



第4章 直流电动机的运行





- 一. 他励直流电动机的启动
- 二. 他励直流电动机的调速
- 三. 他励直流电动机的电动与制动运行
- 四. 直流拖动系统的过渡过程



- 一. 他励直流电动机的启动
- 二. 他励直流电动机的调速
- 三. 他励直流电动机的电动与制动运行
- 四. 直流拖动系统的过渡过程



一. 他励直流电动机的启动

本节学习要点：

1. 熟悉起动的概念及对起动的基本要求
2. 掌握他励直流电动机的起动方法及特点



启动的概念

启动： 电动机组（电动机 生产机械）从**静止**到**稳定运行**的过程。

基本要求：

机械方面：

有足够大的启动转矩，以克服摩擦转矩、惯性转矩以及负载转矩。

$$T_s = C_t \Phi I_s \quad I_s \text{ 足够大}$$

电路方面：

启动电流限制在允许的范围內。

$$n = 0, E_a = 0 \quad I_s = \frac{U_N - E_a}{R_a} = \frac{U_N}{R_a} \quad (\text{冲击电流})$$

限制： $I_s = (1.5 \sim 2) I_N$



1、直接启动

将电机电枢直接接在额定电压的电源上启动。

优点：设备简单，操作方便，起动转矩大。

缺点：（1）起动电流（冲击电流）大。

起动时 $n = 0 \Rightarrow E_a = 0 \Rightarrow I_s = \frac{U_N}{R_a} = (10 \sim 20) I_N$

（2）引起电源电压突然降低，影响电源上其他用户。

（3）电枢绕组发热、换向恶化、火花、电磁力冲击。

（4）过大的转矩冲击将使拖动系统的传动机构受损。

除了微型直流电机，由于自身电枢电阻较大，可以直接起动外，一般都不允许直接起动。

2、电枢回路串电阻启动

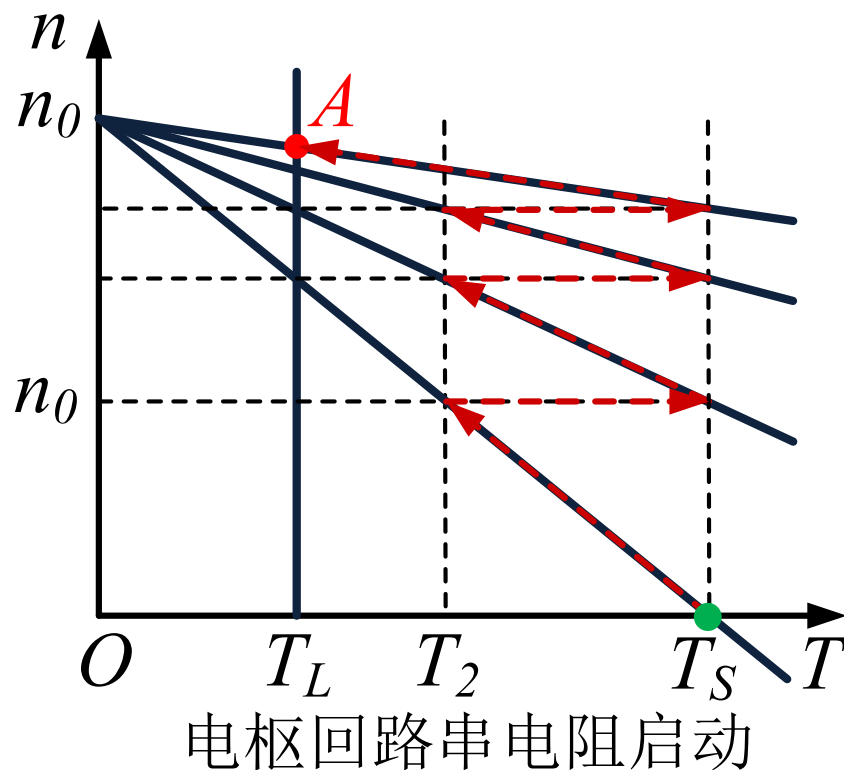
起动时在电枢回路串入变阻器以限制启动电流，待转速上升后再逐级切除启动电阻（分级启动）。

串电阻启动电流：

$$I_s = \frac{U_N}{R_a + R}$$

优点：设备简单，且始终保持较大的启动转矩。

缺点：启动电阻上有 I^2R 损耗。



3、降压启动

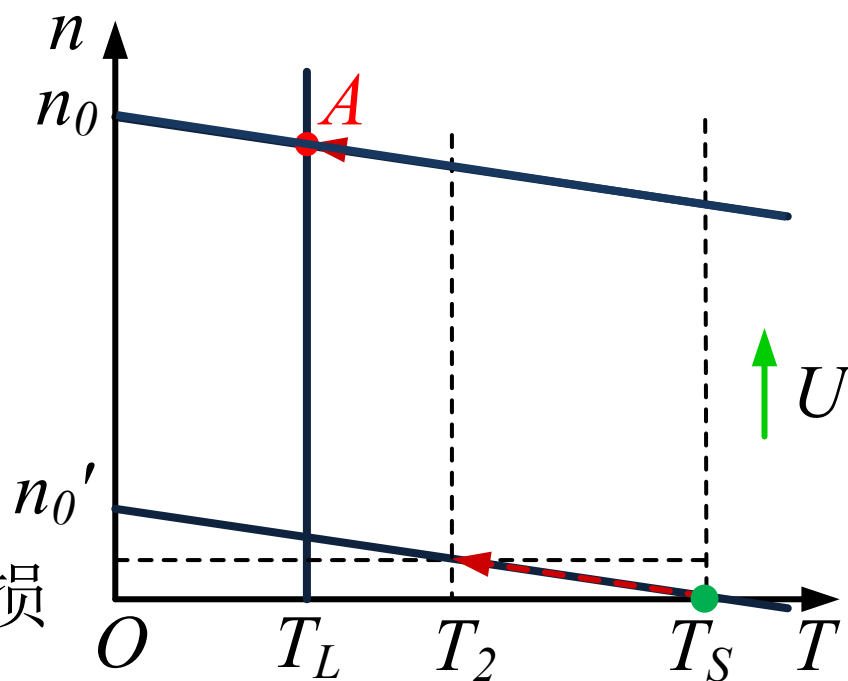
通过降低电机端电压来限制起动电流。

降低电压启动电流：

$$U \downarrow \left\{ \begin{array}{l} I_s = \frac{U}{R_a} \quad (1.5 \sim 2) I_N \\ T_s = C_t \Phi I_s = (1.5 \sim 2) T_N \end{array} \right.$$

优点：起动电流小，能量损耗小。

缺点：专用电源，系统复杂。





例题 4-1 某他励直流电动机数据： $P_N=96\text{kW}$ ， $U_N=440\text{V}$ ， $I_N=250\text{A}$ ， $n_N=500\text{ r/min}$ ， $R_a=0.078\Omega$ ，拖动额定大小恒转矩负载运行，忽略空载转矩。（1）若采用电枢回路串电阻启动，启动电流 $I_s=2I_N$ 时，计算应该串入的电阻值及启动转矩。（2）如采用降压启动，条件相同，求电压应该降至多少并计算启动转矩。

解题思路：

1) 求串电阻启动电阻，已知 I_s ，电压方程式： $U_N = I_s(R_s + R_a)$ ，求启动转矩，方法一： $T_s = C_t \Phi I_s$ ，额定点： $U_N = C_e \Phi n_N + I_N R_a$

$$\text{方法二： } T_s \approx 2T_{2N} = 9.55 \frac{P_N}{n_N}$$

2) 求降压启动电压，已知 I_s ，电压方程式： $U = I_s R_a$ 求启动转矩，方法与1)相同。



解：(1)电枢回路串电阻启动时，应串电阻：

$$R_s = \frac{U_N}{I_s} - R_a = \frac{440}{2 \times 250} - 0.078 = 0.802 \Omega$$

额定转矩：

$$T_N \approx 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{96 \times 10^3}{500} = 1833.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\begin{aligned} \text{另解：} T_N &= C_t \Phi I_N = 955 \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} I_N = 955 \frac{440 - 250 \times 0.078}{500} \times 250 \\ &= 2008 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\text{启动转矩：} T_2 = C_t \Phi I_s = C_t \Phi 2I_N = 2T_N = 3667 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 降压启动时，启动电压：

$$U_s = I_s R_a = 2 \times 250 \times 0.078 = 39 \text{ V}$$

$$\text{启动转矩：} T_2 = C_t \Phi I_s = C_t \Phi 2I_N = 2T_N = 3667 \text{ N} \cdot \text{m}$$



- 一. 他励直流电动机的启动
- 二. 他励直流电动机的调速**
- 三. 他励直流电动机的电动与制动运行
- 四. 直流拖动系统的过渡过程



二. 他励直流电动机的调速

本节学习要点：

1. 掌握直流电机三种**调速方法的原理**及特点
2. 掌握评价**调速方法的主要指标**



什么是调速？

调速：调节电动机的转速。

机械调速：通过改变传动机构速比的调试方法。

电气调速：通过改变电机参数而改变电动机的转速调速方法。

由直流电动机的电压平衡方程式，得：

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R)}{C_e \Phi}$$

参数二 参数一
参数三

实现方法：

1. 电枢回路串电阻调速
2. 降低电枢端电压调速
3. 减弱电机主磁通调速

1. 他励直流电动机的调速方法

电枢串电阻调速

方法：保持 $U = U_N$, $\Phi = \Phi_N$, 在电枢回路中串入不同电阻 R 。

特点：对于同一个负载转矩 T_L , $R \uparrow \rightarrow n \downarrow$, 且只能向 $n < n_N$ 的方向调。

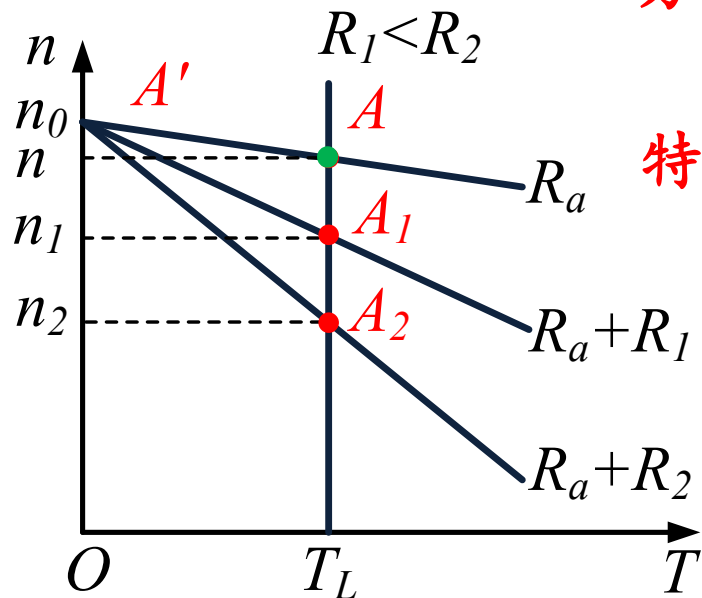
分级调速, 速度调节 **不平滑**。

空载或轻载时, 调速效果不明显。

低速时 (R 很大) 机械特性软, 负载变化时转速波动大, 所以 **调速范围不大**。

所串的调速电阻 R 上消耗的能量大, **调速时效率降低, 经济性差**。

应用：起重机、电车等



调速前后 T_L 不变, 故 I_a 不变,

$$P_1 = UI_a = \text{Constant}$$

$$P_2 \downarrow = T_2 \cdot \Omega \downarrow = T_2 \frac{2\pi n \downarrow}{60} \propto n \downarrow$$

$$\eta \downarrow = \frac{P_2 \downarrow}{P_1}$$

降低电源电压调速

方法：保持 $\Phi = \Phi_N$ 不变，在电枢回路中不串电阻 $R=0$ ，降低电枢端电压。

特点：对于同一个负载转矩 T_L ， $U \downarrow \rightarrow n \downarrow$ ，且只能向 $n < n_N$ 的方向调。

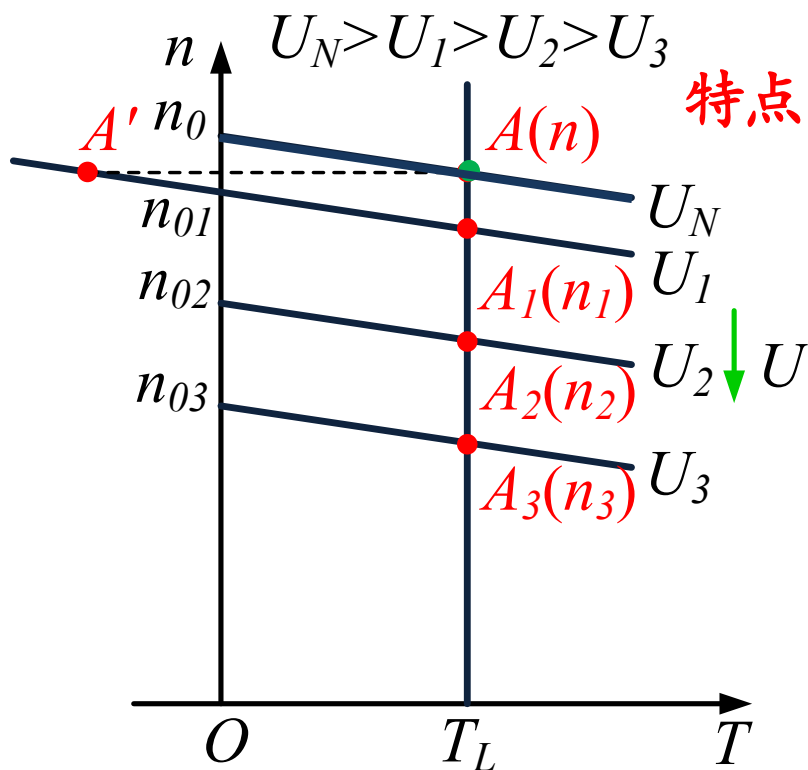
平滑地改变 U ，可实现 **无级调速**。

降压人为特性与固有特性平行，无论轻载或满载都有明显的调速效果。

机械特性硬度不变，负载变化时转速波动不大，静态稳定性好，调速范围大。

调速过程能量损失小。

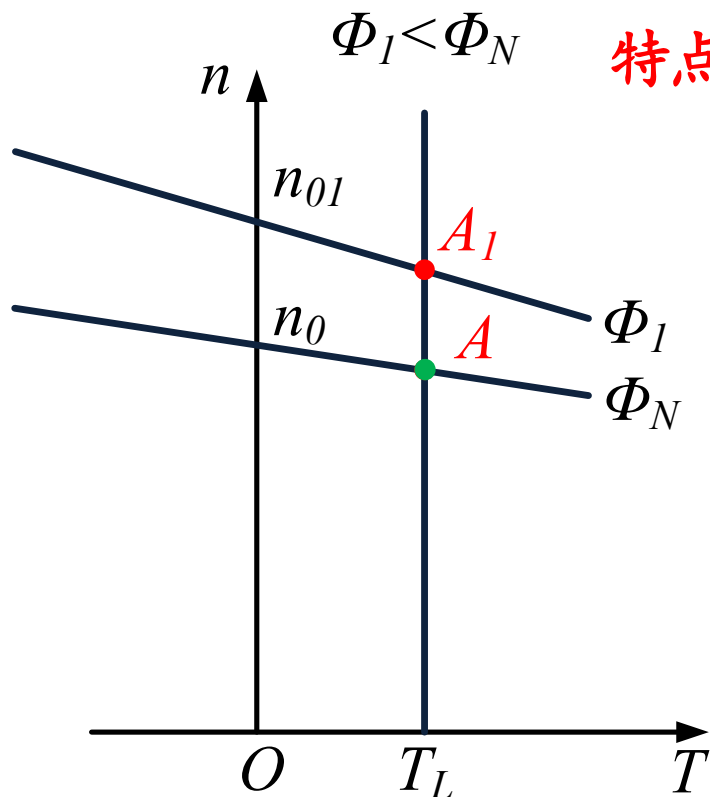
应用：龙门刨床、轧钢机等





弱磁调速

方法：保持 $U = U_N$ ，且 $R = 0$ ，减小 I_f 使主磁通 Φ 减小。



特点：对于同一个负载转矩 T_L ， $\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow$ ，且只能向 $n > n_N$ 的方向调。

在功率较小的励磁回路调节励磁电流，控制方便，可实现 无级调速。

因电机最高转速受机械强度与换向能力的限制，调速范围不大 ($1.2 \sim 2n_N$)，通常与调压调速结合以扩大调速范围。

励磁回路电阻容量小，调速过程能量损失小。

应用：适用于恒功率负载



例题 4-2 某台他励直流电动机： $P_N=22\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=115\text{A}$ ， $n_N=1500\text{ r/min}$ ， $R_a=0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩， 电动机带额定负载运行时， 要求把转速降到 1000r/min ， 计算： （1） 采用电枢串电阻调速需串入的电阻值； （2） 采用降低电压调速需要把电源电压降到多少； （3） 上述两种调速情况下， 电动机的输入功率与输出功率。（不计励磁回路功率）

解题思路： 1) 求串电阻调速的电阻值 R

B点电压方程： $U_N = C_e \Phi_N n + I_N (R_a + R)$

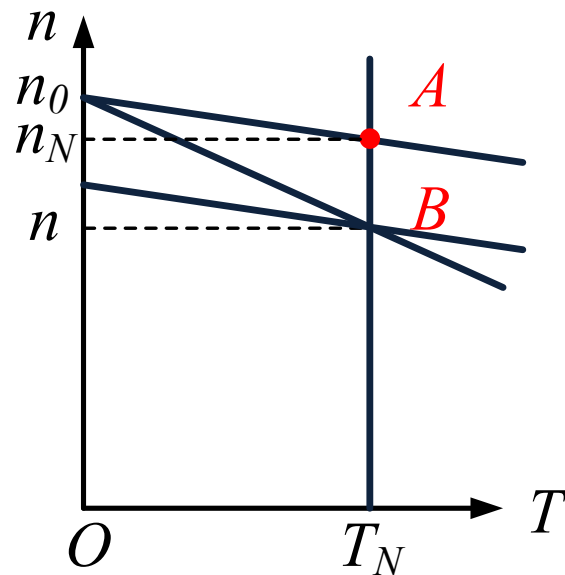
A点电压方程： $U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$

2) 求降压调速， 电压 U

B点电压方程： $U = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$

3) 求输入功率， $P_1 = UI_N$

输出功率， $P_2 = T_2 n / 9.55 = 9.55 \frac{P_N}{n_N} n / 9.55 = \frac{P_N}{n_N} n$





解：（1）先计算 $C_e \Phi_N$ ：

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

速度降落后，串入电阻：

$$R = \frac{U_N - C_e \Phi_N n}{I_N} - R_a = \frac{220 - 0.139 \times 1000}{115} - 0.1 = 0.604 \Omega$$

（2）降压调速，电源电压：

$$U_1 = C_e \Phi_N n + I_N R_a = 0.139 \times 1000 + 115 \times 0.1 = 150.5 \text{ V}$$

（3）串电阻调速输入功率：

$$P_1 = U_N I_N = 220 \times 115 = 25.3 \text{ kW}$$

降压调速输入功率：

$$P_1 = U_1 I_N = 150.5 \times 115 = 17.308 \text{ kW}$$

降速后的输出功率： $P_2 = \frac{P_N}{n_N} n = 14.67 \text{ kW}$



例题4-3 例4-2中若采用弱磁升速。（1）若要求负载转矩 $T_L=0.6T_N$ 时，转速升到2000r/min，此时磁通量应降到额定值的多少倍？

解题思路：

1) 求弱磁调速，磁通量

方法一：

A点电压方程： $U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$

C点电压方程： $U_N = C_e \Phi n + I_a R_a$

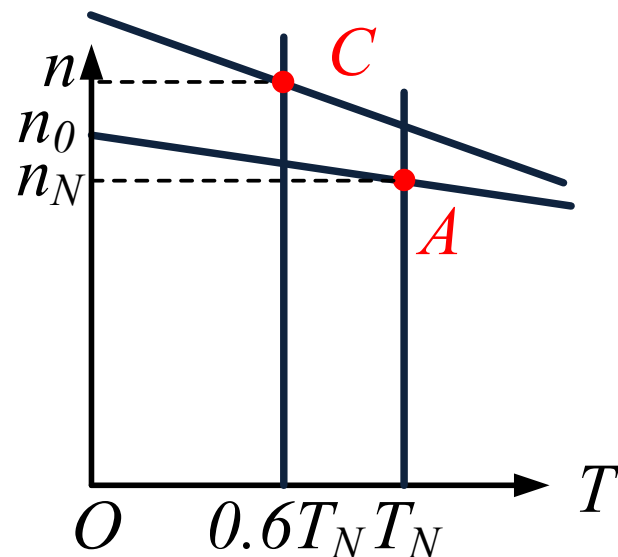
三个未知数，2个方程无解。

补充转矩方程式

$T_L=0.6T_N=9.55C_e\Phi I_a=0.6\times 9.55C_e\Phi_N I_N$

方法二：

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{9.66(C_e \Phi)^2} T$$





例题4-3 例4-2中若采用弱磁升速。（2）若已知该电动机的磁化特性数据如下表：

Φ/Φ_N	0.38	0.73	0.85	0.95	1.02	1.07	1.11	1.15
I_f/A	0.5	1	1.25	1.5	1.75	2.0	2.25	2.5

且励磁绕组额定电压220V，励磁绕组电阻110Ω，问：在题（1）情况下，励磁回路应该出入的电阻大小应该为多少？

（3）若不使电枢电流超过额定电流，在按（1）要求减弱磁场情况下，该电动机所能输出的最大转矩是多少？

解题思路：

2) 求励磁回路串电阻，查表得 I_f ， $U_N = (R + R_f) I_f$

3) 求额定电流下，电磁转矩

$$T = 9.55 C_e \Phi I_N$$



解: (1) 电机电磁转矩:

$$T = 0.6 \times 9.55 C_e \Phi_N I_N = 0.6 \times 9.55 \times 0.139 \times 115 \\ = 91.6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

转速和转矩代入减少气隙磁通量的人为机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T = \frac{220}{C_e \Phi} - \frac{0.1}{9.55 (C_e \Phi)^2} 91.6 = 2000$$

解方程得: $C_e \Phi = 0.1054$ 或 $0.0045 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$

减少磁通到额定磁通的倍数为:

$$\frac{\Phi}{\Phi_N} = \frac{C_e \Phi}{C_e \Phi_N} = \frac{0.1054}{0.139} = 0.758$$



(2) 用线性插值法求 I_f :

$$\frac{x - 1}{0.758 - 0.73} = \frac{1.25 - 1}{0.85 - 0.73} = 2.08 \text{ 解得: } x = 1.06$$

励磁回路串入电阻:

$$R = \frac{U_N}{I_f} - R_f = \frac{220}{1.06} - 110 = 97.5 \Omega$$

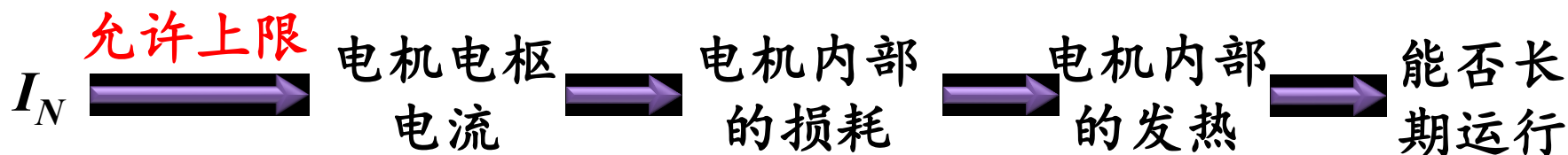
(3) 弱磁后, 电枢不过流所能输出最大电磁转矩:

$$T = 9.55 C_e \Phi I_N = 9.55 \times 0.1054 \times 115 = 115.76 N \cdot m$$



2、恒转矩调速和恒功率调速

额定电枢电流 I_N 的含义是什么？



电机运行时是否电枢电流越小越好？

I_a 大，损耗大； I_a 小，输出功率小，作用发挥不出来，因此充分使用电机，就是让它工作在 $I_a = I_N$ 情况下。

电动机运行时实际 电枢电流 I_a 的大小 取决于 所拖动的负载。

什么是电机调速时的容许输出？

电动机调速运行时，如果始终满足： $I_a = I_N$ ，则该电机既充分利用，又能安全运行，此时电机的输出功率与转矩，分别称该转速下的 **容许输出功率 (P_l)** 和 **容许输出转矩 (T_l)**。



2、恒转矩调速和恒功率调速

调速方式：是在 $I_a = I_N$ 不变的前提下，用来表征电动机采用某种调速方法时的负载能力或容许输出的性能指标。

恒转矩调速：在调速过程中，保持电枢电流和每极磁通为额定值（即电磁转矩为额定值）。

电枢回路串电阻调速、降低电枢端电压调速为恒转矩调速方式。

恒功率调速：保持电枢电流为额定值，采用弱磁调速，此时虽然转矩小，但转速变高，而功率保持不变。

弱磁调速为恒功率调速方式。

调速方式与负载类型的配合

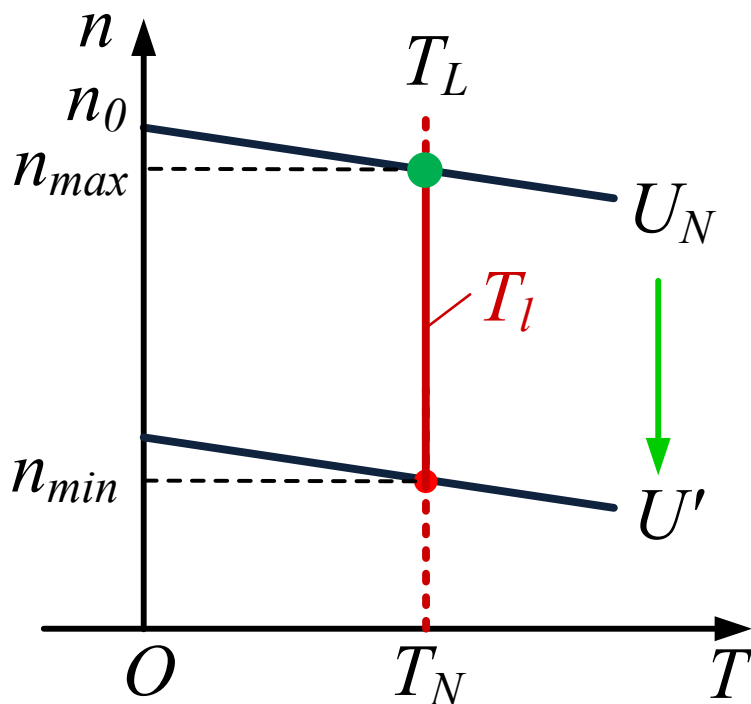
恒转矩调速方式



恒转矩负载



匹配



条件: $T_l = \text{const}$

使 $T_L = T_N$

$\Rightarrow T = T_L = T_l (n_{\min} \sim n_{\max})$

电机既能安全运行又能
得到充分利用

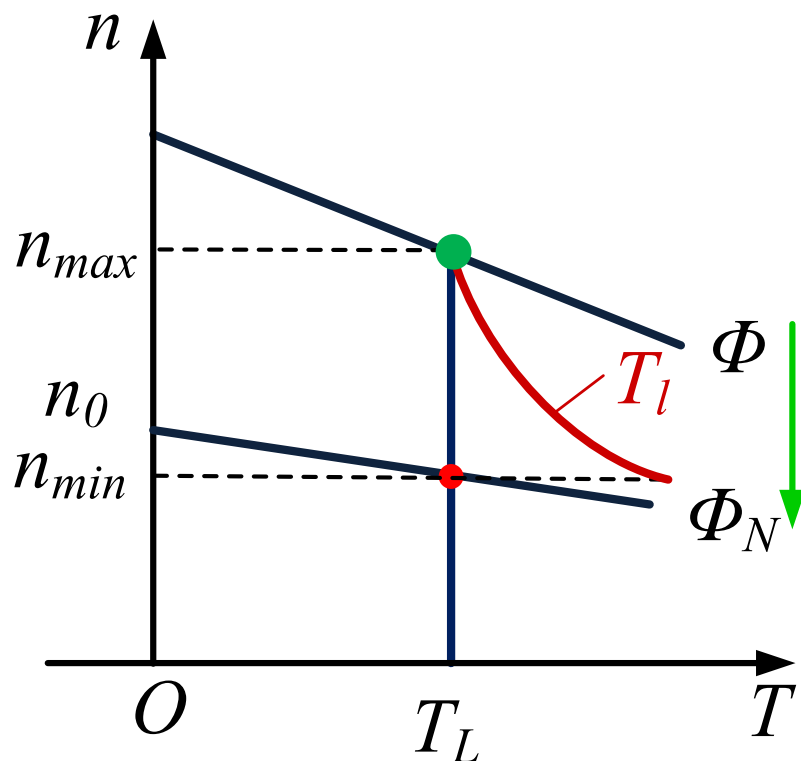
调速方式与负载类型的配合

恒功率调速方式



恒转矩负载

→ 不匹配



条件: $P_l = \text{const} \rightarrow T_l \propto \frac{1}{n}$

使高速 $n_{\max}$ 时, $T_{L\min} = T_l$

→ $T = T_L < T_l (n_{\min} \sim n_{\max})$

电机得不到充分利用

调速方式与负载类型的配合

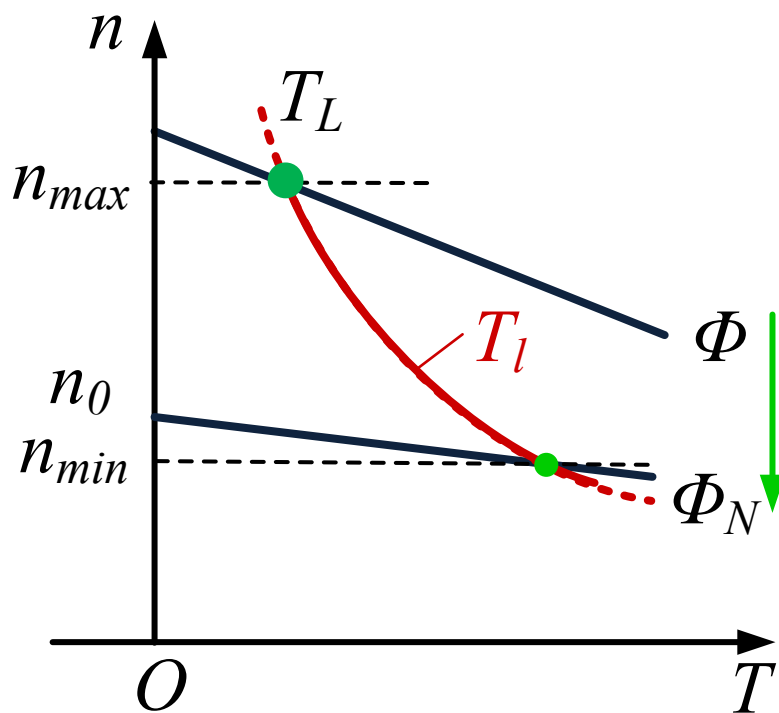
恒功率调速方式



恒功率负载



匹配



条件: $P_l = \text{const}$

使 $P_L = P_N = P_l$

$$\rightarrow T_L = \frac{60P_L}{2\pi n} = 9.55 \frac{P_L}{n} \propto \frac{1}{n}$$

$$\rightarrow T = T_L = T_l (n_{\min} \sim n_{\max})$$

电机既能安全运行又能得到充分利用

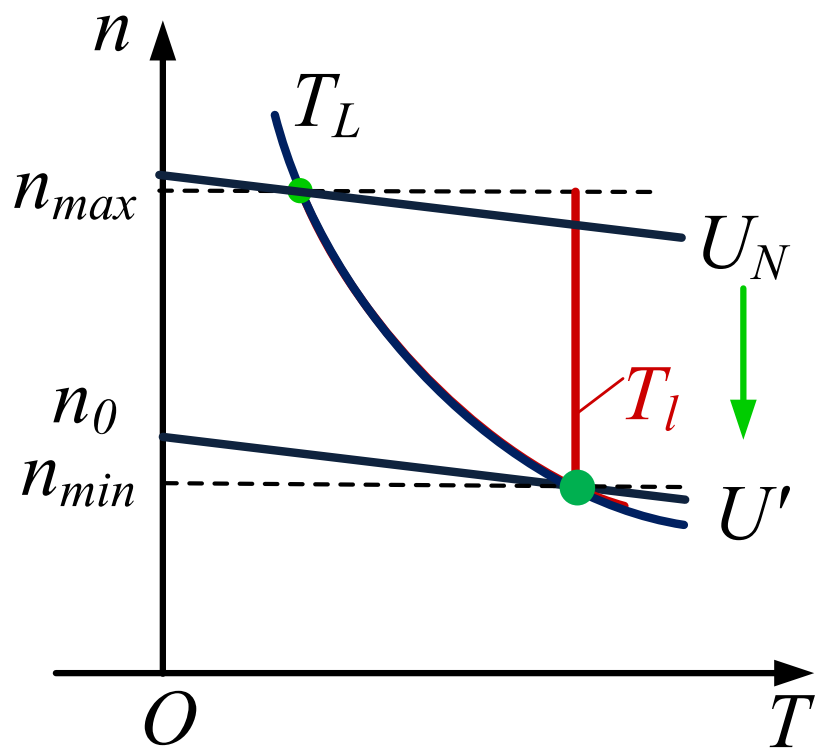
调速方式与负载类型的配合

恒转矩调速方式



恒功率负载

→ 不匹配



条件: $P_l = const$

使低速 n_{min} 时, $T_{Lmax} = T_l$

→ $T = T_L < T_l (n_{min} \sim n_{max})$

电机得不到充分利用



例题4-4 某台他励直流电动机： $P_N=17\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=90\text{A}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ，额定励磁电压 $U_{fN}=110\text{V}$ 。该电动机在额定电压和额定磁通时，拖动某负载运行的转速为 1550r/min ，当负载要求向下调速，最低转速 600r/min ，现采用降压调速方法，计算以下情况电枢电流的变化范围。（1）若该负载为恒转矩负载；（2）若该负载为恒功率负载。

解题思路： 1) 求降压调速，恒转矩负载 I_a 的变化范围

B点电压方程式： $U_N = C_e \Phi_N n_B + I_B R_a$

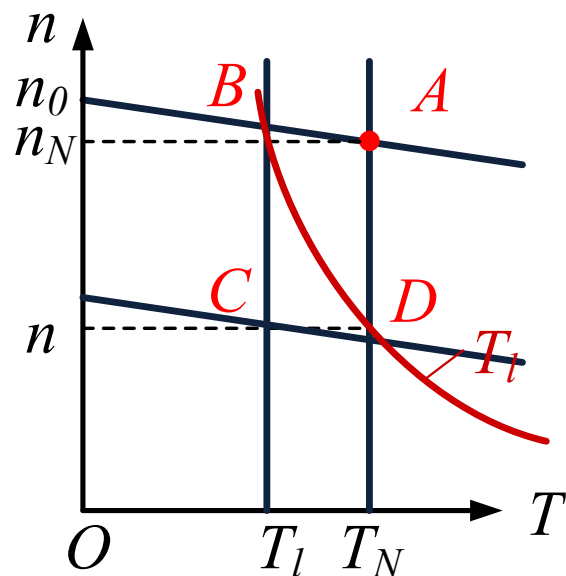
A点电压方程式： $U_N = C_e \Phi_N n_N + I_N R_a$

三个未知数，2个方程，无解，**怎么办？**

2) 求恒功率负载， I_a 的变化范围

D点电压方程式： $U = C_e \Phi_N n_D + I_D R_a$

$$P = \frac{T_{LD} n_D}{9.55} = \frac{T_{LB} n_B}{9.55} = \frac{C_t \Phi_N I_D n_D}{9.55} = \frac{C_t \Phi_N I_B n_B}{9.55}$$





解: (1) 假设 $E_{aN} = 0.94U_N$, 则电枢电阻:

$$R_a = \frac{U_N - E_{aN}}{I_N} = \frac{0.96 \times 220}{90} = 0.14667 \Omega$$

计算 $C_e \Phi_N$: $C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 90 \times 0.14667}{1500} = 0.138 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$

电枢电流: $I_a = \frac{U_N - C_e \Phi_N n}{R_a} = \frac{220 - 1550 \times 0.138}{0.14667} = 43 \text{ A}$

若为恒转矩负载, 降压调速时, $\Phi = \Phi_N$, $T = C_t \Phi_N I_a = T_L = \text{const}$, 所以 $I_a = 43 \text{ A}$

(2) 若为恒功率负载, 降压调速时

$$P = \frac{T_{L2} n_{\min}}{9.55} = \frac{T_{L1} n_{\max}}{9.55} = \frac{C_t \Phi_N I_{a\max} n_{\min}}{9.55} = \frac{C_t \Phi_N I_{a\min} n_{\max}}{9.55}$$

因此, 电枢最大电流:

$$I_{a\max} = \frac{I_{a\min} n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1550}{600} \times 43 = 111.1 \text{ A}$$



例题4-5例4-4中，若要求把转速升高至1850r/min，采用弱磁升速方法，计算以下情况电枢电流的变化范围。（1）若该负载为恒转矩负载；（2）若该负载为恒功率负载。

解题思路：

1) 求弱磁升速，恒转矩负载 I_a 变化范围

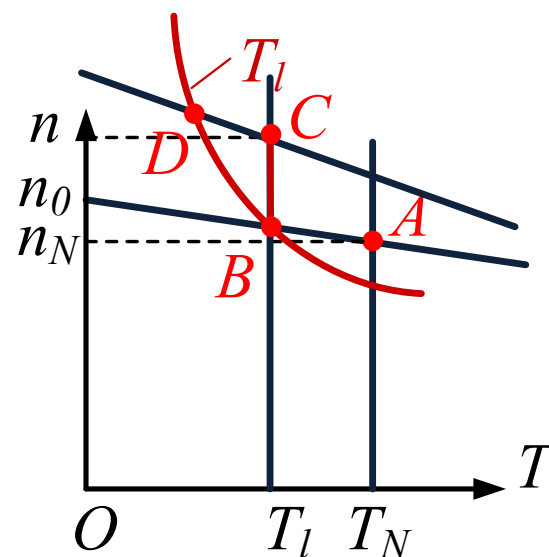
C点电压方程式： $U_N = C_e \Phi n_C + I_C R_a$

C点转矩方程： $T = 9.55 C_e \Phi I_C = 9.55 C_e \Phi_N I_B$

二未知数，二方程，可解。

2) 求弱磁升速，恒功率负载 I_a 变化范围

$P = U_N I_D = U_N I_B = \text{const}$





解: (1) 若为恒转矩负载, 弱磁调速时,

$$T = C_t \Phi_N I_a = C_t \Phi_2 I_{a2} = \text{const}, \text{ 所以 } \Phi_2 = (I_a / I_{a2}) \Phi_N$$

电动机电压方程为:

$$U_N = C_e \Phi_2 n_{\max} + I_{a2} R_a = C_e (I_a / I_{a2}) \Phi_N n_{\max} + I_{a2} R_a$$

代入数据, 得方程:

$$0.14667 I_{a2}^2 - 220 I_{a2} + 1850 \times 43 \times 0.138 = 0$$

解电枢电流: $I_{a2} = 51.68\text{A}$ 或 1448.15A

(2) 负载为恒功率时,

$$P = U_N I_{a2} = U_N I_a = \text{const}$$

所以, $I_{a2} = I_a = 43\text{A}$



3、调速的性能指标

- 调速范围

- 静差率（转速变化率）

- 调速的平滑性

- 调速的经济性



调速范围

定义：电动机在额定负载 $T = T_N$ 下调速时所能达到的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比，称 **调速范围**。

调速范围用 D 表示：
$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}}$$

/ 受电机换向及机械强度的限制
受转速相对稳定性要求的限制

电枢串电阻调速

$$n < n_N \rightarrow n_{max} = n_N$$

调压调速

$$n < n_N \rightarrow n_{max} = n_N$$

弱磁调速

$$n > n_N \rightarrow n_{min} = n_N$$

静差率（转速变化率）

定义： 电动机由理想空载到额定负载时 转速的变化率，也称 转速变化率。

静差率用 δ 表示：
$$\delta = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

硬度相同(平行)

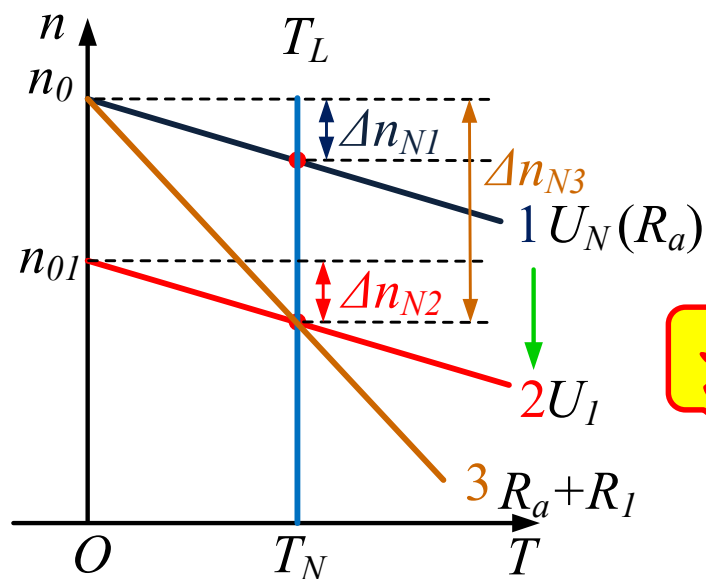
$n_0 \downarrow \rightarrow \delta \uparrow$

n_0 相同

硬度 $\uparrow \rightarrow \delta \downarrow$

注意

静差率 δ 是恒量系统运行中相对稳定性的重要指标。 δ 大，则负载变化时转速波动大，故要求 δ 应小于某一允许值。 某生产机械对 δ 要求越高（ δ 越小）系统所能实现的调速范围 D 越小。



$$\Delta n_{N1} = \Delta n_{N2} < \Delta n_{N3}$$

$$\delta_1 < \delta_2 < \delta_3$$



例题4-6某台他励直流电动机有关数据为： $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=305\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.04\Omega$ ，求调速范围？

- (1) 静差率 $\delta \leq 30\%$ ，电枢串电阻调速；
- (2) 静差率 $\delta \leq 20\%$ ，电枢串电阻调速；
- (3) 静差率 $\delta \leq 20\%$ ，降低电源电压调速。

解题思路：

1) 给定 δ ，求电枢串电阻调速范围 D ：

由定义 $\delta = \Delta n_{N3}/n_0$ ，求 Δn_{N3} ，先求 n_0

额定电压方程式： $U_N = C_e \Phi n_N + I_N R_a$

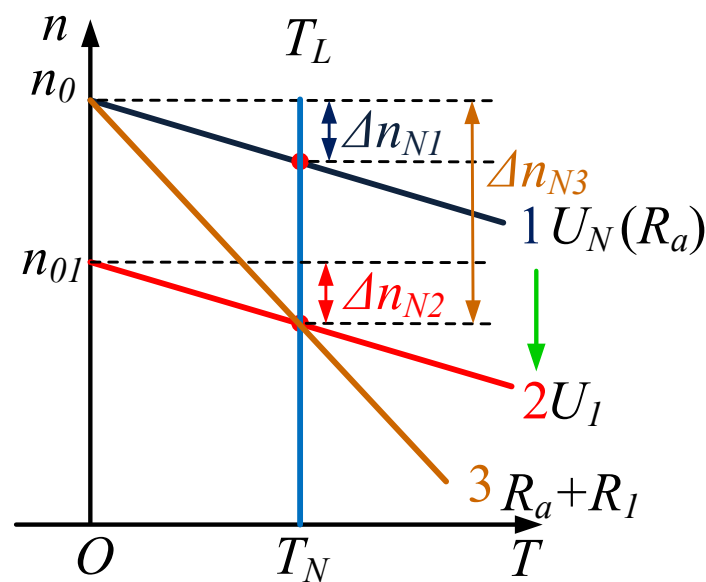
理想空载点： $U_N = C_e \Phi n_0$

$$D = n_N / (n_0 - \Delta n_{N3})$$

2) 给定 δ ，求降压调速范围 D ：

由定义 $\delta = \Delta n_{N2}/n_{01}$ ，求 $n_{01} = \Delta n_{N1}/\delta$

$$D = n_N / (n_{01} - \Delta n_{N2})$$





例题4-6某台他励直流电动机有关数据为： $P_N=60\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $I_N=305\text{A}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.04\Omega$ ，求调速范围？

- (1) 静差率 $\delta \leq 30\%$ ，电枢串电阻调速；
- (2) 静差率 $\delta \leq 20\%$ ，电枢串电阻调速；
- (3) 静差率 $\delta \leq 20\%$ ，降低电源电压调速。

解： (1) 计算 $C_e\Phi_N$ ： $C_e\Phi_N = (U_N - I_N R_a) / n_N$

$$= \frac{220 - 305 \times 0.04}{1000} = 0.2075 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

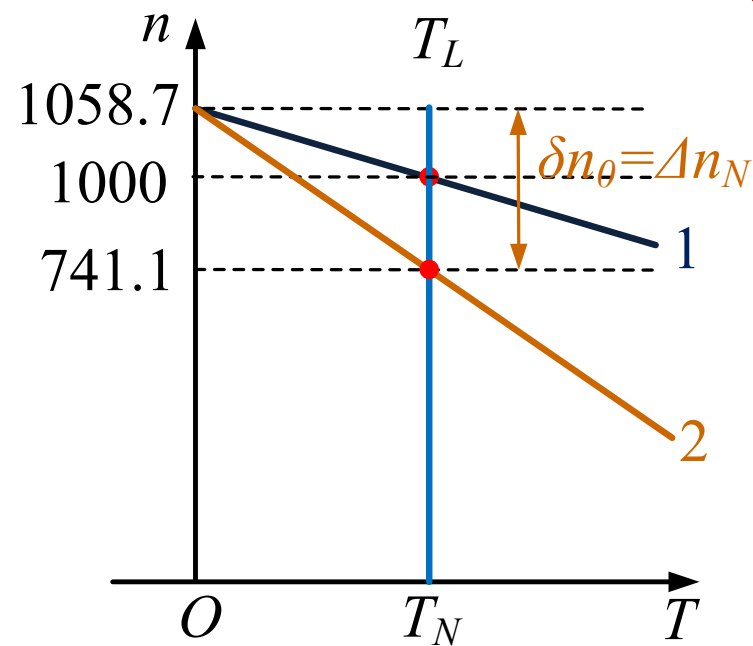
理想空载转速：

$$n_0 = U_N / C_e\Phi_N = 220 / 0.2075 = 1058.7 \text{ r/min}$$

最低转速： $n_{\min} = n_0 - \delta n_0 = 1058.7 - 20\% \times 1058.7 = 741.1 \text{ r/min}$

调速范围：

$$D = \frac{1000}{741.1} = 1.35$$





例题4 (某他励直流电动机主要参数如下: $P_N = 601 \text{ kW}$, $U_N = 220 \text{ V}$, $I_N = 30 \text{ A}$)

- (1) 静差率 $\delta \leq 20\%$ 时, 调速范围?
- (2) 静差率 $\delta \leq 20\%$ 时, 调速范围扩大, 主要是提高机械特性的硬度, 减小 Δn_N 。
- (3) 静差率 $\delta \leq 20\%$, 降低电源电压调速。

解: (3) 降低电源电压时, 额定转矩时转速降落:

$$\Delta n = n_0 - n_N = 1058.7 - 1000 = 58.7 \text{ r/min}$$

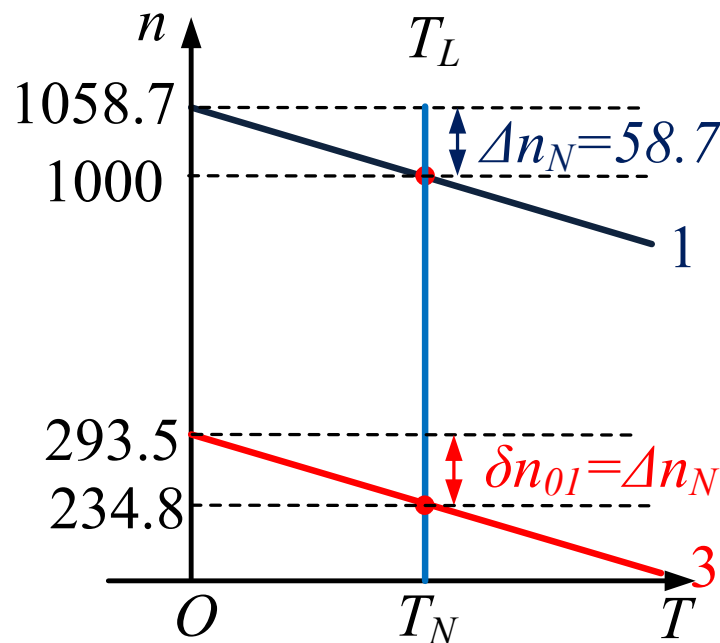
最低转速相应的理想空载转速 n_{01} :

$$n_{01} = \frac{\Delta n}{\delta} = \frac{58.7}{0.02} = 293.5 \text{ r/min}$$

最低转速: $n_{\min} = n_{01} - \Delta n = 293.5 - 58.7 = 234.8 \text{ r/min}$

调速范围:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000}{234.8} = 4.26$$





调速的平滑性

定义：电动机在调速时，相邻两级转速中，高一级转速与低一级转速之比，用平滑系数 φ 表示。

$$\varphi = \frac{n_i}{n_{i-1}}$$

φ 越小，平滑性越好。 $i \rightarrow \infty, \varphi \rightarrow 1$ 时，成为**无级调速**。

调速的经济性

调速的经济性主要指调速设备的初投资、调速的电能损耗和运行时的维修费用等。

综合看来，电枢串电阻调速设备**成本最低**；降低电源电压调速因需大功率可调压电源，**成本最高**。



他励直流电机三种调速方法调速性能比较

调速性能	调速方法		
	电枢串电阻	降电源电压	减弱磁通
调速方向	$n < n_N$	$n < n_N$	$n > n_N$
$\delta \leq 50\%$ 时的调速范围	≈ 2	$\approx 10 \sim 12$	$\approx 1.2 \sim 2$ (与 δ 无关)
一定调速范围内转速的稳定性	差	好	较好
负载能力	恒转矩	恒转矩	恒功率
调速平滑性	有级调速	无级调速	无级调速
设备初投资	少	多	较多
电能损耗	大	较小	小



作业： 4.1、4.2、4.4、4.6