

文章编号: 1001-0920(2009)12-1890-05

时变采样周期网络控制系统的鲁棒容错控制器设计

黎 焯¹, 吴晓蓓¹, 王玉龙², 徐志良¹

(1. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094; 2. 江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 研究具有时变采样周期网络控制系统的执行器失效的完整性问题. 假设系统任意两个连续采样间隔具有上界, 利用输入时延法, 将时变采样周期网络控制系统等价转化为连续时变时延网络控制系统. 在此基础上, 基于时延条件, 应用 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式 (LMIs) 方法证明了鲁棒容错控制律的存在条件, 设计了鲁棒容错控制器, 并给出了系统完整性条件下的最大允许时延的估计方法. 仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 网络控制系统; 容错控制; 时变采样周期; 鲁棒

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Robust fault-tolerant controller design of networked control systems under variable-period sampling

LI Xuan¹, WU Xiao-bei¹, WANG Yu-long², XU Zhi-liang¹

(1. Institute of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China. Correspondent: LI Xuan, E-mail: lx334@yahoo.cn)

Abstract: The problem of integrity against actuator failures for networked control systems under variable-period sampling is studied. Assuming that the distance between any two consecutive sampling instants is less than a given bound, by using the input delay approach, the networked control systems with variable-period sampling is transformed into a continuous-time networked control systems with time-varying delays. Then, based on the time delay condition, the existence condition of robust fault-tolerant control law is testified in terms of the Lyapunov stability theory combined with linear matrix inequalities (LMIs). Furthermore, the robust fault-tolerant controller is designed and the estimate method of maximum value of time-varying delays is given under the condition for the system with integrity. The result of a numerical simulation example show the effectiveness and feasibility of the conclusions.

Key words: Networked control systems; Fault-tolerant control; Variable-period sampling; Robust

1 引 言

网络控制系统 (NCSs) 是指反馈控制系统通过加入实时通讯网络而形成的一种分布式闭环控制系统^[1-3], 直接连接在网络上的部件 (包括传感器、控制器) 均视为网络上的一个节点. 与传统的点对点控制相比, 网络控制系统具有资源共享、远程操作、成本低、易维护等优点, 但是通讯网络的介入, 必然会导致时延、丢包、时序错乱等问题, 从而降低系统的性能, 甚至使系统变得不稳定. 因此, 网络控制系统的容错控制要比传统的容错控制系统复杂.

目前, 网络控制系统的容错控制研究还不是很多. 文献[4]将一类具有随机时延的网络化控制系统

建模为具有马尔可夫延迟特性的离散跳变线性系统, 研究了离散网络控制系统执行器失效的容错控制问题; [5] 基于时延依赖稳定方法, 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; [6] 将随机时延对系统的影响转化为系统不确定参数, 研究了离散不确定网络控制系统执行器和传感器失效的鲁棒容错控制. 以上文献均是基于固定采样周期进行研究. 然而在网络控制系统中, 一方面网络作为信息传输的载体, 承担着工业控制现场大量的数据和信息的传输, 这些数据和信息以分时复用的方式共享有限的网络资源, 为了更好地利用网络资源, 往往会

收稿日期: 2009-01-21; 修回日期: 2009-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60804024); 江苏省自然科学基金项目 (BK2006202).

作者简介: 黎焯 (1980—), 男, 湖北黄梅人, 博士生, 从事网络控制系统的容错控制的研究; 吴晓蓓 (1958—), 女, 南京人, 教授, 博士生导师, 从事基于网络的测控技术、智能控制等研究.

采用动态调度策略对资源进行动态分配. 由于网络中信息流的变化是时变不确定的, 系统进行动态资源分配时的采样周期通常也是时变不确定的, 此时网络控制系统为一个变采样周期系统. 另一方面, 计算机负载的变化、网络的影响、器件故障以及外部干扰等因素, 都会导致系统采样周期发生变化, 因此有必要对时变采样周期网络控制系统进行研究. [7] 基于动态调度研究了时变采样周期网络控制系统设计方法; [8] 研究了具有时变采样周期的网络控制系统的 H_∞ 鲁棒控制器设计问题. 而关于时变采样周期网络控制系统的容错控制研究还未见相关报道. 因此如何合理地设计控制器, 使得时变采样周期网络控制系统出现故障时仍保持良好的性能具有十分重要的现实意义.

本文针对一类具有时变采样周期和时变时延的网络控制系统, 在限定任意连续两个采样间隔上界的条件下, 利用输入时延法, 将时变采样周期网络控制系统等价转化为连续时变时延网络控制系统; 在此基础上, 研究存在执行器失效的网络控制系统鲁棒容错控制器设计问题, 并进一步研究了系统具有完整性条件下采样间隔与网络诱导时延之间的关系, 给出了系统最大允许时延的估计方法.

2 问题描述

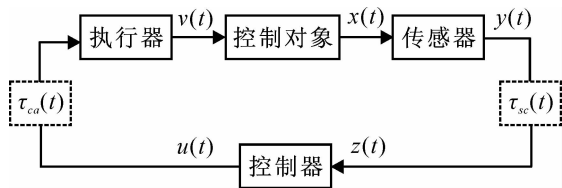


图 1 网络控制系统结构图

考虑图 1 所示的 NCS 模型. 网络存在于传感器和控制器、控制器和执行器之间, 系统具有输出时延 $\tau_s(t)$ 和控制时延 $\tau_a(t)$.

设 NCS 的被控对象是线性时不变的, 其状态方程描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + DF(t)E_1)x(t) + (B + DF(t)E_2)v(t), \\ v(t) = u(t - \tau_a(t)). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为状态向量; $v(t) \in R^p$ 为输入向量; $u(t) \in R^p$ 为控制器输出向量; $y(t) \in R^r$ 为输出向量; A, B, C, D, E_1, E_2 为适维常系数矩阵; $F(t)$ 是不确定参数矩阵, 且满足 $F^T(t)F(t) \leq I$.

假设系统(1)完全能控, 传感器采用时间驱动, 控制器和执行器均采用事件驱动, 网络诱导时延具有上界 τ , 即 $\tau(t) = \tau_s(t) + \tau_a(t) \leq \tau, k$ 时刻系统的输出时延和控制时延分别记为 τ_k^s 和 τ_k^a . 系统的采样

周期是实时变化的, 且采样周期的变化是有界的. 任意连续两个采样间隔最大值不大于 δ , 即假定 t_k 是第 k 个采样时刻, 则有

$$t_{k+1} - t_k \leq \delta, \forall k \geq 0. \quad (2)$$

对系统(1)采用无记忆状态反馈控制律, 并考虑时延, 有

$$u(t) = Kx(t_k - \tau_k^s), \quad (3)$$

式中 $K \in R^{p \times n}$.

记 $\bar{A} = A + DF(t)E_1, \bar{B} = B + DF(t)E_2$, 由式(1)和(3)可得

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}Kx(t_k - \tau_k^s - \tau_k^a), \quad (4)$$

式中 $t_k + \tau_k^s + \tau_k^a \leq t < t_{k+1} + \tau_{k+1}^s + \tau_{k+1}^a$. 显然有

$$\bigcup_{k=1}^{\infty} [t_k + \tau_k^s + \tau_k^a, t_{k+1} + \tau_{k+1}^s + \tau_{k+1}^a) = [t_0, \infty),$$

$$t_0 \geq 0.$$

采用输入时延法可以得到

$$t_k - \tau_k^s - \tau_k^a = t - (t - t_k) - \tau_k^s - \tau_k^a = t - \theta(t) - \tau(t), \quad (5)$$

式中: $\theta(t) = t - t_k, \tau(t) = \tau_k^s + \tau_k^a$.

由式(4)和(5)可得

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}Kx(t - \theta(t) - \tau(t)). \quad (6)$$

通过上述变换后, 时变采样闭环离散系统(4)转变为具有时变时延的连续系统(6).

在系统(6)中, $\theta(t)$ 是由系统采样所衍生的时变时延, 其示意如图 2 所示. 在网络控制系统中, 当采样周期大于某一临界值时, 将导致系统性能恶化甚至失稳; 而采样周期越小, 网络中的通信量会越大, 造成信息的阻塞, 引发数据包丢失、乱序、长时延等问题的发生, 导致系统性能下降. $\tau(t)$ 是数据在传输过程中产生的网络诱导时延, 包括输出时延和控制时延, 受网络的负载状况、网络的传输速率和数据包的大小等因素的影响. $\tau(t)$ 存在于控制系统的信息反馈通道中, 影响闭环系统的稳定性和动态性能. 因而对时变采样周期进行容错控制分析时, 应考虑系统采样周期的变化和时变时延的综合影响. 由前面描述, 显然有 $0 < \theta(t) \leq \delta, 0 \leq \tau(t) \leq \tau$.

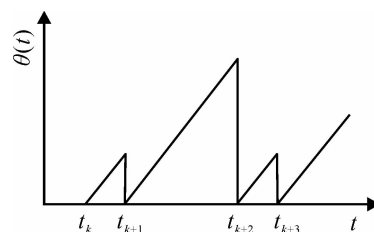


图 2 时延 $\theta(t)$ 的示意

考虑系统(6)可能存在的执行器故障, 引入表示执行器故障开关矩阵 $H_i = \text{diag}(h_1, h_2, \dots, h_m)$.

其中: m 为执行器数量; $h_j = \begin{cases} 1, \text{执行器 } j \text{ 正常;} \\ 0, \text{执行器 } j \text{ 失效;} \end{cases} j = 1, 2, \dots, m$. 设执行器故障共有 $N (\leq 2^m)$ 种组合模式, 即 $\Omega = \{H_0, H_1, \dots, H_N\}$. 当系统(6) 发生执行器故障时, 引入开关矩阵 $H \in \Omega$ 且 $H \neq 0$, 并将其放在系统矩阵 \bar{B} 和反馈矩阵 K 之间, 于是可得到网络控制系统闭环模型为

$$\dot{x}(t) = \bar{A}x(t) + \bar{B}HKx(t - \theta(t) - \tau(t)). \quad (7)$$

3 鲁棒容错控制器设计

本文研究的主要内容是: 确定鲁棒容错控制器增益 K , 使得系统(7) 在任意开关矩阵 $H \in \Omega$ 下是渐近稳定的, 并在系统完整性条件下确定系统时变采样间隔和时变时延之间的关系. 首先介绍一个有用的引理.

引理 1^[9] 设 W, M, N 为适当维数的实矩阵, 其中 W 为对称阵, 则对于所有满足 $F^T(k)F(k) \leq I$ 的矩阵 $F(k)$, 不等式

$$W + N^T F^T(k) M^T + M F(k) N < 0$$

成立, 当且仅当存在任意常数 $\epsilon > 0$, 使

$$W + \epsilon M M^T + \epsilon^{-1} N^T N < 0.$$

定理 1 若闭环系统(7) 的控制器增益矩阵为 K , 存在对称正定矩阵 P 和 T , 矩阵 X 和 Y , 使得下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Psi} & \bar{\Psi} & -X \\ * & (\delta + \tau)(\bar{B}HK)^T \times & -Y \\ * & T\bar{B}HK - Y - Y^T & \\ * & * & -(\delta + \tau)^{-1}T \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

则闭环系统(7) 对执行器失效具有完整性. 式中

$$\tilde{\Psi} = \bar{A}^T P + P\bar{A} + (\delta + \tau)\bar{A}^T T\bar{A} + X + X^T,$$

$$\bar{\Psi} = P\bar{B}HK + (\delta + \tau)A^T T\bar{B}HK - X + Y^T,$$

“*” 表示矩阵的对称部分.

证明 令 $\gamma(t) = \theta(t) + \tau(t)$, 显然有 $0 < \gamma(t) \leq \delta + \tau, \dot{\gamma}(t) = 1$. 构造如下 Lyapunov-Krasovskii 函数:

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \int_{-\delta-\tau}^0 \int_{t+\beta}^t \dot{x}(\alpha)T\dot{x}(\alpha)d\alpha d\beta,$$

其中 P 和 T 为对称正定矩阵. 沿系统(7) 的任意轨线, 对 $V(t)$ 求导可得

$$\dot{V}(t) \leq \frac{1}{\theta(t) + \tau(t)} \int_{t-\theta(t)-\tau(t)}^t \Xi(t, \alpha) d\alpha. \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \Xi(t, \alpha) = & 2x^T(t)P(\bar{A}x(t) + \bar{B}HKx(t - \theta(t) - \tau(t))) + \\ & (\delta + \tau)\dot{x}^T(t)T\dot{x}(t) - (\theta(t) + \tau(t))\dot{x}(\alpha)T\dot{x}(\alpha). \end{aligned}$$

由 Leibnitz-Newton 公式可知

$$\int_{t-\theta(t)-\tau(t)}^t \dot{x}(\alpha) d\alpha = x(t) - x(t - \theta(t) - \tau(t)).$$

于是, 对任意矩阵 X 和 Y , 有

$$\begin{aligned} \Lambda = & \frac{1}{\theta(t) + \tau(t)} \int_{t-\theta(t)-\tau(t)}^t \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \theta(t) - \tau(t)) \end{bmatrix}^T \times \\ & \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} [x(t) - x(t - \theta(t) - \tau(t)) - \\ & (\theta(t) + \tau(t))\dot{x}(\alpha)] d\alpha = 0. \end{aligned}$$

式(9) 加上 Λ 和 Λ^T 可得

$$\dot{V}(t) \leq \frac{1}{\theta(t) + \tau(t)} \int_{t-\theta(t)-\tau(t)}^t [\Theta^T(t, \alpha)\Phi\Theta(t, \alpha)] d\alpha.$$

式中

$$\begin{aligned} \Theta^T(t, \alpha) = & [x^T(t) \quad x^T(t - \theta(t) - \tau(t)) \quad \dot{x}^T(\alpha)], \\ \Phi = & \begin{bmatrix} \tilde{\Psi} & \bar{\Psi} & -(\theta(t) + \tau(t))X \\ * & (\delta + \tau)(\bar{B}HK)^T \times & -(\theta(t) + \tau(t))Y \\ * & T\bar{B}HK - Y - Y^T & -(\theta(t) + \tau(t))T \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由于 $\theta(t) + \tau(t) \leq \delta + \tau$, 由式(8) 显然有 $\Phi < 0$, 从而有 $\dot{V}(t) < 0$. 故当式(8) 成立时, 系统是渐近稳定的. \square

下面利用线性矩阵不等式的可行性给出鲁棒容错控制器设计方法.

定理 2 若存在对称正定矩阵 \bar{P} 和 \bar{T} , 矩阵 \bar{K} , \bar{X} 和 \bar{Y} , 标量 ϵ_1, ϵ_2 和 ϵ_3 , 使得下列矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ * & \Psi_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

则闭环系统(7) 对执行器失效具有完整性. 式(3) 是系统的鲁棒容错控制器, 且控制器增益为 $K = \bar{K}\bar{P}^{-1}$. 式中

$$\Psi_{11} = \begin{bmatrix} \bar{P}A^T + A\bar{P} + \bar{X} + \bar{X}^T & -\bar{X} + \bar{Y}^T & -\bar{X} & \bar{P}A^T \\ * & -\bar{Y} - \bar{Y}^T & -\bar{Y} & 0 \\ * & * & (\delta + \tau)^{-1}(\bar{T} - 2\bar{P}) & 0 \\ * & * & * & -(\delta + \tau)^{-1}\bar{T} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{12} = \begin{bmatrix} 0 & \epsilon_1 B & \bar{P}E_1^T & \epsilon_2 D & \bar{P}E_1^T & 0 & 0 & 0 \\ \bar{K}^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_1 B & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_3 D & \epsilon_3 D \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{22} = \begin{bmatrix} -\epsilon_1 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & -\epsilon_1 I & \epsilon_1 E_2^T & 0 & 0 & \epsilon_1 E_2^T & 0 & 0 \\ * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_2 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\epsilon_3 I \end{bmatrix},$$

“*” 表示矩阵的对称部分.

证明 对式(8) 由 Schur 补可得

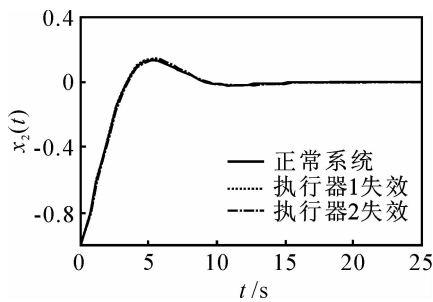


图 4 例 1 的 x_2 响应曲线

例 2 考虑式(1)所描述的系统,其参数为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 \\ 0.3 & -0.1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0.8 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \sin(0.1t) & 0 \\ 0 & \cos(0.1t) \end{bmatrix},$$

$$E_1 = E_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}.$$

通过计算可得矩阵 A 的特征值分别为 0.1303 和 -0.2303 ,表明系统本身是不稳定的. 同例 1 一样,通过仿真可计算出 $(\delta + \tau)_{\max} = 0.9843$. 假设系统参数 $\delta = 0.4, \tau = 0.2$,可求得系统鲁棒容错控制器增益矩阵为

$$K = \bar{K} * \bar{P}^{-1} = \begin{bmatrix} -0.1993 & -0.1929 \\ -0.4910 & -0.3126 \end{bmatrix}.$$

假设系统的初始状态为 $x(0) = [1.2 \ -0.8]^T$,当系统正常或发生执行器失效时,闭环网络控制系统的状态响应曲线分别如图 5 和图 6 所示.

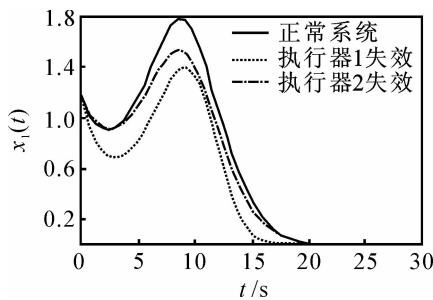


图 5 例 2 的 x_1 响应曲线

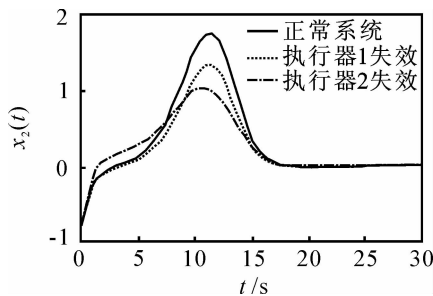


图 6 例 2 的 x_2 响应曲线

从图中可以看出,当系统在正常或发生执行器失效时,控制系统均是稳定的,这表明系统对执行器失效具有完整性.

5 结 论

本文针对一类具有时变采样周期和时变时延的网络控制系统,在限定采样间隔上界的条件下,利用输入时延法,将时变采样周期网络控制系统等价转化为连续时变时延网络控制系统. 在此基础上,借助于 Lyapunov 稳定性理论和容错控制的思想,设计了系统的鲁棒容错控制器,研究了系统完整性条件下采样间隔与网络诱导时延之间的关系,并给出了系统最大允许时延的估计方法. 因此本文方法对网络控制系统容错控制理论的应用具有实际意义. 另外,利用输入时延法将时变采样周期网络控制系统转化为连续时变时延网络控制系统,为研究时变采样周期网络控制系统提供了一条新的路径.

参考文献 (References)

[1] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 85-99.

[2] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y G. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.

[3] Antsaklis P, Baillieul J. Special issue on technology of networked control systems[J]. Proc of the IEEE, 2007, 95(1): 5-8.

[4] 霍志红, 方华京. 一类随机时延网络化控制系统的容错控制研究[J]. 信息与控制, 2006, 35(5): 584-588. (Huo Z H, Fang H J. Fault-tolerant control of networked control systems with random time-delays[J]. Information and Control, 2006, 35(5): 584-588.)

[5] 郭一楠, 张芹英, 巩敦卫, 等. 一类时变时延网络控制系统的鲁棒容错控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 689-692. (Guo Y N, Zhang Q Y, Gong D W, et al. Robust fault-tolerant control of networked control systems with time-varying delays[J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 689-692.)

[6] Li W, Li Y J, Liu W R. Robust fault tolerant control for networked control systems with uncertain disturbance[C]. Proc of the 2007 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, Harbin, 2007: 2813-2819.

[7] 王艳, 纪志成, 谢林柏, 等. 基于动态调度的网络控制系统设计方法[J]. 信息与控制, 2008, 37(1): 74-80. (Wang Y, Ji Z C, Xie L B, et al. A dynamic-scheduling-based design approach for networked control systems[J]. Information and Control, 2008, 37(1): 74-80.)

(下转第 1898 页)