第 23 卷 第 6 期 控 制 与 决 策 2008 年 6 月
Vol. 23 No. 6 Control and Decision Jun. 2008

文章编号: 1001-0920(2008)06-0689-04

一类时变时延网络控制系统的鲁棒容错控制

郭一楠[1], 张芹英[1], 巩敦卫[1], 张建化[2]
(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 针对一类具有时变时延的不确定网络控制系统,研究存在执行器失效情况的系统鲁棒容错控制问题. 基于完整性容错控制思想和李亚普诺夫时延依赖稳定理论,给出了系统对执行器失效具有完整性的充分条件,设计了鲁棒容错控制器. 仿真结果表明,该控制器不仅能保证系统鲁棒渐近稳定,而且使系统具有良好的动态性能.

关键词: 网络控制系统; 时变时延; 时延依赖; 不确定参数; 容错控制
中图分类号: TP18 **文献标识码**: A

Robust fault-tolerant control of networked control systems with time-varying delays

GUO Yi-nan[1], *ZHANG Qin-ying*[1], *GONG Dun-wei*[1], *ZHANG Jian-hua*[2]
(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China. Correspondent: ZHANG Qin-ying, E-mail: zhqinyingcumt@163.com)

Abstract: For a class of networked control systems with time-varying delays, a robust fault-tolerant control problem with actuator failures is discussed. Based on the integrity fault-tolerant control theory and the time-delay-dependent stability criteria, the sufficient conditions for systems with integrity against actuator failures are given, and the robust fault-tolerant controller is designed. Simulation results show that the controller can not only guarantee the robust stability, but also obtain better dynamic performance.

Key words: Networked control system; Time-varying delay; Time-delay-dependent; Uncertain parameter; Fault-tolerant control

1 引 言

随着系统的控制规模、关键设备日益庞大,系统发生故障的可能性也逐渐增大,对系统可靠性的要求也越来越高[1]. 实际控制过程中,即使采用最可靠的元器件,也不能完全避免故障的发生. 因此,容错控制成为提高系统可靠性的关键技术,受到广泛重视. 网络控制系统(Networked Control System, NCS)是以网络作为(检测、控制)信号传输平台构成的闭环系统,它融合了计算机、通信、网络和控制等技术. 与传统的点对点连接方式相比,它具有连线少、信息资源能共享、易于维护和扩展等优点. 但由于网络通信带宽、承载能力和服务能力的限制,系统不可避免地存在时延、丢包、抖动等诸多问题. 其中网络诱导时延是 NCS 中不可忽视的因素,它直接影响到系统的稳定性和动态性能. 因此,网络控制系统容错控制要比传统的控制系统复杂,更符合工业发展趋势和生产需求.

网络控制系统的容错控制在国内外的研究还很有限. 针对一类确定性被控对象,文献[2]假定网络诱导时延为常数,将故障过程和检测过程看作不同的马尔科夫时变过程,建立了网络容错控制系统的模型,给出了均方渐近稳定的充分条件;[3]考虑网络诱导时延的随机性,借助跳变系统理论,研究了离散网络控制系统执行器失效的容错控制问题. 由于建模误差、环境因素、元器件老化等原因,系统往往含有不确定参数;[4]针对网络时延为有界的随机数,研究了离散不确定网络控制系统执行器失效的鲁棒容错控制;[5]针对常数时延,设计了连续网络控制系统的鲁棒容错控制器. 但上述文献均基于保守的时延独立稳定条件进行控制器设计. 文献[6]根

收稿日期: 2007-04-11; 修回日期: 2007-08-13.
基金项目: 中国博士后科学基金项目(2005012).
作者简介: 郭一楠(1975—),女,太原人,副教授,从事进化计算与网络控制系统的研究; 巩敦卫(1970—),男,江苏徐州人,教授,博士生导师,从事进化计算与智能控制的研究.

据时延依赖稳定条件,研究了不确定连续网络控制系统最大允许时延的上界,但未考虑执行器失效情况. 针对以上问题,本文基于文献[6],在时延依赖稳定条件下,研究了存在执行器失效的网络控制系统鲁棒容错控制问题.

2 问题描述

考虑一类含不确定参数线性连续的被控对象,其状态方程为

$$\dot{x}(t) = (A+\Delta A)x(t) + (B+\Delta B)u(t). \qquad (1)$$

式中: $x(t) \in R^n$ 是状态向量; $u(t) \in R^m$ 是控制输入向量; $A \in R^{n\times n}$ 是系统的状态矩阵; $B \in R^{n\times m}$ 是输入矩阵; ΔA 和 ΔB 是反映模型中不确定参数的未知实数矩阵,假定其范数有界,且具有以下形式:

$$[\Delta A \quad \Delta B] = DF(t)[E \quad E_1]. \qquad (2)$$

其中: $F(t)$ 是满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的不确定参数矩阵; D, E 和 E_1 是已知的常数矩阵,反映了不确定参数的结构信息.

若控制器采用状态反馈

$$u_c(t) = Kx_c(t), \qquad (3)$$

考虑传感器到控制器的网络时延 $d_{sc}(t)$ 和控制器到执行器的网络时延 $d_{ca}(t)$,则被控对象的控制输入

$$u(t) = Kx(t - d_{sc}(t) - d_{ca}(t)). \qquad (4)$$

由上述分析,获得网络控制系统闭环模型为

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) =\ & [A + DF(t)E]x(t) + [B + \\ & DF(t)E_1]Kx(t - d_{sc}(t) - d_{ca}(t)). \end{aligned} \qquad (5)$$

假设 $d_{sc}(t)$ 和 $d_{ca}(t)$ 时变、有界,并令 $d(t) = d_{sc}(t) + d_{ca}(t)$; $d(t)$ 满足 $0 \leq d(t) \leq \tau$ 且 $\dot{d}(t) \leq \mu < 1$.

根据完整性容错控制的思想,设计一个鲁棒控制器,使系统在正常和故障条件下该控制器都能保持系统稳定或获得良好的控制性能. 本文考虑执行器失效情况下系统的完整性设计. 引入开关矩阵

$$L = \mathrm{diag}\{l_1, l_2, \cdots, l_m\},\ L \neq 0 \text{ 且 } L \in \psi,$$

其中 ψ 表示所有可能的执行器失效开关矩阵 L 的集合.

$$l_i = \begin{cases} 1, \text{第 } i \text{ 个执行器正常;} \\ 0, \text{第 } i \text{ 个执行器失效;} \\ \quad i = 1,2,\cdots,m. \end{cases}$$

在控制器与执行器之间引入开关矩阵 L 后,网络控制系统闭环模型为

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) =\ & [A + DF(t)E]x(t) + [B + \\ & DF(t)E_1]LKx(t - d(t)). \end{aligned} \qquad (6)$$

基于上述模型和时延假设条件,本文研究工作的核心在于:确定控制器增益 K,使得系统(6)在任意开关矩阵 $L \in \psi$ 下是渐近稳定的.

3 鲁棒容错控制器设计

本文采用线性矩阵不等式(LMI)方法,借鉴文献[7]和文献[8]的引理进行控制器设计.

引理 1[7] 对于任意适当维数的向量 $a(\alpha)$, $b(\alpha)$ 和矩阵 N, X, Y, Z,其中 X 和 Z 是对称矩阵,若 $\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix} \geq 0$,则

$$-2\int a^T(\alpha)Nb(\alpha)\mathrm{d}\alpha \leq \int \begin{bmatrix} a(\alpha) \\ b(\alpha) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X & Y-N \\ Y^T-N^T & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(\alpha) \\ b(\alpha) \end{bmatrix} \mathrm{d}\alpha.$$

引理 2[8] 给定适当维数的矩阵 Y, D 和 E,其中 Y 为对称矩阵,则 $Y + DFE + E^TF^TD^T < 0$,对于所有满足 $F^TF \leq I$ 的矩阵 F 成立,当且仅当存在一个常数 $\varepsilon > 0$,使得 $Y + \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1}E^TE < 0$.

定理 1 考虑网络控制系统闭环模型(6),对于已知参数 τ, μ, ε 和所有 $L \in \psi$,如果存在正定对称矩阵 $\tilde{P}$ 和 $\tilde{Q}$,对称矩阵 $\tilde{X}, \tilde{Z}$ 和矩阵 $\tilde{Y}, \overline{W}$,使

$$\begin{bmatrix} \tilde{M} & BL\overline{W} - \tilde{Y} & \tau\tilde{P}A^T & D & \tilde{P}E^T \\ * & -(1-\mu)\tilde{Q} & \tau\overline{W}^TL^TB^T & 0 & \overline{W}^TL^TE_1^T \\ * & * & -\tau\tilde{P} & \tau D & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon^{-1}I & 0 \\ * & * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \qquad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{X} & \tilde{Y} \\ \tilde{Y}^T & \tilde{Z} \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (8)$$

成立,则执行器失效时闭环系统(6)仍保持渐近稳定. 其中: * 是由矩阵的对称性得到的矩阵块, $\tilde{M} = \tilde{P}A^T + A\tilde{P} + \tau\tilde{X} + \tilde{Y} + \tilde{Y}^T + \tilde{Q}$. 由上述线性矩阵不等式组的一组可行解 $(\overline{W}, \tilde{P})$,得到鲁棒容错控制器的状态反馈增益 $K = \overline{W}\tilde{P}^{-1}$.

证明 根据时延依赖稳定性条件,选择 Lyapunov 函数 $V(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$,其中

$$V_1(t) = x^T(t)Px(t),$$

$$V_2(t) = \int_{t-d(t)}^{t} x^T(\alpha)Qx(\alpha)\mathrm{d}\alpha,$$

$$V_3(t) = \int_{-\tau}^{0}\int_{t+\beta}^{t} \dot{x}^T(\alpha)Z\dot{x}(\alpha)\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta,$$

式中 P, Q 和 Z 均为正定对称矩阵. 显然, $V(t)$ 正定,根据 Lyapunov 稳定条件,只要 $\dot{V}(t) < 0$,系统便是渐近稳定的.

将 Newton-Leibniz 公式代入系统模型(6),得

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) =\ & (A + DFE + (B + DFE_1)LK)x(t) - \\ & (B + DFE_1)LK\int_{t-d(t)}^{t} \dot{x}(\alpha)\mathrm{d}\alpha \end{aligned} \qquad (9)$$

沿系统(9)的任意轨线, $V_1(t)$ 关于时间导数为

$$\dot V_1(t) = x^T(t)[(A+DFE+(B+DFE_1)LK)^T P + P(A+DFE+(B+DFE_1)LK)]x(t) - 2\int_{t-d(t)}^{t} x^T(t)P(B+DFE_1)LK\dot x(\alpha)\,d\alpha$$

由引理 1 可知

$$-2\int_{t-d(t)}^{t} x^T(t)P(B+DFE_1)LK\dot x(\alpha)\,d\alpha \le \int_{t-d(t)}^{t}\begin{bmatrix} x(t)\\ \dot x(\alpha)\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix} X & Y-P(B+DFE_1)LK\\ * & Z\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix} x(t)\\ \dot x(\alpha)\end{bmatrix}d\alpha =$$

$$\int_{t-d(t)}^{t} x^T(t)Xx(t)\,d\alpha + \int_{t-d(t)}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha + 2x^T(t)(Y-P(B+DFE_1)LK)\int_{t-d(t)}^{t}\dot x(\alpha)\,d\alpha \le$$

$$\tau x^T(t)Xx(t) + \int_{t-d(t)}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha + 2x^T(t)(Y-P(B+DFE_1)LK)(x(t)-x(t-d(t))),$$

则

$$\dot V_1(t)\le x^T(t)((A+DFE)^T P + P(A+DFE))x(t) + 2x^T(t)(P(B+DFE_1)LK-Y)x(t-d(t)) + x^T(t)(\tau X+Y+Y^T)x(t) + \int_{t-d(t)}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha$$

同理,$V_2(t)$ 和 $V_3(t)$ 关于时间导数为

$$\dot V_2(t) = x^T(t)Qx(t) - (1-\dot d(t))x^T(t-d(t))Qx(t-d(t)) \le x^T(t)Qx(t) - (1-\mu)x^T(t-d(t))Qx(t-d(t)),$$

$$\dot V_3(t) = \tau\dot x^T(t)Z\dot x(t) - \int_{t-\tau}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha \le \tau\dot x^T(t)Z\dot x(t) - \int_{t-\tau}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha + \int_{t-\tau}^{t-d(t)}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha = \tau\dot x^T(t)Z\dot x(t) - \int_{t-d(t)}^{t}\dot x^T(\alpha)Z\dot x(\alpha)\,d\alpha$$

则

$$\dot V(t) = \dot V_1(t)+\dot V_2(t)+\dot V_3(t)\le x^T(t)((A+DFE)^T P + P(A+DFE) + \tau X + Y + Y^T + Q)x(t) + 2x^T(t)(P(B+DFE_1)LK-Y)x(t-d(t)) + \tau\dot x^T(t)Z\dot x(t) - (1-\mu)x^T(t-d(t))Qx(t-d(t)).$$

令 $M = (A+DFE)^T P + P(A+DFE) + \tau X + Y + Y^T + Q$,整理上式,得

$$\dot V(t)\le\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-d(t))\end{bmatrix}^T\left\{\begin{bmatrix} M & P(B+DFE_1)LK-Y\\ * & -(1-\mu)Q\end{bmatrix} + \tau\begin{bmatrix}(A+DFE)^T\\ ((B+DFE_1)LK)^T\end{bmatrix}Z[(A+DFE)\quad (B+DFE_1)LK]\right\}\times\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-d(t))\end{bmatrix}.$$

由 shur 补引理,得

$$\dot V(t)\le\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-d(t))\end{bmatrix}^T\cdot\Xi\cdot\begin{bmatrix} x(t)\\ x(t-d(t))\end{bmatrix},$$

其中

$$\Xi = \begin{bmatrix} M & P(B+DFE_1)LK-Y & \tau(A+DFE)^T Z\\ * & -(1-\mu)Q & \tau((B+DFE_1)LK)^T Z\\ * & * & -\tau Z\end{bmatrix}.$$

因此,若

$$\Xi < 0, \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} X & Y\\ Y^T & Z\end{bmatrix}\ge 0 \tag{11}$$

成立,则网络控制系统(6)是渐近稳定的,满足完整性设计要求.

令 $M_1 = PA^T + AP + \tau X + Y + Y^T + Q$,将式(10)分解为

$$\begin{bmatrix} M_1 & PBLK-Y & \tau A^T Z\\ * & -(1-\mu)Q & \tau(BLK)^T Z\\ * & * & -\tau Z\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} PD\\ 0\\ \tau ZD\end{bmatrix}F[E\quad E_1LK\quad 0] + \begin{bmatrix} E^T\\ (E_1LK)^T\\ 0\end{bmatrix}F^T[(PD)^T\quad 0\quad \tau(ZD)^T] < 0.$$

由引理 2,若上式对所有满足 $F^T(t)F(t)\le I$ 的不确定矩阵 $F(t)$ 成立,当且仅当存在一个标量 $\varepsilon > 0$,使

$$\begin{bmatrix} M_1 & PBLK-Y & \tau A^T Z\\ * & -(1-\mu)Q & \tau(BLK)^T Z\\ * & * & -\tau Z\end{bmatrix} + \varepsilon\begin{bmatrix} PD\\ 0\\ \tau ZD\end{bmatrix}\begin{bmatrix} PD\\ 0\\ \tau ZD\end{bmatrix}^T + \varepsilon^{-1}\begin{bmatrix} E^T\\ (E_1LK)^T\\ 0\end{bmatrix}[E\quad E_1LK\quad 0] < 0. \tag{12}$$

由 shur 补引理,式(12)转换为

$$\begin{bmatrix} M_1 & PBLK-Y & \tau A^T Z & PD & E^T\\ * & -(1-\mu)Q & \tau(BLK)^T Z & 0 & (E_1LK)^T\\ * & * & -\tau Z & \tau ZD & 0\\ * & * & * & -\varepsilon^{-1}I & 0\\ * & * & * & * & -\varepsilon I\end{bmatrix} < 0. \tag{13}$$

对式(13) 左乘和右乘 $\mathrm{diag}\{P^{-1},P^{-1},Z^{-1},I,I\}$,对式(11) 左乘和右乘 $\mathrm{diag}\{P^{-1},P^{-1}\}$,并令 $\widetilde{P}=P^{-1}$,$\widetilde{X}=P^{-1}XP^{-1}$,$\widetilde{Y}=P^{-1}YP^{-1}$,$\widetilde{Q}=P^{-1}QP^{-1}$,$\widetilde{Z}=Z^{-1}$,$\widetilde{P}=\widetilde{Z}$,$\overline{W}=KP^{-1}$,便得到线性不等式(7) 和(8) . □

4　仿真分析

考虑一类具有不确定参数的网络控制系统闭环模型(6) ,其中

$$A=\begin{bmatrix}-1.3 & -0.5\\ 0.7 & -1.8\end{bmatrix},B=\begin{bmatrix}1 & 0.5\\ 0 & 1\end{bmatrix},$$

$$F(t)=\begin{bmatrix}\sin t & 0\\ 0 & \cos t\end{bmatrix},D=I,E=E_1=0.2I.$$

假设系统的初始状态

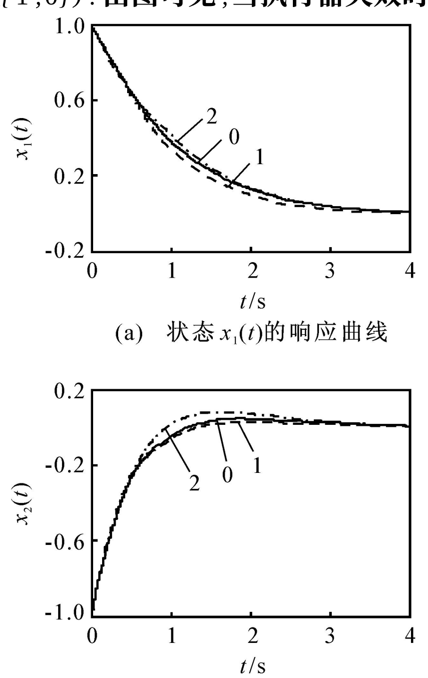
$$[x_1(0)\quad x_2(0)]^T=[1\quad -1]^T.$$

系统分析中相关参数 $\tau=1$,$\mu=0.6$,则网络诱导时延 $0\leq d(t)\leq 1$ 且 $\dot{d}(t)\leq 0.6$.

根据定理 1, 对于给定参数 $\varepsilon=0.5$, 通过 Matlab 线性矩阵不等式工具箱 feasp 求解器, 验证线性矩阵不等式(5) 和(6) 是可行的,可得到满足线性矩阵不等式的可行解,并求得鲁棒容错控制器的增益矩阵

$$K=\begin{bmatrix}0.1097 & -0.0499\\ -0.0754 & 0.1998\end{bmatrix}.$$

经过仿真, 在不同的开关矩阵下, 网络控制系统状态 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时域响应曲线如图 1 所示. 图中:0 表示正常系统($L=\mathrm{diag}\{1,1\}$) ,1 表示执行器 1 失效($L=\mathrm{diag}\{0,1\}$) ,2 表示执行器 2 失效($L=\mathrm{diag}\{1,0\}$) . 由图可见,当执行器失效时,本文设计的控制器能保证系统渐近稳定.



(a)　状态 $x_1(t)$的响应曲线

(b)　状态 $x_2(t)$的响应曲线

图 1　本文方法系统的响应曲线

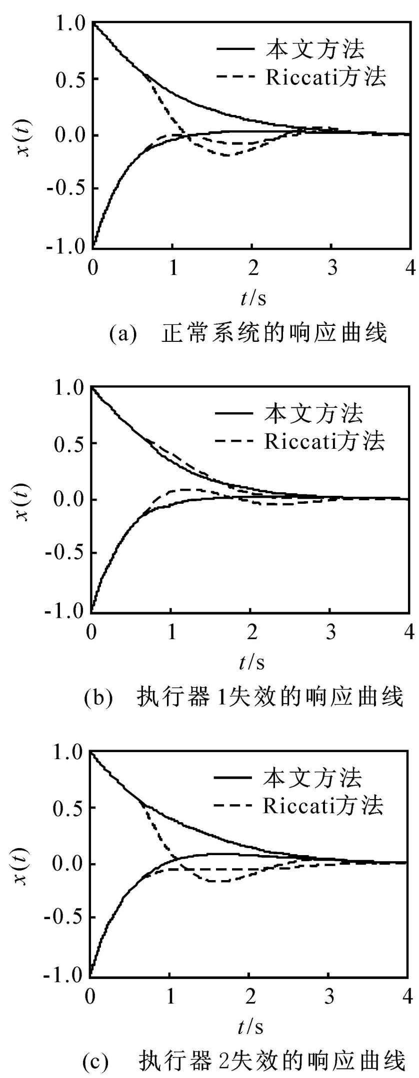
为进一步分析时延依赖稳定条件下控制系统的性能,与时延独立稳定条件下控制系统的性能进行分析对比. 针对上述被控对象,采用文献[9] 基于时延独立稳定条件的控制器设计方法,取 $Q=4I$,$R=I$,则解 Riccati 代数方程 $A^TP+PA-PBR^{-1}B^TP+Q=0$,得到正定对称矩阵

$$P=\begin{bmatrix}1.0237 & -0.0647\\ -0.0647 & 0.9126\end{bmatrix},$$

状态反馈控制增益

$$K=-R^{-1}B^TP=\begin{bmatrix}-1.0237 & 0.0647\\ -0.4472 & -0.8803\end{bmatrix}.$$

两种方法下系统状态 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的时域响应曲线如图 2 所示. 由分析对比可知,根据时延依赖稳定条件设计的控制器,可使得系统具有较好的动态稳定性能.



(a)　正常系统的响应曲线

(b)　执行器 1失效的响应曲线

(c)　执行器 2失效的响应曲线

图 2　本文方法和 Riccati 方法下系统的响应曲线

(下转第 696 页)

从轨道半长轴偏置带来的降交点地方时漂移变化看,无论轨道半长轴偏置 - 8 km 或 - 6 km,在运载偏差极端情况下,降交点地方时 50 d 中积累的最大漂移约 1 min,朝着使降交点地方时增大的方向.从缩短卫星进入标称轨道的时间上考虑,选择半长轴偏置 - 8 km 比较理想.

5 结 论

1) 太阳同步轨道卫星的轨道设计和入轨偏差是导致降交点地方时初始漂移速度的主要因素,而大气阻力和太阳引力摄动也可使降交点地方时产生漂移加速度.

2) 可通过轨道偏置设计、轨道高度保持控制和轨道倾角保持控制等方法,有效地控制降交点地方时漂移在允许的范围内.

3) 仿真模算和工程实际应用表明,分析结论准确,控制策略合理,提高了卫星的使用效率.

参考文献(References)

[1] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
(Liu L. Orbit theory of spacecraft [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001.)

[2] Deutsch R. Orbital dynamics of space vehicles [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1963.

[3] Roy A E. Orbit motion[M]. Bristol: Hilger, 1978.

[4] Morton B G, Taff L G. A new method of initial orbit determination [J]. Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy, 1986, 39(2): 181-190.

[5] Giacaglia G E O. A note on the inclination functions of satellite theory [J]. Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy, 1976, 13(4): 503-509.

[6] 周军. 航天器控制原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001.
(Zhou J. Spacecraft control principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2001.)

(上接第 692 页)

5 结 论

本文针对具有时变时延的不确定网络控制系统,基于时延依赖稳定条件,对存在执行器失效情况的闭环网络控制系统进行了完整性设计,给出了相应的鲁棒容错控制器设计方法.仿真实例表明,该控制器能有效保证系统的渐近稳定性,而且与时延独立稳定条件下的容错控制系统相比,时延依赖稳定条件下的系统具有较好的动态稳定性能.目前,大多研究主要是针对容错控制系统的稳定性方面.网络控制系统是控制、网络等多种技术交叉的学科,因此,同时考虑稳定性和保证系统性能最优(如二次性能指标)是容错控制系统值得研究的问题.

参考文献(References)

[1] 谢林柏, 纪志成, 方华京, 等. 具有异步时延的网络控制系统故障检测[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(3): 2717-2720.
(Xin L B, Ji Z C, Fang H J. Fault detection for networked control systems with asynchronous measurement delay[J]. J of System Simulation, 2005, 17(3): 2717-2720.)

[2] 高飞, 张洪钺. 带马尔科夫参数时时延容错控制系统的稳定性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(5): 566-570.
(Gao F, Zhang H Y. Stability of time-delay fault-tolerant control systems with Makovian parameters[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(5): 566-570.)

[3] 霍志红, 方华京. 一类随机时延网络控制系统的容错控制研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 584-587.
(Huo Z H, Fang H J. Fault-tolerant control of networked control system with random time-delays[J]. Information and Control, 2006, 35(5): 584-587.)

[4] 郑英, 方华京. 不确定网络控制系统的鲁棒容错控制[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 804-807.
(Zheng Y, Fang H J. Robudt fault-tolerant control of networked control system with time-varying delays[J]. J of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(8): 804-807.)

[5] Zhang Jianhua, Gong Dun-wei, Guo Yi-nan. Robust fault-tolerant control for networked control systems[C]. The 1st Int Conf on Complex System and Applications. Huhhot, 2006: 445-458.

[6] Huaicheng Yan, Xinhan Huang, Min Wang, et al. Delay-dependent stability criteria for a class of networked control systems with multi-input and multi-output[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2007, 34(3): 997-1005.

[7] Moon Y S, Park P G, Kwon W H. Delay-dependant robust stabilization of uncertain stated-delayed system [J]. Int J of Control, 2001, 74: 1175-1184.

[8] Li Yu, Gao Furong. Optimal guaranteed cost control of discrete-time uncertain systems with both state and input delays[J]. J of the Franklin Institute, 2001, 338(1): 101-110.

[9] Ming Lv, Xiaobei Wu, Zhiliang Xu. Robust fault-tolerant control of multi-time-delay continuous systems [C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 1999-2002.