



机器人学(第三版)

蔡自兴 主编

中南大学

2016



5.1 机器人控制与传动概述

从控制观点看，机器人系统代表冗余的、多变量和本质上非线性的控制系统，同时又是复杂的耦合动态系统。每个控制任务本身就是一个动力学任务。



5.1 机器人控制与传动概述

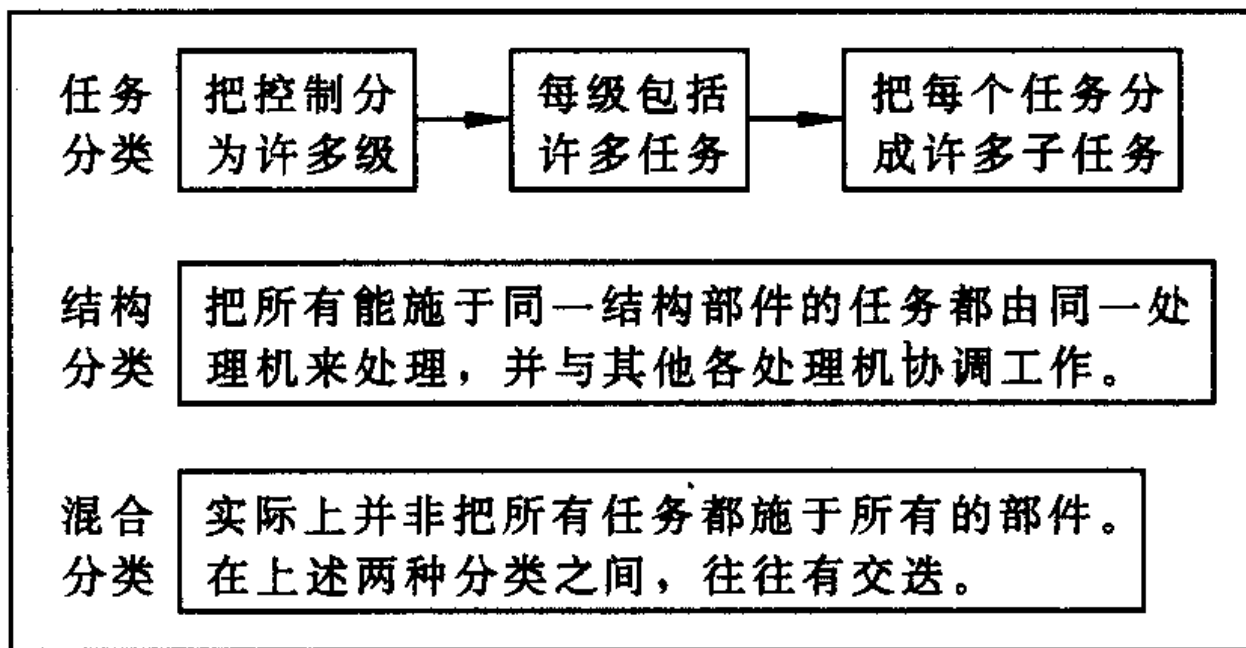
5.1.1 机器人控制的分类、变量与层次

■ 控制器分类

机器人控制器是具有多种结构形式，包括非伺服控制、伺服控制、位置和速度反馈控制、力（力矩）控制、基于传感器的控制、非线性控制、分解加速度控制、滑模控制、最优控制、自适应控制、递阶控制以及各种智能控制等。

5.1.1 机器人控制的分类、变量与层次

表5.1 机器人控制的分类及其分析方法



5.1.1 机器人控制的分类、变量与层次

■ 主要控制变量

图5.1表示一台机器人的各关节控制变量。

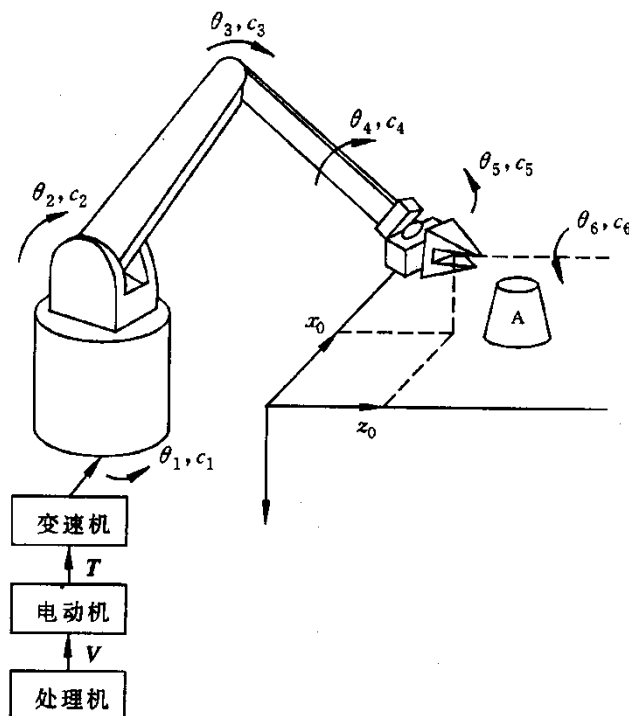


图5.1 机器手各关节控制变量

5.1.1 机器人控制的分类、变量与层次



■ 主要控制层次

图5.2表示机器人的主要控制层次

- 第一级：人工智能级
- 第二级：控制模式级
- 第三级：伺服系统级

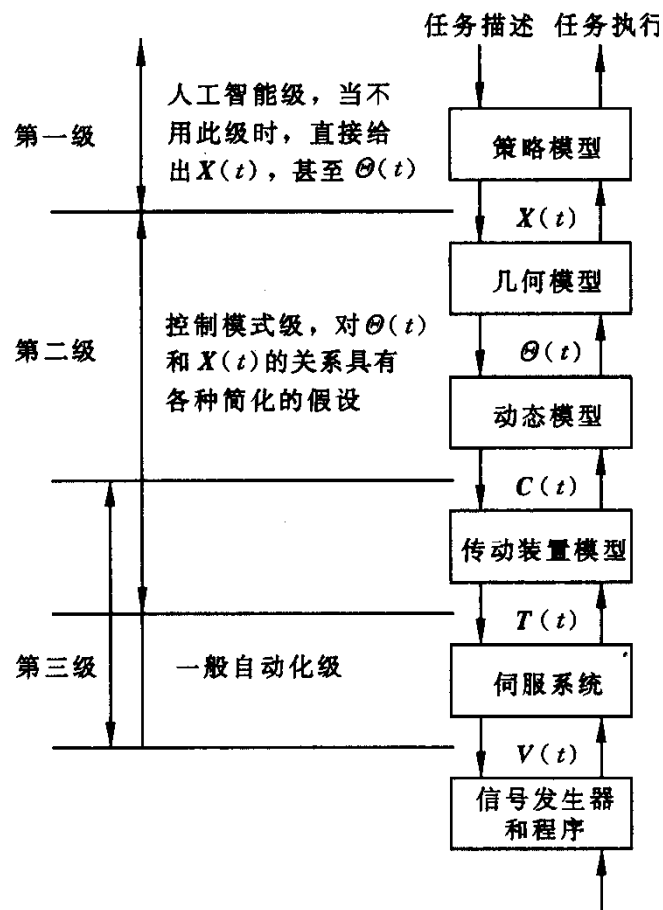


图5.2 机器手主要控制层次

5.1.2 机器人传动系统



■ 液压缸伺服传动系统

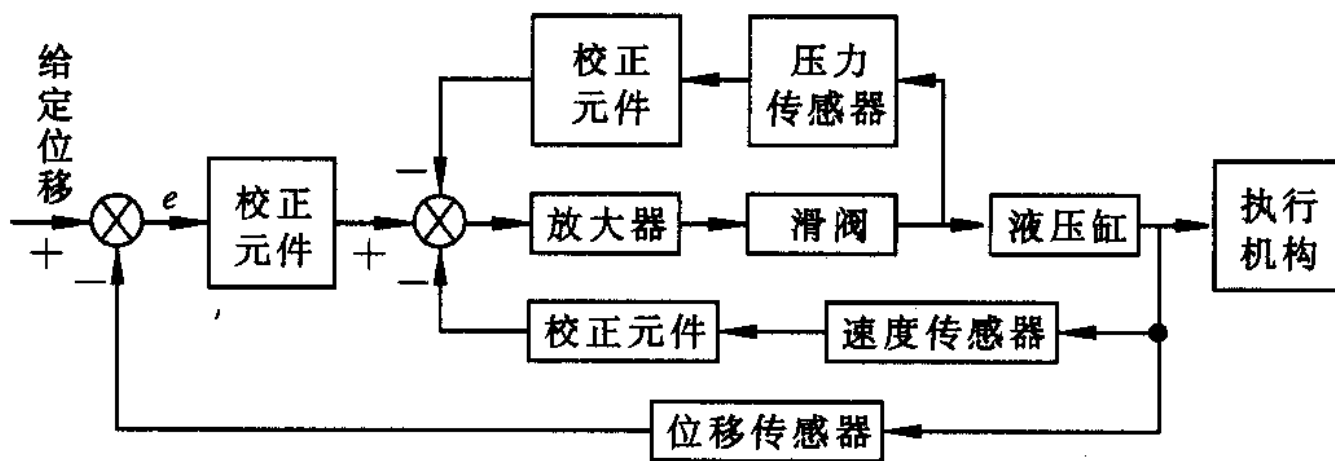


图5.3 液压缸伺服传动系统结构图

5.1.2 机器人传动系统



■ 电-液压伺服控制系统

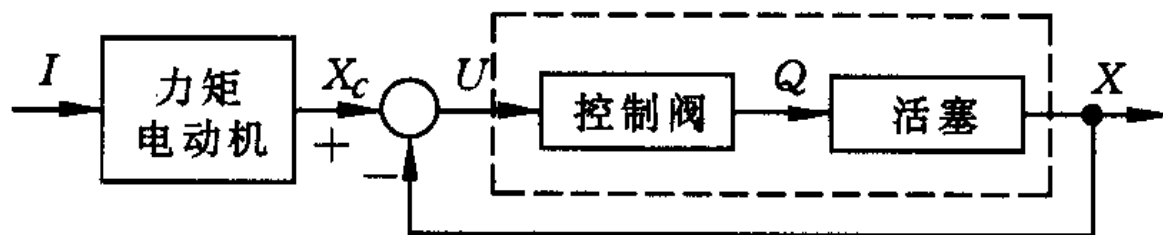


图5.4 电-液压伺服控制系统

5.1.2 机器人传动系统



■ 滑阀控制液压传动系统

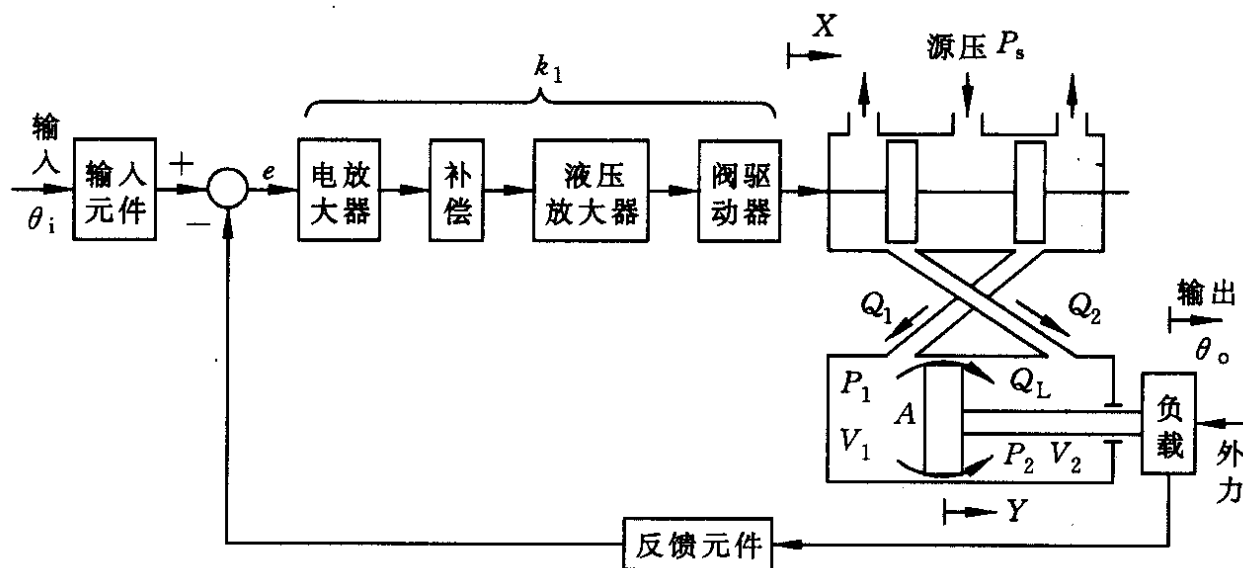


图5.5 一个简单的滑阀控制液压传动系统

5.2 机器人的位置控制



机器人为串续连杆式机械手，其动态特性具有高度的非线性。要控制这种由马达驱动的操作机器人，用适当的数学方程式来表示其运动是十分重要的。这种数学表达式就是数学模型，或简称模型。

在设计模型时，提出下列二个假设：

- （1）机器人的各段是理想刚体，因而所有关节都是理想的，不存在摩擦和间隙。
- （2）相邻两连杆间只有一个自由度，要么为完全旋转的，要么是完全平移的。

5.2.1 直流控制系统原理与数学模型

■ 传递函数与等效方框图

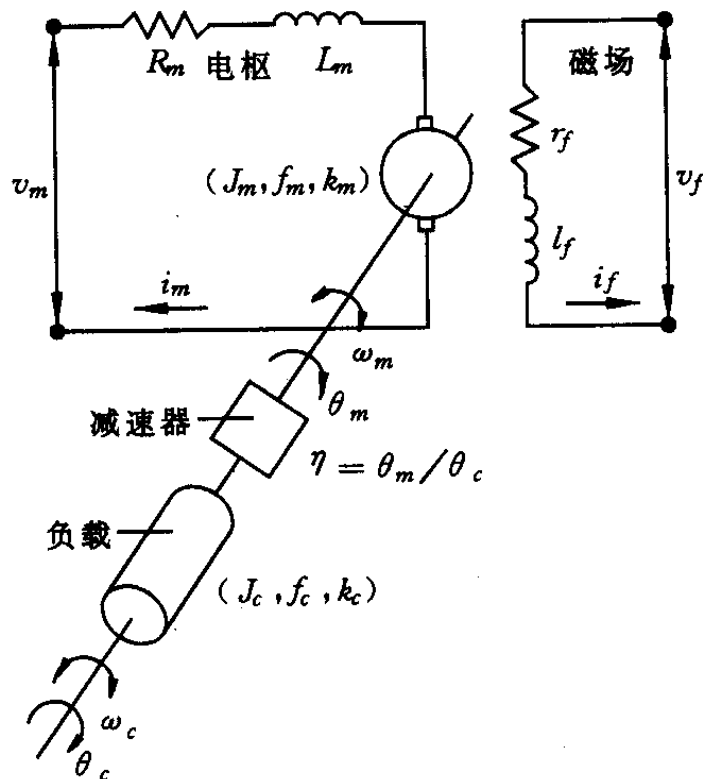
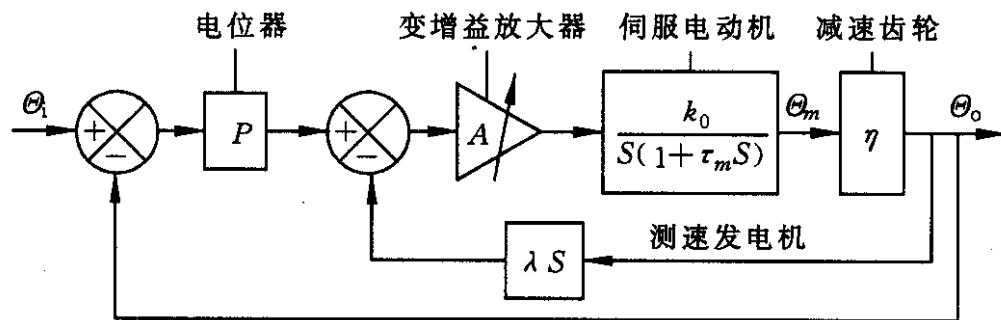


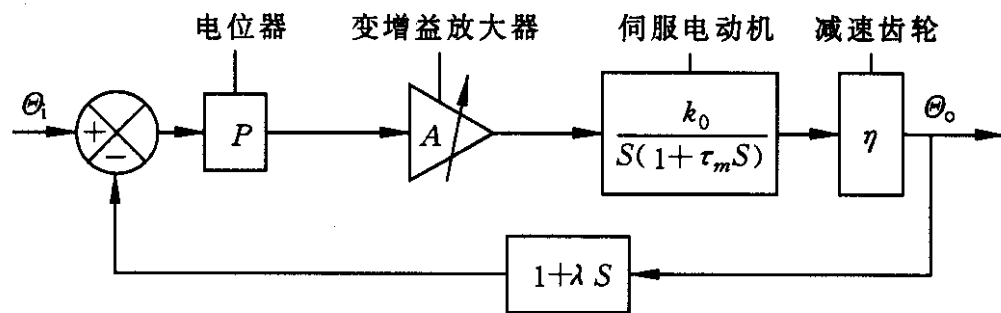
图5.7 直流电动机伺服传动原理

5.2.1 直流控制系统原理与数学模型

■ 直流电动机的转速调整



(a)



(b)

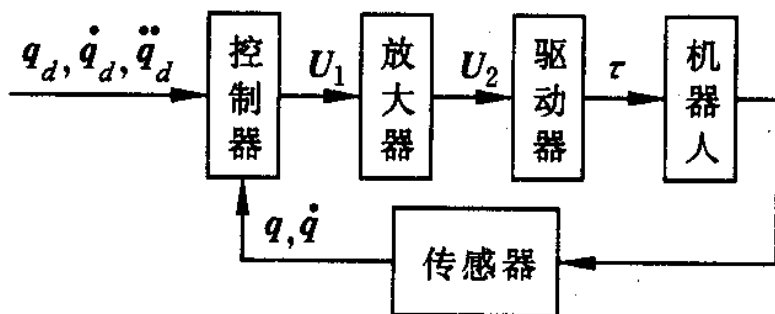
(a) 控制原理图

(b) 等效电路图

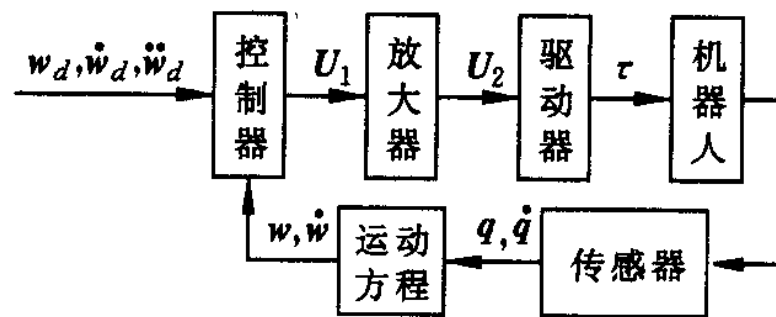
图5.10 具有测速反馈的直流电动机控制原理图

5.2.2 机器人位置控制的一般结构

■ 机器人基本控制结构



(a) 关节空间控制结构



(b) 直角坐标空间控制结构

图5.11 机器人位置控制基本结构

5.2.2 机器人位置控制的一般结构

■ PUMA机器人的伺服控制结构

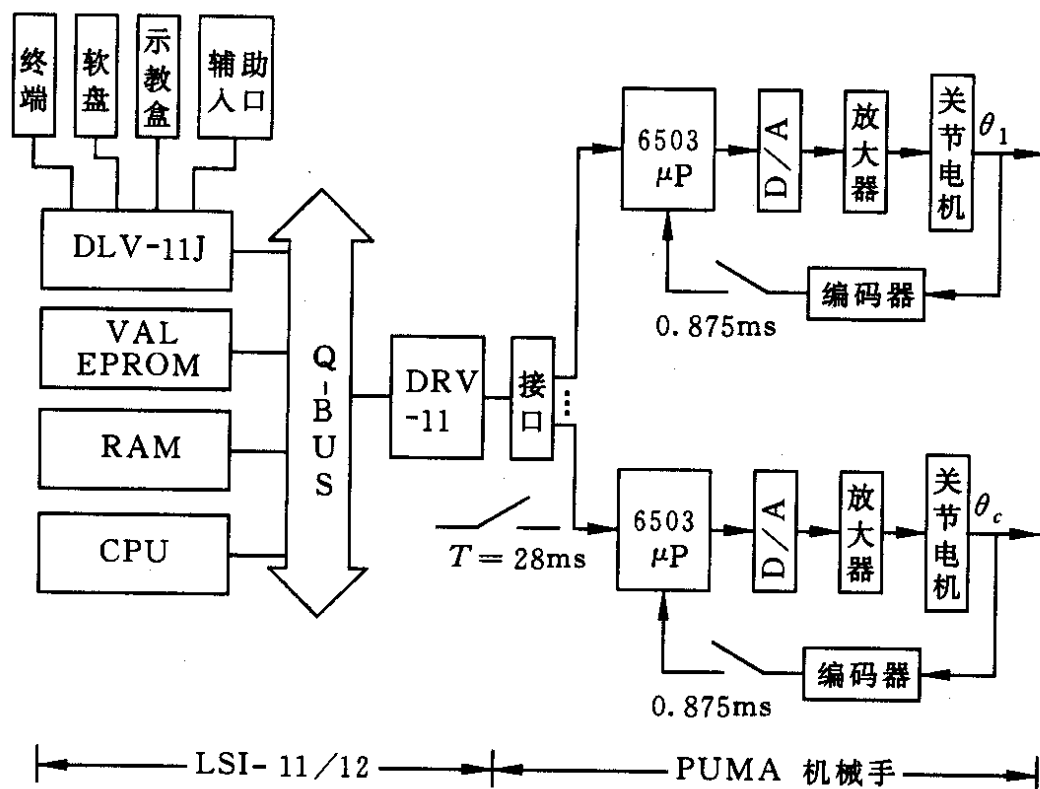


图5.12 PUMA机器人的伺服控制结构

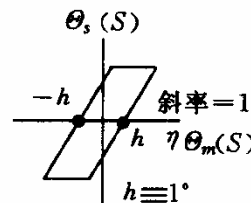


图5.13 斯坦福机械手的位置控制系统方框图

5.2.3 单关节位置控制器的结构与模型



■ 单关节控制器的传递函数

$$\frac{\Theta_m(S)}{V_m(S)} = \frac{K_I}{S[L_m JS^2 + (R_m J + L_m B)S + (R_m B + k_e K_I)]} \quad (5.51)$$

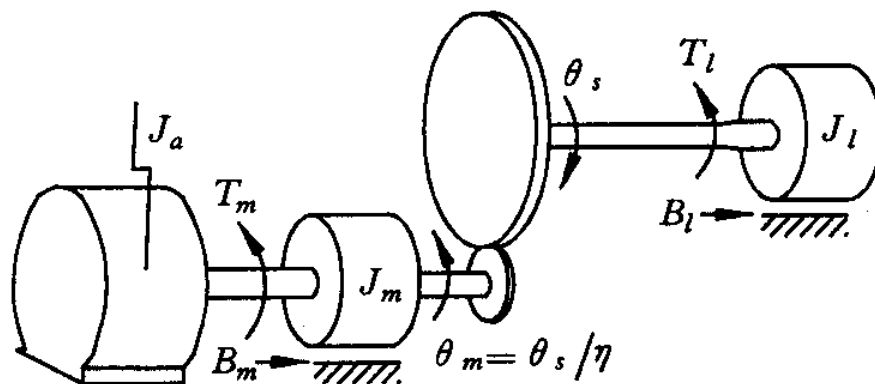
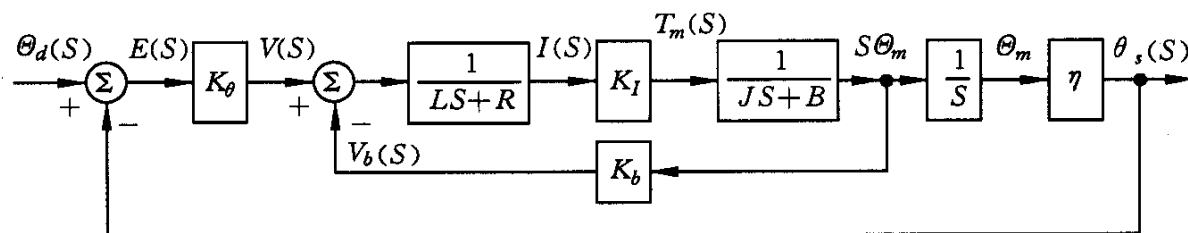
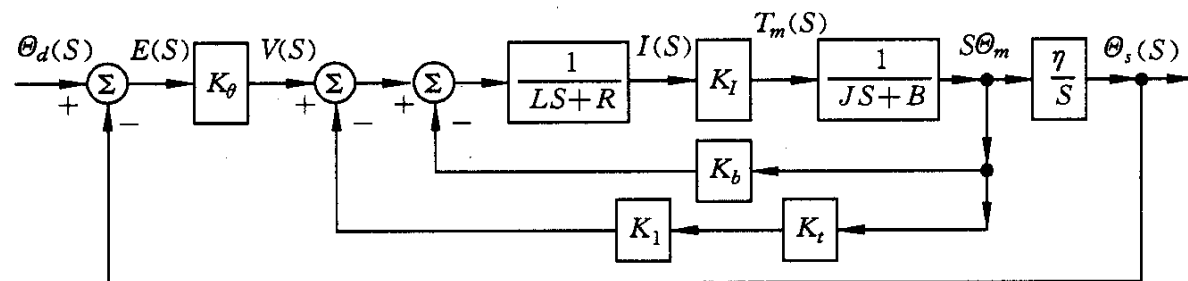


图5.14 一个关节的电动机-齿轮-负载联合装置示意图

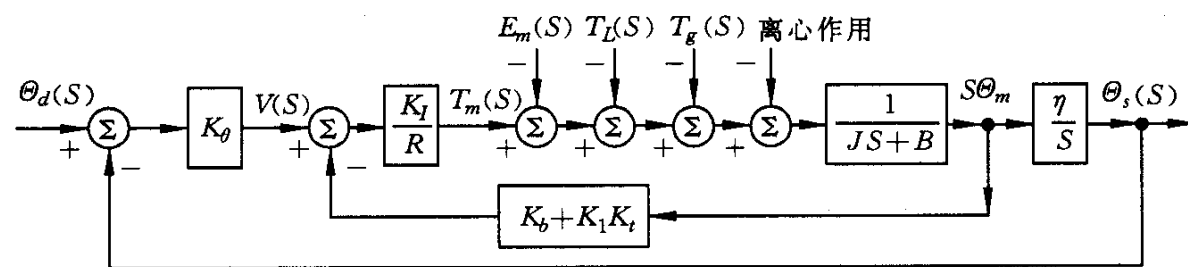
5.2.3 单关节位置控制器的结构与模型



(a)



(b)



(c)

图5.15 机械手位置控制器结构图



5.2.3 单关节位置控制器的结构与模型

■ 参数确定及稳态误差

■ K_θ 和 K_I 的确定

$$K_\theta \leq J_{eff} \omega^2 R_m / 4\eta K_I \quad (5.69)$$

$$K_I \geq R_m (\omega / \sqrt{J_{eff}} - B) / K_t - k_e / K_t \quad (5.71)$$

■ 关节控制器的稳态误差

$$e_{ssp} = R_m (C_f + C_g + \eta C_L) / K_\theta K_I \quad (5.80)$$

5.2.4 多关节位置控制器的耦合与补偿

- 动态方程的拉格朗日公式

$$\mathbf{T}_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\mathbf{T}_i = \sum_{j=1}^6 D_{ij} \ddot{q}_j + J_{ai} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^6 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i$$

- 各关节间的耦合与补偿
- 耦合惯量补偿的计算

5.3 机器人的力和位置混合控制

5.3.1 柔顺运动与柔顺控制

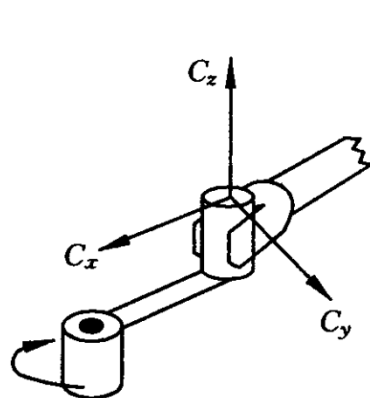
■ 被动柔顺和主动柔顺

- 远距离中心柔顺（remote center compliance, RCC）
- 被动柔顺（passive compliance）机械装置具有快速响应能力，而且比较便宜。
- 可编程主动柔顺（active compliance）装置能够对不同类型的零件进行操作，或者能够根据装配作业不同阶段的要求来修改末端装置的弹性性能。

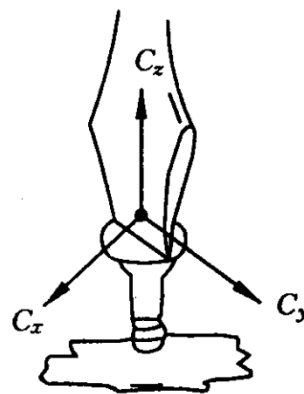
5.3.1 柔顺运动与柔顺控制

- 作业约束与力控制
 - 对机器人机械手进行力控制，就是对机械手与环境之间的相互作用力进行控制。
- 机器人机械手所受到的约束
 - 自然约束(natural constraints)是由物体的几何特性或作业结构特性等引起的对机械手的约束。
 - 人为约束(artificial constraints) 是一种人为施加的约束，用来确定作业结构中的期望运动的力或轨迹的形式。

作业约束与力控制

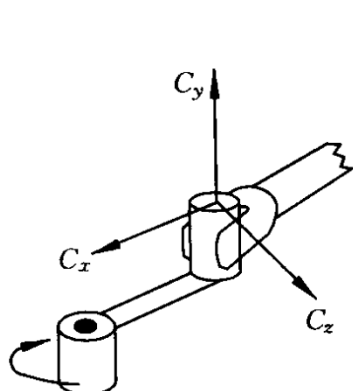


(a) 转动曲柄

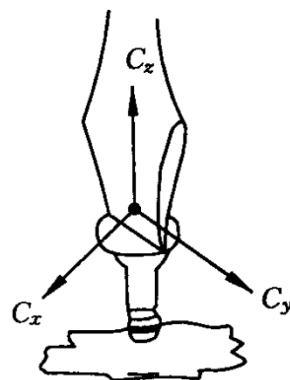


(b) 旋转起子

图5.18 两种不同作业下的自然约束



(a) 转动曲柄



(b) 旋转起子

图5.19 两种作业的自然约束与人为约束

5.3.1 柔顺运动与柔顺控制

■ 柔顺控制的种类

两类实现柔顺控制的主要方法：

■ 阻抗控制

阻抗控制不是直接控制期望的力和位置，而是通过控制力和位置之间的动态关系来实现柔顺功能。

■ 力和位置的混合控制

基本思想是在柔顺坐标空间将任务分解为某些自由度的位置控制和另一些自由度的力控制，并在任务空间分别进行位置控制和力控制的计算，然后将计算结果转换到关节空间合并为统一的关节控制力矩，驱动机械手以实现所需要的柔顺功能。

5.3.2 主动阻力控制



阻力是研究上述任意大任务空间位移的延伸：

$$\ddot{x} = \ddot{x} - \ddot{x}_d \quad (5.87)$$

把下列控制规律用于任务空间就能根据上式直接控制机械手与其环境间的动态交互作用：

$$\tau = \hat{g}(q) - J^T(q)[K_p \tilde{x} + K_D \dot{\tilde{x}}] \quad (5.88)$$

由于式(5.88)监控机械手的力与位置间的动态关系，而不是直接控制力或位置，所以把这种控制称为阻力控制。

5.3.2 主动阻力控制

■ 位置控制型阻力控制

- 定义候选李雅普诺夫函数为：

$$V := \frac{1}{2}[\tilde{x}^T X_p \tilde{x} + \dot{q}^T H \dot{q}] \quad (5.89)$$

- 分三种情况：

- 机械手为非冗余的，而且 $J(q)$ 在当前机械手结构 q 下具有全秩（rank）。
- 对于当前的 q ，雅可比矩阵 $J(q)$ 是退化的，当前的机械手结构是奇异的
- 机械手是冗余的，但对于当前的 q ， $J(q)$ 不具有完全的低秩。

■ 柔顺型阻抗控制

5.3.3 力和位置混合控制方案和规律

■ 力和位置混合控制方案

■ 主动刚性控制

如果希望在某个方向上遇到实际约束，那么这个方向的刚性应当降低，以保证有较低的结构应力；反之，在某些不希望碰到实际约束的方向上，则应加大刚性，这样可使机械手紧紧跟随期望轨迹。于是，就能够通过改变刚性来适应变化的作业要求。

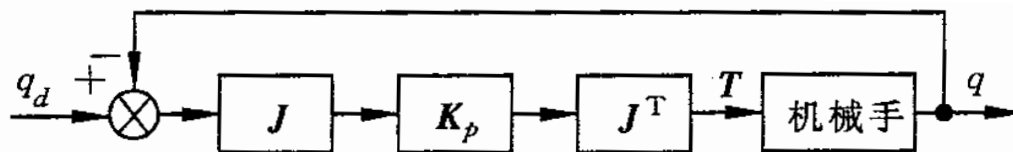


图5.23 主动刚性控制框图

■ 雷伯特-克雷格位置/力混合控制器

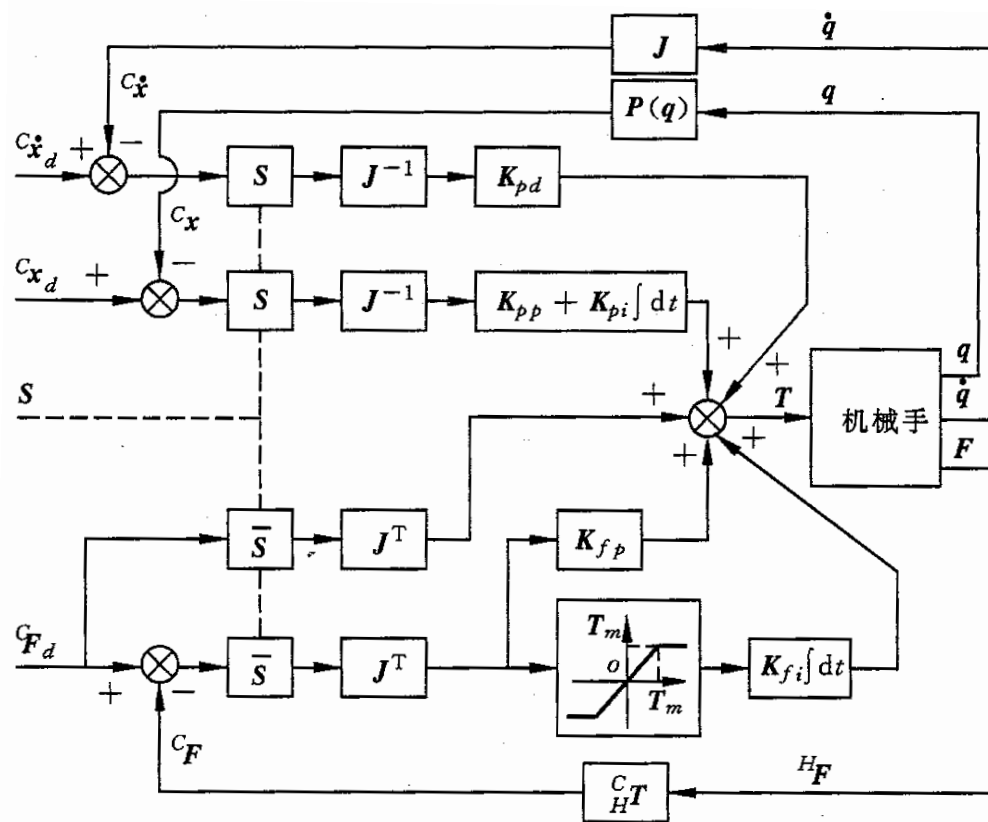


图5.24 R-C控制器结构

对R-C控制器进行如下改进：

- 在混合控制器中考虑机械手的动态影响，并对机械手所受重力及哥氏力和向心力进行补偿；
- 考虑力控制系统的欠阻尼特性，在力控制回路中，加入阻尼反馈，以消弱振荡因素。
- 引入加速度前馈，以满足作业任务对加速度的要求，也可使速度平滑过渡。

改进后的R-C力/位置混合控制系统结构图如图5.17所示。

雷伯特-克雷格位置/力混合控制器

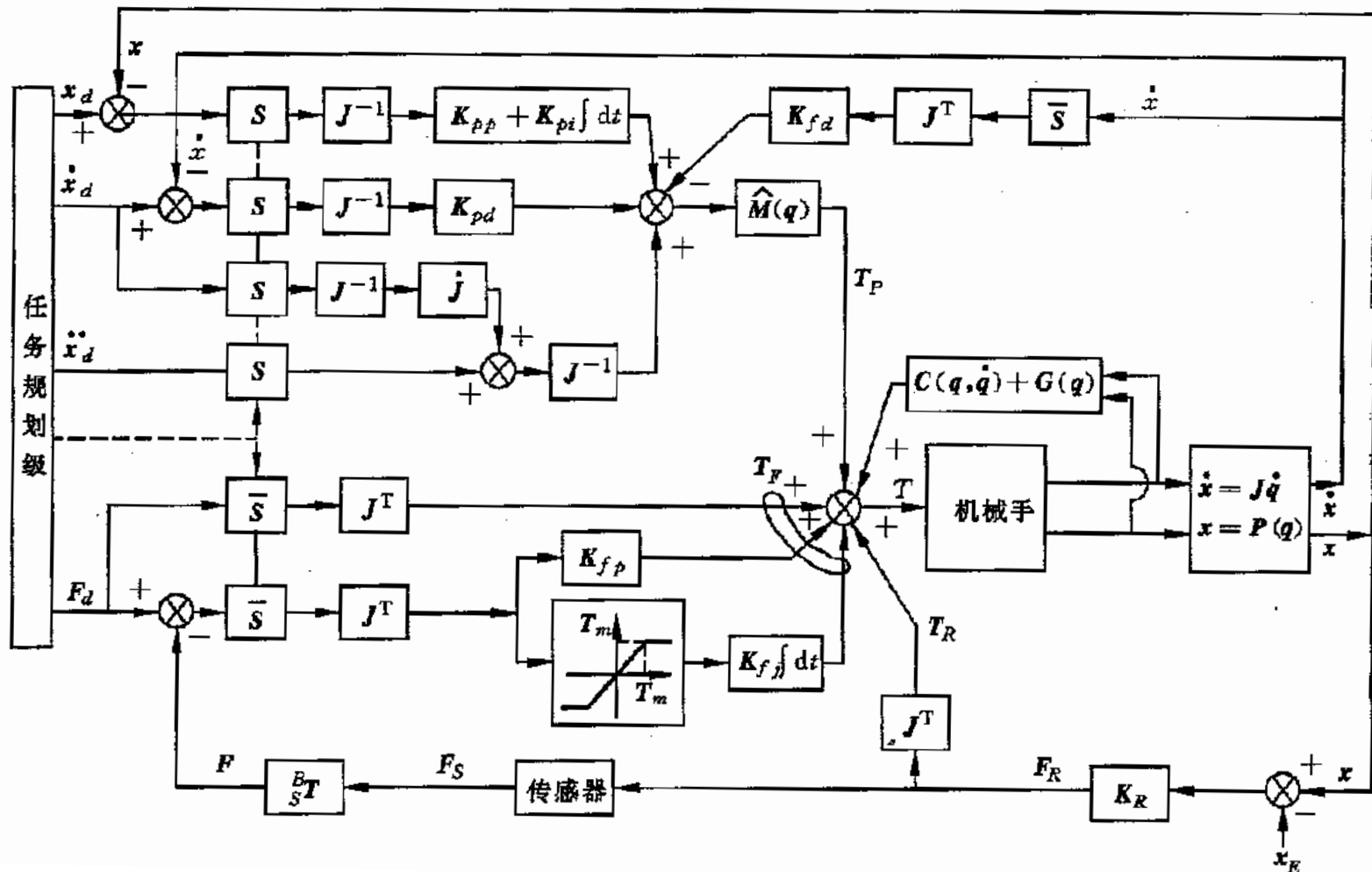


图5.25 改进后的R-C混合控制系统结构

力和位置混合控制方案



■ 操作空间力和位置混合控制系统

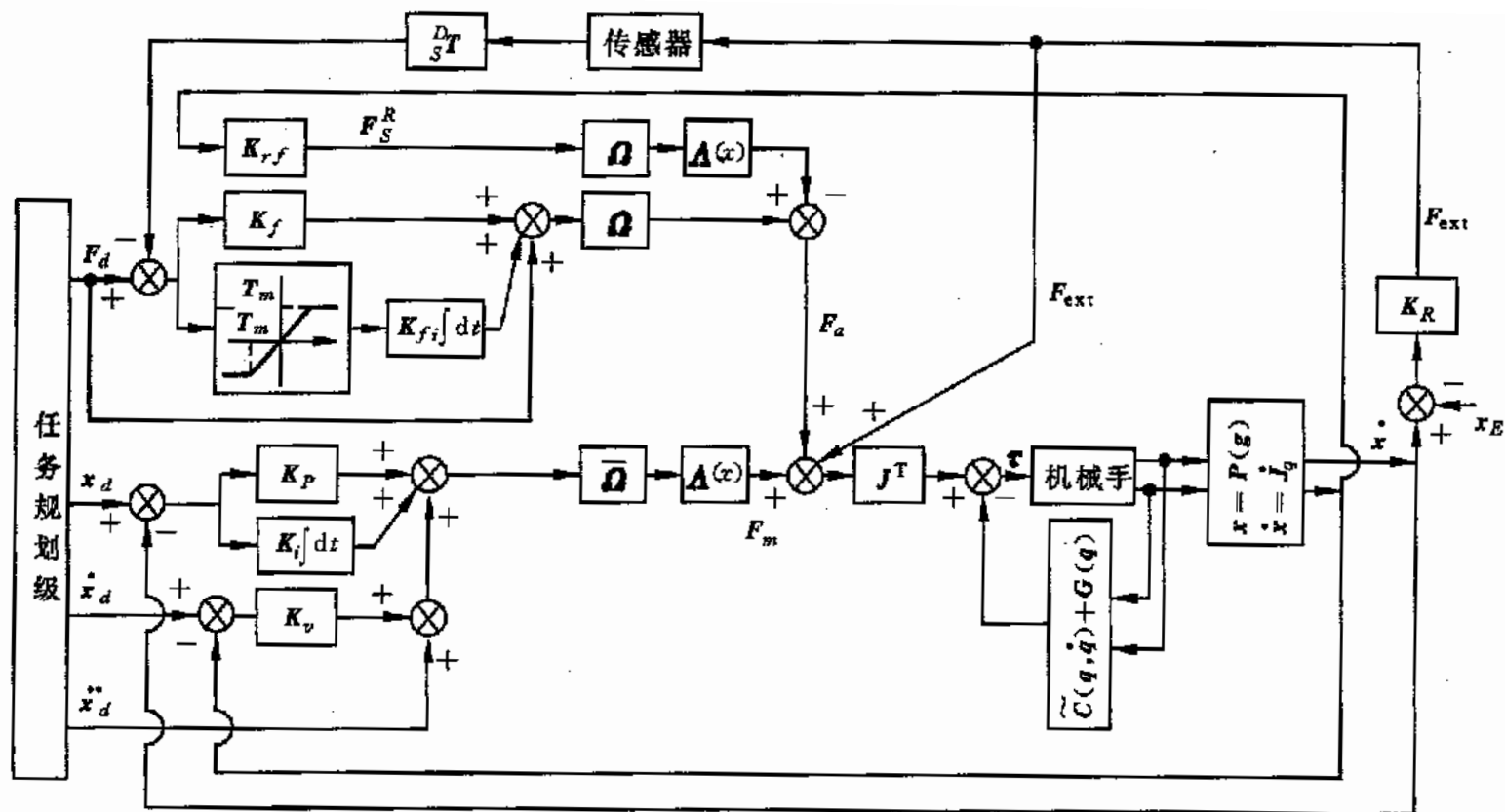


图5.26 操作空间力/位置混合控制系统框图



■ 位置控制规律

系统的控制器方程为：

$$T = \hat{M}(q)[\ddot{q}_d + K_{pd}(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_{pp}(q_d - q)] + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (5.67)$$

闭环系统的动态方程：

$$\Delta\ddot{q} = K_{pd}\Delta\dot{q} + K_{pp}\Delta q = 0 \quad (5.70)$$

取

$$\begin{aligned} K_{pd} &= 2\xi\omega_n I \\ K_{pp} &= \omega_n^2 I \end{aligned} \quad (5.71)$$

■ 力控制规律

令图5.17中的位置适从选择矩阵 $S=0$ ，控制末端在基坐标系 z_0 方向上受到反作用力。设约束表面为刚体，末端受力如图5.19所示，那么对三连杆机械手进行力控制时有力控制选择矩阵

:

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

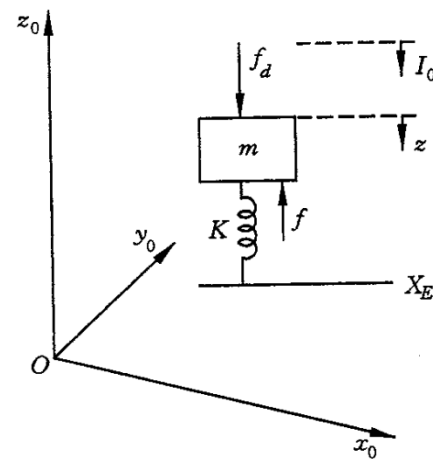


图5.27 机械手末端受力图

闭环系统的动态方程：

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 = 0 \\ \ddot{q}_2 + J_{32}^2 K_{fd2} \dot{q}_2 + J_{32} J_{33} K_{fd2} \dot{q}_3 = H_1 (f - f_d) \\ \ddot{q}_3 + J_{33}^2 K_{fd3} \dot{q}_3 + J_{32} J_{33} K_{fd3} \dot{q}_2 = H_2 (f - f_d) \end{cases} \quad (5.76)$$

上式表明，关节1对力控制不起作用，关节2和3对力控制有作用。

■ 力和位置混合控制规律

设约束坐标系与基坐标系重合。如果要求作业在基坐标系的 z_0 方向进行力控制，在某个与 x_0y_0 平面平行的约束面上进行位置控制，则适从选择矩阵为

$$\text{位置: } S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{力: } \bar{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\ddot{x} + K'_{pd1}\Delta\dot{x} + K'_{pp1}\Delta x \\ \Delta\ddot{y} + K'_{pd2}\Delta\dot{y} + K'_{pp2}\Delta y \\ \ddot{z} + K'_{fd3}\dot{z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} 0 \\ H_1 \cdot \Delta f \\ H_2 \cdot \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{12}H_1 + J_{13}H_2 \\ J_{22}H_1 + J_{23}H_2 \\ J_{32}H_1 + J_{33}H_2 \end{bmatrix} \Delta f \quad (5.84)$$

5.3.4 柔顺控制运动位移和力混合控制的计算



- 根据作业要求对 Σ_c 的三个自由度上的线位移或接触压力进行控制，即

x_c 轴向位移控制的位移误差为：

$$e_x^c = i_c \cdot i_c^T (E - P_c) \quad (5.123)$$

y_c 轴向位移控制的位移误差为：

$$e_y^c = j_c \cdot j_c^T (E - P_c) \quad (5.124)$$

z_c 轴向接触压力控制，产生接触压力 Q_n 的位移误差为：

$$e_z^c = k_c \cdot k_c^T (E - P_c) - Q_n / K_z^c \quad (5.125)$$

5.4 机器人的分解运动控制

5.4.1 分解运动控制原理

- 相对参考坐标系分别定义位置矢量 $\mathbf{p}(t)$ 、欧拉角矢量 $\mathbf{\Gamma}(t)$ 、线速度矢量 $\mathbf{v}(t)$ 和角速度矢量 $\mathbf{\Omega}(t)$ 。
- 夹手的线速度和角速度：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{\Omega}(t) \end{bmatrix} = [\mathbf{J}(\mathbf{q})]\dot{\mathbf{q}}(t) = [\mathbf{J}_1(\mathbf{q}), \mathbf{J}_2(\mathbf{q}), \dots, \mathbf{J}_6(\mathbf{q})]\dot{\mathbf{q}}(t)$$

- 关节的加速度

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}(t) \\ \dot{\mathbf{\Omega}}(t) \end{bmatrix} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \mathbf{\Omega}(t) \end{bmatrix}$$

5.4.2 分解运动速度控制

- 分解运动速度控制（resolved motion rate control, RMRC）意味着各关节马达的运动联合进行，并以不同的速度同时运行，以保证夹手沿笛卡尔坐标轴稳定运动。

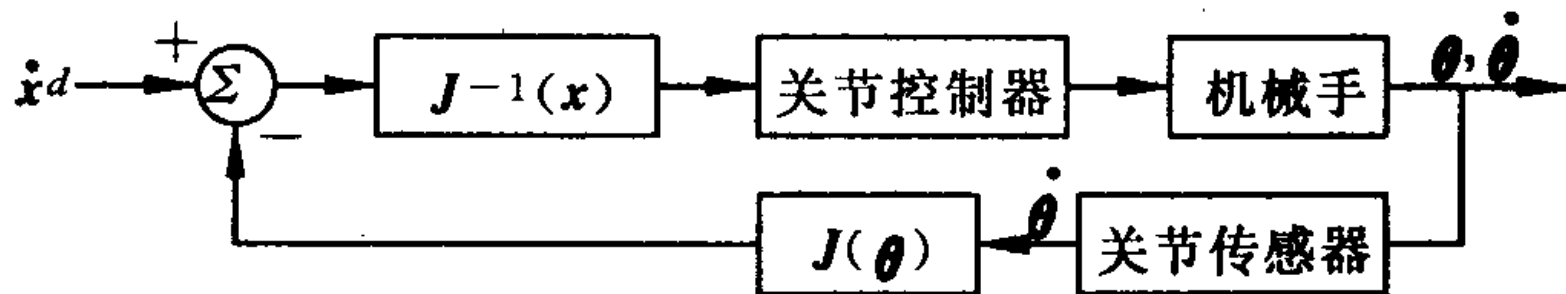


图5.29 分解运动速度控制框图

5.4.3 分解运动加速度控制

- 分解运动加速度控制（resolved motion acceleration control, RMAC）把分解运动速度控制的概念扩展以包括加速度控制。

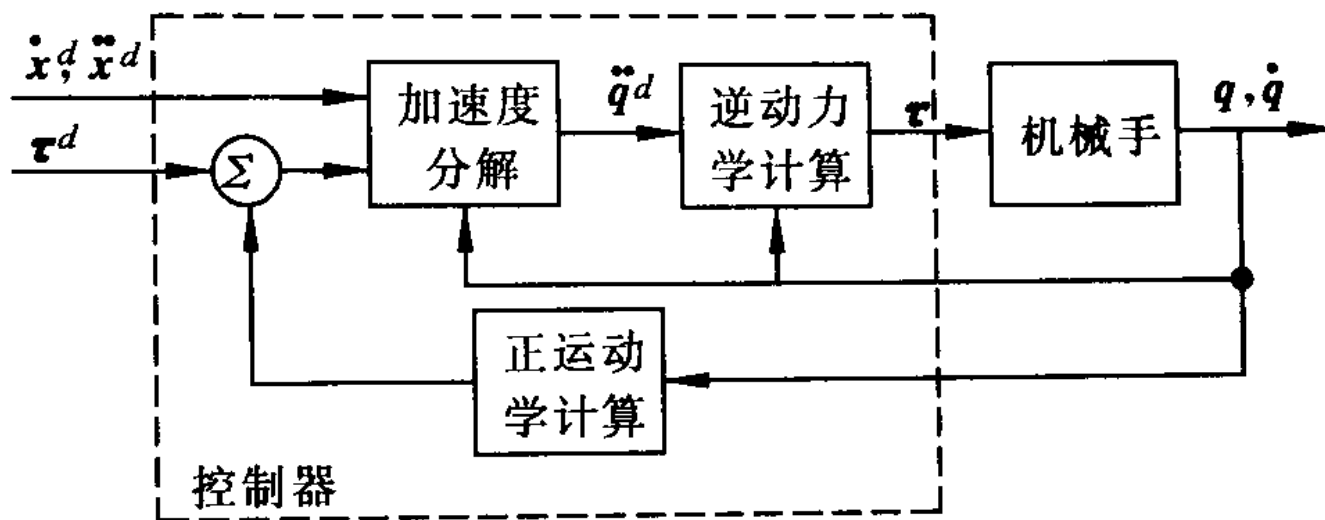


图5.30 一种分解运动加速度控制方案框图

5.4.4 分解运动力控制

- 分解运动力控制（resolved motion force control, RMFC）的概念是要确定加于机械手各关节驱动器的控制力矩，使机械手的夹手或工具执行期望的笛卡儿位置控制。

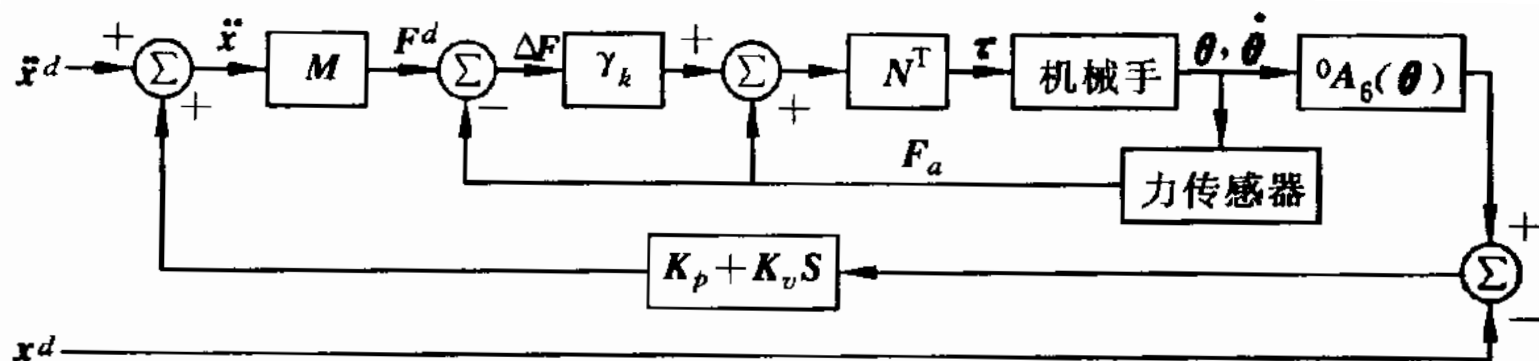


图5.31 分解运动力控制系统框图

5.5 小结

- 机器人控制的基本原则
 - 机器人控制器的分类
 - 各控制变量之间的关系和主要控制层次
- 位置控制：
 - 关节空间控制结构
 - 直角坐标空间控制结构
 - PUMA机器人的伺服控制结构
 - 单关节位置控制器和多关节位置控制器

5.5 小结

- 力/位置混合控制
 - 主动刚性控制
 - R-C控制
 - 混合控制系统控制规律的综合问题

- 机器人的分解运动控制
 - 分解运动速度控制
 - 分解运动加速度控制
 - 分解运动力控制