

# 数据包丢失的无线网络控制系统的故障检测

陈志明, 崔宝同

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:**针对一类具有数据包丢失的无线网络控制系统,根据数据包丢失和未丢失的情况,同时结合无线网络控制系统数据传输过程中时延的特点,设计了具有时延补偿功能的鲁棒  $H_\infty$  观测器进行故障检测。当系统未发生故障且不存在未知扰动时,系统是稳定的,当存在未知扰动时,系统满足一定的  $H_\infty$  性能。为了及时检测系统的故障并减小系统故障的误报率,设计了残差评价信号,当系统发生故障,残差评价信号即刻超过指定值,系统检测出故障。所得结果通过仿真示例得到了验证。

**关键词:**无线网络控制系统;数据丢包;稳定性;故障检测

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)11-0061-04

## Faults Detection Occurred in Wireless Networked Control System with Packet Dropout

CHEN Zhi-ming, CUI Bao-tong

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** For a class of wireless networked control systems with packet dropout, according to packet loss and not loss, combined with the delay characteristics of the wireless networked control systems during data transfer, a robust  $H_\infty$  observer with delay compensation has been designed to make a fault detection of the systems. When there are no faults and unknown disturbance, the systems is stable, with the presence of unknown disturbance, the system meets certain  $H_\infty$  performance. In order to detect faults instantly and reduce the false alarm rate, designed a residual evaluation signal, when a fault occurs, the residual evaluation signal exceeds the threshold rapidly to imply that fault is detected. All obtained results have verified through simulation examples.

**Key words:** wireless networked control systems; packet dropout; stability; fault detection

## 0 引言

网络控制系统即闭环控制回路通过实时网络进行连接的反馈式控制系统<sup>[1-3]</sup>,通常可以根据传输媒介的不同分为有线网络控制系统、无线网络控制系统和有线与无线混合的网络控制系统。关于有线网络的研究已取得了相当的成果<sup>[4-7]</sup>。文献[4]研究了经过网络传输数据具有的时滞和数据包丢失的网络控制系统的稳定性,并设计了相应的控制器。文献[5]研究了具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计。文献[6]研究了具有时变时滞的网络控制系统的状态观测器的设计,并根据不同的网络环境,提出不同的控

制方法。文献[7]研究了网络控制系统在丢包的情况下,将数据包丢失和数据包未丢失的情况分开设计观测器并进行故障检测。文献[8]研究了系统的网络预测控制问题,当系统时延过大时,通过选取上一时刻的控制输入预测当前时刻的控制输入以对系统时延进行补偿。相较于有线网络,无线网络有组网和维护更加便利、可拓展性更好等优点。但是,无线网络也带来了时延更大和数据包更容易丢失等问题<sup>[9]</sup>。因此,关于无线网络的研究越来越受到关注。文献[10]研究了在考虑将无线网络控制系统中的不确定长时滞转换成系统参数的不确定性,建立此无线网络控制系统的离散模型。文献[11]介绍了一类非线性模型的无线网络控制系统的故障检测。

文中考虑无线网络传输的主要特点,即网络的时延与数据传输的跳数有关,加之传输过程中存在数据包丢失,设计了一类具有时延补偿功能的鲁棒  $H_\infty$  观测器。当系统发生故障时迅速检测出故障。仿真示例

收稿日期:2012-02-24;修回日期:2012-05-27

基金项目:国家自然科学基金(61174021)

作者简介:陈志明(1986-),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为无线网络控制系统故障检测;崔宝同,博士,教授,研究方向为控制理论及其应用、工业过程模型化与控制、复杂大系统与控制。

验证了方法的有效性。

## 1 系统描述

图 1 所示模型的连续时间方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_f x(t) + B_f u(t) + D_f \sigma(t) + f(t) \\ y(t) = C_f x(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(t)$  为状态向量,  $u(t)$  为控制输入向量,  $y(t)$  为可观测输出向量,  $\sigma(t)$  为未知外部扰动。  $A_f, B_f, C_f, D_f$  为适当维数的矩阵。

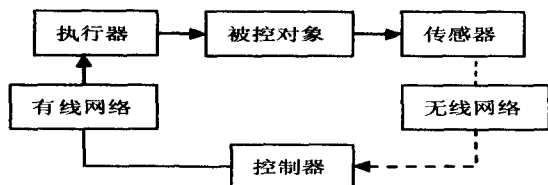


图 1 无线网络控制系统模型

由于数据传输要经由网络进行传输,因此连续模型需离散化成如下形式:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + D\sigma(k) + f(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$A = e^{A_f T}, B = \int_0^T e^{A_f s} ds B_f, C = C_f, D = \int_0^T e^{A_f s} ds D_f$ , 其中  $T$  为输出信号的采样周期。

针对上述网络控制系统,令  $\tau_{ca}$  为控制器到执行器传输时延,假定  $\tau_{ca}$  远小于  $T$ 。传感器到控制器的传输时延为  $\tau_{sc}$ 。由于传输时延  $\tau_{sc}$  主要与跳数  $m$  有关,且  $m$  是不确定的,但系统允许的最大跳数  $\bar{m}$  一般是确定的,则  $m$  可以写成  $m \in [0, 1, \dots, \bar{m}]$ , 则:

$$m = \begin{cases} \tau_{sc}/T & \text{为整数} \\ \tau_{sc}/T + 1 & \text{为非整数} \end{cases} \quad (3)$$

综合上面的说明,对系统做如下假设:

1) 执行器、控制器都采用时间驱动方式,采样周期均为  $T$ ;

2) 不论是被控对象的输出还是控制信号的传输都是单包传输,且所有状态都是可观测的;

3) 数据在网络中传输采用单包传输,传输过程中存在数据包丢失;如传输过程中数据包丢失,则控制器输入采用上一个周期的数据。

## 2 观测器设计

根据上述的离散模型,建立如下的状态观测器系统:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L_m(y_{k-m} - \hat{y}_{k-m}) \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \end{cases} \quad (4)$$

但是数据包在传输过程中可能存在数据包的丢失,若此时数据包丢失,根据假设会采用上个时刻的数据,这样可以将观测器模型写成如下形式:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) \\ \hat{y}(k) = C\hat{x}(k) \end{cases} \quad (5)$$

这时,若令  $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$

则误差方程为:

$$e(k+1) = Ae(k) \quad (6)$$

若数据发生丢失的情况,根据上面的说明,时延具有不确定性,为此提出了一种具有时延补偿功能的状态观测器。

若  $f_k = 0$ , 根据式(2)可进行如下推导:

$$\begin{aligned} x(k-1) &= A^{-1}x(k) - A^{-1}Bu(k-1) - A^{-1}D\sigma(k-1) \\ x(k-2) &= A^{-1}(A^{-1}x(k) - A^{-1}Bu(k-1) - A^{-1}D\sigma(k-1)) - \\ &\quad A^{-1}Bu(k-2) - A^{-1}D\sigma(k-2) \\ &= A^{-2}(x(k) - \sum_{i=1}^2 A^{i-1}Bu(k-i) - \sum_{i=1}^2 A^{i-1}D\sigma(k-i)) \\ &\vdots \\ x(k-m) &= A^{-m}(x(k) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}Bu(k-i) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}D\sigma(k-i)) \end{aligned}$$

则

$$y(k-m) = CA^{-m}(x(k) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}Bu(k-i) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}D\sigma(k-i)) \quad (7)$$

可以构造

$$\hat{x}(k-m) = A^{-m}(\hat{x}(k) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}Bu(k-i)) \quad (8)$$

那么

$$\hat{y}(k-m) = CA^{-m}(\hat{x}(k) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}Bu(k-i)) \quad (9)$$

则

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L_m CA^{-m}(x(k) - \hat{x}(k) - \sum_{i=1}^m A^{i-1}D\sigma(k-i)) \quad (10)$$

这样观测器状态估计误差方程如下:

$$\begin{aligned} e(k+1) &= Ae(k) - LCA^{-m}e(k) + D\sigma(k) \\ &\quad + L_m CA^{-m} \sum_{i=1}^m A^{i-1}D\sigma(k-i) \end{aligned} \quad (11)$$

令  $\xi(k) = \sigma(k) + L_m CA^{-m} \sum_{i=1}^m A^{i-1}\sigma(k-i)$  看成是新的扰动输入,这样状态估计误差方程为:

$$e(k+1) = Ae(k) - L_m CA^{-m}e(k) + D\xi(k) \quad (12)$$

每一个  $k, m$  的取值都在 1 到  $\bar{m}$  间变化,因此误差系统即可用切换系统进行表示,且此切换系统具有  $\bar{m}$  个子系统。

$$e(k+1) = \sum_{m=1}^{\bar{m}} \beta_m [A - L_m CA^{-m}]e(k) + D\xi(k) \quad (13)$$

其中,  $\beta_m \rightarrow \{0, 1\}$ ,  $\sum_{m=1}^n \beta_m = 1$ 。

综合丢包和不丢包的情况, 可得:

$$e(k+1) = \Phi_j e(k) + D \xi_j(k) \quad (14)$$

其中,  $\Phi_1 = A$ ,  $\Phi_2 = (A - L_m C A^{-m})$ ,  $\xi_1(k) = \sigma(k)$ ,  $\xi_2(k) = \xi(k)$

这样, 观测器误差系统就可以写成如下的离散切换系统:

$$e(k+1) = \sum_{j=1}^2 \alpha_j \{ \Omega_j e(k) + D \xi_j(k) \} \quad (15)$$

其中,  $\alpha_j \rightarrow \{0, 1\}$ ,  $\sum_{j=1}^2 \alpha_j = 1$ 。

另外, 可令残差  $\varepsilon(k) = S e(k)$ , 其中  $S$  为适维的权矩阵。为了减小误报率, 这里设计了残差评价单元进行残差评价。

$$J(k) = E \{ \left( \sum_{k=0}^L \varepsilon^T(k) \varepsilon(k) \right)^{1/2} \} \quad (16)$$

$$J_{th} = \sup_{w \in L, j=0} E \{ \left( \sum_{k=0}^L \varepsilon^T(k) \varepsilon(k) \right)^{1/2} \} \quad (17)$$

其中  $L$  为最大时间窗。

这样, 就可以按如下的规则判断系统是否发生故障:

$$\begin{cases} J(k) > J_{th} & \text{发生故障} \\ J(k) \leq J_{th} & \text{未发生故障} \end{cases} \quad (18)$$

### 3 主要结果

定义 1<sup>[12]</sup> 对于系统(14), 当扰动  $\xi(k) = 0$ , 若满足  $\lim_{k \rightarrow \infty} E \{ \sum_{k=0}^{\infty} e^T(k) e(k) \} = 0$ , 则系统均方指数稳定。当扰动  $\xi(k) \neq 0$  且存在未知输入, 给定常量  $\gamma > 0$ , 若不等式:

$$E \{ \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon^T(k) \varepsilon(k) \} \leq \gamma^2 E \{ \sum_{k=0}^{\infty} \xi^T(k) \xi(k) \} \quad (19)$$

成立, 则系统满足一定的  $H_{\infty}$  性能。

引理 1<sup>[13]</sup> 若有矩阵  $X$  满足

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12}^T & Z_{22} & Z_{23} + X^T \\ Z_{13}^T & Z_{23}^T + X & Z_{33} \end{pmatrix} < 0 \quad (20)$$

则有,

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{12}^T & Z_{22} \end{pmatrix} < 0, \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{13} \\ Z_{13}^T & Z_{33} \end{pmatrix} < 0 \quad (21)$$

其中,  $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{33}$  为对称矩阵  $Z$  相应位置上的元素。

引理 2<sup>[14]</sup> 对于离散切换系统

$$x(k+1) = A_i x(k) \quad (22)$$

式中  $i = 1, 2, \dots, r, r < \infty$  为子系统的个数。若所有子系统的对称矩阵  $P$  相同, 且对所有子系统下式

$$A_i^T P A_i - P < 0, i = 1, 2, \dots, r \quad (23)$$

都能成立, 则离散切换系统稳定。

定理 1 对于离散切换系统(15), 若矩阵  $P, Q$  都是对称正定的, 使系统满足不等式

$$\begin{pmatrix} -P + S^T S & 0 & A^T \\ * & -\gamma^2 I & D^T \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (24)$$

$$\begin{pmatrix} -P + S^T S & 0 & A^T P - (A^{-m}) C^T L_m^T \\ * & -\gamma^2 I & D^T \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (25)$$

$m = 1, 2, \dots, m$ ,  $*$  是矩阵的对称部分,  $S$  为权矩阵, 则该观测器是稳定的, 且满足一定的  $H_{\infty}$  鲁棒性能。

证明: 为了证明方便, 可将式(24)和式(25)写成如下形式

$$\begin{pmatrix} -P + H^T H & 0 & \Phi_j^T \\ * & -\gamma^2 I & D^T \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (26)$$

其中,  $\Phi_1 = A$ ,  $\Phi_2 = (A - L_m C A^{-m})$ 。

共同的 Lyapunov 函数  $V(k) = e^T(k) P e(k)$ , 其中  $P$  为对称正定矩阵, 则

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= V(k+1) - V(k) \\ &= e^T(k+1) P e(k+1) - e^T(k) P e(k) \\ &= (\Phi_j e(k) + D \xi_j(k))^T P (\Phi_j e(k) + D \xi_j(k)) \\ &\quad - e^T(k) P e(k) \\ &= e^T(k) \Phi_j^T P \Phi_j e(k) + e^T(k) \Phi_j^T P D \xi_j(k) \\ &\quad + \xi_j^T(k) D^T P \Phi_j e(k) + \xi_j^T(k) D^T P D \xi_j(k) \\ &\quad - e^T(k) P e(k) \\ &= e^T(k) (\Phi_j^T P \Phi_j - P) e(k) + e^T(k) \Phi_j^T P D \xi_j(k) \\ &\quad + \xi_j^T(k) D^T P \Phi_j e(k) + \xi_j^T(k) D^T P D \xi_j(k) \end{aligned}$$

当  $\xi_j(k) = 0$  时, 即不存在扰动输入的时候

$$\Delta V(k) = e^T(k) (\Phi_j^T P \Phi_j - P) e(k) \quad (27)$$

将式(26)看成引理 1 的式(21) 即令

$$-P + S^T S = Z_{11}, \Phi_j^T = Z_{12}, -P^{-1} = Z_{22}$$

$$\text{由} \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ * & Z_{22} \end{pmatrix} < 0,$$

$$\text{得} \begin{pmatrix} -P + S^T S & \Phi_j^T \\ * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0$$

$$\text{由于 } S^T S > 0, \text{ 则} \begin{pmatrix} -P & \Phi_j^T \\ * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0。$$

由 schur 补知, 上式等价于  $\Phi_j P \Phi_j - P < 0$ , 则  $\Delta V(k) < 0$ 。因此系统渐进稳定。

当  $\xi_j(k) \neq 0$ , 存在外界干扰输入时, 引入

$$\begin{aligned} G(k) &= \|\varepsilon(k)\|^2 - \gamma^2 \|\xi_j(k)\|^2 + \Delta V(k) \\ &= [e^T(k) \quad \xi_j^T(k)] \Xi \begin{bmatrix} e(k) \\ \xi_j(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

其中,

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Phi_j^T P \Phi_j - P + S^T S & \Phi_j^T P D \\ * & D^T P D - \gamma^2 I \end{bmatrix}$$

则  $\sum_{k=0}^{\infty} G(k) < 0$ , 等价于  $\Xi < 0$ , 而利用引理 1, 式

(22) 可以写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} -P + S^T S & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_j^T \\ D^T \end{bmatrix} P [\Phi_j \quad D] < 0, \text{ 即}$$

$\Xi < 0$ . 则  $\sum_{k=0}^{\infty} G(k) < 0$ , 证毕。

将式(24)和(25)两边同时乘以  $\text{diag}(I, I, P)$ , 并令  $Q = L_m^T P$ , 可得如下不等式:

$$\begin{pmatrix} -P + S^T S & 0 & A^T P \\ * & -\gamma^2 I & D^T P \\ * & * & -P \end{pmatrix} < 0 \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} -P + S^T S & 0 & A^T P - (A^{-m})^T C^T Q \\ * & -\gamma^2 I & D^T P \\ * & * & -P \end{pmatrix} < 0 \quad (30)$$

这样, 观测器增益矩阵可写为  $L_m = P^{-1} Q^T$

#### 4 仿真示例

考虑系统(1)中, 各参数的值给定为:

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -4 \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}, C_f = [1 \quad 1], D_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

若无线网络控制系统中各节点的采样周期  $T = 0$ .

1s, 输出时延上界  $m = 2$ , 则通过计算可得离散模型的参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9868 & 0.0820 \\ -0.2460 & 0.6588 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.2035 \\ 0.0557 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \quad 1], D = \begin{bmatrix} 0.0044 \\ 0.0082 \end{bmatrix}$$

当系统正常时, 考虑最大的干扰输入为 0.4, 令权矩阵  $S = I$ , 若  $\gamma = 0.1$ , 则利用 LMI 求解器 feasp 求解可得:

当  $m = 1$  时,  $L_1 = [-0.0419 \quad 0.0529]^T$ ;

当  $m = 2$  时,  $L_2 = [-0.0035 \quad 0.0059]^T$ 。

正常情况下, 系统的状态估计如图 2 和图 3 所示。

假定系统在  $t = 30s$  发生故障, 可由图 4 和图 5 看出误差在 30s 之后迅速超过阈值, 系统据此检测到故障的发生。

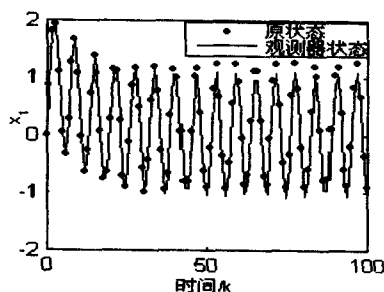


图 2  $x_1$  的状态估计

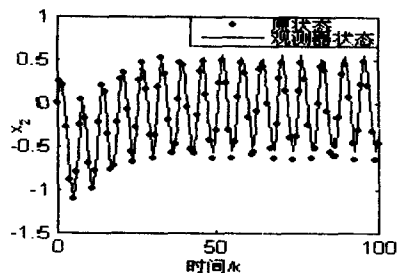


图 3  $x_2$  的状态估计

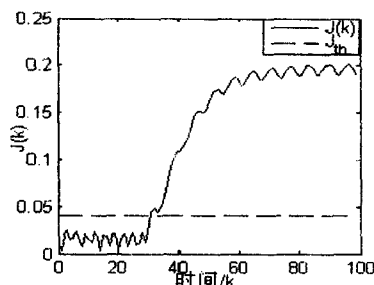


图 4 数据包未丢失时的故障检测

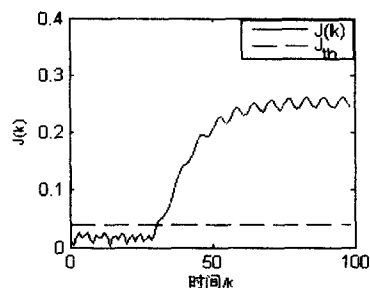


图 5 数据包丢失时的故障检测

#### 5 结束语

文中研究了具有丢包的无线网络控制系统的故障检测。根据经无线网络传输的数据通常会有时延且具有不确定性, 加之数据包可能丢失的特点, 设计相应的观测器, 证明了无扰动和故障的情况下的系统稳定性, 并给出了故障检测的仿真示例。

#### 参考文献:

- [1] Zhong M Y, Ding S X, Lam J. A LMI approach to design ro-

图 6 信息审核功能界面图

- [3] 周端阳,王 猛.基于三层体系结构的单元测试框架研究与实现[J].计算机应用,2010(8):2189-2192.
- [4] 王 爽,房鼎益,陈晓江.基于 J2EE 的网络考试系统设计与实现[J].计算机技术与发展,2008,18(10):155-157.
- [5] 黄 超.基于 Struts 2 拦截实现角色管理与应用系统的解耦[J].电脑知识与技术,2009(31):8709-8711.
- [6] 吴克河,冯苏鑫.基于 J2EE 的工作流开发平台的设计与实现[J].中国电力教育,2009(S2):503-505.
- [7] 丁苍峰.轻量级 workflow 管理系统架构设计[J].计算机技术与发展,2011,21(6):36-39.
- [8] 张云勇.中间件技术原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [9] 李 刚.轻量级 J2EE 企业应用实战:Struts+Spring+Hibernate 整合开发[M].北京:电子工业出版社,2007.
- [10] Johnson R. J2EE development frameworks [J]. Computer, 2005,38(1):107-110.
- [11] Laszewski G V, Foster I, Gawor J. Java CoG Kit Workflow Concepts for Scientific Experiments [R]. Argonne; Argonne National Laboratory, 2005.
- [12] Roure D D, Goble C. Six Principles of Software Design to Empower Scientists [EB/OL]. 2007. <http://eprints.ecs.soton.ac.uk/15032/1/myExpSoftware.pdf>.

(上接第 64 页)

- bust fault detection filter for uncertain LTI systems [J]. Automatica, 2003, 39(2):397-402.
- [2] Tipsuwan Y, Chow M. Control methodologies in networked control system [J]. Control Engineering Practice, 2006, 11(10):1099-1111.
- [3] Walsh G C, Ye H, Bushnell L C. Stability analysis of networked control systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3):438-446.
- [4] 邱占芝,张庆灵,刘 明.有时延和数据包丢失的网络控制系统控制器设计[J].控制与决策,2006,21(6):625-630.
- [5] 于之训,蒋 平,陈辉堂,等.具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计[J].信息与控制,2000,29(2):125-130.
- [6] 邱占芝,张庆灵,连志春,等.存在时延和数据包丢失情况下状态反馈网络控制系统的指数稳定性[J].信息与控制,2005,34(5):567-575.
- [7] 吕 明,吴晓蓓,陈庆伟,等.基于异步动态系统的网络控制系统故障检测[J].控制与决策,2008,23(3):325-329.
- [8] 王 磊,师五喜,郭文成,等.含有死区输入的 Hammerstein 系统的网络预测控制[J].计算机技术与发展,2010,20(3):246-248.
- [9] 彭丽萍,岳 东.无线网络控制系统研究[J].控制工程,2006,13(5):481-484.
- [10] 王 艳,张东彪,纪志成.无线网络控制系统建模与鲁棒控制分析[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):85-89.
- [11] 张 捷,薄煜明,吕 明.基于无线网络控制系统的故障检测[J].系统工程与电子技术,2010,32(4):842-845.
- [12] Bao Y, Dai Q Q, Cui Y L, et al. Fault detection based on robust states observer on networked control systems [C]//International Conference on Control and Automation. Budapest, Hungary: [s. n.], 2005:1237-1241.
- [13] 贾英明.鲁棒控制[M].北京:科学出版社,2007.
- [14] Zhang M J. A switching control strategy for nonlinear dynamic systems [C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan: [s. n.], 2003:1476-1481.