

文章编号: 1671-7848(2006)06-0547-03

## 网络控制中基于 FSMC 观测器的时延补偿

刘建涛, 李惠光, 李国友

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)



**摘 要:** 针对网络控制系统中因存在通讯时延、网络诱导噪声及数据丢失等而可能引起系统性能降低或不稳定的问题, 利用模糊滑模控制理论, 在时延存在的情况下, 基于观测器建立不确定网络控制系统模型; 并利用预估方法对网络控制系统的时延进行补偿, 从而保证系统的稳定。设计模糊滑模控制器(FSMC)来抑制网络控制系统中的诱导噪声及滑模面上的“抖动”, 以及采用预估补偿策略处理网络中的时滞和数据包丢失等, 可有效保证系统的稳定。仿真实例表明了该算法的合理性、有效性。

**关键词:** 网络控制系统; 滑模控制; 模糊控制

**中图分类号:** TP 13 **文献标识码:** A

## Time Delay Compensation for Networked Control Systems Based on FSMC Observer

LIU Jian-tao, LI Hui-guang, LI Guo-you

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The fuzzy sliding mode control (FSMC) method is applied to guarantee the stability of networked control systems in view of the common existing problem of communication delays, networked-induced noise and data packet dropout. The uncertainties of networked control systems with time delay are adopted based on the observer. The FSMC is used to deal with the networked-induced noise and the chatters, and predictive way is used to deal with time delay and data packet dropout. And then the stability condition of networked control systems is guaranteed. Simulation results show that the proposed theory is reasonable and effective.

**Key words:** networked control systems; sliding mode control; fuzzy control

### 1 引言

通过串行通信网络实现闭环控制回路的控制系统称为网络控制系统(NCS)<sup>[1]</sup>。系统中各节点都和控制网络直接相连, 因此具有资源共享、连接数少、易于维护等优点; 但由于网络中的信息必须通过通信网络分时传送, 不可避免地在控制环路中存在通讯时延、网络诱导噪声及数据丢失等。时延根据不同的网络协议和介质呈现出固定或随机, 或有某种规律的特征, 大大降低了控制系统的性能, 甚至引起网络控制系统不稳定, 同时也给网络控制系统的分析、设计带来了很大的困难。

由于滑模控制(SMC)理论对不定参数和外部干扰具有较强的鲁棒性, 而广泛应用于不确定系统。具有未知时滞的网络控制系统可视为不确定系统, 因此可以利用滑模控制进行处理。但由于切换时延的存在, 系统在滑模面上常常会出现“抖动”而破坏

系统的稳定性。文献[2]在滑模控制中采用模糊控制逻辑, 对上述问题进行了研究, 但未考虑系统时延。文献[3-4]利用滑模控制方法研究了网络控制系统的延迟补偿策略, 即假设系统的全部状态已知, 但由于在许多实际的网络控制系统中, 系统状态变量往往不能获取或难以测量, 因此, 输出反馈或基于观测器的控制就显得十分必要。

针对上述问题, 本文利用模糊滑模控制理论, 在时延存在的情况下, 基于观测器建立了不确定网络控制系统模型, 并利用预估方法对网络控制系统的时延进行补偿, 以保证系统的稳定。

### 2 问题描述

假设:

①传感器为时间驱动, 采样周期为  $T$ ; 控制器为事件驱动。

②执行器为事件驱动, 但如果信号延迟过长,

则为时间驱动。

③时滞  $\tau_k^{sc}$ ,  $\tau_k^{ca}$  和  $\tau_k^c$  为随机时变, 总的时滞为

$$\tau_k = \tau_k^{sc} + \tau_k^c + \tau_k^{ca}.$$

按如上假设的网络系统, 如图 1 所示。

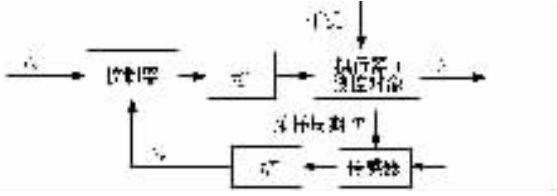
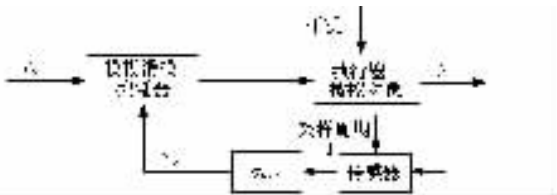


图 1 网络控制系统模型

可以看出, 时滞  $\tau_k^{sc}$  和  $\tau_k^{ca}$  的性质不一样, 前者可通过常规处理时滞的方法处理, 但后者无法用常规的方法来补偿, 因为这时的控制  $u$  已经求出。因此, 无论在控制器节点上对  $\tau_k^{sc}$  补偿得多么好, 但最终的控制性能由于  $\tau_k^{ca}$  的存在却不一定好。本文的处理方法是, 在控制器节点上对这两个时滞进行预补偿, 最终在执行器节点对这两者的和进行补偿。分别在控制器和执行器节点设定缓冲区堆栈, 其长度为相应的时滞最大值, 并把两个堆栈合并处理。这样传输时滞可以视为常值, 计算时滞  $\tau_k^c$  也包含在其中, 进行处理。如图 2 所示。



$\tau_{max}$  表示最大时滞

图 2 基于 FSMC 的网络控制系统模型

基于上述假设, 考虑非线性被控对象:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u(t - \tau) + Ew(t) \quad (1)$$

式中,  $x \in \mathbf{R}^n$  为系统状态向量;  $u \in \mathbf{R}$  为控制输入;  $f, g: \mathbf{R}^+ \times \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$  为向量域;  $w(t)$  为有界不确定输入, 包括输入干扰、模型误差等。

定义滑模面:

$$S = \{x \in \mathbf{R}^n \mid s(x) = 0\} \quad (2)$$

式中,  $s(x) = Cx$  为切换函数。

另设不确定向量  $w$  满足  $|E| \leq \gamma$ 。

### 3 NCS 的模糊滑模输出反馈控制

对于不确定系统, 滑模控制 (SMC) 是一种效率很高的方法。具有未知时滞的网络控制系统可以视为不确定系统, 因此可以利用滑模控制进行处理。但由于切换时延的存在, 在滑模面上系统常常会出现“抖动”而破坏系统的稳定性。模糊控制逻辑对于非线性、复杂对象的控制显示了鲁棒性好、控制性能

高的优点。为此可以利用模糊控制逻辑的特点来克服滑模控制中的“抖动”问题。由于实际系统中的很多状态并非完全可观测, 所以采用基于观测器进行输出反馈控制。

1) 测量  $t$  时刻的系统状态向量  $x(t)$  并记录初始控制变量  $u_k$ , 利用式 (3) 预测  $x(t + \tau)$ ,

$$\hat{x}(t + \tau) = x(t) + \int_t^{t+\tau} [f(x) + g(x)u_k + Ew(t)] dt \quad (3)$$

式中,  $u_k$  为  $(t, t + T)$  内的控制信号。

2) 由预测得到的系统状态 根据式 (2), 并选择 Lyapunov 函数  $V = s^2/2 > 0$ , 选择合适的  $C$  保证  $V = s, \dot{s} < 0$  成立, 即滑模面上误差趋于零, 系统稳定。

3) 设计模糊滑模控制器

①设计模糊规则

Rule 1 if  $s(x(t))$  is  $S_r$ , then  $u = U_R$

Rule 2 if  $s(x(t))$  is  $S_e$ , then  $u = U_E$

式中,  $S_r$  为趋近模式;  $U_R$  为相应输入;  $S_e$  为滑模模式;  $U_E$  为相应输入。

②计算控制律  $U_R$  及控制增益  $K$

由  $s(x) = -K \text{sgn}(s)$ ,  $K > 0$  得:

$$U_R = -[\frac{\partial s}{\partial x} g(x)]^{-1} [\frac{\partial s}{\partial x} f(x) + K \text{sgn}(s)] \quad (4)$$

③计算控制律  $U_E$

由  $s(x) = \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u = 0$  得:

$$U_E = -[\frac{\partial s}{\partial x} g(x)]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (5)$$

④制定模糊规则集

模糊滑模模式:

$$\mu_e(s(x)) = \begin{cases} 1 & \text{if } s(x) = 0 \\ \in [0, 1] & \text{if } s(x) \in [-\epsilon, \epsilon] \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

模糊趋近模式:

$$\mu_r(s(x)) = 1 - \mu_e(s(x)) \quad (7)$$

⑤模糊滑模控制器为

$$U(s) = \frac{\mu_r(s(x)) * U_R + \mu_e(s(x)) * U_E}{\mu_r(s(x)) + \mu_e(s(x))} \quad (8)$$

4) 将控制序列  $u = \{u_0, u_1, \dots, u_m\}$  作为一个数据包一次全部传到执行器节点, 根据到达执行器节点的时滞, 更新缓冲区的值。其中,  $u_k = u_{t+kT}$ ,  $m$  为预补偿的步数。

### 4 仿真实例

被控对象为机械手臂, 周期为 10 ms, 通过现场总线网络与控制计算机相连, 延迟为 60 ms。

机械手臂的状态空间表达式<sup>[21]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = g \sin(x_1(t)) + u(t - \tau) \end{cases} \quad (9)$$

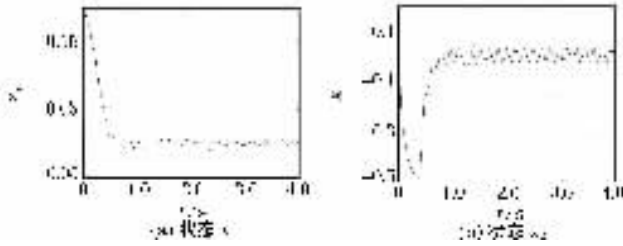


图 3 基于 SMC 的状态响应

图 3 中, 控制器增益  $K = 5$ ; 图 4 中,  $KL = 5$ ,  $KM = 4$ ,  $KS = 3$ ,  $KZ = 1$ 。

由仿真结果可以看出, FSMC 控制方法在保持较小的跟踪误差的同时, 也减弱了滑模面上的“抖动”。

## 5 结 语

针对网络控制系统的特点, 提出了采用基于模糊滑模控制观测器建立网络控制系统模型的方法, 减弱了滑模面上的“抖动”, 并用预估策略对时滞进行补偿, 保证了系统的稳定。仿真结果表明了该算法的合理性、有效性。

初始状态为  $x(0) = [0.2 \ 0]^T$ ,  $g$  为重力常数。取滑模面为  $s(x) = 10x_1 + x_2 = 0$ ,  $\varepsilon = 0.02$ 。基于 SMC 和 FSMC 的状态响应图如图 3 图 4 所示。

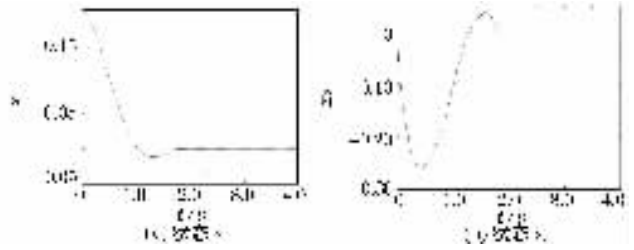


图 4 基于 FSMC 的状态响应

## 参考文献：

- [1] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21: 84-99.
- [2] Ghalia M B, Alouani A T. Sliding mode control synthesis using fuzzy logic [C]. Seattle WA: The American Control Conference, 1995.
- [3] Wang Q, Yi J Q, Zhao D B, et al. Time delay compensation for networked control systems based on SMC [C]. Washington: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2004.
- [4] Xiong Y S, Sh L Y, Yu M. Sliding mode multiple steps predictive control for networked control systems [J]. Control Theory & Application 2005, 22(2): 301-306.
- [5] Hess R A, McLean C. Development of a design methodology for reconfigurable flight control systems [C]. Reno, NV: 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2000.
- [6] Zhang Y M, Li X R, Zhou K M. A fault detection and diagnosis approach based on hidden Markov chain model [C]. Philadelphia: The American Control Conference, 1998.
- [7] Xiong Y, Saif M. A novel design for robust fault diagnostic observer [C]. Florida: The 37th IEEE Conference on Decision & Control, 1998.
- [8] Gaither S A, Agarwal A K, et al. A real-time expert system for self-repairing flight control [R]. USA: AIAA-89-3427-CP, 1989.
- [9] Yao Y P, Cheng M H. The application on dynamic fault tree analysis for dissimilar fault-tolerant flight control system [J]. IEEE, 1999, 6(6): 1-6.
- [10] 胡寿松, 张栋. 基于神经网络的自修复飞行控制系统故障认定 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 23(增刊): 24-26.
- [11] Gao Z Q, Antsaklis P J. On the stability of the pseudo-inverse method for reconfigurable control systems [J]. IEEE, 1989, 9(9): 333-337.
- [12] 张平, 陈宗基. 非线性飞控系统的控制可重构性 [J]. 飞机设计, 2001(3): 12-15.
- [13] Maybeck P S, Stevens R D. Reconfigurable flight control via multiple model adaptive control method [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(3): 470-480.
- [14] Jovan D B, Raman K M. Stable multiple model adaptive flight control for accommodation of a large class of control effector failures [C]. San Diego: The American Control Conference, 1999.
- [15] Zhou Y G, Zhang Y W, Wang F L. A new type of reconfigurable control against actuator faults [C]. Shanghai: The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2002.
- [16] Kim K S, Lee K J, Kim Y D. Model following reconfigurable flight control system design using direct adaptive scheme [C]. Monterey: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2002.
- [17] 胡寿松, 周川, 胡维礼. 基于径向基函数神经网络的模型跟随自修复控制 [J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(5): 486-489.
- [18] Chandler P, Mears M, Pachter M. On-line optimizing networks for reconfigurable control [C]. San Antonio: The 32th Conference on Decision and Control, 1993.
- [19] 朱家强, 郭锁凤. 基于神经网络的超机动飞机自适应重构控制 [J]. 航空学报, 2003, 24(3): 246-250.
- [20] 罗峰, 邓建华. 基于 MATLAB 的自修复飞控系统仿真 [J]. 计算机仿真, 2000, 17(3): 45-49.
- [21] 张德发, 胡寿松, 汪兴宁. 基于 MATLAB 数字仿真模块歼击机自修复控制的可视化研究 [J]. 飞机设计, 2001(2): 8-21.
- [22] 周川, 胡维礼, 陈庆伟. 智能重构控制技术及其应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(6): 59-62.
- [23] 张绍杰. 歼击机操纵面故障的诊断方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [24] Huang Y S. Adaptive and reconfigurable flight control [D]. USA: Dissertation of Air Force Institute of Technology, 2001.

(上接第 516 页)