

自动控制实践

第四讲 直流电动机的特性 与控制方法

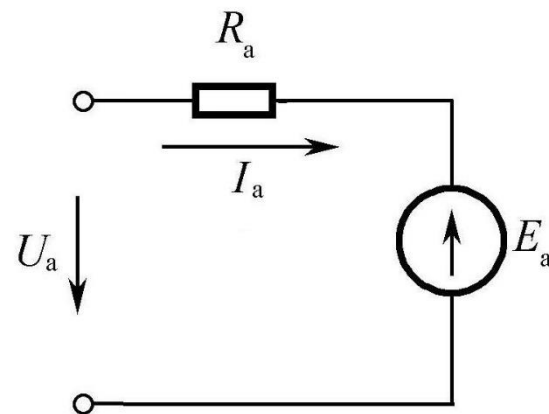
哈尔滨工业大学

伊国兴



直流电动机的静态特性

❖ 静态时的电枢等效电路图



❖ 静态时的电枢电流

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} = \frac{U_a - C_e \Phi n}{R_a}$$

直流电机的电流与转速有关

❖ 静态时的直流电机转速（静态特性方程）

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

$$\omega = \frac{U_a}{K_e} - \frac{T_{em} R_a}{K_e K_t}$$

直流电动机的静态特性

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

❖ 调速：改变和控制电动机的转速。

❖ 开环调速：改变电枢电压，磁通，电枢回路电阻。

- 当磁场 Φ 、 R_a 不变时， U_a 与 n 正比变化（电枢控制）。适用于中小容量和快速性高的系统。
- 当 U_a 、 R_a 不变时，改变 Φ ，可以改变 n （磁场控制）。调节方便，效率高，恒功率调速系统应用广泛。
- 当 U_a 、 Φ 不变时， R_a 与 n 反比变化（电阻控制）。仅用于一些特殊调速系统。

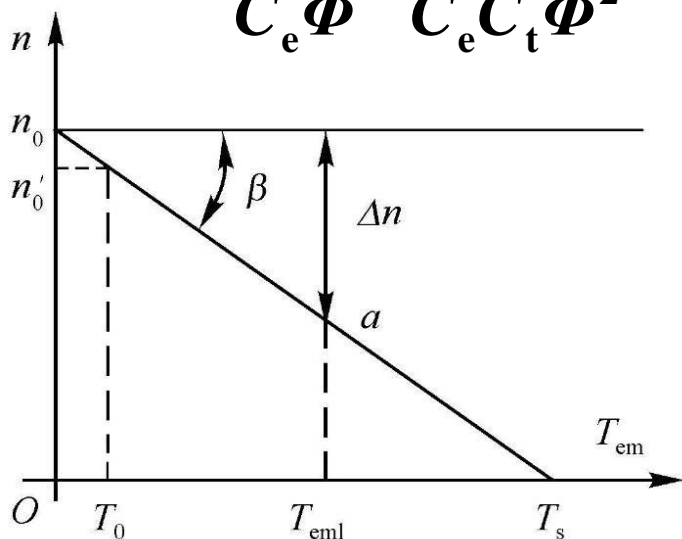
直流电动机的静态特性

❖ 电枢控制时的机械特性

- 磁通 Φ 不变，电枢电压为常数或参变量时转速与电磁转矩的关系。

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T_{em}$$

$$\omega = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T_{em}$$



- 理想空载转速 n_0
- 实际空载转速 n'_0
- 堵转转矩 T_s
- 机械特性硬度： β 的大小。
- β 小，机械特性硬。

直流电动机的静态特性

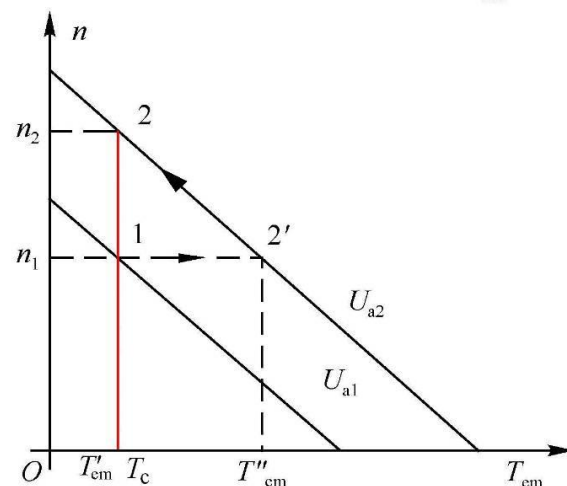
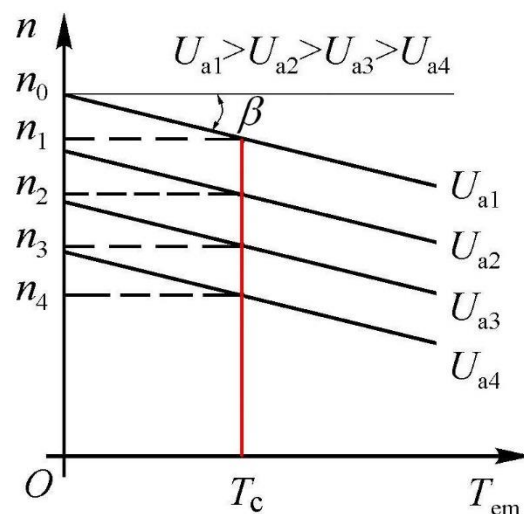
❖ 电枢控制时的机械特性

- 机械特性族：不同电枢电压对应的机械特性曲线，机械特性族是平行直线。

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T_{em}$$

- 分析：电压提高，工作状态变化。

T_c 不变, $U_{a1} \rightarrow U_{a2}$



直流电动机的静态特性

❖ 电枢控制时的调节特性

- 电磁转矩为参变量时转速与电枢电压的关系。

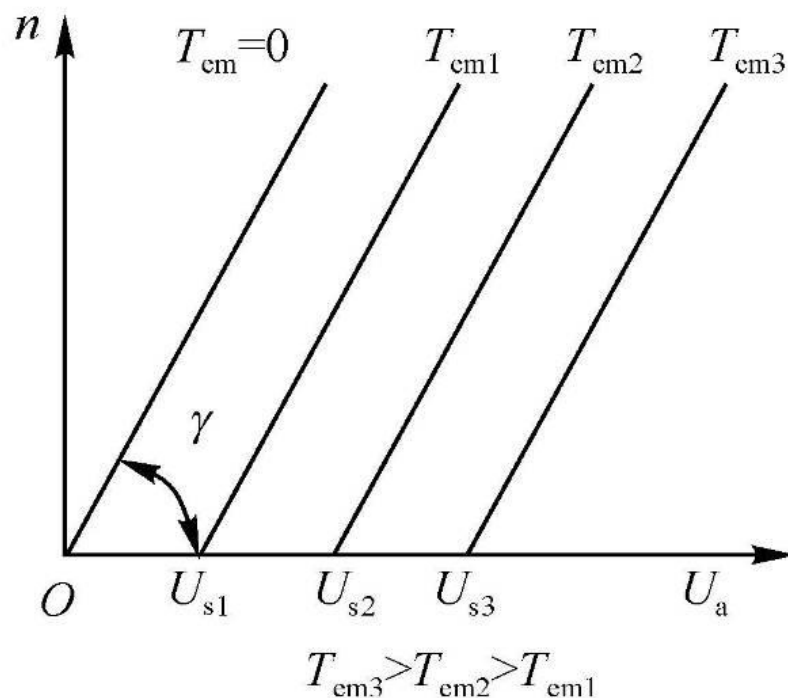
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

$$\text{斜率: } \tan \gamma = \frac{1}{C_e \Phi} = \frac{1}{K_e} > 0$$

起动（死区）电压、电流。

（摩擦力和负载引起）

$$U_s = \frac{T_{em} R_a}{C_t \Phi} = \frac{T_c R_a}{C_t \Phi} \quad I_s = \frac{U_s}{R_a}$$



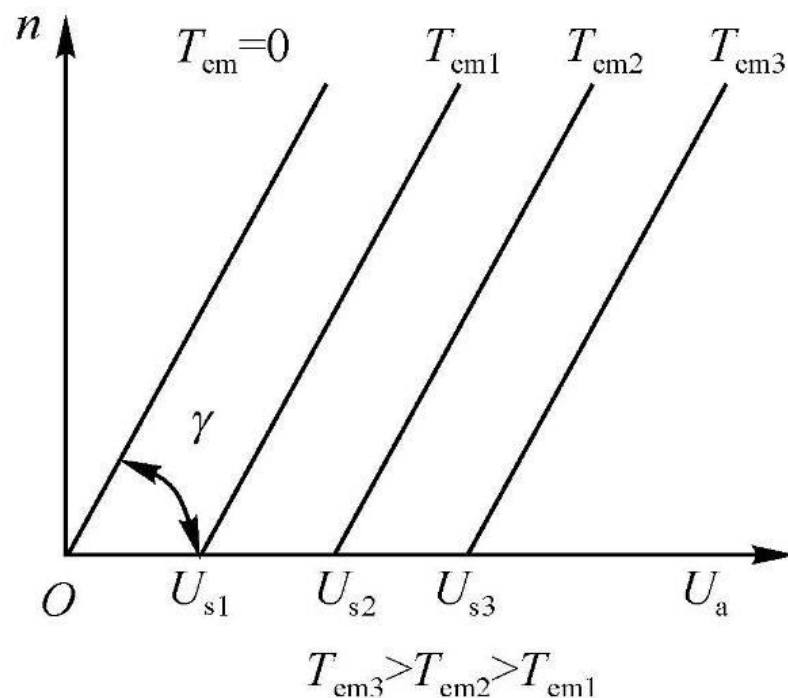
直流电动机的静态特性

❖ 电枢控制的优点：

- 机械特性和调节特性曲线族是平行直线，直流电机是理想的线性元件。

❖ 电枢控制的缺点：

- 控制功率 $U_a I_a$ 大，对于较大电机，要用较大容量的功率放大器。



直流电动机的静态特性

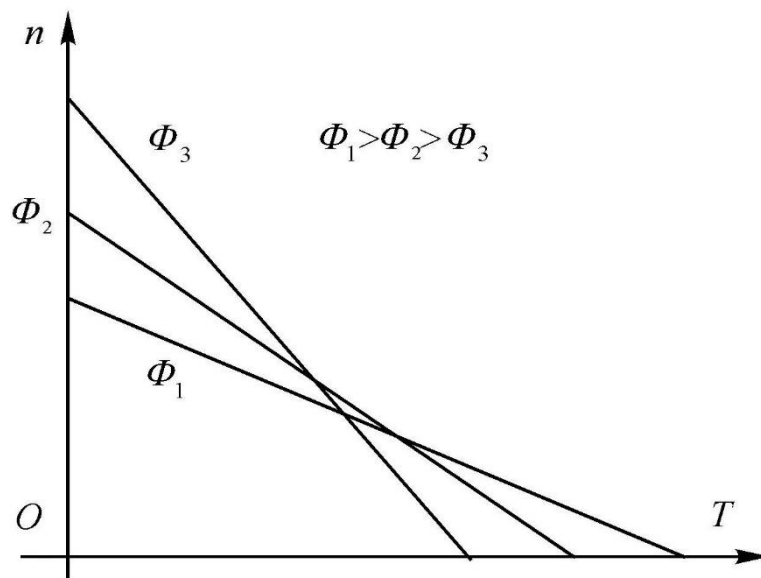
❖ 磁场控制时的机械特性

- 磁通是参变量，转速 n 与转矩 T_{em} 的关系。
- n 与 T_{em} 是线性关系。

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T_{em}$$

斜率： $-\frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2}$

- 机械特性族是交叉的直线。



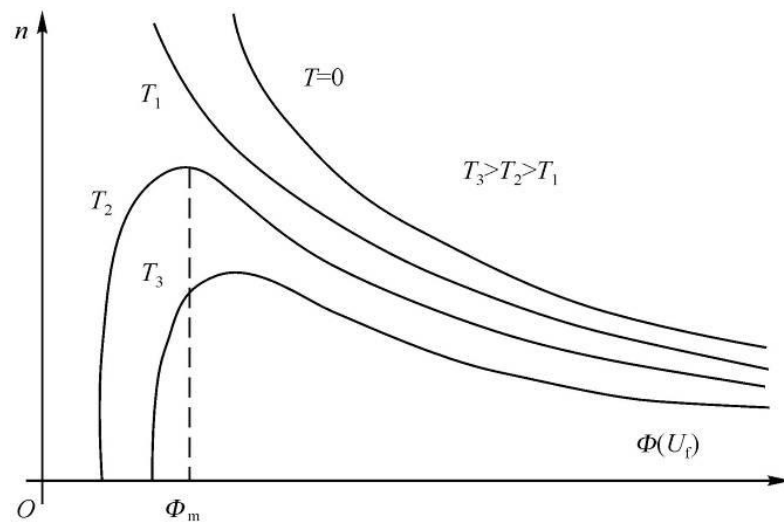
直流电动机的静态特性

❖ 磁场控制时的调节特性

- 转矩是参变量，转速 n 与磁通 Φ 的关系。

$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

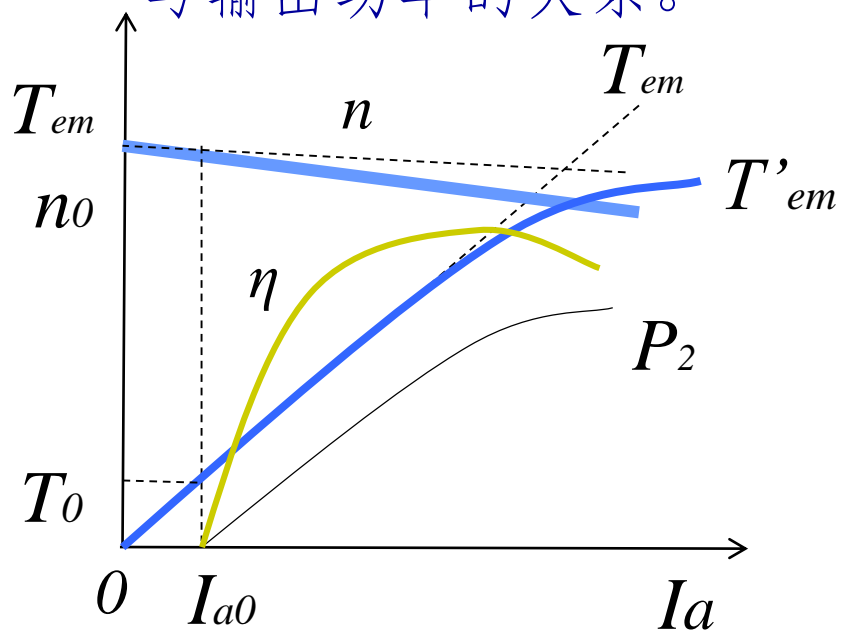
- 调节特性是非线性曲线。
- 控制方法：
 - ⑩ 改变激磁电压 U_f ，电流 I_f 。
- 磁场控制的优点：
 - ⑩ 控制功率 $U_f I_f$ 小，可控制大功率电机。



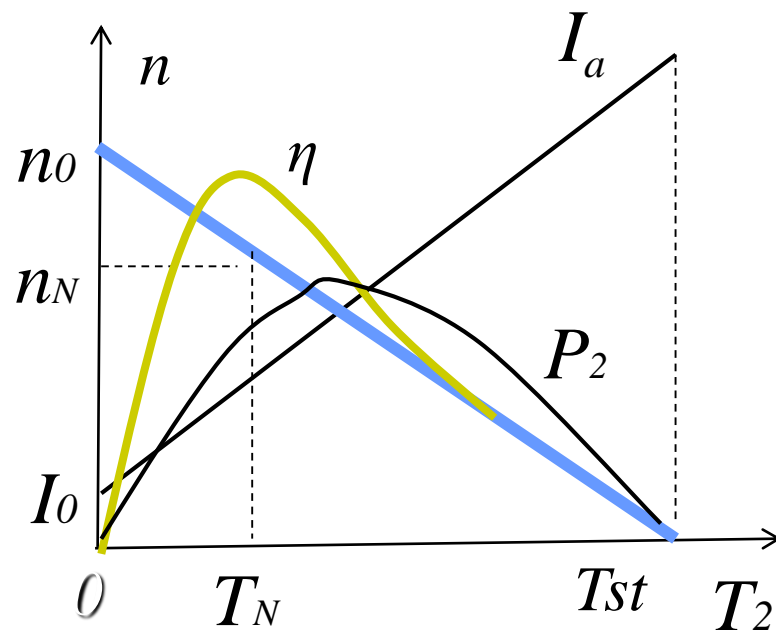
直流电动机工作特性

❖ 直流电动机的工作特性

- 电枢电压和电流均为额定值时，转速、转矩、效率及输出功率与电枢电流的关系，或转速、转矩、效率及电枢电流与输出功率的关系。



电磁式(他励)直流电动机



永磁式直流电动机

典型负载转矩特性

❖ 典型负载转矩特性矩与转速的关系

■ 恒转矩负载

⑩ 反抗性恒转矩负载，大小不变，方向与运动方向相反。

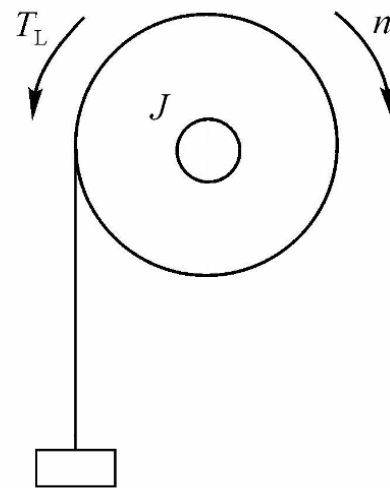
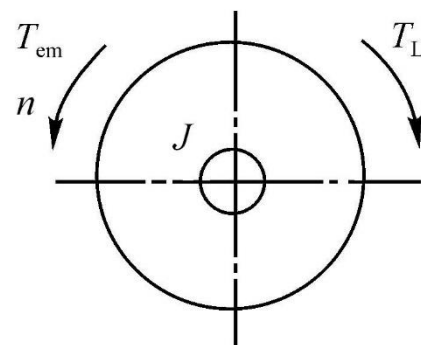
⑩ 位能性恒转矩负载，负载转矩大小和方向都不变。如提重物。

■ 泵类负载，如，水泵，风扇。

$$T_L = kn^2$$

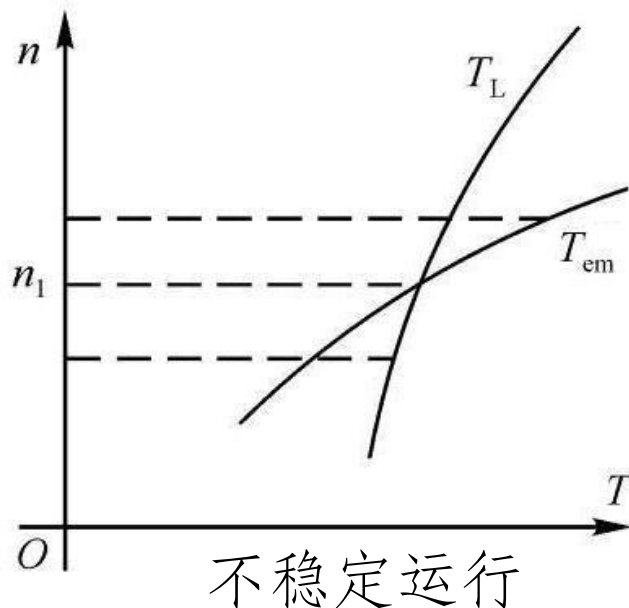
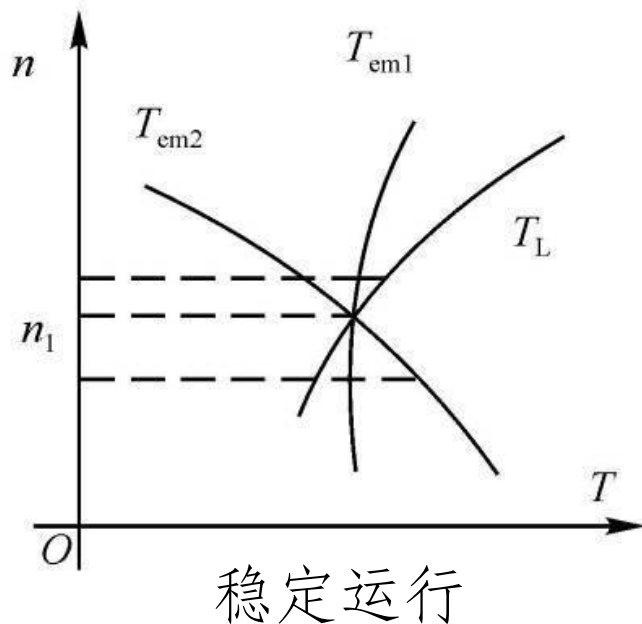
■ 恒功率负载，轧钢机，卷纸机，电气牵引车。

$$P = T_L \omega \text{ 为常数}$$



电机-负载稳定运行条件

❖ 稳定运行状态：设电机转速为 n ，若由于某种扰动，转速发生变化。当扰动消失后，电机能自行恢复到原转速 n ，则称 n 所表示的状态是稳定运行状态，否则是不稳定状态。



稳定运行条件：

$$\frac{dT_{em}}{dn} < \frac{dT_L}{dn}$$

电机-负载稳定运行条件

❖ 稳定运行条件的证明

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = J \frac{dn}{dt} \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{dT_{\text{em}}}{dn} - \frac{dT_{\text{L}}}{dn} \right) \frac{dn}{dt} = J \frac{d^2n}{dt^2}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{dT_{\text{em}}}{dn} - \frac{dT_{\text{L}}}{dn} \right) sN(s) = Js^2N(s)$$

$$\Rightarrow JsN(s) + \left(\frac{dT_{\text{L}}}{dn} - \frac{dT_{\text{em}}}{dn} \right) N(s) = 0$$

■ 特征方程
$$Js + \frac{dT_{\text{L}}}{dn} - \frac{dT_{\text{em}}}{dn} = 0$$

- 根据控制原理，稳定的条件是各项系数大于零：

$$\frac{dT_{\text{L}}}{dn} - \frac{dT_{\text{em}}}{dn} > 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dT_{\text{em}}}{dn} < \frac{dT_{\text{L}}}{dn}$$

直流电动机的起动

❖ 电动机接到规定电源后，转速从零上升到稳态转速的过程称为起动过程。系统要求起动电流要小，起动转矩要大的原因是为了保证电源供电质量和起动时间要短。

- 起动电流要小；
- 起动转矩要大；
- 起动设备要简单便可靠

直流电动机的起动



❖ 直接起动（全压起动）

- 操作方法简便，不需任何起动设备；
- 起动时冲击电流很大，冲击电源电压，影响同一电源的其他设备正常运行。
- 换向困难引起较大火花。
- 仅用于微小型电动机的起动。

❖ 电枢回路串电阻起动

- 电枢回路的外串电阻增大，起动电流减小
- 使用起动器时，起动过程中外串电阻逐段切除。

❖ 降压起动

- 没有起动电阻，起动过程平滑，起动过程中能量损耗少。
- 专用降压设备，成本较高。

思考题

❖ 并励（他励）直流电动机运行时，如果励磁回路突然断开，说明 Φ 、 E_a 、 I_a 、及 n 的变化趋势。

- 励磁回路断开，主极磁场只剩剩磁， n 不会立即变化。
- $E_a = C_e \Phi_r n$ 很小， I_a 急剧增大。
- $T = C_t \Phi_r I_a$ 两种可能

(1) I_a 增大比率高于主磁通减小的比率（剩磁大）

力矩 T 迅速增大，负载转矩 T_L 不变时，转速 n 快速升高， E_a 升高， I_a 开始减小，当 $T=T_L$ 时，电机在高转速下达到新稳态。此时， I_a 和 n 远大于电机额定值，电机出现“飞车”现象，易造成转子（换向器）损坏； I_a 过大，电机发热严重，换向火花过大，可能烧毁换向器和电枢绕组。

(2) I_a 增大比率低于主磁通减小的比率（剩磁小）

力矩 T 减小，负载转矩 T_L 不变时，转速 n 降低， E_a 减小， I_a 增大， T 增大， $n=0$ 时，有可能 T 仍然小于 T_L ， I_a 远大于额定电流 I_N ，可能烧毁电机。

并励（他励）直流电机运行时绝不允许励磁回路开路。

思考题

- ❖ 一台并励直流电动机在正转时有一定转速，现欲改变其旋转方向，为此停车后改变其励磁电流方向或电枢电流方向。重新起动后，发现它在同样的情况下的转速与原来不一样，这可能是什么原因？

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

- U 、 I_a 、 R_a 都不变
 - n 变化必然是主磁通 Φ 变化引起的
 - I_f 不变，造成 Φ 变化的原因只能是电枢反应的变化
 - I_a 不变，交轴电枢反应作用在电机正、反转时相同
 - 引起 Φ 变化的只能是直轴电枢反应
 - 电刷偏离几何中性线，是造成直轴电枢反应的原因
- ❖ 由于电刷偏离几何中性线造成的直轴电枢反应在电机正反转时的作用不同，即一个方向增磁，一个方向去磁，造成了正反转不一致的现象。

直流电动机的工作状态



❖ 直流电机两种状态：

- 电动机状态
- 发电机状态

❖ 电机和外加电压结合，工作状态可分为4种：

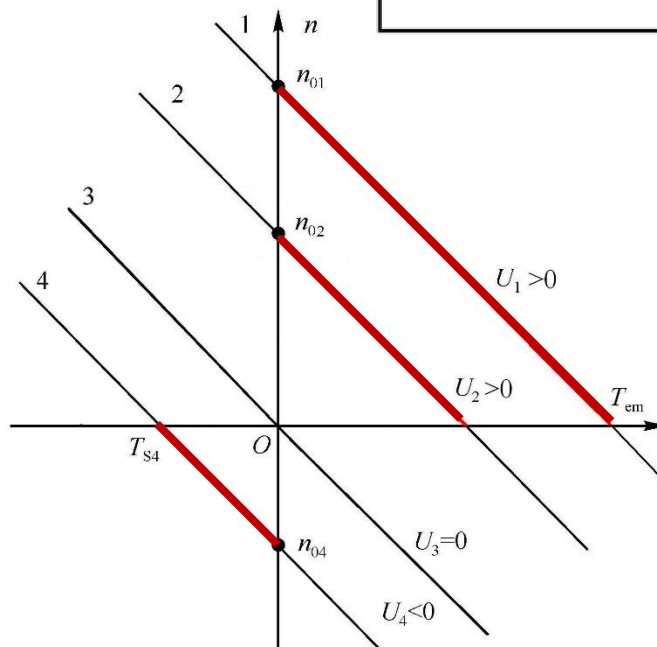
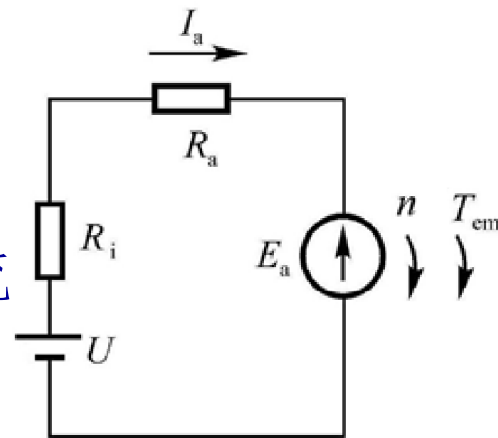
- 发电机状态
- 电动机状态
- 能耗制动状态
- 反接制动状态

直流电动机的工作状态

1、电动机状态

- 外加电压：大于电枢感应电势，方向相反
- 电流：与电枢感应电势反向，小于堵转电流
- 电磁转矩：与转速同方向，电动机特点。
- 能量关系：电能转化为机械能。
- 转速：低于理想空载转速。
- 机械特性：1、3象限

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_i}$$
$$n = n_0 - \frac{R_a + R_i}{K_e K_t} T_{em}$$



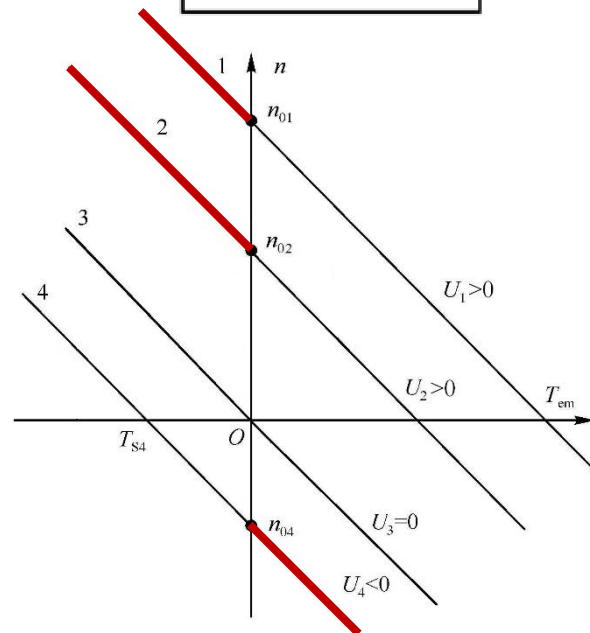
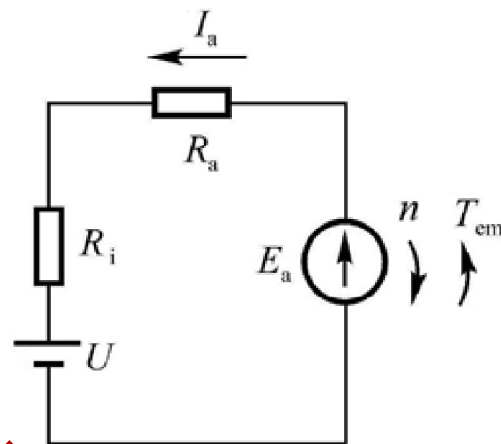
直流电动机的工作状态

2、发电机状态

- 外加电压：小于感应电势，方向相反。
- 电流：与感应电势方向相同。
- 电磁转矩：与电机转速 n 相反，制动转矩
- 能量关系：机械能转化为电能。
- 转速：高于理想空载转速。
- 机械特性：2、4象限

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_i}$$

$$n = n_0 - \frac{R_a + R_i}{K_e K_t} T_{em}$$



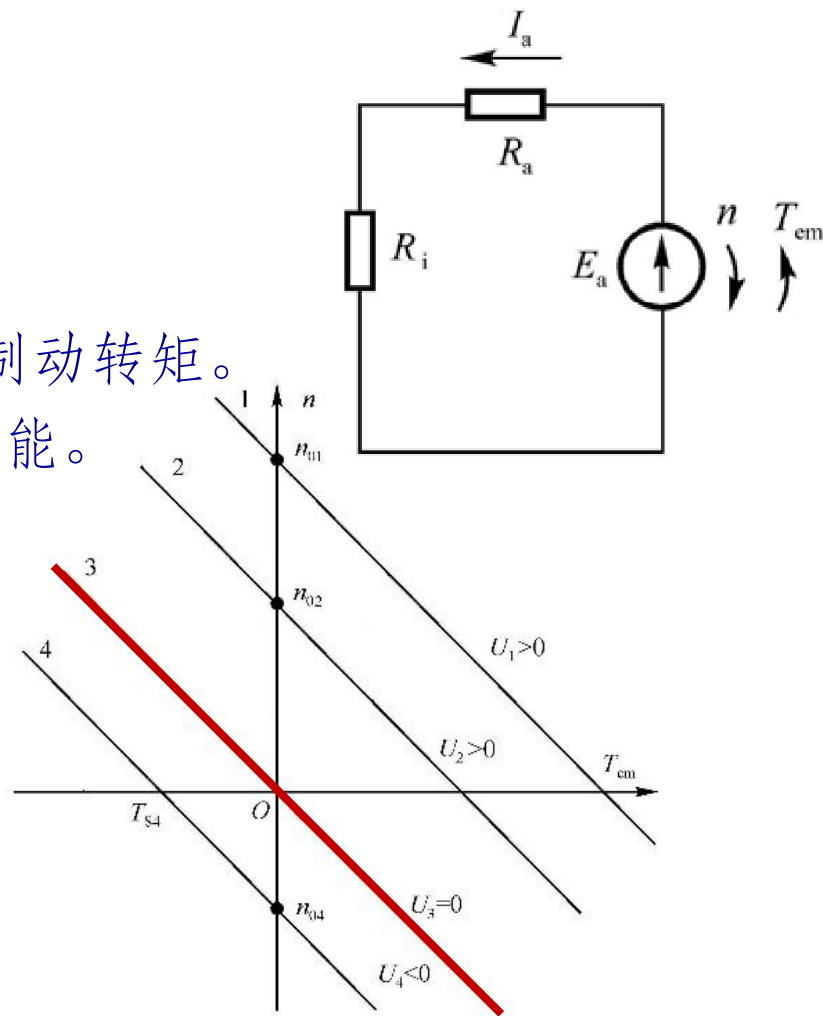
直流电动机的工作状态

3、能耗制动状态

- 外加电压：零。
- 电流：与电势同向。
- 电磁转矩：与电机转速 n 相反，是制动转矩。
- 能量关系：机械能转化为电能和热能。
- 机械特性：通过原点。

$$I_a = -\frac{E_a}{R_a + R_i} = -\frac{C_e \Phi}{R_a + R_i} n$$

$$n = -\frac{R_a + R_i}{C_e C_t \Phi^2} T_{em}$$



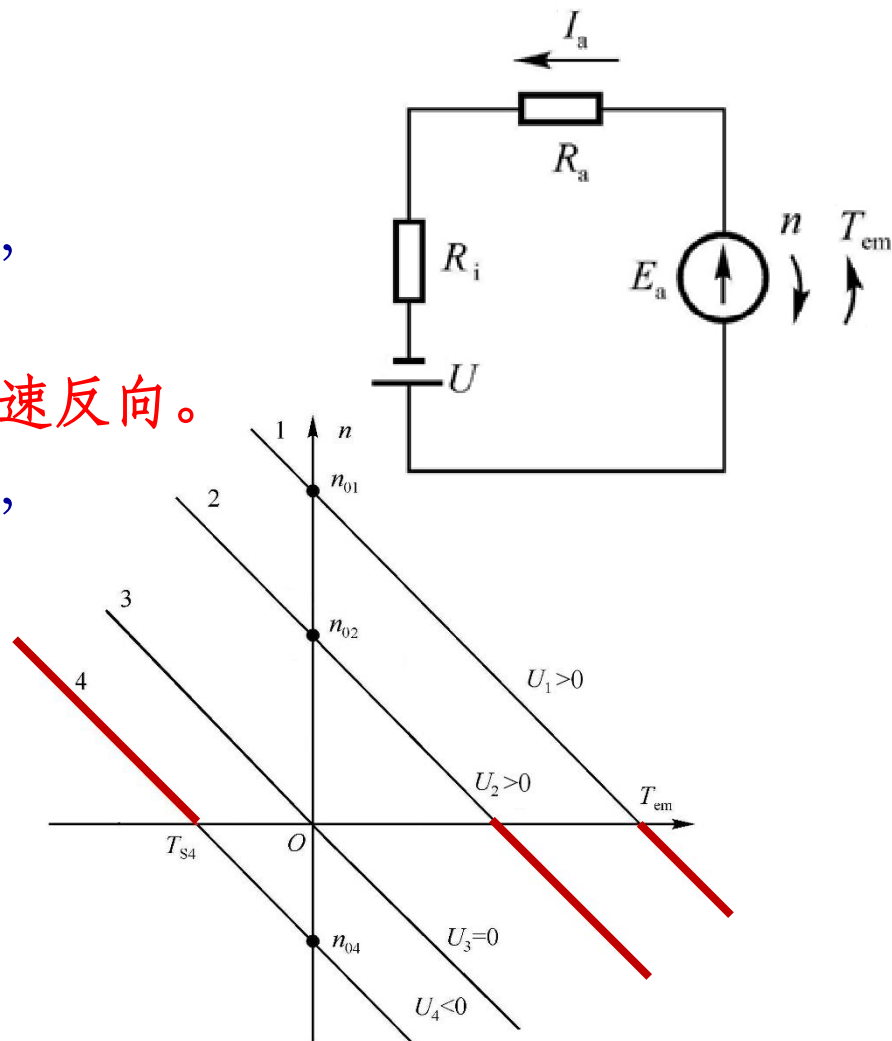
直流电动机的工作状态

4、反接制动状态

- 外加电压：与感应电势同向。
- 电流：与外电压、感应电势同向，大于堵转电流。
- 电磁转矩：**大于堵转转矩，与转速反向。**
- 能量关系：电源和电机输出电能，电阻消耗电能。
- 机械特性：4、2象限

$$I_a = \frac{U + E_a}{R_a + R_i}$$

$$|I_a| > |I_s| \quad |T_{em}| > |T_s|$$



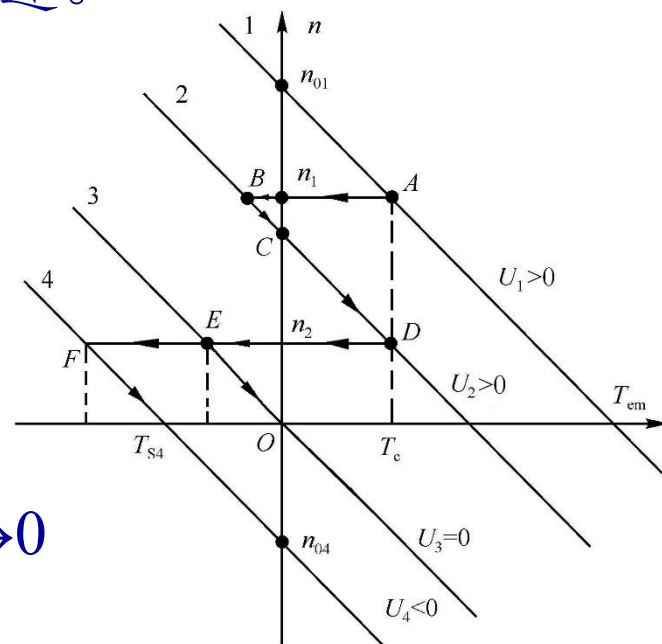
直流电动机的工作状态

❖ 例1：负载转矩 T_c 不变，电压 U_1 ，转速 n_1 ，调速由 n_1 至 n_2

- $U_1 \rightarrow U_2$ ， $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$
- $B \rightarrow C$ 阶段为发电机状态，加快减速。

❖ 例2：由 n_2 至 $n=0$ ，制动

- 能耗制动
 - $U_2 \rightarrow 0$ ， $D \rightarrow E \rightarrow 0$
- 反接制动
 - $U_2 \rightarrow U_4 < 0 \rightarrow 0$ ， $D \rightarrow F \rightarrow T_{s4} \rightarrow 0$
- 制动转矩加快减速过程。



直流电动机的动态特性

1、电枢控制时的动态特性

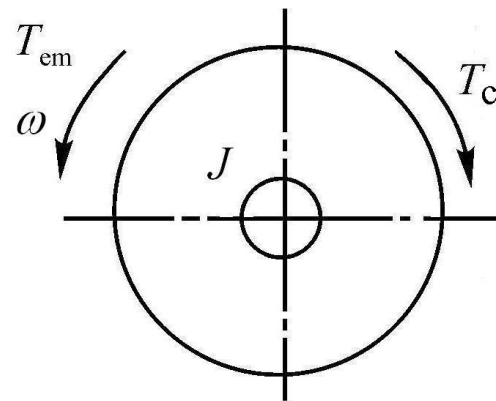
- 电枢电压 U_a 为输入，转速 ω 为输出。扰动力矩为 T_c 。

$$T_{em}(t) = K_t I_a(t) \Rightarrow T_{em}(s) = K_t I_a(s)$$

$$E_a(t) = K_e \omega(t) \Rightarrow E_a(s) = K_e \Omega(s)$$

$$T_{em}(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + T_c \Rightarrow T_{em}(s) = Js\Omega(s) + T_c(s)$$

$$U_a(t) = L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + R_a I_a(t) + E_a(t) \Rightarrow U_a(s) = (L_a s + R_a) I_a(s) + E_a(s)$$

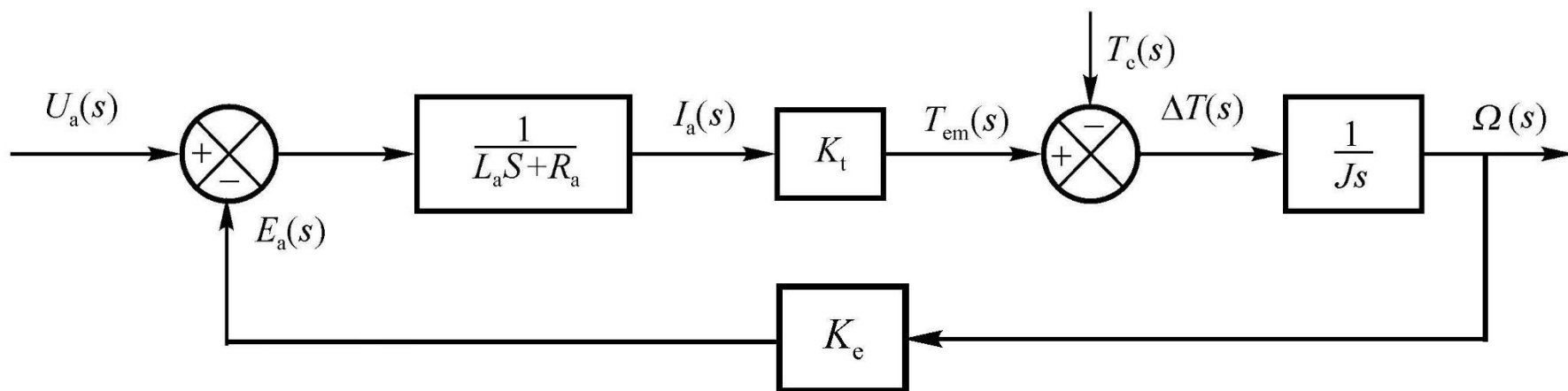


直流电动机的动态特性

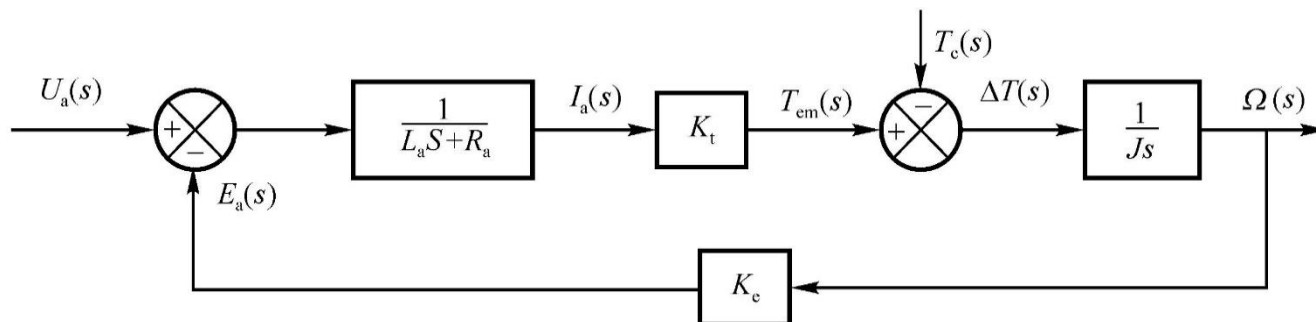
$$\begin{cases} T_{\text{em}}(s) = K_t I_a(s) \\ E_a(s) = K_e \Omega(s) \\ T_{\text{em}}(s) = Js\Omega(s) + T_c(s) \\ U_a(s) = (L_a s + R_a) I_a(s) + E_a(s) \end{cases}$$



$$\begin{cases} \Omega(s) = \frac{1}{Js} (T_{\text{em}}(s) - T_c(s)) \\ T_{\text{em}}(s) = K_t I_a(s) \\ I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} (U_a(s) - E_a(s)) \\ E_a(s) = K_e \Omega(s) \end{cases}$$



直流电动机的动态特性



❖ 直流电动机的传递函数

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \Rightarrow \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1}$$

❖ 机电时间常数

$$\tau_m = \frac{R_a J}{K_e K_t}$$

❖ 电磁时间常数

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$$

直流电动机的动态特性

❖ 直流电动机的传递函数

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1}$$

$$\tau_m > 10\tau_e$$

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)}$$

❖ $1/\tau_e$ 远远超过了控制系统的通频带

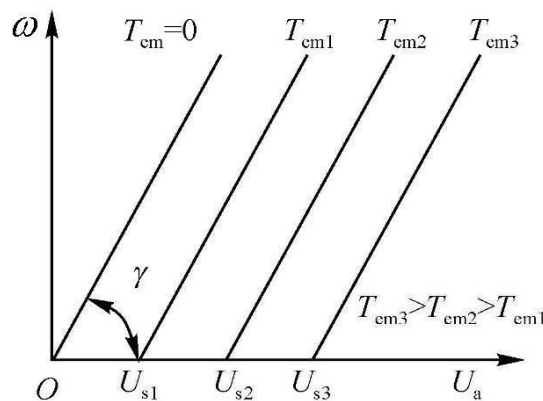
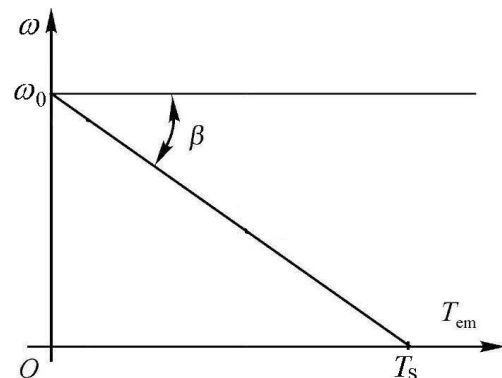
$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m s + 1}$$

直流电动机的动态特性

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m s + 1}$$

$$\tau_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = J \tan \beta = \frac{J \omega_0}{T_s}$$

$$\omega = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T_{em}$$



- ❖ 机电时间常数与机械特性斜率成正比。
- ❖ $1/K_e$ 是调节特性斜率
- ❖ 线性元件
- ❖ 静态特性
- ❖ 平行直线

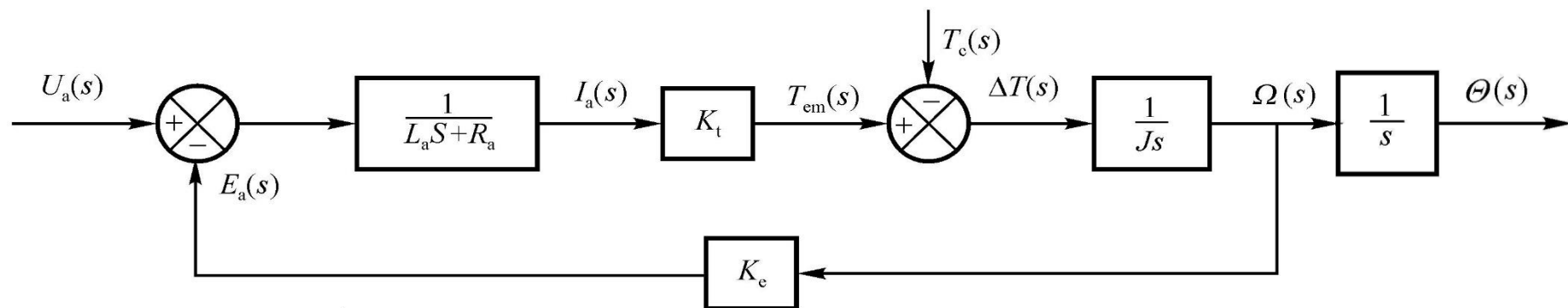
直流电动机的动态特性

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt \Rightarrow \Theta(s) = \frac{1}{s} \Omega(s) \Rightarrow \frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{s} \frac{\Omega(s)}{U_a(s)}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{s(\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1)}$$

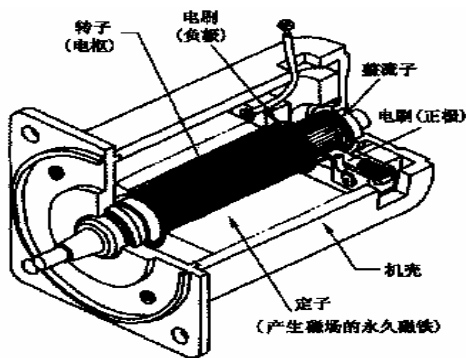
$$\frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{s(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)}$$

$$\frac{\Theta(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{s(\tau_m s + 1)}$$



直流伺服电机

- ❖ 直流伺服电动机在原理上与普通的直流电动机并无区别，但是由于伺服电机工作特点的要求，在具体实现上结构有些区别。
- ❖ 普通的电磁式直流伺服电动机有磁极，结构较复杂但控制方便，灵活，既可电枢控制，也可采用磁场控制。
- ❖ 永磁式直流伺服电动机只能进行电枢控制，但是结构较简单，体积小、出力大、效率高。



直流伺服电机



❖ 直流有刷伺服电机特点：

- 惯量小、动作快反应快、过载能力大、调速范围宽
- 低速力矩大, 波动小, 运行平稳
- 低噪音, 高效率
- 后端编码器反馈（选配）构成直流伺服

直流伺服电机



❖ 直流伺服电机控制特点：

- **稳定性好：**直流伺服电机具有下垂的机械性，能在较宽的调速范围内稳定运行。
- **可控性好：**直流伺服电机具有线性的调节特性。
- **响应迅速：**直流伺服电机具有较大的起动转矩和较小的转动惯量。
- **控制功率低，损耗小。**
- **转矩大：**直流伺服电机广泛应用于宽调速系统和精确位置控制系统中，其输出功率一般为1~600W，也有达数千瓦。电压有6V、9V、12V、24V、27V、48V、110V、220V等。转速可达1500~1600r/min。



详细说明 General Specifications

绝缘等级 Insulation Class	B	130℃ /F 155℃
运行温度 Operating Temperature Range	-5℃ ~ +50℃	
相对温度/湿度 Environment Temperature/Humidit	20±2℃, 65%±5%RH	
防护等级 Protection	IP00	
安装方式 Installation	IMB14	
可选择配件 Choose Components	磁编码器 Magnetic encoder	

电气性能 Electrical Specifications

电机型号 Model	额定电压 Rated Voltage (V)	空载转速 NoLoad speed (RPM)	空载电流 NoLoad Current (A)	额定转速 Rated Speed (RPM)	额定电流 Rated Current (A)	额定转矩 Rated Torque (N. M)	额定功率 Rated Power (W)	机身长度 Length L (MM)
80ZY12-001	12	5200	1.8	4200	13	0.23	100	102
80ZY24-001	24	6000	1.5	5000	6.7	0.2	105	102
80ZY24-002	24	3600	1	2800	7.5	0.42	120	112
80ZY100-001	100	2400	0.2	1900	1.2	0.4	78	112
80ZY24-003	24	3000	1.3	2500	9.7	0.6	155	137
80ZY220-001	220	3700	0.1	3000	1	0.45	140	137

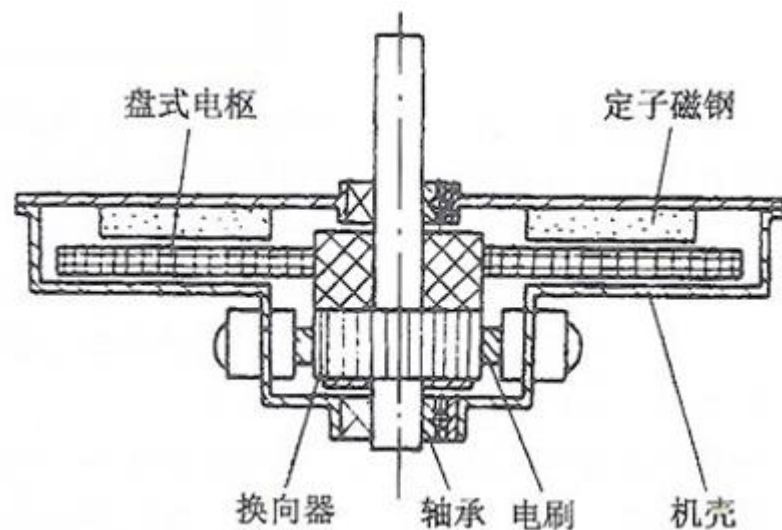
TN2P57 系列电机典型性能参数（可按客户要求提供 OEM 定制其他参数）

符号		单位	型号			
			TN2P57-07D	TN2P57-09C	TN2P57-12E	TN2P57-16D
Ke	Back E.M.F	Volts/KRPM	6.0	5.6	12.1	12.0
Kt	Torque Constant	oz-in/Amp (mN.m/Amp)	8.1 (57.3)	7.6 (53.5)	16.4 (115.6)	16.2 (114.6)
Rt	Terminal Resistance	Ohms	1.00	0.62	1.75	1.30
L	Inductance	mH	1.1	0.76	2.46	2.03
Rth	Thermal Resistance	Deg C/Watt	4.9	4.4	3.8	2.9
Vt	Voltage Terminal	V dc	24	24	48	48
n _o	No load Speed @ Vt	RPM	4000	4286	3967	4000
I _o	No load Current @ Vt	Amp	0.55	0.60	0.28	0.32
T _c	Cont. Torque	oz-in (N.m)	21 (0.15)	30 (0.21)	45 (0.32)	65 (0.46)
n _c	Speed @ Vt & Tc	RPM	3558	3847	3569	3569
I _c	Current @ Vt & Tc	Amp	3.2	4.6	3.0	4.3
P _o	Power Out @ Vt & Tc	Watts	57	85	119	170
T _p	Peak Torque	oz-in (N.m)	42 (0.30)	59 (0.42)	91 (0.64)	129 (0.91)
n _p	Speed @ Vt & Tp	RPM	3117	3409	3172	3139
I _p	Current @ Vt & Tp	Amp	5.8	8.5	5.8	8.3

低惯量直流伺服电机

❖ 线绕盘式直流伺服电动机

电枢无铁心，没有磁饱和效应和齿槽效应，换向性能好，时间常数小，快速响应性能好。



低惯量直流伺服电机

❖ 印制绕组直流伺服电动机

电枢无铁心，没有磁饱和效应和齿槽效应，换向性能好，时间常数小，快速响应性能好

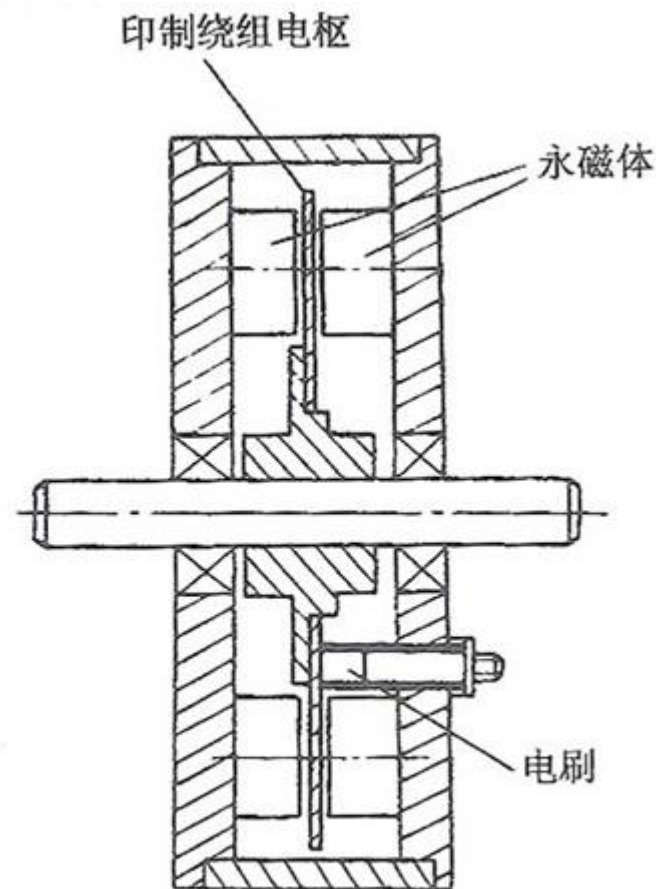


图 3-1-4 印制绕组直流伺服电动机结构

低惯量直流伺服电机

❖ 杯型电枢直流伺服电动机

转动惯量非常小，具有较高的加速能力，时间常数小。

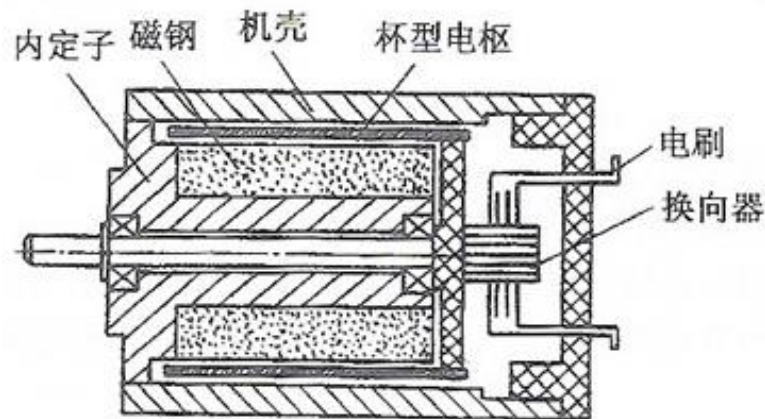


图3-1-6 空心杯型电枢直流伺服电动机结构



宽调速直流伺服电机

❖ 宽调速直流伺服电动机

- 具有调速范围宽，在闭环控制中调速比可做到1:2000以上；
- 过载能力强，最大转矩可为额定转矩的5到10倍；
- 低速转矩大，可以与负载同轴连接。
- 这类电机目前广泛使用在数控机床的进给伺服驱动、雷达天线驱动及其它伺服跟踪驱动系统中。



直流力矩电机



- ❖ $P=T\omega$ ，在功率相同时，转速越高，力矩越小；体积和重量就越小。所以高速电机多。
- ❖ 直流伺服电动机属于高速电机，额定转速为每分钟几千转，低速性差，更不宜在堵转下工作。力矩小。
- ❖ 带动低速负载及大转矩负载要用减速器。
- ❖ 直流力矩电机转速低（几十转/分）、转矩大，可在堵转下长期工作。可以直接带动低速负载和大转矩负载，转速和力矩波动小，机械特性和调节特性线性度好，特别适用于高精度的位置伺服系统。

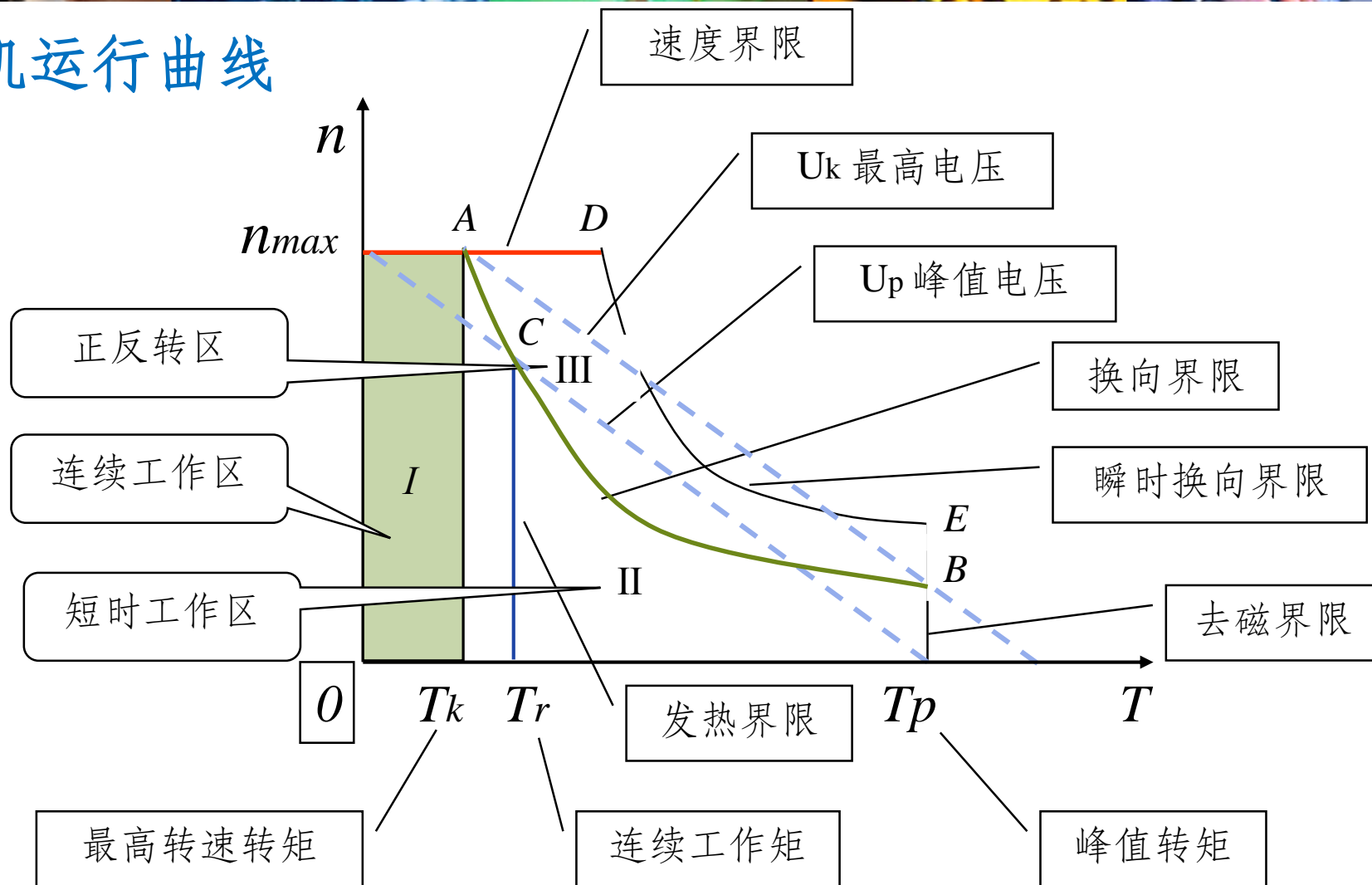
直流力矩电机



- ❖ 结构特点：永磁，多极，外形扁平。
- ❖ 转矩大，空载转速低。 K_e 、 K_t 大。
- ❖ 极对数 p 多，并联支路对数 a 小。
- ❖ 磁密高的永磁材料。
- ❖ 大力矩需要电枢直径大，由于体积不变，故电枢是扁平形状。
- ❖ 关键参数：峰值堵转电流、峰值堵转力矩。

直流电动机的选择

电机运行曲线



直流电动机的选择

功率与转矩

$$P_{20} = K(T_L + J_L \alpha_L) \omega_L (\text{单位: W})$$

$$i \leq \frac{n_N}{n_L} \text{ 或 } i \leq \frac{n_0}{2n_L}$$

$$T_{2\max} = \frac{T_L}{i \cdot \eta} + (J_m + J_i + \frac{J_L}{\eta \cdot i^2}) i \alpha_{L\max}$$

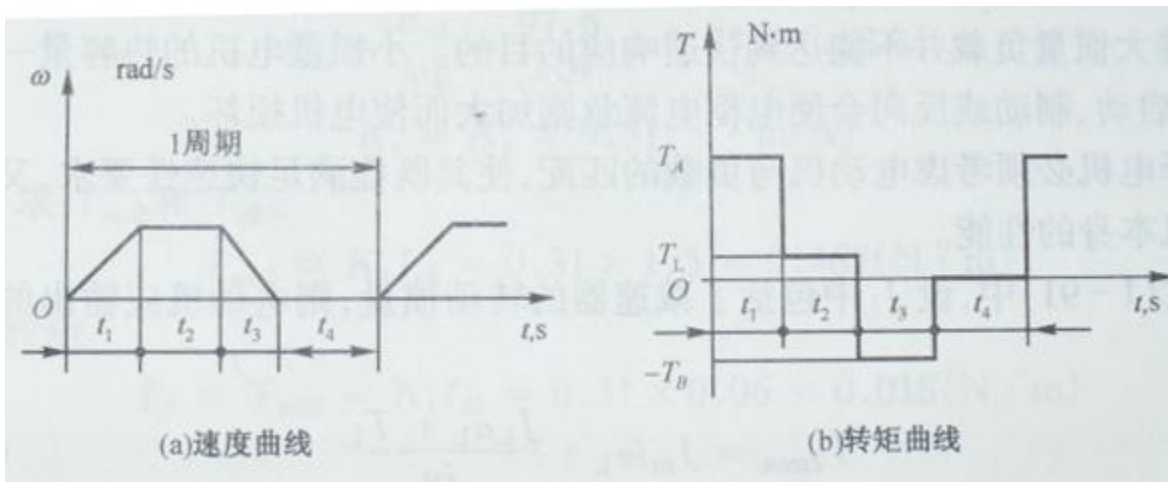
$$P_{2\max} = T_{2\max} \omega_{L\max} i (W)$$

$$P_{2\max} = 0.105 T_{2\max} \times n_{L\max} \times i (W)$$

直流电动机的选择

功率与转矩

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_A^2 t_1 + T_L^2 t_2 + T_B^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}$$



直流电动机的选择

电流与电压

- 改变减速比*i*，以便减小 $T_{2\max}$ ；
- 选择高 K_t 的电动机；
- 使阻转矩减少至最小，以便减小 $T_{2\max}$

$$I_{\max} = \frac{T_{2\max} + T_0}{K_t}$$
$$U_{\max} = I_{\max} R_a + K_e \cdot i \cdot \omega_L = I_{\max} R_a + K_e \omega_{\max}$$

电动机与负载的惯量匹配

$$\text{电动机最大转矩: } T_{2\max} = J_m i \alpha_L + \frac{J_L \alpha_L + T_L}{i \eta}$$

$$\text{使 } T_{2\max} \text{ 最小的最佳减速比: } i_0 = \sqrt{\frac{J_L \alpha_L + T_L}{J_m i \alpha}}$$

$$\eta = 1, T_L = 0; i_0^2 = J_L / J_m$$

$$J_m \geq \frac{1}{3} \cdot \frac{J_L}{i^2}$$

$$\text{最佳减速比 } i_0 \text{ 时的最大转矩: } T_{2\max} = 2 \sqrt{\frac{J_m \alpha_L (J_L \alpha_L + T_L)}{\eta}}$$

直流电动机参数计算公式

名称	公式	符号、单位
初选电动机功率	$P_{20} = K(T_L + J_L \alpha_L) \omega_L$	P_{20} : W T_L : N.m ω_L : rad/s K: 经验系数。大中功率 1.2—1.5; 小功率 2—2.5;
初选减速比	$i \leq \frac{n_N}{n_L} \text{ 或 } i \leq \frac{n_0}{2n_L}$	i : 减速比
电动机最大转矩	$T_{2\max} = \frac{T_L}{i \cdot \eta} + (J_m + J_i + \frac{J_L}{\eta \cdot i^2}) i \alpha_{L\max}$	J_m : 电动机惯量 kg · m ² J_i : 减速器惯量 kg · m ² J_L : 负载惯量 kg · m ² $\alpha_{L\max}$: m/s ² η : 0.9-0.94
电动机最大输出功率	$P_{2\max} = T_{2\max} \omega_{L\max} i (W)$ $P_{2\max} = 0.105 T_{2\max} \times n_{L\max} \times i (W)$	$P_{2\max}$: W $T_{2\max}$: N.m $n_{L\max}$: r/min
电动机电枢电流	$I_{\max} = \frac{T_{2\max} + T_0}{K_t}$	
电动机电枢电压	$U_{\max} = I_{\max} R_a + K_e \cdot i \cdot \omega_L$ $= I_{\max} R_a + K_e \omega_{\max}$	

直流电机总结

❖ 直流电机工作原理

- 发电机: $e = B_{\delta}(x)lv$
- 电动机: $f = B_{\delta}(x)li$
- 交流、直流、机械整流

❖ 直流电机结构

- 定子（永磁、励磁）、转子
- 励磁方式：他励、并励、串励、复励

❖ 直流电机额定值

- 额定功率 ⇨ 输出功率

直流电机总结

❖ 直流电机气隙磁场

■ 空载磁场 ($I_a = 0$)

- 主磁通、漏磁通
- 励磁磁动势 B_δ 、 B_{av} 、极距 τ

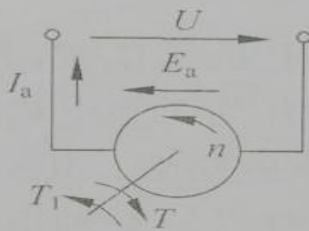
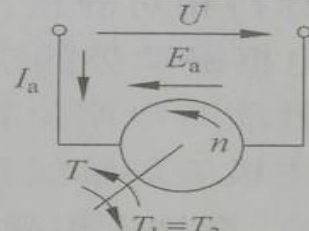
■ 负载磁场 ($I_a \neq 0$)

- 交轴磁势、直轴磁势
- 电枢磁动势空间分布
- 电枢反应

• 直流电机换向

直流电机总结

❖ 直流电机基本关系式

关 系 类 别		发 电 机	电 动 机
电枢电动势		$E_a = C_e \Phi n$ (其中 $C_e = \frac{pz}{60a}$)	
电磁转矩		$T = C_T \Phi I_a$ (其中 $C_T = \frac{pz}{2\pi a}$)	
惯 例			
电 流 关 系	他 励	$I = I_a$	
	并 励	$I = I_a + I_f$	$I = I_a + I_f$
电动势平衡方程式		$E_a = U + I_a R_a$	$U = E_a + I_a R_a$
转矩平衡方程式		$T_1 = T + T_0$	$T = T_2 + T_0$
功率平衡方程式		$P_1 = P_{em} + p_0$ $P_{em} = P_2 + p_{Cu} (+ p_{Cuf}, \text{并励时})$	$P_1 = P_{em} + p_{Cu} (+ p_{Cuf}, \text{并励时})$ $P_{em} = P_2 + p_0$
		$p_0 = p_m + p_{Fe} + p_{ad}$	
功率、转矩关系		$P_{em} = T\Omega = E_a I_a, \quad p_0 = T_0 \Omega, \quad p_{Cu} = I_a^2 R_a, \quad p_{Cuf} = U_f I_f = I_f^2 R_f$	
		$P_1 = T_1 \Omega, \quad P_2 = UI$	$P_1 = UI, \quad P_2 = T_2 \Omega$

直流电机总结

❖ 直流电机特性

■ 静态特性

- 机械特性
- 调节特性
- 调速：改变电枢电压，磁通，电枢回路电阻
- 稳定运行条件

❖ 直流电机工作状态

- 电动机状态
- 发电机状态
- 能耗制动状态
- 反接制动状态

计算题

❖ 有一并励电动机，其额定数据如下： $P_2=22\text{KW}$ ， $U_N=110\text{V}$ ， $n_N=1000\text{r/min}$ ， $\eta=0.84$ ， $R_f=27.5\Omega$ ， $R_a=0.04\Omega$ 。

试求： (1) 额定电枢电流 I_a 及额定励磁电流 I_f ；
(2) 损耗功率 ΔP_{aCu} ，及 ΔP_O ；
(3) 额定转矩 T ；
(4) 反电动势 E 。

解： (1) P_2 是输出功率，额定输入功率为

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{22}{0.84} = 26.19 \text{ KW}$$

额定励磁电流

$$I_f = \frac{u}{R_f} = \frac{110}{27.5} = 4 \text{ A}$$

计算题

额定励磁电流 $I_f = \frac{u}{R_f} = \frac{110}{27.5} = 4 \text{ A}$

额定电枢电流 $I_a = I - I_f = 238 - 4 = 234 \text{ A}$

(2) 电枢电路铜损

$$\Delta P_{aCu} = R_a I_a^2 = 0.04 \times 234^2 = 2190 \text{ W}$$

励磁电路铜损

$$\Delta P_{fCu} = R_f I_f^2 = 27.5 \times 4^2 = 440 \text{ W}$$

总损失功率

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_2 = 26190 - 22000 = 4190 \text{ W}$$

空载损耗功率

$$\Sigma \Delta P_0 = \Sigma \Delta P_1 - \Delta P_{aCu} = 4190 - 2190 = 2000 \text{ W}$$

计算题

(3) 额定转矩

$$T = 9550 \frac{P_2}{n} = 9550 \frac{22}{1000} = 210 \text{ N.m}$$

(4) 反电动势

$$E = U - R_a I_a = 110 - 0.04 \times 234 = 100.6 \text{ V}$$

计算题

❖ 有一他励电动机，已知： $I_a=68.5\text{A}$ ， $P_N=13\text{KW}$ ， $n_N=1500\text{r/min}$ ， $R_a=0.225\Omega$ ， $U_N=220\text{V}$

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

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

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

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

$$R = 0.995 \Omega$$

$$= \frac{220 - (0.225 + R) \times 68.5}{220 - 0.225 \times 68.5} = \frac{1000}{1500}$$

计算题

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

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

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

$$U = 151.8\text{V}$$

计算题

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

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

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

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

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

作业

❖ 《自动控制元件及线路第五版》第一章课后习题
6、7