

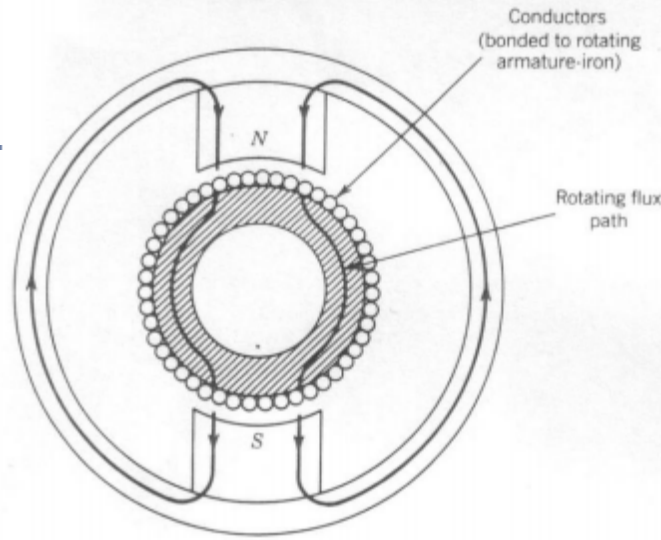
机器人建模与控制

机器人运动控制

8.1 独立关节控制

8.1.1 电机及电机驱动器

直流电机包括定子和转子，转子的主要部分是可通电的电枢(线圈绕组)



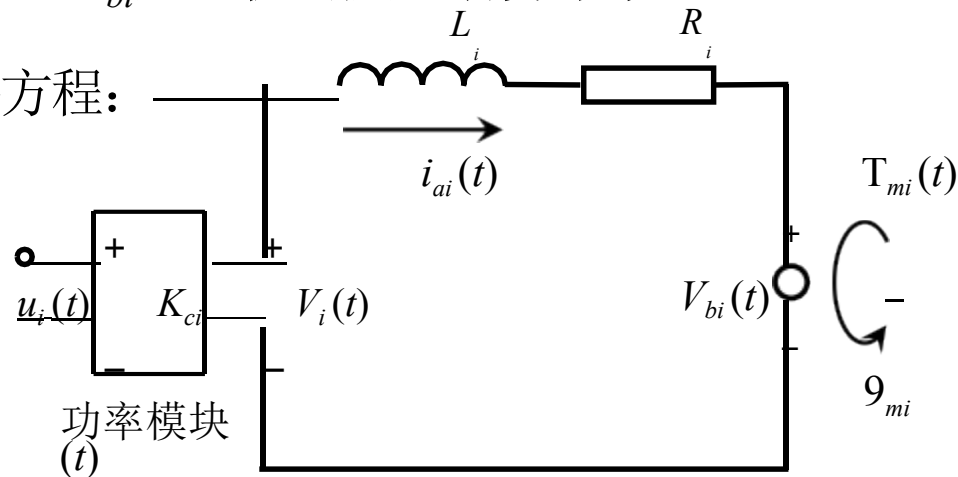
在第*i*关节电机的电枢两端施加电枢电压 $V_i(t)$ ，则有电枢电流 $i_{ai}(t)$ ，因 $i_{ai}(t)$ 在定子磁场中，会产生定子对转子的力矩 $\tau_{mi}(t)$ ，该力矩会改变转子转速(电机转速) $d\theta_{mi}(t)/dt$ ，其大小与电流成正比， $\tau_{mi}(t) = K_{mi}i_{ai}(t)$ ， K_{mi} 是电机的扭矩常数

当转子转动时，电枢切割定子磁力线，电枢电路中会出现反电动势 $V_{bi}(t)$ ，其大小与转速成正比， $V_{bi}(t) = K_{bi}d\theta_{mi}(t)/dt$ ， K_{bi} 是电机的反电动势常数

记电枢电感为 L_i ，电枢电阻为 R_i ，电枢电路方程：

$$L_i di_{ai}(t)/dt + R_i i_{ai}(t) = V_i(t) - K_{bi} d\theta_{mi}(t)/dt$$

功率模块相当于放大器 $V_i(t) = K_{ci}u_i(t)$ ， K_{ci} 为可调增益， $u_i(t)$ 为第*i*关节控制电压



8.1 独立关节控制

8.1.2 减速器及关节模型

摩擦 当物体与另一物体沿接触面的切线方向运动或有相对运动的趋势时，在两物体的接触面之间有阻碍它们相对运动的作用力，这种力叫摩擦力。接触面之间的这种现象或特性叫“摩擦”

摩擦分为静摩擦和动摩擦

按动摩擦表面的润滑状态，摩擦可分为干摩擦、边界摩擦和流体（粘性）摩擦

干摩擦：摩擦副表面直接接触，没有润滑剂存在时的摩擦

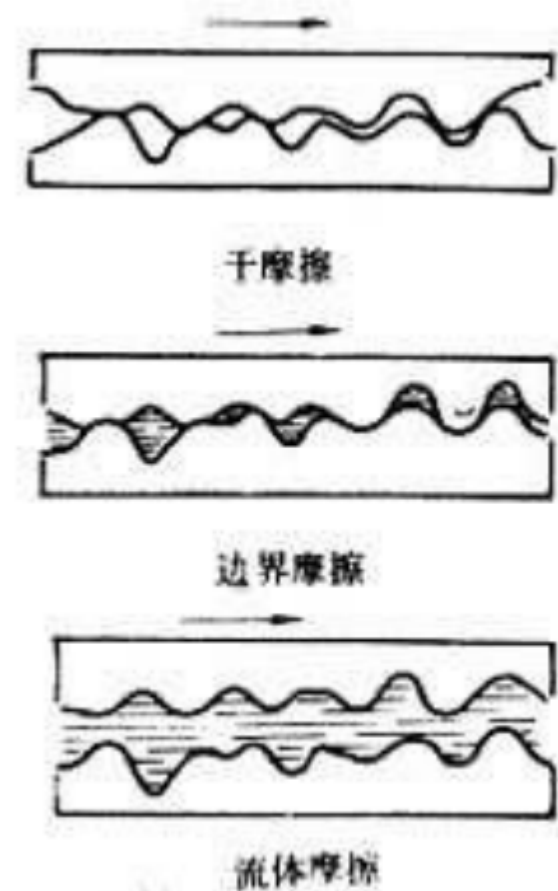
干摩擦力=法向力×干摩擦系数

流体（粘性）摩擦：流体润滑状态下的摩擦。

当流体为层流状时：

粘性摩擦力=物体相对运动速度×粘性摩擦系数

边界摩擦相当于干摩擦和流体摩擦之间的一种状态

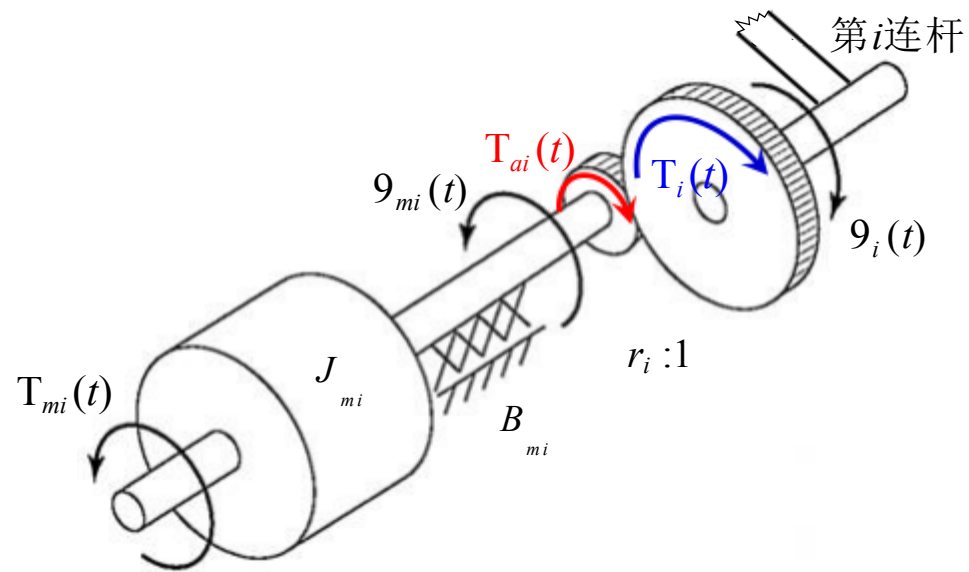


8.1 独立关节控制

电机转子通过传动比为 $r_i:1$ 的齿轮减速器与第 i 连杆相连

电机转角与关节角度的关系:

$$\theta_{mi}(t) = r_i \theta_i(t)$$



$\tau_i(t)$ 为高速侧对低速侧的作用力的力矩(关节力矩)

$\tau_{ai}(t)$ 为低速侧对高速侧的反作用力的力矩

$$\tau_i(t) = r_i \tau_{ai}(t)$$

B_{mi} 是转子轴承的粘性摩擦系数, 粘性摩擦力矩=角速度 \times 粘性摩擦系数

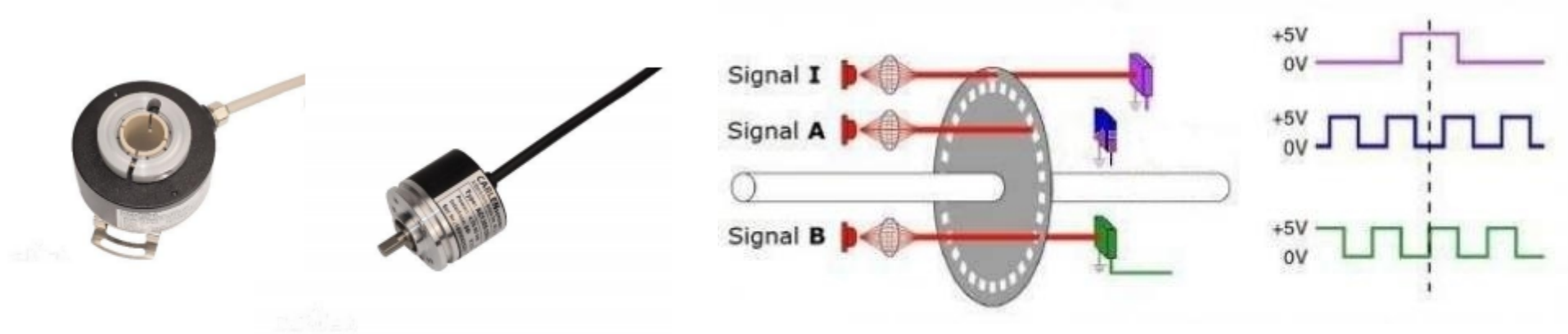
J_{mi} 为高速侧的转动惯量

高速侧力矩平衡: $J_{mi} d^2 \theta_{mi}(t)/dt^2 = \tau_{mi}(t) - \tau_{ai}(t) - B_{mi} d\theta_{mi}(t)/dt$

即 $J_{mi} d^2 \theta_{mi}(t)/dt^2 + B_{mi} d\theta_{mi}(t)/dt = \tau_{mi}(t) - \tau_i(t)/r_i$

8.1 独立关节控制

8.1.3 旋转编码器及关节传递函数模型



在带有明暗方格的码盘两侧，安放发光元件和光敏元件
随着码盘的旋转，光敏元件输出的波形经整形后变成脉冲

根据脉冲计数，可以测量固定在码盘上的转轴的角位移

根据A相信号和B相信号间的关系，可以判断旋转方向

码盘上有Z相标志信号，每转一圈输出一个脉冲，可用于确定零位

根据单位时间内的脉冲计数(高速)或两个相邻脉冲的时间间隔(低速)，
可以测量固定在码盘上的转轴的角速度

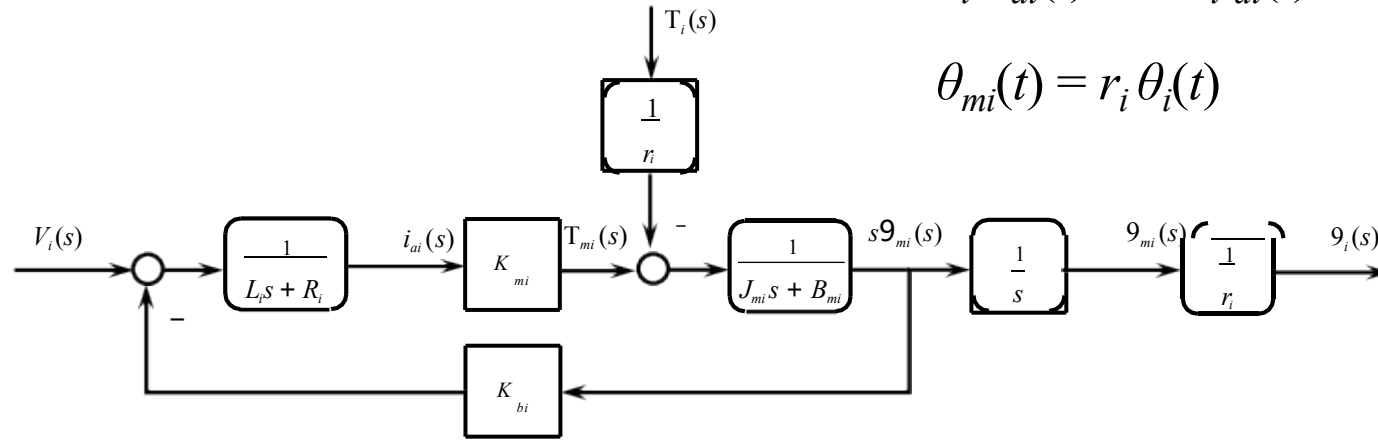
8.1 独立关节控制

$$J_{mi}d^2\theta_{mi}(t)/dt^2 + B_{mi}d\theta_{mi}(t)/dt = \tau_{mi}(t) - \tau_i(t)/r_i$$

$$\tau_{mi}(t) = K_{mi}i_{ai}(t)$$

$$L_i di_{ai}(t)/dt + R_i i_{ai}(t) = V_i(t) - K_{bi}d\theta_{mi}(t)/dt$$

$$\theta_{mi}(t) = r_i \theta_i(t)$$



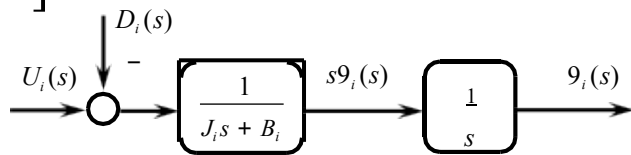
$$\frac{\theta_i(s)}{V_i(s)} = \frac{K_{mi}/r_i}{s[(L_i s + R_i)(J_{mi} s + B_{mi}) + K_{bi}K_{mi}]}$$

$$\frac{\theta_i(s)}{T_i(s)} = \frac{-(L_i s + R_i)/r_i^2}{s[(L_i s + R_i)(J_{mi} s + B_{mi}) + K_{bi}K_{mi}]}$$

因电气时间常数 L_i/R_i 远比1小, 假设 L_i/R_i 为零, 得

$$\frac{\theta_i(s)}{V_i(s)} = \frac{K_{mi}/r_i R_i}{s[J_{mi} s + B_{mi} + K_{bi}K_{mi}/R_i]}$$

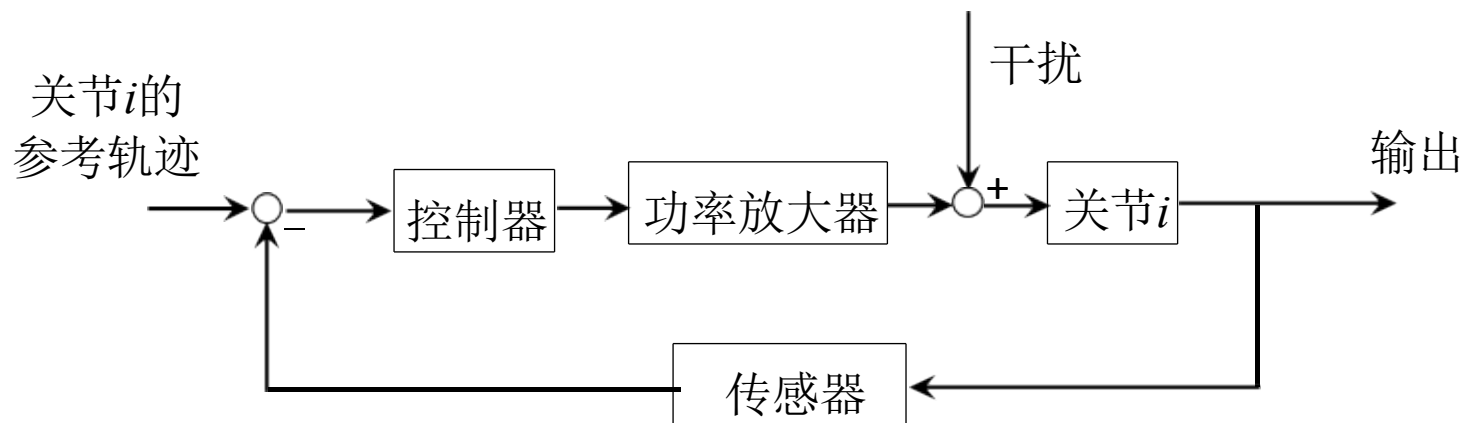
$$\frac{\theta_i(s)}{T_i(s)} = \frac{-1/r_i^2}{s[J_{mi} s + B_{mi} + K_{bi}K_{mi}/R_i]}$$



$$U_i(t) = (K_{mi}/r_i R_i)V_i(t), D_i(t) = T_i(t)/r_i^2$$

$$J_i = J_{mi}, B_i = B_{mi} + K_{bi}K_{mi}/R_i$$

8.1 独立关节控制



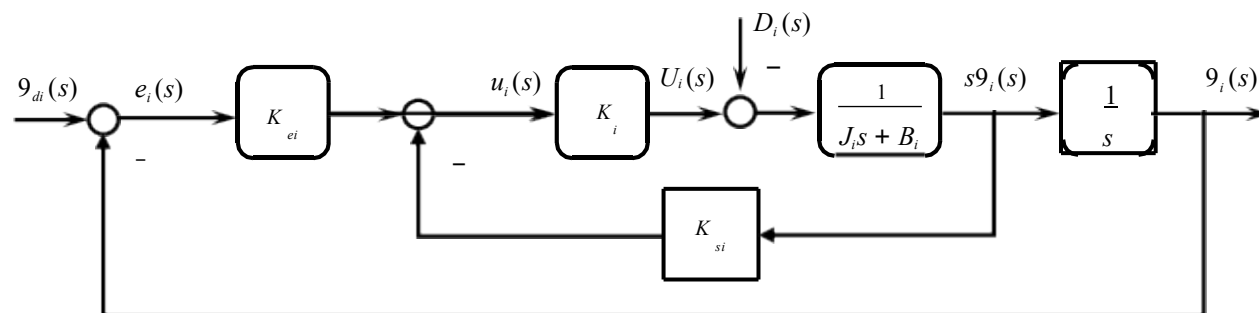
机器人的每个轴都被作为一个单输入/单输出 (SISO) 系统来控制

由于其他关节的运动而引起的耦合效应被包含在干扰中

设计控制算法，保证闭环系统稳定，并较好地跟踪参考轨迹和减小干扰的影响

8.1 独立关节控制

8.1.4 考虑阶跃输入的PD控制器设计

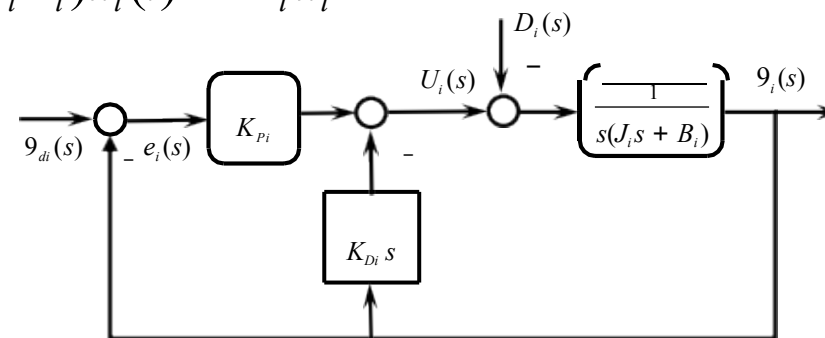


偏差 $e_i(t) = \theta_{di}(t) - \theta_i(t)$

$$\left. \begin{aligned} U_i(t) &= (K_{mi} / r_i R_i) V_i(t) \\ V_i(t) &= K_{ci} u_i(t) \end{aligned} \right\} \rightarrow U_i(t) = (K_{mi} K_{ci} / r_i R_i) u_i(t) = K_i u_i(t)$$

比例系数 $K_{Pi} = K_i K_{ei}$

微分系数 $K_{Di} = K_i K_{si}$



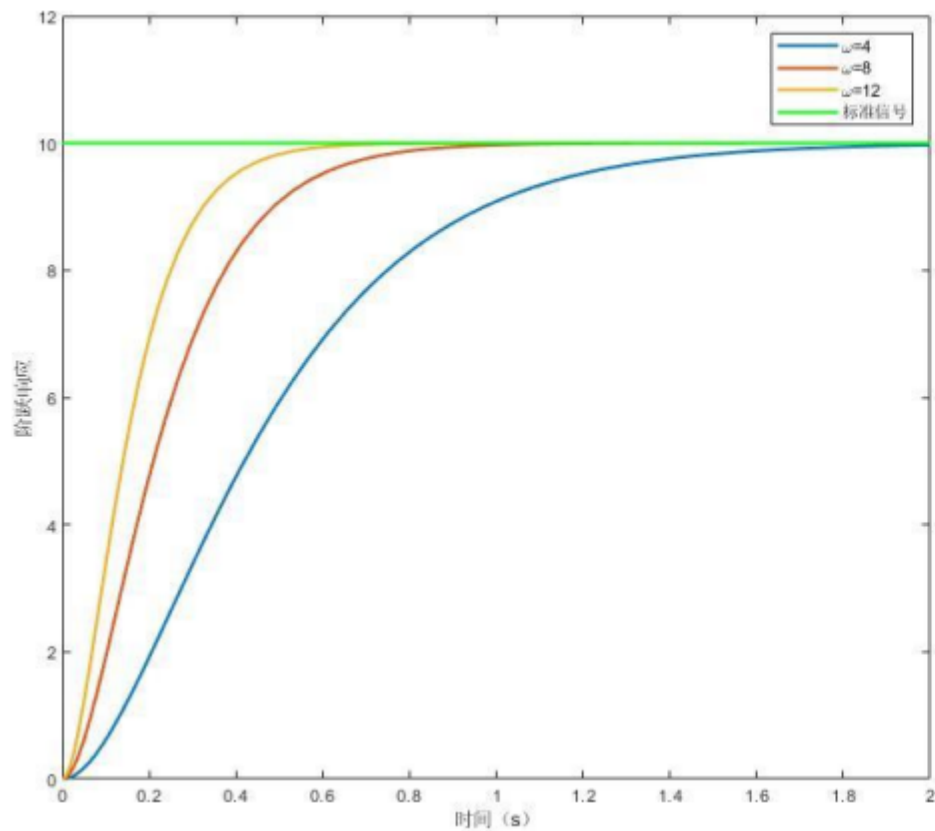
$$e_i(s) = \frac{s^2 + s(B_i + K_{Di}) / J_i + K_{Pi} / J_i}{s^2 + s(B_i + K_{Di}) / J_i + K_{Pi} / J_i} \theta_{di}(s) + \frac{1 / J_i}{s^2 + s(B_i + K_{Di}) / J_i + K_{Pi} / J_i} D_i$$

特征方程 $s^2 + s(B_i + K_{Di}) / J_i + K_{Pi} / J_i = s^2 + 2\zeta \omega_i s + \omega_i^2$

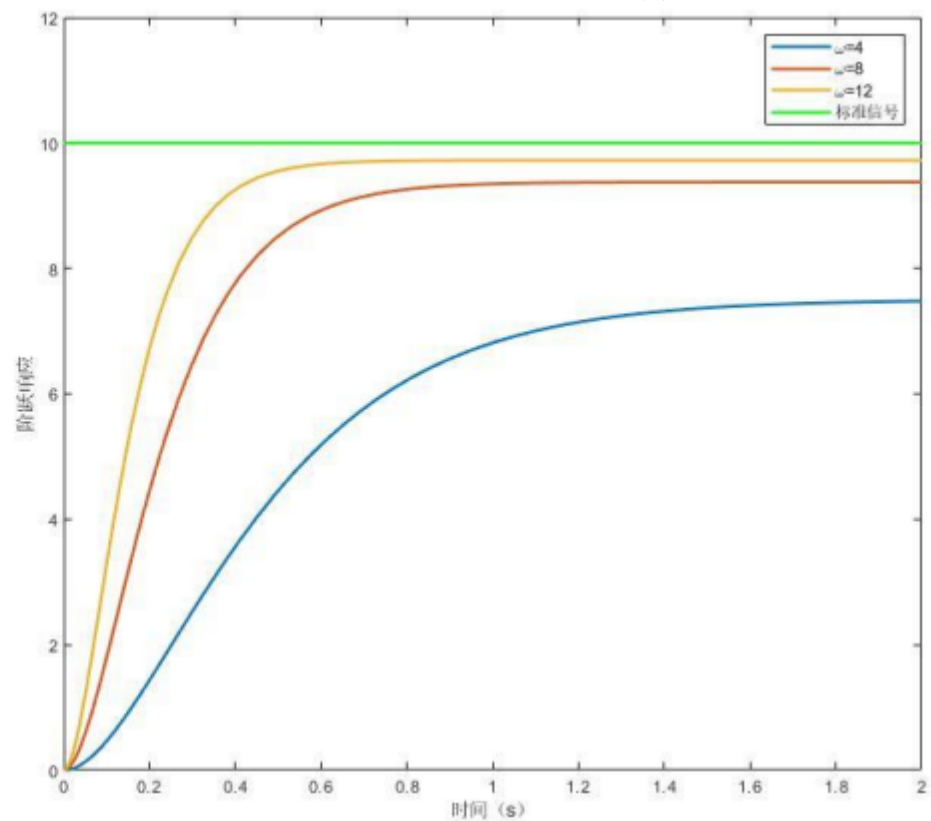
8.1 独立关节控制

通常取 $\zeta_i=1$ 常使得响应是临界阻尼，以产生最快的非振动响应。在这种情况下， ω_i 决定响应的速度

阶跃响应 (无干扰 $d_i(t) = 0$)

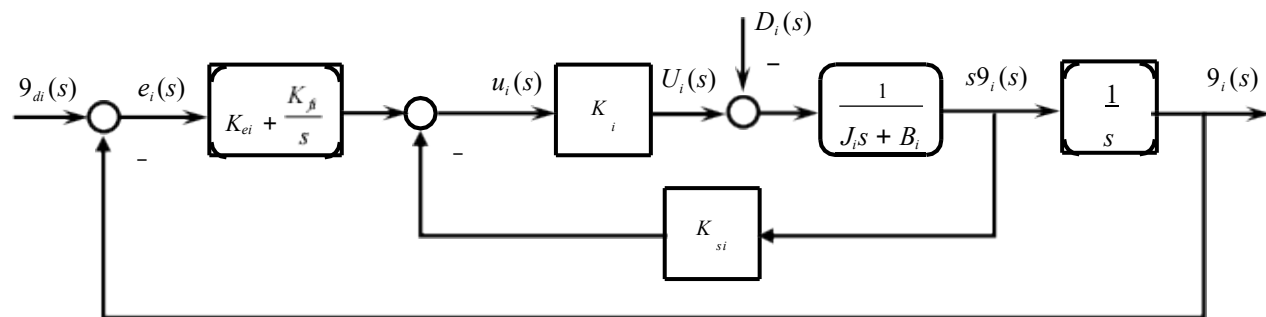


阶跃响应 (有干扰 $d_i(t) = 40$)

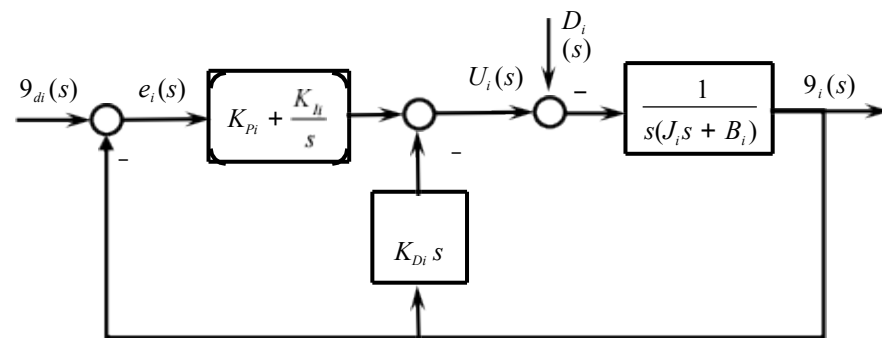


8.1 独立关节控制

8.1.5 考虑阶跃输入的PID控制器设计



积分系数 $K_{Ii} = K_i K_{fi}$



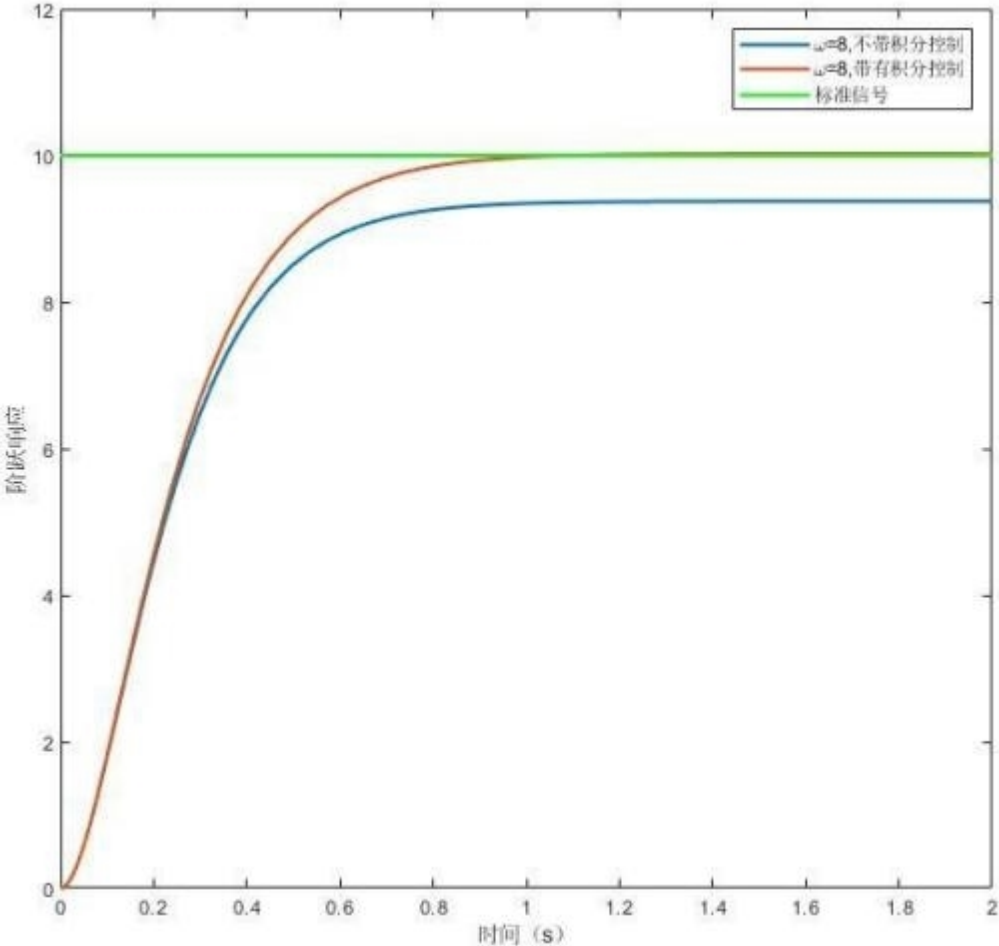
特征方程 $s^3 + s^2(B_i + K_{Di})/J_i + sK_{Pi}/J_i + K_{Ii}/J_i$

由Routh判据可知，闭环系统稳定的充要条件是 $K_{Ii} < (B_i + K_{Di})K_{Pi}/J_i$

8.1 独立关节控制

在控制器中增加积分环节，主要是为了消除稳态误差

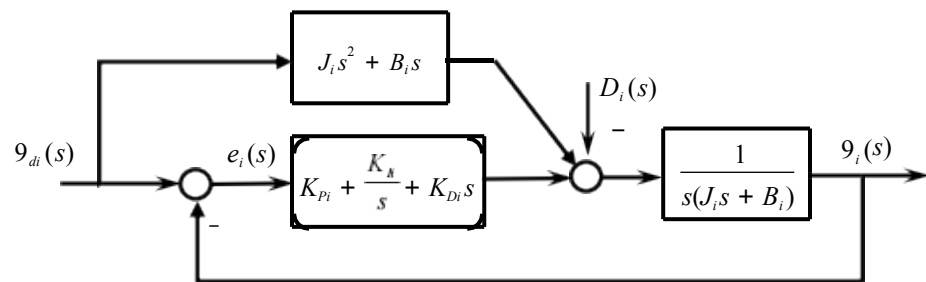
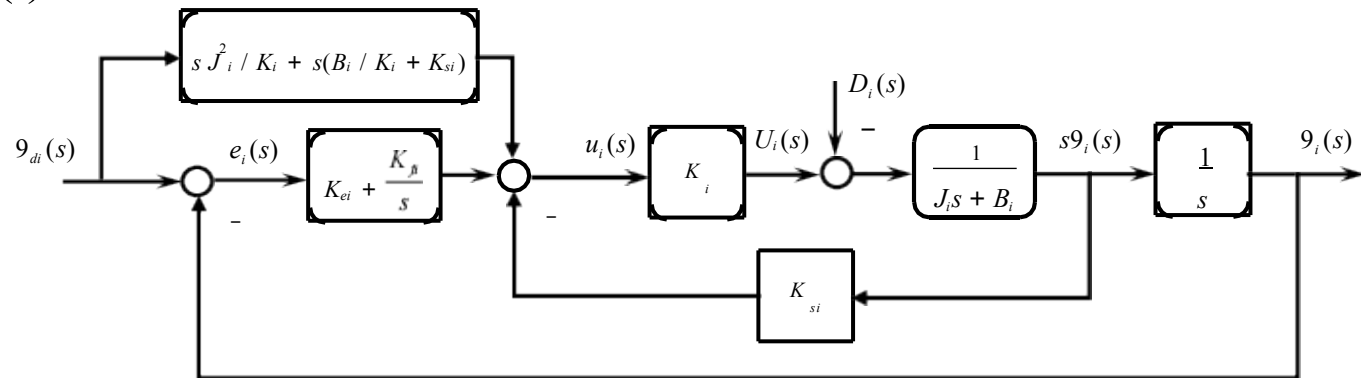
阶跃响应(有干扰 $d_i(t) = 40$)



8.1 独立关节控制

8.1.6 考虑二阶可导输入的PID控制器设计

若 $\theta_{di}(t)$ 二阶可导，可增加前馈提高控制性能，如下面的前馈+PID控制



$$e_i(s) = \frac{s / J_i}{s^3 + s^2 (B_i + K_{Di}) / J_i + s K_{Pi} / J_i + K_{Li} / J_i} D_i(s)$$

引入前馈可以使偏差与 $\theta_{di}(t)$ 的变化无关

在阶跃干扰时，对任意的二次可导参考轨迹，跟踪误差以渐近方式趋于零

8.2 计算转矩前馈控制

例: a_1 和 a_2 分别为两连杆的长度

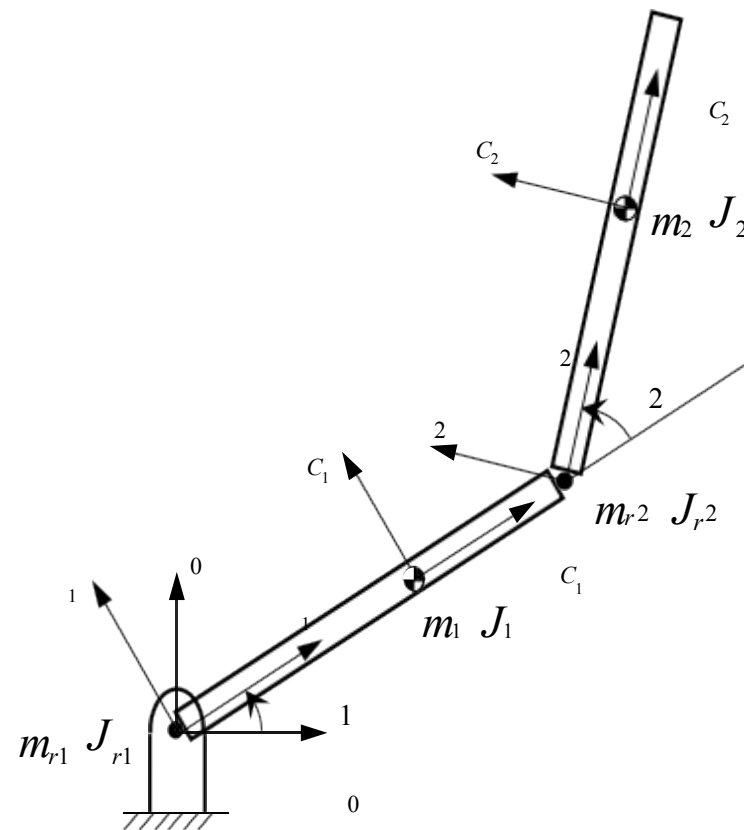
l_1 和 l_2 分别为两连杆质心到各自关节轴之间的距离

机器人的势能为 $u = m_1 g l_1 s_1 + m_2 g (a_1 s_1 + l_2 s_{12}) + m_{r2} g a_1 s_1$

机器人的动能为

$$k = \frac{1}{2} (m_1 l_1^2 + m_2 a_1^2 + 2m_2 a_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2 + m_{r2} a_1^2 + J_1 + J_2 + n_1 J_{r1} + J_{r2}) \dot{\theta}_1^2 + (m_2 a_1 l_2 c_2 + m_2 l_2^2 + J_2 + n_2 J_{r2}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{2} (m_2 l_2^2 + J_2 + n_2 J_{r2}) \dot{\theta}_2^2$$

利用拉格朗日方法可建立机器人动力学模型



8.2 计算转矩前馈控制

关节1处的动力学模型

$$\begin{aligned} & \frac{\eta_1 C_{T1} k_{u1}}{R_{m1}} U_{c1} - \left(b_{a1} + {}^2n_1 b_{m1} + \frac{\eta_1^2 C_{T1} k_{e1}}{R_{m1}} \right) \mathbf{q}_1 \\ & = (m_1 \dot{l}_1^2 + m_2 (a_1^2 + 2a_1 l_2 c_2 + \dot{l}_2^2) + m_{r2} a_1^2 + J_1 + J_2 + {}^2n_1^2 J_{r1} + J_{r2}) \mathbf{q}_1 - 2m_2 a_1 l_2 s_2 \mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 \\ & \quad (m_2 (a_1 l_2 c_2 + l_2)^2 + J_2 + {}^2n_2 J_{r2}) \mathbf{q}_2 - m_2 a_1 l_2 s_2 \mathbf{q}_2^2 + m_1 g l_1 c_1 + m_2 g (a_1 c_1 + l_2 c_{12}) + m_{r2} g a_1 c_1 \end{aligned} \quad +$$

按照独立关节控制的思路，此模型等价于 $J_{c1} \theta_1 + B_{c1} \dot{\theta}_1 = K_{c1} U_{c1} - T_{c1}$

$$\text{式中 } J_{c1} = J_{a1} + {}^2n_1 J_{m1} \quad J_{a1} = m_1 \dot{l}_1^2 + m_2 (a_1^2 + 2a_1 l_2 \bar{c}_2 + \dot{l}_2^2) + m_{r2} a_1^2 + J_1 + J_2 + J_{r2} \quad J_{m1} = J_{r1}$$

$$\begin{aligned} T_{c1} & = 2m_2 a_1 l_2 (c_2 - \bar{c}_2) \mathbf{q}_1 + (m_2 (a_1 l_2 c_2 + \dot{l}_2^2) + J_2 + {}^2n_2 J_{r2}) \mathbf{q}_2 \\ & \quad - 2m_2 a_1 l_2 s_2 \mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 - m_2 a_1 l_2 s_2 \mathbf{q}_2^2 + m_1 g l_1 c_1 + m_2 g (a_1 c_1 + l_2 c_{12}) + m_{r2} g a_1 c_1 \quad \bar{c}_2 \text{ 是 } c_2 \text{ 变化范围的中值} \end{aligned}$$

$$B_{ci} = b_{ai} + {}^2n_i^2 b_{mi} + \frac{\eta_i^2 C_{Ti} k_{ei}}{R_{mi}}$$

$$K_{ci} = \frac{\eta_i C_{Ti} k_{ui}}{R_{mi}}$$

类似可得关节2处的模型

8.2 计算转矩前馈控制

由前述模型可见，即使是采取独立关节控制，也还是需要掌握机器人整体动力学模型的信息，因为某些独立关节模型的参数可能会涉及其它关节

同时，也可以看到干扰转矩非常复杂，它们与关节的角度、角速度、角加速度甚至关节角度变化范围等等都有关系。

对干扰力矩进行估计，并利用估计结果补偿干扰力矩，即形成有利于抑制复杂干扰力矩的计算转矩前馈控制策略

如：对干扰力矩 T_{c1} 的估计式为

$$\begin{aligned} T_{c1}^{\wedge} = & 2m_2a_1l_2(c_{d2} - \bar{c}_2)\mathbf{9}_{d1} + (m_2(a_1l_2c_{d2} + l_2\dot{l}) + J_2 + n_2J_{r2})\mathbf{9}_{d2} \\ & - 2m_2a_1l_2s_{d2}\mathbf{9}_{d1}\mathbf{9}_{d2} - m_2a_1l_2s_{d2}\mathbf{9}_{d2}^2 + m_1gl_1c_{d1} + m_2g(a_1c_{d1} + l_2c_{d12}) + m_{r2}ga_1c_{d1} \end{aligned}$$

式中 $c_{d1} = \cos\mathbf{9}_{d1}$, $s_{d2} = \sin\mathbf{9}_{d2}$, $c_{d2} = \cos\mathbf{9}_{d2}$, $c_{d12} = \cos(\mathbf{9}_{d1} + \mathbf{9}_{d2})$

对于关节1，在带前馈的PID控制中引入计算转矩前馈，可得到如下控制方案：

$$U_{c1}(s) = \left(k_{P1} + \frac{k_{I1}}{s} \right) \mathbf{9}_1(s) - k_{D1} \dot{\mathbf{9}}_1(s) + \frac{J_{c1}}{K_{c1}} s^2 \mathbf{9}_{d1}(s) + \left(\frac{B_{c1}}{K_{c1}} + k_{D1} \right) s \theta_{d1}(s) + \frac{1}{K_{c1}} T_{c1}^{\wedge}(s)$$

8.3 集中控制

8.3.1 电机电流控制

引入电流反馈会削弱关节的抗干扰能力，考虑到独立关节控制对各关节的抗干扰能力要求甚高，所以在独立关节控制中不使用电流反馈

在独立关节控制中，将各关节电机视为运动部件，重点关注转速 ω_i ，由转速积分为 θ_i 进而形成机器人运动完成要求的作业

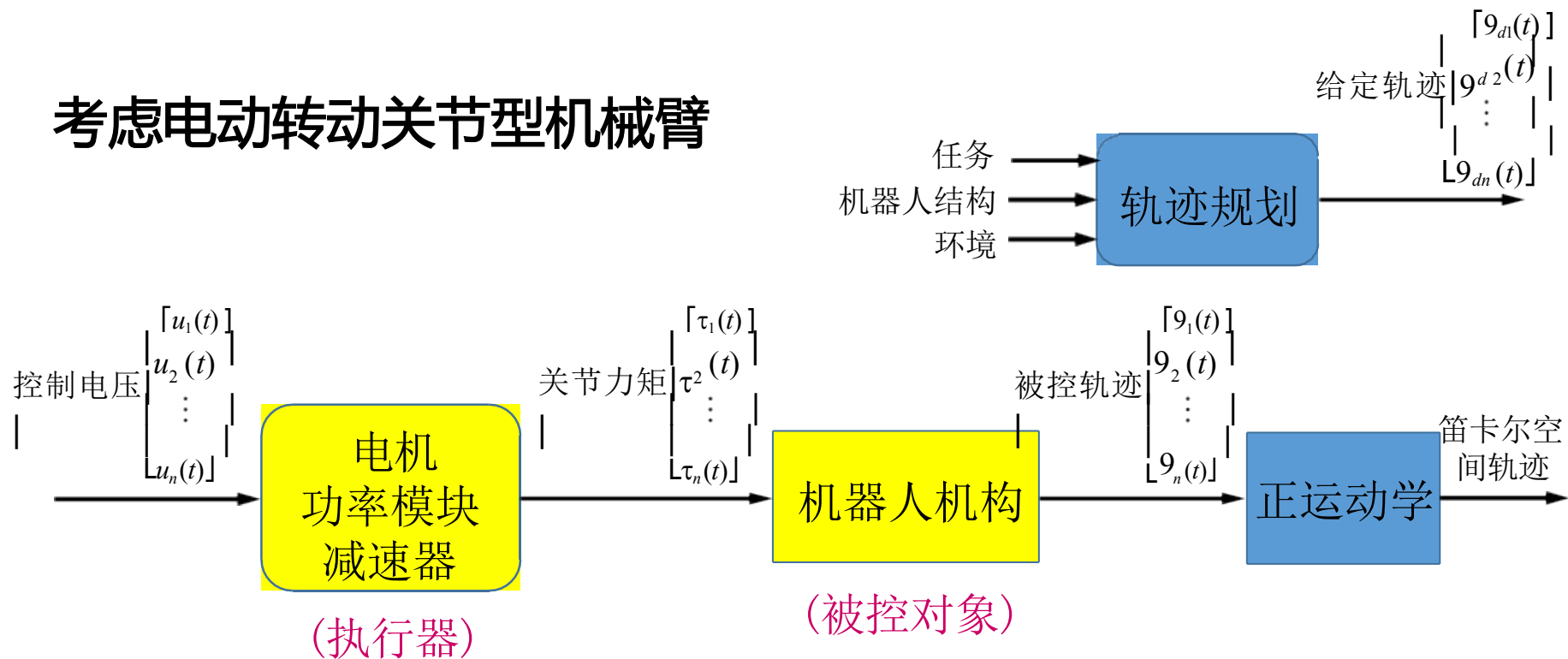
在独立关节控制中各关节电机控制的目标是让转角跟踪期望曲线

与独立关节控制不同，集中控制是将各关节电机视为出力部件，重点关注转矩 T_{ei} ，由关节电机的转矩驱动机器人运动完成要求的作业。由于电机转矩与电流成正比，在集中控制中各关节电机控制的目标是让电机电流跟踪期望电流。这种电流跟踪控制显然需要使用电流反馈，因此在集中控制中是离不开电流反馈的

8.3 集中控制

8.3.2 集中控制的被控对象模型

考虑电动转动关节型机械臂



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：
<https://d.book118.com/125042002201012023>