

一类变时延时变过程的控制方差性能评估

张登峰^{1,2}, 赵 宇², 赵 超², 苏宏业²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 浙江大学 智能系统与控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 利用强跟踪滤波理论实现了一类单变量时变过程的时变时延和模型参数的联合实时估计, 并将其用于控制过程方差性能的评估. 结合性能评估的FCOR策略, 给出了适于单变量变时延过程方差性能评估的VFCOR算法. 仿真示例说明了该方法的有效性.

关键词: 控制性能评估; 变时延估计; 强跟踪滤波器; VFCOR算法

中图分类号: TP271; TP13 **文献标识码:** A

Control variance performance assessment for a class of time-varying processes with varying time-delay

ZHANG Deng-feng^{1,2}, ZHAO Yu², ZHAO Chao², SU Hong-ye²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China;

2. Institute of Cyber-systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: By the strong-tracking filtering theory, the on-line joint estimation of time delay and model parameters is realized for a class of single-input single-output(SISO) time-varying processes with varying time-delay. Then, combining with the FCOR(filtering and correlation) strategy, the joint estimation method is applied to assess the output variance of the controlled process. The VFCOR(varying time-delay FCOR) algorithm is developed for such kind of processes. Simulation examples are performed to validate the proposed strategy.

Key words: control performance assessment; estimation of variant time-delay; strong tracking filter; variant time-delay FCOR algorithm

1 引言(Introduction)

随着对工业生产过程及产品性能要求的日益提高, 系统控制性能的优劣显得尤为重要. 因此, 工业过程控制系统性能评估(control performance assessment, CPA)技术的研究, 成为近年来一个热点^[1~5]. 其中基于最小方差(minimum variance, MV)控制的方差性能评估技术发展最为迅速^[1,2]. 然而, 大多数结果都针对固定时延过程. 实际上, 由于许多因素的影响, 任何过程的时延参数都会发生变化, 还往往伴随着系统某些结构参数的变化. 然而适于这类过程性能评估的在线时延估计方法却很少. 目前尽管对时延估计的研究成果较多^[6~13], 但大多是针对固定时延或缓变时延参数, 难以在线估计突变时延及其发生变化的时刻, 且难以对时延与系统其它参数进行联合实时估计, 很难用于过程的CPA^[7~9,11]. 强跟踪滤波(strong tracking filtering, STF)理论作为联合估计非线性时变过程状态与参数

的有效方法, 便于在线实时应用, 是一种很好的在线估计策略^[14,15], 用于时变时延信息的估计具有良好的性能^[16]. 因此, 本文针对一类时延呈阶跃变化的单变量随机时变过程, 基于STF理论给出了一种适于过程方差性能评估的时变时延和模型参数联合估计方法. 进而结合方差性能评估的FCOR(filtering and correlation)算法^[2], 提出了适于变时延SISO过程性能评估的VFCOR(Variant time-delay FCOR)策略. 最后通过仿真实验, 表明了本文性能评估策略的有效性.

2 时变时延和模型参数联合估计(Joint estimation of varying time-delay and parameters)

考虑一类单变量时变过程, 其模型为

$$y(t+1) = Q(q^{-1})G(q^{-1})q^{-d(t+1)}[y^{sp}(t+1) - y(t+1)] + e(t+1), \quad (1)$$

收稿日期: 2008-09-02; 收修改稿日期: 2008-12-09.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2007AA04Z172); 国家自然科学基金资助项目(60804027, 60574082); 中国博士后科学基金资助项目(20070411178).

其中 $Q(q^{-1})$ 为控制器模型; $G(q^{-1})$ 为含执行机构的过程模型, 并包含未知时变参数 $\rho(t) \in \mathbb{R}^n$; $e(t+1) = N(q^{-1})a(t+1) \in \mathbb{R}$ 是输出端可测噪声, $a(t+1) \in \mathbb{R}$ 是方差为 $S(t+1)$ 的零均值白噪声. $N(q^{-1}) = D(q^{-1})/[1 - B(t)q^{-1}]$ 为输出端噪声模型, $D(q^{-1})$ 是关于 q^{-1} 的代数多项式, $B(t)$ 是 t 的连续函数. 模型 $Q(q^{-1})$ 、 $G(q^{-1})$ 和 $N(q^{-1})$ 不包含时延信息. q^{-1} 是一步后移算子, 为便于叙述, 在后文中省略该算子. $0 < d(t+1) < \infty$ 是呈阶跃性变化的过程时延参数, 且设为采样周期 T_s 的整数倍, $y(t+1) \in \mathbb{R}$ 为过程输出, $y^{\text{sp}}(t+1) \in \mathbb{R}$ 为参考输入, t 表示采样点. 假设模型 Q 、 G 和 N 是正则有理的适维矩阵, 未知参数 $\rho(t)$ 可辨识, $y^{\text{sp}}(t+1)$ 和 $y(t+1)$ 关于 $d(t+1)$ 和 $\rho(t+1)$ 连续可微, 参数 $d(t)$ 与 $\rho(t)$ 的变化相互独立. 则过程(1)可转换为

$$\begin{aligned} y(t+1) = & QG[y^{\text{sp}}(t+1-d(t+1)) - \\ & y(t+1-d(t+1))] + Na(t+1) \triangleq \\ & h[t+1, d(t+1), \rho(t+1)] + Na(t+1). \end{aligned} \quad (2)$$

注 1 大多数实际过程输出端的有色噪声, 在分析时常看作是白噪声经过模型 N 变换得到. 因此, 即使噪声 $e(t+1)$ 不可测, 利用模型 N 可实现其估计. 而对白噪声 $a(t+1)$, 由过程输出 $y(t+1)$ 可进行估计^[2,4]. 因此, 本文对模型的假设不失一般性.

为估计过程(2)的时延 $d(t)$ 和模型参数 $\rho(t)$, 建立如下估计模型:

$$d(t+1) = d(t), \quad (3a)$$

$$\rho(t+1) = \rho(t), \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} y(t+1) = & h(t+1, d(t+1), \rho(t+1)) + \\ & Na(t+1). \end{aligned} \quad (3c)$$

记状态变量

$$x_d(t) = [d^T(t), \rho^T(t)]^T,$$

输出变量为 $y(t+1)$. 对式(3c)中的 $h(\cdot)$ 进行Taylor级数展开, 取其线性部分, 则式(3c)可改写为

$$\begin{aligned} y(t+1) = & H(t+1, \hat{x}_d(t|t))x_d(t+1) + \\ & w(k+1) + Na(t+1), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} w(t+1) = & h(t+1, \hat{x}_d(t|t)) - \\ & H(t+1, \hat{x}_d(t|t))\hat{x}_d(t|t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$H(t+1, \hat{x}_d(t|t)) = \frac{\partial h(t+1, x_d(t+1))}{\partial x_d} \Big|_{x_d=\hat{x}_d(t|t)}. \quad (6)$$

从而, 根据有色噪声下的扩展Kalman滤波和STF理

论^[14], 得时延和模型参数的联合在线实时估计算法:

$$\hat{x}_d(t|t+1) = \hat{x}_d(t|t) + F(t)\gamma(t), \quad (7)$$

$$\hat{x}_d(t|t) = \hat{x}_d(t-1|t). \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} F(t) = & P(t|t)C^T(t)[C(t)P(t|t) \times \\ & C^T(t) + DS(t)D^T]^{-1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$P(t+1|t+1) = \lambda(t+1)P(t|t+1), \quad (10)$$

$$P(t|t+1) = [I - F(t)C(t)]P(t|t), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma(t) = & y(t+1) - B[y(t) - w(t)] - \\ & w(t+1) - C(t)\hat{x}_d(t|t). \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} C(t) = & H(t+1, \hat{x}_d(t|t)) - \\ & BH(t+1, \hat{x}_d(t-1|t-1)), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\lambda(t+1) = \text{diag}\{\lambda_i(t+1)\}, \quad i=1, \dots, n+1, \quad (14)$$

$$\lambda_i(t+1) = \begin{cases} \alpha_i \eta(t+1), & \text{如果 } \alpha_i \eta(t+1) > 1; \\ 1, & \text{如果 } \alpha_i \eta(t+1) \leq 1, \end{cases} \quad (15)$$

$$\eta(t+1) = \frac{\text{tr}[N(t+1)]}{\sum_{i=1}^{n+1} \alpha_i \cdot M_{ii}(t+1)}, \quad (16)$$

$$M_{ii}(t+1) = [C(t+1)P(k|k)C^T(t+1)]_{ii} \quad (17)$$

$$N(t+1) = V_0(t+1) - \beta \cdot DS(t+1)D^T, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} V_0(t+1) = & E[\gamma(t+1)\gamma^T(t+1)] = \\ & \begin{cases} \gamma(1)\gamma^T(1), & \text{如果 } t=0; \\ \frac{[\mu V_0(t) + \gamma(t+1)\gamma^T(t+1)]}{(1+\mu)}, & \text{如果 } t \geq 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $0 < \mu \leq 1$ 是遗忘因子, $\beta \geq 1$ 为弱化因子, $\alpha \geq 1$ 为跟踪因子, 其确定准则参见文[14~16].

3 变时延SISO过程的方差性能评估方法(Variance CPA for SISO processes with varying time-delay)

理论证明, 当系统的时延确定时, 基于MV控制的过程输出方差可作为评估其它控制作用下方差性能的一个基准^[1]. 例如FCOR算法在零参考输入时, 仅需过程闭环输出数据序列 $y(t)$ 和时延参数 d , 就可计算过程在MV控制下的输出方差 σ_{MV} , 实际输出 $y(t)$ 的方差 σ_y 与其对比可得到方差性能的评估指标 $\delta = \sigma_{\text{MV}}/\sigma_y$, 该指标满足 $0 \leq \delta \leq 1$ ^[2]. 本节对于系统(1), 在第2节的时延和模型参数联合估计方法的基础上, 结合单变量过程方差性能评估的FCOR算法^[2], 给出变时延过程性能评估的VFCOR算法. 其主要步骤为:

1) 初始化: 根据过程机理或系统辨识等技术, 确定过程的模型结构及其初始参数 Q, G, N .

2) 在参考输入端施加宽频激励信号, 记录过程闭环I/O数据和噪声数据序列 $y^{\text{sp}}(t), y(t), e(t)$; 若 $e(t)$ 不可测时, 可利用时间序列分析或滤波器方法^[17], 估计噪声 $a(t)$ 及其方差 S .

3) 根据第2节的参数联合估计算法, 估计此段数据序列的过程时延和模型参数信息, 记为 $d(t)$ 和 $\rho(t)$.

4) 结合工程先验知识, 修正估计时延曲线 $d(t)$ 中的畸变点等不合理数据, 修正后的曲线记为 $\hat{d}(t)$.

5) 定义新的输出数据列 $Y(t) = y(t) - y^{\text{sp}}(t)$.

6) 根据时延估计曲线 $\hat{d}(t)$, 以其发生跃变的时刻为分界点, 对数据序列 $Y(t)$ 进行分段. 对每段数据(如第 i 段), 可认为时延参数不变. 利用该段数据 $Y_i(t)$ 和估计的时延参数 $\hat{d}_i$, 计算数据列 $\bar{Y}_i(t) = q^{-\hat{d}_i} Y_i(t)$, 其在MV控制下的输出方差为

$$\sigma_{\text{MV}} = \frac{\sum_{j=0}^{\hat{d}_i} (\bar{Y}_i \cdot a_{t-j+1})}{S},$$

则该时段内控制过程的方差性能评估指标:

$$\delta_v = \frac{\sigma_{\text{MV}}}{E(Y_i^T Y_i)}.$$

上述VFCOR算法, 不仅可以实现模型参数和时变时延的在线估计, 而且能获知时延和参数发生变化的时刻, 使得利用FCOR算法准确评估系统的性能成为可能. 另一方面, 这种方法要求参考输入为宽频激励信号, 当其不是宽频信号时, 可以在相对安全的时段, 通过在输入端叠加小幅值的高频信号实现. 因此, 该评估策略不会对过程的正常运行产生严重干扰.

注2 上述算法是一种时延与模型参数实时估计的分段CPA在线实施策略. 在认为时延不变的区间内, 该算法可以递推实施, 成为一种在线实时评估算法. 此时一旦由参数联合估计算法发现时延有明显变化, 即可放弃以前数据, 评估新的时间区间内的控制性能. 此外, 如果从实际输出数据 $y(t)$ 中难以去除 $y^{\text{sp}}(t)$ 的影响, 可采用类似文[5]中的修正策略进行评估.

4 仿真示例(Simulations)

例1^[2] 设某SISO过程回路模型为

$$y(t) = u(t - d(t)) + \frac{1 - 0.2q^{-1}}{1 - q^{-1}} a(t).$$

$a(t)$ 是零均值, 标准差为0.1的白噪声, 采用积分控制器

$$\Delta u(t) = K_p(y^{\text{sp}}(t) - y(t)).$$

取参数 $K_p = 0.3$, 则闭环回路模型为

$$y(t+1) = \frac{3}{1 - q^{-1}} \cdot [y^{\text{sp}}(t+1 - d(t+1)) - y(t+1 - d(t+1))] + \frac{1 - 0.2q^{-1}}{1 - q^{-1}} a(t) \Rightarrow \quad (20)$$

$$Y(t+1) = 3h(t+1, d(t+1)) + e(t+1). \quad (21)$$

假设只有时延发生变化:

$$d(t) = \begin{cases} 2, & 0 \leq t \leq 2000, \\ 5, & 2001 \leq t \leq 4000, \\ 4, & 4001 \leq t \leq 6000, \\ 2, & 6001 \leq t. \end{cases}$$

以式(20)为输出方程, 与方程 $d(t+1) = d(t)$ 一起构成时延估计模型. 仿真计算的参考输入为 $y^{\text{sp}}(t) = 40 + 1.5\sin(0.3t)$, 初始参数为 $\mu = 0.85$, $\beta = 6$, $\alpha = 4.6$, $P(0|0) = 180$, $d(0) = 1$. 利用第2节的估计算法得到的时延估计结果如图1示. 由图1可见, 估计曲线只在少数点产生脉冲野值, 去除这些脉冲野值后, 估计时延和真值的变化一致. 以时延跃变点为分界点, 得到相应的性能评估结果如表1示. 可以看出, 采用固定时延的CPA方法得到的结果在时延变化时偏离真实性能, 说明其对变时延过程的性能评估难以反映真实的性能, 而本文的方法可得到合理的评估结果.

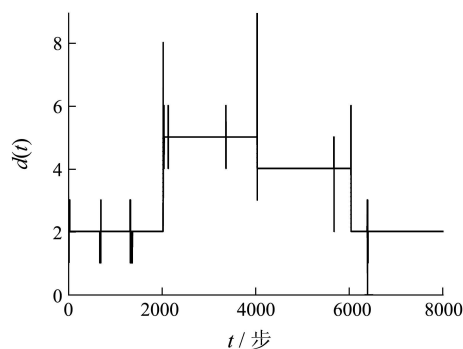


图1 时延估计的结果

Fig. 1 Result of time-delay estimation

表1 方差性能评估结果

Table 1 CPA results for output variance

数据段	1	2	3	4
$\hat{d}(t)$	2	5	4	2
δ^a	0.875	0.144	0.364	0.861
δ_v	0.875	0.359	0.628	0.861

a) 利用文[2]方法取固定时延为 $d(t) = 2$ 的评估结果.

例2 以实验室采用中控JX-300 DCS系统构建的液位控制实验系统为例, 采用比例调节律 $Q =$

K_p 进行控制,经辨识计算,其一阶离散时变过程模型:

$$G \cdot q^{-d(t)} = \frac{G_o T(t) q^{-d(t)}}{1 - e^{-T(t)} q^{-1}},$$

噪声模型:

$$N = \frac{1}{1 - e^{-T(t)} q^{-1}}.$$

其中 $T(t) = 1/T_p(t)$ 为过程时变参数, $G_o = (K_v \sqrt{2.0y_0g})/(A_o g)$ 为过程增益, $T_p(t) = (A_i(t) \sqrt{2.0y_0g})/(A_o g)$ 为时间常数. $K_v = 0.891 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{V}$ 为智能控制阀的流量系数, $y_0 = 5 \text{ cm}$ 为过程稳态时的理想液位, $A_i(t)$ 为可调节的水箱入口截面积, $A_o = 0.9 \text{ cm}^2$ 为水箱出口截面积, g 为重力加速度. 根据STF滤波原理,可得参数估计模型为:

$$\begin{cases} d(t+1) = d(t), \\ T(t+1) = T(t), \\ y(t+1) = e^{T(t+1)}y(t) + K_p T(t+1)[y^{sp}(t+1 - d(t+1)) - y(t+1 - d(t+1))] + a(t+1) \triangleq \\ h(t+1, d(t+1), T(t+1)) + a(t+1), \end{cases}$$

在过程时延 d 和参数 T 同时变化的情况下,取采样周期 $T_s = 0.1 \text{ min}$,参考输入为方波信号 $y^{sp}(t) = 5 + 0.5\sqrt{0.03t} \text{ cm}$,分别取比例控制律为 $K_p = 0.12$ 和 $K_p = 0.16$ 进行了模拟仿真实验.得到该时段过程的时延 $d(t)$ 和参数 $T(t)$ 估计结果分别如图2,3示.可以看出,模型参数 $T(t)$ 的估计和真值吻合很好,时延曲线分别在1000,3000,5000点附近有3个明显的阶跃变化,修正后的时延 $\hat{d}(t)$ 在4个时段取值见表2.利用MATLAB的噪声估计函数n4sid,计算过程输出端噪声 $a(t)$ 为方差 $S = 0.0081$ 的零均值白噪声.采用VFCOR算法得到的评估结果见表2.从评估结果可以看出,当 $K_p = 0.16$ 时,2种评估方法的结果都不理想,说明此时的控制性能不好.当控制律调整为 $K_p = 0.12$ 时,在初始阶段,控制性能明显得到了提高,而当时延参数增大时,性能又下降了(见表2示),说明整定后的控制器对参数变化后系统的性能改善仍然不理想.然而,此时采用固定时延的评估结果却指示出比整定前的性能更差,与真实性能有较大出入.而本文的变时延评估方法较正确地反映了控制回路的性能.此外,从表2中对第4段数据的评估结果可以看出,在 $K_p = 0.16$ 时,由于估计的时延与真实值有差异,和真实时延下的评估结果不一致,但它却指示出此时段的时延已发生了变化.因此,本文的评估方法即使不能准确估计参数,也可给出参数是否变化的信息,为工程技术人员确切判断

系统性能提供依据.

表2 时延估计与方差性能评估结果

Table 2 Results of time-delay estimation and CPA for output variance

数据段		1	2	3	4
$K_p = 0.12$	$\hat{d}(t)$	$3T_s$	$6T_s$	$8T_s$	$3T_s$
	δ^a	0.738	0.045	0.032	0.404
	δ_v	0.738	0.092	0.094	0.404
$K_p = 0.16$	$\hat{d}(t)$	$3T_s$	$6T_s$	$8T_s$	$4T_s$
	δ^a	0.093	0.071	0.068	0.059
	δ_v^b	0.093	0.071	0.089	0.059
	δ_v	0.093	0.071	0.089	0.113

a) 利用文[2]方法取固定时延为 $d(t) = 3T_s$ 的评估结果.

b) 利用本文方法取实际时延下的评估结果.

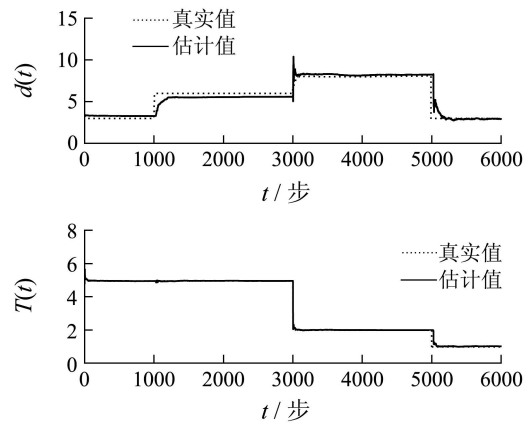


图2 时延与参数估计结果($K_p = 0.12$)

Fig. 2 Estimation of time-delay and parameter($K_p = 0.12$)

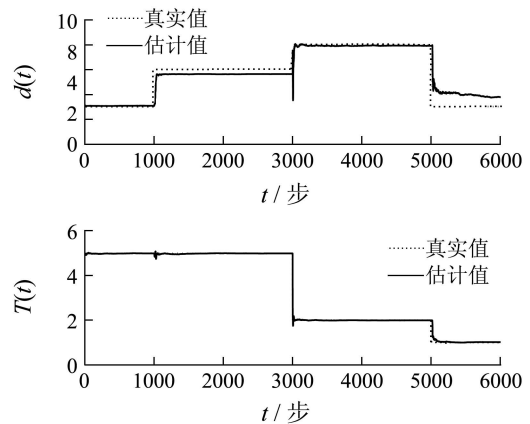


图3 时延与参数估计结果($K_p = 0.16$)

Fig. 3 Estimation of time-delay and parameter ($K_p = 0.16$)

5 结论(Conclusion)

本文针对一类工业SISO变时延过程的性能评估问题,对于阶跃性变化的过程和时延参数,基于STF理论给出了一种时变时延与参数联合估计方

法,并结合单变量过程性能评估的FCOR技术,实现了该类过程性能评估的VFCOR算法。仿真示例表明,本文的时延估计方法可用于过程性能评估的变时延参数在线估计,弥补了固定时延CPA算法的缺陷。该时延估计方法可以推广到MIMO过程,但如何用于MIMO过程的CPA是面临的难题。同时,降低估计算法对初值的依赖也是值得深入研究的课题之一。

参考文献(References):

- [1] HARRIS T. Assessment of closed loop performance[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1989, 67(5): 856 – 861.
- [2] HUANG B, SHAH S L. *Performance Assessment of Control Loops: Theory and Applications*[M]. London, UK: Springer-Verlag, 1999.
- [3] JELALI M. An overview of control performance assessment technology and industrial applications[J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(5): 441 – 466.
- [4] HUANG B, SHAH S L, KWOK E K. Good, bad or optimal: Performance assessment of multivariable processes[J]. *Automatica*, 1997, 33(6): 1175 – 1184.
- [5] ZHAO Y, GU Y, SU H, et al. Extended prediction error approach for MPC performance monitoring and industrial applications[C] // *Proceedings of 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea: Omnipress, 2008: 14894 – 14899.
- [6] BOUDREAU D, KABAL P. Joint time-delay estimation and adaptive recursive least squares filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(2): 592 – 601.
- [7] HUANG B, SHAH S L, FUJII H. Identification of the time delay/interactor matrix for MIMO systems using closed-loop data[C] // *Proceedings of 13th IFAC World Congress*. San Francisco, CA, USA: Pergamon Press, 1996: 355 – 360.
- [8] 张泳健, 周东华. 动态系统的时滞估计方法. 自动化学报[J], 2000, 26(supp. B): 81 – 85.
(ZHANG Yongjian, ZHOU Donghua. Methods of time-delays estimation for dynamic systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, 26(supp. B): 81 – 85.)
- [9] NI B, SHAH S L, XIAO D. A time delay estimation method for MIMO systems[C] // *Proceedings of 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea: Omnipress, 2008: 5539 – 5544.
- [10] GOVINDAN R B, RAETHJEN J, KOPPER F, et al. Estimation of time delay by coherence analysis[J]. *Physical A*, 2005, 350(2): 277 – 295.
- [11] AHMED S, HUANG B, SHAH S L. Parameter and delay estimation of continuous-time models using a linear filter[J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(4): 323 – 331.
- [12] SO H C. Noisy input-output system identification approach for time delay estimation[J]. *Signal Processing*, 2002, 82(10): 1471 – 1475.
- [13] CHOI J H, YOO C. One-way delay estimation and its application[J]. *Computer Communications*, 2005, 28(7): 819 – 828.
- [14] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [15] ZHOU D H, FRANK P M. Strong tracking filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with colored noise: application to parameter estimation and empirical robustness analysis[J]. *International Journal of Control*, 1996, 65(2): 295 – 307.
- [16] ZHOU D. On-line adaptive estimation of time-varying time delay[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 61 – 63.
- [17] GOODWIN G C, SIN K S. *Adaptive Filtering Prediction and Control*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Press, 1984.

作者简介:

张登峰 (1973—), 男, 博士, 现在为浙江大学控制科学与工程学科流动站做博士后研究工作, 目前研究方向为动态系统的故障诊断、容错控制、工业过程控制性能监控与评估技术等, E-mail: dfzhang@iipc.zju.edu.cn;

赵宇 (1981—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为工业过程控制性能监控与评估技术等, E-mail: yzhao@iipc.zju.edu.cn;

赵超 (1976—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为预测控制、流程工业大规模动态优化及经济性能评估等, E-mail: czhao@iipc.zju.edu.cn;

苏宏业 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究领域为鲁棒控制、流程工业过程的先进控制与优化等, E-mail: hysu@iipc.zju.edu.cn.