

基于遗传算法的非线性系统时变时滞的 在线估计方法*

张泳健 周东华
(清华大学自动化系 北京 100084)

摘 要 针对系统输入带有纯时滞的一类非线性系统,选择有限点的输出误差的平方和构成适应度函数,采用十进制编码技术,提出一种基于遗传算法的非线性系统时变时滞的在线估计方法,该方法具有一定的抗噪声能力。仿真实验结果验证了所提出方法的有效性。

关键词 遗传算法,非线性系统,时变时滞,估计,在线

分类号 N 94. 55

Online Estimation Approach Based on Genetic Algorithm to Time-varying Time Delay of Nonlinear Systems

Zhang Yongjian, Zhou Donghua
(Tsinghua University)

Abstract For a class of nonlinear systems with pure time delay in the input signal, by selecting the accumulated output error in a data window to form the fitness function, and by adopting the decimal coding technique, an online estimation approach based on genetic algorithm to time-varying time delay of nonlinear systems is proposed. This approach has definite robustness against system noise. The simulation results demonstrated the effectiveness of the proposed approach.

Key words genetic algorithm, nonlinear systems, time-varying time delay, estimation, online

1 引 言

时滞估计(TDE)是目前的研究热点之一。时滞是一个不同于系统阶次和其它系统参数的特殊结构参数,它广泛存在于信号处理和过程控制等众多领域。对时滞估计的准确与否,直接关系到控制算法是否可行,控制行为是否有效,控制结果是否收敛等一系列问题。然而在实际过程中,很多情况下时滞是未知的,而且还有可能是随时间变化的。因此,对时滞的准确在线估计已引起许多学者的关注。

目前已有许多线性系统的时滞估计方法,其中大多采用最小二乘类方法。梯度算法、相关分析法或

随机近似技术,也能较好地解决线性系统的时滞估计问题。但在实际过程中,有很多非线性环节,将导致系统的非线性,从而给系统辨识和时滞估计带来很大困难。非线性系统时变时滞的在线估计是一个尚待解决的问题^[1~5]。

本文将遗传算法(GA)应用于一类非线性系统时变时滞的估计。遗传算法是一种在思路和方法上都与众不同的优化算法,它模拟自然界“物竞天择,适者生存”的进化过程,在问题空间进行全局并行的随机搜索优化,使种群朝着全局优化的方向收敛。遗传算法尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂非线性问题^[6]。本文采用遗传算法构成自

* 国家自然科学基金项目(69774022)和国家 863 计划项目(511-945-001)

适应参数估计系统,以估计非线性系统的时变时滞。

2 基于遗传算法的非线性系统时变时滞的在线估计方法

基于遗传算法^[7,8]的非线性系统时变时滞的在线估计流程如图 1 所示。图中, $u(k) \in R^p$ (采用足够长的 M 序列) 为系统输入, $v(k) \in R^m$ 为干扰白噪声, $y(k) \in R^m$ 为实际时滞系统的输出, $y_m(k) \in R^m$ 为时滞系统估计模型的输出, $e(k)$ 为 $y(k)$ 和 $y_m(k)$ 之差, $D(k)$ 为真实时滞。

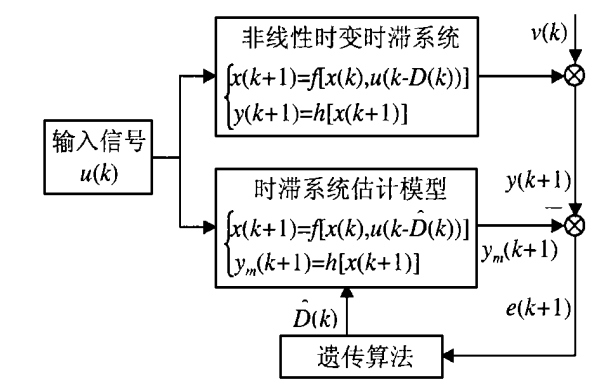


图 1 系统时变时滞的在线估计

假设估计模型中除时滞外其余模型参数已知。自适应遗传算法以 N 个 $e(k)$ 的平方和为评价函数,平方和越小则认为其适应度值越高。遗传算法通过提高群体的适应度,以达到搜索最优估计值的目的。在实际应用中,取 $k - N$ 步的系统输出为估计模型输出,则把由 $k - N + 1$ 到 k 步输出误差的平方和的负数作为适应度值,即取适应度函数为

$$\text{Fit}(N) = - \sum_{i=k-N}^k [y(i) - y_m(i)]^T \times [y(i) - y_m(i)] \quad (1)$$

采用遗传算法估计第 k 步的系统时滞,由此构成非线性系统时变时滞的自适应在线估计方法,使时滞估计值在线跟踪时滞真实值的变化。不难看出,除遗传算法自身参数的调整外, N 的选择变得尤为重要。当 N 取值较大时,遗传算法的时滞估计值比较准确,但对时变时滞的跟踪性能较差,并且反应较慢;当 N 取值较小时,遗传算法的跟踪性能较好,可以较快地对时变时滞做出反应,但代价是增加了估计误差。因此应合理地选取 N 值,在满足必要的估计精度的基础上, N 值越小会使遗传算法对参数的跟踪性能越好。

3 仿真实验研究

仿真实验模型源于德国 Amira 自动化公司的三容水箱系统 DT S200。水箱的数学模型为

$$A \frac{dh_1}{dt} = Q_1 - Q_{13} \quad (2)$$

$$A \frac{dh_3}{dt} = Q_{13} - Q_{32} \quad (3)$$

$$A \frac{dh_2}{dt} = Q_{32} - Q_{20} \quad (4)$$

其中

$$Q_{13} = az_1 S_n \text{sgn}(h_1 - h_3) (2g|h_1 - h_3|)^{1/2}$$

$$Q_{32} = az_3 S_n \text{sgn}(h_3 - h_2) (2g|h_3 - h_2|)^{1/2}$$

$$Q_{20} = az_2 S_n (2gh_2)^{1/2}$$

模型中的变量和参数定义如下: az_i 为流出系数, h_i 为液位(m), Q_{ij} 为流量(m^3/s), Q_1 为补给流量即系统输入(m^3/s), A 为水箱截面积(m^2), S_n 为连接管道的截面积(m^2), $\text{sgn}(z)$ 为参数 z 的符号。其中, $i = 1, 2, 3, (i, j) \in \{(1, 3), (3, 2), (2, 0)\}$ 。

三容水箱的一些参数为

$$\begin{aligned} A &= 0.015 \text{ 4m}^2, \quad S_n = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \\ Q_{1\max} &= 100 \text{ ml/s}, \quad H_{\max} = (62 \pm 1) \text{ cm} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2, \quad \Delta T = 0.5 \text{ s} \\ az_1 &= 0.490 \text{ 471}, \quad az_2 = 0.611 \text{ 429} \\ az_3 &= 0.450 \text{ 223} \end{aligned}$$

其中, $Q_{1\max}$ 为补给流量的最大值, $H_{\max}$ 为液位最大值, g 为重力加速度, ΔT 为系统采样时间。

定义

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = [Q_1] \\ \mathbf{A}(\mathbf{x}) &= \frac{1}{A} \begin{bmatrix} -Q_{13} \\ Q_{32} - Q_{20} \\ Q_{13} - Q_{32} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = [y_1] = [h_1] \end{aligned}$$

则方程(2) ~ (4) 可以表示为

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}_1 \quad (6)$$

对系统进行欧拉离散化,并在输入端加入纯时滞 $D(k)$, 则得

$$\begin{aligned} h_1(k+1) &= \\ h_1(k) &+ \Delta T \frac{[Q_1(k-D(k))] - Q_{13}(k)}{A} \end{aligned} \quad (7)$$

$$h_3(k+1) = h_3(k) + \Delta T(Q_{13}(k) - Q_{32}(k)) \setminus A \quad (8)$$

$$h_2(k+1) = h_2(k) + \Delta T(Q_{32}(k) - Q_{20}(k)) \setminus A \quad (9)$$

现对上述离散系统采用遗传算法在线估计系统时滞。实验中共对系统进行 251 步仿真, 设定值 $D(k)$ 的初始值为采样时间的 15 倍, 到 $D(51)$ 变为 20 倍, 到 $D(101)$ 变为 25 倍, 到 $D(151)$ 又变为 20 倍, 到 $D(201)$ 又变为 15 倍。分别取 $N = 5$ 和 $N = 15$, 噪信比分别为 0% 和 10%。在这几种情况下, 考察本文所述方法对时滞的估计和跟踪能力, 仿真实验结果如图 2 所示。

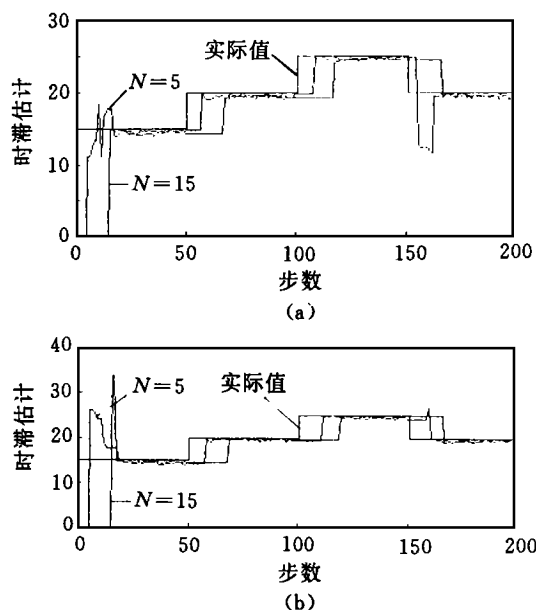


图 2 仿真实验结果

(a) 噪信比 0% (b) 噪信比 10%

仿真实验中, 采用十进制编码技术, 初始种群规模为 10 个个体, 个体值分别是 {28.1, 12.3, 2.6, 6.9, 7.7, 26.8, 15.5, 2.8, 27.2, 34.2}。 $N = 5$ 时遗传算法从第 5 步开始估计时滞; $N = 15$ 时遗传算法从第 15 步开始估计时滞。

图 2(a) 为噪信比为 0%, N 分别为 5 和 15 时, 在线估计方法对非线性系统的时滞估计结果。可以看出, 无论 $N = 5$ 还是 $N = 15$, 本文方法均能较好地跟踪时滞变化。 $N = 5$ 时估计结果的波动性略大于 $N = 15$ 时的情况, 这说明 N 值越大, 遗传算法估计越准确。由图还可看出, $N = 5$ 时该方法对参数变化的反应速度要快于 $N = 15$ 的情况, 因此说, N 值越小, 遗传算法对参数变化反应越迅速, 跟踪越快。可见, 该算法应合理地选择 N 值, 在满足估计精度要求的情况下, 较小的 N 值可以明显地改善算法的跟

踪性能。

图 2(b) 为噪信比为 10%, N 分别为 5 和 15 时该方法对非线性系统的时滞估计结果。由图可见, 在一定的干扰下, 该方法仍能有效地估计非线性系统的时变时滞。从估计结果的波动性可以看出, 随着噪声强度增大, 估计结果的波动性增大, 即估计准确度有所下降, 但仍能满足一定的精度要求。这说明该方法具有一定的抗干扰能力。

4 结 论

本文提出的基于遗传算法的非线性系统时变时滞的在线估计方法, 可以有效地解决非线性系统时变时滞的在线估计问题, 并具有一定的抗噪声能力。仿真实验结果验证了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 V Gabay, S J Merhav. Identification of linear systems with time-delay operating in a closed loop in the presence of noise. IEEE Trans on Automatic Control, 1976, 21(5): 711~716
- 2 D M Etter, S D Stearns. Adaptive estimation of time-delays in sampled data systems. IEEE Trans on Acoust Speech Signal Processing, 1981, 29(3): 582~587
- 3 W X Zheng, C B Feng. Identification of stochastic time lag systems in the presence of colored noise. Automatica, 1990, 26(4): 769~779
- 4 D Boudreau, P Kabal. Joint time-delay estimation and adaptive recursive least squares filtering. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(2): 592~601
- 5 C Banyasz, L Keviczky. Recursive time delay estimation method. Int J Systems Sci, 1994, 25(11): 1857~1865
- 6 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用. 北京: 中国邮电出版社, 1996
- 7 陈根社, 陈新海. 遗传算法的研究与进展. 信息与控制, 1994, 23(6): 215~222
- 8 黄炯, 郭永革, 李军, 等. 基于遗传算法的系统在线辨识. 信息与控制, 1996, 25(3): 171~176

作 者 简 介

张泳健 男, 1974 年生。1997 年于清华大学自动化系获学士学位, 现为该系硕士研究生。研究方向为动态系统的时滞估计, 故障诊断。

周东华 男, 1963 年生。1990 年于上海交通大学获博士学位, 现为中国自动化学会副秘书长, 清华大学自动化系教授, 博士生导师。研究方向为动态系统的辨识, 故障诊断与容错控制。