

文章编号: 1001-0920(2010)01-0031-06

基于 T-S 模型的非线性网络控制系统的量化保成本控制

褚红燕^{1,2}, 费树岷¹, 岳东²

(1. 东南大学 自动化学院, 南京 210096; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 南京 210042)

摘要: 研究一类非线性网络控制系统的量化保成本控制问题. 首先在考虑量化因素的影响下, 基于 T-S 模糊模型方法建立包含时延、丢包和量化信息的新的非线性网络控制系统模型; 其次运用 Lyapunov 稳定性理论和并行分布式补偿(PDC)方法给出系统稳定性条件, 运用锥补方法和线性矩阵不等式(LMI)技术求解量化保成本控制器. 仿真结果和横向比较结果验证了该方法的有效性.

关键词: 非线性网络控制系统; 量化; 锥补

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Quantized guaranteed cost control for T-S fuzzy nonlinear networked control systems

CHU Hong-yan^{1,2}, FEI Shu-min¹, YUE Dong²

(1. College of Automation, South and East University of China, Nanjing 210096, China; 2. College of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China. Correspondent: CHU Hong-yan, E-mail: dzychu@mail.njnu.edu.cn)

Abstract: This paper considers the problem of quantized guaranteed cost control for a class of nonlinear networked control systems (NNCS). The new model of NNCS is derived based on T-S method considering the quantization, delay and packet dropout. Then by using Lyapunov stability theory and parallel distributed compensation (PDC) method, the stability criteria are given. Guaranteed cost controller is designed by using cone complementary method and LMI technology. The simulation results and the comparison with related paper show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Nonlinear networked control system; Quantization; Cone complementary

1 引言

随着网络通讯技术的不断发展以及对控制和管理要求的不断提高,越来越多的现代控制系统逐渐通过通讯网络来构建系统结构,此类系统被统称为网络控制系统(NCS).实际的工业控制系统中存在非线性,而非线性网络控制系统(NNCS)由于非线性和时延的存在使得闭环控制器的设计富有挑战性.Nesic^[1,2]研究了具有干扰的 NNCS 的输入至状态稳定性和输入至输出 L_p 稳定性,然而 Nesic 只研究了稳定性问题,并未处理控制器设计问题.文献[3]所提出的 T-S 模糊控制方法由于其结构简单而被广泛应用于非线性时延系统的分析和设计中.[4]研究了具有时延的 T-S 模糊系统的保成本控制,基

于双索引规则设计一新的动态输出反馈模糊保成本控制器,采用最小化方法搜索保成本函数的次优上界.[5]研究了区间时变时延的 T-S 模糊系统的鲁棒 H 设计,利用矩阵函数的凸性,在很大程度上可减少保守性.利用 Lyapunov 方法和 LMI 求解器可方便地得出控制器的设计和求解,但[4,5]未将 T-S 模糊方法应用于 NNCS 中.[6]给出一种基于 T-S 模型的网络控制系统的鲁棒 H 设计方法,构造 Lyapunov-Krasovskii 函数并引入适当的自由权矩阵,通过解一组 LMI 得出鲁棒 H 控制器增益矩阵.

上述针对 NNCS 的分析及设计都假设信号能直接传输且为无损传输,而在 NNCS 中公共网络有

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60835001,60774060,60704024); 江苏省自然科学基金项目(BK2006573).

作者简介: 褚红燕(1979—),女,江苏泰州人,讲师,博士,从事网络控制系统、时滞系统等研究; 费树岷(1961—),男,安徽宣城人,教授,博士生导师,从事非线性控制、鲁棒控制等研究.

限的传输能力必然会对在线控制产生巨大影响,因此数据的量化处理是必要的. Yue^[7,8]研究了线性网络控制系统的时不变和时变量化控制. 目前对 NNCS 的量化控制器的分析和设计尚待解决.

本文在传感器与控制器以及控制器与执行器之间分别设置对数量化器,数据量化减少了网络传输的数据量,提高了网络 QoS(服务质量);建立了新的 NNCS 的 T-S 模糊模型,首次在模型中同时包含丢包、时延信息以及量化信息. 采用 Lyapunov 方法和并行分布式补偿(PDC)方法对 NNCS 进行稳定性分析,通过引入自由权矩阵大大减少了结果的保守性,通过一些变量替换和等效处理,降低了求解的复杂性. 运用锥补方法和线性矩阵不等式技术求解量化保成本控制器,通过横向比较验证了本文所述方法的有效性.

2 系统描述和预备知识

引理 1^[9] D, E 和 $F(k)$ 是具有适当维数的实矩阵,且满足 $F^T(k)F(k) \leq I$, 则对任意的变量 $v > 0$, 满足

$$DF(k)E + E^T F^T(k)D^T - \gamma^{-1}DD^T + E^T E.$$

2.1 对数量化器

定义 1 一量化器被称为对数量化器(见图 1),若量化级数集合为 $U = \{ \pm u_i \mid u_i = i u_0, i = \pm 1, \pm 2, \dots \} \cup \{0\}, 0 < \delta < 1, u_0 > 0$, 映射关系 $q(\cdot)$ 定义为

$$q(v) = \begin{cases} u_i, & v > 0 \text{ 且 } \frac{u_i}{1+\delta} < v \leq \frac{u_i}{1-\delta}; \\ 0, & v = 0; \\ -q(-v), & v < 0. \end{cases} \quad (1)$$

$\delta = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$, 量化密度 $q = \frac{2}{\ln(\frac{1+\alpha}{1-\alpha})}$, 则 α 越小, q 越小.

本文称 q 为量化密度.

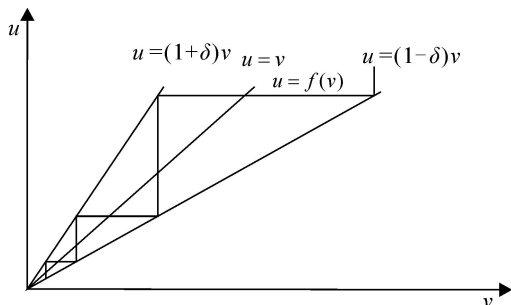


图 1 对数量化器

2.2 系统描述

将 NNCS 的状态量表示成 T-S 模糊模型,则有: 对象规则 i : 若 $x_1(t)$ 为 $W_1^i, \dots, x_s(t)$ 为 W_s^i , 则

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t), \\ x(t) &= x(t_0 - \tau) e^{A_i(t-t_0+\tau)} \triangleq \phi(t), \\ t &\in [t_0 - \tau, t_0]. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $x_1(t), \dots, x_s(t)$ 为精确变量; $W_g^i (g = 1, 2, \dots, s)$ 为模糊集; $x(t) \in R^n$ 为状态向量; $u(t) \in R^m$ 为控制输入向量; A_i 和 B_i 为系统矩阵. 假设 A_i 不稳定且 (A_i, B_i) 可稳定, 应用中心加权平均反模糊化可得

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\tau(t)) [A_i x(t) + B_i u(t)].$$

其中

$$h_i(\tau(t)) = \frac{\mu_i(\tau(t))}{\sum_{i=1}^r \mu_i(\tau(t))},$$

$$\mu_i(\tau(t)) = \prod_{g=1}^s W_g^i(\tau_g(t)).$$

假设文中对所有的 t 有 $0 < \mu_i(\tau(t)) < 1, i = 1, \dots, r, \sum_{i=1}^r \mu_i(\tau(t)) > 0$, 则 $h_i(\tau(t)) > 0, i = 1, \dots, r, \sum_{i=1}^r h_i(\tau(t)) = 1$.

网络延迟 $\tau = \tau_{\text{MADB}} + \tau_{\text{MATI}}$, 其中 τ_{MADB} 表示最大可允许延迟界(MADB), τ_{MATI} 表示最大可允许传输间隔(MATI), 且存在 $\delta > 0$ 使得 $(i_{k+1} - i_k)h + \tau_{k+1} < \delta$, 如图 2 所示.

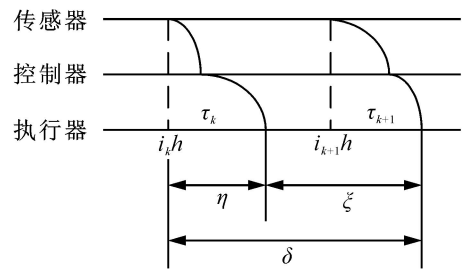


图 2 NCS 时延示意图

设置量化器后,系统模型如图 3 所示^[11].

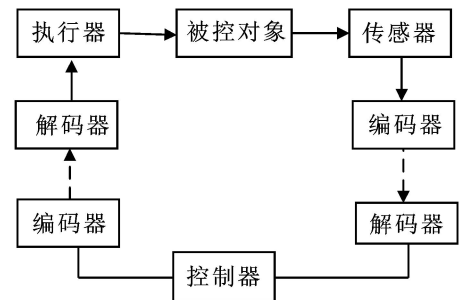


图 3 带量化的网络控制系统结构图

量化状态反馈控制器模糊模型为:

控制规则 i : 若 $x_1(i_k h)$ 为 $W_1^i, \dots, x_s(i_k h)$ 为 W_s^i , 则

$$\begin{aligned} u(t) &= q(v(t)), v(t) = K_i g(x(i_k h)), \\ t &\in [i_k h + \tau, i_{k+1} h + \tau]. \end{aligned} \quad (3)$$

这里 K_i 为状态反馈增益, $q(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 定义如下:

$$\begin{aligned} q(v) &= \text{diag}(q_1(v_1), \dots, q_m(v_m)), \\ g(x) &= \text{diag}(g_1(x_1), \dots, g_n(x_n)). \end{aligned}$$

其中

$$q_i(-v_i) = -q_i(v_i), g_j(-x_j) = -g_j(x_j).$$

定义量化误差

$$e(v_i) = q_i(v_i) - v_i = q_i(v_i)v_i,$$

则对数量化器 $q_i(\cdot)$ 和 $g_j(\cdot)$ 可描述为^[10]

$$q_i(v_i) = (1 + q_i(v_i))v_i,$$

$$g_j(x_j) = (1 + g_j(x_j))x_j.$$

这里

$$|q_i(v_i)| = q_i, |g_j(x_j)| = g_j.$$

定义

$$q = \text{diag}(q_1, \dots, q_m),$$

$$g = \text{diag}(g_1, \dots, g_n),$$

则

$$q(v) = (I + q)v, g(x) = (I + g)x. \quad (4)$$

若 $q = 0, g = 0$, 则 $q(v) = v, g(x) = x$, 即无量化。

结合式(3)和(4), 到达执行器的控制量表示为

$$u(t) = (I + q)K_i(I + g)x(i_kh) \triangleq (K_i + (K_i))x(i_kh),$$

则控制器为

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(i_kh)(K_i + (K_i))x(i_kh),$$

其中

$$(K_i) = qK_i + K_i g + qK_i g.$$

因此网络控制系统的模型可表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(t) \sum_{j=1}^r h_j(i_kh) [A_i x(t) + B_i (K_j + (K_j))x(i_kh)]. \\ t & \in [i_kh + k, i_{k+1}h + k + 1), \\ x(t) &= x(t_0 - \tau) e^{-A_i(t-t_0+\tau)} \triangleq \phi(t), \\ t & \in [t_0 - \tau, t_0]. \end{aligned} \quad (5)$$

注 1 在式(5)中, $i_k (k = 1, 2, \dots)$ 为正整数且 $\{i_1, i_2, i_3, \dots\} \subset \{0, 1, 2, \dots\}$. 若 $i_{k+1} < i_k$, 表示有错误, 则无实际应用价值, 所以本文假设 $i_{k+1} > i_k$.

对给定对称正定矩阵 Q_1, Q_2 , 定义保成本函数

$$\begin{aligned} J_k &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k J_k = \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k \int_{i_kh+k}^{i_{k+1}h+k+1} [x^T(t) Q_1 x(t) + \\ & x^T(i_kh) (K_i + (K_i))^T Q_2 (K_j + \\ & (K_j)) x(i_kh)] dt, \end{aligned}$$

其中

$$h_i = h_i(t), h_j^k = h_j(i_kh).$$

整个区间上的保成本函数为

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^N J_k.$$

3 稳定性分析

定理 1 对给定的常数 α 和矩阵 $K_j (j = 1, 2, \dots, r), Q_1 = Q_1^T > 0, Q_2 = Q_2^T > 0$, 若存在恰当维数的矩阵 $P > 0, T > 0, N_{ij} (l = 1, 2, 3; i, j = 1, \dots, r), M_l (l = 1, 2, 3)$, 使得下列不等式成立:

$$\alpha < 0, 1 \quad i \quad r, \quad (6)$$

$$ij + ji < 0, i \quad i < j \quad r, \quad (7)$$

则系统渐近稳定, 且保成本函数 J 的上界 J^* 为

$$J^* = x^T(t_0) P x(t_0) + \int_{t_0}^{t_0+\tau} \Phi^T(s) T \Phi(s) ds.$$

证明 构造如下 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V(x) &= x^T(t) P x(t) + \int_{t-\tau}^t \dot{x}^T(v) T \dot{x}(v) dv ds, \\ P &> 0, T > 0. \end{aligned}$$

已知

$$x(t) - x(i_kh) - \int_{i_kh}^t \dot{x}(s) ds = 0, \quad (8)$$

则根据式(5)和(8), 如下两个等式成立:

$$2^T(t) N [x(t) - x(i_kh) - \int_{i_kh}^t \dot{x}(s) ds] = 0,$$

$$2^T(t) M [-A_i x(t) - B_i (K_j + (K_j)) x(i_kh) + \dot{x}(t)] = 0.$$

其中

$$^T(t) = [x^T(t) \quad x^T(i_kh) \quad \dot{x}^T(k)],$$

$$N^T = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k [N_{1ij}^T \quad N_{2ij}^T \quad N_{3ij}^T],$$

$$M^T = [M_1^T \quad M_2^T \quad M_3^T].$$

对 $V(t)$ 求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2x^T(t) P \dot{x}(t) + 2^T(t) N [x(t) - x(i_kh) - \\ & \int_{i_kh}^t \dot{x}(s) ds] + 2^T(t) M [-A_i x(t) - \\ & B_i (K_j + (K_j)) x(i_kh) + \dot{x}(t)] + \\ & \dot{x}(t) T \dot{x}(t) - \int_{t-\tau}^t \dot{x}^T(s) T \dot{x}(s) ds. \end{aligned}$$

由

$$\begin{aligned} & - 2^T(t) \int_{i_kh}^t \dot{x}(s) ds \\ & ^T(t) N T^{-1} N^T(t) + \int_{i_kh}^t \dot{x}^T(s) T \dot{x}(s) ds, \\ & - \int_{t-\tau}^t \dot{x}^T(s) T \dot{x}(s) ds - \int_{i_kh}^t \dot{x}(s) T \dot{x}(s) ds, \end{aligned}$$

得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= 2x^T(t) P \dot{x}(t) + 2^T(t) N [x(t) - x(i_kh)] + \\ & 2^T(t) M [-A_i x(t) - B_i (K_j + (K_j)) x(i_kh) + \\ & \dot{x}(t)] + \dot{x}(t) T \dot{x}(t) + ^T(t) N T^{-1} N^T(t). \end{aligned}$$

利用 Schur 补,根据模糊性质以及下列不等式:

$$\begin{aligned} & (K_i + (K_i))^T Q_2 (K_j + (K_j)) + \\ & (K_j + (K_j))^T Q_2 (K_i + (K_i)) \\ & (K_i + (K_i))^T Q_2 (K_i + (K_i)) + \\ & (K_j + (K_j))^T Q_2 (K_j + (K_j)), \end{aligned}$$

得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i h_i^k \bar{u}^T(t) \bar{u}(t) + \\ & \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=i+1}^r h_i h_j^k \bar{u}^T(t) (\bar{u}_{ij} + \bar{u}_{ji})(t) - \\ & \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k [x^T(t) Q_1 x(t) + x^T(i_k h) (K_j + \\ & (K_j))^T Q_2 (K_j + (K_j)) x(i_k h) J]. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ij} &= \begin{bmatrix} \bar{u}_{ij} & * \\ i & \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_{ji} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{ji} & * \\ j & \end{bmatrix}, \\ \bar{u}_j &= [0 \quad K_j + (K_j) \quad 0 \quad 0] J, \quad \bar{u}_{ij} = -Q_2, \\ \bar{u}_{ij} &= \begin{bmatrix} 11 & * & * & * \\ 21 & 22 & * & * \\ 31 & 32 & 33 & * \\ 41 & 42 & 43 & 44 \end{bmatrix}, \\ \bar{u}_{11} &= N_{1ij} + N_{1ij}^T - M_1 A_i - A_i^T M_1^T + Q_1, \\ \bar{u}_{21} &= N_{2ij} - N_{1ij}^T - M_2 A_i - \\ & K_j^T B_i^T M_1^T - (K_j)^T B_i^T M_1^T, \\ \bar{u}_{22} &= -N_{2ij} - N_{2ij}^T - K_j^T B_i^T M_2^T - M_2 B_i K_j - \\ & M_2 B_i (K_j) - (K_j)^T B_i^T M_2^T, \\ \bar{u}_{31} &= N_{3ij} - M_3 A_i + P^T + M_1^T, \\ \bar{u}_{32} &= -N_{3ij} - M_3 B_i K_j - M_3 B_i (K_j) + M_2^T, \\ \bar{u}_{33} &= T + M_3 + M_3^T, \\ \bar{u}_{41} &= N_{1ij}^T, \quad \bar{u}_{42} = N_{2ij}^T, \\ \bar{u}_{43} &= N_{3ij}^T, \quad \bar{u}_{44} = -T. \end{aligned}$$

若不等式(6)和(7)同时满足,则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j^k \int_{i_k h + k}^{i_{k+1} h + k+1} [x^T(t) Q_1 x(t) + \\ & x^T(i_k h) (K_i + (K_i))^T Q_2 (K_j + \\ & (K_j)) x(i_k h) J] dt, \end{aligned}$$

所以

$$\dot{V}(t) = J_k, t \in [i_k h + k, i_{k+1} h + k+1). \quad (9)$$

由 $\int_{i_k h + k}^{i_{k+1} h + k+1} = (t_0, \dots)$, 对式

$$(9) \text{ 左右两边积分得 } J = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^N J_k V(t_0) \triangleq J^*,$$

定理 1 得证.

注 2 在定理 1 中,若令 $q = g = 0$,则该问题成无量化作用的稳定性问题.而 (K) 以非线性形

式存在,使定理 1 无法直接求解,需进行改写.

定理 2 对给定的常数 \bar{u} 和矩阵 $K_j (j = 1, \dots, r), Q_1 = Q_1^T > 0, Q_2 = Q_2^T > 0$,如果存在恰当维数的矩阵 $P > 0, T > 0, M_l (l = 1, 2, 3), N_{lij} (l = 1, 2, 3; i, j = 1, \dots, r)$ 和变量 $\bar{u}_m (m = 1, 2, 3)$,使得下列线性矩阵不等式成立:

$$\bar{u}_{ii} < 0, \quad 1 \leq i \leq r, \quad (10)$$

$$\bar{u}_{ij} + \bar{u}_{ji} < 0, \quad 1 \leq i < j \leq r, \quad (11)$$

则系统在量化器作用下渐近稳定,且保成本函数 J 的上界 J^* 为

$$J^* = x^T(t_0) P x(t_0) + \int_{t_0}^{t_0^*} \bar{\phi}^T(s) T \bar{\phi}(s) ds.$$

证明

$$\bar{u}_{ij} = \bar{u}_{ij} + L_{B_i} L_{(K_j)} + L_{(K_j)}^T L_{B_i}^T,$$

其中

$$L_{B_i}^T = [-B_i^T M_1^T \quad -B_i^T M_2^T \quad -B_i^T M_3^T \quad 0 \quad I],$$

$$L_{(K_j)} = [0 \quad (K_j) \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$L_{K_j} = [0 \quad K_j \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

又因为

$$(K_j) = q K_j + K_j g + q K_j g,$$

所以

$$L_{(K_j)} = q L_{K_j} + L_{K_j} g + q L_{K_j} g,$$

因此

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ij} &= \bar{u}_{ij} + L_{B_i} (q L_{K_j} + L_{K_j} g + q L_{K_j} g) + \\ & (L_{K_j}^T q + g^T L_{K_j} + g^T L_{K_j}^T q) L_{B_i}^T. \end{aligned}$$

应用引理 1,存在 $\bar{u}_i > 0, i = 1, 2, 3$,使得

$$\begin{aligned} \bar{u}_{ij} &= \bar{u}_{ij} + \bar{u}_1^{-1} L_{B_i} (q L_{K_j}^T + L_{K_j}^T q) L_{B_i}^T + \\ & \bar{u}_2^{-1} g^T L_{K_j} L_{K_j} g + \bar{u}_3^{-1} L_{B_i} (q L_{K_j}^T + L_{K_j}^T q) L_{K_j} g. \end{aligned}$$

其中

$$\bar{u}_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{11} & * & * & * & * \\ \bar{u}_{21} & \bar{u}_{22} & * & * & * \\ \bar{u}_{31} & \bar{u}_{32} & \bar{u}_{33} & * & * \\ \bar{u}_{41} & \bar{u}_{42} & \bar{u}_{43} & \bar{u}_{44} & * \\ 0 & \bar{u}_{52} & 0 & 0 & \bar{u}_{55} \end{bmatrix};$$

$$\bar{u}_{11} = \bar{u}_{11}, \quad \bar{u}_{21} = N_{2ij} - N_{1ij}^T - M_2 A_i - K_j^T B_i^T M_1^T,$$

$$\bar{u}_{22} = -N_{2ij} - N_{2ij}^T - K_j^T B_i^T M_2^T - M_2 B_i K_j,$$

$$\bar{u}_{31} = \bar{u}_{31}, \quad \bar{u}_{32} = -N_{3ij} - M_3 B_i K_j + M_2^T,$$

$$\bar{u}_{33} = \bar{u}_{33}, \quad \bar{u}_{41} = \bar{u}_{41}, \quad \bar{u}_{42} = \bar{u}_{42},$$

$$\bar{u}_{43} = \bar{u}_{43}, \quad \bar{u}_{44} = \bar{u}_{44}, \quad \bar{u}_{52} = K_j, \quad \bar{u}_{55} = -Q_2^{-1}.$$

由 $q = q I, g = g I$, 及 Schur 补,得

$$\bar{u}_{ij} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{ij} & * \\ \bar{u}_{ji} & \bar{u}_{22} \end{bmatrix} = \bar{u}_{ij}.$$

其中

$$\bar{u}_{21} = [L_{B_i} \quad \bar{u}_1^{-1} L_{K_j}^T \quad L_{B_i} \quad \bar{u}_2^{-1} L_{K_j}^T \quad L_{B_i} \quad \bar{u}_3^{-1} L_{K_j}^T]^T,$$

$$\begin{aligned}
\tilde{Q}_2 = \text{diag} \left\{ -\frac{1}{2}I, -\frac{1}{2}I, -\frac{1}{2}I, \right. \\
\left. -\frac{2}{g}I, -\frac{3}{2}I, -\frac{3}{2}I \right\}.
\end{aligned}$$

4 量化保成本控制器设计

定理 3 对系统 (5), 给定 q 和 g , 对给定变量 $\mathbf{l}_2, \mathbf{l}_3$ 以及给定矩阵 $\tilde{Q}_1 = \tilde{Q}_1^T > 0, \tilde{Q}_2 = \tilde{Q}_2^T > 0$, 若存在矩阵 $\tilde{P} > 0, \bar{T} > 0, \bar{N}_{lij} (l = 1, 2, 3; i, j = 1, 2, \dots, r)$, $X, Y_j (j = 1, 2, \dots, r)$ 和标量 $m (m = 1, 2, 3)$, 使得下列不等式成立:

$$\tilde{u}_{ii} < 0, \quad 1 \leq i \leq r, \quad (12)$$

$$\tilde{u}_{ij} + \tilde{u}_{ji} < 0, \quad i \neq j, \quad 1 \leq i, j \leq r, \quad (13)$$

则系统渐近稳定, 控制反馈增益为 $K_j = Y_j X^T$, 且保成本函数 \tilde{J} 的上界 \tilde{J}^* 为

$$\begin{aligned}
\tilde{J}^* = x^T(t_0) X^{-1} \tilde{P} X^{-T} x(t_0) + \\
\int_{t_0}^{t_1} \phi^T(s) X^{-1} \bar{T} X^{-T} \phi(s) ds. \quad (14)
\end{aligned}$$

证明 定义 $M_1 = X^{-1}, M_2 = \mathbf{l}_2 X^{-1}, M_3 = \mathbf{l}_3 X^{-1}$, 并对式 (10) 和 (11) 两边分别左乘、右乘 $\text{diag}(J_1, J_2)$ 和转置, $J_1 = \text{diag}(X, X, X, X, I), J_2$ 为单位阵.

$$\tilde{u}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{ij} & * \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} \end{bmatrix}.$$

$$\tilde{u}_{ij} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{11} & * & * & * & * \\ \tilde{u}_{21} & \tilde{u}_{22} & * & * & * \\ \tilde{u}_{31} & \tilde{u}_{32} & \tilde{u}_{33} & * & * \\ \tilde{u}_{41} & \tilde{u}_{42} & \tilde{u}_{43} & \tilde{u}_{44} & * \\ 0 & \tilde{u}_{52} & 0 & 0 & \tilde{u}_{55} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{u}_{11} = \bar{N}_{1ij} + \bar{N}_{1ij}^T - A_i X^T - X A_i^T + \tilde{Q}_1,$$

$$\tilde{u}_{21} = \bar{N}_{2ij} - \bar{N}_{1ij}^T - \mathbf{l}_2 A_i X^T - Y_j^T B_i^T,$$

$$\tilde{u}_{22} = \bar{N}_{2ij} - \bar{N}_{2ij}^T - \mathbf{l}_2 Y_j^T B_i^T - \mathbf{l}_2 B_i Y_j,$$

$$\tilde{u}_{31} = \bar{N}_{3ij} - \mathbf{l}_3 A_i X^T + \tilde{P}^T + X,$$

$$\tilde{u}_{32} = -\bar{N}_{3ij} - \mathbf{l}_3 B_i Y_j + \mathbf{l}_3 X,$$

$$\tilde{u}_{33} = \bar{T} + \mathbf{l}_3 X + \mathbf{l}_3 X^T,$$

$$\tilde{u}_{41} = \bar{N}_{1ij}^T, \tilde{u}_{42} = \bar{N}_{2ij}^T, \tilde{u}_{43} = \bar{N}_{3ij}^T,$$

$$\tilde{u}_{44} = -\bar{T}, \tilde{u}_{52} = Y_j, \tilde{u}_{55} = -\tilde{Q}_2^{-1},$$

$$\tilde{u}_{21}^T = [\tilde{L}_{B_i} \quad \mathbf{l}_1 L_{Y_j}^T \quad \tilde{L}_{B_i} \quad \mathbf{l}_2 L_{Y_j}^T \quad \tilde{L}_{B_i} \quad \mathbf{l}_3 L_{Y_j}^T]^T,$$

$$\tilde{u}_{22} = \text{diag} \left\{ -\frac{1}{2}I, -\frac{1}{2}I, -\frac{1}{2}I, \right.$$

$$\left. -\frac{2}{g}I, -\frac{3}{2}I, -\frac{3}{2}I \right\},$$

$$\tilde{L}_{B_i}^T = [-B_i^T \quad -\mathbf{l}_2 B_i^T \quad -\mathbf{l}_3 B_i^T \quad 0 \quad I],$$

$$L_{Y_j} = [0 \quad Y_j \quad 0 \quad 0 \quad 0], \tilde{Q}_1 = X Q_1 X^T,$$

$$\tilde{P} = X P X^T, \bar{N}_{lij} = X N_{lij} X^T, l = 1, 2, 3,$$

$$\bar{T} = X T X^T, \tilde{Q}_2 = Q_2.$$

采用锥补法最小化式 (14) 中的 \tilde{J}^* . 从式 (5) 得知 $\phi(t) = A_i \phi(t)$, 假设存在 $\lambda_i > 0 (i = 1, 2)$ 使得 $X^{-1} \tilde{P} X^{-T} = \lambda_1 I, X^{-1} \bar{T} X^{-T} = \lambda_2 I$, 则

$$\tilde{J}^* = \lambda_1 x^T(t_0) x(t_0) + q_a \int_{t_0}^{t_1} \phi^T(t) \phi(t) dt,$$

$$q_a = \min \lambda_i.$$

通过获得初态变化范围, 即 $\phi^T(t) \phi(t) \leq q_b, t \in [t_0, t_1]$, 则

$$\tilde{J}^* \leq q_b \lambda_1 + q_b q_a \lambda_2. \quad (15)$$

定义

$$S_X = X^{-1}, S_P = \tilde{P}^{-1}, S_T = \bar{T}^{-1},$$

$$S_{N_1} = N_1^{-1}, S_{N_2} = N_2^{-1},$$

则系统 (5) 保成本问题可转换成如下最优控制问题:

$$\min q_b \lambda_1 + q_b q_a \lambda_2 + T_r(S_P \tilde{P} + S_T \bar{T} + S_X X);$$

s. t. 式 (12) 和 (13), 且如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -\lambda_1 I & * \\ S_X & -S_P \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} -\lambda_2 I & * \\ S_X & -S_T \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{bmatrix} S_P & * \\ I & \tilde{P} \end{bmatrix} \leq 0, \begin{bmatrix} S_T & * \\ I & \bar{T} \end{bmatrix} \leq 0,$$

$$\begin{bmatrix} S_X & * \\ I & X \end{bmatrix} \leq 0, X > 0, \tilde{P} > 0,$$

$$\bar{T} > 0, S_X > 0, S_P > 0, S_T > 0. \quad (16)$$

5 仿真算例

考虑由网络控制的一刚性机械臂, 该机械臂的一端通过旋转铰链连接至基体, 运动方程表示如下:

$$\ddot{J} = -(0.5 m g l + M g l) \sin \theta + u.$$

其中: θ 表示铰链的旋转角度, $m = 1.5 \text{ kg}$ 为负载质量, $M = 3 \text{ kg}$ 为机械臂质量, $l = 0.5 \text{ m}$ 为臂长, $J = M l^2 + (1/3) m l^2 = 0.875 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 为惯性常数, u 为所加控制转矩. $\theta = 0$ 表示机械臂处于垂直平衡位置, 此时 $u = 0$, 控制任务是使机械臂从 $[0, \pi/2]$ 回到平衡位置, 使 $\dot{\theta} = 0, \theta = 0, \ddot{\theta} = 0$.

定义状态变量 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$, 构造 T-S 模糊模型:

规则 1: 若 $|\theta|$ 接近 0, 则 $\dot{x} = A_1 x + B_1 u$;

规则 2: 若 $|\theta|$ 接近 $\pi/2$, 则 $\dot{x} = A_2 x + B_2 u$.

其中

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{2(0.5mgl + Mgl)}{J} & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{0.5mgl + Mgl}{J} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mu_1(x_1) = (0.5 - |x_1|)/0.5,$$

$$\mu_2(x_1) = 1 - \mu_1(x_1).$$

选取量化密度为 $q = g = 0.8$ 和 $q = g = 1$ (不考虑量化), 由式(1)得 $q = g = 1/9$ 和 $q = g = 0$, 选取 $l_2 = 9, l_3 = 30, \tilde{Q}_1 = I, Q_2 = I, x(0) = [1/6, 0]^T, \phi^T(t)\phi(t) = 1, t \in [t_0, t_1]$, 则得 $q_a = 13.4, q_b = 0.2742$.

在相同条件下与文献[6]进行比较, 结果如表 1 所示.

表 1 无量化和无保成本时与文献[6] 的比较结果

	K_1	K_2
本文定理 3	0.208 [- 17.6098, - 3.9462]	[11.0641, - 3.8024]
文献 [6]	0.15 [-10.5000, - 5.1057]	[3.8800, - 5.0628]

1) 当考虑保成本而不量化时: 选取 $l_2 = 9, l_3 = 30$, 利用定理 3 可得

$$= 0.168,$$

$$K_1 = [16.9082 \quad - 3.7359],$$

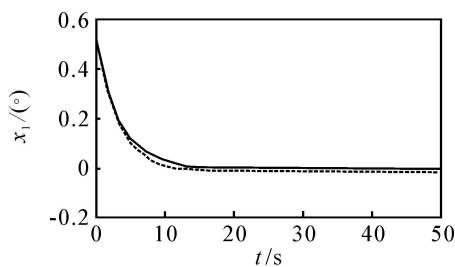
$$K_2 = [10.2396 \quad - 3.5305].$$

2) 既考虑保成本, 也考虑量化时, 取 $q = g = 1/9, l_2 = 9, l_3 = 30$, 则利用定理 3 得

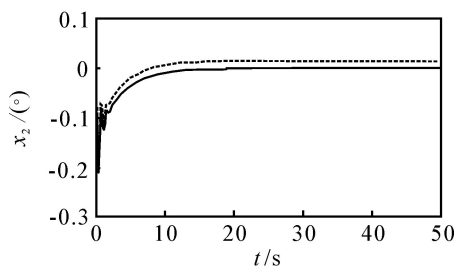
$$K_1 = [1.3522 \quad - 0.6422],$$

$$K_2 = [- 5.0037 \quad - 0.7687].$$

保成本上限 $J = 45.06, \epsilon = 0.048$.



(a) 系统 x_1 的状态响应



(b) 系统 x_2 的状态响应

图 4 有量化和没有量化情况下系统的状态响应

系统在有量化作用和没有量化作用下的状态响应如图 4 所示, 初始状态 $x(0) = [1/6, 0]^T$.

6 结 论

本文研究了 NNCS 的量化保成本控制问题. 在考虑量化的影响下, 基于 T-S 模糊模型方法建立了新的 NNCS 模型. 运用 Lyapunov 理论和 LMI 技术, 证明了系统稳定性条件, 并设计了量化保成本控制器, 运用锥补方法求解成本函数上界. 最后在多种情况下对刚性机械臂系统进行了仿真验证, 运用定理 3, 在不考虑量化的情况下给出的仿真结果与文献[6]的结果进行横向对比, 验证了本文所述方法的有效性和小保守性. 有量化和无量化情况下的状态响应图验证了量化对系统响应的有效性.

参考文献(References)

- [1] Netic D, Teel A. Input-to-state stability of networked control systems[J]. Automatica, 2004, 40(12): 2121-2128.
- [2] Netic D, Teel A. Input-output stability properties of networked control systems[J]. IEEE Trans Automatic Control, 2004, 49(10): 1650-1667.
- [3] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [4] Guan X P, Chen C L. Delay-dependent guaranteed cost control for T-S fuzzy systems with time delays [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2004, 12(2): 236-249.
- [5] Tian E G, Yue D, Zhang Y J. Delay-dependent robust control for uncertain T-S fuzzy system with interval time-varying delay[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(12): 1708-1719.
- [6] Zhang H G, Yang J. T-S fuzzy-model-based robust H_∞ design for networked control systems with uncertainties [J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2007, 3(4): 289-301.
- [7] Yue D, Peng C, Tang G Y. Guaranteed cost control of linear systems over networks with state and input quantizations [J]. IEE Proc of Control Theory and Applications, 2006, 153(6): 658-664.
- [8] Yue D, Lam J, Wang Z D. Persistent disturbance rejection via state feedback for networked control systems[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2007, 153(6): 658-664.
- [9] Barmish B R. Necessary and sufficient conditions for quadratic stabilizability of an uncertain system[J]. J of Optimization Theory and Applications, 1985, 46(4): 399-408.

(下转第 42 页)

提出的挖掘含负项目的频繁项集算法 MFPPN. 表 2 给出了对两个数据集设置不同的支持度阈值的实验结果.

Chess 是一个较大的真实数据集, 并且相当稠密, 尤其是考虑了负项目后, 数据集变得更为稠密, 因此在实验中主要比较了支持度较高的情况. 从实验结果数据可以看出, 无论原始数据集是稀疏还是稠密, 当支持度阈值较高, 频繁项集个数较少时, 3 种算法的挖掘时间相差不大; 而当频繁项集个数较多时, MFPPN 算法的时间远远小于直接 FP-growth 算法; 而与 MFPPN 算法相比也有一定提高. 由此可见, MFPPN 算法对于挖掘含负项目的频繁项集是有效的, 且具有较高的效率.

5 结 论

在不扩充原始数据库的条件下, 将原始数据库中的频繁正、负项目插入频繁模式树中, 并对 FP 树的构造作了适当改进, 为每个节点引入一个位串来存储其前缀路径, 因此挖掘过程中不需要反复遍历节点, 使挖掘效率得到提高. 实验结果表明, 本文算法比现有的同类挖掘算法和直接 FP-growth 算法具有更好的效率.

由于事务项中引入负项目后, 事务中的各项存在极大的相关性, 虽然 MFPPN 挖掘出了完备的包含正负项目的频繁项集, 但是数目较多, 同时很多含正负项目的频繁项集都是由频繁的负项目构成, 甚至全是频繁负项目, 这些对应的规则可能在某些领域没有太大的应用价值. 如何有效地限制频繁项集, 只挖掘出某领域有实用价值的频繁项集是今后进一步研究的方向.

参考文献(References)

- [1] Jiawei Han, Micheline Kambr. Data mining concepts and techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [2] Jean-François Boulicaut, Artur Bykowski, Baptiste Jeudy. Towards the tractable discovery of association rules with negations[C]. FQAS 00. Warsaw, 2000: 425-434.

- [3] 武鹏程, 袁兆山. 混合关联规则及其挖掘算法[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(5): 895-898.
(Wu P C, Yuan Z S. Hybrid association rules and their mining algorithms[J]. Mini-micro Systems, 2003: 24(5): 895-898.)
- [4] 卢生炎, 饶丹. 一种挖掘带否定关联规则的算法[J]. 计算机工程与科学, 2004, 26(10): 63-65.
(Lu Y S, Rao D. A mining algorithm for association rules with negation [J]. Computer Engineering & Science, 2004, 26(10): 63-65.)
- [5] Rakesh Agrawal, Ramakrishnan Srikant. Fast algorithms for mining association rules[C]. Proc of the 20th VLDB Conf. Chile, 1994: 487-499.
- [6] 张玉芳, 熊忠阳, 彭燕, 等. 基于 FP-Tree 含正负项目的频繁项集挖掘算法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(2): 246-253.
(Zhang Y F, Xiong Z Y, Peng Y, et al. Study association rules with negative items based on FP-Tree [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(2): 246-253.)
- [7] Jiawei Han. Mining frequent patterns without candidate generation[C]. Proc of 2000 ACM SIGMOD Int Conf. Dalas, 2000: 1-20.
- [8] Agrawal R, Imielinaki T, Swami A. Mining association rules between sets of items in large databases[C]. Proc of the ACM SIGMOD Conf on Management of Data. Washington DC, 1993: 207-216.
- [9] <http://fimi.cs.helsinki.fi>.
- [10] 李彤岩, 肖海林, 李兴明. 通信网告警加权关联规则挖掘算法的研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(6): 807-810.
(Li T Y, Xiao H L, Li X M. Algorithm for mining weighted alarm association rules in telecommunication networks[J]. J of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(6): 807-810.)
- [11] 刘君强, 孙晓莹, 王勋, 等. 挖掘最大频繁模式的新方法[J]. 计算机学报, 2004, 27(10): 1329-1334.
(Liu J Q, Su X Y, Wang X, et al. A new algorithm for mining maximal frequent patterns[J]. Chinese J of Computers, 2004, 27(10): 1329-1334.)

(上接第 36 页)

- [10] Fu M, Xie L. The sector bound approach to quantized feedback control [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(11): 1698-1711.
- [11] 唐功夫, 张勇. 一类不确定性非线性网络控制系统的

- 扰动抑制[J]. 控制与决策, 2008, 23(9): 1055-1064.
(Tang G Y, Zhang Y. Disturbance rejection for a class of uncertain nonlinear networked control systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(9): 1055-1064.)