

文章编号: 1001-0920(2006)06-0651-05

基于位置内环的柔顺力控制的研究

叶正茂¹, 赵慧², 张尚盈¹, 韩俊伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081)

摘要: 为模拟空间对接强制校正阶段的推出和拉近过程, 提出基于六自由度并联机器人位置内环的柔顺力控制策略。综合考虑参数变化、模型变动和外来干扰等不确定性, 利用 μ 综合控制理论设计鲁棒力控制器, 并通过 μ 分析比较鲁棒力控制器和经典力控制器的鲁棒稳定性和鲁棒性能。鲁棒力控制器和经典力控制器的实验结果, 表明了所设计鲁棒力控制器的有效性和优越性。

关键词: 六自由度并联机器人; μ 综合; μ 分析; 柔顺力控制

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A

On Compliant Force Control Based on Inner Position Loop

YE Zhengmao¹, ZHAO Hui², ZHANG Shangying¹, HAN Junwei¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China. Correspondent: YE Zhengmao, E-mail: yezhm@hit.edu.cn)

Abstract: Compliant force control strategy is presented based on the inner loop position control of 6-dof parallel robot in order to simulate pushing and pulling procedure of forcible alignment of space docking. Considering uncertainties such as parameter perturbation, model perturbation and external disturb etc., robust force controller is designed using μ synthesis theory. Robust stability and robust performance are compared between robust force controller and classical force controllers by μ analysis. Experiment results of robust force controller and classical force controllers show that the designed robust force controller is of efficiency and superiority.

Key words: 6-dof parallel robot; μ synthesis; μ analysis; Compliant force control

1 引言

空间对接是载人空间站在轨长期运行不可缺少的操作活动, 美国和前苏联从上世纪60年代初就开始研究对接技术^[1]。为保证空间对接的成功实现, 进行半物理地面模拟试验是不可缺少的过程。Stewart提出了六自由度Stewart platform模型, 因其结构简单、高刚度、高精度和高重载能力等优点, 六自由度运动平台(亦称六自由度并联机器人)已成为对飞机、舰船、宇航和车载设备进行动态可靠性研究的重要模拟试验装置^[2]。俄罗斯能源科研生产联合体将六自由度运动平台应用于联合式综合动力学试验台, 研究空间对接动力学。然而, 空间对接动力学基

频与六自由度运动平台频宽之间的制约关系, 使形成对接框的刚性连接有很大困难^[1], 特别是在强制校正的拉紧阶段, 闭环回路会产生振荡, 甚至不稳定。

在六自由度运动平台的常规应用及研究中, 要求它能跟踪自由空间中的期望轨迹, 没有或不考虑六自由度运动平台与环境之间的接触动态。当六自由度运动平台与环境接触, 即其运动在空间受到约束时, 需要在控制六自由度运动平台位置的同时, 考虑六自由度运动平台与约束环境之间交互作用力的控制。与Stewart platform成对偶结构的串联机器人, 已在装配、轮廓跟踪、研磨、抓取、擦洗等场合, 即

收稿日期: 2005-04-28; 修回日期: 2005-11-07

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET)。

作者简介: 叶正茂(1973—), 男, 内蒙古包头人, 讲师, 博士, 从事液压伺服系统等研究; 赵慧(1973—), 女, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 从事多刚体系统动力学、电液伺服系统等研究。

操纵器的运动有约束的情况下, 获得了许多研究成果和实际应用。经典主动力控制^[3]有阻抗控制和力/位混合控制两类, 阻抗控制是由Neville 首先提出的, Mason 等对力/位混合控制作了具有代表性的研究。经典力控制较少考虑参数变化、模型变动和外来干扰等不确定性, 因而力控制器的鲁棒性较差。Doyle 提出了 μ 的概念, 将任何分散的不确定性集中为一对角阵, 并给出了这类不确定性系统鲁棒稳定的充分必要条件。用 μ 综合控制理论设计控制器已有不少成功的工程实例^[4]。

为克服对接框的刚性连接给空间对接动力学模拟造成的困难, 本文采用力环包容位置环的串级控制结构, 研究六自由度运动平台在推拉作用下作顺应运动的柔顺力控制策略, 用于模拟空间对接过程的强制校正阶段, 即强制推出和拉近阶段。

2 柔顺力控制系统描述

模拟飞行器对接的拉近和推出过程的试验台原理如图1所示, 其中对接锥(6)与对接杆(7)合称为对接模拟装置。其工作原理为: 伺服电机(3)带动电动缸(4)作匀速伸缩运动, 电动缸(4)依次与弹簧件(5)和对接锥(6)连接, 对接锥(6)和对接杆(7)由锁紧装置锁紧, 对接杆(7)固联在六自由度并联机器人(液压驱动)平台(8)上。根据力传感器(1)的测量值, 经力控制器的解算, 给出六自由度运动平台的位置输入量。要求在电动缸(4)的推拉下, 六自由度运动平台作柔顺运动, 并要求力传感器的出力尽量小, 即要求作用在对接模拟装置上的附加力越小越好。

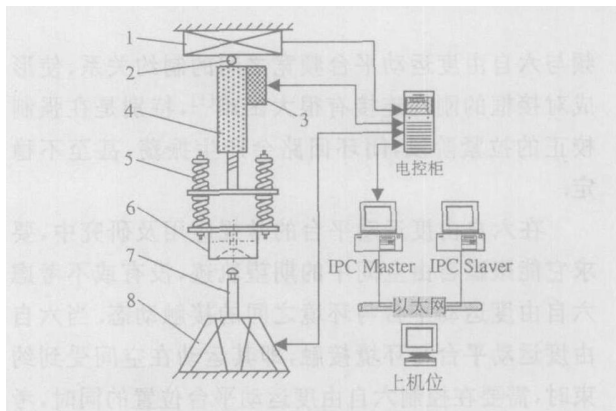


图1 柔顺力控制系统结构示意图

系统采用分布式实时控制结构^[5], 软件为Opal-RT 公司生产的RT-LAB。上位机负责系统管理, 并对数据进行监控; 下位机之一(IPC Master)运行实时控制程序, 并负责时钟同步、数据采集(A/D)和信号输出(D/A); 下位机之二(IPC Slaver)实时解算六自由度运动平台的正解^[6], 用于监测平台当前姿态。

3 鲁棒力控制器设计及分析

在柔顺力控制过程中, 由于弹簧的非线性和电动缸的伸缩, 广义刚度 k 会在一定范围内变动。作顺从运动的六自由度运动平台, 负载特性随升沉运动而变化^[7], 其垂直向的传递函数也会有所变动, 即存在模型不确定性。六自由度运动平台位置环还会受到外来干扰, 传感器噪声和过程噪声也会对力控制回路产生影响。综合考虑参数变化、模型变动和外来干扰等不确定性, 要求力控制系统具有鲁棒稳定性, 并要求力响应值尽可能小。这正符合用 μ 综合控制理论设计鲁棒力控制器的框架^[4]。

考虑不确定性和性能要求的柔顺力控制系统框图如图2所示, 其中表示系统环节、不确定性和性能要求的符号含义将在下节给出。

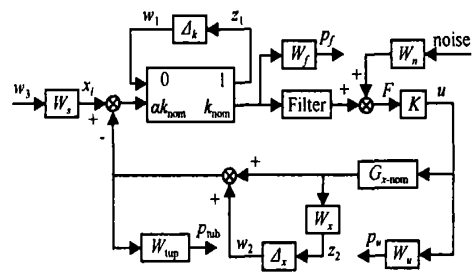


图2 考虑不确定性的柔顺力控制系统框图

3.1 加权函数的选取

空间对接推出和拉近过程要求匀速拉伸, 速度不超过1 mm/s。设定伺服电机的控制方式为速度控制, 每1 V 电压对应496 r/min, 经星型齿轮减速器(减速比为25)和丝杠螺母(导程为5 mm)传动, 电动缸的牵引速度为1.653 3 mm/s/V。输入信号加权函数取

$$W_s(s) = \frac{1}{s + 10^{-3}} \times 0.00166 \quad (1)$$

在柔顺力控制过程中, 广义刚度 k 在一定范围内变动, 经过实际测量, $k \in [78\ 200, 95\ 200]$ N/s。把 k 看作具有不确定性的参数, 用线性分式变换式^[4, 8]表示为

$$k = F_U \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha k_{nom} & k_{nom} \end{bmatrix}, \Delta_k \right) \quad (2)$$

其中

$$k_{nom} = 86\ 703 \text{ N/m}, \alpha = 10\%, \Delta_k \in [-1, 1]$$

六自由度运动平台升沉运动时, 六套液压伺服系统的动作是一致的, 所以位置闭环传递函数具有液压伺服系统的典型三阶系统形式^[7], 可由实验辨识确定。其中惯性环节表征了位置闭环的频宽, 二阶环节表征了位置闭环的高频动态特性。位置环名义传递函数取

$$G_{x\text{-nom}}(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{40} + 1\right)\left(\frac{s^2}{200^2} + \frac{2 \times 0.15}{200}s + 1\right)} \quad (3)$$

位置环为闭环子系统, 随着平台的升沉运动, 其负载特性会发生变动^[7], 位置环的频率特性也会有所变化, 可用乘法摄动对模型不确定性建模^[4]. 通过仿真, 低频区的变化取 0.5%, 在名义频宽 40 rad/s 处达到 8%, 高频区变化至 12.5%. 乘法摄动加权函数取

$$W_x(s) = \frac{s+2}{s+50} \times 0.125 \quad (4)$$

则六自由度运动平台垂直向传递函数集合为

$$G_x(s) = \{G_{x\text{-nom}}(I + W_x \Delta_x) \mid \Delta_x \text{ 稳定}, \Delta_x \in 1\}$$

干扰的频率特性基本上是在低频增益大, 所以使用低通传递函数作为干扰加权函数. 当干扰在相当长时间内为大致相同的数值时, 可看作阶跃信号处理, 其模型可用积分器来描述^[9]. 干扰信号的加权函数增益的大小可通过重复仿真确定. 干扰信号的加权函数增益越大, 说明干扰衰减性能越好. 干扰加权函数取

$$W_{\text{ub}}(s) = \frac{s+20}{s+10^{-3}} \times 5 \times 10^{-5} \quad (5)$$

控制输入加权函数的功能在于去除控制输入中的高频成分, 所以使用高通传递函数^[9]作为控制输入加权函数. 在控制频带内让增益接近于零, 超过控制频带后使用高增益. 控制输入加权函数取

$$W_u(s) = \frac{s+10}{s+800} \times 5, \quad (6)$$

力性能指标加权函数取

$$W_f(s) = \frac{0.5}{s+0.5} \quad (7)$$

力加权函数表明, 当低频区要求力的稳态值为 1 N 或更小时, 随着频率的增大, 对力的要求则越宽松.

测量力进入控制器之前先进行滤波, 以减小过程噪声的影响. 考虑到机械系统的频响, 选择截止频率为 30 Hz 的低通滤波器. 滤波器传递函数为

$$\text{Filter}(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{(2\pi \times 30)^2} + \frac{2 \times 0.7}{2\pi \times 30}s + 1} \quad (8)$$

力传感器的测量值含有噪声, 低频区噪声幅值为 0.5 N, 高频区噪声可达到 20 N. 噪声加权函数取

$$W_n(s) = \frac{s+20}{s+800} \times 20 \quad (9)$$

3.2 设计问题规范化

由图 2 可得系统的开环互连结构 Plant, 该

Plant 是 11 状态、5 输入 6 输出的系统. 定义块对角化结构 Δ_{kx} 和 Δ 分别为

$$\Delta_{kx} := \left\{ \begin{bmatrix} \Delta_k & & \\ & \Delta_x & \\ & & \Delta_c \end{bmatrix} \mid \Delta_k \in R, \Delta_x \in C^{2 \times 3} \right\},$$

$$\Delta := \left\{ \begin{bmatrix} \Delta_{kx} & \\ & \Delta_f \end{bmatrix} \mid \Delta_f \in C^{2 \times 3} \right\}.$$

其中: Δ_k 表示参数摄动, Δ_x 表示乘法摄动, Δ_f 表示虚结构的性能指标摄动. 这种对角型结构的摄动称为结构型摄动^[4].

用 K 表示待设计的控制器, 则图 2 所示结构可归结为图 3 所示的规范化鲁棒控制问题.

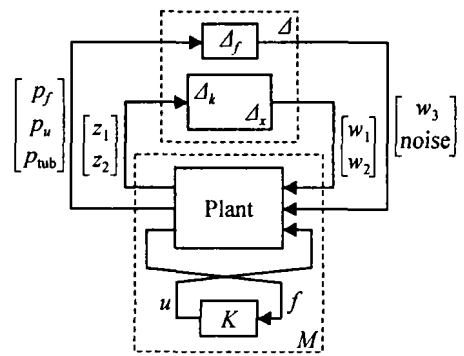


图 3 规范化鲁棒控制问题

3.3 鲁棒力控制器设计

图 3 中传递函数 M 为开环互连结构 Plant 与控制器 K 的星积^[8], 用线性分式变换式表示为

$$M(s) = F_L(\text{Plant}, K) \quad (10)$$

传递函数矩阵 M 的结构化奇异值 μ 定义^[9] 为

$$\mu_{\Delta}(M) := \frac{1}{\min\{\sigma_{\max}(\Delta) \mid \det(I - M\Delta) = 0\}} \quad (11)$$

定理 1 (鲁棒性能与稳定性定理)^[9] 对于稳定的并满足 $\Delta_{kx} \in 1$ 的所有 Δ_{kx} , 图 2 所示闭环系统 $\Delta_{kx} \sim M$ 是稳定的, 且满足 $F_U(M, \Delta_{kx}) \in 1$ 的充分必要条件

$$\sup_{\omega \in \mathbb{R}} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) < 1.$$

则力控制器设计问题可看作是 μ 综合问题, 即寻求稳定控制器 K , 使得闭环传递函数 $M(j\omega)$ 的结构化奇异值 $\mu_{\Delta}(M)$ 的峰值最小. 用公式表达为

$$\min_{K \text{ 稳定}} \left[\max_{\omega} \mu_{\Delta}(M(j\omega)) \right]$$

可用 D-K 迭代法求解上式的优化问题^[4,9]. 采用 Matlab 工具箱 μ -analysis and Synthesis Toolbox^[4] 中的 dkit 程序, 经 3 次迭代, μ 值达到 0.8869, 解算得 26 阶力控制器. 用平衡截断法^[4] 对控制器进行降阶, 所得 9 阶力控制器如下:

$$K = \begin{bmatrix} -8.3e-5 & -9.2e-5 & 1.8e-4 & 1.3e-4 & 6.6e-4 & -6.2e-6 & -3.3e-4 & -2.6e-4 & 1.4e-4 & -6.6e-2 \\ -9.2e-5 & -1.3e-3 & 5.4e-3 & 3.7e-3 & 1.9e-2 & -1.8e-4 & -9.5e-3 & -7.3e-3 & 4.1e-3 & -3.7e-2 \\ -1.8e-4 & -5.4e-3 & -4.8e-1 & -6.5e-1 & -3.5 & 3.2e-2 & 1.7 & 1.3 & -7.4e-1 & -7.3e-2 \\ -1.3e-4 & -3.7e-3 & -6.5e-1 & -8.5 & -6.6e+2 & 1.1 & 5.8e+1 & 3.1e+1 & -1.9e+1 & -5.1e-2 \\ 6.6e-4 & -3.7e-3 & -6.5e-1 & -8.5 & -6.6e+2 & 1.1 & 5.8e+1 & 3.1e+1 & -1.9e+1 & -5.1e-2 \\ 6.6e-4 & 1.9e-2 & 3.5 & 6.6e+2 & -2.6e+2 & 3.6 & 2.0e+2 & 2.2e+2 & -1.1e+2 & 2.6e-1 \\ -6.2e-6 & -1.8e-4 & -3.2e-2 & -1.1 & 3.6 & -6.9e-2 & -3.9 & -8.1 & 3.3 & -2.5e-3 \\ -3.3e-4 & -9.5e-3 & -1.7 & -5.8e+1 & 2.0e+2 & -3.9 & -2.3e+2 & -5.3e+2 & 2.1e+2 & -1.3e-1 \\ 2.6e-4 & 7.3e-3 & 1.3 & 3.1e+1 & -2.2e+2 & 8.1 & 5.3e+2 & -3.9e+2 & 3.8e+2 & 1.0e-1 \\ -1.4e-4 & -4.1e-3 & -7.4e-1 & -1.9e+1 & 1.1e+2 & -3.3 & -2.1e+2 & 3.8e+2 & -8.7e+2 & -5.7e-2 \\ -6.6e-2 & -3.7e-2 & 7.3e-2 & 5.1e-2 & 2.6e-1 & -2.5e-3 & -1.3e-1 & -1.0e-1 & 5.7e-2 & 0.0 \end{bmatrix}$$

3.4 力控制系统的位置内环

如图 2 所示, 经力控制器的解算, 给出六自由度并联机器人的位置输入量。六自由度并联机器人靠六路并行的液压伺服系统驱动, 位置输入量需经位置反解求出液压缸的伸缩值^[6]。位置控制系统采用 PD 控制, 位置环应用动压反馈以提高系统的阻尼比, 改善伺服阀非线性的影响。动压反馈环节的形式为

$$G_p(s) = K_p \frac{T_p s}{T_p s + 1} \quad (12)$$

其中: K_p 为压力反馈系数, T_p 为动压反馈时间常数

位置环采用前馈补偿以减小系统的跟踪误差, 提高动态跟踪精度, 拓宽液压伺服系统的频宽。前馈补偿环节的形式为

$$G_f(s) = K_f \frac{T_f s}{T_f s + 1} \quad (13)$$

其中: K_f 为前馈补偿系数, T_f 为前馈补偿时间常数

3.5 力控制器鲁棒性分析

记传递函数矩阵 M 中以 $[w_1, w_2]$ 为输入, 以 $[z_1, z_2]$ 为输出的子传递函数矩阵为 M_{11} 。用 $\mu_{\Delta_{kx}}(M_{11}(j\omega))$ 来评价 $\Delta_{kx} \sim M_{11}$ 闭环系统的鲁棒稳定性^[4]。经过计算, 鲁棒控制器回路的 $\mu_{\Delta_{kx}}$ 值在 $\omega = 43.967 \text{ rad/s}$ 达到峰值 0.1557。因此, 当 $\max_{\omega} \overline{\sigma}(\Delta_{kx}) < 1/0.1557$ 时, 稳定性可得到保证。

用 $\mu_{\Delta}(M(j\omega))$ 来评价 $\Delta \sim M$ 闭环系统的鲁棒性能^[4]。经过计算, 鲁棒控制器回路的 μ_{Δ} 值在 $\omega = 0.001 \text{ rad/s}$ 达到峰值 0.8869。因此, 当 $\max_{\omega} \overline{\sigma}(\Delta) < 1/0.8869$ 时, 稳定性和鲁棒性能可得到保证。

4 实验结果

经典力控制器 $K(s)$ 一般由三部分串联组成: 柔顺系数 C_f , 校正环节 $G_c(s)$ 和积分器, 即

$$K(s) = C_f G_c(s) \frac{1}{s} \quad (14)$$

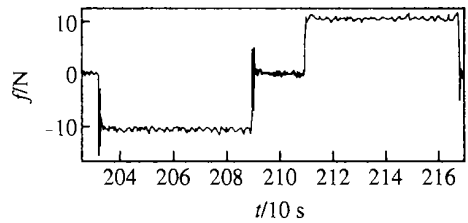
柔顺系数 C_f 一般取为广义刚度的倒数, 即 $C_f = k^{-1}$; 加入积分器是为将力控制回路改造为 I 型系

统; 校正环节取

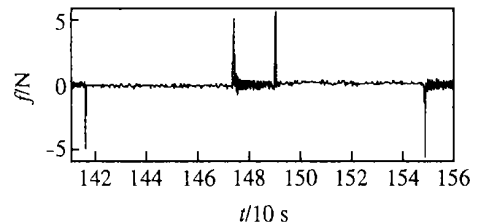
$$G_c(s) = P \frac{s + \beta\omega}{s + \omega} \quad (15)$$

实验中, 经典控制器参数的取值(单位采用国际标准)为: $C_f = k^{-1} = 1/867.03$, $P = 15$, $\omega = 0.05$ 。当 $\beta = 1$ 时为比例控制器, 当 $\beta = 100$ 时为滞后校正控制器。

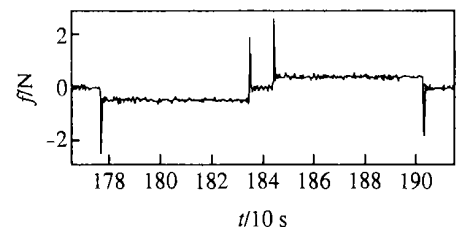
以 1.6533 mm/s 的速度进行推拉实验, 由比例控制器、滞后校正器和鲁棒控制器所得力曲线实验结果如图 4 所示。其中 4 个力尖峰分别对应拉启动、拉停止、推启动和推停止。



(a) 比例控制器



(b) 校正控制器



(c) 鲁棒控制器

图 4 柔顺力控制实验结果

由比例控制器所得力稳态值大约为 10 N。由校正控制器所得力稳态值几乎为零, 但在启停处, 力峰值最大, 说明其抗干扰性是三者中最差的。由鲁棒控制器所得力稳态值小于 1 N, 达到设计要求的性能。

指标,在启停处,力峰值是三者中最小的,说明其抗干扰性最好。即用鲁棒控制器时,作用在对接模拟装置上的附加力最小,说明鲁棒控制器较其他两种控制器的鲁棒性更好。

5 结 论

为模拟空间对接强制校正阶段的推出和拉近过程,本文提出了基于六自由度并联机器人位置内环的柔顺力控制策略。针对参数变化、模型变动和外来干扰等不确定性,用 μ 综合控制理论设计鲁棒力控制器。 μ 分析结论和实验结果表明,所设计的鲁棒力控制器较经典力控制器具有鲁棒稳定性和鲁棒性能好等优越性。所描述的鲁棒力控制器的设计方法,对于工业机器人的类似应用具有一定的借鉴意义。

参考文献(References)

- [1] 娄汉文, 曲广吉, 刘济生. 空间对接机构[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992: 187-191.
(Lou H W, Qu G J, Liu J S. *Space Docking Machine* [M]. Beijing: Aeronautics Industry Press, 1992: 187-191.)
- [2] Dasgupta B, M rthyunjaya T S. The Stewart Platform Manipulator: A Review [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2000, 35(1): 15-40
- [3] 殷跃红, 慰忠信, 黄晓曦. 智能机器系统力觉及力控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 95-97.
(Yin Y H, Wei Z X, Huang X X. *Force Sensing and Force Control Technology for Intelligent System* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001: 95-97.)
- [4] Balas G J, Doyle J C, Glover K, et al. μ -analysis and Synthesis Toolbox User's Guide [M]. Minneapolis: M U SYN Inc and MathWorks Inc, 2001: 346-452
- [5] Zhang S Y, Han J W, Zhao H. RCP and RT Control of 6-DOF Parallel Robot [A]. *Proc of the Fourth Int Workshop on Robot Motion and Control* [C]. Poznan, 2004: 133-137.
- [6] 张尚盈, 赵慧, 韩俊伟. 六自由度运动平台实时控制的正/反解算法[J]. *机床和液压*, 2002, 183(3): 133-135.
(Zhang S Y, Zhao H, Han J W. Forward and Inverse Solution Algorithms for Real-time Control of 6-DOF Platform [J]. *Machine Tool and Hydraulics*, 2002, 183(3): 133-135.)
- [7] 王洪瑞. 液压6-DOF 并联机器人操作手运动和力控制的研究[M]. 保定: 河北大学出版社, 2001.
(Wang H R. *Motion and Force Control Study of Hydraulic Driven 6-DOF Parallel Robots' Manipulator* [M]. Baoding: Press of Hebei University, 2001.)
- [8] 周克敏, Doyle J C, Glover K. 鲁棒与最优控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 157-161.
(Zhou K M, Doyle J C, Glover K. *Robust and Optimal Control* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2002: 157-161.)
- [9] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 105-115.
(Mei S W, Shen T L, Liu K Z. *Modern Robust Control Theory and Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 105-115.)
- [7] A lthoff K D, Bergmann R, Wess S, et al. Case-based Reasoning for Medical Decision Support Tasks: The Inreca Approach [J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 1998, 12(2): 25-41.
- [8] Slonima T Y, Schneider M. Design Issues in Fuzzy Case-based Reasoning [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 117(2): 251-267.
- [9] Finnie G, Sun Z H. R^5 Model for Case-based Reasoning [J]. *Knowledge-based Systems*, 2003, 16(1): 59-65
- [10] 谭明浩, 柴天佑. 基于案例推理的层流冷却过程建模[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(2): 248-253.
(Tan M H, Chai T Y. Modeling of the Laminar Colling Process with Case-based Reasoning [J]. *Control Theory and Applications*, 2005, 22(2): 248-253.)
- [11] Grupe F H, Urxiler R, Ramarapu N K, et al. The Application of Case-based Reasoning to the Software Development Process [J]. *Information & Software Technology*, 1998, 40(9): 493-499
- [12] 张晓东, 王伟, 王小刚. 选矿过程神经网络粒度软测量方法的研究[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(1): 85-88.
(Zhang X D, Wang W, Wang X G. Research of the Particle Size Neural Network Soft Sensor for Concentration Process [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(1): 85-88.)
- [13] Plitt L R. A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier [J]. *CIM Bull*, 1976, 69(776): 114-123
- [14] 柴天佑, 杨辉, 张肃宇, 等. 稀土萃取分离过程综合自动化系统[J]. *控制工程*, 2005, 12(1): 1-7.
(Chai T Y, Yang H, Zhang S Y, et al. Integrated Automation System for Rare Earths Countercurrent Extraction Process [J]. *Control Engineering of China*, 2005, 12(1): 1-7.)

(上接第650页)