

文章编号: 1001-0920(2007)07-0791-04

高精度轨迹跟踪的 6-PRRS 并联机器人自抗扰控制研究

赵杰, 杨永刚, 刘玉斌

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 针对 6-PRRS 并联机器人控制系统的非线性、耦合等特性, 采用分散控制策略, 在关节空间设计强鲁棒性的自抗扰控制器对其进行控制. 该自抗扰控制器由非线性跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性 PD 和扰动补偿 4 部分组成. 具有模型补偿功能的扩张状态观测器可以获得系统的状态估计和未知外扰的实时作用量, 使系统性能得到有效补偿. 该控制器以离散的形式进行设计, 易于工程实现. 仿真结果证明了所提出的控制策略具有强鲁棒性, 跟踪性能良好.

关键词: 并联机器人; 自抗扰控制器; 非线性 PD; 轨迹跟踪控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

6-PRRS parallel robot of auto-disturbance rejection controller on high-precision trajectory tracking

ZHAO Jie, YANG Yong-gang, LIU Yu-bin

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China. Correspondent: YANG Yong-gang, E-mail: yg_yang@hit.edu.cn)

Abstract: A distributed control strategy is used and a high robust auto-disturbance-rejection-controller (ADRC) is designed in joint space of robot to implement the high-precision trajectory tracking of 6-PRRS parallel robot. The ADRC is composed of nonlinear tracking differentiator (NTD) for feedforward control, an extended state observer (ESO), a nonlinear proportional-derivative controller (NPD) in the feedback path and disturbance compensation. The ESO compensated by model provides the estimate of the unmeasured system's state and the real time action of the unknown disturbances, then improves the performance of the system. This ADRC is designed in distribute form and easily applied to engineering. The experimental results show the strong robustness and high tracking performance of this control strategy.

Key words: Parallel robot; Auto-disturbance-rejection-controller; Nonlinear PD; Trajectory tracking control

1 引言

相对于传统的串联机构, 并联机构具有刚度重量比大、负载与机构质量比大、低惯性、高速度、高精度和位置反解求解容易等显著优点. 由于并联机器人的结构特点, 6 自由度并联机器人控制系统是一个非线性、强耦合、变参数的多变量系统. 在运动过程中, 机器人处于不同位姿或以不同的加速度运动时, 作用在各个分支上的负载将在一定的范围内作非线性变化. 此外, 由于并联结构是由多个连杆连接末端平台组成的, 各通道的输出相互影响、相互耦合. 对于高精度控制系统, 未建模的非线性摩擦对系统的性能会产生十分不利的影 响. 人们通常采用基于模型的方法实现非线性摩擦的补偿, 以达到较高

的系统控制性能. 甚至在一些自适应控制系统中, 需要一个精确的初始非线性摩擦模型来保证良好的控制品质和参数的快速收敛. 但在实际工程条件下, 获得并联机器人近似精确的非线性摩擦模型并不容易. 研究能解决非线性、变负载、交联耦合和摩擦干扰的控制策略是高精度 6 自由度并联机器人应用中的一个重要环节.

近年来, 国内学者对 6 自由度并联机器人进行控制所采用的策略主要有 PID 控制^[1,2]、神经网络控制^[3]、自适应鲁棒控制^[4]等, 取得了一定的成果. 而国外学者对 6 自由度并联机器人的研究较早, 成果也较多: Park 等^[5]采用带有干扰观测器的滑模控制器对 6 自由度并联机器人进行控制; Honegger

收稿日期: 2006-04-30; 修回日期: 2006-06-20.

作者简介: 赵杰(1968—), 男, 河北卢龙人, 教授, 博士生导师, 从事机器人多传感器集成控制技术、机器人遥操作的研究; 杨永刚(1978—), 男, 吉林四平人, 博士生, 从事并联机器人动力学及控制的研究.

等^[6]采用非线性自适应控制器进行控制;Choi等^[7]对H4并联机器人采用基于模型的动力学控制;Vivas等^[8]使用预测控制方法对H4并联机器人进行控制.本文采用分散控制策略对6-PRRS并联机器人的高精度轨迹跟踪进行控制,在关节空间设计了强鲁棒性的自抗扰控制器,保证了6-PRRS并联机器人高精度轨迹跟踪的实现.

2 6-PRRS 并联机器人的运动学逆解

2.1 6-PRRS 并联机器人的机械结构

6-PRRS 并联机器人结构如图1所示.由运动平台通过6根固定长度的杆件分别连接到沿3根导轨运动的滑块上;滑块通过丝杠传递,由伺服电机驱动;电机固定在丝杠的左侧,通过柔性联轴器与丝杠相联接;滑块与杆件之间采用虎克铰连接方式;杆件通过一旋转副加虎克铰方式与动平台相连接.为增大工作空间,减少运动干涉,所设计的中间丝杠在位置上略低于两边丝杠.动平台的空间期望轨迹可通过改变滑块的位置来实现.

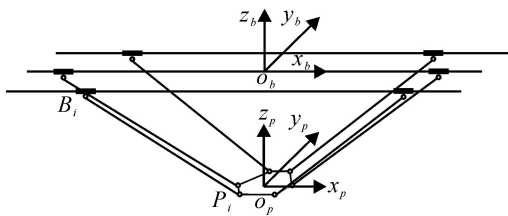


图1 6-PRRS 并联机器人结构简图

2.2 6-PRRS 并联机器人的位置反解和运动学逆解

在基座和动平台上分别建立固定坐标系 $\{O_b-x_b y_b z_b\}$ 和可动坐标系 $\{O_p-x_p y_p z_p\}$, 其坐标原点分别位于二者的中心 B 和 P . 根据并联机器人位置与姿态的描述以及空间变换理论,可以得到

$$P_i = TP_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (1)$$

式中: P_i 表示连杆与动平台连接点在坐标系 $\{O_b-x_b y_b z_b\}$ 中的坐标矢量, 记为

$$P_i = [P_{ix} \quad P_{iy} \quad P_{iz} \quad 1]^T; \quad (2)$$

P_i 表示 P_i 在坐标系 $\{O_p-x_p y_p z_p\}$ 中的坐标矢量, 记为

$$P_i = [P_{ix} \quad P_{iy} \quad P_{iz} \quad 1]^T; \quad (3)$$

T 为可动坐标系对固定坐标系平移和旋转后的齐次坐标变换矩阵, 值为

$$T = T(x_0, y_0, z_0) R_x(\cdot) R_y(\cdot) R_z(\cdot) = \begin{bmatrix} c c & s s c & -c s & c s c & +s s & x_0 \\ c s & s s s & +c c & c s s & -s c & y_0 \\ -s & s s & & c c & & z_0 \\ 0 & 0 & & 0 & & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式(2)表示在固定坐标系下, 可动坐标系先绕 z

轴旋转角, 然后绕 y 轴旋转角, 再绕 x 轴旋转角, 最后沿 x, y, z 轴平移 x_0, y_0, z_0 所得到的相对于固定坐标系的齐次变换矩阵.

P_i 可由机构尺寸直接求得. 当给出活动平台相对于固定坐标系的位置 (x_0, y_0, z_0) 和姿态 (\cdot, \cdot, \cdot) 后, P_i 可由式(1)求得.

设滑块在固定坐标系下中心点 B_i 的坐标为

$$B_i = [B_{ix} \quad B_{iy} \quad B_{iz} \quad 1]^T, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (5)$$

因为滑块只能沿丝杠方向运动, 所以 B_{iy} 和 B_{iz} 为常量, 由并联机器人的结构确定. 根据矢量关系可得

$$P_i B_i = B B_i - B P - P P_i = l, \quad i = 1, 2, \dots, 6; \quad (6)$$

式中 l 为杆长. 整理得

$$B_{ix} = P_{ix} - \sqrt{l^2 - (B_{iy} - P_{iy})^2 - (B_{iz} - P_{iz})^2}, \quad i = 1, 3, 5, \quad (7a)$$

$$B_{ix} = P_{ix} + \sqrt{l^2 - (B_{iy} - P_{iy})^2 - (B_{iz} - P_{iz})^2}, \quad i = 2, 4, 6. \quad (7b)$$

式(7)即为并联机器人的位置逆解. 当给定动平台的位姿, 可由式(7)求出6个滑块的位置逆解. 上式也可表示为

$$B_{ix} = f_i(x_0, y_0, z_0, \cdot, \cdot, \cdot), \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (8)$$

对式(8)两端进行时间微分, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{B}_{1x} \\ \dot{B}_{2x} \\ \dots \\ \dot{B}_{6x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{1x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial z_0} \\ \frac{\partial B_{2x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial z_0} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial B_{6x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial z_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (9)$$

简记为

$$\dot{Y} = [J]_{6 \times 6} \dot{X}. \quad (10)$$

式中 $[J]_{6 \times 6}$ 即为并联机器人的运动学雅可比矩阵, 也称运动影响系数, 是仅与并联机器人几何位置有关的量.

3 控制器设计

自抗扰控制器^[9]自1998年提出以来, 便在大时滞系统^[10]、无刷直流电机控制系统^[11]、火电厂主汽温控制系统^[12]和大射望远镜轨迹跟踪^[13]等非线性

性系统中得到广泛的应用. 自抗扰控制器 (ADRC) 主要由前馈非线性跟踪微分器 (NTD), 反馈回路的扩张状态观测器 (ESO) 和非线性 PD (NPD) 组成. ADRC 利用跟踪-微分器安排过渡过程, 给出参考输入信号的各阶导数, 并利用扩张状态观测器估计被控对象的实时运动状况, 实现模型和外扰补偿. 非线性 PD 组合是安排过渡过程与对象的状态变量之间误差的非线性控制策略.

3.1 非线性跟踪微分器 (NTD)

前馈 TD 的主要作用是对给定的输入信号安排系统的过渡过程, 并提取参考输入信号 r_1 及微分信号 r_2 , 削弱测量噪声对控制性能的影响. 前馈 TD 离散的输出方程为

$$\begin{aligned} r_1(k+1) &= r_1(k) + h \times r_2(k), \\ r_2(k+1) &= \\ r_2(k) + h \cdot f_{\text{han}}(r_1(k) - \\ r(k), r_2(k), \cdot, h). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: h 为采样步长; d 为决定过渡过程快慢的参数; $f_{\text{han}}(x_1, x_2, \cdot, h)$ 为如下非线性函数:

$$f_{\text{han}}(x_1, x_2, \cdot, h) = \begin{cases} \text{sgn}(a), & |a| > d; \\ (a/d), & |a| \leq d. \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; a 和 d 可由下式确定:

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sgn}(y), & |y| > d_0; \\ x_2 + y/h, & |y| \leq d_0; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} d = h, \\ d_0 = hd, \\ y = x_1 + hx_2, \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8|y|}. \end{cases} \quad (14)$$

对于任何有界可积的函数 $r(t)$, 式 (11) 提供的 2 个信号 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 能够高品质地实现 $r_1(t) \approx r(t)$, $r_2(t) \approx \dot{r}(t)$. 其中: $t = kh$ 表示时间, k 为采样点.

3.2 扩张状态观测器 (ESO)

ESO 的作用是利用尽可能少的信息估计出受未知外扰作用的非线性不确定对象的扩张状态, 实现反馈控制及扰动补偿. 离散三阶 ESO 的一种具体实现形式为

$$\begin{cases} 0 = z_1(k) - y(k), \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - 1 \cdot 0), \\ z_2(k+1) = \\ z_2(k) + h(z_3(k) + f_0(z_1(k), z_2(k)) - \\ 2f_{\text{al}}(0, 1, 1) + b_0 u(k)), \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h \cdot 3f_{\text{al}}(0, 0, 1). \end{cases} \quad (15)$$

式中: $1, 2, 1, 2, 3, 1$ 和 b_0 为设计参数; $f_0(z_1(k), z_2(k))$ 为已知的已建模动态, 对系统进行模型补偿. 非线性函数 $f_{\text{al}}(\cdot, \cdot, \cdot)$ 为

$$f_{\text{al}}(\cdot, \cdot, \cdot) = \begin{cases} / / \text{sgn}(\cdot), & / / > ; \\ / ^{-1}, & / / . \end{cases} \quad (16)$$

3.3 非线性 PD (NPD)

非线性 PD 获得高质量的微分信号后, 采用如下非线性组合实现 ADRC 的控制作用:

$$\begin{cases} e_1 = r_1 - z_1, \\ e_2 = r_2 - z_2, \\ u_0 = k_p f_{\text{al}}(e_1, 0_1, 0) + \\ k_d f_{\text{al}}(e_2, 0_2, 0). \end{cases} \quad (17)$$

其中: 非线性函数 $f_{\text{al}}(e, \cdot, 0)$ 与式 (16) 的定义相同; $k_p, k_d, 0_1, 0_2$ 和 0 为 NPD 的设计参数.

3.4 扰动补偿控制输出

ESO 获得未知外扰的实时作用量后, 可实现扰动补偿. 因此, ADRC 控制器的总输出为

$$U(t) = U_0(t) - \frac{z_3 + f_0(z_1(k), z_2(k))}{b_0}. \quad (18)$$

综上所述, 设计 ADRC 的结构如图 2 所示.

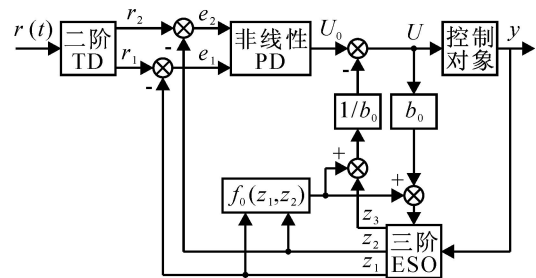


图 2 ADRC 控制器结构简图

4 数字仿真和结果分析

采用分散控制策略, 实现 6-PRRS 并联机器人的轨迹跟踪控制. 因为并联机器人各轴结构相同, 所以可以只在单轴上进行仿真来确定 ADRC 的参数. 首先建立单轴的数学模型, 驱动系统如图 3 所示, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{K_t \times L}{s(Js + B)}. \quad (19)$$

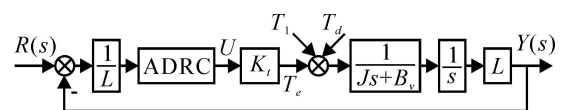


图 3 并联机器人单轴系统框图

图 3 中: 丝杠导程 $L = 10 \text{ mm}$, 交流伺服电机转矩常数 $K_t = 0.953 \text{ 3 N} \cdot \text{m/A}$, $J = J_1 + J_2$, 电机转动惯量 $J_1 = 1.31 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2$, 丝杠转动惯量 $J_2 = 4.85 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2$, 阻尼系数 $B_v = 5 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$. 假设并联机器人只受库仑摩擦力影

响,其大小为

$$f(\dot{Y}) = c_0 \text{sign}(\dot{Y}), \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (20)$$

这里 c_0 值取 1.8, 在实际应用中, 它与实际库仑摩擦值可通过不断调整 c_0 值来逼近, 库仑摩擦力用 $f_0(z_1(k), z_2(k))$ 表示. 通过仿真, ADRC 设计参数确定为 $b_0 = 200, b_1 = K_t/J, \alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.25, \beta_1 = 1000, \beta_2 = 30000, \beta_3 = 500000, \gamma_1 = 0.005, k_p = 3.7, k_d = 0.0567, \sigma_1 = 0.72, \sigma_2 = 1.1, \sigma_0 = 0.03$. 图4为采样时间 $h = 2 \text{ ms}$, 角速度 $\dot{\theta} = 5 \text{ rad/s}$ 时, 机器人末端执行器中心运动轨迹为半径 $r = 50 \text{ mm}$ 的圆的各滑块理论位置, 其值可由式(8)求得. 图5为各滑块轨迹跟踪误差. 由图可以看出, 所设计的自抗扰控制器跟踪误差与运动空间的比值小于 $1/10000$. 作者也在提高速度以及添加其他扰动的情况下进行了仿真实验, 系统的跟踪轨迹并没有明显变化, 从而证明系统具有强鲁棒性.

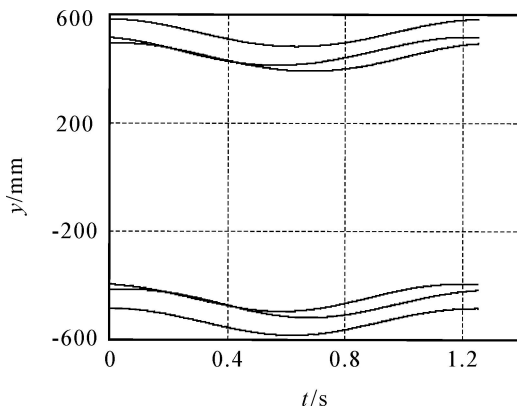


图4 滑块轨迹理论值

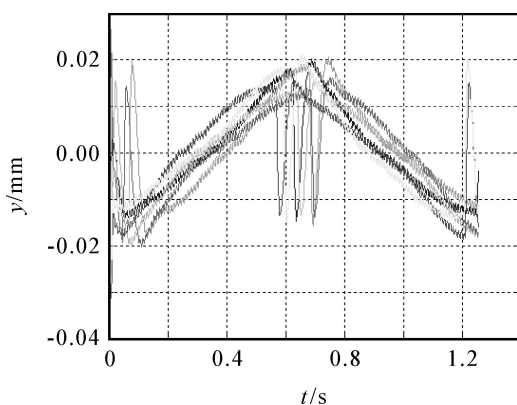


图5 滑块轨迹跟踪误差

5 结 语

本文采用分散控制策略对 6-PRRS 并联机器人进行高精度轨迹跟踪控制, 设计了由非线性跟踪微分器、扩张状态观测器、非线性 PD 和前馈的扰动补偿 4 部分组成的自抗扰控制器. 在各种外扰和测量噪声的影响下, 非线性跟踪微分器能获得高品质给定信号的微分信号. 具有模型补偿功能的扩张状态

观测器, 可以缩小观测对象的不确定性范围, 提高 ESO 估计被控对象模型未知部分的逼近能力, 从而提高对系统参数的辨识能力, 进而改善自抗扰控制器的控制品质. 同时, 非线性 PD 的采用进一步提升了系统的控制性能. 数字仿真实验结果表明, 通过将并联机器人系统之间的动力学耦合以及其他系统未建模部分视为对系统的未知扰动, 自抗扰控制器可以实现动力学耦合以及其他未知外扰的补偿, 具有强鲁棒性和良好的轨迹跟踪性能.

参考文献(References)

- [1] 张秀峰, 孙立宁. 精密并联机器人控制算法及控制系统研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 177-180.
(Zhang Xiufeng, Sun Lining. Research of precise parallel robot control method and system[J]. Chinese J of Mechanical Engineering, 2004, 40(4): 177-180.)
- [2] 苏玉鑫, 段宝岩, 张永芳, 等. 并联机器人的非线性 PID 控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 490-493.
(Su Yuxin, Duan Baoyan, Zhang Yongfang, et al. Nonlinear PID control of a parallel manipulator [J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 490-493.)
- [3] 万亚民, 王孙安, 杜海峰. 液压并联机器人的动态神经网络控制研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 955-958.
(Wan Yamin, Wang Sunan, Du Haifeng. Dynamic neural network control of hydraulic parallel robot[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 955-958.)
- [4] 焦晓红, 耿秋实, 方一鸣, 等. 液压伺服并联机器人的自适应鲁棒跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3): 401-403.
(Jiao Xiaohong, Geng Qiushi, Fang Yiming, et al. Adaptive robust tracking control of hydraulic serve parallel robot[J]. J of System Simulation, 2003, 15(3): 401-403.)
- [5] Park M K, Lee M C, Go S J, et al. The design of sliding mode controller with perturbation observer for a 6-DOF parallel manipulator[C]. IEEE Int Symposium on Industrial Electronics. Korea, 2001: 1502-1507.
- [6] Honegger M, Brega R, Schweitzer G. Application of a nonlinear adaptive controller to a 6 DOF parallel manipulator[C]. Int Conf on Robotics and Automation. San Francisco, 2000: 1930-1935.
- [7] Choi H B, Company O, Pierrot F, et al. Design and control of a novel 4-DOFs parallel robot H4 [C]. Int Conf on Robotics and Automation. Taipei, 2003: 1185-1190.
- [8] Vivas Andres, Poignet Philippe. Predictive functional control of a parallel robot [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13: 863-874.

(下转第 799 页)

取 $t_0 = 0$, $x(t_0) = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 2 \end{bmatrix}$. 基于 SDPP 的随机通信逻辑强度 $s(t) = 25 e(t)^2$.

基于 SDPP 的随机通信逻辑数据发送时间和系统状态如图 2 和图 3 所示. 由图可以看出, 网络控制系统中加入 SDPP 的随机通信逻辑后, 在保持系统稳定的前提下, 减少了网络控制系统中数据的发送速率, 从而降低了带宽约束对系统的影响.

6 结 论

本文介绍了具有通信逻辑的网络控制系统结构, 提出了一种基于 SDPP 的随机通信逻辑. 通过降低网络中节点包传输速率的方法, 解决了网络控制系统中的带宽约束问题. 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

参考文献 (References)

- [1] Zhang Wei, Branicky Michael S, Philips Stephen M. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 85-99.
- [2] 谢林柏, 方华京, 王华. 网络化控制系统的信息调度与稳定性研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 589-591. (Xie Lin-bo, Fang Hua-jing, Wang Hua. Information scheduling and asymptotical stability of networked control systems [J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 589-591.)
- [3] Mu Shumei, Chu Tianguang, Wang Long, et al. State feedback control of networked systems via periodical switching[C]. 2004 IEEE Int Symposium on Computer Aided Control Systems Design. Taipei, 2004: 356-361.
- [4] Dimitrios Hristu. Stabilization of LTI systems with communication constraints [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago: Illinois, 2000: 2342-2346.
- [5] Peter E Hokayem, Chaouki T Abdallah. Inherent issues in networked control systems: A survey[C]. Proc of the 2004 American Control Conf. Boston: Massachusetts, 2004: 4897-4902.
- [6] Panos Antsaklis, John Baillieul. Special issue on networked control systems [J]. Automatic Control, 2004, 49(9): 1421-1423.
- [7] Luis A Montestruque, Panos J Antsaklis. Model-based networked control systems-stability [R]. Notre Dame: University of Notre Dame, 2002.
- [8] John K Yook, Dawn M Tilbury, Nandit R Soparkar. Trading computation for bandwidth: Reducing communication in distributed control systems using state estimators [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 503-518.
- [9] Xu Yonggang, Joao Hespanha. Communication logics for networked control systems [C]. Proc of the 2004 American Control Conf. Boston: Massachusetts, 2004: 572-577.
- [10] 邓永录, 梁纸舜. 随机点过程及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992. (Deng Yong-lu, Liang Zhi-shun. Stochastic point processes and applications[M]. Beijing: Science Press, 1992.)
- [9] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23. (Han Jing-qing. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.)
- [10] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制 [J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354-358. (Han Jing-qing, Zhang Wen-ge. ADRC control for large time-delay systems [J]. Control and Decision, 1999, 14(4): 354-358.)
- [11] 苏位峰, 孙旭东, 李发海. 基于自抗扰控制器的异步电机矢量控制 [J]. 清华大学学报, 2004, 44(10): 1329-1332. (Su Wei-feng, Sun Xu-dong, Li Fa-hai. Vector control of induction motors with active disturbance rejection control[J]. J of Tsinghua University, 2004, 44(10): 1329-1332.)
- [12] 黄焕袍, 武利强, 高峰, 等. 自抗扰在火电厂主汽温控制中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 241-244. (Huang Huan-pao, Wu Li-qiang, Gao Feng, et al. Main steam temperature control of thermal power plant based on active disturbance rejection control [J]. J of System Simulation, 2005, 17(1): 241-244.)
- [13] 苏玉鑫, 段宝岩, 张永芳, 等. 大射电望远镜馈源指向系统轨迹跟踪自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 956-960. (Su Yu-xin, Duan Bao-yan, Zhang Yong-fang, et al. Auto-disturbances rejection control of the feed-supporting system for the square kilometer array [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 956-960.)

(上接第 794 页)