

文章编号: 1000-8152(2002)05-0797-04

硬盘驱动器准滑模自适应鲁棒控制方法*

郭 戈

(甘肃工业大学 电气与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 提出一种硬盘驱动器鲁棒自适应准滑模控制方法, 该方法在仿真和实验中有效地克服了跟踪扰动信号的影响, 极大地提高了硬盘驱动器的跟踪速度, 使系统稳态、动态性能和鲁棒性都得到很大的改善。

关键词: 硬盘驱动器; 自适应策略; 准滑模; 鲁棒跟踪

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Robust quasi-sliding mode adaptive control method for hard disk drive

GUO Ge

(College of Electric and Information Engineering, Gansu University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A robust quasi-sliding mode adaptive control method is presented for a hard disk drive servo system. It can effectively reject effects of disturbance in simulation and experiments. Track-following ability and behavior in both stable and transient state of the hard disk drive control system are largely improved.

Key words: hard disk drive; adaptive strategy; quasi-sliding mode; robust tracking

1 引言(Introduction)

硬盘驱动器读写头定位控制的目的是在最短的时间内使读写头移动到期望的磁道, 而跟踪控制时则要求读写头在外部扰动作用下以允许的跟踪误差准确跟踪指定的磁道. 硬盘驱动器读写头定位伺服控制系统中存在的扰动信号主要来自磁头位置传感器及其接口系统、声音线圈电机功率放大电路和硬盘的增益变化等, 这些扰动对硬盘驱动器读写头控制具有严重的影响, 必须对其进行有效的抑制. 近年来, 先进的现代控制技术已经成功地应用于硬盘驱动器读写头伺服控制系统之中. 如 Hanselmann 等人^[1]提出一种基于一个八阶模型的 LQG/LTR 硬盘驱动器读写头跟踪控制方法, Hasegava^[2]提出一种基于双积分模型和加速轨迹模型的状态反馈控制策略来解决硬盘驱动器声音线圈感应和执行器共振问题. 文献[3]设计了一种以极点配置和状态观测为基础的硬盘驱动器状态反馈控制策略, 并利用状态转移矩阵方法设计了一个三阶故障辨识滤波器, 从而在出现故障时保证系统恢复到正常工作状态. 虽然这些控制方法可以改善硬盘驱动器读写头定位伺服控制系统的性能, 但是它们需要处理大量的复杂计

算, 快速性和鲁棒性都比较差, 因此这些高阶控制器不便于设计和实施. 为此, 本文提出一种硬盘驱动器读写头伺服控制系统鲁棒自适应跟踪控制方法, 并对其有效性进行了仿真和实验研究. 结果表明这种方法简单实用, 即使在严重的扰动信号作用下也可以对硬盘驱动器读写头实现快速而稳定的鲁棒跟踪控制.

2 系统模型(System model)

硬盘驱动器读写头定位伺服系统中的执行器是一个由电流放大器驱动的声音线圈电动机, 根据牛顿第二定律, 该执行器可用如下数学模型来描述:

$$\ddot{\vartheta}(t) = \xi F(t) + \xi u(t - \tau). \quad (1)$$

其中 ϑ 代表磁头角位置, F 为未知偏斜力(稳态时为常数), u 是控制器输出电压, τ 为滞后时间, ξ 为驱动器常数. 在跟踪模式下, 上述模型可以写成如下状态方程形式:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \xi \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \xi \\ 0 \end{bmatrix} u(t - \tau), \\ y = [1 \ 0 \ 0]x. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $y = \vartheta$, $x = [x_1, x_2, x_3]^T$, $x_1 = \vartheta$, $x_2 = \dot{x}_1$, $x_3 =$

* 基金项目: 国家自然科学基金(69635010)和甘肃工业大学博士基金(139903)资助项目.

收稿日期: 2000-07-26; 收修改稿日期: 2001-04-30.

F. 该模型在 50 ~ 2000Hz 范围内的频率响应特性与实验测得的硬盘驱动器频率响应数据基本吻合。

选择采样周期为 $T_s = 220 \mu s$, 根据文献[4]中的方法将系统状态空间模型离散化, 并代入相关参数值可以得到:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1.9047 & 1.8419 \\ 0 & 1 & 3.8094 & 3.1168 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.0628 \\ 0.6917 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k), \quad (3)$$

$$y(k) = [1 \ 0 \ 0 \ 0]x(k). \quad (4)$$

其中 $x_4 = u(k-1)$. 由此可写出系统输出与控制信号间的传递函数:

$$G_u(z) = \frac{0.0628(z + 38.8239)(z + 0.5233)}{z(z-1)^2}. \quad (5)$$

该模型可进而写成如下形式:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-d) + v(k). \quad (6)$$

其中 $v(k)$ 为系统的不确定性, d 是离散系统对应的时间延迟 ($d = 1$), 系数多项式分别如下:

$$A(z^{-1}) = 1 - 2z^{-1} + z^{-2},$$

$$B(z^{-1}) = 0.0628 + 2.471z^{-1} + 1.2759z^{-2}.$$

3 鲁棒自适应控制器设计 (Robust adaptive controller design)

研究表明, 自适应控制和滑模控制的有机结合^[5]在改善系统跟踪性能和鲁棒性方面效果显著, 因此本文采用自适应滑模控制理论设计硬盘驱动器读写头跟踪控制器. 首先定义如下滑模:

$$s(k) = P(z^{-1})[y(k) - r(k)] + Q(z^{-1})u(k-d). \quad (7)$$

其中多项式 $P(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 分别为

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1z^{-1} + p_2z^{-2},$$

$$Q(z^{-1}) = Q_0(z^{-1})(1 - z^{-1}).$$

如果系统参数已知, 上述多项式的选择见文献[6]. 在此基础上引入 Diophantine 方程

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}F(z^{-1}), \quad (8)$$

$$G(z^{-1}) = E(z^{-1})B(z^{-1}) + Q(z^{-1}). \quad (9)$$

其中

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1},$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + g_2z^{-2}.$$

于是, 根据滑模控制理论可得到如下控制律:

$$u(k) = -[G(z^{-1})]^{-1}[F(z^{-1})y(k) - P(z^{-1})r(k+d)]. \quad (10)$$

进而可将前面定义的滑模改写为:

$$s(k) = G(z^{-1})u(k) + F(z^{-1})y(k) - P(z^{-1})r(k+d) + w(k+d). \quad (11)$$

这里

$$w(k+d) = E(z^{-1})v(k+d). \quad (12)$$

由于实际上硬盘驱动器读写头伺服控制系统的参数是未知的, 所以无法确定 Diophantine 方程中的相关多项式, 从而也不能由上述控制律实现滑模 $s(k) = 0$. 因此, 本文设计了一种自适应控制策略, 通过对多项式 $G(z^{-1})$ 和 $F(z^{-1})$ 的估计而使滑模渐近趋于零. 为此, 将滑模写为如下形式:

$$\bar{s}(k) = s(k) + P(z^{-1})r(k+d). \quad (13)$$

其中

$$\bar{s}(k) = \phi^T(k)\theta + w(k+d),$$

$$\phi^T(k) = [u(k), u(k-1), u(k-2), y(k), y(k-1)],$$

$$\theta = [g_0, g_1, g_2, f_0, f_1]^T.$$

为了便于设计自适应控制器, 不失一般性, 假设硬盘驱动器读写头伺服控制系统中的不确定性满足如下条件

$$w(k) = w_1(k) + w_2(k), \quad (14)$$

$$\|w_1(k)\| \leq \alpha \|\phi(k-d)\|_2, \quad (15)$$

$$\|w_2(k)\|_2 \leq \rho. \quad (16)$$

这里 α 是一个很小的已知正常数, ρ 为未知正常数.

现在令 $\hat{\theta}(k)$ 为 k 时刻未知参数 θ 的估计值, 定义估计误差为

$$e(k) = \bar{s}(k) - \phi^T(k-d)\hat{\theta}(k-d), \quad (17)$$

也可写为

$$e(k) = \phi^T(k-d)[\theta - \hat{\theta}(k-d)] + w_1(k) + w_2(k). \quad (18)$$

由于 ρ 上界未知, 为了求其估计值 $\hat{\rho}(k-d)$, 定义如下函数

$$\lambda(k) = \begin{cases} 1 - \frac{\hat{\eta}(k-d)}{|e(k)|}, & |e(k)| > \hat{\eta}(k-d), \\ 0, & |e(k)| \leq \hat{\eta}(k-d). \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\hat{\eta}(k-d) = \alpha \|\phi(k-d)\|_2 + \hat{\rho}(k-d). \quad (20)$$

于是可由下面正则化关系迭代地得到

$$\hat{\rho}(k) = \hat{\rho}(k-d) + \frac{\epsilon \lambda(k) |e(k)|}{1 + \phi^T(k-d)\phi(k-d)}. \quad (21)$$

这里 $0 < \epsilon < 1$, 初值 $\hat{\rho}(0)$ 可选为很小的任意正常

数. 进而根据文献[7]可以得到

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-d) + \frac{\varepsilon \lambda(k) \phi(k-d) e(k)}{1 + \phi^T(k-d) \phi(k-d)}, \quad (22)$$

$$\hat{\theta}(k) = \text{proj}\{\hat{\theta}'(k)\}. \quad (23)$$

其中 proj 为投影算子^[7], 且有下述关系

$$\text{proj}\{\hat{f}_i'(k)\} = \hat{f}_i'(k), \quad i = 0, 1,$$

$$\text{proj}\{\hat{g}_i'(k)\} = \hat{g}_i'(k), \quad i = 1, 2,$$

$$\text{proj}\{\hat{g}_0'(k)\} = \begin{cases} \hat{g}_0'(k), & \hat{g}_0'(k) \geq g_{0m}, \\ g_{0m}, & \hat{g}_0'(k) < g_{0m}. \end{cases}$$

选择 $\hat{g}_0(0) \geq g_{0m}$ ($0 < g_{0m} \leq g_0$), 其它参数的初值可选为任意常数.

在此估计算法的基础上, 可以写出如下准滑模自适应控制律:

$$u(k) = -[\hat{G}_k(z^{-1})]^{-1}[\hat{F}_k(z^{-1})y(k) - P(z^{-1})r(k+d) - \delta s(k)]. \quad (24)$$

这里加权因子 $0 < \delta < 1$, 引入该因子主要是为了调整硬盘驱动器读写头伺服控制系统的响应, 并对控制信号的幅值进行控制.

下面来证明该算法的稳定性和收敛性. 首先定义

$$\bar{\theta}(k) = \hat{\theta}(k) - \theta, \quad (25)$$

$$\bar{\rho}(k) = \hat{\rho}(k) - \rho, \quad (26)$$

容易得到

$$\bar{\theta}^T(k) \bar{\theta}(k) \leq \bar{\theta}'^T(k) \bar{\theta}'(k). \quad (27)$$

接下来引入如下 Lyapunov 函数

$$V(k) = \bar{\theta}^T(k) \bar{\theta}(k) + \bar{\rho}^2(k). \quad (28)$$

由于

$$e(k) w_2(k-d) - |e(k)| \rho \leq 0, \quad (29)$$

并利用 $\eta(k-d)$ 和 $\lambda(k)$ 的定义, 可以证明有下述关系成立

$$V(k) - V(k-d) \leq -\frac{\varepsilon \lambda^2(k) e^2(k) (2-\varepsilon)}{1 + \phi^T(k-d) \phi(k-d)}. \quad (30)$$

于是根据 Lyapunov 定理, 上述控制系统是 Lyapunov 意义下渐近稳定的.

另外, 由上述关系可以得到

$$V(N) - V(0) \leq - (2-\varepsilon) \varepsilon \sum_{k=1}^N \frac{\lambda^2(k) e^2(k)}{1 + \phi^T(k-d) \phi(k-d)}. \quad (31)$$

由于 $V(N) > 0$, 故可得到下述收敛性结论:

1) 对于任何 $k \geq 0$, $\hat{\theta}(k)$ 和 $\hat{\rho}(k)$ 总有界.

2) $\hat{g}_0(k) \geq g_{0m}$.

3)

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N \frac{\lambda^2(k) e^2(k)}{1 + \phi^T(k-d) \phi(k-d)} < \infty.$$

$$4) \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda^2(k) e^2(k)}{1 + \phi^T(k-d) \phi(k-d)} = 0;$$

$$5) \lim_{k \rightarrow \infty} [\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-d)] = 0;$$

$$6) \lim_{k \rightarrow \infty} [\hat{\rho}(k) - \hat{\rho}(k-d)] = 0.$$

上述结论说明本文的硬盘驱动器读写头伺服控制系统自适应控制方法能够保证系统的收敛性和稳定性.

4 仿真和实验结果 (Results of simulation and experiment)

图 1 和图 2 给出了采样周期为 220 μs 时分别采用文献[3]和本文的控制方法对硬盘驱动器读写头伺服控制系统进行控制的仿真结果, 图 1 和图 2 分别表示无扰动和在初始时刻加入扰动两种情况下的硬盘驱动器读写头跟踪控制响应曲线. 从图中可以看出文献[3]的控制方法虽然可以较为有效地实现硬盘驱动器读写头的跟踪控制, 但跟踪误差波动范围很大, 跟踪时间较长, 且可能导致闭环系统不稳定. 另外, 这种高阶控制器无法克服硬盘驱动器读写头伺服系统中的噪声影响, 也不便于设计和实施. 而采用本文的方法在两种情况下都可以快速而准确地实现硬盘驱动器读写头伺服跟踪控制, 在快速性和跟踪偏差方面明显优于文献[3]的方法. 另外, 仿真实验中发现加权因子 δ 越小系统响应速度越快, 但超调量也越大, 反之亦然. 图中是系数选为 $\delta = 0.5$ 时的结果.

我们对一台 PIII450PC 计算机的硬盘驱动器读写头进行了多次跟踪控制实验, 图 3 给出了没有加入扰动信号时的实验结果, 图 4 给出了加入幅值为 0.015V 的初始扰动信号时的实验结果. 从图 3 和图 4 的性能对比中可以看出, 当加入初始扰动信号时, 在本文的控制方法作用下硬盘驱动器读写头跟踪时间在 0.02 秒左右, 而文献[3]的控制方法作用下硬盘驱动器读写头跟踪时间约为 0.06 秒, 在最大跟踪偏差方面也是前者明显优于后者. 在没有扰动作用的情况下, 本文所提的控制方法更是在快速性和准确性等性能方面明显优于文献[3]的方法. 特别值得说明的一点是, 在普通的 PIII450 计算机上完成文献[3]中控制算法的一次计算大约需要时间 219.8 微秒, 即约等于采样周期, 这说明这种方法快速性比较差. 而本文的控制方法计算量较小, 可更加快速地完成硬盘驱动器读写头跟踪控制.

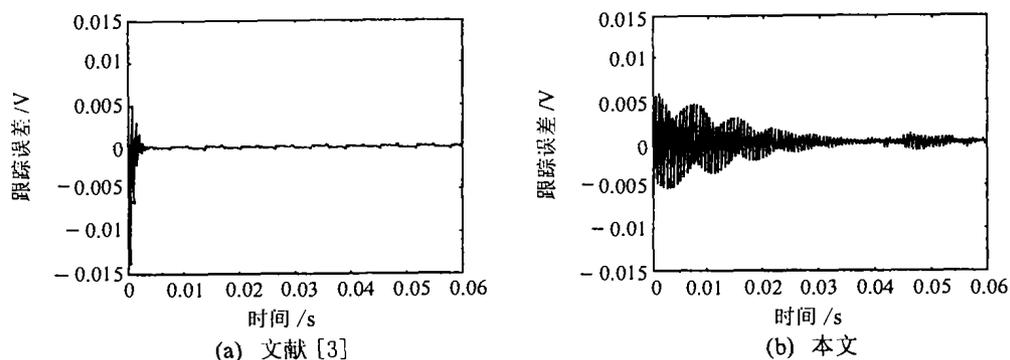


图1 无扰动时的仿真结果比较

Fig. 1 Simulation results comparison (no disturbance)

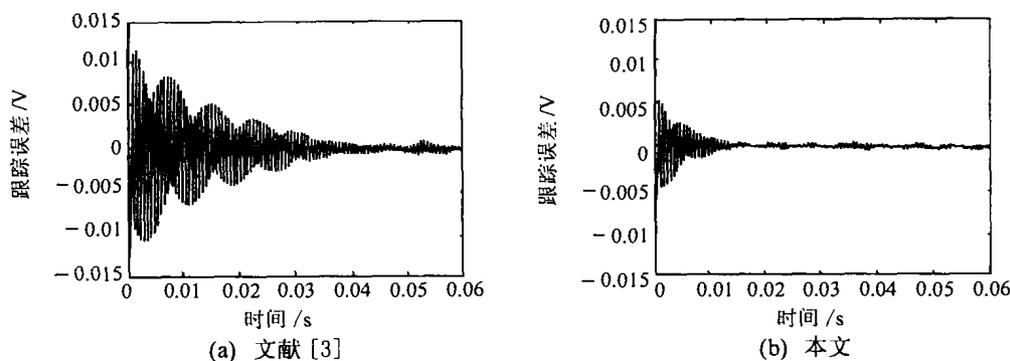


图2 有扰动时的仿真结果比较

Fig. 2 Simulation results comparison (disturbance)

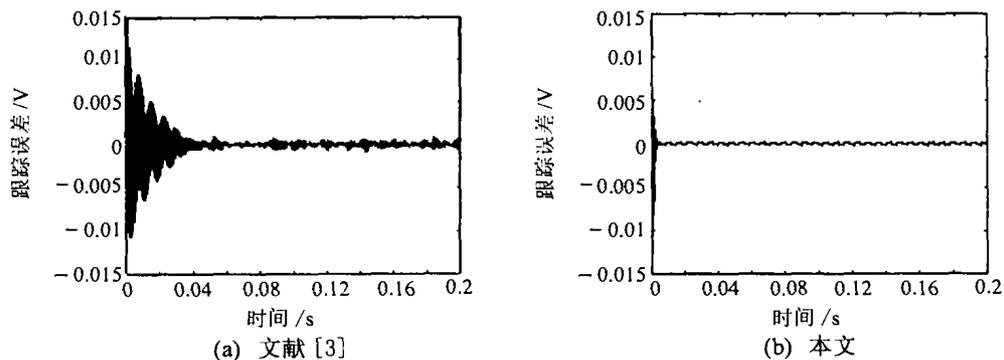


图3 无扰动时的实验结果比较

Fig. 3 Experiment results comparison (no disturbance)

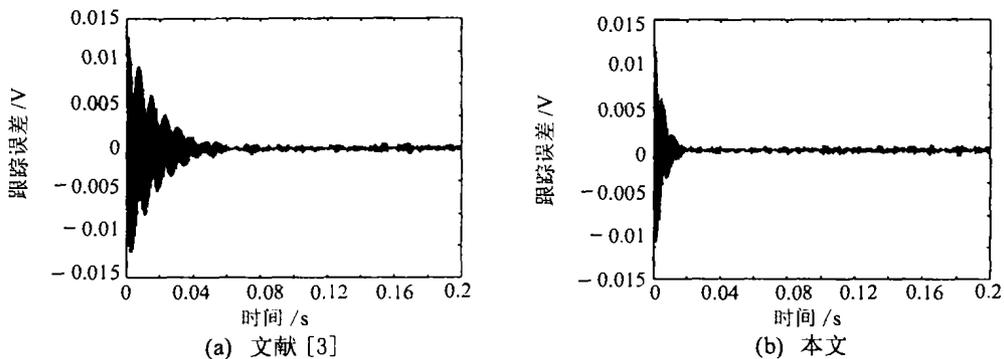


图4 有扰动时的实验结果比较

Fig. 4 Experiment results comparison (disturbance)

特征值是 $\lambda_1 = 2$ 和 $\lambda_2 = -2$. 由定理 1 得

$$\sigma(\bar{A}) = \sigma(M + 2H) \cup \sigma(M - 2H).$$

而 $M + 2H = \begin{bmatrix} 1 & -12 \\ 6 & -8 \end{bmatrix}$, 且

$$\sigma(M + 2H) = \left\{ -\frac{7}{2} + \frac{3}{2}\sqrt{23}i, -\frac{7}{2} - \frac{3}{2}\sqrt{23}i \right\};$$

$M - 2H = \begin{bmatrix} -3 & -8 \\ -2 & -12 \end{bmatrix}$, 且

$$\sigma(M - 2H) = \left\{ -\frac{15}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{145}, -\frac{15}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{145} \right\}.$$

从而

$$\sigma(\bar{A}) = \left\{ -\frac{7}{2} + \frac{3}{2}\sqrt{23}i, -\frac{7}{2} - \frac{3}{2}\sqrt{23}i, \right. \\ \left. -\frac{15}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{145}, -\frac{15}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{145} \right\}.$$

4 结束语(Conclusion)

本文找到一种非奇异变换, 得到(7)式的准解耦形式. 如果拟对称组合大系统中的影响因子矩阵具有某种特性, 使得它相似于对角阵, 则拟对称组合大系统能够完全分块解耦, 从而为分析系统带来简便.

参考文献(References)

- [1] Zhang Siying. Symmetry and similarity structure of the complex con-

trol systems [J]. Control Theory and Applications, 1994, 11(2): 231 - 237

- [2] Yang G, Zhang S. Structural properties of large-scale systems possessing similar structures [J]. Automatica, 1995, 31(7): 1011 - 1017
- [3] Huang Shoudong, Zhang Siying. Some control problems for symmetric circulant composite systems [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(4): 478 - 482
- [4] Huang Tingzhu, You Zhaoyong. Generalizations of diagonally dominances and distribution of eigenvalues [J]. Cata Mathematicae Applicatae Sinica, 1998, 21(2): 277 - 281 (in Chinese)
- [5] Huang Shoudong. The analysis and control for the complex systems with symmetric circulant structure [D]. Shenyang: Northeastern University, 1998 (in Chinese)

本文作者简介

李建华 1957年生. 1982年毕业于沈阳机电学院应用数学专业, 现为沈阳大学基础部副教授, 研究方向为组合大系统理论及应用, 进化计算与智能控制, 系统的鲁棒性. Email: ljhh5000@sina.com

李凌圣 1963年生. 1985年毕业于沈阳师范学院数学专业, 1994年获工学硕士学位, 现为沈阳大学自动化专业副教授, 研究方向为组合大系统的结构分析, 智能控制.

李彦平 1957年生. 1982年01月毕业于东北大学, 95年03月获东北大学自动控制理论及应用专业工学博士学位, 现为沈阳大学科研处处长, 教授. 主要研究方向为复杂系统理论及应用, 计算机控制与仿真.

(上接第 800 页)

参考文献(References)

- [1] Hanselmann H, Engelke A. LQG-control of a highly resonant disk drive head positioning actuator [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 1996, 35(1): 100 - 104
- [2] Hasegawa S. Digital servo control for head positioning of disk drive [J]. FUJITSU Sci. & Tech. J., 1999, 34(4): 378 - 390
- [3] Hwang Daw-shang. An integrated control method for a hard disk drive [J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Tech., 1998, 6(6) 216 - 224
- [4] Franklin G F. Digital Control of Dynamic Systems [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1998

- [5] Chan C Y. Discrete adaptive sliding mode tracking controller [J]. Automatica, 1997, 33: 999 - 1002
- [6] Astrom K J, Wittenmark B. Adaptive Control [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1996
- [7] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive Filtering, Prediction and Control [M]. Engle-Wood, Cliffs, NJ; Prentice-Hall Inc., 1984

本文作者简介

郭戈 1972年生. 1994年毕业于东北大学, 1998在东北大学获博士学位. 现为甘肃工业大学副教授, 主要研究方向: 复杂工业过程建模与控制, 智能控制理论与应用等. Email: guog@gsut.edu.cn