



自动控制实践(I)-4

- 直流电机特性与调速运行



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

直流电机的基本关系式

- a. 电动势
- b. 电磁力矩
- c. 电压平衡式
- d. 力矩平衡式
- e. 功率平衡式

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

感应电动势:

$$\begin{aligned}
 e &= \sum B_{\delta} l v = \frac{N}{2a} B_{\delta} l v \\
 &= \frac{N}{2a} B_{\delta} l r \Omega = \frac{N}{2a} B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} \Omega \frac{2p}{2\pi} \\
 &= \frac{N}{2a} \phi \Omega \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi \Omega \\
 &= K_e \Omega
 \end{aligned}$$

电磁力矩:

$$\begin{aligned}
 T_e &= \sum B_{\delta} i_a l r = \frac{N}{2a} B_{\delta} i_a l r \\
 &= \frac{N}{2a} B_{\delta} \frac{2\pi r l}{2p} i_a \frac{2p}{2\pi} \\
 &= \frac{N}{2a} \phi i_a \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi i_a \\
 &= K_t i_a
 \end{aligned}$$



上节课复习

直流电源+ ➡ 电刷 ➡ 换向片 ➡ 电枢绕组 ➡ 换向片 ➡ 电刷 ➡ 直流电源-

电枢通入电流后，产生电磁转矩:

$$T_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \phi i = K_T i$$

通电线圈在磁场中转动，又会在线圈中产生感应电动势:

$$e = \frac{pN}{2\pi a} \phi \Omega = K_e \Omega$$



上节课复习

运动控制/电机驱动控制的内涵

电:

施加电压 u

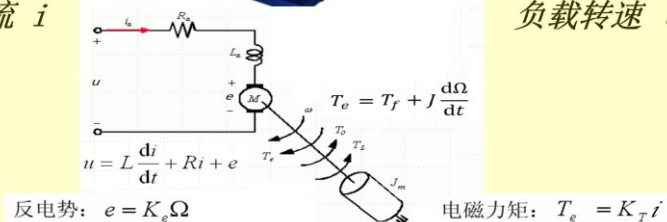
驱动电流 i



机:

输出力矩 T_e

负载转速 Ω



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



上节课复习

直流电动机的铭牌

1. 额定功率 P_N : 电机轴上输出的机械功率 ($T_N \cdot n_N$) 。
2. 额定电压 U_N : 额定工作情况下的电枢上加的直流电压。
(例: 3V, 12V, 24V, 110V, 220V)
3. 额定电流 I_N : 额定电压下, 轴上输出额定功率时的电流
(并励应包括励磁电流和电枢电流) 三者关系:
 $P_N = U_N I_N \eta$ (η : 效率)
4. 额定转速 n_N : 在 P_N , U_N , I_N 时的转速。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 直流电机的静态工作特性

2. 直流电机的调速运行

3. 直流电机的四象限运行

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机静态工作特性

a. 静态工作特性:

机械特性/调节特性/控制特性

b. 负载特性与稳定运行条件

c. 电磁电机需确保激磁可靠

d. 直流电机的启动电流限制

e. 电动势 e 与电磁力矩 T 的波动

f. 效率特性

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



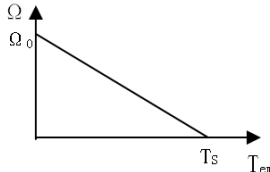
1.直流电机静态工作特性

直流电机静态特性:

$$\text{转矩平衡: } T_{em} = T_L$$

$$\text{电压平衡: } U = E + IR = K_e \Omega + IR$$

他/并励直流电机机械特性:

$$\Omega = \frac{U - \frac{T_{em}}{K_T} R}{K_e}$$




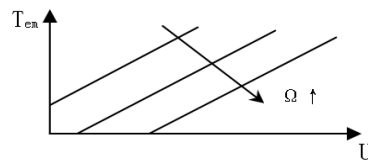
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机静态工作特性

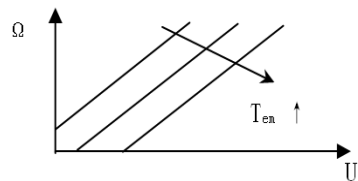
控制特性:

$$T_{em} = K_T I = K_T \frac{U - K_e \Omega}{R}$$



调节特性:

$$\Omega = \frac{U - IR}{K_e} = \frac{U - \frac{T_{em}}{K_T} R}{K_e}$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机静态工作特性

a. 静态工作特性:

机械特性/调节特性/控制特性

b. 负载特性与稳定运行条件

c. 电磁电机需确保激磁可靠

d. 直流电机的启动电流限制

e. 电动势 e 与电磁力矩 T 的波动

f. 效率特性



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1. 直流电机静态工作特性

提问:

- 1) 电动机在启动时和与负载达到稳定转速时, 电枢电流是多大? 由什么决定?
- 2) 教材的图1-36(a)中, P_2 和 η 为何不过原点?
- 3) 有什么方法可以调整电动机转速?



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 直流电机的静态工作特性

2. 直流电机的调速运行

3. 直流电机的四象限运行



2. 直流电机的调速运行

- 电机调速运行的基本要求
- 串电阻调速
- 弱磁调速
- 调压调速



2. 直流电机的调速运行

直流电动机的调速：

- 人为改变直流电机的工作条件，使电机的工作点偏移，与负载线的交点移动。
- 调速范围
- 调速的平滑性
- 调速的效率

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 直流电机的调速运行

直流电机的调速控制：串电阻调速

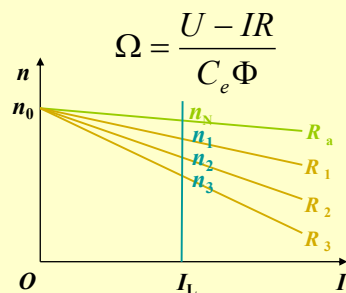
保持 $\Phi = \Phi_N$ ； $U = U_N$ ；

增加电阻 $R_a \rightarrow R \uparrow$

$R \uparrow \rightarrow n \downarrow$ ， n_0 不变；

调速特性：

1. 简单,易实现；
2. 损耗大,低效率；
3. 降速调速；
4. 一般为有级调速；
5. 特性变软；
6. 轻载时调速范围小。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 直流电机的调速运行

直流电机的调速控制：弱磁调速

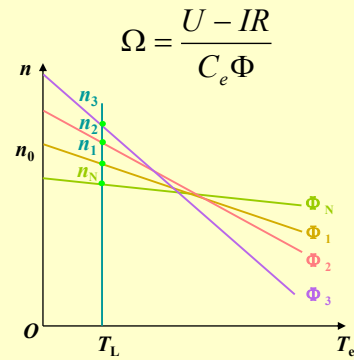
保持 $U = U_N$, $R = R_a$;

减小励磁 $\Phi_N \rightarrow \Phi \downarrow$

$\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow$, $n_0 \uparrow$

调速特性：

1. 基速以上和额定电流以下的调速；
2. 转速上升；3. 机械特性曲线变软；
4. 高效率；5. 恒功率；6. 一般调速范围在2-4。



调磁调速特性曲线



2. 直流电机的调速运行

直流电机的调速控制：降压调速

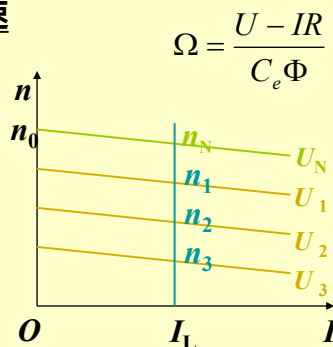
保持 $\Phi = \Phi_N$; $R = R_a$

改变电压 $U_N \rightarrow U \downarrow$

$U \downarrow \rightarrow n \downarrow$, $n_0 \downarrow$

调速特性：

1. 基速以下调速；
2. 线性直线族特性；
3. 控制与调节特性良好；4. 易于无级调速；
5. 效率高；6. 需调压电源实现。



调压调速特性曲线



2. 直流电机的调速运行

例: 有一他励电动机,已知: $U_N=220\text{V}$, $R_a=0.225\ \Omega$, 额定力矩 T_N 对应 $I_a=68.5\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, 保持 T_N 输出

(1) 采用电枢串电阻调速, 使 $n=1000\text{r/min}$, 应串入多大的电阻?

(2) 采用降压调速, 使 $n=1000\text{r/min}$, 电源电压应降为多少?

(3) 采用弱磁调速, $\Phi=0.85\Phi_N$, 电动机的转速为多少?
能否长期运行?

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 直流电机的调速运行

(1) 采用电枢串电阻调速时, 当 $\Phi=\Phi_N$, $T=T_N$ 时 $I_a=68.5\text{A}$,

根据
$$n = \frac{U_N - (R_a + R)I_a}{C_E \Phi_N} \quad n_N = \frac{U_N - R_a I_a}{C_E \Phi_N}$$

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_N} &= \frac{U_N - (R_a + R)I_a}{U_N - R_a I_a} \\ &= \frac{220 - (0.225 + R) \times 68.5}{220 - 0.225 \times 68.5} = \frac{1000}{1500} \end{aligned}$$

$$R = 0.995\ \Omega$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 直流电机的调速运行

(2)降压调速时, 当 $\Phi = \Phi_N, T = T_N$ 时 $I_a = 68.5A$,

根据

$$n = \frac{U - R_a I_a}{C_E \Phi_N} \quad n_N = \frac{U_N - R_a I_a}{C_E \Phi_N}$$

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_N} &= \frac{U - R_a I_a}{U_N - R_a I_a} \\ &= \frac{U - 0.225 \times 68.5}{220 - 0.225 \times 68.5} = \frac{1000}{1500} \end{aligned}$$

$$U = 151.8V$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 直流电机的调速运行

(3)弱磁调速时, 当 $\Phi = 0.85\Phi_N, T = T_N$ 时,

根据 $\frac{T}{T_N} = \frac{\Phi I_a}{\Phi_N I_{aN}} = \frac{0.85\Phi_N I_a}{\Phi_N I_{aN}} = \frac{0.85I_a}{I_{aN}} = 1$

$$I_a = \frac{I_N}{0.85} = 80.59A \quad \text{电动机不能长期运行}$$

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_N} &= \frac{(U_N - R_a I_a)/C_E \Phi}{(U_N - R_a I_{aN})/C_E \Phi_N} \\ &= \frac{220 - 0.225 \times 80.59}{(220 - 0.225 \times 68.5) \times 0.85} = \frac{n}{1500} \end{aligned}$$

$$n = 1741 \text{ rpm}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 直流电机的静态工作特性

2. 直流电机的调速运行

3. 直流电机的四象限运行



3. 直流电机的四象限运行

-- 电动运行

-- 能耗制动

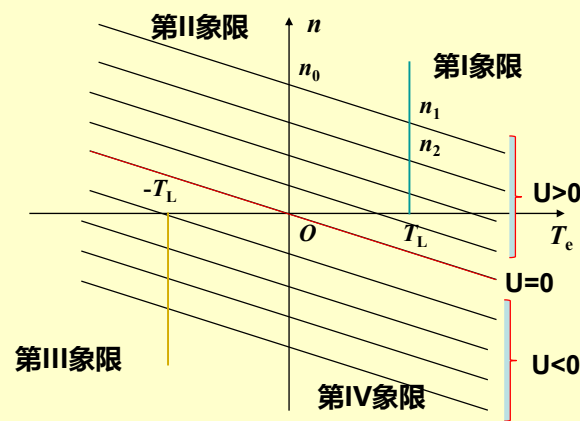
-- 再生制动

-- 反接制动



3. 直流电机的四象限运行

直流电机的四象限调压控制：

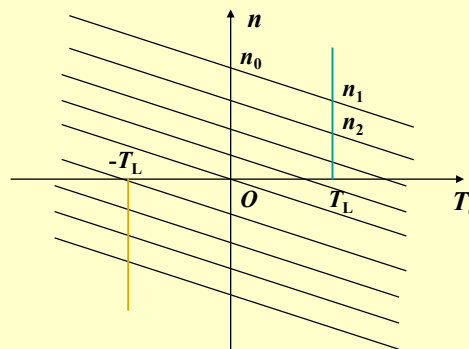


直流电机的四象限调压特性



3. 直流电机的四象限运行

直流电机的四象限调压控制：



直流电机的四象限调压特性

控制特性：

$$T_{em} = K_T \frac{U - K_e \Omega}{R}$$

调节特性：

$$\Omega = \frac{U - \frac{T_{em}}{K_T} R}{K_e}$$



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

