

# 第五章

## 直流电动机

[返回主页](#)

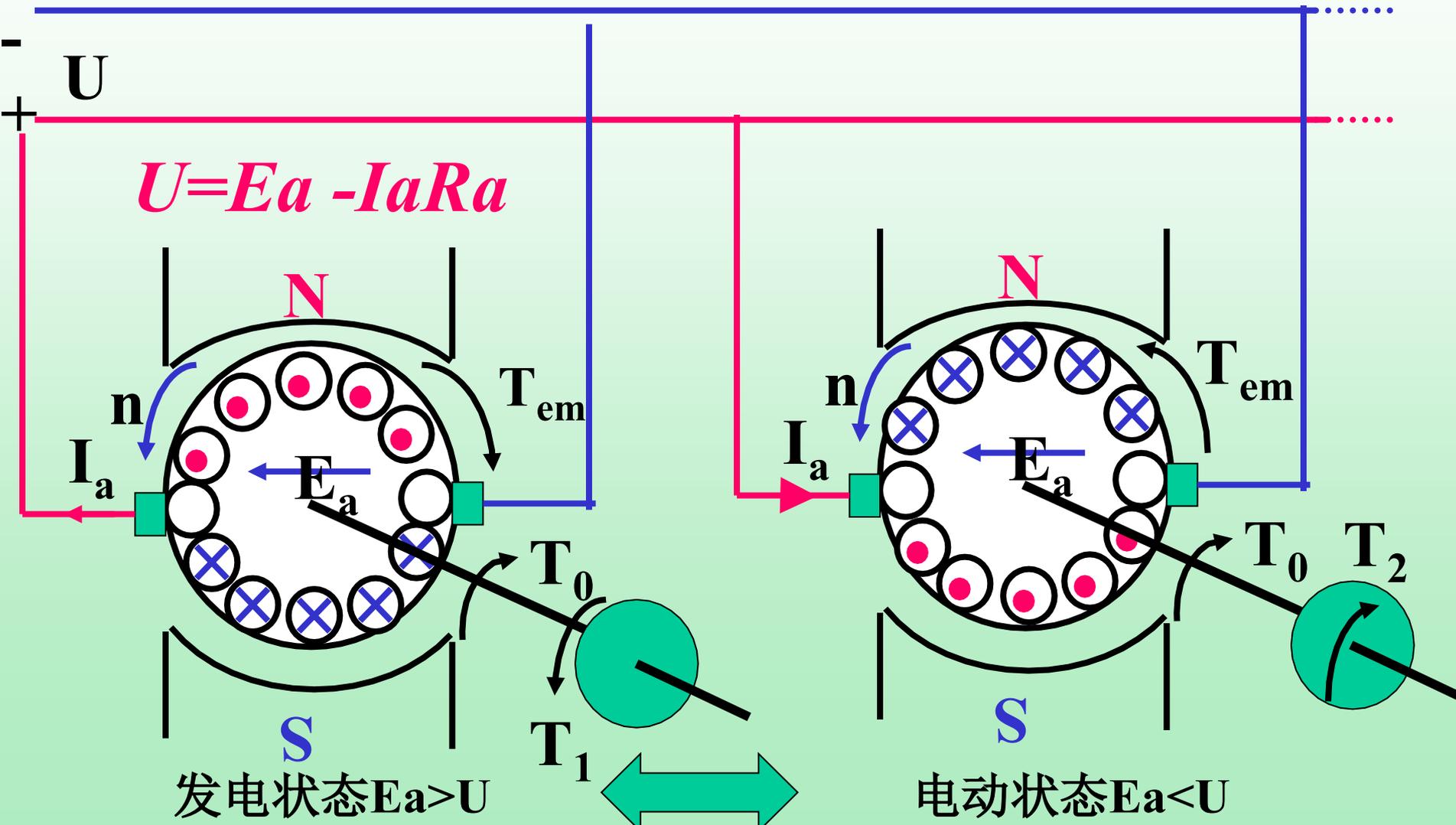
# 第五章 直流电动机

## 本章要求:

- 掌握直流电机的可逆原理，并能正确判断直流电机的运行状态。
- 熟练掌握直流电动机的**基本方程**，并能正确使用。
- 掌握直流电动机的**转速特性**、**转矩特性**以及**效率特性**。
- 熟练掌握直流电动机的**机械特性**，并能灵活应用。

# 第一节 直流电机的可逆原理

**电机可逆原理：**从原理上讲一台电机在某一种条件下作为发电机，在另一种情况下可做电动机运行，这两种状态可以相互转换。



以他励直流电机为例，一台他励直流发电机在直流电网上并联运行，电机各物理量正方向如图所示。发电机运行时电机功率关系和转矩关系为：

$$P_1 = P_M + p_0$$

$$T_1 = T + T_0$$

分析一下此时发电机各物理量状态：直流发电机将输入机械功率 $P_1$ 转换为电功率输送给电网。电磁转矩 $T_{em}$ ， $T_0$ 与转速方向相反均为制动性转矩，电流方向 $I_a$ 为图示正方向，

$$U = E_a - I_a R, \quad U < E_a$$

保持其他情况不变，让发电机输入功率为0，即脱开原动机让 $T_1=0$ ，刚开始瞬间，电机转速来不及变化， $E_a$ 、 $I_a$ 、 $T$ 都不能突变，电磁转矩 $T_{em}$ ， $T_0$ 与转速方向仍相反，电机在两个制动性转矩作用下减速。当转速 $n$ 下降到某一值 $n_0$ 时， $E_{a0} = C_e \Phi n_0 = U$ ，这时 $I_a = 0$ ，直流发电机向电网输送功率为零。此时电磁转矩 $T_{em} = 0$ ，电机在空载转矩 $T_0$ 的作用下继续减速。当转速 $n < n_0$ 时， $U > E_a$ ，电枢电流反向，电机开始从电网

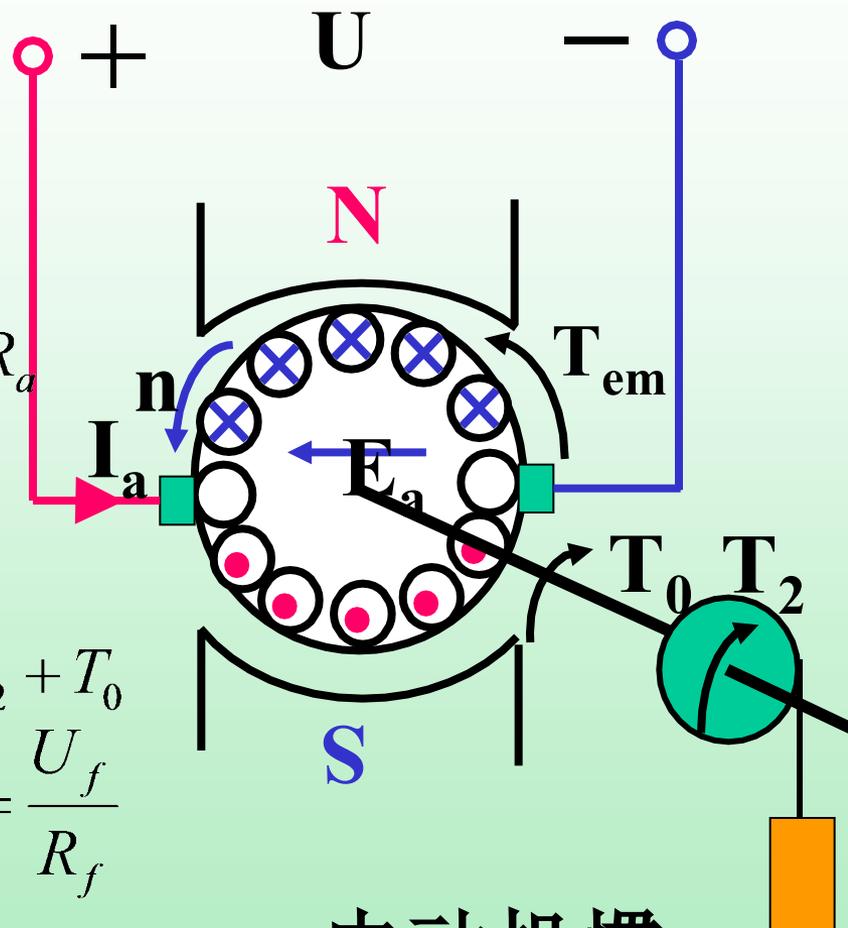
吸收能量。电磁转矩的方向也改变，与转速方向一致即变成拖动性转矩，当转速下降到某一值时，电磁转矩与空载转矩相同，这时转速不再下降维持恒速运行。

同样，上述物理过程可以反过来，这就是直流电机可逆原理。

## 第二节 直流电动机的基本方程

从电路、力学和能量守恒等方面可以得到电动机的三个稳态的平衡方程。

- 电枢回路方程式:  $U = E_a + I_a R_a$
- 电枢电动势:  $E_a = C_e \Phi I_a$
- 电磁转矩  $T = C_T \Phi I_a$
- 稳态运行转矩关系式:  $T = T_2 + T_0$
- 他励发电机的励磁电流  $I_f = \frac{U_f}{R_f}$
- 气隙每极磁通  $\Phi = f(I_f, I_a)$



电动机惯例

以后分析电力拖动系统运行状态都采用电动机惯例

## 第三节他励直流电动机的功率关系

电压方程式两边都乘以 $I_a$ 得到：
$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

$P_1 = UI_a$ : 电源输入功率

$$P_1 = P_M + p_{Cua}$$

$P_M = E_a I_a$ : 电磁功率，指电功率向机械功率转换

$p_{Cua}$ : 电枢回路总铜损

转矩平衡方程式乘以机械角速度 $\Omega$ 得：

$$T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

$$P_M = P_2 + p_0$$

$P_M = T \Omega$  电磁功率

$P_2 = T_2 \Omega$  转轴上输出机械功率

$p_0$ 空载损耗包括机械磨擦损耗 $p_m$ 和铁损 $p_{fe}$

总损耗： $\sum p = p_m + p_{Fe} + p_{Cua} + p_s$  效率：
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

例：一台四级他励直流电机，电枢采用单波绕组，电枢总导体数  $N=372$ ，电枢回路总电阻  $R_a=0.208$  欧姆，当电机运行在电源电压  $U=220V$ ，电机转速  $n=1500r/min$ ，气隙每极磁通  $\Phi=0.011Wb$ ，电机铁损  $p_{Fe}=362W$ ，机械摩擦损耗  $p_m=204W$ （忽略附加损耗）问：（1）该电机运行在发电状态还是电动状态？

（2）电磁转矩是多少？

（3）输入功率和效率各是多少？

解：(1)单波绕组的并联支路数  $a=1$ ，所以

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{2 \times 372}{60 \times 1} \times 0.011 \times 1500 = 204.6V$$

由于  $E_a < U = 220V$ ，可以判断电机运行于电动机状态。

（2）用电动机惯例进行计算：

$$\text{电磁转矩: } T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{2\pi n} = \frac{204.6 \times 74}{2\pi \times 1500} = 96.38 N.m$$

(3) 输入功率  $P_1 = UI_a = 220 \times 74 = 16280W$

输出功率  $P_2 = P_M - p_{Fe} - p_m = 204.6 \times 74 - 362 - 204 = 14574W$

总损耗:  $\Sigma p = P_1 - P_2 = 16280 - 14574 = 1706W$

效率:  $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{14574}{16208} = 89.5\%$

例：一并励直流电动机： $P_N=96\text{KW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=255\text{A}$ ， $I_f=5\text{A}$ ， $n_N=500\text{rpm}$ ， $R_a=0.078\Omega$ 。求额定时： $P_1$ 、 $\Sigma p$ 、 $\eta$ ； $p_{\text{cua}}$ 、 $P_{\text{em}}$ 、 $p_0$ ； $T$ 、 $T_2$ 、 $T_0$ 。

解：

$$P_1 = U_N I_N = 440 \times 255 = 112.2\text{KW}$$

$$\Sigma p = P_1 - P_2 = 112.2 - 96 = 16.2\text{KW}$$

$$\eta = P_2 / P_1 = 96 / 112.2 = 85.6\%$$

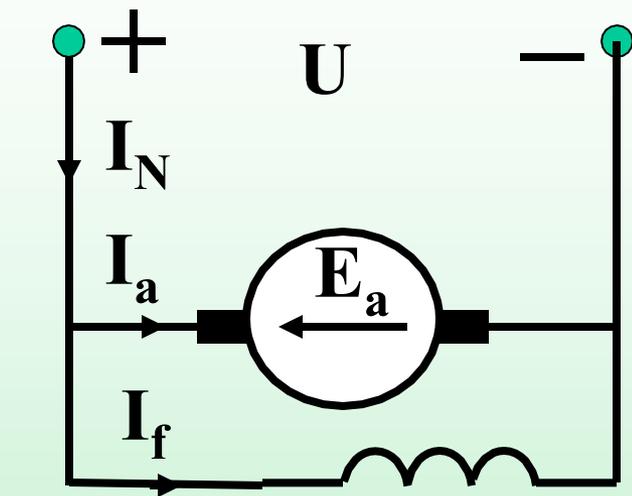
$$I_a = I_N - I_f = 255 - 5 = 250\text{A}$$

$$p_{\text{cua}} = I_a^2 R_a = 250^2 \times 0.078 = 4.88\text{KW}$$

$$E_a = U_N - I_a R_a = 440 - 250 \times 0.078 = 420.5\text{V}$$

$$P_{\text{em}} = E_a I_a = 420.5 \times 250 = 105.1\text{KW}$$

$$p_0 = P_{\text{em}} - P_2 = 105.1 - 96 = 9.1\text{KW}$$



$$T = P_{\text{em}} / \Omega = 2008\text{Nm}$$

$$T_2 = P_2 / \Omega = 1833\text{Nm}$$

$$T_0 = p_0 / \Omega = 175\text{Nm}$$

## 第四节：直流电动机的工作特性

### 1、转速特性

在额定电压、额定励磁电流情况下：转速 $n$ 与电枢电流 $I_a$ 的关系

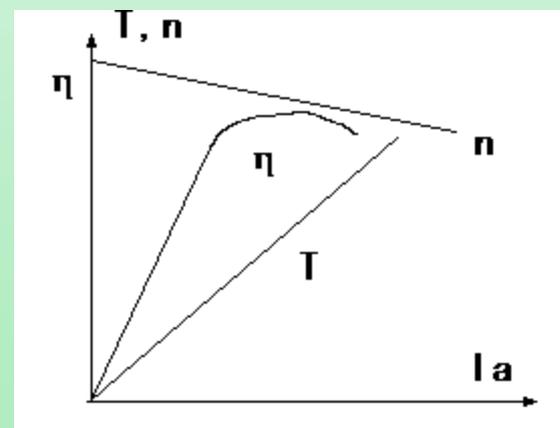
$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} I_a$$

### 2、转矩特性

在额定电压、额定励磁电流情况下：转矩 $T$ 与电枢电流 $I_a$ 的关系。每极磁通为额定值时，电磁转矩 $T$ 与电枢电流成正比。如果考虑电枢反应的去磁效应，随着电枢电流 $I_a$ 的增大， $T$ 略微减小。

### 3、效率特性

在额定电压、额定励磁电流情况下：效率 $\eta$ 与电枢电流 $I_a$ 的关系。



## 第五节 他励直流电动机的机械特性

•机械特性： $n=f(T)$ 是指在一定的条件下，电磁转矩和转速两个机械量之间的函数关系。

### 一、机械特性方程式

•用电枢回路总电阻考虑电刷接触压降，总电阻 $R_a$ ，为了推导机械特性的一般公式，在电枢回路中串入电阻 $R$ 。

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R}{C_e \Phi} I_a \quad I_a = \frac{T}{C_T \Phi}$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

•其中， $n_0=U/(C_e \Phi)$ 为理想空载转速，而 $\beta=(R_a+R)/(C_e C_T \Phi^2)$ 为机械特性的斜率

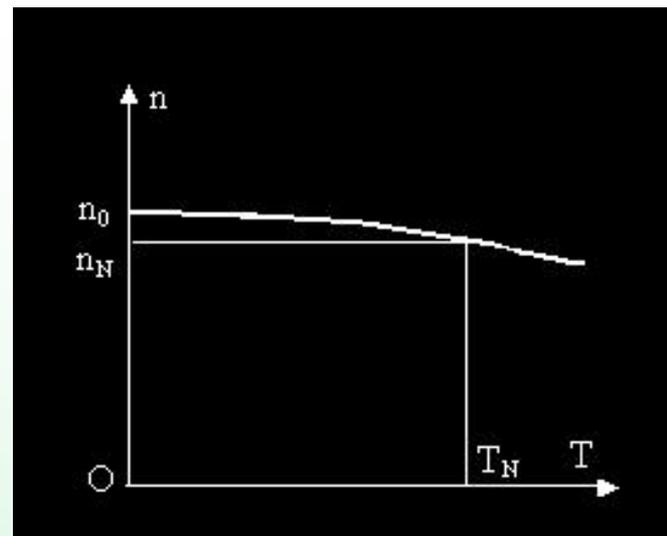
## 二、固有机械特性

三个量 $U, \Phi, R$ 可以改变机械特性

$U=U_N, \Phi=\Phi_N, R=0$ 时的机械特性称为固有机械特性。其方程为

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

- 其特性是一条**向下倾斜的直线**
- $T=0$ 时  $n=n_0=U_N/C_e \Phi_N$  **理想空载转速**。此时  $I_a=0, E_a=U_N$
- 斜率  $\beta = R_a / (C_e C_T \Phi_N^2)$ ，于  $R_a$  很小，其值很小，转矩  $T$  增大时， $n$  下降很小，固有机械特性是一条比较平的下降曲线。 (**硬特性**)
- $T=T_N$ 时  $n=n_N$ , **额定转速降**  $\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta T_N \approx 0.05 n_0$
- 电机启动时  $n=0, E_a=0$ ，电枢**启动电流**  $I_s = U_N/R_a \approx 20 I_N$ ，**启动转矩**  $T_s \approx 20 T_N$



- 工作在第四象限情况：倒拉反转运行 $T > T_s$ ,  $n < 0$
- 工作在第二象限情况：发电回馈制动运行  
 $I_a < 0$ 方向反向，电磁转矩由拖动变成制动,  $n > n_0$

例3-8：一台他励直流电动机额定功率 $P_N=96\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=440\text{V}$ ，额定电流 $I_N=250\text{A}$ ，额定转速 $n_N=500\text{r/min}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.078$ 欧姆，忽略电枢反应的影响求（1）理想空载转速 $n_0$ （2）固有机机械特性斜率 $\beta$

解（1）理想空载转速计算

先求电动机 
$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 250 \times 0.078}{500} = 0.841$$

理想空载转速 
$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{440}{0.841} = 523.2 \text{ r/min}$$

（2）斜率计算

$$C_T \Phi_N = 9.55 C_e \Phi_N = 9.55 \times 0.841 = 8.03$$

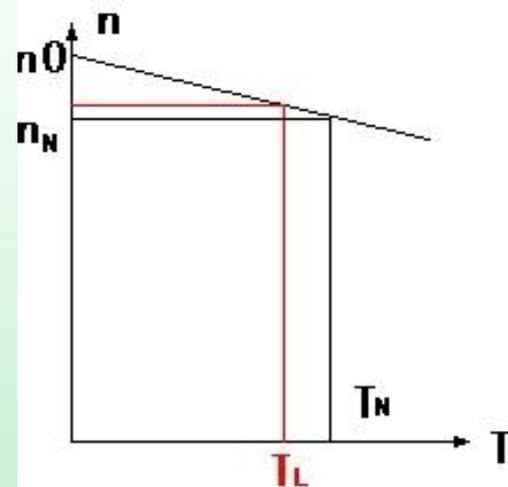
$$\beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} = \frac{0.078}{0.841 \times 8.03} = 0.0116$$

例：某他励直流电动机额定功率 $P_N=22\text{kW}$ ，额定电压 $U_N=440\text{V}$ ，额定电流 $I_N=250\text{A}$ ，额定转速 $n_N=1500\text{r/min}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.1$ ，忽略空载转矩 $T_0$ ，电动机拖动恒转矩负载 $T_L=0.85T_N$ （额定电磁转矩），求稳定运行时电动机的转速、电枢电流和电动势。

解：要求稳定运行时电动机的转速 $n$ ，只需求出理想空载点的转速 $n_0$ ，根据图中所示比例关系可知：

$$n_0 - n = 0.85(n_0 - n_N)$$

$$n = n_0 - 0.85(n_0 - n_N)$$



先求电动机  $C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139$

理想空载转速  $n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1582.7 \text{ r/min}$

稳定运行转速  $n = 1582.7 - 0.85(1582.7 - 1500) = 1512.4 \text{ r/min}$

电枢电流  $I_a = \frac{T_L}{C_T \Phi_N} = \frac{0.85 T_N}{C_T \Phi_N} = 0.85 I_N = 0.85 \times 115 = 97.75 \text{ A}$

电枢电动势： $E_a = C_e \Phi_N n = 0.139 \times 1512.4 = 210.2V$

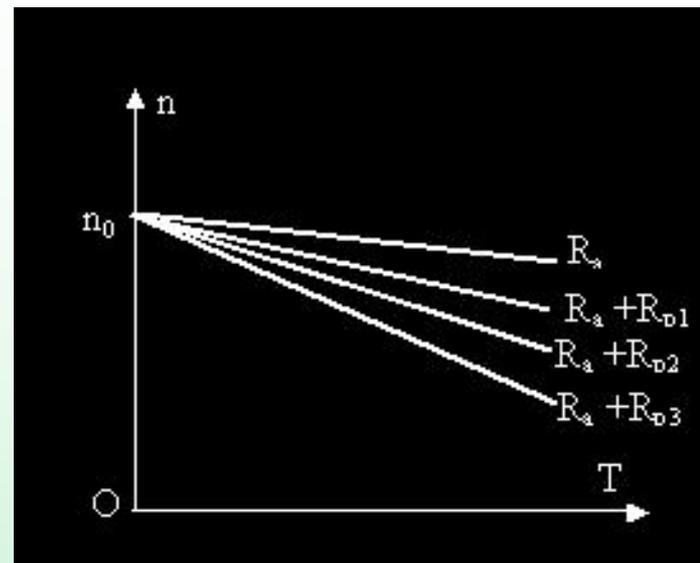
### 三、人为机械特性

改变三个量 $U, \Phi, R$ 之一而其他量不变时可以得到人为机械特性。

#### (1) 电枢回路串电阻时的人为机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

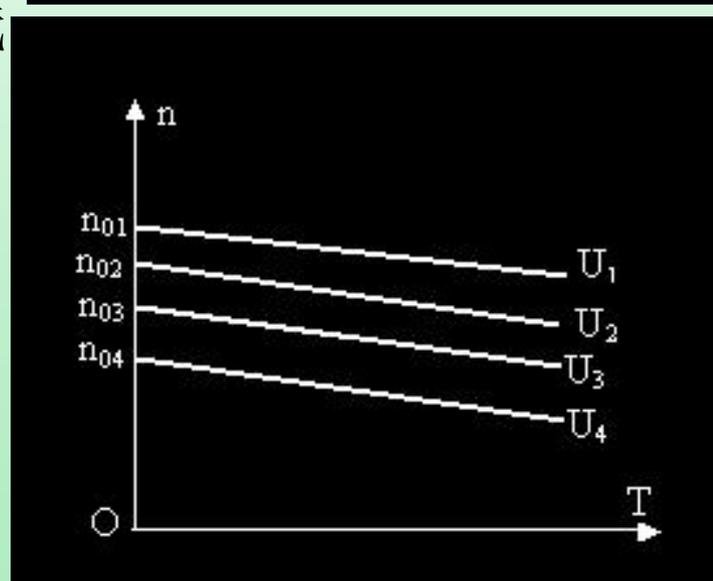
对应于不同的 $R$ 可以得到一簇斜率不同射线



#### (2) 改变电枢电压的人为机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

斜率不变，理想空载转速 $n_0$ 不同的一簇平行线。 $(U < U_N)$



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/446122044144011003>