

文章编号: 1001-0920(2009)08-1214-04

基于网络控制系统平均时延的模糊控制器设计

王国敬, 穆志纯

(北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对网络控制系统(NCS)中的随机时延问题, 根据实际网络时延的分布情况, 提出一种新的具有随机时延的网络控制系统的建模方法——离散 T-S 模型, 并在此基础上应用并行分布补偿原理(PDC)设计模糊控制器. 同时提出一种新的模糊控制系统隶属函数的确定方法, 利用 Lyapunov 定理和线性矩阵不等式(LMI)研究系统的稳定性问题, 给出了基于 LMI 的模糊控制器的设计方法. 最后通过仿真实例验证了该控制方法能使具有时延的网络控制系统稳定.

关键词: 网络控制系统; 模糊控制; 趋势理论; 随机时延; 并行分布补偿

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Fuzzy controller design for networked control system based on average delay

WANG Guo-jing, MU Zhi-chun

(School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.
Correspondent: WANG Guo-jing, E-mail: wgj-fly@sohu.com)

Abstract: Aiming at networked control systems (NCS) with random time-delay, and according to the actual time-delay, this paper designs a networked control system's discrete model and proposes a fuzzy stable controller based on parallel distributing compensation theory. The design method of membership function is presented. Lyapunov theory and linear matrix inequality method are used to derive the sufficient conditions for the stability of NCS. A simulation example illustrates that the proposed method can guarantee the stability of the NCS with time-delay.

Key words: Networked control systems; Fuzzy control; Trend theory; Random time-delay; Parallel distributing compensation

1 引言

网络控制系统(NCS)是指通过网络形成的闭环反馈控制系统. 与传统的控制系统相比, NCS 具有可远程监测与控制、自行故障诊断、系统配置灵活、安装与维护简便等诸多优点. 但由于通信网络协议是时分复用的, 不可避免地产生通信延时, 延时不但使系统的性能大打折扣, 而且有可能引起系统不稳定甚至失控. 因此, 对 NCS 的分析和控制器设计必须考虑网络延迟的影响.

国内外许多学者对 NCS 的建模、控制器设计、稳定性分析等问题进行研究. 文献[1]研究了网络随机时延具有马尔可夫特性的 NCS, 将随机网络通讯时延的 NCS 归于线性二次型 Gauss 最优控制问题

(LQG), 给出了闭环 NCS 的均方稳定条件. [2, 3]建立了随机长时延网络控制系统的数学模型, 并设计了满足系统均方指数稳定和随机稳定的控制律. [4]针对线性连续的网络控制系统状态向量无法直接测量的情况, 通过设立状态观测器, 给出了系统全局指数稳定的充要条件. [5]通过建立具有参数不确定性的线性网络控制系统模型, 估计传输时延的最大界, 给出了网络控制系统渐近稳定的条件. [6, 7]在考虑网络时延小于一个采样的条件下, 提出了基于 T-S 模型的网络控制系统设计方法, 给出了系统稳定的充分条件. 然而, 以上研究都是建立在时延小于一个采样周期或各种假定条件之上, 并没有对实际网络中的时延进行分析.

收稿日期: 2008-04-18; 修回日期: 2008-11-17.

基金项目: 北京市教委重点学科共建项目(XK100080537); 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室项目(2007104).

作者简介: 王国敬(1979—), 男, 河北衡水人, 博士生, 从事网络控制系统时延的研究; 穆志纯(1952—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 从事模式识别、人工智能等研究.

本文在文献[8-10]的基础上,通过对实际 Internet 控制系统得到的时延数据进行分析,利用滚动计算方法求出某一时间区间内的平均时延,根据平均时延的大小和此时时延与平均时延差值的大小,求出模糊控制器的隶属函数,建立系统的 T-S 模型,通过并行补偿原理建立系统的状态反馈模糊控制器,利用 Lyapunov 理论分析其稳定性.

2 时延特性分析及系统描述

在实际网络中,影响网络延时的因素很多,如网络带宽、路由器的端口队列、网络的拥塞程度及控制器端的计算时延等.本文通过 VC++6.0 编写客户端和服务端程序,分别运行在通过 Internet 相连的两台计算机上.服务器端运行控制器程序,采用事件驱动,当接收到客户端传送的系统状态数据时,立刻计算出控制数据发送给客户端;客户端模拟执行器和传感器,当接收到服务器发送过来的控制量后,每隔时间周期 T 通过模拟的状态方程计算系统状态,传送给服务器.客户端和服务端发送数据带有时间帧,由客户端计算总的网络延时 τ_k .调用 VC++6.0 中的计时器 API 函数 QueryPerformanceCounter(),可以达到 ns 级的计时精度.

设置采样周期 $T = 10\text{ms}$,客户端得到时延 τ_k 的分布情况如图1所示.由于得到的时延数据量十分巨大,本文只选取了 2000 组数据进行分析.

令 $\bar{\tau}_k = \sum_{i=k-m}^{i=k} \tau_i / m, m = 30$,可得平均时延 $\bar{\tau}_k$ 的

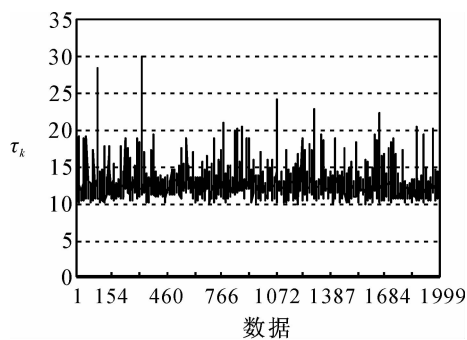


图 1 网络时延的分布曲线

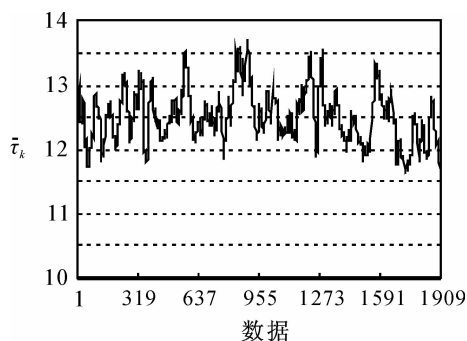


图 2 网络的平均时延曲线

分布曲线,如图 2 所示.

由图 1 可知,时延大多在 10.0 ~ 30.0 ms 波动,具有随机性;由图 2 可知,平均时延在 11.5 ~ 13.8 ms,平均时延的集中度比时延的集中度高,并且在某一时间段内具有趋势特征.

设长时延网络控制系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t), \\ y_p(t) = C_p x_p(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_p(t) \in R^n$ 是对象状态, $u(t) \in R^n$ 是对象输入, $y_p(t)$ 是对象输出; A_p, B_p, C_p 是具有相应维数的矩阵.

令 $\tau_k = \tau_s + \tau_{ca}$ 为第 k 时刻的网络时延,传感器的采样周期为 T ,传感器采用时间驱动,控制器和执行器采用事件驱动.将系统(1)离散化,可得如下离散状态方程:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_{d0} u_k + B_{d1} u_{k-1}, \quad (2)$$

其中 $A_d = e^{A_p T}$. 令 $m = \tau_k / T$ 取整,则

$$B_{d0} = \int_{(m+1)T-\tau_k}^{(m+1)T} e^{A_p t} dt B, \quad B_{d1} = \int_0^{\tau_k} e^{A_p t} dt B.$$

3 模糊控制器设计与隶属函数确定

3.1 模糊控制器设计

设在此时刻起过去的 n 次网络时延中,网络最大平均时延和最小平均时延分别是 $\bar{\tau}_{\max}$ 和 $\bar{\tau}_{\min}$, $\Delta\tau$ 表示第 k 时刻的时延 τ_k 减去平均时延 $\bar{\tau}_k$ 的值.设 $\Delta\tau_{\max}$ 为过去 n 次 $\Delta\tau$ 的最大值, $\Delta\tau_{\min}$ 为过去 n 次 $\Delta\tau$ 的最小值,可得

$$[\bar{\tau}_k - \Delta\tau_{\min}, \bar{\tau}_k + \Delta\tau_{\max}] \in [\tau_{\min}, \tau_{\max}],$$

$$\tau_k \in [\bar{\tau}_k - \Delta\tau_{\min}, \bar{\tau}_k + \Delta\tau_{\max}].$$

将区间 $[\bar{\tau}_{\min}, \bar{\tau}_{\max}]$ 均匀划分为 L 个子区间,第 i 个子区间为 $[\bar{\tau}_{ki}, \bar{\tau}_{ki+1}]$,其中 $\bar{\tau}_{ki} = (\bar{\tau}_{\max} - \bar{\tau}_{\min}) \times i / L$. 将区间 $[\Delta\tau_{\min}, \Delta\tau_{\max}]$ 均匀划分为 M 个子区间,第 j 个子区间为 $[\Delta\tau_{kj}, \Delta\tau_{kj+1}]$,其中 $\Delta\tau_{kj} = ((\Delta\tau_{\max} - \Delta\tau_{\min}) \times j / M)$. 则基于 T-S 模糊模型的网络控制系统(2)可描述如下:

$$R^i: \text{If } \bar{\tau}_k \text{ is } [\bar{\tau}_{ki}, \bar{\tau}_{ki+1}] \text{ and } \Delta\tau_k \text{ is } [\Delta\tau_{kj}, \Delta\tau_{kj+1}],$$

$$\text{Then } x_{k+1}^i = A_d x_k + B_{d0i} u_k + B_{d1i} u_{k-1},$$

$$i = 1, 2, \dots, L \times M.$$

其中: R^i 为 T-S 模糊模型的第 i 条模糊规则, $L \times M$ 为 T-S 模糊系统的模糊规则数; $\bar{\tau}_k$ 和 $\Delta\tau_k$ 为模糊规则的前件变量; $[\bar{\tau}_{ki}, \bar{\tau}_{ki+1}]$ 和 $[\Delta\tau_{kj}, \Delta\tau_{kj+1}]$ 为模糊集合; $x_k \in R^n$ 为系统第 k 时刻状态变量, $u_k \in R^n$ 为系统第 k 时刻控制输入变量; A_d, B_{d0i}, B_{d1i} 是具有适当维数的常数矩阵.

取 $\bar{\tau}_k$ 的隶属函数 ω_i 为过去 n 个周期内 $\bar{\tau}_k \in [\bar{\tau}_{ki}, \bar{\tau}_{ki+1}]$ 的概率 $P(\bar{\tau}_k)$, $\Delta\tau_k$ 的隶属函数 ω_j 为过去 m 周期内 $\Delta\tau_k \in [\Delta\tau_{kj}, \Delta\tau_{kj+1}]$ 的概率 $P(\Delta\tau_k)$. 应用

单点模糊化、乘积推理和中心加权反模糊化推理方法,可得网络控制系统的 T-S 模型

$$x_{k+1} = \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k^i) (A_d x_k + B_{d0i} u_k + B_{d1i} u_{k-1}). \quad (3)$$

其中

$$\mu_i(\tau_k^i) = \omega_{Ti}(\tau_k^i) / \sum_{i=1}^{L \times M} \omega_{Ti}(\tau_k^i),$$

$$\omega_{Ti}(\tau_k) = \omega_i \times \omega_j = P(\bar{\tau}_k) \times P(\Delta\tau_k).$$

显然有

$$\mu_i(\tau_k^i) > 0, \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k^i) = 1.$$

利用并行分布补偿(PDC)原理,设计如下状态反馈控制器:

R^i : If $\bar{\tau}_k$ is $[\bar{\tau}_{ki}, \bar{\tau}_{ki+1}]$ and $\Delta\tau_k$ is $[\Delta\tau_{kj}, \Delta\tau_{kj+1}]$,

Then $u_i(k) = K_i x_k, i = 1, 2, \dots, L \times M$.

应用单点模糊化、乘积推理和中心加权反模糊化推理方法,可得整个模糊控制器方程

$$u_k = K x_k = \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k^i) K_i x_k. \quad (4)$$

其中: K_i 为控制器增益, τ_k^i 为第 k 次的网络时延.

式(4)代入式(3),可得闭环系统的方程

$$x_{k+1} = \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k) \left[(A_d + B_{d0i} \sum_{j=1}^{L \times M} \mu_j(\tau_k^j) K_j) x_k + (B_{d1i} \sum_{j=1}^{L \times M} \mu_j(\tau_k^j) K_j x_{k-1}) \right]. \quad (5)$$

由式(5)可知, A_d, K_j 和 B_{d0i}, B_{d1i} 是不相关的. 令

$$\begin{cases} A = \sum_{j=1}^L \mu_j(\tau_k) A_d, & K = \sum_{j=1}^{L \times M} \mu_j(\tau_k^j) K_j, \\ M = \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k^i) B_{d0i}, & N = \sum_{i=1}^{L \times M} \mu_i(\tau_k^i) B_{d1i}, \end{cases} \quad (6)$$

则式(5)可表示为

$$x_{k+1} = (A + MK) x_k + NK x_{k-1}. \quad (7)$$

3.2 稳定性分析

引理 1^[4] 给定适当维数的矩阵 A, B, F , 且 $F^T F \leq I$. 则对于任意标量 $\epsilon > 0$, 有如下不等式成立:

$$AFB + B^T F^T A^T \leq \epsilon AA^T + \epsilon^{-1} B^T B. \quad (8)$$

引理 2^[7] (Schur 补性质) 对于给定的对称矩

阵 $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$, 其中 $S_{11} \in R^{r \times r}$, 以下 3 个条件是等价的:

$$\begin{aligned} S &< 0; \\ S_{11} &< 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0; \end{aligned}$$

$$S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0.$$

定理 1 若存在对称正定矩阵 P, S 和一类常数矩阵 K , 使得下式成立:

$$\begin{bmatrix} S - P & (A + MK)^T \\ A + MK & -(P + \epsilon I)^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} -S & (PN)^T \\ PN & -(\epsilon^{-1} I + P^{-1})^{-1} \end{bmatrix} < 0. \quad (10)$$

则控制系统(5)是渐近稳定的.

证明 选取 Lyapunov 函数

$$V(x_{k+1}) = x_{k+1}^T P x_{k+1} + x_k^T S x_k.$$

其中: P 和 S 为对称正定矩阵, $x_{k+1} \neq 0, V(x_{k+1}) > 0$. 沿系统(7)的任意轨线 $V(x_{k+1})$ 的前向差分为

$$\begin{aligned} \Delta V(x_k) &= V(x_{k+1}) - V(x_k) = \\ & x_{k+1}^T P x_{k+1} + x_k^T S x_k - x_k^T P x_k - x_{k-1}^T S x_{k-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

式(7)代入式(11),化简得

$$\begin{aligned} \Delta V(x_k) &= \\ & x_k^T (A_d + MK)^T P (A_d + MK) x_k + x_k^T (A_d + \\ & MK)^T P N x_{k-1} + x_{k-1}^T N^T P (A_d + MK) x_k + \\ & x_{k-1}^T N^T P N x_{k-1} + x_k^T (S - P) x_k - x_{k-1}^T S x_{k-1} = \\ & x_k^T ((A_d + MK)^T P (A_d + MK) + S - P) x_k + \\ & x_{k-1}^T (N^T P N - S) x_{k-1} + x_k^T (A_d + \\ & MK)^T P N x_{k-1} + x_{k-1}^T N^T P (A_d + MK) x_k. \end{aligned} \quad (12)$$

由引理 1 得

$$\begin{aligned} \Delta V(x_k) &< \\ & x_k^T ((A_d + MK)^T P (A_d + MK) + S - P) x_k + \\ & x_{k-1}^T (N^T P N - S) x_{k-1} + \epsilon^{-1} x_{k-1}^T N^T P P N x_{k-1} + \\ & \epsilon x_k^T (A_d + MK)^T (A_d + MK) x_k = \\ & x_k^T ((A_d + MK)^T (P + \\ & \epsilon I) (A_d + MK) + S - P) x_k + \\ & x_{k-1}^T (N^T P^T (P^{-1} + \epsilon^{-1} I) P N - S) x_{k-1}. \end{aligned} \quad (13)$$

闭环系统稳定的充分条件是

$$\Delta V(x_k) < 0, \quad (14)$$

即如果下式成立,则式(14)成立.

$$(A_d + MK)^T (P + \epsilon I) (A_d + MK) + S - P < 0, \quad (15)$$

$$N^T P^T (P^{-1} + \epsilon^{-1} I) P N - S < 0. \quad (16)$$

注意到式(15)是一个非线性矩阵不等式,由引理 2 可得,式(15)等价于下面的线性矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} S - P & (A_d + MK)^T \\ A_d + MK & -(P + \epsilon I)^{-1} \end{bmatrix} < 0; \quad (17)$$

同理,式(16)等价的线性矩阵不等式为式(10). \square

4 仿真实例

设位置伺服系统的状态方程如下:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0.4 & -0.3 \\ 0.8 & 0.2 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0.6 \\ 1 \end{bmatrix} u(t).$$

采样周期为 10 ms, 时延分布如图 1 所示. 则由式(2)可得

$$A_d = \begin{bmatrix} 1.7051 & 0.43267 \\ 0.36056 & 1.2725 \end{bmatrix},$$

最大时延 $\tau_{\max} = 30$ ms, 最小时延 $\tau_{\min} = 10$ ms. 由图 1 和图 2 可得 $\Delta\tau_{\max} = 17.08$ ms, $\Delta\tau_{\min} = -3.07$ ms. 取 $L = 7, M = 7$, 则由图 1, 图 2 和隶属度的统计方法可得某一模糊集合的隶属度 ω_i 和 ω_j , 如图 3 和图 4 所示.

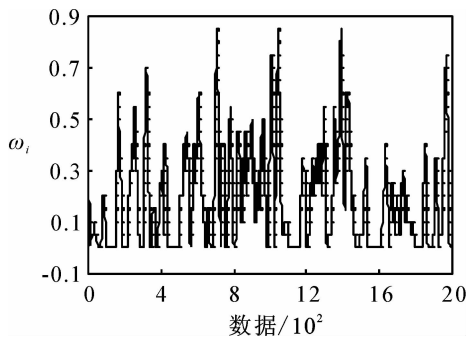


图 3 平均时延 $\bar{\tau}$ 的隶属度

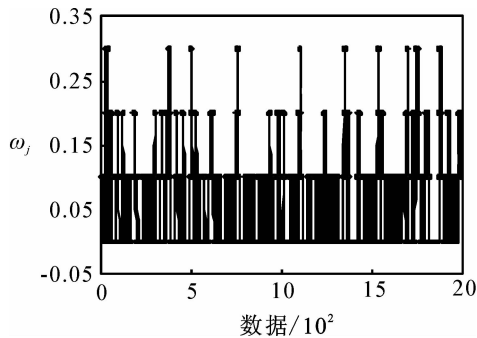
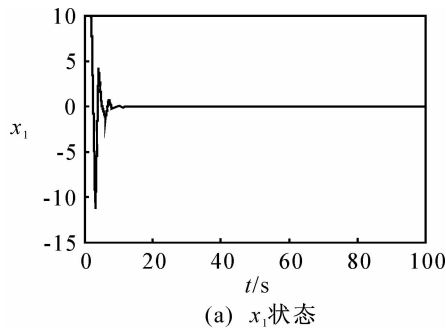
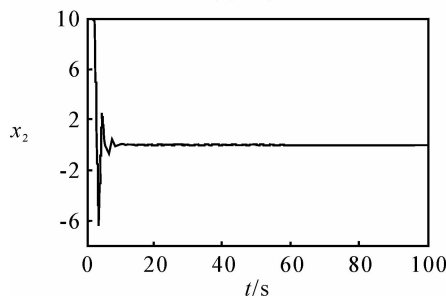


图 4 时延差值 $\Delta\tau$ 的隶属度



(a) x_1 状态



(b) x_2 状态

图 5 基于模糊控制器的状态曲线

由式(6), (17), (10) 和 Matlab 的 LMI 工具箱可得

$$K = [-4.8105 \quad -3.3729],$$

$$P = \begin{bmatrix} 45.55 & 32.46 \\ 36.46 & 28.37 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 55.41 & 46.68 \\ 46.68 & 38.28 \end{bmatrix}.$$

状态仿真曲线如图 5 所示.

5 结 论

本文针对实际得到的网络控制系统时延, 提出了基于平均时延趋势建立网络控制系统的 T-S 模糊模型的方法, 并采用 Lyapunov 定理证明了网络控制系统的稳定性. 控制器设计考虑的是实际网络中的时延, 因此本文提出的方法更适合于实际应用.

参考文献 (References)

- [1] Nilsson J, Bernhardsson, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays[J]. Automatica, 1998, 34(1): 57-64.
- [2] Walsh G C, Hong Y, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems[C]. Proc of the American Control Conf. San Diego: IEEE Press, 1999: 2876-2880.
- [3] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-884. (Fan W H, Cai H, Chen Q W. Stability of networked control systems with time-delay[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(6): 880-884.)
- [4] Xie L B, Fang H J, Zheng Y. Guaranteed cost control for networked control systems[J]. Control Theory and Applications, 2004, 2(2): 143-148.
- [5] 姜培刚, 李春文, 徐文龙, 等. 基于 LMI 方法的网络控制系统的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 17-21. (Jiang P G, Li C W, Xu W L, et al. Robust H_∞ control for the networked control systems based on LMI[J]. Control and Decision, 2004, 19(1): 17-21.)
- [6] 崔桂梅, 李晓理, 穆志纯. 网络闭环系统的离散模糊控制[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2): 260-263. (Cui G M, Li X L, Mu Z C. Discrete fuzzy control of network closed loop system[J]. J of Liaoning Technical University, 2007, 26(2): 260-263.)
- [7] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Yu L. Robust control: Linear matrix inequalities method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)
- [8] Tian E, Yue D, Peng C. Quantized output feedback control for networked control systems[C]. Information Sciences. New York, 2008: 1-19.