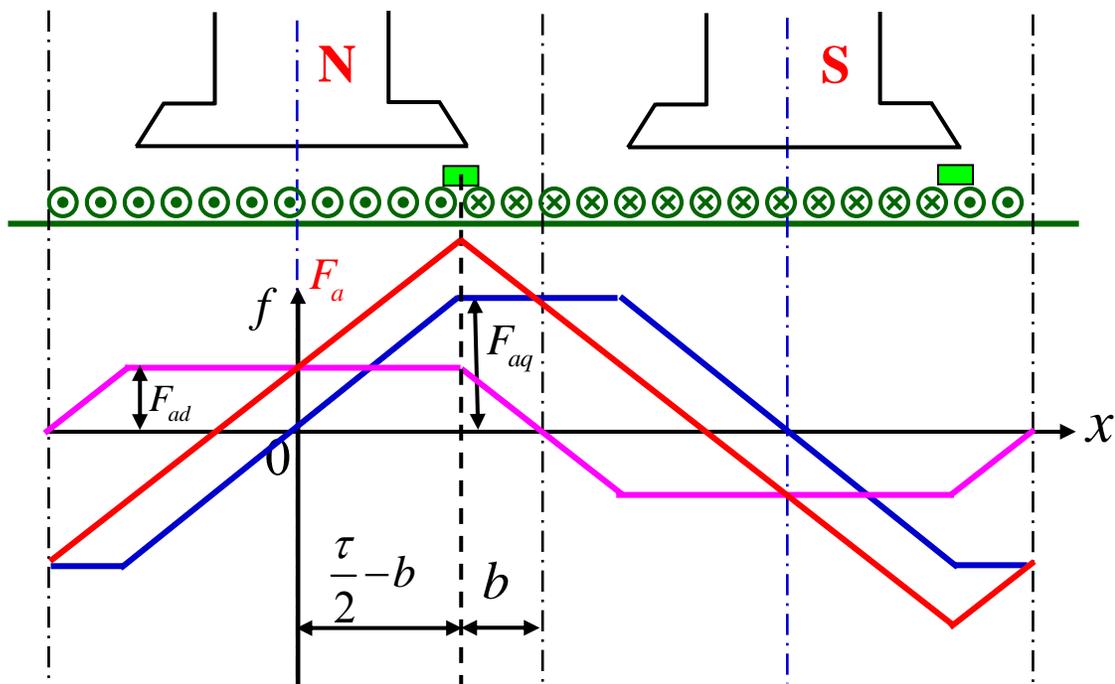
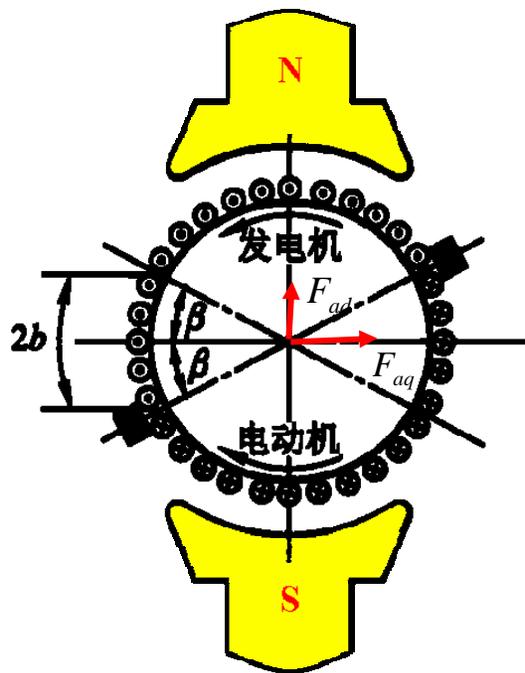
。

在几何中性线处，电枢磁动势达到最大值，即

$$F_{aq} = F_a = \frac{1}{2} A\tau [A]$$

电枢磁密
$$b_a(x) = \mu_0 H_a(x) = \mu_0 \frac{f_a(x)}{\delta(x)} = \mu_0 \frac{Ax}{\delta(x)}$$

2) 电刷不在几何中性线上

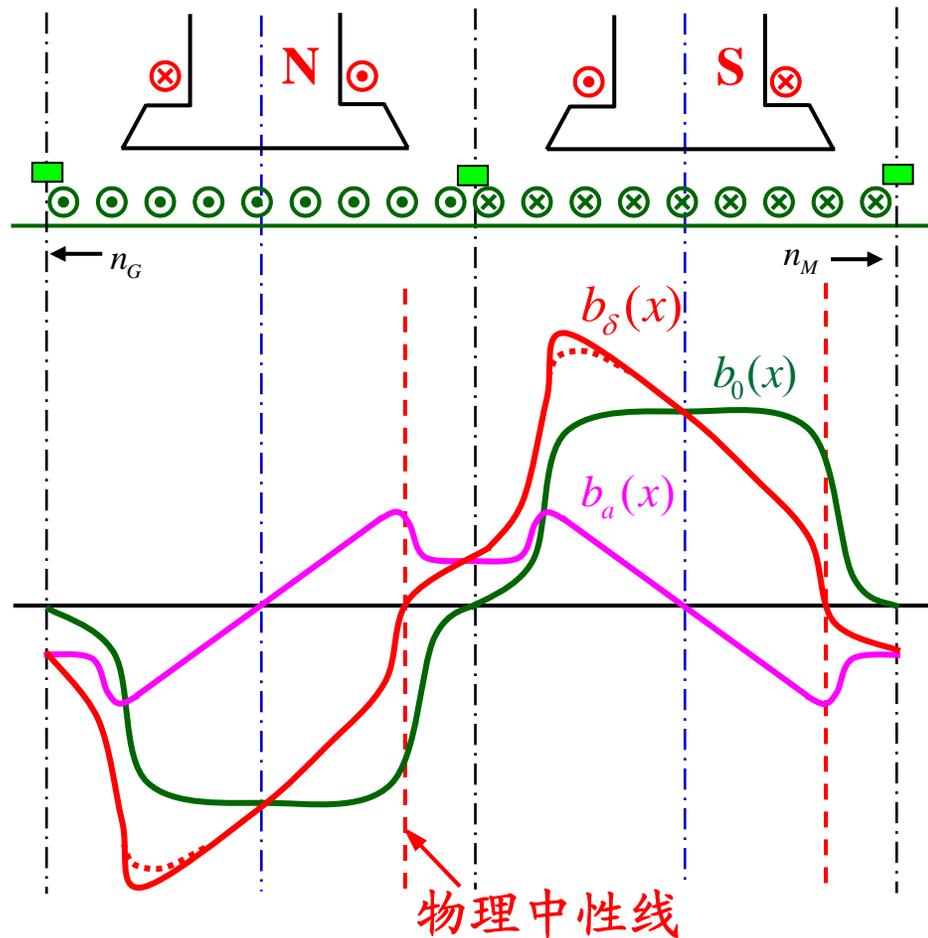
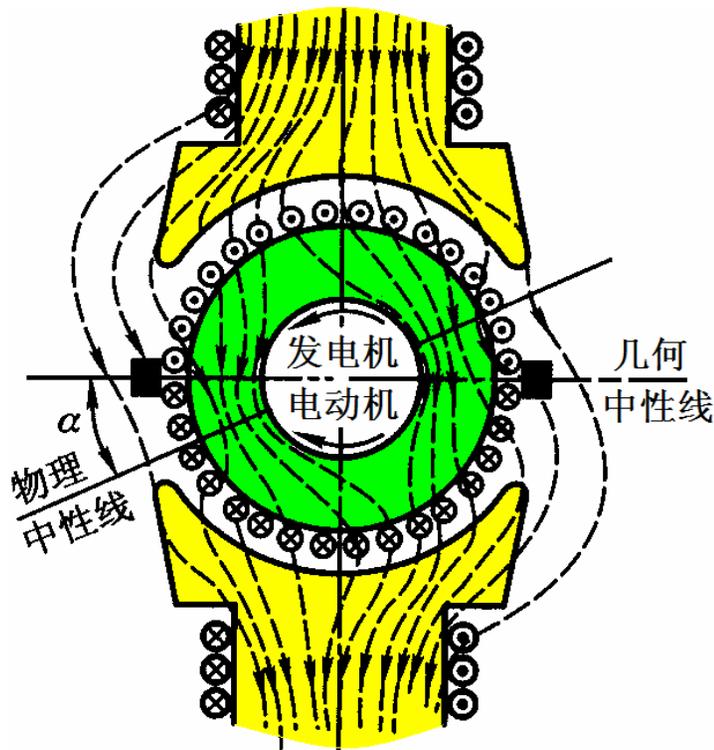


电刷偏离几何中性线时，电枢磁动势可分解成交轴电枢磁动势和直轴电枢磁动势。

- 交轴电枢磁动势的最大值 $F_{aq} = F_a \frac{\tau - 2b}{\tau} = A \left(\frac{\tau}{2} - b \right) [A]$
- 直轴电枢磁动势的最大值 $F_{ad} = F_a \frac{2b}{\tau} = Ab [A]$

2.直流电机的电枢反应

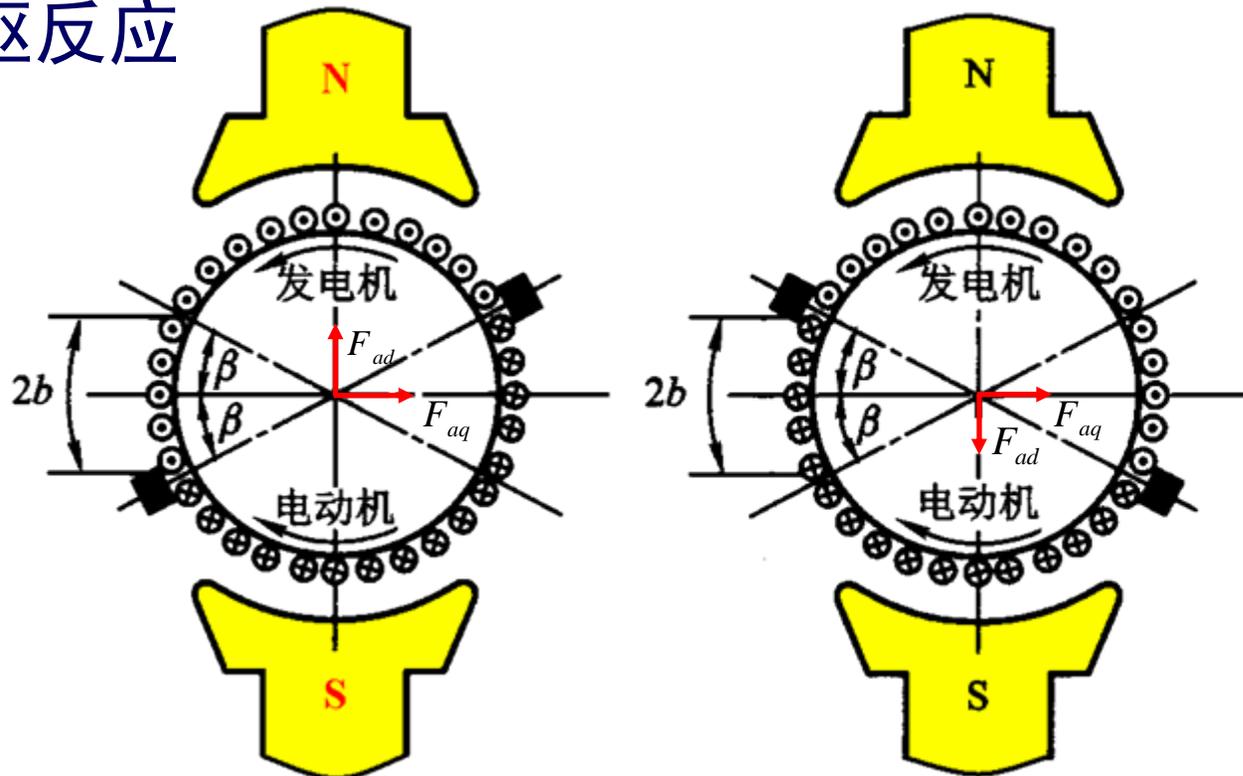
1) 交轴电枢反应



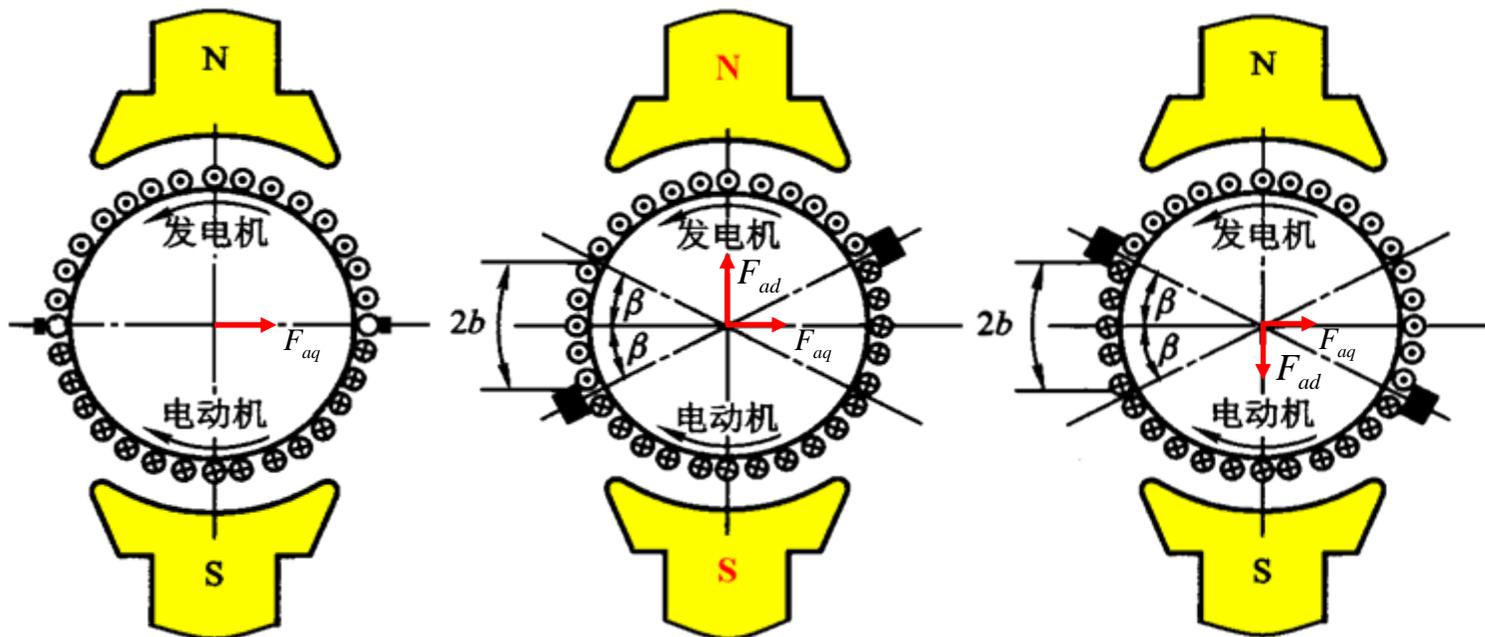
- ①使气隙磁场发生畸变。
- ②使物理中性线偏移几何中性线一个角度。
- ③考虑磁路饱和的影响，具有去磁作用。

交轴去磁电
枢反应

2) 直轴电枢反应



| | 电刷顺转向偏移 | 电刷逆转向偏移 |
|-------|---------|---------|
| 直流发电机 | 直轴去磁 | 直轴助磁 |
| 直流电动机 | 直轴助磁 | 直轴去磁 |



电枢反应的性质

| | 电刷在几何中性线上 | 电刷顺转向偏移 | 电刷逆转向偏移 |
|-------|-----------|---------|---------|
| 直流发电机 | 交轴 | 交轴和直轴去磁 | 交轴和直轴助磁 |
| 直流电动机 | 交轴 | 交轴和直轴助磁 | 交轴和直轴去磁 |

8-4 直流发电机的运行特性

发电机运行时转速一般保持为额定值，这时端电压 U 、负载电流 I 、励磁电流 I_f 3个物理量其中1个保持不变，另外2个量之间的关系就构成发电机的一种运行特性。

■直流发电机的运行特性：

①空载特性：当 n =常数且 $I=0$ 时， $U_0=f(I_f)$ 。

②外特性：当 n =常数且 I_f =常数（或励磁回路总电阻 R_f =常数）时， $U=f(I)$ 。

③调节特性：当 n =常数且 U =常数时， $I_f=f(I)$ 。

④效率特性：当 n =常数且 U =常数时， $\eta=f(P_2)$ 。

1.他励直流发电机的运行特性

1) 空载特性

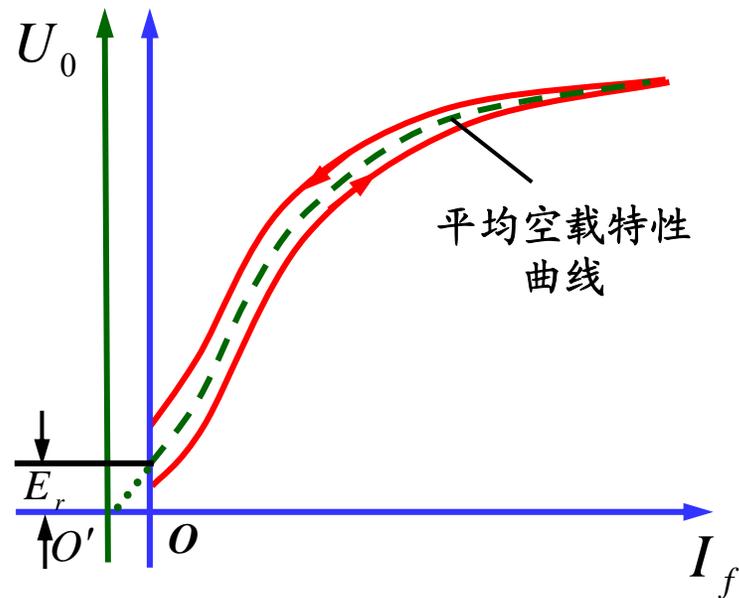
■ **定义：** 当 n =常数且 $I=0$ 时， $U_0=f(I_f)$ 。

■ 空载特性可通过空载实验或磁路计算求得。

$$U_0 = E_a = C_e \Phi_0 n_N \propto \Phi_0$$

$$I_f \propto F_0$$

■ 空载特性曲线的形状与磁化特性曲线相同。



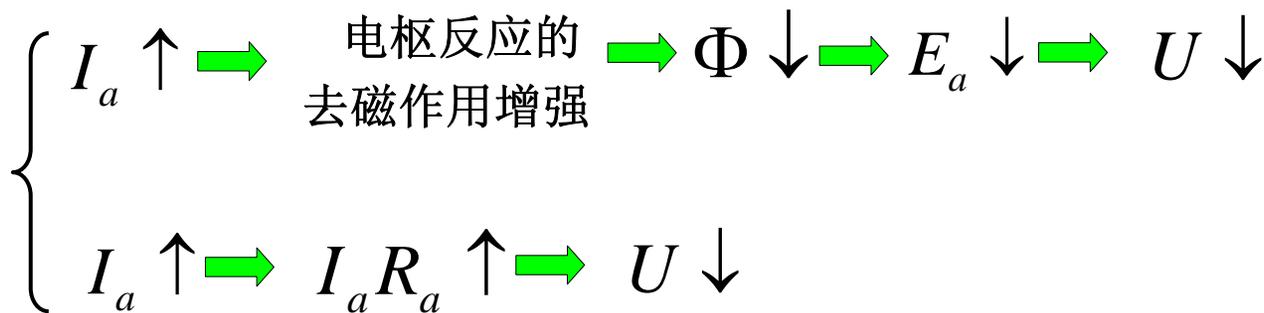
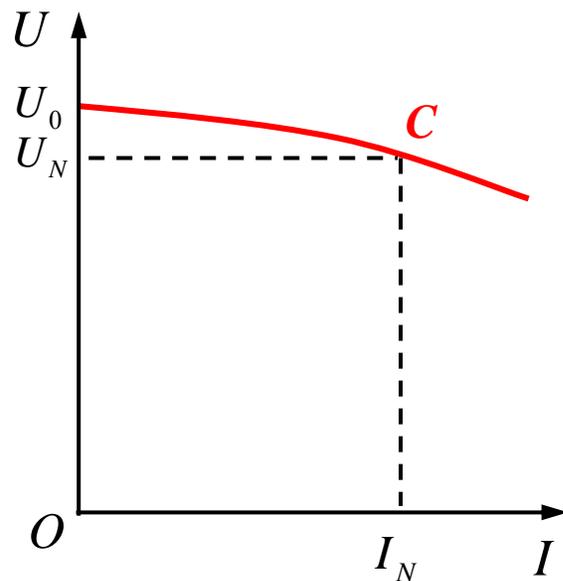
2) 外特性

■ **定义**：当 $n = \text{常数}$ 且 $I_f = \text{常数}$ （或励磁回路总电阻 $R_f = \text{常数}$ ）时， $U = f(I)$ 。

■ **他励直流发电机外特性下垂的原因**：

- ① 电枢反应的去磁作用。
- ② 电枢回路电阻压降的存在。

$$U = E_a - I_a R_a = C_e \Phi n - I_a R_a$$



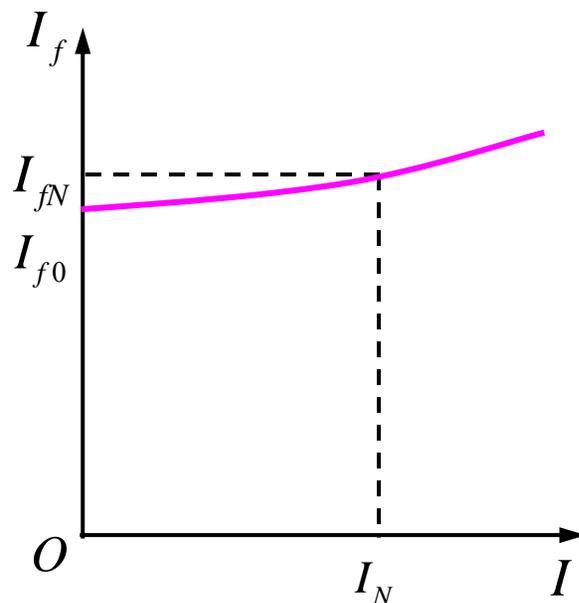
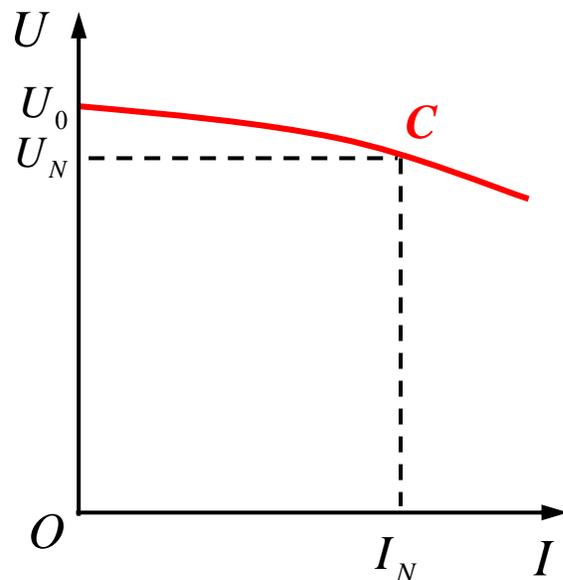
■ **电压调整率**：发电机从额定负载 ($U=U_N$, $I=I_N$) 过渡到空载 ($U=U_0$, $I=0$) 时，端电压升高的数值对额定电压的百分比，即

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

他励直流发电机， $\Delta U \approx (5 \sim 10)\%$ 。

3) 调节特性

■ **定义**：当 $n = \text{常数}$ 且 $U = \text{常数}$ 时， $I_f = f(I)$ 。



4) 效率特性

■ **定义**: 当 n =常数且 U =常数时, $\eta=f(P_2)$ 。

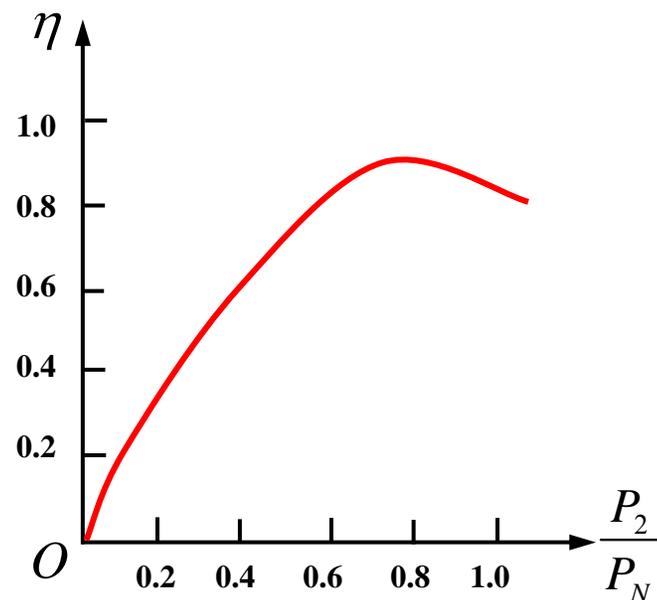
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

$$\sum p = p_{cu} + p_m + p_{Fe} + p_a = p_{cu} + p_0$$

$$p_{Cu} = I_a^2 R_a \propto I_a^2 \quad \text{—可变损耗}$$

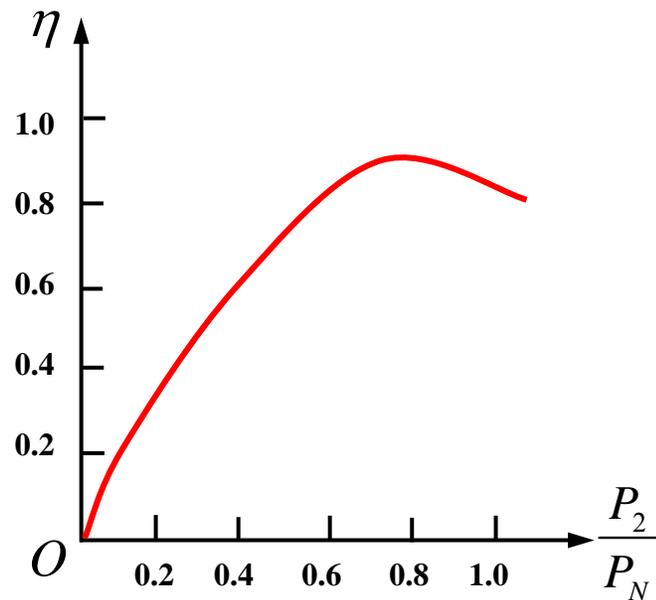
$$p_0 = p_m + p_{Fe} + p_a \quad \text{—不变损耗}$$

$$P_2 = UI_a$$



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI_a}{UI_a + I_a^2 R_a + p_0}$$

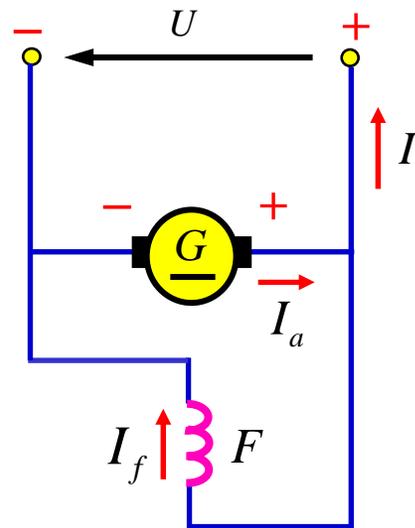
$$\frac{d\eta}{dI_a} = 0 \quad \rightarrow \quad I_a^2 R_a = p_0$$



当不变损耗=可变损耗时发生最大效率。

2. 并励直流发电机的自励

并励直流发电机建立电压的过程称为**自励过程**，满足建压的条件称为**自励条件**。



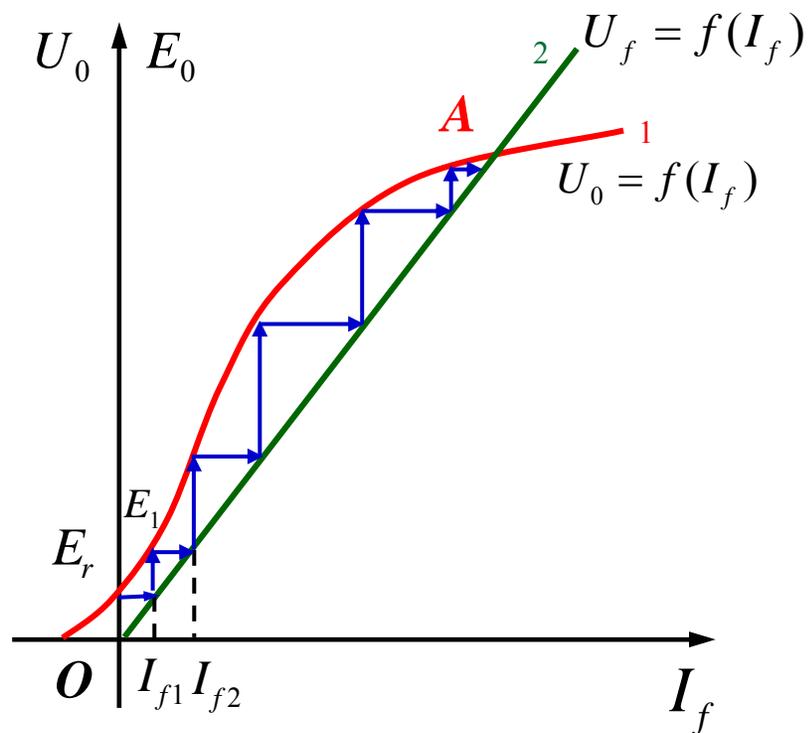
1) 并励直流发电机的自励过程

■ **空载特性曲线** $U_0 = f(I_f)$

$$\begin{aligned} U_0 &= E_0 - I_a R_a \\ &= E_0 - I_f R_a \approx E_0 \end{aligned}$$

■ **励磁回路的电阻特性曲线**

$$U_f = I_f R_f = f(I_f)$$

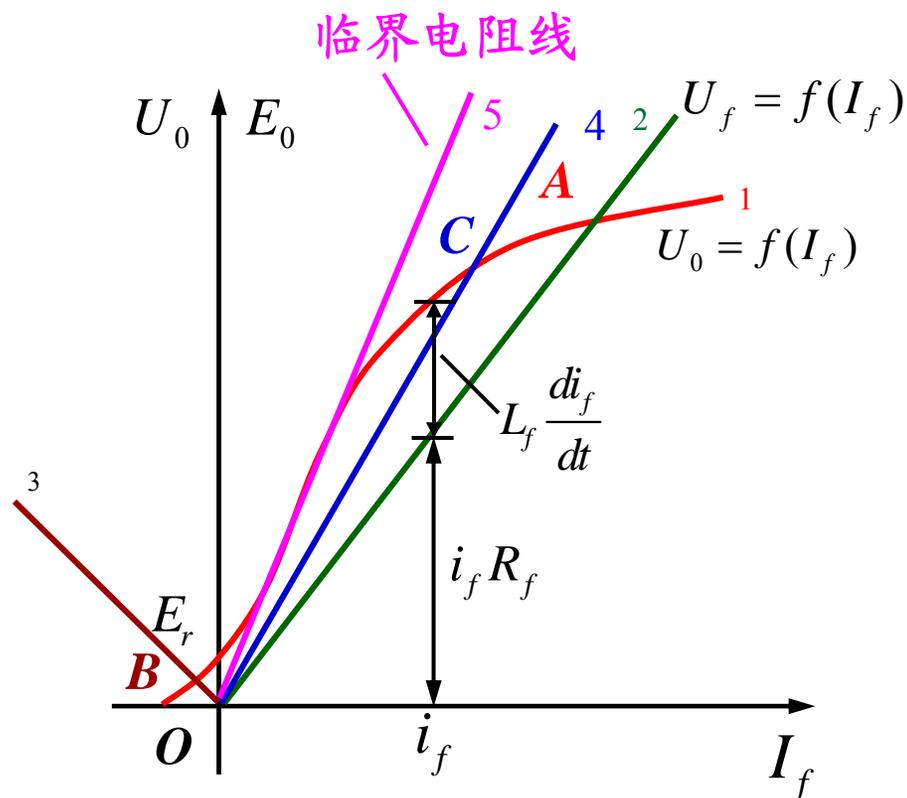


在发电机自励过程中，励磁回路的电压方程式为

$$U_0 = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad \rightarrow \quad L_f \frac{di_f}{dt} = U_0 - i_f R_f$$

■ 并励直流发电机的稳定工作点：空载特性曲线和励磁回路电阻线的交点。

■ 临界电阻 R_{cr} ：转速一定时，与磁化曲线的直线部分重合的励磁回路电阻线对应的电阻。



2) 并励直流发电机的自励条件

- ①电机有剩磁；
- ②励磁绕组并联到电枢两端的极性正确；
- ③励磁回路的总电阻小于与电机转速相应的临界电阻。

实际应用中，并励直流发电机自励而电压未能建立时，应先减小励磁回路的外串电阻，看电压是否能建立，不行再改变励磁绕组与电枢绕组连接的极性，若电压还不能建立，则应考虑可能没有剩磁，充磁后，再进行自励发电。

3. 并励直流发电机的运行特性

1) 空载特性

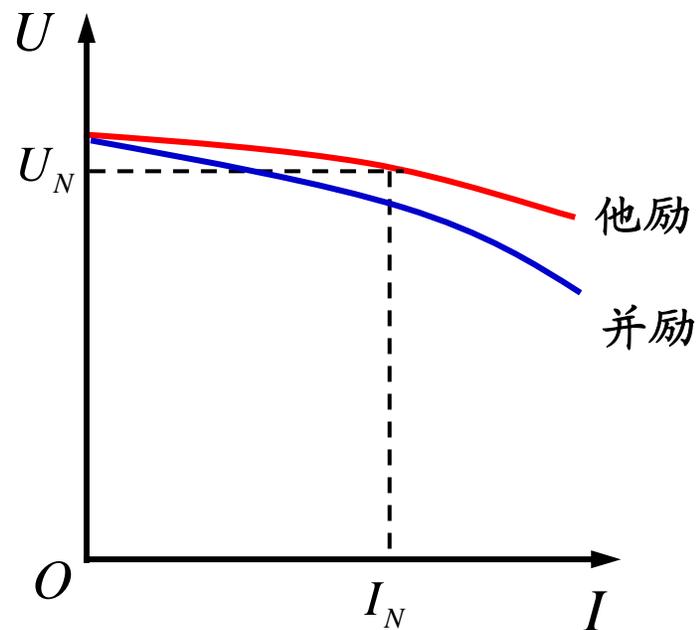
并励发电机的空载特性和他励直流发电机相同。

2) 外特性

■ **定义：** 当 n =常数且励磁回路总电阻 R_f =常数时， $U=f(I)$ 。

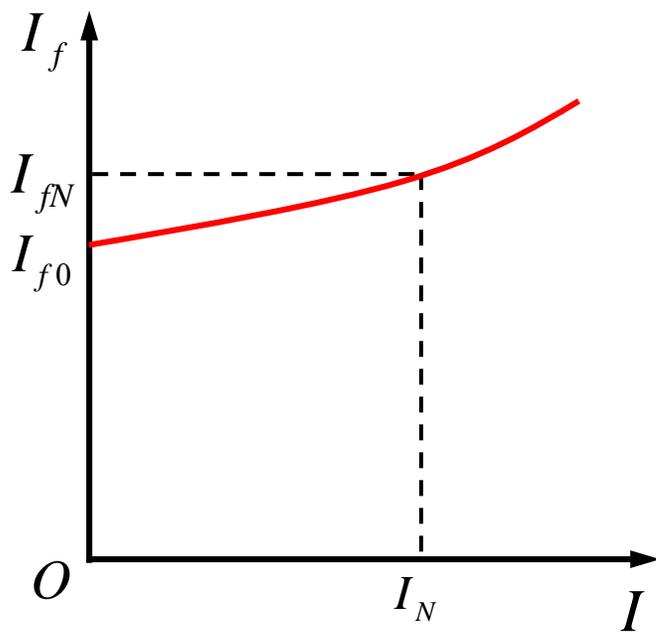
■ **并励直流发电机外特性下垂的原因：**

- ① 电枢反应的去磁作用。
- ② 电枢回路电阻压降的存在。
- ③ 端电压下降，引起励磁电流减小。



3) 调节特性

■ **定义：** 当 n =常数且 U =常数时， $I_f=f(I)$ 。



4.复励直流发电机的运行特性

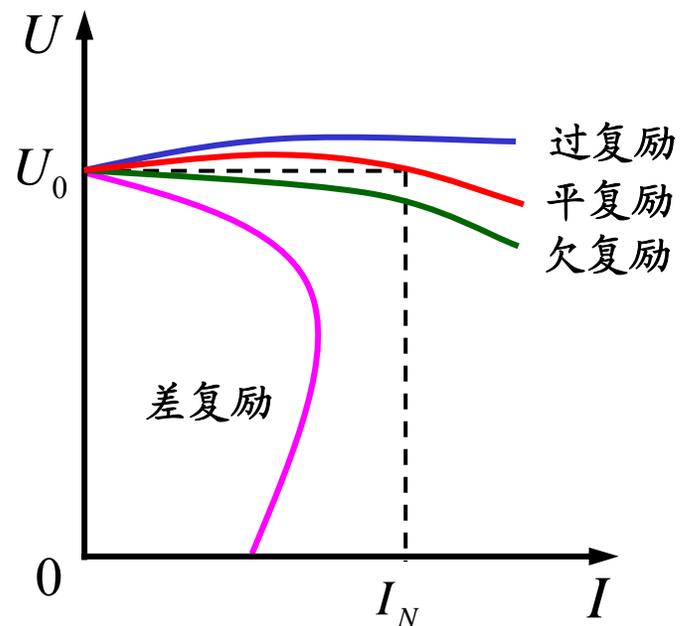
- **积复励直流发电机：** 串励绕组的磁动势和并励绕组的磁动势方向相同。
- **差复励直流发电机：** 串励绕组的磁动势和并励绕组的磁动势方向相反。

积复励直流发电机：

(1) 平复励： $\Delta U = 0$

(2) 过复励： $\Delta U < 0$

(3) 欠复励： $\Delta U > 0$



小 结

1. 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式分为：他励、并励、串励、复励。

• 他励直流发电机

$$I_a = I$$

• 并励直流发电机

$$I_a = I + I_f$$

2. 直流发电机的基本方程式

1) 电压方程式

$$E_a = U + I_a R_a$$

$$U_f = I_f R_f$$

2) 转矩平衡方程式

$$T_1 = T + T_0$$

3) 电磁功率和功率平衡方程式

电磁功率 $P_M = T\Omega = E_a I_a$

• 并励直流发电机

$$P_1 = P_M + p_0 \quad P_M = P_2 + p_f + p_{cu}$$

$$P_1 = P_2 + p_{cu} + p_f + p_m + p_{Fe} + p_a = P_2 + \sum p$$

• 他励直流发电机

$$P_1 = P_M + p_0 \quad P_M = P_2 + p_{cu}$$

$$P_1 = P_2 + p_{cu} + p_m + p_{Fe} + p_a = P_2 + \sum p$$

3.直流电机的电枢反应

电枢反应：负载时电枢磁动势对励磁磁场的影响。

1) 电刷在几何中性线上

交轴电枢反应：①使气隙磁场发生畸变。②使物理中性线偏移几何中性线一个角度；③考虑磁路饱和的影响，具有去磁作用。

2) 电刷不在几何中性线上

当电刷不在几何中性线上，除了交轴电枢反应外还有直轴电枢反应。

| | 电刷在几何中性线上 | 电刷顺转向偏移 | 电刷逆转向偏移 |
|-------|-----------|---------|---------|
| 直流发电机 | 交轴 | 交轴和直轴去磁 | 交轴和直轴助磁 |
| 直流电动机 | 交轴 | 交轴和直轴助磁 | 交轴和直轴去磁 |

4.直流发电机的运行特性

直流发电机的运行特性有空载特性、外特性和调节特性。外特性 $U=f(I)$ 是发电机最重要的一种特性，它反映了电机端电压 U 随负载电流 I 变化的情况。

他励直流发电机的外特性是一条下垂的曲线，其原因有：①电枢反应的去磁作用；②电枢回路的电阻压降。对于并励直流发电机，还有第3个原因：电枢端电压下降，引起励磁电流减小，使电枢电势和端电压进一步下降。所以并励直流发电机的电压调整率比他励时要大。

5.并励直流发电机的自励条件

- (1) 电机有剩磁；
- (2) 励磁绕组并联到电枢两端的极性正确；
- (3) 励磁回路的总电阻小于与电机转速相应的临界电阻。