



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

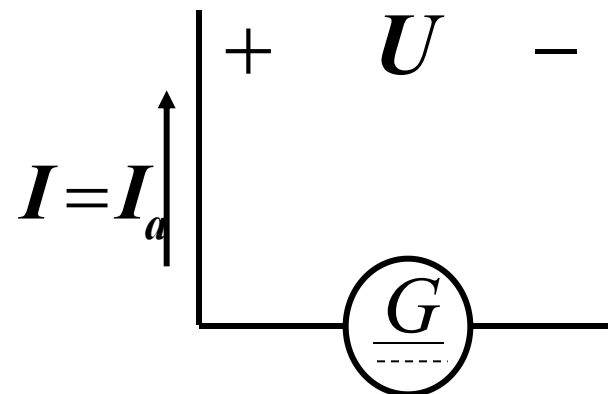
**1.6 直流发电机**

1.7 直流电动机

- 供给励磁绕组电流的方式称为**励磁方式**。分为**他励**和**自励**两大类，自励方式又分**并励**、**串励**和**复励**三种方式。

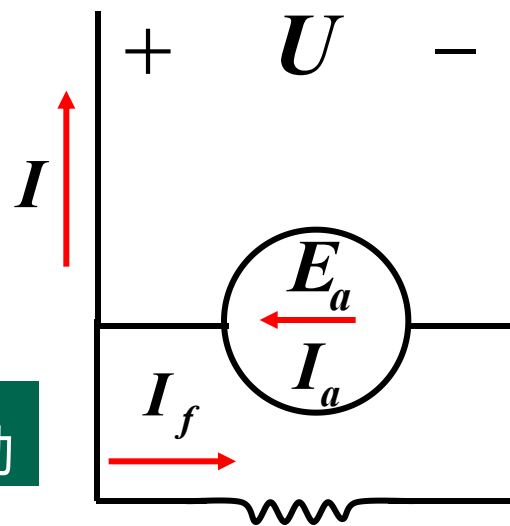
1、**他励**：直流电机的励磁电流由其它直流电源单独供给。

他励直流发电机的电枢电流和负载电流相同，即： $I = I_a$



2、**并励**：发电机的励磁绕组与电枢绕组并联。且满足

$$I_a = I + I_f$$



并励

他励

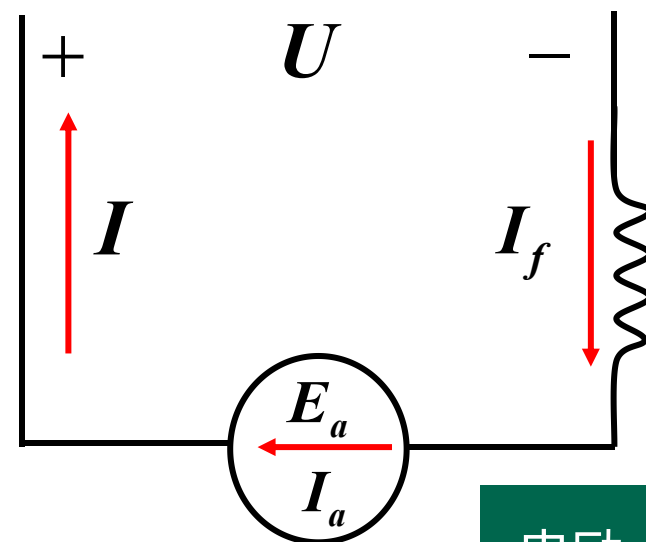


3、串励：励磁绕组与电枢绕组串联。满足

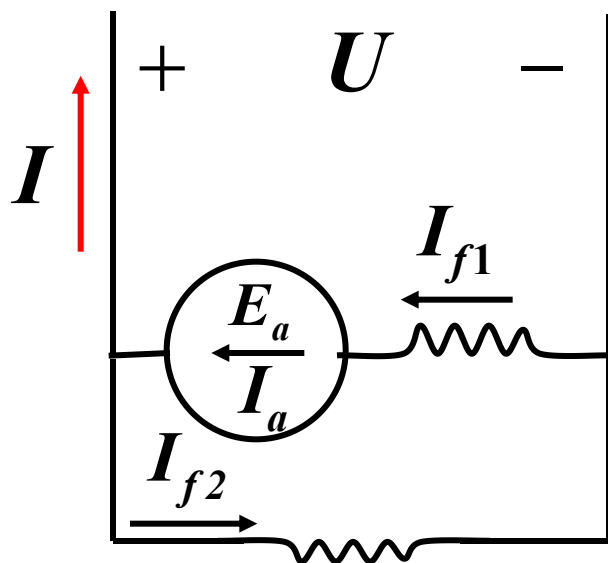
$$I_a = I_f = I$$

4、复励：

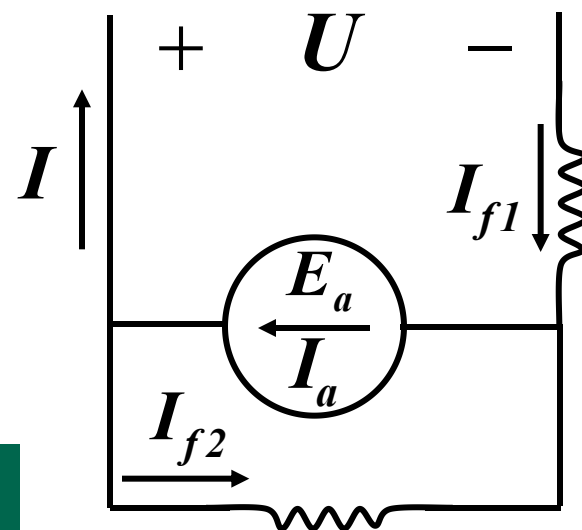
并励和串励两种励磁方式的结合。电机有两个励磁绕组，一个与电枢绕组串联，一个与电枢绕组并联。



串励



复励



如图规定各物理量的参考方向

### 1、电动势平衡方程

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

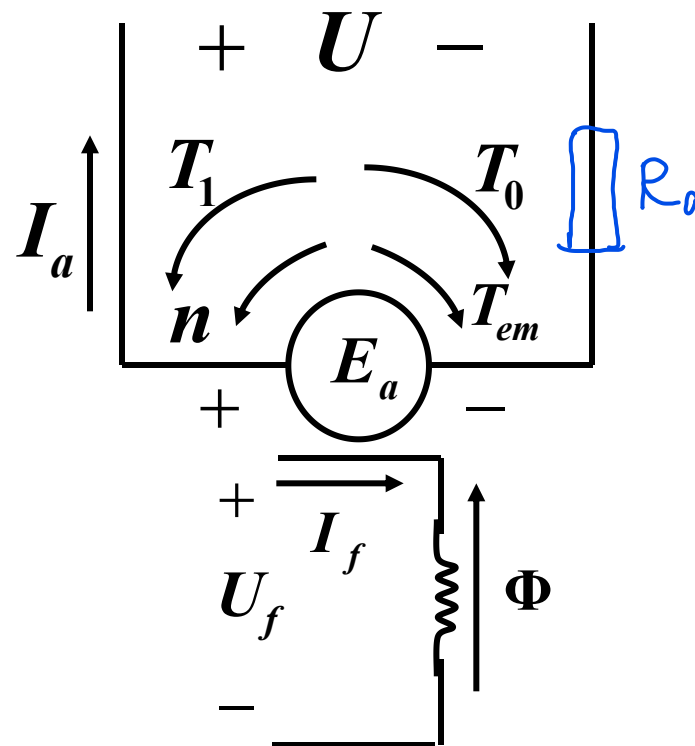
从方程式可见，直流发电机满足  $E_a > U$

### 2、转矩平衡方程

发电机轴上有三个转矩：原动机输入给的驱动转矩  $T_1$ 、电磁转矩  $T_{em}$  和机械摩擦及铁损引起的空载转矩  $T_0$ 。

转矩平衡方程为： $T_1 = T_{em} + T_0$

驱动转矩    电磁转矩    空载转矩



他励直流发电机线路原理图



## 3、励磁特性公式

直流发电机的励磁电流  $I_f = \frac{U}{R_f}$  每极气隙磁通  $\Phi = f(I_a, I_f)$

## 4、功率平衡方程

$$T_1 \Omega = T_{em} \Omega + T_0 \Omega$$

转矩方程两边同乘 $\Omega$ ， $\Omega$ 为发电机的机械角速度

机械功率

电磁功率

$$P_1 = P_{em} + P_0$$

空载损耗功率：包括机械损耗 $P_{mec}$ 、铁损耗 $P_{Fe}$ 、附加损耗 $P_{ad}$

$$\text{电磁功率 } P_{em} = T_{em} \Omega = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = E_a I_a$$

电磁功率一方面代表电动势为 $E_a$ 的电源输出电流 $I_a$ 时发出的电功率，一方面又代表转子旋转时克服电磁转矩所消耗的机械功率。

$$\text{又 } E_a I_a = U I_a + R_a I_a^2 \quad \text{即 } P_{em} = P_2 + P_{Cua}$$

电磁功率

输出功率

内阻消耗

发电机输出功率

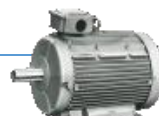
电枢回路的铜损耗

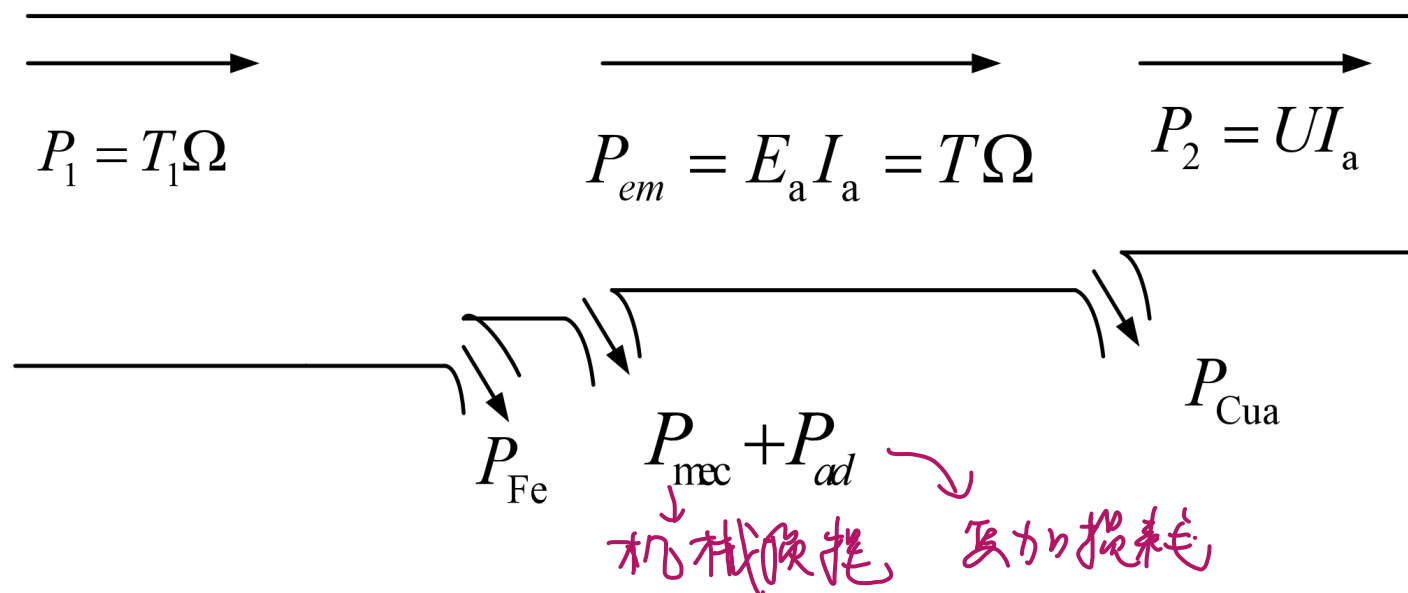
故功率平衡方程式为：

$$P_1 = P_{em} + P_0 = P_2 + P_{Cua} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}$$

电磁功率

空载损耗





## 他励直流发电机的功率流程图

直流发电机的总损耗:  $\sum P = P_{Cua} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad}$

不变损耗:  $P_{mec}$ 、 $P_{Fe}$ 、 $P_{ad}$

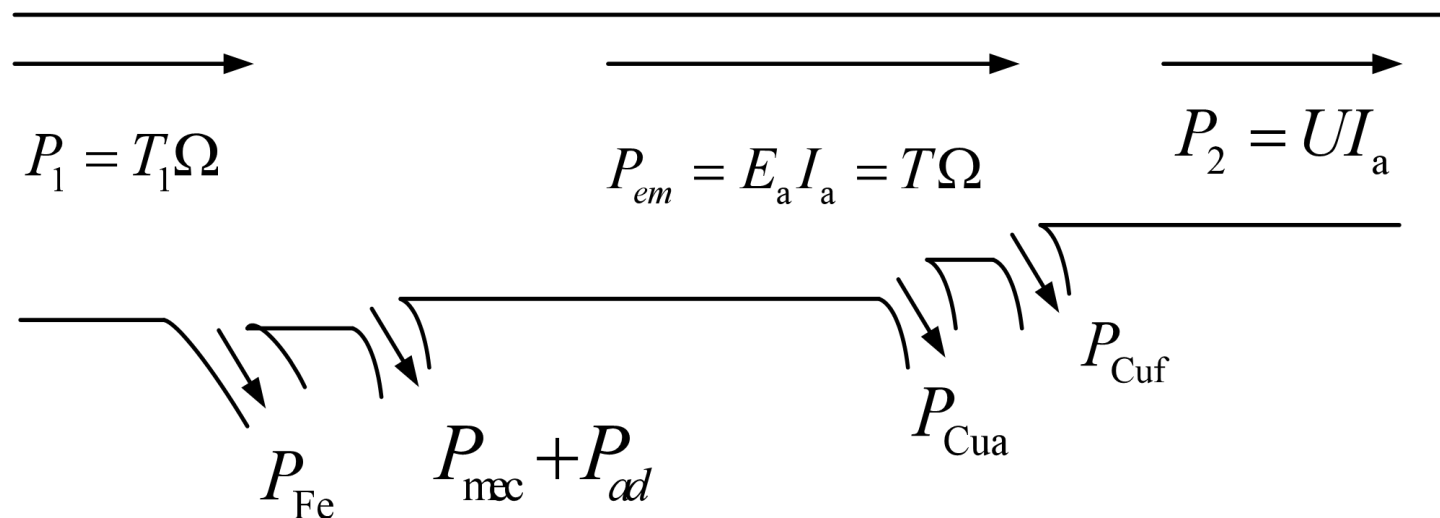
可变损耗:  $P_{Cua}$

直流发电机的效率:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left( 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \right) \times 100\%$$

(Handwritten red notes:  $\rightarrow$  输出 (output) above  $P_2$ , and  $\rightarrow$  输入 (input) below  $P_1$ )





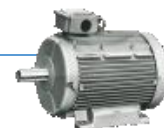
### 并励直流发电机的功率流程图

对于并励直流发电机:

$$\begin{aligned}
 P_{em} &= E_a I_a = (U + I_a R_a) I_a = U I_a + I_a^2 R_a = U(I_f + I) + I_a^2 R_a \\
 &= U I + U I_f + I_a^2 R_a = P_2 + P_{cuf} + P_{cua}
 \end{aligned}$$

一部分给励磁回路

$$I_a = I_f + I$$





保持转速 $n$ 为额定值，运行特性就是 $U$ 、 $I_f$ （或 $I$ ）、 $I_a$ 三个物理量保持其中一个不变时，另外两个物理量之间的关系。

### 1、空载特性

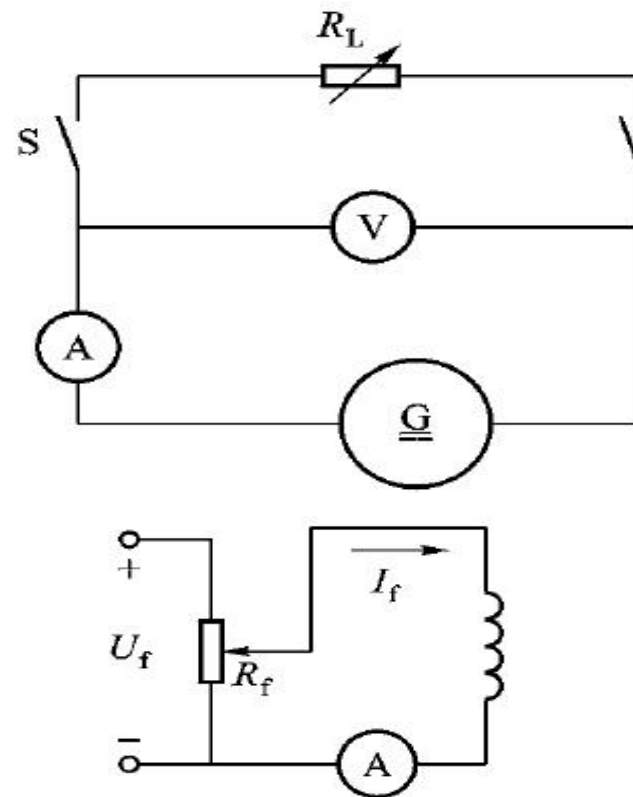
空载特性： $n=n_N$ ， $I_a=0$ 时，端电压 $U_0$ 与励磁电流 $I_f$ 之间的关系 $U_0=f(I_f)$ 。

- 空载特性的测定：开关 $S$ 断开，调节 $R_f$ ，使 $I_f$ 单方向由零逐步增大，直至 $U_0 \approx 1.25 U_N$ 为止。然后 $I_f$ 单方向逐步减小至0，测取相应的 $U_0$ 和 $I_f$ 。

$$U_0 = E_a = C_e \Phi n \rightarrow U_0 \propto \Phi$$

$$U_0 \rightarrow I_f \Leftrightarrow \Phi \rightarrow I_f$$

空载特性实质上就是 $\Phi=f(I_f)$ 。所以空载特性曲线的形状与空载磁化特性曲线相同。



保持转速 $n$ 为额定值，运行特性就是 $U$ 、 $I_f$ （或 $I$ ）、 $I_a$ 三个物理量保持其中一个不变时，另外两个物理量之间的关系。

### 1、空载特性

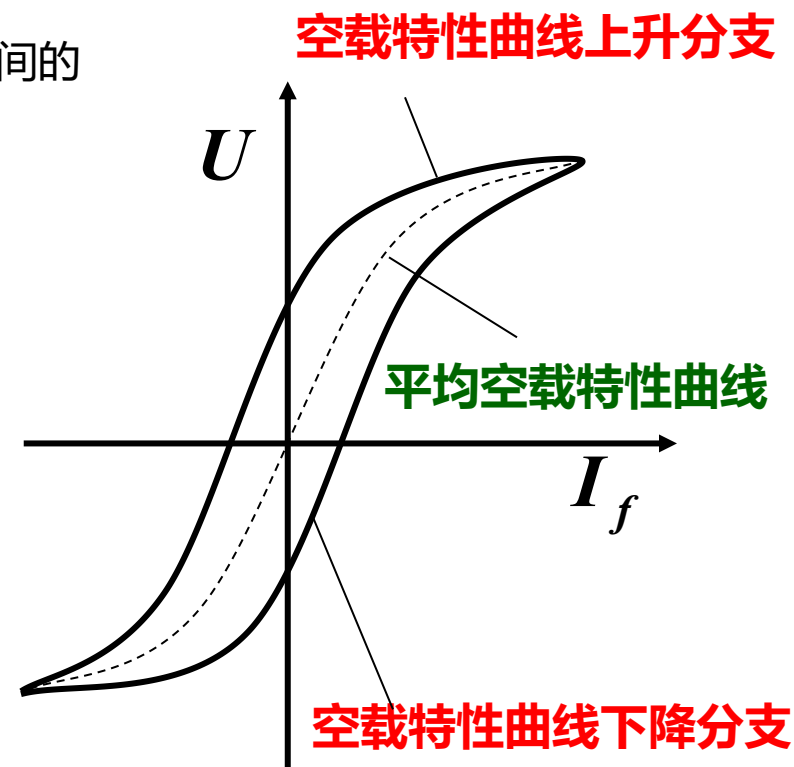
空载特性： $n=n_N$ ， $I_a=0$ 时，端电压 $U_0$ 与励磁电流 $I_f$ 之间的关系 $U_0=f(I_f)$ 。

- 直流发电机的空载特性是非线性的，上升与下降的过程是不相同的。实际中通常取平均特性曲线作为空载特性曲线。

$$U_0 = E_a = C_e \Phi n \rightarrow U_0 \propto \Phi$$

$$U_0 \rightarrow I_f \Leftrightarrow \Phi \rightarrow I_f$$

空载特性实质上就是 $\Phi=f(I_f)$ 。所以空载特性曲线的形状与空载磁化特性曲线相同。



保持转速 $n$ 为额定值，运行特性就是 $U$ 、 $I_f$ （或 $I$ ）、 $I_a$ 三个物理量保持其中一个不变时，另外两个物理量之间的关系。

## 2、外特性

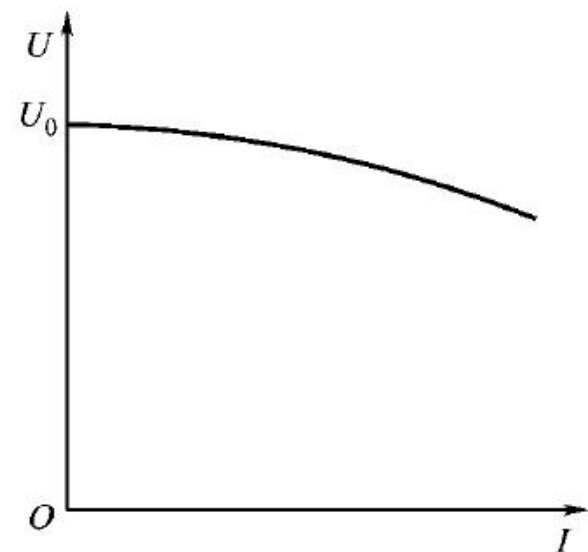
$n=n_N$ ， $I_f=I_{fN}$ 时，端电压 $U$ 与负载电流 $I$ 之间的关系 $U=f(I)$ 。

外特性测定： $R_L$ 置于最大时合上开关 $S$ ，同时调节 $R_L$ 和 $I_f$ ，使 $U=U_N$ ， $I=I_N$ ，此时的 $I_f$ 称为额定励磁电流 $I_{fN}$ 。调节 $R_L$ 使 $I$ 从0增加到 $1.2I_N$ ，测取各点相应的 $I$ 和 $U$ 。

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

端电压下降有两个原因：

- 1、在励磁电流一定情况下，负载电流增大，电枢反应的去磁作用使每极磁通量减少，使电动势减少；
- 2、电枢回路上的电阻压降随负载电流增大而增加，使端电压下降。



他励直流发电机的外特性



保持转速 $n$ 为额定值，运行特性就是 $U$ 、 $I_f$ （或 $I$ ）、 $I_a$ 三个物理量保持其中一个不变时，另外两个物理量之间的关系。

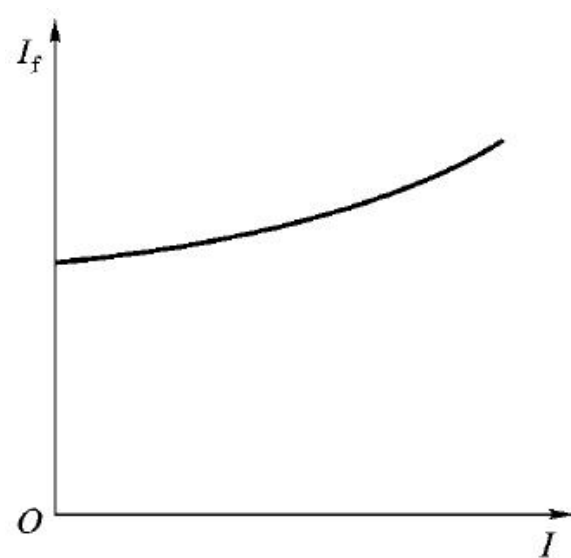
### 3、调节特性

调节特性： $n=n_N$ ， $U$ =常数时，励磁电流 $I_f$ 与负载电流 $I$ 之间的关系 $I_f = f(I)$ 。

**调节特性测定：**保持 $n=n_N$ ，同时调节 $R_L$ 节 $I_f$ ，使不同负载下，端电压 $U$ 维持不变，测取相应的 $I_f$ 和 $I$ 。

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

由曲线可见，在负载电流变化时，若保持端电压不变，必须改变励磁电流，补偿电枢反应及电枢回路电阻压降对输出端电压的影响。



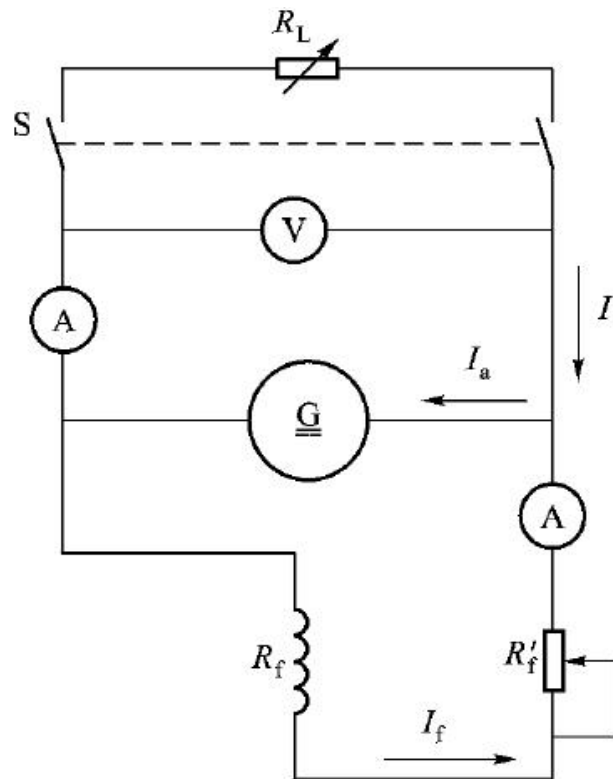
他励直流发电机的调节特性



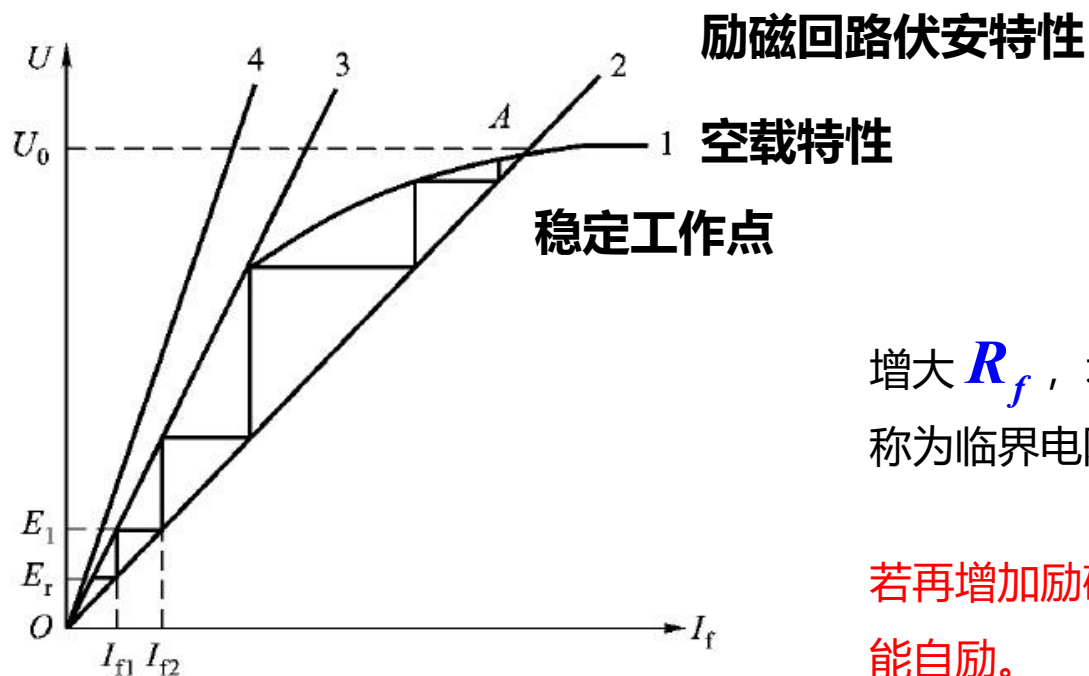
➤ 并励直流发电机不需要其他直流电源励磁，使用方便，应用广泛。但在电压尚未建立以前，励磁电流为零，故需要使发电机的端电压和励磁电流互相促进，电压不断提高，直至所需数值。

## 一、自励条件

➤ 这点与他励发电机不同。并励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。



并励直流发电机的原理接线图



并励直流发电机的自励建压过程

增大 $R_f$ ，场阻线变为曲线3时， $R_f$ 称为临界电阻 $R_{cr}$ 。

若再增加励磁回路电阻，发电机将不能自励。



### 一、自励条件

并励直流发电机自励建压必须满足以下三个条件：

- 电机磁路中要有剩磁，如果电机磁路中没有剩磁，可用其他直流电源（例如干电池）短时加于励磁绕组给主磁极充磁。
- 励磁绕组并联到电枢两端的极性正确，如果并联极性不正确，可将并励绕组并到电枢绕组的两个端头对调。
- 励磁回路的总电阻小于该转速下的临界电阻。

思考题：电机正转  
能自励,反转能自励  
吗？



## 二、并励直流发电机的运行特性

## 01 空载特性

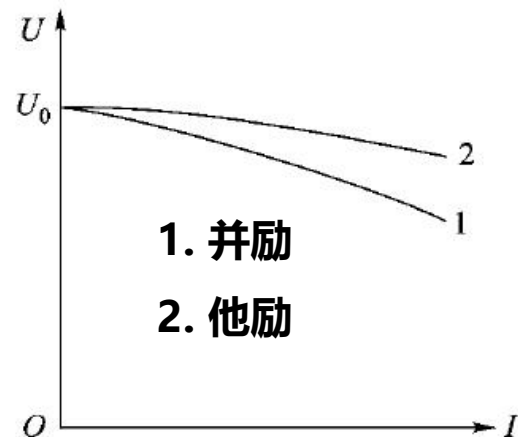
并励直流发电机的空载特性一般是在他励方式下测得的，所以与他励直流发电机相同。

## 02 外特性

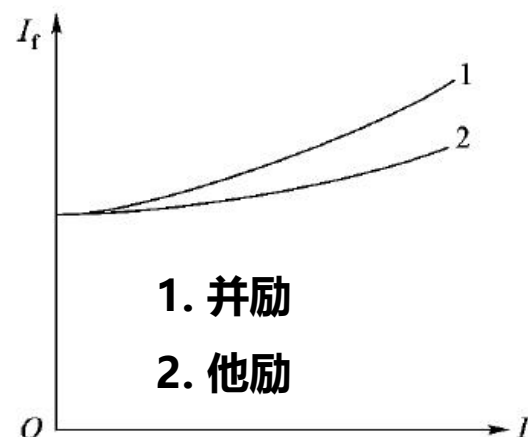
$n = n_N$ ,  $R_f$  为常数时, 端电压  $U$  与负载电流  $I$  之间的关系。  
负载电流增大时电压下降得多。

## 03 调节特性

负载电流增大时电压下降较多，为维持电压恒定所需增加的励磁电流较大，所以调节特性上翘程度超过他励。



并励直流发电机的外特性

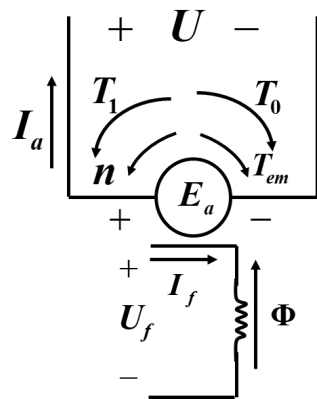


并励直流发电机的调节特性



# 小结

直流发电机



励磁方式

他励

自励：并励、串励、复励

基本方程  
(他励)

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

$$T_1 = T_{em} + T_0 \quad I_f = \frac{U}{R_f}$$

$$P_{em} = P_1 - P_0 = T_{em} \Omega = E_a I_a \quad P_2 = P_{em} - P_{Cua}$$

$$P_1 = P_{em} + P_0 = P_2 + P_{Cua} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad}$$

运行特性 (他励)

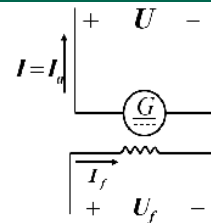
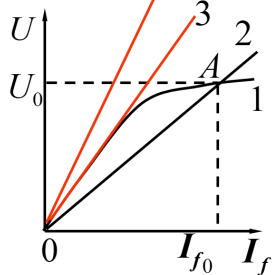
空载特性  $n = C_1 \quad I = 0$  时,  $U = f(I_f)$

外特性  $n = n_N \quad I_f = I_{fN}$  时,  $U = f(I)$

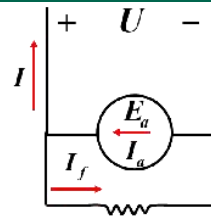
调节特性  $n = C_1 \quad U = C_2$  时,  $I_f = f(I)$

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

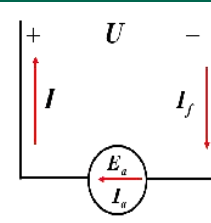
并励发电机：自励条件（剩磁，极性，临界电阻）



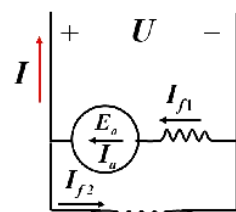
$I = I_a$  他励



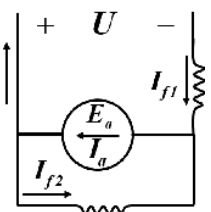
$I_a = I + I_f$  并励



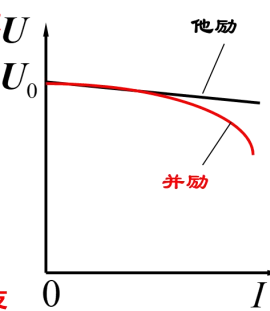
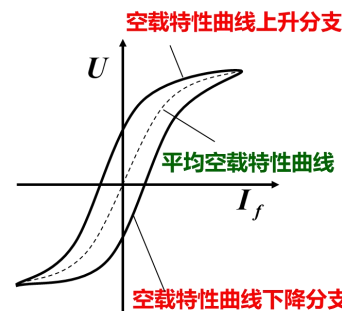
$I_a = I_f = I$  串励



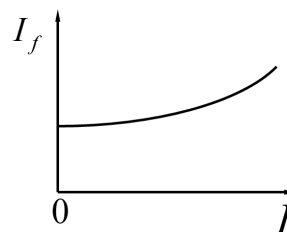
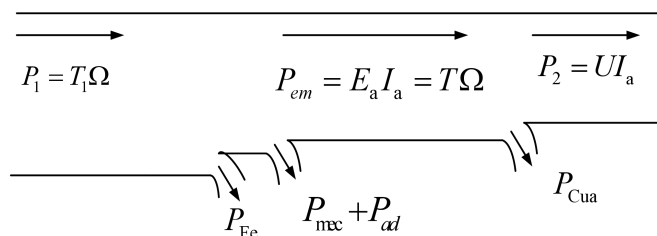
复励



励磁方式



运行特性



他励直流发电机的功率流程图