



电机与拖动**课件**之三

直流电机 电力拖动

胡梦月、韩谷静

纺大电子电气



章节目录

2.1 电力拖动系统的运动方程和负载转矩特性

2.2 他励直流电动机的机械特性

2.3 他励直流电动机的起动

2.4 他励直流电动机的制动

2.5 他励直流电动机的调速

2.6 串励直流电动机的电力拖动

直流电动机的机械特性是指电动机在电枢电压 U 、励磁电流 I_f 、电枢回路电阻 $R_a + R_\Omega$ 为恒值的条件下，即电动机处于稳态运行时，电动机的转速与电磁转矩之间的关系： $n = f(T_{em})$

电枢感应电动势： $E_a = C_e \Phi n$

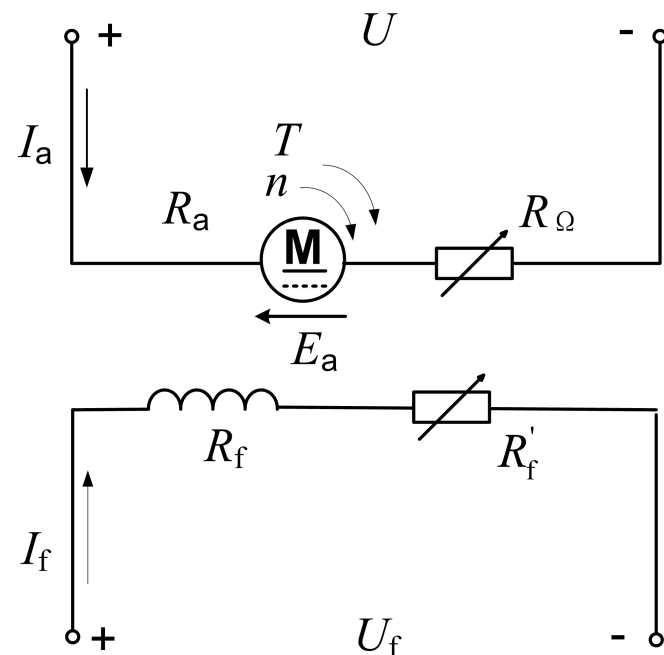
电磁转矩： $T_{em} = C_T \Phi I_a$

电枢电路电压平衡方程：

$$U = E_a + RI_a \quad R = R_a + R_\Omega$$

故电动机机械特性方程

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_{em}$$



他励直流电动机电路原理图



机械特性方程:

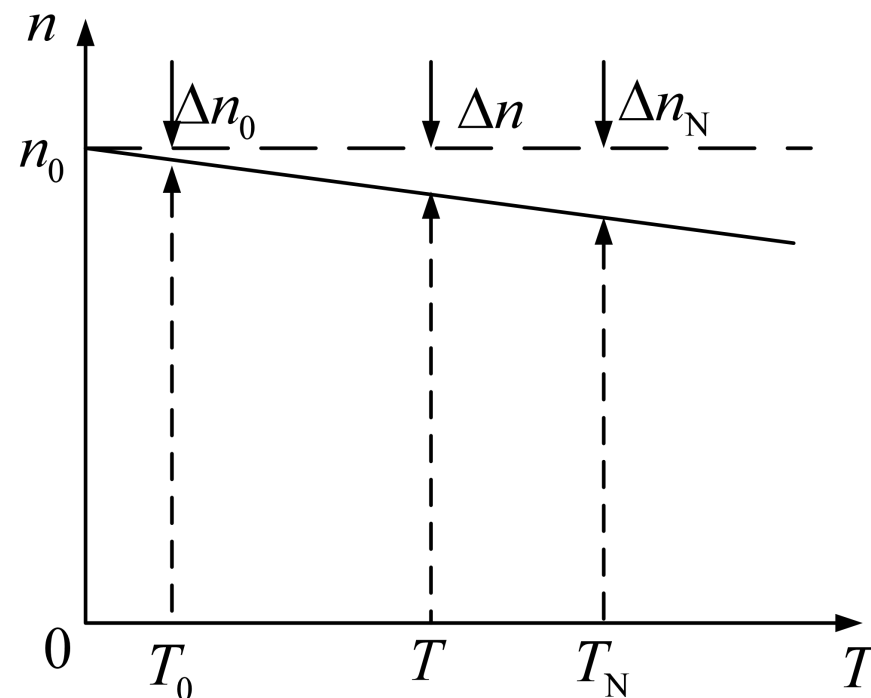
$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_{em} = n_0 - \beta T_{em}$$

理想空载转速: $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$

实际的空载转速: $n'_0 = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_0$

负载转矩为 T 时的转速降: $\Delta n = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = \beta T$

β -机械特性曲线的斜率



他励直流电动机的机械特性

转速的统一形式: $n = n_0 - \beta T$ 或 $n = n_0 - \Delta n$



一、固有机机械特性

固有机机械特性：当电枢上加额定电压 $U=U_N$ 、气隙每极磁通为额定磁通 $\Phi=\Phi_N$ 、电枢回路不串任何电阻 $R=R_a$ 时的机械特性。

固有机机械特性方程式：

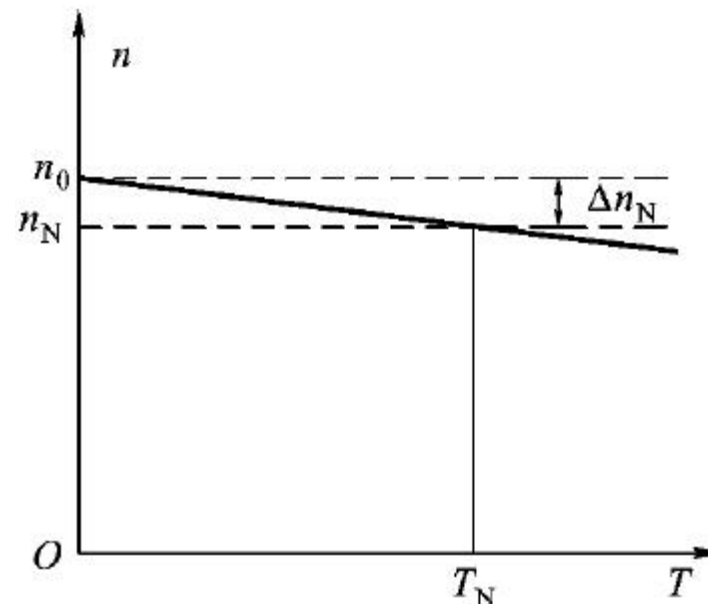
$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

(1) 由于 R_a 很小，斜率 $\beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2}$ 很小，特性较平，习惯上称为硬特性。

(2) 当 $T=0$ 时， $I_a=0$ ， $E_a=U_N$

(3) 当 $T=T_N$ 时， $n=n_N$

额定转速降： $\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta T_N$



他励电动机的固有机机械特性



二、人为机械特性

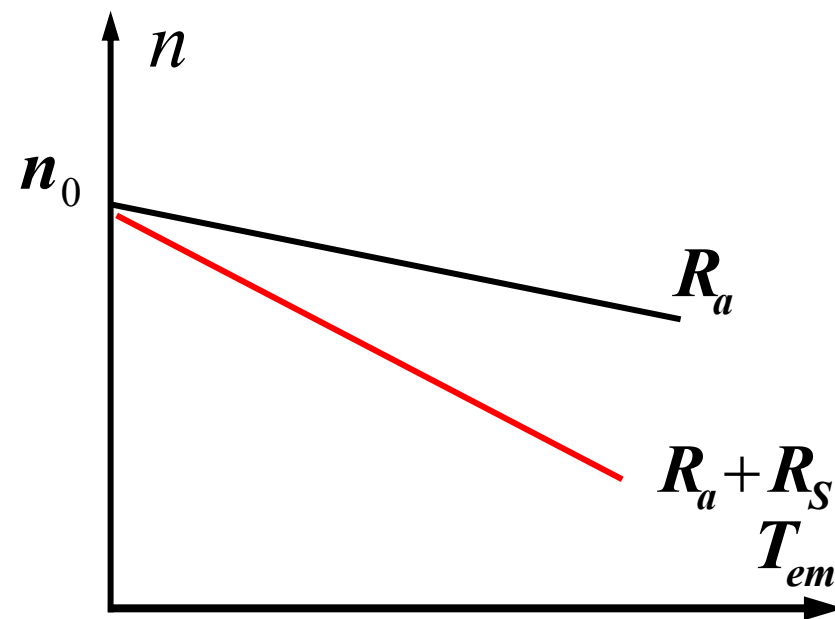
当改变 U 或 R_a 或 Φ 得到的机械特性称为**人为机械特性**。

1、电枢串电阻时的人为特性

保持 $U = U_N, \Phi = \Phi_N$ 不变, 只在电枢回路中串入电阻 R_S 的人为特性。

$$n = \frac{U_N}{C_E \Phi_N} - \frac{R_a + R_S}{C_E C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

特点: 1) n_0 不变, β 变大;
2) β 越大, 特性越软。



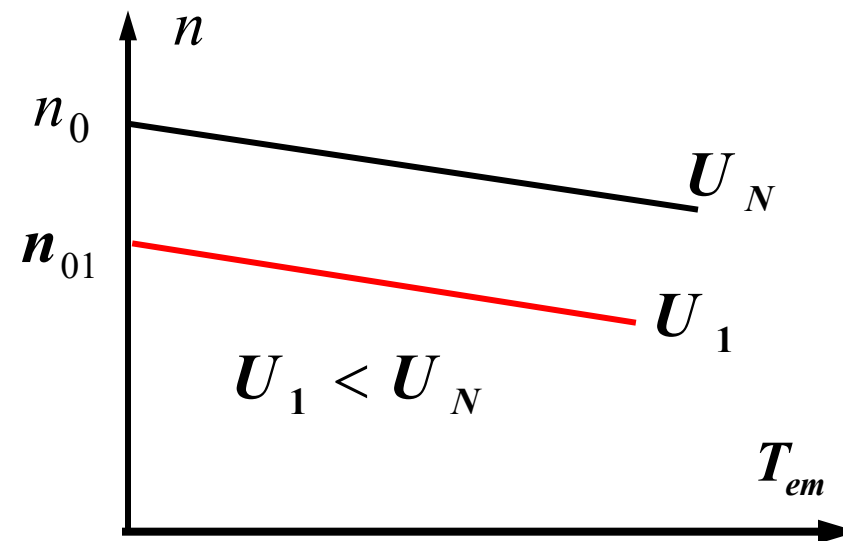
二、人为机械特性

2、降低电枢电压时的人为特性

保持 $R = R_a, \Phi = \Phi_N$ 不变, 只改变电枢电压时的人为特性:

$$n = \frac{U}{C_E \Phi_N} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

- 特点: 1) n_0 随 U 变化, β 不变;
2) U 不同, 曲线是一组平行线。



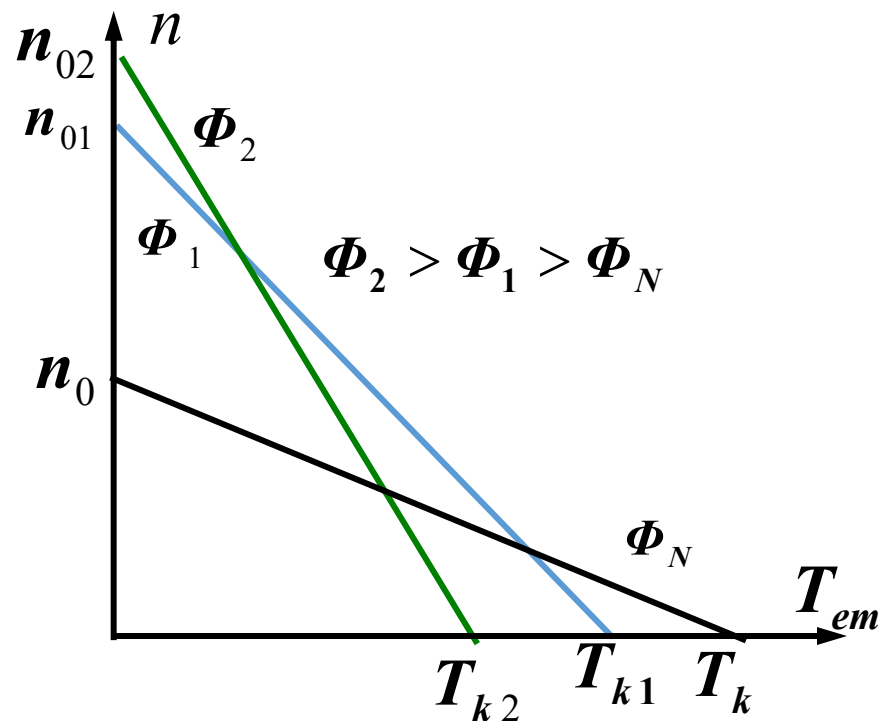
二、人为机械特性

3、减弱励磁磁通时的人为特性

保持 $R = R_a, U = U_N$ 不变, 只改变励磁回路调节电阻 R_{sf} 的人为特性:

$$n = \frac{U_N}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_{em}$$

特点: 1) 弱磁, n_0 增大;
2) 弱磁, β 增大



一、固有特性的求取

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

- 已知 P_N, U_N, I_N, n_N
- 求两点：理想空载点 ($T_{em}=0, n=n_0$) 和额定运行点 ($T_{em}=T_N, n=n_N$)。

计算固有机机械特性的具体步骤：

(1)估算 R_a : $R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$

(2)计算 $C_E \Phi_N$ 和 $C_T \Phi_N$: $C_E \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N}$

$$C_T \Phi_N = 9.55 C_E \Phi_N$$

二、人为特性的求取

- 在固有机机械特性方程 $n = n_0 - \beta T_{em}$ 的基础上，根据人为特性所对应的参数 R_s 或 U 或 Φ 变化，重新计算 n_0 和 β ，然后得到人为机械特性方程式。

(3)计算理想空载点: $T_{em} = 0, n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi_N}$

(4)计算额定工作点: $T_N = C_T \Phi_N I_N, n = n_N$



【例2.2.1】一台他励直流电动机的铭牌数据为 $P_N=5.5\text{kW}$, $U_N=110\text{V}$, $I_N=62\text{A}$, $n_N=1000\text{r/min}$. **求：**(1) 求固有机械特性方程式；(2) 实际空载转速 n_0

解：(1) 求固有机械特性方程式先估算 R_a

$$R_a = \frac{1}{2} \times \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} = \frac{1}{2} \times \frac{110 \times 62 - 5500}{62^2} \Omega = 0.172 \Omega$$

$$C_E \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{110 - 62 \times 0.172}{1000} = 0.099$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi_N} = \frac{110}{0.099} \text{ r/min} = 1111 \text{ r/min}$$

固有特性方程式为

$$n = n_0 - \beta T_{em} = (1111 - 1.84 T_{em}) \text{ r/min}$$

$$C_T \Phi_N = 9.55 C_E \Phi_N = 9.55 \times 0.099 = 0.945$$

$$\beta = R_a / (C_E \Phi_N \cdot C_T \Phi_N) = \frac{0.172}{0.099 \times 0.945} = 1.84$$



【例2.2.1】一台他励直流电动机的铭牌数据为 $P_N=5.5\text{kW}$, $U_N=110\text{V}$, $I_N=62\text{A}$, $n_N=1000\text{r/min}$. **求：**(1)求固有机械特性方程式；(2)实际空载转速 n'_0

(2)实际空载转速 n'_0

$$T_{emN} = C_T \Phi_N I_N = 0.945 \times 62 \text{N} \cdot \text{m} = 58.6 \text{N} \cdot \text{m}$$

额定负载转矩:

$$T_{LN} = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{5500}{1000} \text{N} \cdot \text{m} = 52.5 \text{N} \cdot \text{m}$$

空载转矩:

$$T_0 = T_{emN} - T_{LN} = (58.6 - 52.5) \text{N} \cdot \text{m} = 6.1 \text{N} \cdot \text{m}$$

实际空载转速:

$$n'_0 = n_0 - \beta T_0 = (1111 - 1.84 \times 6.1) \text{r/min} = 1100 \text{r/min}$$



【例2.2.2】一台他励直流电动机的铭牌数据为 $P_N=22\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=116\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$. 求: (1)求固有机械特性方程式; (2)电枢串入电阻 $R_s=0.7\Omega$ 时的人为特性; (3)电源电压降至 110V 时的人为特性; (4)磁通减弱至 $2/3\Phi_N$ 时的人为特性; (5)当负载转矩为额定转矩时, 要求电动机以 $n=1000\text{r/min}$ 的速度运转, 试问有几种可能的方案, 并分别求出它们的参数。

解: (1)固有特性方程式

$$R_a = \frac{2}{3} \times \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} = \frac{2}{3} \times \frac{220 \times 116 - 22000}{116^2} \Omega = 0.175 \Omega$$

$$C_E \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 116 \times 0.175}{1500} = 0.133 \quad C_T \Phi_N = 9.55 C_E \Phi_N = 9.55 \times 0.133 = 1.27$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi_N} = \frac{220}{0.133} \text{r/min} = 1654 \text{r/min} \quad \beta = R_a / (C_E \Phi_N \cdot C_T \Phi_N) = \frac{0.175}{9.55 \times 0.133^2} = 1.04$$

固有特性方程式为 $n = n_0 - \beta T_{em} = (1654 - 1.04 T_{em}) \text{r/min}$

理想空载点数据为 $T_{em} = 0 \quad n = n_0 = 1654 \text{r/min}$

额定工作点数据为 $n = n_N = 1500 \text{r/min} \quad T_{emN} = C_T \Phi_N I_N = 1.27 \times 116 \text{N} \cdot \text{m} = 147.3 \text{N} \cdot \text{m}$ 连接这两点, 得出固有特性



【例2.2.2】一台他励直流电动机的铭牌数据为 $P_N=22\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=116\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$. 求: (1)求固有机械特性方程式; (2)电枢串入电阻 $R_s=0.7\Omega$ 时的人为特性; (3)电源电压降至 110V 时的人为特性; (4)磁通减弱至 $2/3\Phi_N$ 时的人为特性; (5)当负载转矩为额定转矩时, 要求电动机以 $n=1000\text{r/min}$ 的速度运转, 试问有几种可能的方案, 并分别求出它们的参数。

(2)电枢串入电阻 $R_s=0.7\Omega$ 时的人为特性

$$n_0 = 1654\text{r/min} \text{ 不变, } \beta \text{ 增大为 } \beta' = (R_a + R_s) / 9.55(C_E \Phi_N)^2 = \frac{0.175 + 0.7}{9.55 \times 0.133^2} = 5.18$$

人为特性为 $n = (1654 - 5.18T_{em})\text{r/min}$

当 $T_{em} = T_N$ 时, 有 $n = (1654 - 5.18 \times 147.3)\text{r/min} = 891\text{r/min}$

(3)电源电压降至 110V 时的人为特性

$$\beta = 1.04 \text{ 不变, } n_0 \text{ 变为 } n'_0 = \frac{1}{2} \times 1654\text{r/min} = 827\text{r/min}$$

人为特性为 $n = (827 - 1.04T_{em})\text{r/min}$

当 $T_{em} = T_N$ 时, 有 $n = (827 - 1.04 \times 147.3)\text{r/min} = 674\text{r/min}$



【例2.2.2】一台他励直流电动机的铭牌数据为 $P_N=22\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=116\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$. 求: (1)求固有机械特性方程式; (2)电枢串入电阻 $R_s=0.7\Omega$ 时的人为特性; (3)电源电压降至 110V 时的人为特性; (4)磁通减弱至 $2/3\Phi_N$ 时的人为特性; (5)当负载转矩为额定转矩时, 要求电动机以 $n=1000\text{r/min}$ 的速度运转, 试问有几种可能的方案, 并分别求出它们的参数。

(4)磁通减弱至 $2/3\Phi_N$ 时的人为特性

$$n \text{ 和 } \beta \text{ 均发生变化, 有 } n_0'' = \frac{U_N}{\frac{2}{3}C_E\Phi_N} = \frac{220}{\frac{2}{3} \times 0.133} \text{ r/min} = 2481 \text{ r/min} \quad \beta'' = \frac{R_a}{9.55 \times (\frac{2}{3}C_E\Phi_N)} = \frac{0.175}{9.55 \times \frac{2}{3} \times 0.133} \text{ r/min} = 2.33 \text{ r/min}$$

$$\text{人为特性为 } n = (2481 - 2.33T_{em}) \text{ r/min} \quad \text{当 } T_{em} = T_N \text{ 时, 有 } n = (2481 - 2.33 \times 147.3) \text{ r/min} = 2138 \text{ r/min}$$

(5)当负载转矩为额定转矩时, 要求电动机以 $n=1000 \text{ r/min}$ 的速度运转, 可采用电枢串电阻或降低电源电压的方法来实现。

当电枢回路串入 R_s 时, β 变化, $n=1000 \text{ r/min}$ 、 $T_N=147.3\text{N.m}$ 代入机械特性 $1000 = 1654 - \beta''' \times 147.3$ 得 $\beta'''=4.44$

应串入的电阻值为 $R_s = 9.55(C_E\Phi_N)^2\beta''' - R_a = (9.55 \times 0.133^2 \times 4.44 - 0.175)\Omega = 0.575\Omega$

当电压下降时 $1000 = \frac{U}{0.133} - 1.04 \times 147.3$

解得电压应降至 $U=153.4 \text{ V}$



小结

机械特性

1、机械特性 $E_a = C_e \Phi n$ $T_{em} = C_T \Phi I_a$ $U = E_a + R I_a$

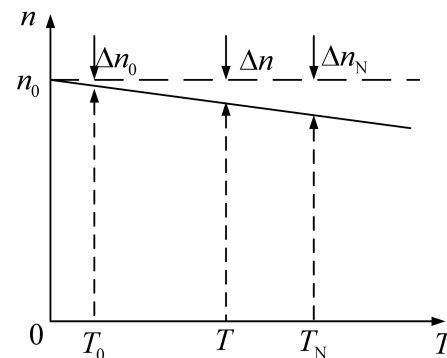
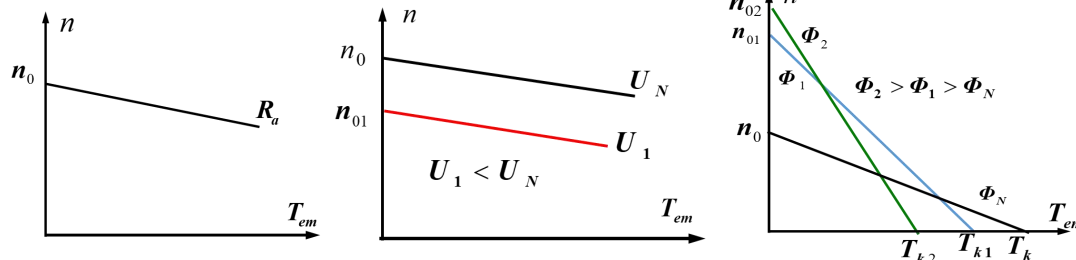
$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_{em} = n_0 - \beta T_{em}$$

理想空载转速、实际空载转速、转速降

2、固有：电压为额定电压，磁通为额定磁通，电枢回路不串任何电阻

人为

串电阻
降电压
弱磁通



他励直流电动机的机械特性

3、机械特性求取

- (1) 估算 R_a : $R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$
- (2) 计算 $C_E \Phi_N$ 和 $C_T \Phi_N$: $C_E \Phi_N = \frac{U_N - R_a I_N}{n_N}$ $C_T \Phi_N = 9.55 C_E \Phi_N$
- (3) 计算理想空载点: $T_{em} = 0, n_0 = \frac{U_N}{C_E \Phi_N}$
- (4) 计算额定工作点: $T_N = C_T \Phi_N I_N, n = n_N$

二、人为特性的求取

➤ 在固有机机械特性方程 $n = n_0 - \beta T_{em}$ 的基础上，根据人为特性所对应的参数 R_s 或 U 或 Φ 变化，重新计算 n_0 和 β ，然后得到人为机械特性方程式。