

扰动抑制无模型自适应控制的鲁棒性分析

卜旭辉, 侯忠生, 金尚泰

(北京交通大学 先进控制系统研究所; 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对一类存在测量扰动的SISO非线性离散时间系统, 研究无模型自适应控制算法的扰动作用问题. 首先给出了系统输出误差与测量扰动的关系, 分析了测量扰动对控制性能的影响. 然后提出了一种带有滤波器的改进无模型自适应控制算法, 该算法较常规无模型自适应控制算法可有效抑制测量扰动的作用. 仿真结果验证了理论分析的正确性.

关键词: 无模型自适应控制; 测量扰动; 滤波算法; 鲁棒性

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

The robustness of model-free adaptive control with disturbance suppression

BU Xu-hui, HOU Zhong-sheng, JIN Shang-tai

(Advanced Control Systems Lab; School of Electronics and Information Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For a class of single-input single-output(SISO) nonlinear discrete-time systems, the measurement disturbance impacts to a model-free adaptive control are considered. The relationship between the output error and the measurement disturbance are given, and the influence of the measurement disturbance is also analyzed. Then, an improved model-free adaptive control algorithm with a filter is proposed, which suppresses the measurement disturbance effectively. The analysis is supported by simulations.

Key words: model-free adaptive control; measurement disturbance; filtering algorithm; robustness

1 引言(Introduction)

无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC) 理论最早于1994年提出, 该方法控制器设计仅用被控系统的I/O数据, 不包括系统的任何模型信息, 且能够实现受控系统的参数自适应和结构自适应控制, 是一种典型的无模型方法^[1,2]. 经过十几年的发展, 无模型自适应控制方法无论在理论上还是在实际应用中, 都取得了较大的成果^[3~11]. 然而, 无模型自适应控制的鲁棒性问题至今尚无研究. 传统基于模型的控制理论和方法, 其鲁棒性是根据不确定性或未建模动态定义的, 由于无模型自适应控制算法控制器的设计不包括任何受控系统的模型信息, 因此, 基于模型不确定的鲁棒性在无模型自适应控制理论中失去了意义. 文献[12]指出, 此种类型的无模型控制方法(也称数据驱动控制方法), 其鲁棒性应基于系统的性能在什么样的数据丢失水平以及数据噪声扰动下, 控制系统性能如稳定性、收敛性等仍然能保持.

本文研究当被控系统存在测量扰动时无模型自适应控制算法的鲁棒性问题. 首先分析了测量扰动对控制算法的影响, 其次提出一种带有滤波器的改进算法, 并在理论上分析了该算法可有效抑制测量扰动的作用.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑SISO非线性离散时间系统:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k), \dots, y(k-n_y), \\ &\quad u(k), \dots, u(k-n_u)), \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $y(k)$, $u(k)$ 分别表示系统的输入与输出, n_y , n_u 分别表示系统阶数. 为了严格本文的讨论, 先对系统(1)做如下假设:

假设 1 假设对某一系统一致有界的期望输出信号 $y^*(k+1)$, 存在一致有界的可行控制输入信号, 使得系统在此控制输入信号的驱动下其输出等于系统的期望输出.

假设 2 $f(\cdot)$ 关于系统当前的控制输入信号

$u(k)$ 的偏导数是连续的.

假设3 系统(1)是广义Lipschitz的, 即满足对任意的 k 和 $\Delta u(k) \neq 0$ 有

$$|\Delta y(k+1)| \leq b |\Delta u(k)|,$$

其中:

$$\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k),$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1),$$

b 是常数.

注1 上述3个假设并不苛刻. 假设1是对受控系统的基本假设, 如果它不满足, 则这样的系统其控制是不可能的. 假设2包括一大类非线性系统. 假设3是对系统输出变化量的一种限制, 即有界的输入能量变化产生有界的输出能量变化, 显然它包括一类非线性系统.

引理1 对非线性系统(1), 如果满足假设1~3, 那么, 当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时, 一定存在一个伪偏导数(pseudo-partial-derivative, PPD) $\varphi(k)$, 使得

$$\Delta y(k+1) = \varphi(k) \Delta u(k), \quad (2)$$

且 $|\varphi(k)| \leq b$, 其中 b 是一个常数.

引理1的详细证明过程参见文献[3]. 由引理1得系统式(1)的紧格式动态线性化模型为

$$y(k+1) = y(k) + \varphi(k) \Delta u(k). \quad (3)$$

若系统存在测量扰动 $w(k)$, $|w(k)| \leq b_w$, b_w 为正的常数, 则系统的测量输出为

$$y_m(k) = y(k) + w(k). \quad (4)$$

此时, 基于紧格式线性化的无模型自适应控制算法(CFL-MFAC)为

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}(k) &= \hat{\varphi}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} (\Delta y_m(k) - \\ &\quad \hat{\varphi}(k-1) \Delta u(k-1)), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(1), \text{ 如果 } |\hat{\varphi}(k)| \leq \varepsilon, \text{ 或者 } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}(k)}{\lambda + \hat{\varphi}^2(k)} (y^*(k+1) - y_m(k)), \quad (7)$$

其中: $\Delta y_m(k) = y_m(k) - y_m(k-1)$, ε 为一个小的正数, ρ, η 为步长, λ, μ 为权重因子.

注2 上述CFL-MFAC方案中, 式(6)的引入是为了使引理1的条件得到满足, 同时也是为了使伪偏导数估计算法式(5)具有更强的对时变参数的跟踪能力.

假设4 系统的伪偏导数(PPD) $\varphi(k)$ 满足 $\varphi(k) \geq b_1 > 0$, 其中 b_1 为常数.

注3 此条假设是许多实际系统能够满足的条件. 它的物理意义很明显, 即控制输入增加时, 相应的下一时刻的系统输出应该也是增加的. 此条件也可以说是非线性系统

的一种“拟线性系统特征”. 很多实际系统均能满足此条假设, 如温度控制系统, 压力控制系统等.

3 扰动作用分析(Disturbance aspects analysis)

在分析测量扰动对系统的作用之前, 首先给出如下两个引理:

引理2 对于存在测量扰动 $w(k)$ 的非线性系统(1), 在假设1~4满足的条件下, 采用式(5)~(7)的CFL-MFAC方案, 若选取 $\mu > 0, \eta \in (0, 1]$, 则伪偏导数估计值 $\hat{\varphi}(k)$ 有界.

证 当 $|\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon$ 时, 由算法(6)可知, $\hat{\varphi}(k)$ 是有界的.

当 $|\Delta u(k-1)| > \varepsilon$ 时, 在式(5)两边同时减去 $\varphi(k)$, 并记 $\tilde{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(k) - \varphi(k)$, 可得

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(k) &= \tilde{\varphi}(k-1) - \Delta \varphi(k) + \\ &\quad \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} (\Delta y_m(k) - \\ &\quad \hat{\varphi}(k-1) \Delta u(k-1)). \end{aligned} \quad (8)$$

利用式(3)和式(4), 式(8)可变为

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(k) &= (1 - \frac{\eta \Delta u^2(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)}) \tilde{\varphi}(k-1) + \\ &\quad \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)} \Delta w(k) - \Delta \varphi(k), \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\Delta w(k) = w(k) - w(k-1)$. 由式(9)可得

$$\begin{aligned} |\tilde{\varphi}(k)| &< \\ &|1 - \frac{\eta \Delta u^2(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)}| |\tilde{\varphi}(k-1)| + \\ &|\frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)}| |\Delta w(k)| + |\Delta \varphi(k)|. \end{aligned} \quad (10)$$

选择 $\mu > 0, \eta \in (0, 1]$, 则下式成立:

$$0 < 1 - \frac{\eta \Delta u^2(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)} < 1, \quad (11)$$

同时,

$$\begin{aligned} |\frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u^2(k-1)}| &= \frac{\eta |\Delta u(k-1)|}{\mu + \Delta u^2(k-1)} = \\ &\frac{\eta}{\frac{\mu}{|\Delta u(k-1)|} + |\Delta u(k-1)|} \leq \frac{\eta}{2\sqrt{\mu}}. \end{aligned} \quad (12)$$

由于 $\Delta w(k), \Delta \varphi(k)$ 有界, 利用式(10)~(12)可知 $\tilde{\varphi}(k)$ 有界. 又有引理1知 $\varphi(k)$ 有界, 从而 $\hat{\varphi}(k)$ 有界.

证毕.

引理3 记 $\vartheta(k) = \frac{\rho \varphi(k) \hat{\varphi}(k)}{\lambda + \hat{\varphi}^2(k)}$, 其中: $\rho > 0, \lambda > 0$, 若选择 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$, 则存在常数 d_1, d_2 满足

$$0 < d_1 \leq \vartheta(k) \leq d_2 < 1.$$

证 根据引理2和式(6), 可假设伪偏导数估计值满足 $0 < \hat{b}_1 \leq \hat{\varphi}(k) \leq \hat{b}$, 式中 $\hat{b}_1, \hat{b}$ 为常数.

令

$$h(x) = \frac{x}{\lambda + x^2} = \frac{1}{\frac{\lambda}{x} + x}.$$

如图1所示, 考察函数 $h(x)$ 的单调性可得: 当 $x \geq \sqrt{\lambda}$ 时, $h(x)$ 为减函数; 当 $x < \sqrt{\lambda}$ 时, $h(x)$ 为增函数.

根据图1可得

$$\text{情形 I} \quad \text{当 } \hat{b} \leq \sqrt{\lambda} \text{ 时, } \frac{\hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2} \leq h(\hat{\varphi}(k)) \leq \frac{\hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}.$$

$$\text{情形 II} \quad \text{当 } \hat{b}_1 \leq \sqrt{\lambda} \leq \hat{b} \text{ 时, } \min\left(\frac{\hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}, \frac{\hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}\right) \leq h(\hat{\varphi}(k)) \leq \frac{1}{2\sqrt{\lambda}}.$$

$$\text{情形 III} \quad \text{当 } \hat{b}_1 \geq \sqrt{\lambda} \text{ 时, } \frac{\hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2} \leq h(\hat{\varphi}(k)) \leq \frac{\hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}.$$

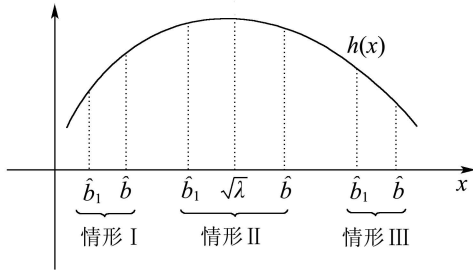


图1 函数 $h(x)$ 的单调性

Fig. 1 The monotonicity of $h(x)$

由 $\vartheta(k) = \rho \varphi(k) h(\hat{\varphi}(k))$ 和 $0 \leq b_1 \leq \varphi(k) \leq b$ 可得

$$\text{情形 I} \quad \frac{\rho b_1 \hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2} \leq \vartheta(k) \leq \frac{\rho b \hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}.$$

$$\text{情形 II} \quad \rho b_1 \min\left(\frac{\hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}, \frac{\hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}\right) \leq \vartheta(k) \leq \frac{\rho b}{2\sqrt{\lambda}}.$$

$$\text{情形 III} \quad d \frac{\rho b_1 \hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2} \leq \vartheta(k) \leq \frac{\rho b \hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}.$$

因此, 存在常数 d_1, d_2 满足 $d_1 \leq \vartheta(k) \leq d_2$, 且

$$\text{情形 I} \quad d_1 = \frac{\rho b_1 \hat{b}_1^2}{\lambda + \hat{b}_1^2}, d_2 = \frac{\rho b \hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}.$$

$$\text{情形 II} \quad d_1 = \rho b_1 \min\left(\frac{\hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}, \frac{\hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}\right), d_2 =$$

$$\frac{\rho b}{2\sqrt{\lambda}}.$$

$$\text{情形 III} \quad d_1 = \frac{\rho b_1 \hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2}, d_2 = \frac{\rho b \hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2}.$$

由假设3, 4可知 $d_1 > 0$. 若 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$, 则有

$$\text{情形 I} \quad d_2 = \frac{\rho b}{2\sqrt{\lambda}} < 1.$$

$$\text{情形 II} \quad d_2 = \frac{\rho b \hat{b}}{\lambda + \hat{b}^2} = \frac{\rho b}{\frac{\lambda}{\hat{b}} + \hat{b}} \leq \frac{\rho b}{2\sqrt{\lambda}} < 1.$$

$$\text{情形 III} \quad d_2 = \frac{\rho b \hat{b}_1}{\lambda + \hat{b}_1^2} < 1.$$

因此, 对于所有情形 $0 < d_1 \leq \vartheta(k) \leq d_2 < 1$ 均成立. 证毕.

定义系统输出误差为 $e(k) = y^* - y(k)$, 测量误差为 $e_m(k) = y^* - y_m(k)$. 由于 $y(k)$ 为系统的真实输出, 而 $y_m(k)$ 是受到测量噪声污染以后的测量输出, 因此, 笔者研究系统控制性能时考虑的是输出误差 $e(k)$ 而并非测量误差 $e_m(k)$. 根据引理2和引理3, 给出如下定理:

定理 1 对于存在测量扰动的非线性系统式(1), 在假设1~4满足的条件下, 采用式(5)~(7)的 CFL-MFAC 方案, 当系统的期望输出 $y^*(k+1)$ 为常数时, 若 ρ, λ 的选取满足 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$, 则系统输出误差满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| < \frac{b_w}{d_1}. \quad (13)$$

证 由式(4)可知

$$e_m(k) = e(k) - w(k), \quad (14)$$

利用式(7)得

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}(k)}{\lambda + \hat{\varphi}^2(k)} e_m(k). \quad (15)$$

由式(3)可得

$$y^* - y(k+1) = y^* - y(k) - \varphi(k) \Delta u(k). \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)可得

$$e(k+1) = (1 - \vartheta(k))e(k) + \vartheta(k)w(k), \quad (17)$$

因此,

$$|e(k+1)| \leq |(1 - \vartheta(k))| |e(k)| + |\vartheta(k)| |w(k)|. \quad (18)$$

若参数 ρ, λ 的选择满足 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$ 时, 由式(18)和引理3得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| \leq \frac{d_2 b_w}{d_1} < \frac{b_w}{d_1}. \quad (19)$$

证毕.

注 4 由文献[3]知, 当系统不存在测量扰动时, 输出误差收敛到0. 而式(13)则指出系统存在测量扰动时输出误差收敛到一个不为零的常数. 因此, 测量扰动的引入破坏了系统的控制性能. 为此, 本文提出一种带有滤波器的改进无模型自适应控制算法.

4 带有滤波器的扰动抑制算法(The disturbance suppression algorithm with filtering)

设计如下带有滤波器的无模型自适应控制算法:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}(k)}{\lambda + \hat{\varphi}^2(k)} z(k), \quad (20)$$

$$z(k) = L(q)e_m(k), \quad (21)$$

其中: $L(q)$ 为一线性滤波器, $z(k)$ 为误差信号 $e_m(k)$ 滤波处理后的信号.

注5 由于实际过程中的测量扰动为高频信号, 因此应选择为低通滤波器. 根据滤波器的原理可知^[13]

$$z(k) = L(q)e_m(k) = L(q)(e(k) - w(k)) = L(q)e(k) + \zeta(k), \quad (22)$$

式中 $\zeta(k)$ 为滤波误差, 且满足 $|\zeta(k)| < b_\zeta < b_w$.

定理2 对于存在测量扰动的非线性系统式(1), 在假设1~4满足的条件下, 采用带有滤波器的无模型自适应控制算法, 当 $y^*(k+1)$ 为常数时, 选择控制器参数满足 $\lambda > \frac{(\rho b)^2}{4}$, 若滤波器对于所有 $\alpha \in (0, 1)$ 均满足 $|1 - \alpha L(q)| < 1$, 则系统输出误差满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| < \frac{b_\zeta}{d_1}. \quad (23)$$

证 由式(3)(20)和式(22)可得

$$y(k+1) = \begin{cases} \frac{y(k)}{1 + y(k)^2} + u(k)^3, & k \leq 500, \\ \frac{y(k)y(k-1)y(k-2)u(k-1)(y(k-2)-1) + a(k)u(k)}{1 + y(k-1)^2 + y(k-2)^2}, & k > 500. \end{cases} \quad (27)$$

系统的控制目标为

$$y^*(k) = \begin{cases} 1, & 1 \leq k \leq 500, \\ -1, & 500 < k \leq 1000. \end{cases}$$

该系统是由两个非线性子系统串联组成, $a(k) = 1 + 2 * \text{round}(k/200)$ 是一个阶跃的时变参数, 此系统结构、阶数和参数均时变. 测量扰动 $w(k) = 0.2 * \text{randn}(1, 1000)$. 系统初值设置为 $u(1:2) = 0$, $y(1) = -1$, $y(2) = 1$, $y(3) = 0.5$, 伪偏导数的初值 $\hat{\varphi}(1) = 2$, $\varepsilon = 10^{-5}$, 伪偏导数首项的重设值为0.5, 控制器参数设置为

$$\rho = 1, \lambda = 2, \eta = 1, \mu = 1,$$

滤波器 $L(q)$ 选择为

$$L(q) = \frac{1}{-0.1q^2 - 0.5q + 1}.$$

对于所有 $\alpha \in (0, 1)$, $|1 - \alpha L(q)|$ 的Nyquist曲线均位于如图2所示的区域内, 显然除了 $\omega \rightarrow \infty$ 外均满

$$e(k+1) = [1 - L(q)\vartheta(k)]e(k) + \vartheta(k)\zeta(k).$$

(24)

根据引理3可得

$$\begin{aligned} |e(k+1)| &\leq \\ |1 - L(q)\vartheta(k)| |e(k)| + |\vartheta(k)| |\zeta(k)| &\leq \\ |1 - L(q)\vartheta(k)| |e(k)| + d_2 b_\zeta. \end{aligned}$$

由于 $L(q)$ 对于所有 $\alpha \in (0, 1)$ 均满足 $|1 - \alpha L(q)| < 1$, 而 $\vartheta(k)$ 满足 $0 < \vartheta(k) < 1$, 因此

$$|1 - L(q)\vartheta(k)| < 1. \quad (25)$$

利用式(25)(26)可知

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |e(k)| \leq \frac{d_2 b_\zeta}{d_1} < \frac{b_\zeta}{d_1}. \quad (26)$$

证毕.

注6 比较式(13)和式(23), 由于 $\frac{b_\zeta}{d_1} < \frac{b_w}{d_1}$, 故采用改进的MFAC算法后系统输出误差的收敛域变小, 因此改进的MFAC算法可有效抑制测量扰动的作用.

5 仿真研究(Simulation study)

本文采用MATLAB软件进行仿真实验. 考虑如下非线性系统:

足 $|1 - \alpha L(q)| < 1$. 采用MFAC和带有滤波器的MFAC两种控制算法, 仿真结果如图3和图4所示. 图3可以看出系统PPD满足假设4的条件, 图4表明测量扰动的作用使得MFAC的控制效果变坏, 当采用带有滤波器的改进算法后, 测量扰动的作用得到了有效的抑制.

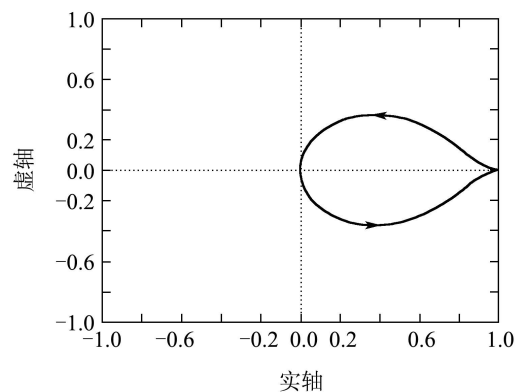


图2 $|1 - \alpha L(q)|$ 的Nyquist曲线

Fig. 2 Nyquist curve of $|1 - \alpha L(q)|$

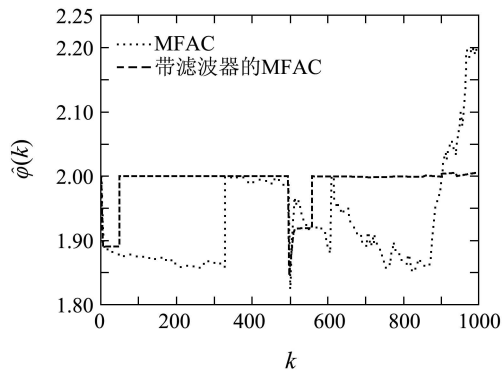


图3 伪偏导数的估计值

Fig. 3 The simulation result of PPD

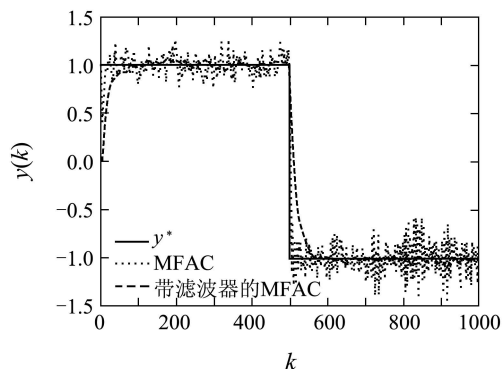


图4 系统输出变量的仿真结果

Fig. 4 The simulation result of output variables

6 结论(Conclusions)

针对一类存在测量扰动的SISO非线性离散时间系统,研究了无模型自适应控制算法的扰动作用问题.首先分析了测量扰动对控制系统的影响,给出了系统收敛误差与扰动信号的关系.然后提出了一种带有滤波器的改进算法,并证明了该算法可有效抑制测量扰动的作用.仿真结果验证了理论分析的正确性.

参考文献(References):

- [1] 侯忠生. 非线性系统参数辨识、自适应控制及无模型学习自适应控制[D]. 沈阳: 东北大学, 1994.
(HOU Zhongsheng. *The parameter identification, adaptive control and model free learning adaptive control for nonlinear systems*[D]. Shenyang: Northeastern University, 1994.)
- [2] HOU Z S, HUANG W H. The model-free learning adaptive control of a class of SISO nonlinear systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. New Mexico, USA: IEEE, 1997: 343 – 344
- [3] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(HOU Zhongsheng. *Nonparametric Models and Its Adaptive Control Theory*[M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [4] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 – 592.
(HOU Zhongsheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 – 592.)
- [5] 马洁, 陈智勇, 侯忠生. 型舰船综合减摇系统无模型自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(11): 1289 – 1292.
(MA Jie, CHEN Zhiyong, HOU Zhongsheng. Model-free adaptive control of integrated roll-reducing system for large warships[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1289 – 1292.)
- [6] TAN K K, LEE T H, HUANG S N, et al. Adaptive-predictive control of a class of SISO nonlinear systems[J]. *Dynamics and Control*, 2001, 11(2): 151 – 174.
- [7] TAN K K, HUANG S N, LEE T H, et al. Adaptive predictive PI control of a class of siso systems[C] // *Proceedings of the American Control Conference*. San Diego, USA: IEEE, 1999: 3848 – 3852.
- [8] LEANDRO S C, ANTONIO A R C. Model-free adaptive control optimization using a chaotic particle swarm approach[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2009, 41(4): 2001 – 2009.
- [9] LEANDRO S C, MARCELO W P, SUMAR R R, et al. Model-free adaptive control design using evolutionary-neural compensator[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 499 – 508.
- [10] 韩志刚. 无模型控制方法在化肥生产中的应用[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 858 – 863.
(HAN Zhigang. Model free control law in the production of chemical fertilizer [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 858 – 863.)
- [11] CHI R H, HOU Z S. A model-free adaptive control approach for free-way traffic density via ramp metering[J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2008, 4(6): 2823 – 283.
- [12] HOU Z S, XU J X. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650 – 667.
- [13] 加博C·特默斯. 现代滤波器理论与设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1984
(TEMES C C. *Modern Filter Theory and Design*[M]. Beijing: Post and Telecom Press, 1984.)

作者简介:

卜旭辉 (1981—), 男, 博士研究生, 研究领域包括无模型自适应控制理论、学习控制、智能交通系统等, E-mail: buxuhui@gmail.com;

侯忠生 (1962—)男, 教授, 博士生导师, 研究领域包括无模型自适应控制理论、学习控制、智能交通系统、智能信息处理等, E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn;

金尚泰 (1976—), 男, 博士, 讲师, 研究领域包括无模型自适应控制理论、学习控制等, E-mail: jst1101@163com.