



自动控制实践I

直流电机的动特性与选择

哈尔滨工业大学空间控制与惯性技术研究中心 解伟男

回顾

○ 直流电机的基本关系式

n 电枢电磁转矩:

$$T_{em} = C_t \Phi I = K_t I$$

n 电枢感应电动势:

$$E_a = C_e \Phi n = K_e \omega$$

n 电压平衡关系:

$$U_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + E_a$$

电动机

$$E_a = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + U_a$$

发电机

n 转矩平衡关系:

$$T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt}$$

电动机

$$T_1 = T_0 + T_{em} + J \frac{d\omega}{dt}$$

发电机

回顾

○ 直流电机的基本关系式

n 功率平衡关系:

$$P_1 = p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c + P_{em}$$

$$P_{em} = p_{mech} + p_{Fe} + P_2$$

电动机

$$P_1 = p_{mech} + p_{Fe} + P_{em}$$

$$P_{em} = p_{Cuf} + p_{Cua} + p_c + P_2$$

发电机

○ 直流电机的铭牌

n 额定功率 P_N (KW)

直流电动机: 额定工况下轴上输出的机械功率

直流发电机: 额定工况下电机出线端输出的电功率

n 额定电压 U_N (V)

直流电动机: 额定工况下电枢上施加的直流电压

直流发电机: 额定工况下电枢上输出的直流电压

回顾

○ 直流电机的铭牌

n 额定电流 $P_N(A)$

直流电动机：额定电压下，轴上输出额定功率时的电流

$$P_N = U_N * I_N * h$$

直流发电机：额定输出电压和额定输出功率时，直流电机出线段输出的电流

$$P_N = U_N * I_N$$

○ 直流电机的静特性与控制方法

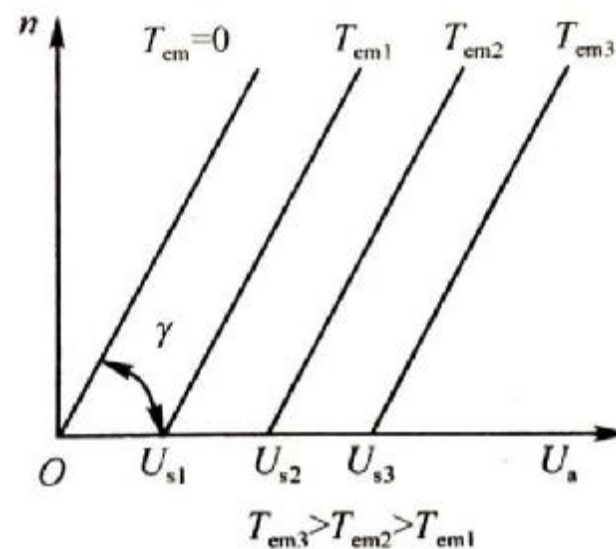
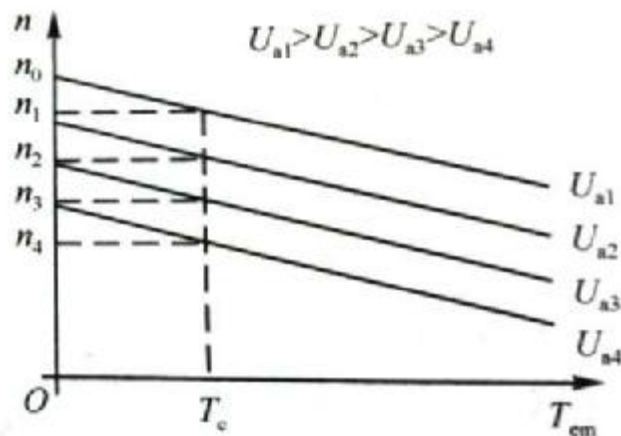
$$n = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \Phi^2}$$

回顾

○ 直流电机的静特性与控制方法

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

n 电枢控制

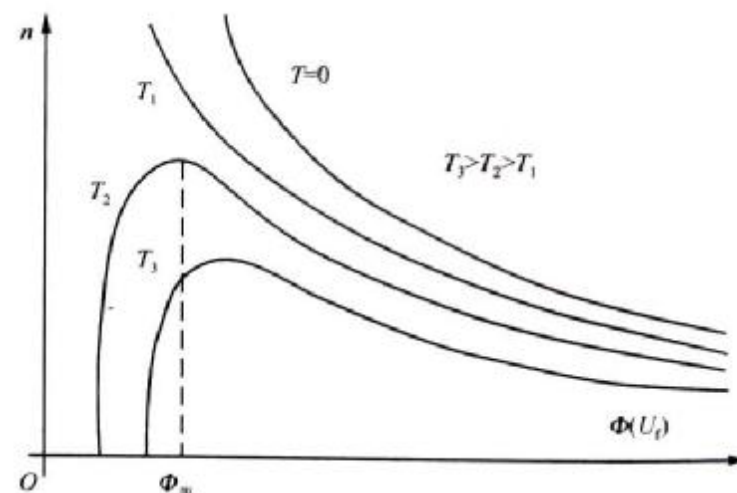
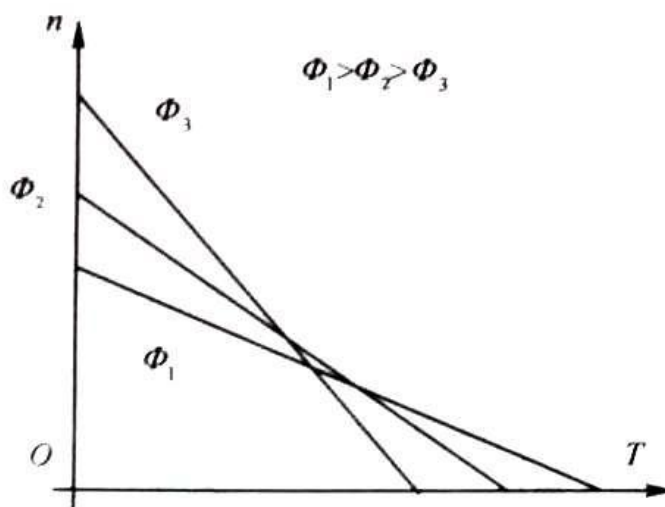


回顾

○ 直流电机的静特性与控制方法

n 磁场控制

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

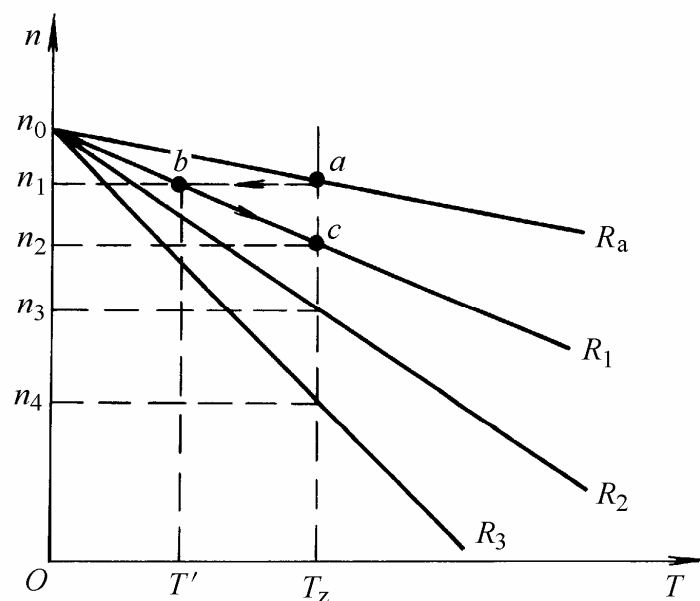


回顾

○ 直流电机的静特性与控制方法

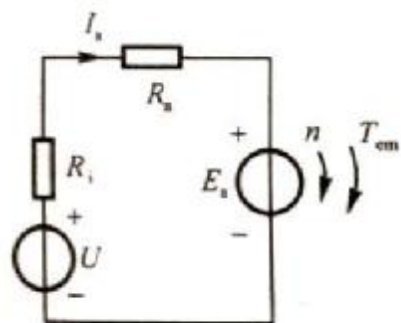
n 改变电枢回路串联电阻

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

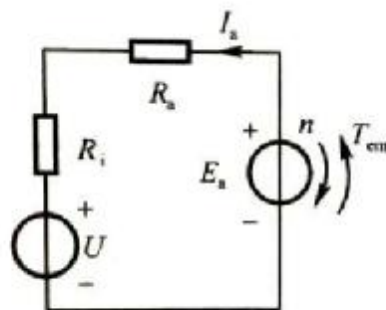


回顾

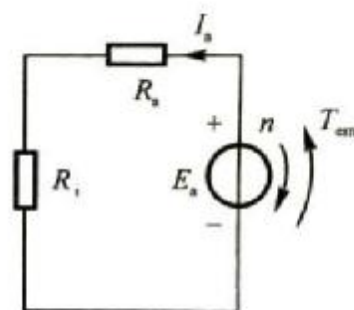
○ 直流电机的工作状态



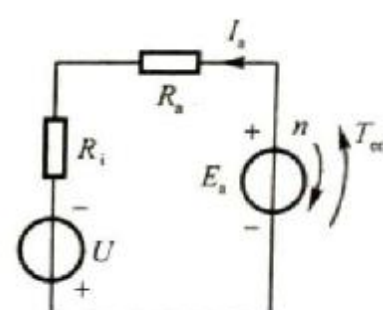
(a)电动机工作状态



(b)发电机工作状态



(c)能耗制动状态



(d)反接制动状态

目 录

- 1 直流电动机的动态特性
- 2 直流伺服电动机
- 3 直流电动机的选择
- 4 例题



1 直流电动机的动态特性

- 过度过程：电动机从一个稳态到另一个稳态的变化过程就叫做动态过程，或称过度过程。
- 动态特性：在动态过程中，直流电动机所具有的特性，或者说它的一些物理量(如转速、反电势、电流、电磁转矩)随时间变化的规律就称为动态特性。
- 动态特性的描述方法：
 - n 微分方程
 - n 方框图
 - n 传递函数

1 直流电动机的动态特性

○ 电枢控制时的动态特性

n 电磁转矩

$$T_{em}(t) = K_t I_a(t)$$

$$T_{em}(s) = K_t I_a(s)$$

n 感应电势

$$E_a(t) = K_e \omega(t)$$

$$E_a(s) = K_e \Omega(s)$$

n 转矩平衡关系

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

$$T_{em}(s) = Js\Omega(s) + T_c(s)$$

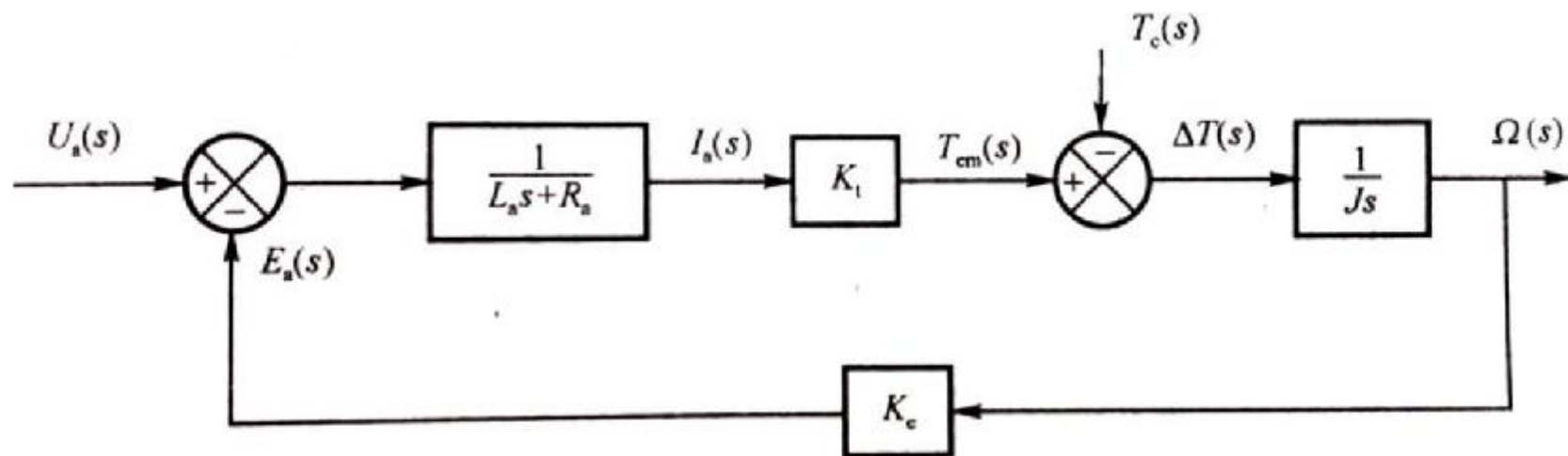
n 电压平衡关系

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

$$U_a(s) = L_a s I_a(s) + R_a I_a(s) + E_a(s)$$

1 直流电动机的动态特性

○ 电枢控制时的动态特性



$$T_{em}(s) = K_t I_a(s)$$

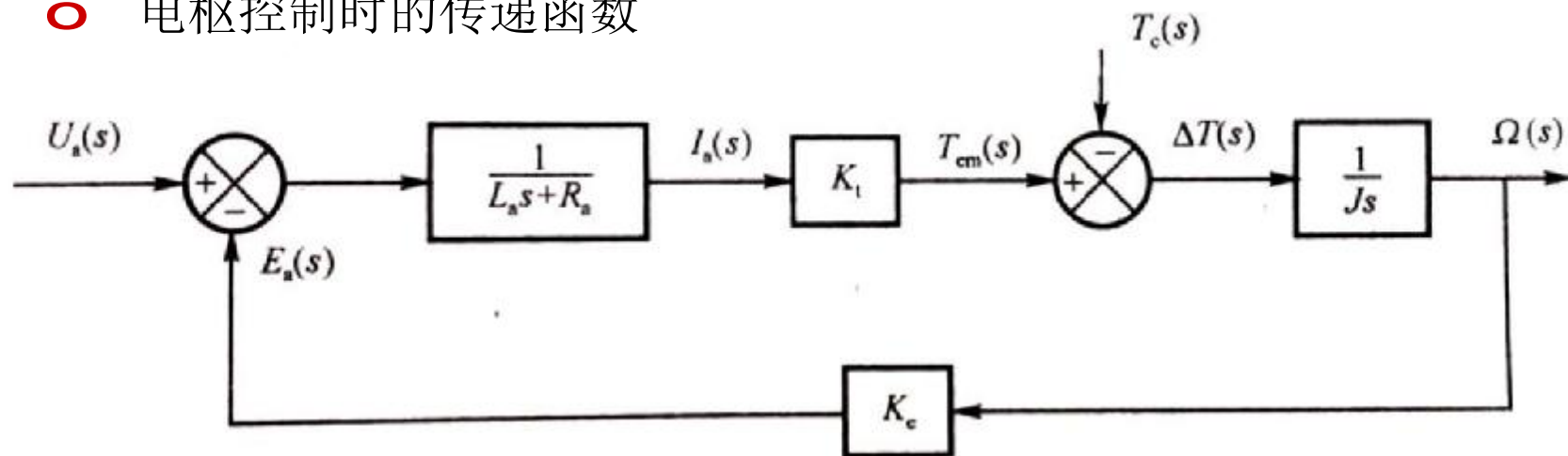
$$E_a(s) = K_e \Omega(s)$$

$$T_{em}(s) = Js\Omega(s) + T_c(s)$$

$$U_a(s) = L_a s I_a(s) + R_a I_a(s) + E_a(s)$$

1 直流电动机的动态特性

○ 电枢控制时的传递函数



令干扰力矩 $T_c=0$

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

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

其中 τ_m 为机电时间常数

$$t_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = J \tan b$$

其中 τ_e 为电磁时间常数

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

1 直流电动机的动态特性

○ 电枢控制时的传递函数

令干扰力矩 $T_c=0$

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

一般情况下 $\tau_m > 10 \tau_e$ ，此时传递函数可简化为

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

当 τ_e 很小，且 $1/\tau_e$ 远远超过了系统带宽，此时传递函数可简化为

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

1 直流电动机的动态特性

○ 电枢控制时的传递函数

- n 机电时间常数 τ_m 是决定电动机的惯性和过度过程时间的主要数据，机械特性越硬 τ_m 越小，力矩惯量比 (T_s/J) 越大的电机 τ_m 越小。

$$t_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = J \tan b = J \frac{W_0}{T_s}$$

- n 在计算机电时间常数 τ_m 时 J 应该包括负载的折算转动惯量。
- n 在计算机电时间常数 τ_m 时 R_a 应该包括功率放大器的内阻，即机械特性硬度与功放内阻有关。

2 直流伺服电动机

- 直流伺服电动机是专门为控制系统特别是伺服系统设计和制造的一种电机，他的转子运动受输入信号控制能作快速反应。
- 工作原理、结构和基本特性与普通直流电动机没有大的区别，但为满足控制系统要求，在结构和性能上做了些改进
 - n 采用细长的电枢以便降低转动惯量，约为直流电动机的 $1/3 \sim 1/2$ ；
 - n 具有优良的换向性能，在大的峰值电流冲击下仍能确保良好的换向条件，因此具有大的瞬时电流和瞬时转矩；
 - n 机械强度高，能够承受住巨大的加速度造成的冲击力作用；
 - n 电刷一般都安放在几何中性面上，以确保正反转特性对称；

2 直流伺服电动机

- 直流力矩电机是一种低转速、大转矩的直流电机，可在堵转下长期工作。
- 直流力矩电机可直接带动低速负载和大转矩负载，具有转速和力矩波动小，机械特性和调节特性线性度好等优点，特别适用于高精度位置伺服系统和低速控制系统。
- 直径大

$$T_{em} = B l I D / 2$$

- 力矩伺服：电机胖， $L/D \approx 0.2 \sim 0.5$ ，力矩波动小，可长时间堵转。

3 直流电动机的选择

○ 直流电机中常用的额定值

- n** 额定功率：电动机在额定工况运行时，其轴端输出的机械功率。
- n** 额定电压：额定工况运行时，电动机的激磁绕组和电枢绕组上所加电压。
- n** 额定电流：在额定电压下，负载达到额定功率时的电枢电流和激磁电流。对于连续运行的直流电动机，其额定电流就是电机长期安全运行的最大电流。短期超过额定电流是允许的。
- n** 额定转速：电动机在额定工况运行时的每分钟转数。它不是电动机允许的最高转速。
- n** 额定转矩：电动机在额定工况时的输出转矩。

电机轴端输出转矩 T_2 、机械功率 $P_2(W)$ 、旋转角速度 ω (rad/s)、 $n(r/min)$ 转速的关系为：

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} N \cdot m = 97400 \frac{P_2}{n} gf \cdot cm$$

3 直流电动机的选择

○ 直流电机中常用的额定值

电机轴端输出转矩 T_2 、机械功率 $P_2(W)$ 、旋转角速度 ω (rad/s)、 n (r/min) 转速的关系为:

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} N \cdot m = 97400 \frac{P_2}{n} gf \cdot cm$$

项 目 型 号	电压 V	电流 A	转矩 $N \cdot m \times 10^{-5}$	转速 r/min	始动电压 V	功率 W	寿命 h	重量 kg
23SYT0	27	0.3	25×9.8	9700			200	0.057
23SYT3	27	0.3	25×9.8	9700			200	0.057
32SYT0	27	0.65	48×9.8	15000		7.4	200	0.16
32SYT3	27	0.7	75×9.8	9000	3		200	0.16
32SYT4	27	0.95	3300×9.8	120	5		70	0.20

成都微精电机股份有限公司 SYT系列永磁直流伺服电动机

3 直流电动机的选择

○ 直流电机中常用的额定值

电机轴端输出转矩 T_2 、机械功率 $P_2(W)$ 、旋转角速度 ω (rad/s)、 n (r/min) 转速的关系为:

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} N \cdot m = 97400 \frac{P_2}{n} gf \cdot cm$$

75 SZD (24V)

技术参数 Technical Parameter



机座号 Frame		75SZD						
规格序号 No.		01	02	03	04	05	06	07
额定功率 Rated Power	kW	0.1				0.15		
额定转矩 Rated Torque	Nm	0.96	0.64	0.48	0.32	0.96	0.72	0.48
额定转速 Rated Speed	r/min	1000	1500	2000	3000	1500	2000	3000
额定电压								

上海矩奉电机自动化有限公司 稀土永磁直流伺服电机

3 直流电动机的选择

$$T_2 = \frac{P_2}{\omega} N \cdot m = 97400 \frac{P_2}{n} \text{ gf} \cdot \text{cm}$$

○ 直流电机中常用的额定值

日本安川SGMAH型伺服电机的额定值与规格

电压		200 V						100 V			
伺服电机型号 SGMAH-		A3A	A5A	01A	02A	04A	08A	A3B	A5B	01B	02B
额定输出 *1	kW	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.75	0.03	0.05	0.1	0.2
额定扭矩 *1, *2	N · m	0.0955	0.159	0.318	0.637	1.27	2.39	0.0955	0.159	0.318	0.637
瞬时最大扭矩 *1	N · m	0.286	0.477	0.955	1.91	3.82	7.16	0.286	0.477	0.955	1.91
额定电流 *1	A (rms)	0.44	0.64	0.91	2.1	2.8	4.4	0.66	0.95	2.4	3.0
瞬时最大电流 *1	A (rms)	1.3	2.0	2.8	6.5	8.5	13.4	2.0	2.9	7.2	9.0
额定转速 *1	r/min	3000									
最高转速 *1	r/min	5000									
扭矩常数	N · m/A (rms)	0.238	0.268	0.378	0.327	0.498	0.590	0.157	0.182	0.146	0.234
旋转惯性动量 J	×10 ⁻⁴ Kg · m ²	0.0166	0.0220	0.0364	0.106	0.173	0.672	0.0166	0.0220	0.0364	0.106
额定功率 *1	kW/s	5.49	11.5	27.8	38.2	93.7	84.8	5.49	11.5	27.8	38.2
额定角加速度 *1	rad/s ²	57500	72300	87400	60100	73600	35500	57500	72300	87400	60100
机械性时间常数	ms	1.4	0.88	0.53	0.39	0.25	0.26	1.4	0.85	0.61	0.41
电气性时间常数	ms	1.0	1.1	1.2	4.6	5.4	8.7	1.0	1.1	1.1	4.4

3 直流电动机的选择

○ 电机的参数选择

n 功率 P_{20}

$$P_{20} = K(T_L + J_L a_L) \omega_L \quad W$$

T_L 为负载转矩(Nm), J_L 为负载的转动惯量(kgm²), a_L 为负载加速度(rad/s²), ω_L 为负载的角速度(rad/s), K 为经验系数, 对大、中功率系统为1.2~1.5, 对小功率系统为2~2.5。

n 减速比*i*

减速比即减速装置的传动比, 指减速机构中瞬时输入速度与输出速度的比值。

$$i \leq \frac{n_n}{n_L}$$

或

$$i \leq \frac{n_0}{2n_L}$$



n_L 为负载的转速, n_n 为直流电动机的额定转速, n_0 为直流电动机的空载转速。

3 直流电动机的选择

○ 电机的参数选择

n 减速比*i*对转速的影响

$$\frac{w}{w_L} = i \quad \Rightarrow \quad w = i w_L$$

结论：若用减速比为*i*的减速器，负载转速为 ω_L ，则在电机端看转速为*i* ω_L ；

n 减速比*i*对角加速度的影响

$$\left. \begin{array}{l} w = i w_L \\ dw/dt = a \\ dw_L/dt = a_L \end{array} \right\} \Rightarrow a = i a_L$$

结论：若用减速比为*i*的减速器，负载角加速度为 α_L ，则在电机端看角加速度为*i* α_L ；

3 直流电动机的选择

o 电机的参数选择

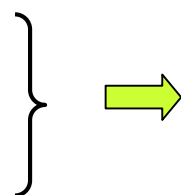
n 减速比*i*对转动惯量影响

动能守恒

$$\frac{1}{2}Jw^2$$

$$\frac{1}{2}Jw^2 = \frac{1}{2}J_L w_L^2$$

$$w/i = w_L$$



$$J = \frac{J_L}{i^2}$$

结论：若用减速比为*i*的减速器，负载转动惯量为 J_L ，则在电机端看转动惯量为 J_L/i^2 ；

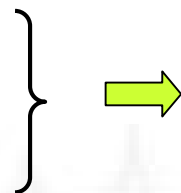
n 减速比*i*对转矩的影响

功率守恒

$$Tw$$

$$Tw = T_L w_L$$

$$w/i = w_L$$



$$T = \frac{T_L}{i}$$

结论：若用减速比为*i*的减速器，负载转矩为 T_L ，则在电机端看转矩为 T_L/i ；

3 直流电动机的选择

○ 电机的参数选择

n 最大转矩 $T_{2\max}$

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

$T_{2\max}$ 为所需的最大转矩(Nm)， T_L 为负载转矩(Nm)， i 为减速器的减速比， η 为减速器的效率， J_m 为电动机本身的转动惯量(kgm²)， J_i 为减速器在电机轴的等效转动惯量(kgm²)， J_L 为负载的转动惯量(kgm²)， $\alpha_{L\max}$ 为负载的最大角加速度(rad/s²)。

$T_{2\max}$ 应等于或小于所选电机的瞬时最大转矩。一般直流伺服电动机可以输出2~8倍额定转矩的瞬时最大转矩。

当作直线运动时，上式仍适用。但式中减速比 i 为电机转速(rad/s)与负载的直线运动速度(m/s)之比，也就是电机转角(rad)与相应的负载直线位移(m)之比， J_L 为负载质量(kg)， $\alpha_{L\max}$ 为负载最大加速度(m/s²)， T_L 是负载阻力(N)。

若无减速机构，最大转矩表示式？

3 直流电动机的选择

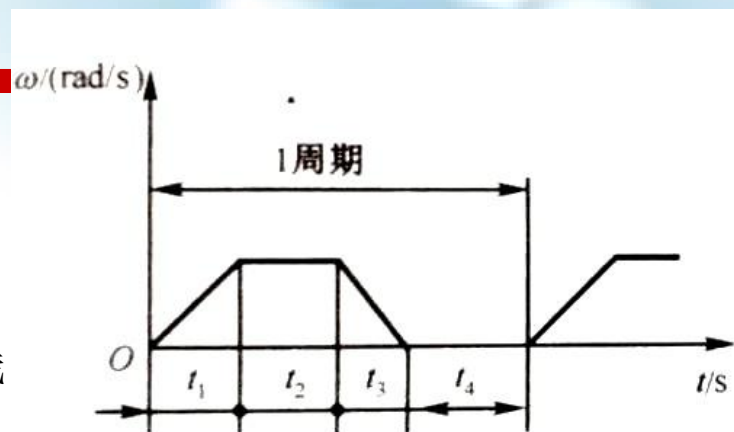
○ 电机的参数选择

n 额定转矩 T_{rms} 和最大转矩 T_{2max}

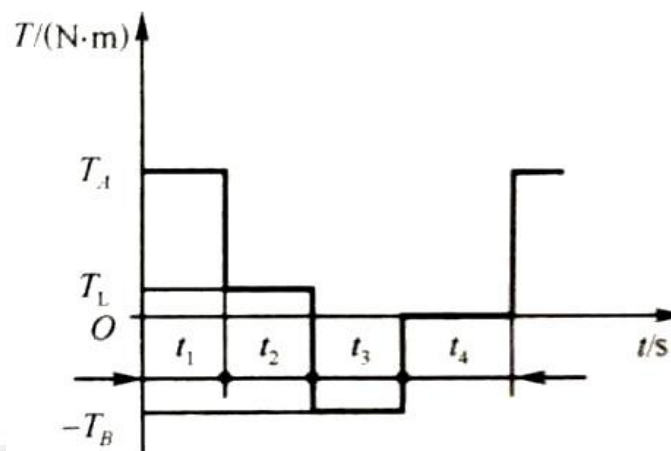
如果电机为**断续周期性工作**，负载的速度曲线和转矩曲线如右图所示。

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

电动机的额定转矩应大于 T_{rms} ；
电动机的最大转矩应大于 T_A 和 T_B 。



(a)速度曲线



(b)转矩曲线

3 直流电动机的选择

○ 电机的参数选择

n 最大电流 I_{\max}

$$I_{\max} = \frac{T_{2\max} + T_0}{K_t}$$

T_0 为电动机本身阻转矩(Nm), K_t 为电动机的转矩灵敏度(Nm/A)。

一般直流伺服电动机的最大瞬时电流为额定电流的**2~8**倍。

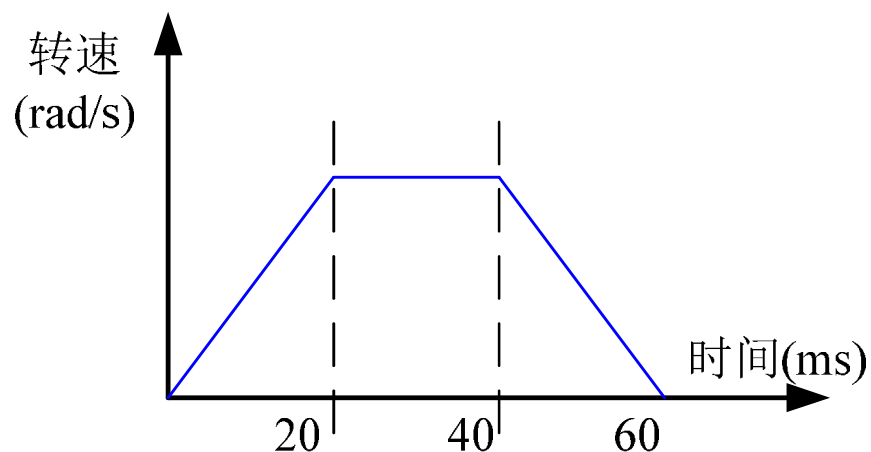
n 电枢电压最大值 U_{\max}

$$U_{\max} = I_{\max} R_a + K_e i \omega_L = I_{\max} R_a + K_e \omega_{\max}$$

ω_{\max} 为电动机带动负载时的最大角速度。

4 例题

例1：电机带动一转轴旋转。摩擦阻力矩： 0.2Nm ；系统转动惯量 $1.6 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$ 。运动要求： 60ms 旋转一圈，每秒重复10次，运动曲线如下。求电机最大转速、最大转矩和额定转矩。



解：所需的角速度为

$$\omega_{\max} = \frac{\text{旋转位移}}{\frac{1}{2}T_{\text{加速}} + T_{\text{匀速}} + \frac{1}{2}T_{\text{减速}}} = \frac{2p}{0.01\text{ms} + 0.02\text{ms} + 0.01\text{ms}} = 157\text{rad/s}$$

4 例题

例1: 电机带动一转轴旋转。摩擦阻力矩: 0.2Nm ; 系统转动惯量 $1.6 \times 10^{-4}\text{kgm}^2$ 。运动要求: 60ms 旋转一圈, 每秒重复10次, 运动曲线如下。求电机最大转速、最大转矩和额定转矩。

所需的角加速度为

$$a = \frac{\omega_{\max}}{t} = \frac{157\text{rad/s}}{20\text{ms}} = 7850\text{rad/s}^2$$

加速时所需力矩为:

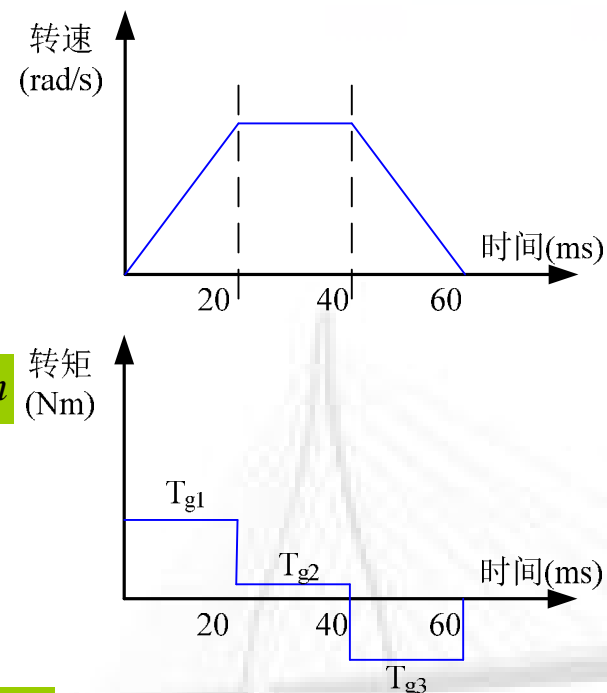
$$T_{g1} = Ja + T_f = 1.6 \times 10^{-4}\text{kgm}^2 \times 7850\text{rad/s}^2 + 0.2\text{Nm} = 1.456\text{Nm}$$

匀速时所需力矩为:

$$T_{g2} = T_f = 0.2\text{Nm}$$

减速时所需力矩为:

$$T_{g3} = -Ja + T_f = -1.6 \times 10^{-4}\text{kgm}^2 \times 7850\text{rad/s}^2 + 0.2\text{Nm} = -1.056\text{Nm}$$



4 例题

例1: 电机带动一转轴旋转。摩擦阻力矩: **0.2Nm**; 系统转动惯量 **$1.6 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$** 。运动要求: **60ms**旋转一圈, 每秒重复**10**次, 运动曲线如下。求电机最大转速、最大转矩和额定转矩。

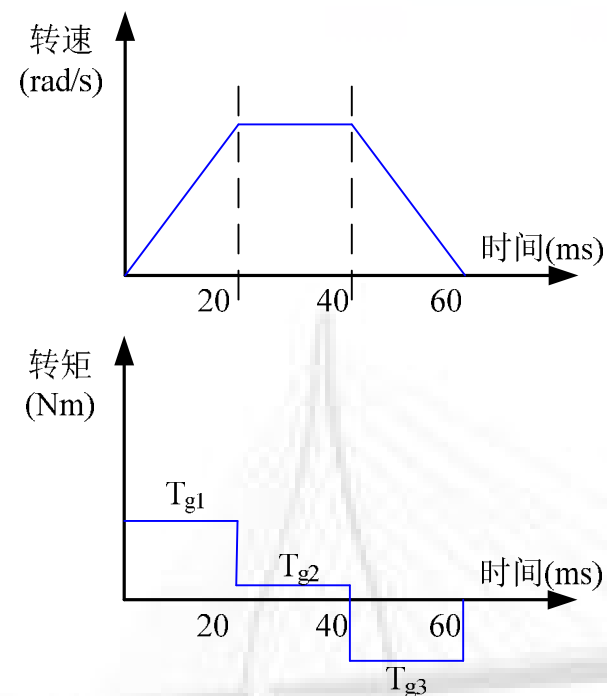
所需的等效转矩为

$$\begin{aligned} T_{rms} &= \sqrt{\frac{T_A^2 t_1 + T_L^2 t_2 + T_B^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \\ &= \sqrt{\frac{1.456^2 \times 20\text{ms} + 0.2^2 \times 20\text{ms} + 1.056^2 \times 20\text{ms}}{100\text{ms}}} \\ &= 0.809\text{Nm} \end{aligned}$$

所选直流电机最大转速应大于**157rad/s**

所选直流电机最大转矩应大于**1.456Nm**

所选直流电机额定转矩应大于**0.809Nm**



4 例题

例2：一台永磁式直流伺服电机，当电枢电压 $U_{a1}=100\text{V}$ 时，空载转速 $n_1=3000\text{rad/min}$ ，电枢电流 $I_{a1}=0.06\text{A}$ 。已知电枢电阻 $R_a=40\ \Omega$ 。求当 $U_{a2}=110\text{V}$ ， $I_{a2}=1.5\text{A}$ 时的电机转速 n_2 、电磁转矩 T_{em2} 及输出转矩 T_{o2} 。

解：(1)求 K_e 和 K_t 。由式 $U_a = I_a R_a + E_a$ 知

$$E_{a1} = U_{a1} - I_{a1} R_a = 100 - 0.06 * 40 = 97.6(\text{V})$$

$$\omega_1 = \frac{2p * 3000}{60} = 314(\text{rad} / \text{s})$$

$$K_e = \frac{E_{a1}}{\omega_1} = \frac{97.6}{314} = 0.31\text{V} / (\text{rad} / \text{s})$$

$$K_t = K_e = 0.31(\text{Nm} / \text{A})$$

4 例题

例2：一台永磁式直流伺服电机，当电枢电压 $U_{a1}=100\text{V}$ 时，空载转速 $n_1=3000\text{rad/min}$ ，电枢电流 $I_{a1}=0.06\text{A}$ 。已知电枢电阻 $R_a=40\ \Omega$ 。求当 $U_{a2}=110\text{V}$ ， $I_{a2}=1.5\text{A}$ 时的电机转速 n_2 、电磁转矩 T_{em2} 及输出转矩 T_{o2} 。

(2)求 T_{em2} 和 T_{o2}

$$T_{em2} = K_t I_{a2} = 0.31 * 1.5 = 0.465(\text{Nm})$$

空载阻转矩为

$$T_f = T_{em1} = K_t I_{a1} = 0.31 * 0.06 = 0.0186(\text{Nm})$$

故

$$T_{o2} = T_{em2} - T_f = 0.465 - 0.0186 = 0.45(\text{Nm})$$

4 例题

例2: 一台永磁式直流伺服电机，当电枢电压 $U_{a1}=100\text{V}$ 时，空载转速 $n_1=3000\text{rad/min}$ ，电枢电流 $I_{a1}=0.06\text{A}$ 。已知电枢电阻 $R_a=40\ \Omega$ 。求当 $U_{a2}=110\text{V}$ ， $I_{a2}=1.5\text{A}$ 时的电机转速 n_2 、电磁转矩 $T_{\text{em}2}$ 及输出转矩 T_{o2} 。

(3)求 n_2

$$E_{a2} = U_{a2} - I_{a2}R_a = 110 - 1.5 * 40 = 50(\text{V})$$

$$\omega_2 = \frac{E_{a2}}{K_e} = \frac{50}{0.31} = 161(\text{rad/s})$$

$$n_2 = \frac{60\omega_2}{2p} = 1540(\text{r/min})$$

4 例题

例3: 一台永磁式直流力矩电机，转矩灵敏度 $K_t=1\text{Nm/A}$ ，摩擦转矩 $T_f=0.1\text{Nm}$ ，转动惯量 $J=6*10^{-3}\text{kgm}^2$ ，电磁时间常数 $\tau_e=3\text{ms}$ 。连续堵转时电流 $I_1=4\text{A}$ ，电压 $U_1=20\text{V}$ 。1)求电机电感 L_a ，机电时间常数 τ_m ，连续堵转的电磁转矩 T_1 。2)当电枢电压 $U_2=25\text{V}$ 时，求启动时输出转矩 T_{20} ，并求此电压对应的空载转速 ω_{20} 。3) $\omega_3=10\text{rad/s}$ ，电磁转矩 $T_3=2\text{Nm}$ 时，求电枢电压 U_3 和输出转矩 T_{30} 。

解：(1) $K_e = K_t = 1\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$

电枢电阻 $R_a = \frac{U_1}{I_1} = \frac{20}{4} = 5(\Omega)$

电枢电感 $L_a = R_a \tau_e = 5 * 3 = 15(\text{mH}) = 0.015\text{H}$

机电时间常数 $t_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = \frac{5 * 6 * 10^{-3}}{1 * 1} = 0.03(\text{s}) = 30(\text{ms})$

连续堵转转矩 $T_1 = K_t I_1 = 1 * 4 = 4(\text{Nm})$

4 例题

例3: 一台永磁式直流力矩电机，转矩灵敏度 $K_t=1\text{Nm/A}$ ，摩擦转矩 $T_f=0.1\text{Nm}$ ，转动惯量 $J=6*10^{-3}\text{kgm}^2$ ，电磁时间常数 $\tau_e=3\text{ms}$ 。连续堵转时电流 $I_1=4\text{A}$ ，电压 $U_1=20\text{V}$ 。1)求电机电感 L_a ，机电时间常数 τ_m ，连续堵转的电磁转矩 T_1 。2)当电枢电压 $U_2=25\text{V}$ 时，求启动时输出转矩 T_{20} ，并求此电压对应的空载转速 ω_{20} 。3) $\omega_3=10\text{rad/s}$ ，电磁转矩 $T_3=2\text{Nm}$ 时，求电枢电压 U_3 和输出转矩 T_{30} 。

(2)启动电流

$$I_{20} = \frac{U_2}{R_a} = \frac{25}{5} = 5(\text{A})$$

$$T_{20} = K_t I_{20} - T_f = 1 * 5 - 0.1 = 4.9(\text{Nm})$$

空载电流

$$I_0 = \frac{T_f}{K_t} = \frac{0.1}{1} = 0.1(\text{A})$$

$$\omega_{20} = \frac{U_2 - R_a I_0}{K_e} = \frac{25 - 5 * 0.1}{1} = 24.5(\text{rad/s})$$

4 例题

例3: 一台永磁式直流力矩电机，转矩灵敏度 $K_t=1\text{Nm/A}$ ，摩擦转矩 $T_f=0.1\text{Nm}$ ，转动惯量 $J=6*10^{-3}\text{kgm}^2$ ，电磁时间常数 $\tau_e=3\text{ms}$ 。连续堵转时电流 $I_1=4\text{A}$ ，电压 $U_1=20\text{V}$ 。1)求电机电感 L_a ，机电时间常数 τ_m ，连续堵转的电磁转矩 T_1 。2)当电枢电压 $U_2=25\text{V}$ 时，求启动时输出转矩 T_{20} ，并求此电压对应的空载转速 ω_{20} 。3) $\omega_3=10\text{rad/s}$ ，电磁转矩 $T_3=2\text{Nm}$ 时，求电枢电压 U_3 和输出转矩 T_{30} 。

$$(3) \quad I_3 = \frac{T_3}{K_t} = \frac{2}{1} = 2(\text{A})$$

$$U_3 = R_a I_3 + K_e \omega_3 = 5 * 2 + 1 * 10 = 20(\text{V})$$

$$T_{30} = T_3 - T_f = 2 - 0.1 = 1.9(\text{Nm})$$

4 例题

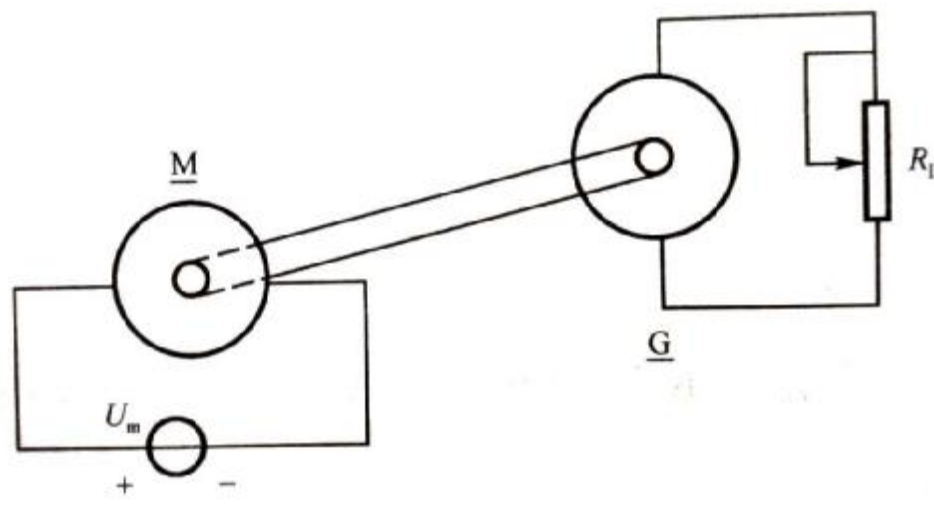
例4：两台完全相同的永磁式直流电机的轴连载一起组成电动机-发电机组，电枢电阻 $R_a=75\ \Omega$ ，电感 $L_a=0.45\text{H}$ ，每台电机的转动惯量为 $J=10^{-4}\text{kgm}^2$ 。

1)电动机电压 $U_{m1}=89\text{V}$ ，电流 $I_{m1}=0.2\text{A}$ 。发电机电枢不接负载电阻，即电流 $I_{g1}=0$ 。此时机组转速 $\omega_1=400\text{rad/s}$ 。求发电机电枢电压(空载) U_{g1} 和每台电机的空载阻转矩 T_f 。

2)电动机电枢电压 $U_{m2}=91\text{V}$ ，发电机电枢端接负载电阻 $R_L=325\ \Omega$ 。求机组转速 ω_2 ，电动机电流 I_{m2} 和输出功率 P_{mo} ，发电机电枢电流 I_{g2} 。

3)求每台电机的机电时间常数 τ_m 和电磁时间常数 τ_e 。

4)利用 τ_m 、 τ_e 等数据写出一台电机的传递函数 $\Omega(s)/U_a(s)$ 。



4 例题

例4: 两台完全相同的永磁式直流电机的轴连载一起组成电动机-发电机组，电枢电阻 $R_a=75\ \Omega$ ，电感 $L_a=0.45\text{H}$ ，每台电机的转动惯量为 $J=10^{-4}\text{kgm}^2$ 。

1)电动机电压 $U_{m1}=89\text{V}$ ，电流 $I_{m1}=0.2\text{A}$ 。发电机电枢不接负载电阻，即电流 $I_{g1}=0$ 。此时机组转速 $\omega_1=400\text{rad/s}$ 。求发电机电枢电压(空载) U_{g1} 和每台电机的空载阻转矩 T_f 。

2)电动机电枢电压 $U_{m2}=91\text{V}$ ，发电机电枢端接负载电阻 $R_L=325\ \Omega$ 。求机组转速 ω_2 ，电动机电流 I_{m2} 和输出功率 P_{mo} ，发电机电枢电流 I_{g2} 。

3)求每台电机的机电时间常数 τ_m 和电磁时间常数 τ_e 。

4)利用 τ_m 、 τ_e 等数据写出一台电机的传递函数 $\Omega(s)/U_a(s)$ 。

解: (1) $E_{a1} = U_{m1} - R_a I_{m1} = 89 - 75 * 0.2 = 74(\text{V})$

$$K_e = \frac{E_{a1}}{\omega_1} = \frac{74}{400} = 0.185\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$$

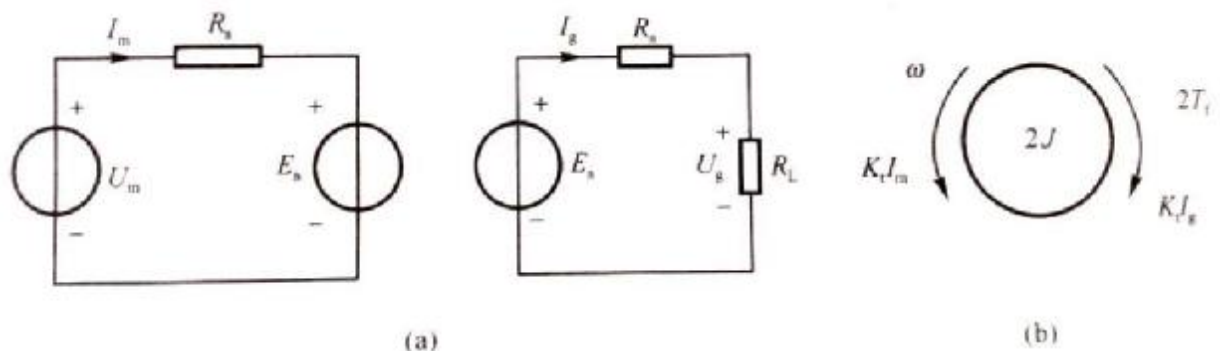
$$K_t = K_e = 0.185(\text{Nm}/\text{A})$$

$$U_{g1} = E_{a1} = 74(\text{V})$$

$$T_f = \frac{T_{em1}}{2} = \frac{K_t I_{m1}}{2} = \frac{0.185 * 0.2}{2} = 0.0185(\text{Nm})$$

4 例题

(2) 机组等效电路图和转子受力图如下



电动机电压平衡方程 $U_{m2} = R_a I_{m2} + K_e \omega_2$

发电机电压平衡方程 $K_e \omega_2 = I_{g2} R_a + I_{g2} R_L$

转矩平衡方程 $K_t I_{m2} = 2T_f + K_t I_{g2}$

4 例题

(2)组成方程组

$$\begin{cases} U_{m2} = R_a I_{m2} + K_e w_2 \\ K_e w_2 = I_{g2} R_a + I_{g2} R_L \\ K_t I_{m2} = 2T_f + K_t I_{g2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 91 = 75 I_{m2} + 0.185 w_2 \\ 0.185 w_2 = I_{g2} 75 + I_{g2} 325 \\ 0.185 I_{m2} = 0.037 + 0.185 I_{g2} \end{cases}$$

解方程可得

$$\begin{cases} w_2 = 346(\text{rad} / \text{s}) \\ I_{m2} = 0.36(\text{A}) \\ I_{g2} = 0.16(\text{A}) \end{cases}$$

$$P_{mo} = (K_t I_{m2} - T_f) w_2 = (0.185 * 0.36 - 0.0185) * 346 = 16.6(\text{W})$$

$$P_{mo} = U_{m2} I_{m2} - I_{m2}^2 R_a - T_f w_2 = 91 * 0.36 - 75 * 0.36^2 - 0.0185 * 346 = 16.6(\text{W})$$

4 例题

例4: 两台完全相同的永磁式直流电机的轴连载一起组成电动机-发电机组，电枢电阻 $R_a=75\ \Omega$ ，电感 $L_a=0.45\text{H}$ ，每台电机的转动惯量为 $J=10^{-4}\text{kgm}^2$ 。

1) 电动机电压 $U_{m1}=89\text{V}$ ，电流 $I_{m1}=0.2\text{A}$ 。发电机电枢不接负载电阻，即电流 $I_{g1}=0$ 。此时机组转速 $\omega_1=400\text{rad/s}$ 。求发电机电枢电压(空载) U_{g1} 和每台电机的空载阻转矩 T_f 。

2) 电动机电枢电压 $U_{m2}=91\text{V}$ ，发电机电枢端接负载电阻 $R_L=325\ \Omega$ 。求机组转速 ω_2 ，电动机电流 I_{m2} 和输出功率 P_{mo} ，发电机电枢电流 I_{g2} 。

3) 求每台电机的机电时间常数 τ_m 和电磁时间常数 τ_e 。

4) 利用 τ_m 、 τ_e 等数据写出一台电机的传递函数 $\Omega(s)/U_a(s)$ 。

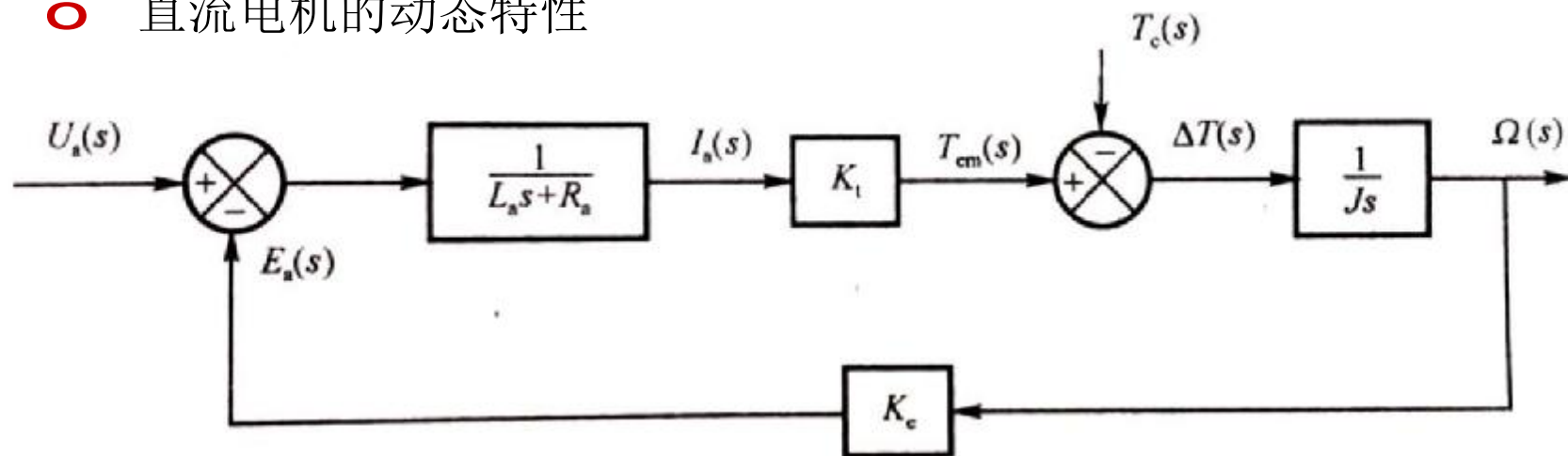
$$(3) \quad t_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = \frac{75 * 10^{-4}}{0.185^2} = 0.22(s)$$

$$t_e = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0.45}{75} = 0.006(s)$$

$$(4) \quad \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/K_e}{(t_m s + 1)(t_e s + 1)} = \frac{5.4}{(0.22s + 1)(0.006s + 1)}$$

小结

○ 直流电机的动态特性



令干扰力矩 $T_c=0$

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

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

其中 τ_m 为机电时间常数

$$t_m = \frac{R_a J}{K_e K_t} = J \tan b$$

其中 τ_e 为电磁时间常数

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

小结

○ 直流伺服电机

n 专门为控制系统特别是伺服系统设计和制造的一种电机，他的转子运动受输入信号控制能作快速反应

n 电机长

○ 直流力矩电机

n 一种低转速、大转矩的直流电机，可在堵转下长期工作

n 电机胖

○ 直流电动机的选择

n 功率选择：

$$P_{20} = K(T_L + J_L a_L) \omega_L$$

n 减速比选择：

$$i \leq \frac{n_n}{n_L}$$

或

$$i \leq \frac{n_0}{2n_L}$$

小结

○ 直流电动机的选择

n 最大转矩

$$T_{2\max} = \frac{T_L}{ih} + (J_m + J_i + \frac{J_L}{hi^2})ia_{L\max}$$

n 额定转矩

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

n 最大电流

$$I_{\max} = \frac{T_{2\max} + T_0}{K_t}$$

n 最大电压

$$U_{\max} = I_{\max} R_a + K_e i w_L = I_{\max} R_a + K_e w_{\max}$$

n 转动惯量匹配

$$J_L = i^2 J_m$$