

直流电动机的启动和反转

启动的要求

$$U = E + I_a R_a$$

启动最初，启动电流 I_s 较大，因为此时 $n=0$ ， $E_a=0$ 。如果电枢电压为额定电压 U_N ，因为 R_a 很小，则启动电流可达额定电流的10~20倍。这样大的启动电流会使换向恶化，产生严重的火花；与电枢电流成正比的电磁转矩过大，对生产机械产生过大的冲击力。因此启动时需限制启动电流的大小。

启动的方法

电枢回路串电阻启动
降压启动

直流电动机的反转

由电磁转矩公式可知，欲改变电磁转矩的方向，只需改变励磁磁通方向或电枢电流方向即可。所以，改变直流电动机转向的方法有两个：

保持电枢绕组两端极性不变，将励磁绕组反接。

保持励磁绕组极性不变，将电枢绕组反接。

他励直流电动机的启动

系统启动的要求

他励直流电动机启动时，为了产生较大的启动转矩及不使启动后的转速过高，应该满磁通启动，即励磁电流为额定值，每极磁通为额定值。因此启动时励磁回路不能串电阻。而且绝对不允许励磁回路出现断路。

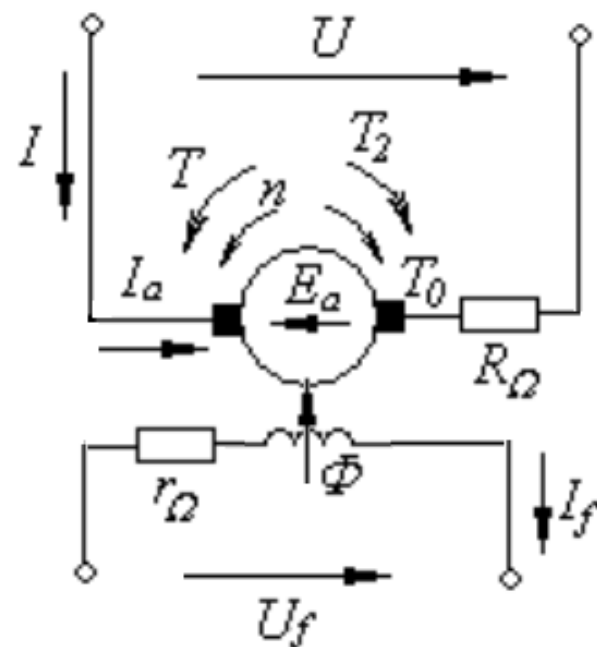
他励直流电动机的启动

一、启动方法

电动机接通电源后，转速从零上升到稳态转速的过程，称为启动过程。

启动初瞬， $n = 0$ ， $E_a = 0$ ，故此时的电枢电流（称为启动电流）为：

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_\Omega} \Rightarrow I_{st} = \frac{U}{R_a + R_\Omega}$$



他励直流电动机的起动

直接起动

如果起动时， $U = U_N$ ， $R\Omega = 0$ ，称为直接起动。

直接起动的起动电流为：

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$$

由于电枢绕组电阻 R_a 很小，故直接起动时冲击电流很大，可达 $(10 \sim 20) I_N$ ，这将产生三个方面的影响：

- 对电机本身，可能引起换向“环火”；
- 引起供电电网的电压下降，影响接于同一电网上的其他电气设备的正常运行；
- 起动转矩也达到额定值的 $10 \sim 20$ 倍，对传动机构造成机械冲击。

故除小容量电动机外，直流电机是不允许直接起动的。

他励直流电动机的启动

启动要求：

- 1) 满足 T_{st} 足够大的条件下，尽量减少 I_{st}
一般要求 $I_{st} = (1.5 \sim 2.0) I_N$ 。
- 2) 启动时必须保证励磁绕组先通电，且 $I_f = I_{fN}$ ，实现满磁通启动。
始终在磁场的保护下

这是为了产生较大的启动转矩及不使启动后的转速过高。

在有磁场的先决条件下，为限制启动电流，有两种方法：

- 1、降压启动；
- 2、电枢回路串电阻启动。

他励直流电动机的启动

1、降压启动

启动时降低端电压 U ，使启动电流减小：

$$I_{st} = \frac{U}{R_a}$$

实现在不大的启动电流下使电动机顺利启动。

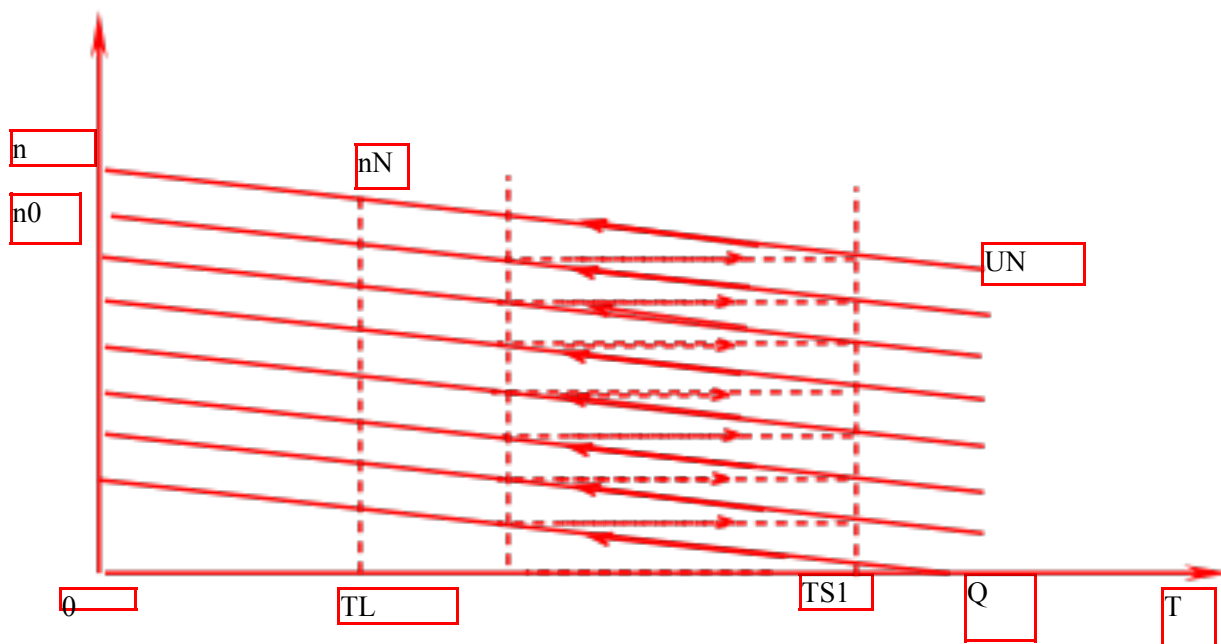
随着转速的升高，反电动势增大，电枢电流下降，这时可以逐渐提高端电压直至额定值。

优点：启动过程平滑，启动过程中能量损耗少。

缺点：需要专用的直流发电机或整流电源，投资费用大。

降压启动

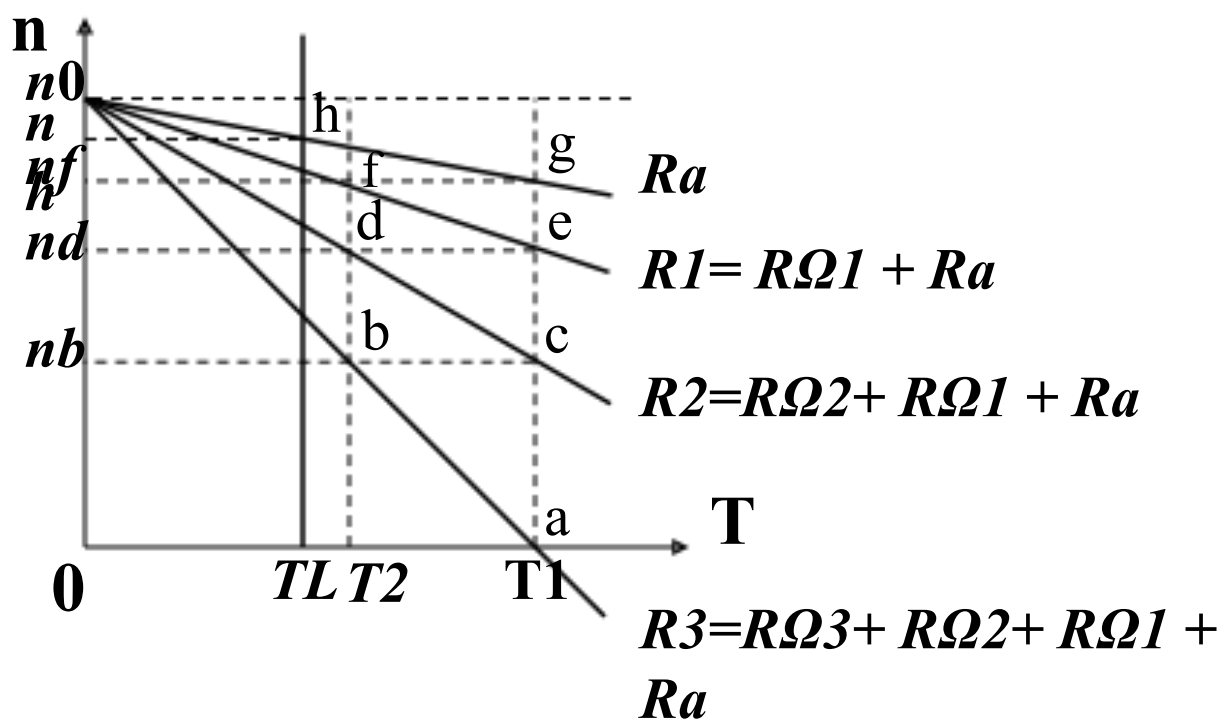
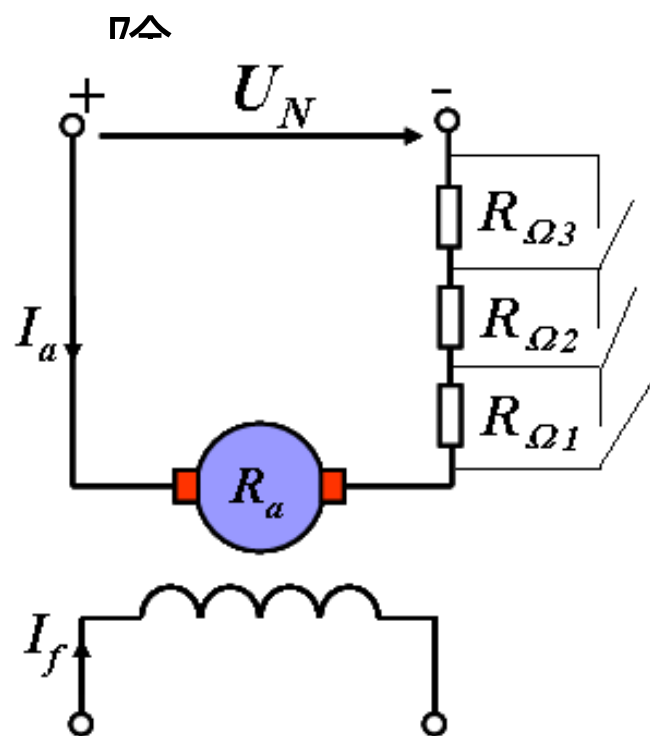
当他励直流电动机的电枢回路由专用的可调压直流电源供电时，可以采用降压启动的方法。启动电流将随电枢电压降低的程度成正比地减小。启动前先调好励磁，然后把电源电压由低向高调节，最低电压所对应的人为特性上的启动转矩 $T_{s1} > T_L$ 时，电动机就开始启动。启动后，随着转速上升，可相应提高电压，以获得需要的加速转矩，启动过程的机械特性如图所示



他励直流电动机的启动

2、电枢回路串电阻启动

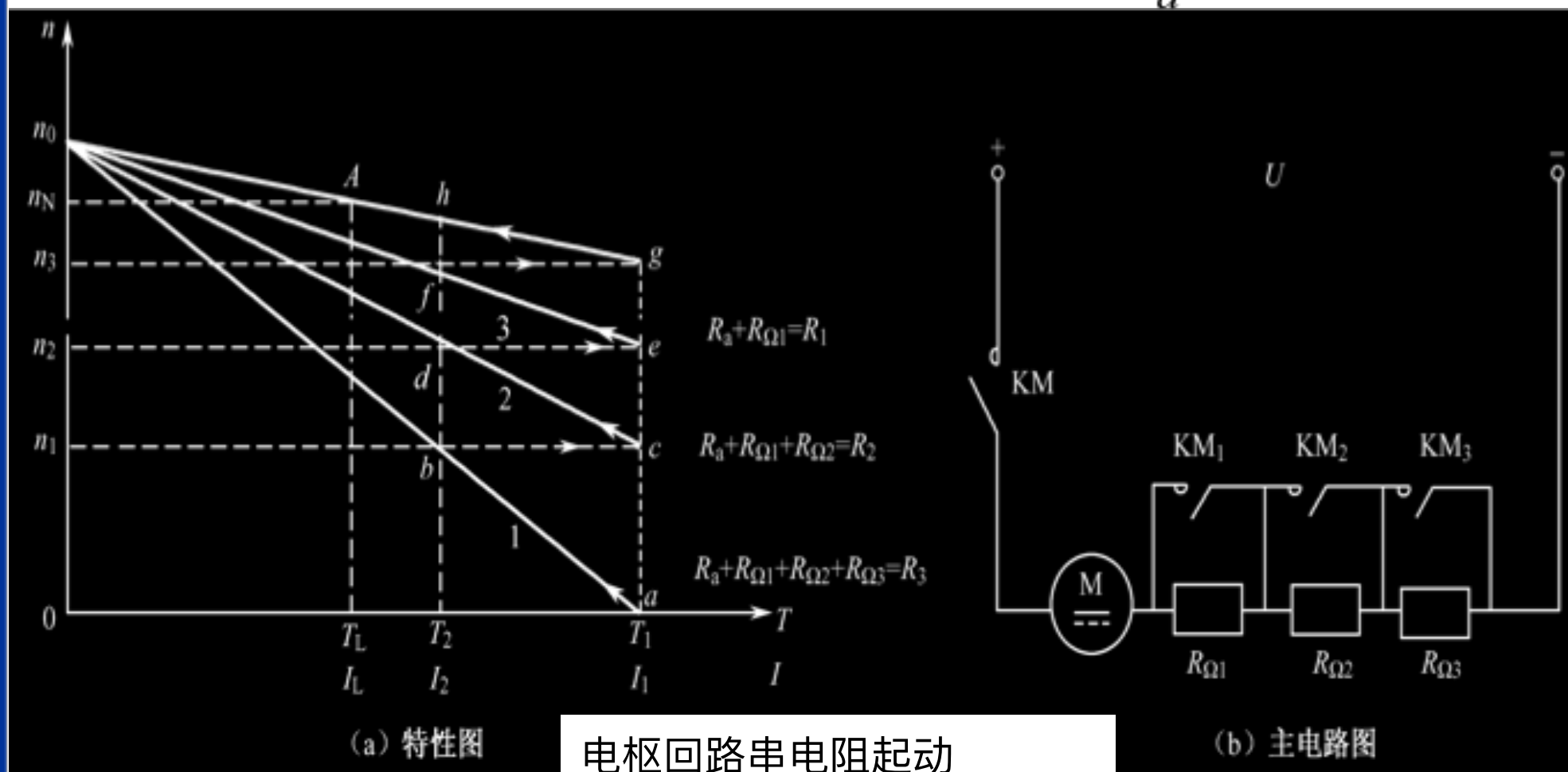
启动时, $U=U_N$, 电枢回路中串入电阻 R_Ω , 使启动电流 I_{st} 降低。在启动过程中外串电阻 R_Ω 逐段切



起动方法

电枢回路串电阻起动

电枢回路串电阻 R ，起动电流为
$$I_s = \frac{U_N}{R_a + R}$$



电枢回路串电阻启动

1) 分级启动电阻的计算

(不需要)

设对应转速 n_1 、 n_2 和 n_3 时，电动势分别为 E_{a1} 、 E_{a2} 和 E_{a3}

则有：

$$b \text{ 点 } R_3 I_2 = U_N - E_{a1}$$

$$c \text{ 点 } R_2 I_1 = U_N - E_{a1}$$

$$d \text{ 点 } R_2 I_2 = U_N - E_{a2}$$

$$e \text{ 点 } R_1 I_1 = U_N - E_{a3}$$

$$f \text{ 点 } R_1 I_2 = U_N - E_{a3}$$

$$g \text{ 点 } R_a I_1 = U_N - E_{a3}$$

2) 计算各级启动电阻的步骤

- (1) 估算或测出电枢回路电阻 R_a ;
- (2) 根据过载倍数选取最大转矩 T_1 对应的最大电流 I_1 ;
- (3) 选取启动级数 m ; $\beta = \sqrt[m]{\frac{U_N}{I_1 R_a}}$
- (4) 计算启动电流比: β , m 取整数;
- (5) 计算转矩: $T_2 = T_1 / \beta$ 校验 $T_2 \geq (1.1 \sim 1.2) T_1$; 如果不满足, 应另选 T_1 或值 m 并重新计算, 直到满足该条件为止;
- (6) 计算各级启动各级电阻和分段电阻。

他励直流电动机的起动

二、起动过渡过程

不稳

一个稳定的电力拖动系统，对其施加作用或有外界干扰时，将从稳态经过一段时间过渡到另一稳态，中间过程称为过渡过程。

在过渡过程中，转速、电枢电流、电磁转矩等物理量都随时间变化，需要采用 $n=f(t)$ 、 $I_a=f(t)$ 、 $T=f(t)$ 等动态特性。以示区别，称 $n=f(T)$ 为静态特性。

引起过渡过程的外因是电机的参数或负载的变化，内因是由于有惯性。他励直流电动机拖动系统中存在的惯性主要有：

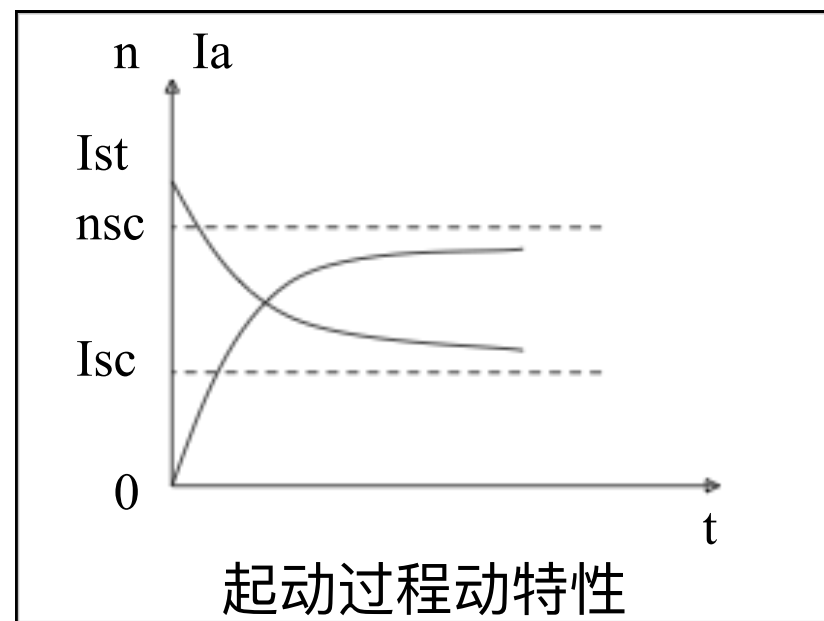
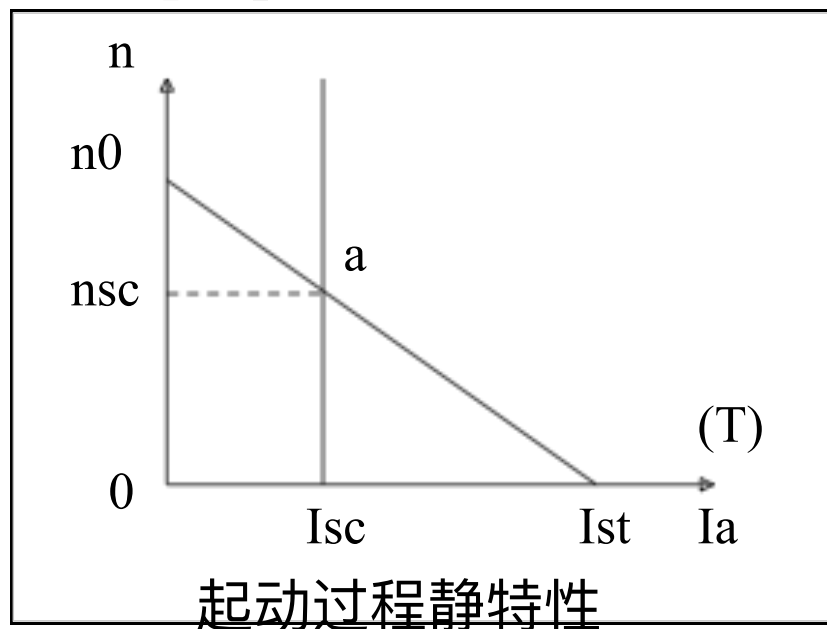
- 1) 机械惯性——反映在GD²上，使转速不能突变；
- 2) 电枢回路的电磁惯性——反映在电枢回路的电感上，使电流不能突变。

他励直流电动机的启动

(1) 动态特性 (只考虑机械惯性时的情况) $T_M \frac{dn}{dt} + n = n_L$

$$n = n_{sc} + (n_{st} - n_{sc})e^{-\frac{t}{T_M}}$$
$$I_a = I_{sc} + (I_{st} - I_{sc})e^{-\frac{t}{T_M}}$$

式中, n_{st} 、 I_{st} 代表起始值, n_{sc} 、 I_{sc} 代表稳态值, T_M 称为机电常数[秒]。



他励直流电动机的起动

(2) 过渡过程时间（只考虑机械惯性时的情况）

T_M ：转速以 $\frac{dn}{dt}|_{t=0}$ 的加速度直线上升，达到稳态转速时所需的时间。

$$T_M = \frac{GD^2(R_a + R_{st})}{375C_e C_T \Phi^2}$$

实际起动过程中的加速度是 $\frac{dn}{dt} = \frac{n_{sc}}{T_M} e^{-\frac{t}{T_M}}$ ，不是常数。

从起点到任一点x所需的起动时间为：

$$t = T_M \ln \frac{n_{st} - n_{sc}}{n_x - n_{sc}} = T_M \ln \frac{I_{st} - I_{sc}}{I_x - I_{sc}}$$

由公式，如果计算到稳态的时间， $n_x = n_{sc}$ ，所需时间为无穷长。但工程上认为， $n_x = (0.95 \sim 0.98)n_{sc}$ 时就已进入稳态。所以起动时间 $t = (3 \sim 4)T_M$ 。

他励直流电动机的起动

缩短过渡过程的途径

$$\frac{dn}{dt} = \frac{T - T_L}{\frac{GD^2}{375}}$$

1、减小系统的GD²。

在容量、转速满足要求的前提下，选细长的电机，或用双电机拖动。

2、保持系统在过渡过程中有最大的加速转矩（动态转矩）。

在过渡过程中，始终保持 $I_a = I_{st}$ ，即 $T = T_{st}$ ，待起动结束后再令 $I_a = I_{sc}$ 。

