

文章编号:1007-6492(2002)01-0052-03

# 机器人的一种鲁棒控制方法

白国长, 侯伯杰

(郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**通过对一个三自由度机械手分别采用 PID 和 PDFSV 控制, 介绍 PDFSV 方法在机器人位置控制中的运用. 改变被控对象各阶系数和加阶跃和正弦干扰仿真, 并对其进行理论分析. 结果表明: 该控制方法设计简单, 响应速度快, 且无超调, 其控制形式适合机器人的需要, 其良好的鲁棒性可以弥补机械手的非线性因素和关节间耦合作用. 只需位置、速度反馈信号就能完成对位置、速度和加速度的控制. 同时控制中计算量小也有利于其实际运用.

**关键词:** 机器人; 鲁棒控制; PDFSV 控制

**中图分类号:** TP 242.2

**文献标识码:** A

作为控制理论鼎盛时期诞生的机器人, 现代控制理论所提供的几乎所有方法都在其控制系统上作过尝试. 而事实上现代绝大部分工业机器所采用的仍为经典的 P, PD 或 PID 控制. 机器人的手臂由于存在很强的非线性和关节间的耦合作用, 在这些过分简单的控制规律下, 手臂的性能特性很有限. 若手臂运动需要高精度且无震荡和超调, 需设计更好的控制器.

在手臂前馈控制中, 把摩擦力、哥氏力、离心力和重力从设定的运动规律计算出来, 并反馈给控制系统来补偿线性模型所不包含的非线性项. 其实质上仍是一个开环系统, 并没有对由于系统参数设计值与实际值的偏离造成的响应性能的影响进行修正. 最优控制, 其控制系数是基于状态空间法, 按被控对象的参数来确定, 只有当实际参数和数学模型完全相等时才是最优的. 而系统参数变化是操作臂的固有特性, 前面所提的方法收效甚微. 至于自适应控制, 需要对未知参数进行准确的估计, 这在机械手控制中非常不易实现. 由于对不确定的外部干扰和无法由定常参数表示的未建模动态等影响参数估计, 误差往往不收敛于零, 甚至发散. 而变结构控制方法的缺陷是控制器频繁的切换动作造成跟踪误差在零点附近产生抖动现象, 而不能收敛于零. 而且, 这两种方法复杂的设计过程及计算机控制时繁重的计算量, 也是限制其运用的因素之一. 所以除非学术研究, 传统的

PID 控制家族几乎用在所有的商业机器人中.

本文推荐一种具有很强鲁棒性、适合于工业机器人操作手臂位置控制的线性反馈控制方法——伪微分反馈次变量控制, 简称 PDFSV 控制, 下面对其特性作简要介绍.

## 1 PDFSV 控制简介

这种控制方法是由 Cornell 大学 Phelan 教授基于实际控制系统于 1981 年提出来的. 后经西南交通大学陈留教授等人的发展, 成为具有一定的理论基础的一种线性控制方法, 它具有以下特点:

(1) 伪微分反馈. 控制器中有微分控制的作用, 而没有实际的微分控制, 避免了对噪声比较敏感的缺点. 前项通道采用积分控制, 在无任何完全可控性损失的情况下, 允许传感器或状态重构处理所提供的状态反馈至少比数学上所需要的低二阶, 这在实际运用中非常有利.

(2) 考虑了末级功率元件的实际输出能力. 末级功率元件的能量转换能力往往决定被控系统的响应性能. 一般的控制方法对它没有考虑, 造成理论和实际的脱节, 而这个参数正是 PDFSV 控制确定其控制系数的重要参数之一. 这个元件在机械手中为直流、交流电机或液压、气压系统.

(3) 固定的系统结构和次变量控制. PDFSV 控制, 可以分别以速度为次变量; 加速度为次变量; 速度和加速度为次变量三种形式. 图 1 为二阶

收稿日期: 2001-10-20; 修订日期: 2001-12-22

作者简介: 白国长(1968-), 男, 河南省襄城县人, 郑州大学讲师, 硕士, 主要从事机电一体化及自动控制方面的研

系统以速度为次变量的控制形式. 图中的“ $\mathbf{r}$ ”是末级控制元件, 和被控系统相比, 其动态性能可以忽略.  $\text{Lim}1, \text{Lim}2$  为限幅器, 一来可以防止积分饱和, 二来可根据实际情况对次变量的最大和最小值进行控制. 在机械手中, 被控对象为位置, 次变量分别为速度和加速度, 这对机械手运动的平稳性来说很重要.

(4) 可方便求出各控制参数. 控制器中各参

数由参考输入和末级元件的输出及控制的品质参数来确定, 详见文献 [1]. 实验及理论证明, 这种控制方法简单易行, 具有很强的鲁棒性.

对于机器人手臂来说, 本身一些参数和外界干扰都是时变的, 需要控制方法具有一定的鲁棒性. 下面介绍这种方法在机械手上的运用, 并对结果进行数字仿真、分析和研究, 并与 PID 控制作对比.

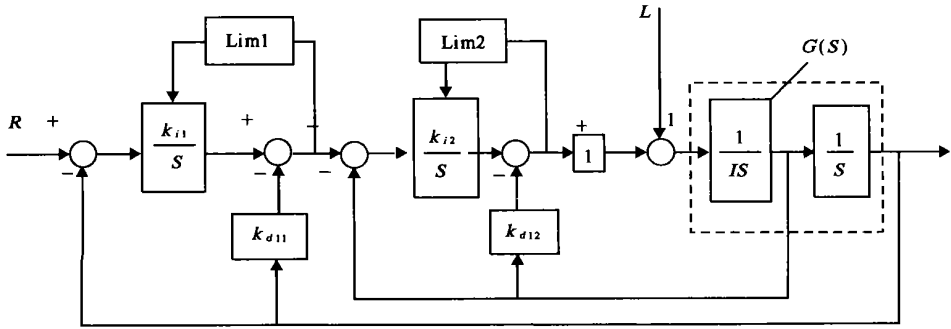


图 1 二阶系统PDFSV 控制方框图

Fig. 1 Block diagrams for PDFSV control of the basic second-order plant

2 仿真与分析

2.1 控制系统的建模

现有的工业机器人大多采用直流伺服电动机驱动的独立关节式结构. 为不失一般性, 参照实验室一具体的三自由度机械手实验装置, 如图 2 所示, 经计算, 上臂和前臂的力矩分别为

$$T_1 = \theta_1 (2.25 + 1.22 \cos \theta_2) + \theta_2 (0.59 + 0.61 \cos \theta_2) - \theta_1 \theta_2 (1.22 \sin \theta_2) - (\theta_2)^2 \cdot (0.61 \sin \theta_2) + 67.7 \cos \theta_1 + 23.5 \cos (\theta_1 + \theta_2);$$
$$T_2 = \theta_1 (0.59 + 0.61 \cos \theta_2) + 0.59 \theta_2 + 0.61 \sin \theta_2 (\theta_1)^2 + 23.5 \cos (\theta_1 + \theta_2).$$

式中含有连杆自身有效的惯性力矩、耦合的惯性力矩、哥氏力、离心力矩及重力矩作用. 建立数学模型时, 暂不考虑机器人的非线性和关节间的耦合作用, 把耦合力矩、平均摩擦力矩、外加负载力矩、重力矩、离心作用力矩及哥氏力作为干扰负载来对待. 可以把它简化为折合到电机输出轴上线性的惯性负载来处理, 即  $T_m = J \ddot{\theta}_m + B \dot{\theta}_m$ . 式中:  $J$  为传动轴上的等效转动惯量;  $B$  传动轴上的等效阻尼系数, 当成常数来处理. 其开环传递函数有  $G(S) = K/(aS^2 + bS)$  的形式, 由于把 MIMO 系统当成多个独立的 SISO 系统, 忽略了系统的非线性因素和机械结构的刚度和变形, 把时变的  $J$  和  $B$

当成常数等假设, 一般的定参数线性控制效果不理想的原因就在于此. 对此实验装置, 经计算, 将  $a = 1.67, b = 1.8$  作为被控对象, 分别用 PID 和 PDFSV 控制进行仿真研究.

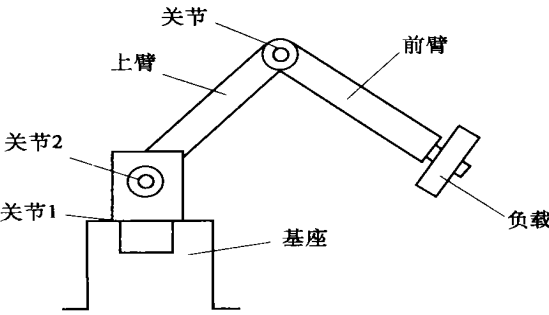


图 2 仿真所用机械手简图

Fig. 2 A schematic of manipulator for simulation

2.2 控制系数的确定

对 PID 控制, 其形式如图 3 所示. 取阶跃输入  $R = 5$ , 经多次仿真实验, 以响应时间最短确定其控制系数  $K_p = 70, K_i = 0.2, K_d = 12$ , 其响应曲线形状如图 4 中曲线 1 所示. 对 PDFSV 控制, 在相同的条件下, 取  $F = 20, B = 1\%, M = 50$  为电机伺服放大器的最大输出电压, 由文献 [1] 推荐的公式求得,  $K_{i1} = 8.77, K_{i2} = 1271.67, K_{d11} = 4.81, K_{d12} = 128.3$ , 响应曲线如图 5 中曲线 1 所示. 由图可知: PDFSV 控制各系数易确定, 且响应速度快, 无超调.

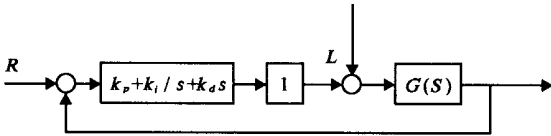


图 3 PID 控制方框图

Fig. 3 Block diagram of PID control

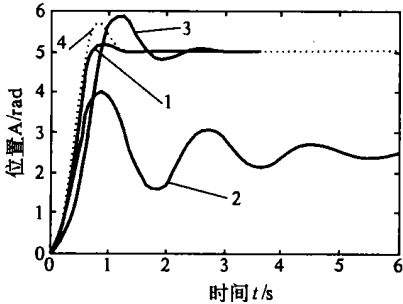


图 4 PID 控制阶跃响应曲线

Fig. 4 Response curves of PID control

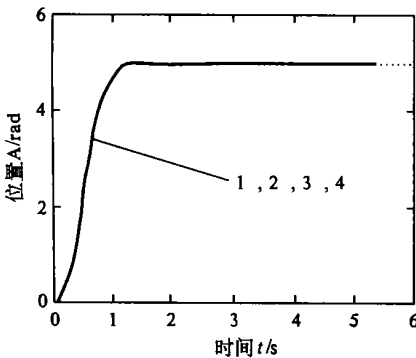


图 5 PDFSV 控制响应曲线

Fig. 5 Response curves of PDFSV control

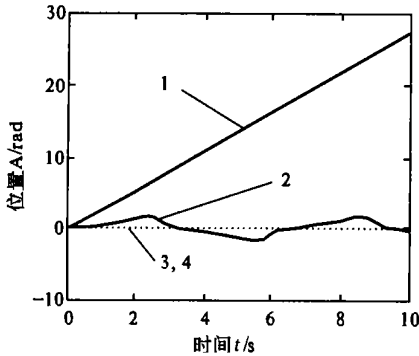


图 6 阶跃和正弦作用下的响应曲线

Fig. 6 Response curves to step load and sinusoidal load

### 2.3 改变机械手自身参数对响应性能的影响

机械手传递函数各系数均为时变的, 由于建模不准确, 要求控制方法对被控系统参数不敏感. 在两上述控制系统中, 分别在被控传递函数加常数项  $f=20$ , 改变一次项系数  $b=0.2$ , 二次项系数  $a=3.3$ , 保持各控制系数不变, PID 控制的响应曲线分别如图 4 中曲线 2, 3, 4 所示. 由图 4 可以看出, 加入常数项后, 对应于重力和外载荷, 响应存在静差且震荡, 表示机械手不能抵抗外力作用, 工业运用中往往采用前馈控制把它补偿掉. 改变

一次项和二次项系数后, 响应时间增加. 而 PDFSV 控制, 在相同的条件下, 其响应曲线如图 5 所示, 4 条曲线重合, 可见 PDFSV 控制对被控对象参数的不敏感性. 所以定控制系数的 PDFSV 控制运用于机械手中, 在一定程度上可以弥补由于建模和系统自身参数变化所带来的影响.

### 2.4 抗干扰分析

建立系统数学模型时, 手臂运动时的重力矩、哥氏力矩、离心力矩、摩擦力矩、外加负载力矩及连杆间耦合作用等未考虑进去, 把这些量作为干扰来对待, 所以要求控制器有很强的抗干扰能力. 在 PID 和 PDFSV 原控制模型上, 把输入设定为零, 分别加阶跃干扰信号  $L=55$  和正弦干扰信号  $L=55\sin(t)$ , 其响应曲线如图 6 所示, 曲线 1 和 2 为 PID 控制在阶跃和正弦干扰作用下的响应, 不稳定且偏离了零位置. 所以工业运用中若采用这种控制方法, 须进行解耦, 并将离心力和哥氏力前馈输入控制器. 由于机器人运动时, 位置和姿态发生变化, 使得计算繁重且复杂. 曲线 3 和 4 为 PDFSV 控制在干扰型号约增加一倍即阶跃干扰信号  $L=100$ , 正弦干扰信号  $L=100\sin(t)$  干扰作用下的响应曲线, 和无干扰时重合, 显而易见, PDFSV 抗干扰性远优于 PID. 而正弦信号可以分解为以时间为函数的各阶信号的叠加, 可见 PDFSV 对各种干扰的抵抗能力. 对于实验台假定  $\theta_1 = \theta_2$ ,  $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2$ , 三角函数都取极大值, 并取拉氏变换, 得出建模时耦合力矩、离心力矩、哥氏力矩、摩擦力矩、载荷和重力矩折合到电机输出轴上的传递函数. 在此干扰作用下, 响应曲线和原无干扰时重合, 所以采用这种控制策略无须解耦就能满足要求.

### 3 结束语

机器人手臂位置控制运用 PDFSV 控制方法, 其良好的鲁棒性是传统的 PID 控制方法所不能比拟的, 可以弥补线性传递函数所不包含的重力、哥氏力、离心力、摩擦力、连杆关节间的耦合等与时间有关的非线性干扰信号. 它设计非常简单, 各系数经计算得到, 一般无须现场调试, 甚至比设计一个 PID 控制器还容易. 只需要位置和速度反馈信号, 能完成对位置、速度、和加速度的控制, 而位置和速度控制正是机械手所必需的. 相对于功能相似的自适应控制, 它各系数固定, 且事先确定, 减少设计时间及控制计算机计算时间, 具有广阔的应用前景. (下转第 58 页)

是一个慢过程,其调节条件和过程都具有模糊性,需要体现出一定的智能性.因此黄原胶发酵过程采用模糊控制、智能PID与仿人智能控制思想是恰当的.系统投入运行后,综合效果令人满意.

参考文献:

[1] 周少奇.反应器生态系统的模型化[J].无锡轻工业大学学报,2000,19(5):461~463.

[2] 杨雄,柳琳,赵九军,等.发酵自动控制技术[J].计算机应用研究 2001,(2):56~58.  
[3] 王畅.模糊控制算法在计算机对发酵过程罐温控制中的应用[J].长沙电力学院学报(自然科学版),1999,14(4):321~324.  
[4] 冯冬青,谢宋和.模糊智能控制[M].北京:化学工业出版社,1998.  
[5] 李士勇.模糊控制·神经控制和智能控制论[M].北京:哈尔滨工业大学出版社,1996.

Intelligent Control of the Xanthan Gum Fermentation Process

SHANG Hai -tao , CHEN Tie -jun

(College of Electrical Engineering , Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002, China)

**Abstract :** Based on the analysis of a control system of a fermentation process ,the temperature and the pH value of the process are discussed . The key problems to be solved are the nonlinearity and the time -variability of the system . In the paper ,fuzzy control method ,combined with a logic judgment -making unity with intelligent PID ,is used to control the temperature ,and through analyzing the error curve ,with the method of anthropomorphic intelligence ,to control the pH value . Simulations and the running result of the intelligence control are satisfactory

**Key words :** xanthan gumfermentation process ;fuzzy control ;intelligent PID ;anthropomorphic intelligence

(上接第 54 页)

参考文献:

[1] CHEN L .Robust behavior of subvariable control of pseudo derivative feedback algorithm[J] . ASME Paper , 1989, A / DSC -16;90.

[2] 侯远龙.二自由度大功率机械手臂计算机控制系统[J].机床与液压,2001,(3):85-86  
[3] 申铁龙.机器人鲁棒控制基础[M].北京:清华大学出版社,2001.  
[4] 蔡自兴.机器人学[M].北京:清华大学出版社,2000.

A Robust Control Algorithm for Robot

BAI Guo -chang , HOU Bo -jie

(College of Mechanical Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

**Abstract :** In this paper ,by means of theory analysis and simulation ,a control scheme called subvariable control of Pseudo -Derivative -Feedback is introduced to the manipulator control . PID and PDFSV control methods are applied to a three dimensional mechanical manipulator and the response curves analysis by means of differing parameter of controlled plant and under step load and sinusoidal for mload indicates this control method is simple in design with high speed response and no overshoot .Its control style is particularly suitable to the robot control .Its excellent robust behavior is particularly satisfactory to the performance requirements of robots in industry ,where nonlinear elements and joint -coupling exist .It is convenient for industrial use since it is free of tedious calculations position and velocity feedback ,we can achieve the full control over position ,velocity and acceleration .and meanwhile it has not big computational burden is benefit to practical use .

**Key words :** robot ;robust control ;PDFSV control