



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.为何要调速?

提高生产效率或满足生产工艺的要求

- 例如车床切削工件时精加工用高速，粗加工用低速；轧钢机在轧制不同品种和不同厚度的钢材时，也必须有不同的工作速度。

2.如何调速?

机械调速

- 通过改变机械传动机构转速比使速度发生变化；

电气调速

- 在负载不变的条件下，通过改变电动机电气参数使速度发生变化，如调压调速、电枢串电阻调速和弱磁调速。

3.调速和速度变化是同一回事吗?

速度变化

- 由于负载的变化而引起的电动机转速变化。

调速

- 由人为改变电气参数而引起的转速变化。



1. **静差率 δ** : 指电动机在某一机械特性上运行时, 由理想空载时转速 n_0 到额定负载时转速 n 的变化率

$$\text{静差率: } \delta = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0}$$

$$\text{转速降: } \Delta n = n_0 - n$$

$\delta n_N = n_0 - n_N$ —— 机械特性额定
额定负载时对应的转速

静差率 δ 是衡量负载变化时, 电动机转速变化的程度, δ 越小, 相对稳定性越好, δ 与机械特性硬度和 n_0 有关。

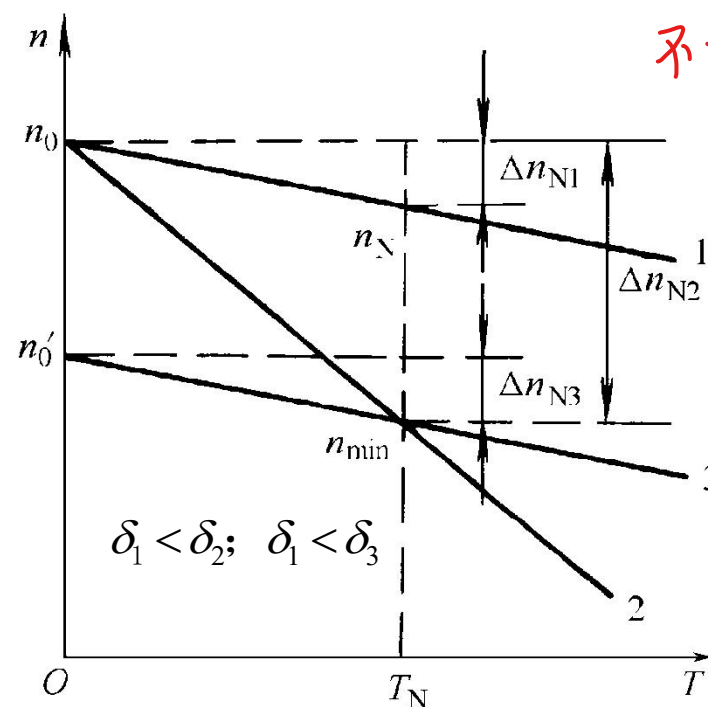
的转速

(1) δ 与机械特性的硬度有关

- 当 n_0 相同时, 机械特性越硬,
- Δn 越小, 则 δ 越小, 表明电动机相对稳定性就越好;

(2) δ 与理想空载转速 n_0 有关

- 对同样硬度的机械特性, 它们的 Δn 相同,
- n_0 越小, δ 越大; n_0 越大, δ 越小。



不一定是物牌数据



希望较大的 D 是共同的要求。但最高转速受电机换向和系统机械强度的限制，最低转速又受系统对低速时静差率的限制。

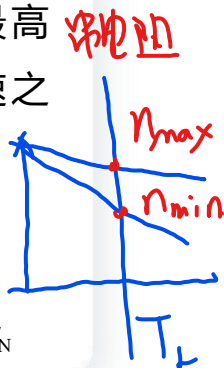
$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{0\min} - \Delta n_N} = \frac{n_{\max}}{\frac{\Delta n_N}{\delta_{\max}} - \Delta n_N} = \frac{n_{\max} \cdot \delta_{\max}}{\Delta n_N (1 - \delta_{\max})}$$

所用的调速方法中

02 调速范围 D :

电动机在额定负载时可能运行的最高转速与最低转速之比。

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \Big|_{T=T_N}$$



03 D 与 δ (静差率)

D 与 δ 相互制约: δ 越小, D 越小, 相对稳定性越好; 在保证一定的 δ 指标的前提下, 要扩大 D , 须减少 Δn , 即提高机械特性的硬度。

04 平滑性

调速时, 相邻两级转速的接近程度, 用平滑系数来衡量, 它是相邻两级转速之比。

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

相邻两级转速之比

05 经济性

调速装置的投资、维护维修费用和调速时的电能损耗。



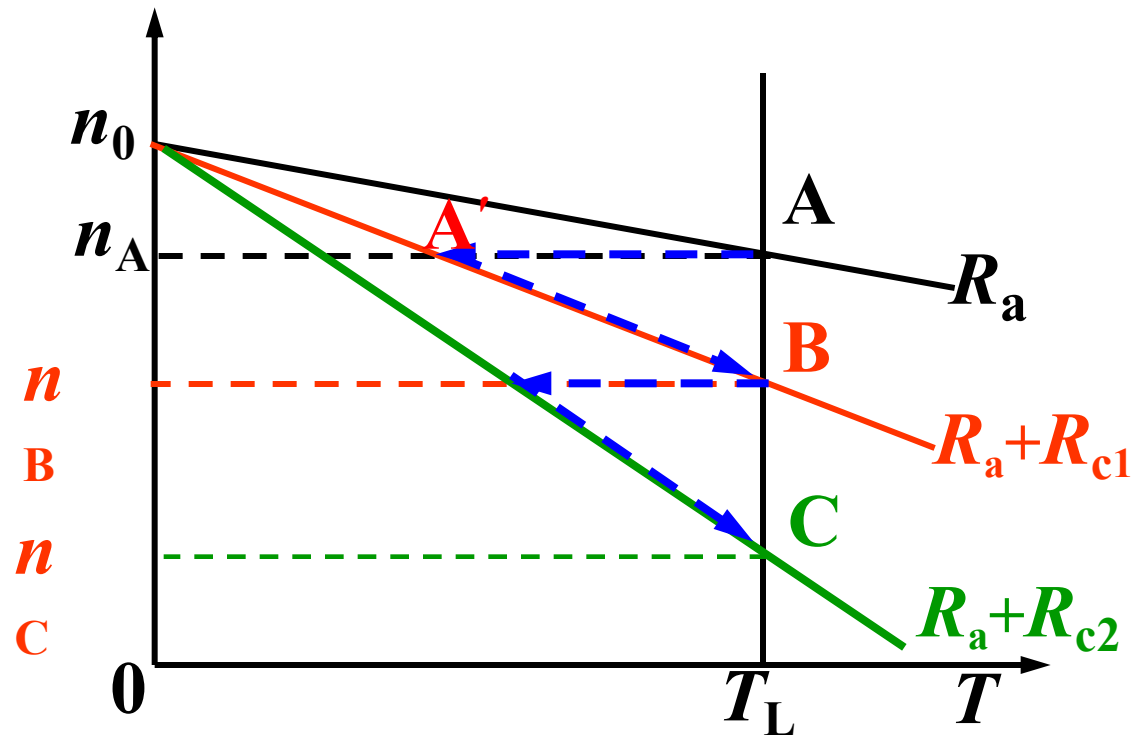
一、电枢回路串电阻调速

1.研究条件

$$U=U_N, \Phi=\Phi_N, R=R_a+R_{ad}$$

2.机械特性方程

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



3. 特点

① n_0 未变

- 理想空载转速 n_0 未变，与固有机特性相同

②特性变软

- 与固有机特性相比，由于电枢回路串入电阻，斜率变大，机械特性变软。

③优缺点

- 从额定转速往下调；设备简单，操作方便；有级调速，平滑性差；电阻损耗，效率不高。

④使用场景

- 主要用于调速性能要求不高的生产机械上，如起重机，矿井下使用的电机车。



二、直流调压调速

1.研究条件

$$U \downarrow, \Phi = \Phi_N, R = R_a$$

2.机械特性方程

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

3. 特点

① n_0 减小

- 理想空载转速 n_0 减小

②斜率未变

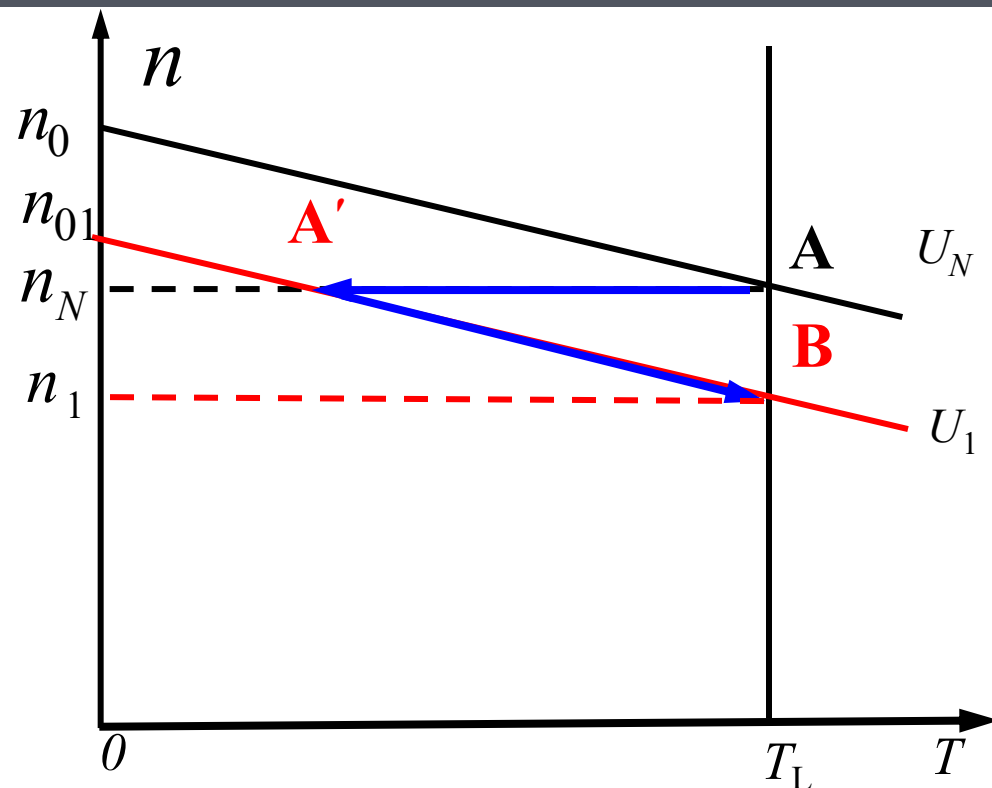
- 与固有机机械特性相比, 转速降 Δn 与斜率 β 未变, 机械特性与固有机机械特性平行, 属硬特性。

③优缺点

- 从额定转速往下调; 机械特性的硬度不变, 稳定性好; 可实现无级调速; 损耗小, 效率高。

④使用场景

- 主要用于调速性能较高的生产机械上, 如机床、轧钢机、造纸机等。



三、弱磁调速

1. 研究条件

$$U = U_N, \Phi \downarrow, R = R_a$$

2. 机械特性方程

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

3. 特点

① n_0 增大

- 理想空载转速 n_0 与磁通成反比，弱磁后， n_0 增大

② 特性变软

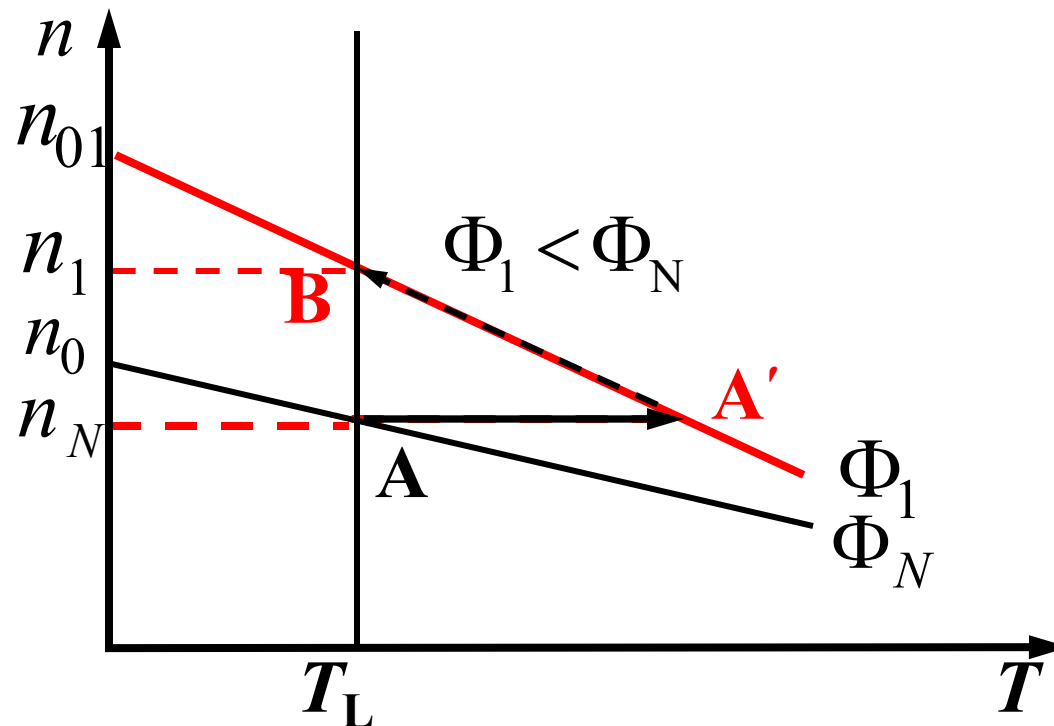
- 转速降 Δn 与磁通的平方成反比，斜率 β 变大，机械特性变软。

③ 优缺点

- 由基速向上调；磁通越弱，转速越高，一般为 $(1.2 \sim 1.5)n_N$ ；可实现无级调速；损耗小，效率高。

④ 使用场景

- 系统相对稳定性变差，故弱磁调速常常与调压调速结合起来使用增大调速范围。



1.容许输出：指电动机在某一转速下长期可靠工作时所能输出的**最大转矩和功率**。

2.充分利用：指在一定的转速下电动机的实际输出转矩和功率达到它的容许值，即**电枢电流达到额定值**。

当电动机调速时，在不同的转速下，电枢电流能否总保持为额定值，即电动机能否在不同转速下都得到充分利用，这个问题与**调速方式和负载类型的配合**有关。

3.调速方式：以电机在不同转速都能得到充分利用为条件，他励直流电动机的调速可分为**恒转矩调速和恒功率调速**。



(1) 恒转矩调速：电动机的容许输出功率与转速成正比，而容许输出转矩为恒值。

电枢串电阻调速和降压调速时，磁通 $\Phi = \Phi_N$ 保持不变，若在不同转速下保持电流 $I_a = I_N$ 不变，即电机得到充分利用，容许输出转矩和功率分别为：

$$T_2 \approx T = C_T \Phi I_a = C_T \Phi_N I_N = C \quad P_2 = T_2 \Omega = \frac{1}{9.55} T n = C_1 n$$

(2) 恒功率调速：电动机的容许输出转矩与转速成反比，而容许输出功率为恒值。

减弱磁通调速时，磁通 Φ 是变化的，在不同转速下若保持电流 $I_a = I_N$ 不变，即电机得到充分利用，容许输出转矩和功率别为：

$$T_2 \approx T = C_T \Phi I_N = C_T \frac{U_N - I_N R_a}{C_e n} I_N = \frac{C_2}{n} \quad P_2 = T_2 \Omega = \frac{1}{9.55} T_2 n = \frac{1}{9.55} \frac{C_2}{n} n = C$$



4.负载转矩特性：恒转矩负载、恒功率负载、泵类负载。

5.调速方式与负载特性的匹配：

为了使电动机得到充分利用，**恒转矩负载采用恒转矩调速方式；恒功率负载采用恒功率调速方式**；对风机类负载，三种方式都不是十分适合，但采用串电阻或降压调速比弱磁调速合适一些。

思考题：为什么恒转矩调速方式通常用于拖动恒转矩负载，恒功率调速方式通常用于拖动恒功率负载？

若恒功率负载采用恒转矩调速方式，或恒转矩负载采用恒功率调速方式，都会出现电动机实际输出转矩比电动机允许转矩小的情况，即“大马拉小车”的情况。



例 一台他励直流电动机铭牌数据为: $P_N = 22\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 115\text{A}$, $n_N = 1500\text{r/min}$, 电枢回路电阻 $R_a = 0.1\Omega$, 忽略空载转矩 T_0 , 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) 采用降低电源电压调速需把电压降到多少?
- (3) 两种调速情况下, 电动机输入功率与输出功率各多少 (不计励磁回路功率)?

解: (1) 电枢应串入的电阻:

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

理想空载转速:

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1582.7 \text{r/min}$$

额定转速降落: $\Delta n_N = n_0 - n_N = 1582.7 - 1500 = 82.7 \text{r/min}$

电枢串电阻后转速降落: $\Delta n = n_0 - n = 1582.7 - 1000 = 582.7 \text{r/min}$

设电枢串电阻为 R , 则: $\frac{R_a + R}{R_a} = \frac{\Delta n}{\Delta n_N}$ $R = 0.605$

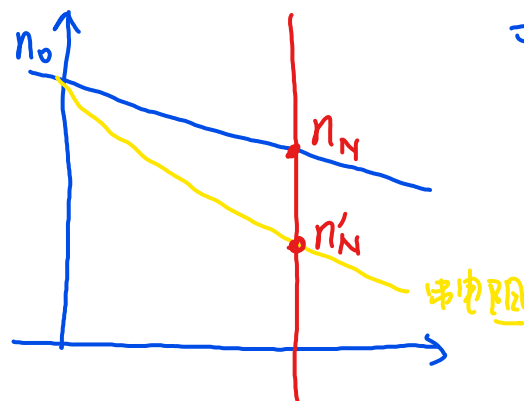
$$T_{em} = T_0 + T_2$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 电机的 空载 负载需求
 出力 转矩

$$\Rightarrow T_{em} \approx T_2 = T_N$$

$$= \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}}$$

$$= 955 \frac{P_N}{n_N}$$



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

$$U_N = E_{aN} + I_N R_a = C_e \Phi_N + I_N R_a$$

根据机械特性推出



例 一台他励直流电动机铭牌数据为： $P_N = 22\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $I_N = 115\text{A}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， 电枢回路电阻 $R_a = 0.1\Omega$ ， 忽略空载转矩 T_0 ， 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) 采用降低电源电压调速需把电压降到多少？

(3) 两种调速情况下， 电动机输入功率与输出功率各多少（不计励磁回路功率）？

(2) 降压调速电压的计算：

降低电源电压后的理想空载转速： $n_{01} = n + \Delta n_N = 1000 + 82.7 = 1082.7\text{r/min}$

设降压后电压为 U_1 ， 则： $\frac{U_1}{U_N} = \frac{n_{01}}{n_0}$ $U_1 = 150.5$

(3) 电动机降速后输入功率与输出功率的计算：

电动机输出转矩： $T_2 = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{22}{1500} = 140.1\text{N.m}$

两种调速情况下降速后的输出功率： $P_2 = T_2 \Omega = T_2 \frac{2\pi}{60} n = 140.1 \times \frac{2\pi}{60} \times 1000 = 14670\text{W}$

电枢串电阻降速的输入功率： $P_1 = U_N I_N = 220 \times 115\text{W} = 25300\text{W}$

降压降速的输入功率： $P_1 = U_1 I_N = 150.5 \times 115\text{W} = 17307.5\text{W}$



小结

调速

评价指标

静差率 $\delta = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{\Delta n}{n_0}$

调速范围 $D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \Big|_{T=T_N}$

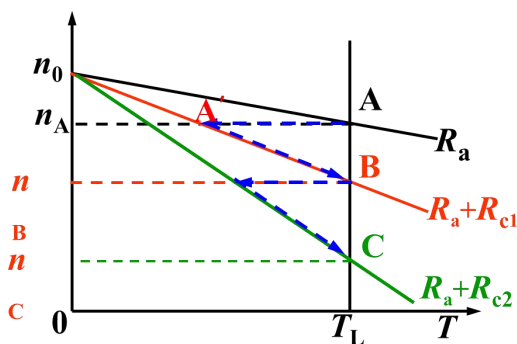
D 与 $\delta\%$ 相互制约: δ 越小, D 越小, 相对稳定性越好

调速的平滑性 $\Phi = \frac{n_i}{n_i - 1}$

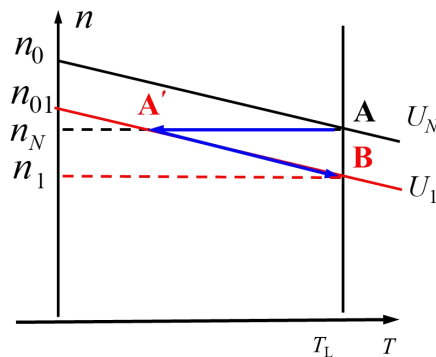
调速的经济性

调速方法

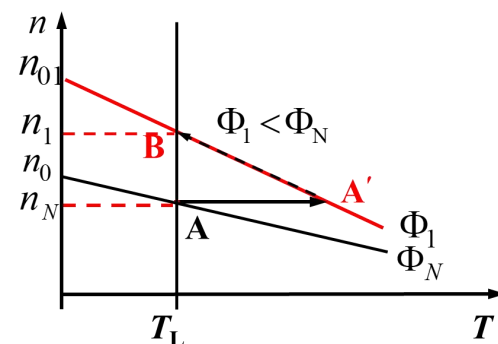
电枢回路串电阻



直流调压调速



弱磁调速



调速方式与负载类型配合

(避免大马拉小车)

恒转矩调速

恒功率调速

$$T_2 \approx T = C_T \Phi I_a = C_T \Phi_N I_N = C \quad P_2 = T_2 \Omega = \frac{1}{9.55} T n = C_1 n$$

电枢串电阻调速和降压调速时, 磁通 $\Phi = \Phi_N$ 保持不变

$$T_2 \approx T = C_T \Phi I_N = C_T \frac{U_N - I_N R_a}{C_e n} I_N = \frac{C_2}{n} \quad P_2 = T_2 \Omega = \frac{1}{9.55} T_2 n = \frac{1}{9.55} \frac{C_2}{n} n = C$$

减弱磁通调速时, 磁通是变化的