



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

1、**起动**：电动机接通电源后，从静止状态加速到所要求的稳定转速的过程。

电动机

起动的条件为： $T_{st} > T_L$
 T_{start} 动力大于阻力

✓ $U = E_a + I_a R_a$
额定 $= C_e \Phi n + I_a R_a$

2、**思考**：起动时，可以在电枢绕组上加额定电压起动吗？

直接起动时：
$$I_{st} = \frac{U_N - E_{ast}}{R_a} = \frac{U_N}{R_a} \approx (10 \sim 20) I_N$$

当 $n=0$ ，则电压全在 R_a 上，则 I_a 为启动电流
➤ 起动时由于转速为零，电枢电动势为零，而且电枢电阻很小，所以启动电流将达很大值。
 $I_{st} = I_a = \frac{U}{R_a}$
非常大。

3、**过大启动电流的危害**：

故不能直接启动直流电机

- (1) **换向困难**：产生强烈火花，甚至烧毁换向器。
- (2) **损坏传动系统**：产生过大的启动转矩，对传动机构产生强烈冲击，导致传动系统部件的损坏。
- (3) **损坏电枢绕组**：在电枢绕组中产生过大的电动应力，会损坏电枢绕组，同时引起绕组发热导致绝缘损坏。
- (4) **造成电网电压波动大**：一方面影响同一电网上运行的其它设备正常运行，另一方面可能引起电源开关跳闸。

为了限制启动电流，他励直流电动机通常采用电枢回路串电阻或降低电枢电压启动。

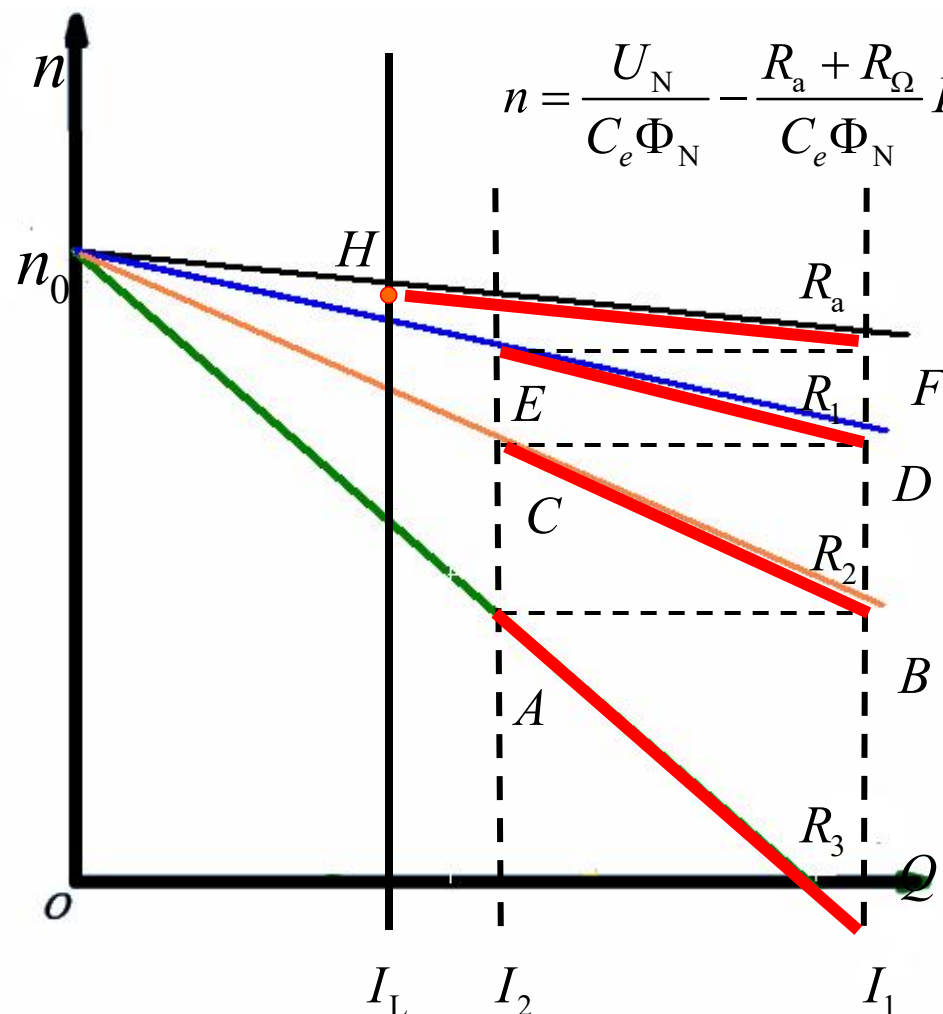
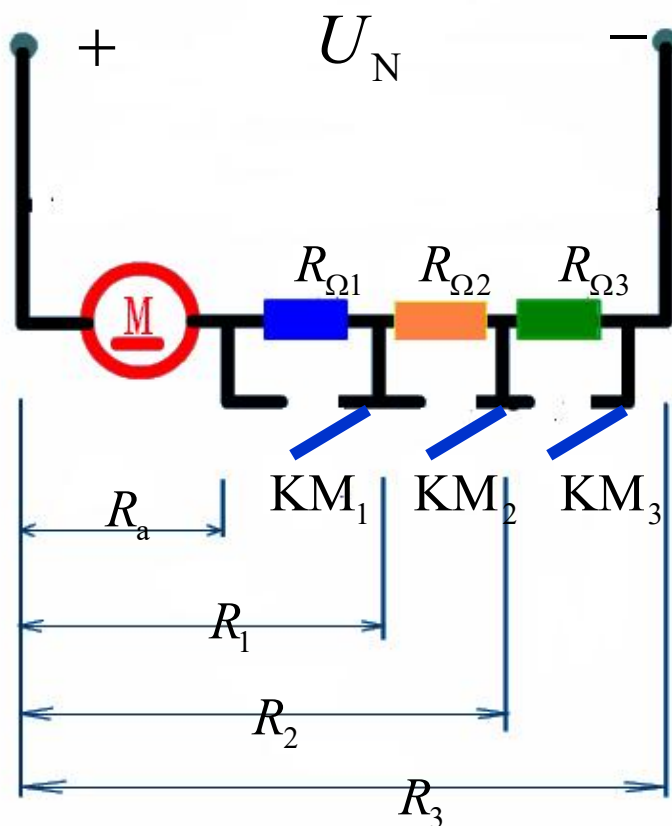
减小 $I_{st} = \frac{U}{R_a}$
 ① 减小 U
 ② 串 R_a



一、分级启动过程分析

启动时，在电枢回路内串入适当的外加电阻，用来限制启动时的启动电流，等电动机转速升高， E_a 上升，再逐步切除外加电阻，直到电动机达到要求的转速。

原理图



交点很近， I_a 很大

机械特性



二、启动最大电流 I_1 和切换电流 I_2 的选择01 电流 I_1

I_1 应不超过电动机容许的最大电流 $I_{1\max}$ ，即

$$I_1 \leq I_{\max} = (2 \sim 2.5) I_N$$

02 电流 I_2

I_2 应兼顾启动的快速性和设备的经济性，选择为

$$I_2 = (1.1 \sim 1.2) I_N$$

03 电流比

为使启动时加速度均匀，分级中每一级的 I_1 和 I_2 相同：

$$\beta = \frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

其中 β 称为启动电流比（或启动转矩比）



三、启动电阻的要求

启动转矩

- 要求启动转矩大；
- 但不能过大。

最大电流

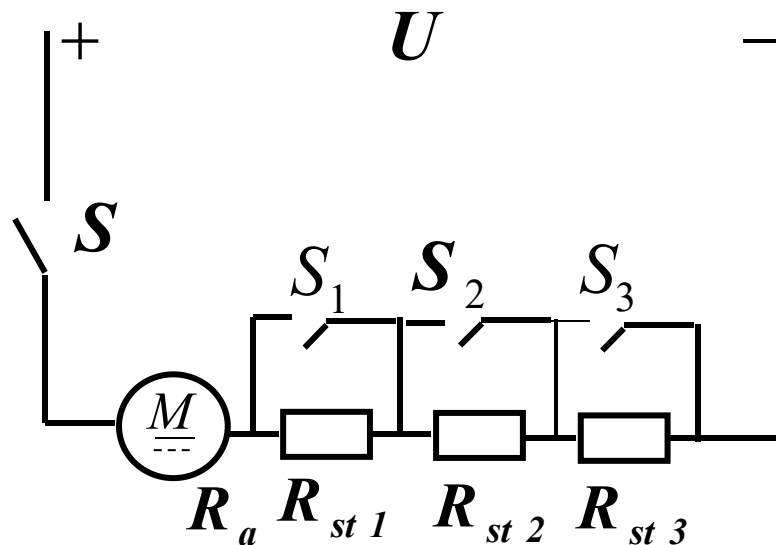
- 约为额定电流的2~2.5倍。

启动电阻段数

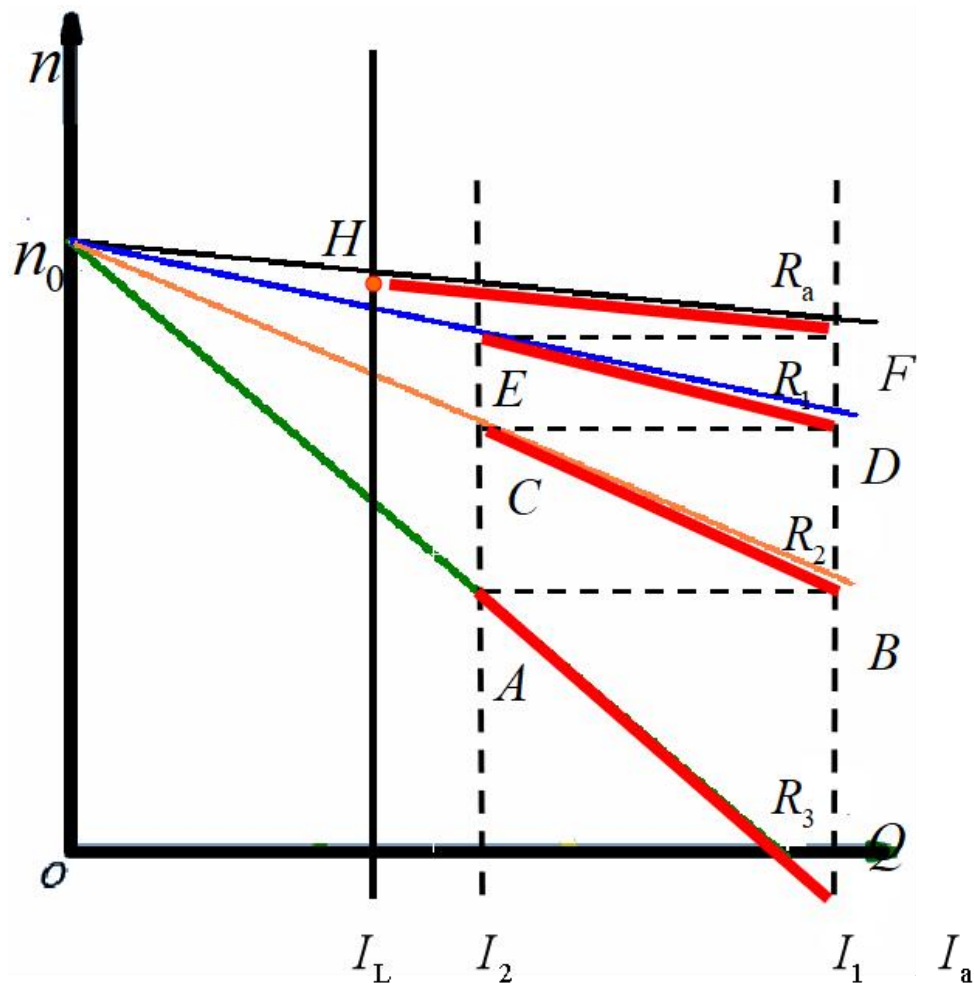
- 不能过少（启动过程的快速性、平滑性要受到影响）；
- 不能过大（设备的经济性、可靠性受到影响）；
- 一般为3~4段。

平滑和快速

- 为尽可能平滑和快速启动要求各启动电阻都对应相同的最大电流 I_1 和切换电流 I_2 。



四、启动电阻的计算步骤



$$n_A = n_B$$

$$U = I R + E \quad E = C_e \Phi n$$

$$n = (U - I R) / C_e \Phi$$

$$(U - I_2 R_3) / C_e \Phi = (U - I_1 R_2) / C_e \Phi$$

$$I_1 / I_2 = R_3 / R_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_3}{R_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_1}{R_a} = \beta$$

$$R_1 = \beta R_a; \quad R_2 = \beta R_1 \quad R_3 = \beta R_2$$

$$R_{\Omega 1} = R_1 - R_a; \quad R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 \quad R_{\Omega 3} = R_3 - R_2$$



四、启动电阻的计算步骤

1、启动级数 m 为已知

(1) 根据 $I_1 = (2 \sim 2.5)I_N$, 选择 I_1 ;

(2) 计算最大启动电阻 R_m , $R_m = \frac{U}{I_1}$;

(3) 计算 β , $\beta = \left(\frac{R_m}{R_a} \right)^{\frac{1}{m}}$;

(4) 计算各级启动电阻及外串电阻:

$$R_1 = \beta R_a; \quad R_2 = \beta R_1 \quad R_3 = \beta R_2$$

$$R_{\Omega 1} = R_1 - R_a; \quad R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 \quad R_{\Omega 3} = R_3 - R_2$$

2、启动级数 m 为未知

(1) 选 I_1 、 I_2 、 β 初值;

(2) 计算最大启动电阻 R_m , $R_m = \frac{U}{I_1}$;

(3) 计算 m , $m = \frac{\lg \frac{R_m}{R_a}}{\lg \beta}$ 。若求得 m 为小数, 则取邻近较大整数。

(4) 将计算所得 m 代入式 $\beta = \left(\frac{R_m}{R_a} \right)^{\frac{1}{m}}$ 修正 β 和 I_2 ;

(5) 计算各级启动电阻及外串电阻。



例：一台他励直流电动机铭牌数据为： $P_N = 22\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 120\text{A}$ ， $n_N = 600\text{r/min}$ ， 求起动电阻。

解：因起动级数 m 未知，按第二种情况进行起动电阻的计算

$$(1) \text{ 初选 } I_1、I_2、\beta : I_1 = 2I_N = 2 \times 120\text{A} = 240\text{A} \quad I_2 = 1.2I_N = 1.2 \times 120\text{A} = 144\text{A} \quad \beta = I_1/I_2 = 240/144 = 1.667$$

$$(2) \text{ 计算最大起动电阻 } R_m: R_m = U_N/I_1 = 220/240 = 0.917\Omega$$

$$(3) \text{ 计算 } m: m = \lg \frac{R_m}{R_a} / \lg \beta$$

$$\text{先估算 } R_a, \text{ 认为 } P_{cu} = I_N^2 R_a = P_{Fe}, \text{ 又 } P_{cu} + P_{Fe} = U_N I_N - P_N, \text{ 得 } R_a = \frac{1}{2} \left(\frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2} \right) = 0.153$$

$$\text{故: } m = \lg(0.917/0.153) / \lg 1.667 = 3.504$$

$$\text{取 } m=4, \text{ 修正 } \beta, I_2, \text{ 则: } \beta = \left(\frac{R_m}{R_a} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.917}{0.153} \right)^{\frac{1}{4}} = 1.816 \quad I_2 = I_1/\beta = 240/1.816 = 132.16\text{A} < 1.2I_N$$

且 $I_2 > 1.1I_N$ ，故 I_2 符合要求

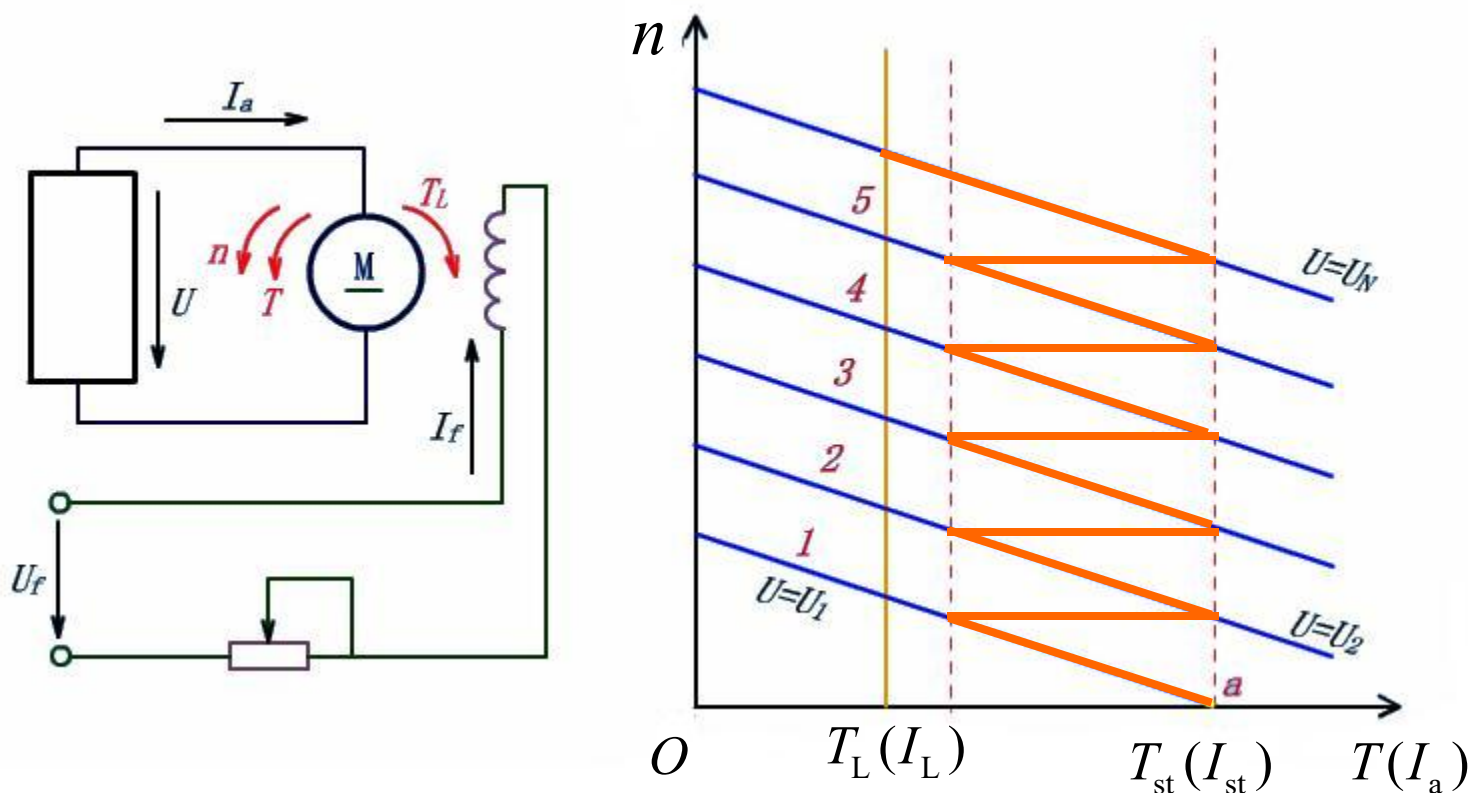
$$R_1 = \beta R_a = 0.278; \quad R_2 = \beta R_1 = 0.505; \quad R_3 = \beta R_2 = 0.917$$

$$(4) \text{ 计算各级起动电阻及外串电阻: } R_{\Omega 1} = R_1 - R_a = 0.125; \quad R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 = 0.227; \quad R_{\Omega 3} = R_3 - R_2 = 0.412$$



➤ 当直流电源电压可调时，可采用降压方法启动。

启动时，降低电源电压使得 $I_{st}=(2\sim 2.5)I_N$ ，随着电机转速的升高， E_a 上升，电流下降，再逐步增加电源电压，始终保证启动的全过程中 I_{st} 不超过允许值。



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

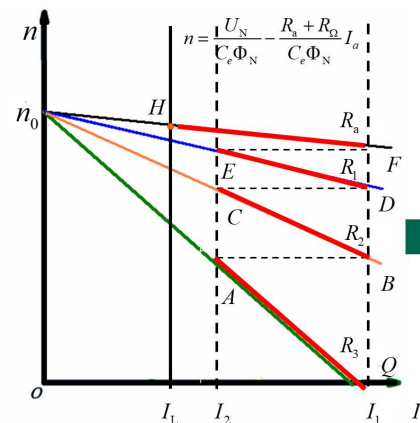
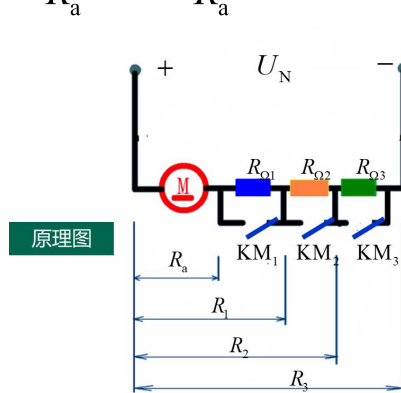
降压启动需专用电源，设备投资较大，但它启动平稳，启动过程能量损耗小，因此得到广泛应用。



小结

起动的条件为 $T_{st} > T_L$ $I_{st} = \frac{U_N - E_{ast}}{R_a} = \frac{U_N}{R_a} \approx (10 \sim 20) I_N$ 如何降低 I_{st} ? \longrightarrow 降U, 增R

原理



$$I_1 \leq I_{max} = (2 \sim 2.5) I_N$$

$$I_2 = (1.1 \sim 1.2) I_N$$

$$\beta = \frac{I_1}{I_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

起动
(他励)

电枢回路串
电阻起动

起动电阻计算

起动级数m已知

起动级数m未知

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

降低电枢电
压起动

