

直接驱动机器人关节的外模模糊控制*

庞富胜 程良铨 张继红

(华中理工大学自控系·武汉, 430074)

摘要: 应用文[1],[2]中提出的外模控制方法组成直接驱动机器人关节外模模糊控制系统, 所用模糊控制器为二级规则的三输入-输出模糊控制器, 进行了动、静态特性的仿真研究. 结果表明系统的性能得到很大的改善.

关键词: 惯量耦合; 外模模糊控制; 动态响应

1 问题概述

机器人的动力学方程是非线性的. 在直接驱动的情况下, 关节间的各种耦合更为显著, 情况更严重. 在采用电枢控制的直流电动机驱动时, 可以写出 i 关节运动方程:

$$J_i \ddot{\theta}_i = K_m I_i - M_i, \quad (1)$$

I_i 是电枢电流, 一般由 PWM 放大器供给, K_m 是电动机的力矩常数, 轴上等效阻力矩:

$$M_i = \sum_{j=1}^n d_{ij}(\theta) \ddot{\theta}_j + b_i(\theta, \dot{\theta}) + C_i(\dot{\theta}) + g_i(\theta). \quad (2)$$

按常规设计的电动机直接驱动的关节控制系统, 很难保证处处有满意的动态和静态品质. 为了提高机器人的性能, 许多作者做了大量的有益工作. [1,2]提出了外模控制结构的理论与方法.

2 外模控制

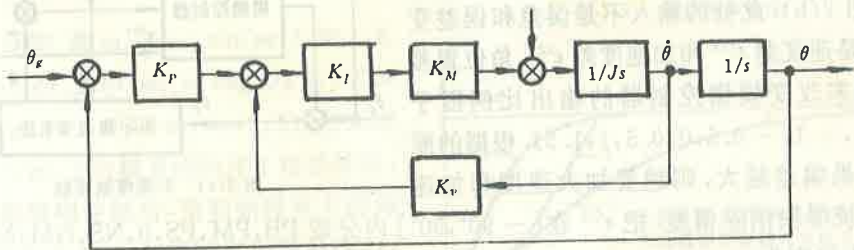


图 1(a) 系统结构

根据[1,2]选定一个恒定的 J_i 值, 按图 1(a) 构成一个性能良好或最优的模系统, 其方程为

$$\ddot{\theta}_m + a_{m1} \dot{\theta}_m + a_{m2} \theta_m = b_m \theta_g. \quad (3)$$

实际关节控制系统与模系统(3)有相同的结构, 方程式是非线性的, 写成

$$\ddot{\theta}_i + a_{i1} \dot{\theta}_i + a_{i2} \theta_i = b_i \theta_g - \tau_i. \quad (4)$$

其中系数是 $\theta, \dot{\theta}$ 的函数 记成

* 国家自然科学基金资助项目.

本文于 1994 年 10 月 12 日收到. 1995 年 12 月 29 日收到修改稿.

$$\begin{cases} a_{ip} = a_{mp} + \Delta a_p; & p = 1, 2, \\ b_i = b_m + \Delta b_i. \end{cases} \quad (5)$$

设(3)和(4)的各阶偏差为 $\epsilon^{(i)} = \theta_m^{(i)} - \theta_i^{(i)}$. 采用广义偏差控制律 $\theta_0 = K(\ddot{\epsilon} + a_{m1}\dot{\epsilon} + a_{m2}\epsilon)$ 和图 1(b) 构成外模控制结构后, 实际关节控制系统方程(4) 变成

$$\theta_i + a_1\dot{\theta}_i + a_2\theta_i = b\theta_g - b'\tau_i, \quad (6)$$

$$\begin{cases} a_p = \frac{a_{ip} + Kb_i a_{mp}}{1 + Kb_i}; & p = 1, 2, \\ b = \frac{1 + Kb_m b_i}{1 + Kb_i}, \\ b' = \frac{1}{1 + Kb_i}. \end{cases} \quad (7)$$

可以作出两点结论: i) K 足够大, 系数 a_{ip}, b_i 以及力矩 τ_i 的影响就很小, 并且 K 越大; (6) 越靠近 (3), 就越接近希望的良好品质. ii) K 的形式无关紧要, 它既可以是一个常数, 亦可以是一个非线性元件.

3 外模模糊控制

实现图 1(b) 的困难在于取得 $\ddot{\epsilon}$. 由于 $\dot{\epsilon}$ 是容易取得的, 由它进行数值微分得 $\ddot{\epsilon}$. 为克服由此引起的时延和可能的干扰, 由上节的结论, 用一个模糊控制器代替图 1(b) 中的 K 构成图 2(a) 的控制结构是合适的, 称为外模模糊控制. 采用 mamdani 提供的模糊控制规则; 模糊控制器的结构如图 2(b). 此处的输入不是误差和误差变化率, 而是速度差 $\epsilon^{(1)}$ 和加速度差 $\epsilon^{(2)}$, 角位置差 $\epsilon^{(0)}$ 则用来改变模糊控制器的输出比例因子 $F(-1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5)$. 根据的原则是: 如果偏差越大, 则越要加大速度和加速度, 使系统尽快消除偏差. 把 $\epsilon^{(0)}$ 在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 内分成 PB, PM, PS, 0, NS, NM, NB, 记为 A_i , 可写出规则为

$$\text{IF } \epsilon^{(0)} = A_i \text{ THEN } F = F_i, \quad i = 1, 2, \dots, 7. \quad (8)$$

众所周知, 对于给定规则集合和模糊集合的定义, 若输入, 输出的量化因子取为 1, 定为标准控制规则, 可算得一个从输入到输出的控制表. 如任一个量化因子发生变化, 算出从输入到输出的控制表与标准情况相比是不同的. 可以认为对于量化因子为 1 的情况, 改变量化因子就是改变了控制规则. 任一组规则记为 R_i , 上述模糊控制器相当于如

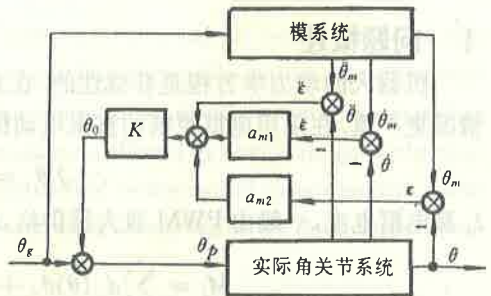


图 1(b) 外模控制结构

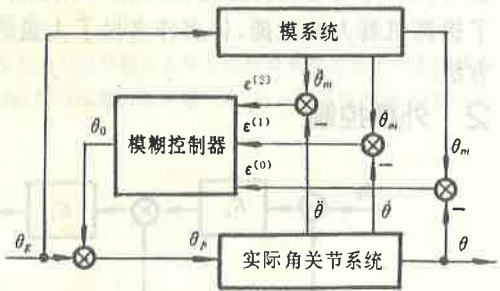


图 2(a) 外模模糊控制

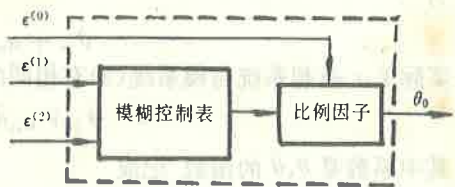


图 2(b) 模糊控制器

下描述:

$$\begin{cases} \text{IF } \epsilon^{(0)} = A_i \text{ THEN } R_i, & i = 1, 2, \dots, 7, \\ R_i: \text{ IF } \epsilon^{(1)} = B_{ij} \text{ and } \epsilon^{(2)} = C_{ij} \text{ THEN } U = D_{ij}, & j = 1, 2, \dots. \end{cases} \quad (9)$$

其中 $A_i, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}$ 是相应的模糊集合. 这是有三个输入一个输出的模糊控制器.

4 仿真结果

研究[2]中研究过的二关节实验机器人. 其两个关节驱动电机, 从电枢电流到转角输出的方程为

$$(J_1 + J_2 \sin^2 \theta_2) \ddot{\theta}_1 = K_{m1} I_1 - J_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2, \quad (10)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 = K_{m2} I_2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_1^2 \sin 2\theta_2 + m_2 g l \sin \theta_2. \quad (11)$$

(10) 中 $J_2 \sin^2 \theta_2$ 是关节 2 加到关节 1 的耦合惯量, 右边第二项为关节 2 运动在关节 1 产生的哥氏力矩. (11) 中右边第二项为关节 1 作用在关节 2 上的向心力矩, 第三项是重力矩. 其中 $l_2 = 0.3\text{m}$, $J_1 = 0.035\text{kgm}^2$, $J_2 = 0.16\text{kgm}^2$, $m_2 = 1.8\text{kg}$. 第一关节电机电力矩系数 $K_m = 0.2157$, 对于关节 1. 选定模系统(3) 中的 $K_p = 19(\text{vrad}^{-1}\text{s})$, $K_v = 6(\text{vrad}^{-1}\text{s})$, $K_2 = 1$, $J = J_1$, 可得一阻尼比 $\xi = 1$ 的 I 型二阶系统.

按图 2(b) 结构, 进行关节 1 的控制系统的数字仿真.

1) 静态. 取定不同的 m_2 和 θ_2 值进行.

其中一组仿真结果如图 3(a) 所示. 2', 3', 4' 是未加外模模糊控制时的响应, 2, 3, 4 是加了外模模糊控制时的响应. 2 几乎与模系统的曲线 1 重合. 3 和 4 几乎重合, 在初始段虽与模系统有差别, 但很快便趋近.

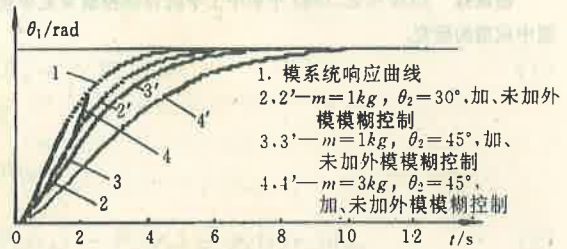


图 3(a) 静态仿真响应

2) 动态. 取 $m_2 = m_{20} \sin(\omega t + \Psi_0)$, $\theta_2 = \theta_{20} \sin(\omega t)$, 其中, $m_{20} = 6\text{kg}$, $\theta_{20} = 90^\circ$, $\omega = 50(\text{vrad}^{-1}\text{s})$, $\Psi_0 = \arcsin(1/3)$. 仿真结果如图 3(b). 2 与模系统响应 1 相差甚远, 但加外模模糊控制后, 虽初始段有大的偏离, 然而在达 95% 时很快靠近模系统. 可以看出, 若不加模糊控制器, 实际关节的动态响应曲线与模系统的动态曲线相差很大, 加上模糊控制器, 并应用外模结构后, 系统品质得到很大的改善. 虽在初始段与模系统有差别, 基本上保证了调节时间与模系统一致, 没有超调.

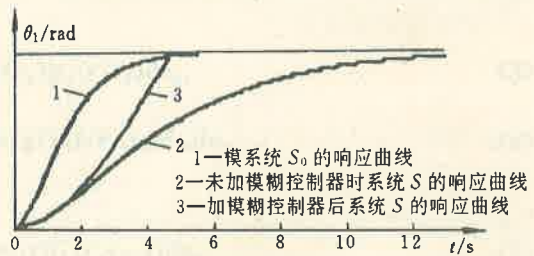


图 3(b) 动态仿真响应

参 考 文 献

[2] 庞富胜. 直接驱动机器人单关节控制系统的研究. 机器人, 1994, 6(1), 20—23

Fuzzy Control with External-Model for Joint of Direct Driving Robot

PANG Fusheng, CHENG Liangquan and ZHANG Jihong

(Department of Automatic Control Engineering, Huazhong University of Science and Technology • Wuhan, 430074, PRC)

Abstract: The control system with external-model developed in article [1],[2], is exploited to construct a fuzzy control system with external-model for joint of direct driving robot. The Fuzzy controller have two levels with three inputs and one output. The simulation of the dynamics and statics is investigated. It is true, the performance of the system is considerably improved.

Key words: Inertiacouple; external-model fuzzy control; dynamic response

本文作者简介

庞富胜 1939 年生. 1961 年毕业于华中工学院自动控制专业. 现为华中理工大学副教授, 湖北省暨武汉市自动化学会理事并控制理论及系统委员会主任委员. 著有《线性多变量系统》. 主要兴趣为线性系统. 模糊控制及智能控制.

程良铨 1938 年生. 1965 年华中工学院自动控制专业毕业, 现为华中理工大学副教授. 从事智能控制. 计算机在控制中应用的研究.

