

文章编号: 1000-8152(2005)06-0983-04

惯性参数大范围变化机械伺服系统鲁棒跟踪控制

刘 强^{1,2}, 冯培恩¹

(1. 浙江大学 机械设计研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

摘要: 机械伺服系统在执行不同任务时, 要求能适应不同质量或惯量的工作负载. 而工作负载的改变会导致伺服系统惯性参数的大范围变化, 目前常见的运动控制方法, 如 PD 控制, 基于干扰观测器的鲁棒控制等, 对上述情况表现为系统不稳定或跟踪性能变差. 对上述问题, 本文假定惯性参数变化范围已知, 提出一种新型的非线性控制方法, 用滑模技术实现了系统对惯性参数变化和外部扰动的鲁棒稳定性, 和跟踪性能, 引入边界层技术避免了控制切换产生的抖振现象. 用 Lyapunov 直接法对系统的全局稳定性给出了证明, 并分析了系统的暂态响应. 以直流电机高精度位置伺服系统为例的仿真结果表明算法的有效性.

关键词: 滑模; 伺服系统; 鲁棒; 跟踪

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust tracking control of mechanical servo systems with inertial parameters varying in large range

LIU Qiang^{1,2}, FENG Pen-en¹

(1. Institute of Mechanical Design, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. College of Mechanical, Electronic and Automation, Huaqiao University, Quanzhou Zhejiang 362011, China)

Abstract: When implementing different tasks, mechanical servo systems must adapt to various working loads with different weight or inertia, which may lead to remarkable variation of servo system's inertial parameters. In such cases, motion control methods at present, such as PD control and disturbance observer-based robust control, exhibit instability or tracking performance declination. A novel nonlinear control scheme is proposed to deal with the above problems in known variation range of inertial parameters. The sliding mode technique is used for servo-system to achieve robust stability and guarantee transient response, and the boundary layer control is also adopted to avoid chattering introduced by control switching. The servo-system's global stability is then proved by using Lyapunov's direct method, and the transient performance is analyzed. Computer simulation results developed for a DC motor servo-system show the effectiveness of the proposed method.

Key words: sliding mode; servo-system; robust; tracking

1 引言(Introduction)

高精度机械伺服系统广泛应用于半导体工业、磁(光)存储介质加工领域、光学仪器加工领域以及武器半实物仿真系统等领域, 伺服系统性能的提高将直接带动上述领域的发展. 影响伺服系统性能提高的主要因素有 3 种: 1) 负载变化及温度漂移带来的系统参数变化; 2) 摩擦环节产生的非线性扰动转矩; 3) 机械谐振及高频未建模动态带来的模型不确定性. 对于高精度伺服系统的研究也集中于上述 3 个方面.

目前, 主要的高精度伺服控制方法有 PD 控制、

扰动观测器方法^[1]、鲁棒双自由度控制^[2]和鲁棒自适应控制^[3]等. 当伺服系统惯性参数发生小范围变化时, 虽然上述方法能保持系统稳定, 但却无法保证系统的模型跟踪性能, 使跟踪误差增大. 对于负载参数大范围变化的高精度伺服系统, 如何设计出具有强鲁棒稳定性和鲁棒模型跟踪性能的控制器的, 是目前研究的热点^[4~7]. 本文针对上述问题, 提出一种新型的全局稳定滑模控制方法.

2 问题描述(Problem description)

对机械伺服系统, 用下述微分方程描述:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = u + d. \quad (1)$$

其中: J 为等效转动惯量, B 为等效阻尼系数, u 为控制输入, d 为等效到控制端的外部干扰的总和, θ 为位置输出. 设系统参数及等效扰动有界, 即

$$J_m \leq J \leq J_M, \quad (2)$$

$$B_m \leq B \leq B_M, \quad (3)$$

$$|d| \leq d_M. \quad (4)$$

其中: J_m, J_M, B_m, B_M 为正实数. 定义如下的名义模型系统

$$J_n \ddot{\theta}_n + B_n \dot{\theta}_n = \mu. \quad (5)$$

其中: $J_n > 0, B_n > 0$ 为模型参数, μ 为模型输入, θ_n 为模型输出. 定义跟踪误差信号为

$$e = \theta - \theta_n. \quad (6)$$

本文的问题是, 对于系统(1), 求控制 u , 使得当等效干扰和参数变化满足式(2) ~ (4) 时, 跟踪误差 $e(t)$ 有界, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(t) \rightarrow 0$ 或收敛于某一有界区域.

3 鲁棒模型跟踪控制 (Robust model tracking control)

设 J_a 和 B_a 为参数变化的中点值, 即

$$J_a = \frac{1}{2}(J_m + J_M), \quad (7)$$

$$B_a = \frac{1}{2}(B_m + B_M). \quad (8)$$

对于名义模型系统, 取如下的 PD 控制算法:

$$\mu = K_p(r - \theta_n) - K_d \dot{\theta}_n. \quad (9)$$

其中: $r > 0$ 为系统输入信号, $K_p > 0, K_d > 0$ 为 PD 控制器参数, 其取值应使名义模型闭环系统稳定, 且响应无超调.

对于伺服系统的控制输入 u , 控制算法如下:

$$u = -Kz - h(\theta, \dot{\theta}, t) \cdot \text{sgn}(z) + J_a \left(\frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right) + B_a \dot{\theta}. \quad (10)$$

其中: $\lambda = B_n/J_n$ 为常数, $K > 0$ 为增益系数, $h(\theta, \dot{\theta}, t)$ 为时间 t 的非线性函数, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 分别定义如下:

$$z = \dot{e} + \lambda e, \quad (11)$$

$$h(\theta, \dot{\theta}, t) = d_M + \frac{1}{2}(J_M - J_m) \left| \frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right| + \frac{1}{2}(B_M - B_m) |\dot{\theta}|, \quad (12)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x = 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases} \quad (13)$$

伺服系统的控制由 u 和 μ 两部分组成, 系统原

理如图 1 所示. 控制 μ 为 PD 控制, 控制 u 实质上是滑模控制, 滑动模态为 z .

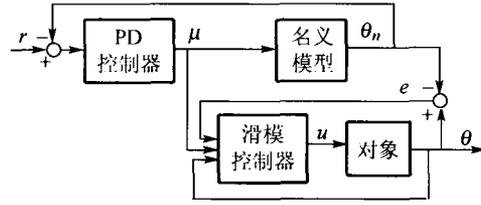


图 1 伺服系统原理

Fig. 1 Block diagram of servo systems

在控制律(10)中用到了符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$, 对于实际应用, 控制量的频繁切换会导致系统输出出抖振, 甚至损坏电机和驱动器. 为避免上述情况, 用饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 代替符号函数, 并引入边界层控制, 对控制律做如下改进:

$$u = -Kz - h(\theta, \dot{\theta}, t) \cdot \text{sat} \left[\frac{h(\theta, \dot{\theta}, t)z}{4\epsilon} \right] +$$

$$J_a \left(\frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right) + B_a \dot{\theta}, \quad (14)$$

$$\text{sat} \left(\frac{x}{\Delta} \right) = \begin{cases} 1, & x > \Delta, \\ \frac{1}{\Delta} x, & |x| \leq \Delta, \\ -1, & x < -\Delta. \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\epsilon > 0, \Delta > 0, \Delta$ 代表边界层厚度.

4 稳定性和暂态性能分析 (Analysis of stability and transient response)

定理 1 对于系统(1), 采取控制律(9)(10), 若等效扰动及参数变化满足式(2) ~ (4), 则系统所有状态有界, 滑动模态 z 以指数速率收敛至 0, 且 $t \rightarrow \infty$ 时, $e(t) \rightarrow 0$.

证 定义如下的 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} Jz^2. \quad (16)$$

由式(1)(5)和(11)有

$$\begin{aligned} J\dot{z} &= J[(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_n) + \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}_n)] = \\ &= (J\ddot{\theta} + B\dot{\theta}) - \frac{J}{J_n}(J_n \ddot{\theta}_n + B_n \dot{\theta}_n) - B\dot{\theta} + \lambda J\dot{\theta} = \\ &= u + d - \frac{J}{J_n} \mu - B\dot{\theta} + \lambda J\dot{\theta}. \end{aligned} \quad (17)$$

将式(10)代入, 有

$$\begin{aligned} J\dot{z} &= -Kz - h(\theta, \dot{\theta}, t) \text{sgn}(z) + d + \\ &= (J_a - J) \left(\frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right) + (B_a - B) \dot{\theta}. \end{aligned} \quad (18)$$

对 V 求导, 有

$$\dot{V} = Jz\dot{z} =$$

$$\begin{aligned}
 & -Kz^2 - h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sgn}(z)z + \\
 & z \left[d + (J_a - J) \left(\frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right) + (B_a - B) \dot{\theta} \right] \leq \\
 & -Kz^2 - h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sgn}(z)z + \\
 & |z| \left[|d| + |J_a - J| \left| \frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right| + |B_a - B| |\dot{\theta}| \right].
 \end{aligned} \tag{19}$$

由式(7)和(8),对于任意的 $J \in [J_m, J_M], B \in [B_m, B_M]$, 有

$$|J_a - J| \leq \frac{1}{2}(J_M - J_m), \tag{20}$$

$$|B_a - B| \leq \frac{1}{2}(B_M - B_m). \tag{21}$$

考虑式(20)(21)和(12),有

$$\begin{aligned}
 & h(\theta, \dot{\theta}, t) \geq \\
 & |d| + |J_a - J| \left| \frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right| + |B_a - B| |\dot{\theta}|,
 \end{aligned} \tag{22}$$

则

$$\dot{V} \leq -Kz^2 = -\frac{2K}{J}V, \tag{23}$$

则有

$$V(t) \leq e^{-\frac{2K}{J}t}V(0). \tag{24}$$

其中: $V(0) = \frac{1}{2}Jz^2(0)$,由式(16), z 以指数速率收敛于0. 因为 $\lambda > 0$,由式(11),跟踪误差 $e(t)$ 渐近收敛于0. 又因为 $z(t)$ 一致有界,若 $e(0)$ 和 $\dot{e}(0)$ 有界,则对于任意的 $t > 0$, $e(t)$ 和 $\dot{e}(t)$ 有界.由式(5)和(9)有

$$J_n \dot{\theta}_n + (B_n + K_d) \dot{\theta}_n + K_p \theta_n = K_{pr}. \tag{25}$$

因此,若 $\theta_n(0)$ 和 $\dot{\theta}_n(0)$ 有界,则对任意的 $t > 0$, $\theta_n(t)$ 和 $\dot{\theta}_n(t)$ 有界.由式(6),则 θ 和 $\dot{\theta}$ 有界,即系统所有状态有界.

说明 1 上述定理说明,若 $z(0) \neq 0$,系统将以指数趋近律收敛到滑动模态 $z = 0$,且对于任意的初始状态,滑模可达性条件满足.

说明 2 若系统的状态初始值满足 $\theta(0) = \theta_n(0)$, $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_n(0)$,则 $e(0) = \dot{e}(0) = 0, z(0) = e(0) + \lambda e(0) = 0$,这说明在初始时刻 $t = 0$,系统便进入滑动模态,由定理 1, $\forall t \geq 0, z(t) \equiv 0$,即 $e(t) + \lambda e(t) \equiv 0$,则 $e(t) = e(0)e^{-\lambda t} = 0$,则 $e(t) = 0$,系统运动与名义模型一致,则有

$$J_n \dot{\theta} + (B_n + K_d) \dot{\theta} + K_p \theta = K_{pr}. \tag{26}$$

上式说明,通过选择参数 K_p 及 K_d ,可以保证系统的暂态响应渐近收敛.

定理 2 对于系统(1),采用控制律(9)(14),若等效扰动及参数变化满足式(2)~(4),则系统所有

状态有界,且

1) 滑动模态 z 以指数速率收敛,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)| \leq \min\{4\epsilon/d_M, \sqrt{\epsilon/K}\}$;

2) 跟踪误差 $e(t)$ 渐近收敛,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \min\{4\epsilon/\lambda d_M, \sqrt{\epsilon/\lambda^2 K}\}$;

3) $\dot{e}(t)$ 渐近收敛,且 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{e}(t)| \leq \min\{8\epsilon/d_M, 2\sqrt{\epsilon/K}\}$.

证 取式(16)定义的 Lyapunov 函数,求导有

$$\begin{aligned}
 \dot{V} = & -Kz^2 - h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sat} \left[\frac{h(\theta, \dot{\theta}, t)z}{4\epsilon} \right] z + \\
 & z \left[d + (J_a - J) \left(\frac{1}{J_n} \mu - \lambda \dot{\theta} \right) + (B_a - B) \dot{\theta} \right] \leq \\
 & -Kz^2 - h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sat} \left[\frac{h(\theta, \dot{\theta}, t)z}{4\epsilon} \right] z + \\
 & h(\theta, \dot{\theta}, t) |z|.
 \end{aligned} \tag{27}$$

当 $|z| \geq \frac{4\epsilon}{h(\theta, \dot{\theta}, t)}$ 时,由式(15),有

$$-h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sat} \left[\frac{h(\theta, \dot{\theta}, t)z}{4\epsilon} \right] \cdot z + h(\theta, \dot{\theta}, t) |z| = 0. \tag{28}$$

这说明当 $|z| \geq \frac{4\epsilon}{h(\theta, \dot{\theta}, t)}$ 时, $\dot{V} \leq -Kz^2$. 又因为 $d_M \leq h(\theta, \dot{\theta}, t)$,

则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)| \leq \frac{4\epsilon}{d_M}. \tag{30}$$

当 $|z| < \frac{4\epsilon}{h(\theta, \dot{\theta}, t)}$ 时,有

$$\begin{aligned}
 & -h(\theta, \dot{\theta}, t) \operatorname{sat} \left[\frac{h(\theta, \dot{\theta}, t)z}{4\epsilon} \right] z + h(\theta, \dot{\theta}, t) |z| = \\
 & -\frac{h^2(\theta, \dot{\theta}, t)z^2}{4\epsilon} + h(\theta, \dot{\theta}, t) |z| \leq \\
 & -\frac{1}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} h(\theta, \dot{\theta}, t) |z| - \epsilon \right)^2 + \epsilon \leq \epsilon.
 \end{aligned} \tag{31}$$

由式(28)和(31),有

$$\dot{V} \leq -Kz^2 + \epsilon = -\frac{2K}{J}V + \epsilon, \tag{32}$$

则有

$$V(t) \leq e^{-\frac{2K}{J}t}V(0) + \frac{J\epsilon}{2K}(1 - e^{-\frac{2K}{J}t}). \tag{33}$$

由式(16),有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)| \leq \sqrt{\frac{\epsilon}{K}}, \tag{34}$$

则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)| \leq \min \left\{ \frac{4\epsilon}{d_M}, \sqrt{\frac{\epsilon}{K}} \right\}, \tag{35}$$

即滑动模态 z 以指数速率收敛到有界区域内. 由式, 跟踪误差 $e(t)$ 及其微分 $\dot{e}(t)$ 满足如下关系:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \min \left\{ \frac{4\epsilon}{\lambda d_M}, \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon}{K}} \right\}, \quad (36)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\dot{e}(t)| \leq \min \left\{ \frac{8\epsilon}{d_M}, 2\sqrt{\frac{\epsilon}{K}} \right\}, \quad (37)$$

即 $e(t)$ 和 $\dot{e}(t)$ 分别渐近收敛到有界区域内. 系统状态有界的证明与定理 1 类似, 略.

说明 3 定理 2 中对状态 $z(t)$, $e(t)$ 和 $\dot{e}(t)$ 的收敛, 给出了边界. 考虑到控制量的平滑, 通常情况下, d_M 不宜过大, 可适当增大 K , 在应用中, 边界 $\sqrt{\epsilon/K}$ 更有实际意义.

5 仿真研究 (Simulation research)

考虑如下的直流电机高精度位置伺服系统

$$J_1 \ddot{\theta} + B_1 \dot{\theta} = u - f(\dot{\theta}, u),$$

$$f(\dot{\theta}, u) = F_{\text{slip}}(\dot{\theta})\lambda(\dot{\theta}) + F_{\text{stick}}(u)[1 - \lambda(\dot{\theta})],$$

$$\lambda(\dot{\theta}) = \begin{cases} 1, & |\dot{\theta}| > D_V, \\ 0, & |\dot{\theta}| \leq D_V, \end{cases} \quad D_V > 0,$$

$$F_{\text{slip}}(\dot{\theta}) = F_C \text{sgn}(\dot{\theta}),$$

$$F_{\text{stick}}(u) = \begin{cases} F_S^+, & u \geq F_S^+ > 0, \\ u, & F_S^- < u < F_S^+, \\ F_S^-, & u \leq F_S^- < 0. \end{cases}$$

其中 $f(\dot{\theta}, u)$ 为等效摩擦干扰. $J_1 = 0.01, B_1 = 0.1, D_V = 0.1, F_C = 0.15, F_S^+ = 0.25, F_S^- = -0.2$, 用 MATLAB 软件作为仿真工具.

5.1 对参数变化的鲁棒性 (Robustness to parameter uncertainty)

取控制器参数 $K_p = 0.6, K_V = 0.01, J_n = J_1, B_n = B_1, J_m = 0.25J_1, J_M = 2.5J_1, B_m = 0.75B_1, B_M = 1.25B_1, d_M = 0.5, \epsilon = 0.1, K = 5.0$. 对于实际伺服系统, 如果负载更换致使转动惯量改变, 则会引起参数 J_1 的变化, 但对参数 B_1 的影响不大^[4]. 故考虑下面 3 种参数变化情况: 1) $J' = J_1, B' = B_1$; 2) $J' = 0.3J_1, B' = 0.85B_1$; 3) $J' = 2.4J_1, B' = 1.2B_1$. 其中 J', B' 为摄动后的参数. 输入信号 $r(t) = \sin(\pi t)$. 考虑到实际伺服系统为采样系统, 取采样

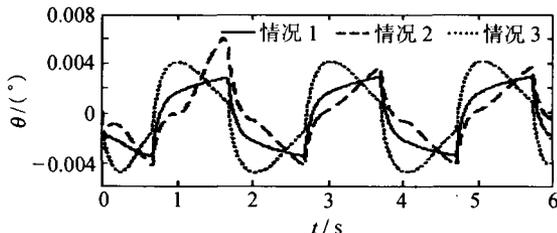


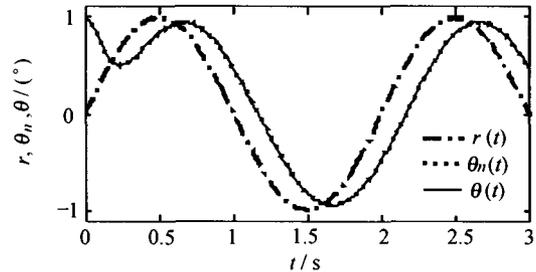
图 2 系统参数变化时跟踪误差曲线

Fig. 2 Experimental tracking curve in the presence of parameters varying

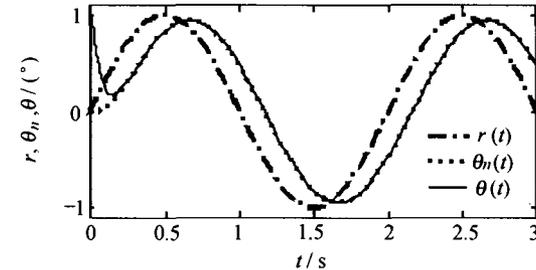
周期为 1 ms, 仿真结果如图 2.

5.2 系统暂态性能 (Transient performance of the servo system)

为考察采用本文控制器后系统的暂态性能, 对于名义模型初值选择考虑如下两种情况: 1) $\theta_n(0) = \theta(0) = 1, \dot{\theta}_n(0) = \dot{\theta}(0) = 0$; 2) $\theta_n(0) = 0, \theta(0) = 1, \dot{\theta}_n(0) = \dot{\theta}(0) = 0$. 仿真结果如图 3 所示. 当初始状态相同时, 实际对象与名义模型的输出基本一致, 说明系统暂态响应可任意设计. 图 4 为系统运动相轨迹.



(a) 情况 1



(b) 情况 2

图 3 暂态响应曲线

Fig. 3 Transient curve

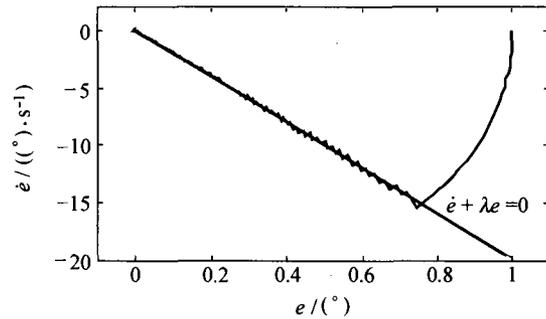


图 4 系统运动相轨迹

Fig. 4 State trajectory of system motion

6 结论 (Conclusion)

本文提出一种新型控制方法, 能过适应机械伺服系统参数大范围变化的情况. 本文算法的实时性好, 且算法实现无需加速度等高阶状态信号, 具有较大的应用价值.

(下转第 990 页)

- [3] 傅予力,赵勇.时滞离散时间双向联想记忆模型的研究[J].华中理工大学学报,2000,28(7):80-82.
(FU Yuli, ZHAO Yong. Researches of discrete time-delayed BAM model [J]. *J of Huazhong University of Science and Technology*, 2000.)
- [4] 王利生,谈正,张志军.连续双向联想记忆网络局部指数稳定的充分必要条件[J].电子学报,1999,27(7):119-121.
(WANG Lisheng, TAN Zheng, ZHANG Zhijun. Sufficient and necessary conditions of locally exponential stability of continuous BAM networks [J]. *Electronic Express*, 1999, 27(7): 119-121.)
- [5] 廖晓峰,吴中福,秦拯.依赖时延 BAM 神经网络的全局吸引力分析[J].计算机研究与发展,2000,37(7):833-837.
(LIAO Xiaofeng, WU Zhongfu, QIN Zheng. Global attraction analysis of delayed BAM neural networks [J]. *Computer Researches and Development*, 2000, 37(7): 833-837.)
- [6] 金聪.离散 Hopfield 型双向联想记忆神经网络的稳定性分析[J].自动化学报,1999,25(5):606-612.
(JIN Cong. Stability analysis of discrete Hopfield bi-directional associated memory neural networks [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(5): 606-612.)
- [7] 廖晓昕.动力系统的稳定性理论和应用[M].北京:国防工业出版社,2000.
(LIAO Xiaoxin. *Stability Theory and Applications on Power Systems* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.)
- [8] MAO Xurong. *Stochastic Differential Equations and Applications* [M]. Chichester: Horwood Press, 1997.

作者简介:

廖伍代 (1963—),男,副教授,于2003年华中科技大学系统工程专业获博士学位,研究方向为非线性随机系统、神经网络理论与应用, E-mail: wdliao@zzti.edu.cn;

蹇继贵 (1965—),男,副教授,华中科技大学系统工程专业博士研究生,研究方向为动力系统、非线性部分变元控制, E-mail: jian-jigui@sohu.com;

廖晓昕 (1938—),男,教授,博士生导师,研究方向为非线性系统、神经网络稳定性、混沌同步, E-mail: xiaoxinliao@hotmail.com.

(上接第 986 页)

参考文献(References):

- [1] KOMADA M, ISHIDA M, OHNISHI K, et al. Disturbance observer based motion control of direct drive motors [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1991, 6(3): 553-559.
- [2] UMENO T, HORI Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degree-of-freedom controller design [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1996, 38(5): 363-368.
- [3] KIONG K T. *Precision Motion Control* [M]. Berlin: Springer Press, 2001: 123-135.
- [4] YAO B, MAJED A M, TOMIZUKA M. High-performance robust motion control of machine tools: an adaptive robust control approach and comparative experiments [J]. *IEEE Trans on Mechatronics*, 1997, 2(2): 63-76.
- [5] YAO B, FANGPING B. Adaptive robust control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2000, 5(2): 79-91.
- [6] XU L, YAO B. Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors [J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1029-1039.
- [7] YAO B, TOMIZUKA M. Adaptive robust control of MIMO nonlinear systems in semi-strict feedback forms [J]. *Automatica*, 2001, 37(9): 1305-1321.

作者简介:

刘强 (1972—),男,副教授,1993年获上海交通大学信息与控制工程系工学学士学位,2002于北京航空航天大学自动控制系获博士学位,2003年于华侨大学机电学院任教,现在浙江大学机械设计研究所作博士后研究工作,主要研究方向为鲁棒控制、自适应控制、高精度伺服控制理论及应用, E-mail: liuqiang@hqu.edu.cn;

冯培恩 (1943—),男,浙江大学机电学院教授,博士生导师,主要研究方向为设计自动化、机电一体化及工程机器人技术等, E-mail: fpe@sun.zju.edu.cn.