

基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述

杨光红^{1,2†}, 张志慧¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004;

2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 介绍一种基于区间观测器的故障诊断技术. 为突出区间观测器在故障诊断方面的优势, 总结归纳针对不同类型系统构造的可以达到故障诊断目的的区间观测器, 并讨论观测器的设计条件. 例如, 事件触发机制下的故障检测区间观测器, 针对线性参数变化系统设计的基于区间观测器的故障检测机制, 在区间观测器的框架下实现带有未知互联项的T-S模糊大系统的故障隔离, 以及利用区间观测器对多智能体系统实现故障隔离. 最后探讨该领域亟待解决的问题.

关键词: 区间观测器; 故障诊断; 线性系统; 线性参数变化系统; T-S模糊互联系统; 多智能体系统

中图分类号: TP277

文献标志码: A

Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems

YANG Guang-hong^{1,2†}, ZHANG Zhi-hui¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The purpose of this survey is to introduce a novel interval observer based fault diagnosis technique. We particularly summarize various interval observers for different systems and discuss design conditions. For example, the event-triggered fault detection method based on interval observers, the parameter-dependent interval observer based fault detection scheme for linear parameter-varying systems, the fault isolation method for T-S fuzzy interconnected systems with unknown interconnections by using interval observers, as well as the interval observer based fault isolation method for discrete-time multi-agent systems. The common goal of discussion on these topics is to highlight the advantages of the interval observer based fault diagnosis schemes. Finally, some open problems in the field are pointed out.

Keywords: interval observer; fault diagnosis; linear systems; linear parameter-varying systems; T-S fuzzy interconnected systems; multi-agent systems

0 引言

随着现代科学与技术的飞速发展, 控制系统日益大型化和复杂化. 在这些系统带来巨大经济效益的同时, 也潜伏着一定的危机. 任何一个部件发生故障都有可能带来损失甚至是灾难. 故障诊断技术作为提高系统安全性和可靠性的重要手段, 可以有效地减少故障事故的发生. 因此, 日益引起人们的重视, 并已成为系统设计过程中必须要考虑的问题之一. 故障诊断技术起源于1971年Beard发表的博士论文^[1], 随后便引起了学者们在故障诊断方面的研究热潮. 直到现在, 对故障诊断技术的研究也从未停止, 并且越

来越受到重视. 故障诊断技术包括故障检测、故障隔离和故障辨识3个方面^[2]. 其中: 故障检测用以判断系统是否发生故障; 故障隔离则是判定故障位置; 故障辨识的任务是估计故障的严重程度、类型和性质^[3].

早期的故障诊断由硬件冗余来实现. 硬件冗余的优势在于其高度的可靠性和直接隔离故障的能力. 但是, 因其高成本和对空间的要求, 在现代控制系统中已不再适用. 基于解析冗余的故障诊断方法应运而生. 在解析冗余方法中, 将系统解析模型的变量数学关系作为诊断的参考点, 因此, 不需要通过对零

收稿日期: 2017-11-25; 修回日期: 2017-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61621004, 61420106016); 流程工业综合自动化国家重点实验室科研基金项目(2013ZCX01).

作者简介: 杨光红(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事容错控制、故障检测与隔离、信息物理系统及鲁棒控制等研究; 张志慧(1988—), 女, 博士生, 从事故障检测与隔离的研究.

†通讯作者. E-mail: yangguanghong@ise.neu.edu.cn

部件的额外硬件备份来实现诊断^[4]. 近年来, 基于解析冗余的故障诊断方法发展迅速, 它大体可分为3类: 基于模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法. 其中, 基于模型的故障诊断方法发展迅速, 其核心问题是残差产生和残差评价^[5-6]. 图1给出了基于模型的故障诊断方法原理.

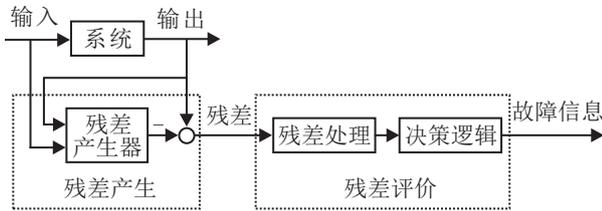


图1 基于模型的故障诊断方法原理

就残差产生而言, 其目的在于生成能够反映系统实际行为与期望行为之间差异的残差信号. 如果设计残差产生器用以产生残差, 使得鲁棒性和故障敏感性得以增强是故障诊断过程中的关键^[7-8], 则残差评价是保证故障得以成功诊断的一个不可忽视的环节. 残差评价阶段由残差评价器、阈值选择器以及决策逻辑3个环节构成. 对故障检测系统而言, 阈值的选择是一个重要的研究课题. 阈值选择的过大, 将会增加漏报; 阈值选择的过小, 也会增加误报. 对故障隔离系统而言, 阈值的选择更加复杂. 到目前为止, 针对阈值, 包括常数阈值^[9-14]和时变阈值^[15-18]选择的研究从未停止.

自Luenberger在文献[19]中提出观测器以来, 因其能够对系统状态进行估计而得到人们的广泛关注. 近年来, 观测器作为一种有效的残差产生器备受青睐, 基于观测器的故障诊断方法应运而生. 最近, 区间观测器理论的兴起和其在控制方面的应用, 为故障诊断提供了新思路. 所谓区间观测器, 是当系统存在不确定因素时, 通过构造上界和下界观测器给出状态变化的一个范围(区间). 以区间观测器为残差产生器, 从而给出的任意时刻状态的上下界, 正是故障诊断的一个天然的阈值. 因此, 基于区间观测器的故障诊断技术的优势在于区间观测器不但能够产生残差信号, 而且还能给出阈值, 省略了传统基于观测器的故障诊断方法设计残差评价器和阈值选择器这两个环节, 残差区间直接用于故障决策, 方法简洁直观. 图2和图3分别给出了传统基于观测器的故障诊断方法和基于区间观测器的故障诊断方法原理.

本文对基于区间观测器的故障诊断技术进行梳理和总结. 首先简短地回顾区间观测器的发展史、基本原理以及基于区间观测器故障检测的主要思想; 对基于事件触发区间观测器的故障检测方法进行总

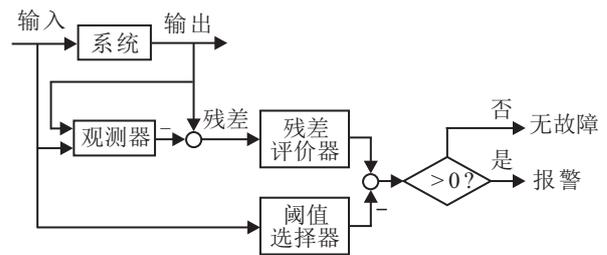


图2 传统基于观测器的故障诊断方法

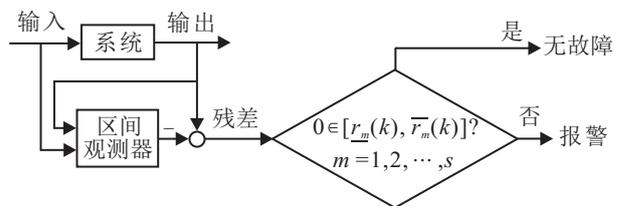


图3 基于区间观测器的故障诊断方法

结, 讨论采样方式对故障检测性能的影响; 简要介绍线性参数变化系统的故障检测问题; 讨论带有未知互联项的模糊大系统故障隔离问题; 针对离散多智能体系统提出基于区间观测器的故障隔离方法; 最后对全文进行总结, 并指明下一步研究的方向.

1 区间观测器发展史、基本原理以及基于区间观测器故障诊断的主要思想

区间观测器的思想是由Gouze等^[20]首次提出的. 针对生物系统和人口模型, 他们提出了能够对系统状态产生上下界估计的动态模型. 区间观测器的概念成熟于文献[21-23], 作者针对线性系统给出了标准的区间观测器形式, 并给出了一套设计思想, 即保证连续误差系统是协同系统, 离散误差系统是非负系统. 文献[21]针对带有扰动的指数稳定离散系统提出了一种区间观测器两步设计法. 第1步将系统变换成Jordan标准型, 第2步通过构造时变坐标变换将Jordan标准型变换成非负系统. 这样, 既保证了误差系统的稳定性, 又保证了其非负性. 文献[22]将上述方法拓展到了连续系统. 文献[23]针对带有未知有界非线性和扰动的离散系统, 设计了基于坐标变换的区间观测器以及基于区间观测器的输出反馈控制器. 区间观测器在文献[24-26]中得到了进一步的发展, 作者针对区间观测器展开了更深入的研究, 构造了Luenberger型区间观测器. 下面以离散系统为例, 给出Luenberger型区间观测器的基本原理以及基于区间观测器故障检测技术的主要思想.

1.1 区间观测器的基本原理

考虑如下受扰动影响的离散线性系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\omega(k),$$

$$y(k) = Cx(k). \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbf{R}^n$ 和 $y(k) \in \mathbf{R}^q$ 是系统的输入和输出向量; $\omega(k) \in \mathbf{R}^p$ 表示外部扰动; $A \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbf{R}^{n \times p}$, $C \in \mathbf{R}^{q \times n}$ 是已知的常数矩阵, 并且 (C, A) 是可观测的.

假设1 存在已知的界函数 $\underline{\omega}(k) \in \mathbf{R}^p$ 和 $\bar{\omega}(k) \in \mathbf{R}^p$ 使得 $\underline{\omega}(k) \preceq \omega(k) \preceq \bar{\omega}(k)$ 成立.

在假设1下, 设计的区间观测器如下:

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= (A - LC)\underline{x}(k) + Ly(k) + B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k), \\ \bar{x}(k+1) &= (A - LC)\bar{x}(k) + Ly(k) + B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k). \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\bar{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 和 $\underline{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 表示对状态 $x(k)$ 的上下界估计; $L \in \mathbf{R}^{n \times q}$ 为观测器增益.

定义 $\underline{e}(k) = x(k) - \underline{x}(k)$ 和 $\bar{e}(k) = \bar{x}(k) - x(k)$, 则有如下误差系统:

$$\begin{aligned} \underline{e}(k+1) &= (A - LC)\underline{e}(k) + B\omega(k) - (B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k)), \\ \bar{e}(k+1) &= (A - LC)\bar{e}(k) + B^+\bar{\omega}(k) - (B^-\underline{\omega}(k) - B\omega(k)). \end{aligned} \quad (3)$$

由 $B^+ = \max\{0, B\}$, $B^- = B^+ - B$ 和假设1可知

$$B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k) \preceq B\omega(k) \preceq B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k).$$

于是, 在误差动态(3)中, 有

$$\begin{aligned} B\omega(k) - (B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k)) &\succeq 0, \\ B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k) - B\omega(k) &\succeq 0 \end{aligned}$$

成立.

进一步, 由非负系统的定义可知, 如果矩阵 $A - LC$ 是非负的, 则在初始条件 $\underline{e}(0) \succeq 0$ 和 $\bar{e}(0) \succeq 0$ 下有

$$\underline{e}(k) \succeq 0, \bar{e}(k) \succeq 0$$

成立. 回顾上下界误差的定义 $\underline{e}(k) = x(k) - \underline{x}(k)$ 和 $\bar{e}(k) = \bar{x}(k) - x(k)$, 不难得到

$$\underline{x}(k) \preceq x(k) \preceq \bar{x}(k)$$

在初始条件满足 $\underline{x}(0) \preceq x(0) \preceq \bar{x}(0)$ 的情况下成立. 也就是说区间观测器(2)能够对系统(1)的状态给出由上下界估计构成的估计区间. 图4给出了这种Luenberger型区间观测器得到的状态估计轨迹.

由上述结构和原理可见, 如何保证误差系统的稳定性和非负性已成为设计区间观测器的关键问

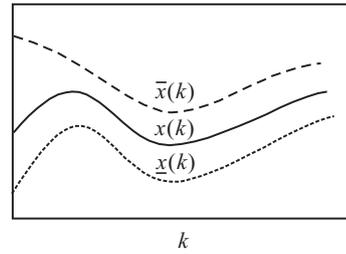


图4 区间观测器状态区间

题. 文献[24]给出了基于Sylvester方程的坐标变换, 用以保证误差动态的稳定性和非负性. 在此基础上, 文献[25]利用Lyapunov稳定性理论分析了估计误差动态的有界性. 进一步, 文献[26]针对具有不可测参数的线性参数变化系统设计了区间观测器, 首次在 L_1/L_2 框架下分析了区间的鲁棒性, 优化了估计精度. 然而, 值得一提的是, 文献[26]中的定理是在对系统进行坐标变换之后提出的, 因此, 定理中给出的Riccati矩阵不等式条件并不能直接用于求解观测器增益矩阵 L , 而只能作为一个验证条件. 如果在不采用坐标变化的情况下, 在将Riccati矩阵不等式转化成LMI的同时, 需要对Lyapunov矩阵强加对角结构限制. 针对一般的线性系统, 采用有结构限制的Lyapunov矩阵而得到的设计条件往往具有一定的保守性. 文献[27]指出, 由于非负性、稳定性和其他性能需要同时满足, 给出一种观测器增益计算方法并不简单, 因而提出了循环验证的算法以求解该问题. 此外, 通过事先确定某些矩阵, 然后采用网格法或迭代法求解LMI也是一种选择. 上述区间观测器在文献[28]和文献[29]中得到了进一步的应用: 文献[28]针对一类带有非线性函数的连续系统和线性参数变化系统设计了基于区间观测器的控制律; 文献[29]解决了一类带有Lipschitz非线性的切换系统基于区间观测器的控制问题. 上述文献提出了一个开放性的问题: 如何找到一个更有效的区间观测器设计方法?

此外, 就故障诊断问题而言, 文献[30-32]提出了基于区间概念的方法, 并且通过集员方法解决了故障检测与隔离问题. 特别地, 文献[33]首次提出了基于区间观测器的故障检测与隔离方法. 观测器设计条件以LMI的形式给出. 但是, 在文献[33]中同样要求Lyapunov是对角的. 因此, 基于区间观测器的故障检测与隔离方法值得进一步深入研究. 以下将总结最近基于LMI的故障诊断区间观测器设计方法以及针对不同问题构造的不同区间观测器.

1.2 基于区间观测器的故障检测主要思想

考虑受故障影响的离散线性系统(1), 有

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\omega(k) + Ef(k), \\ y(k) &= Cx(k), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $f(k) \in \mathbf{R}^{n_f}$ 是属于 l_2 的故障信号.

在假设1下,设计如下基于区间观测器的残差产生器:

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= (A - \underline{L}C)\underline{x}(k) + \underline{L}y(k) - \underline{F}(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)) + B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k), \\ \bar{x}(k+1) &= (A - \bar{L}C)\bar{x}(k) + \bar{L}y(k) + \bar{F}(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)) + B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k), \\ \underline{y}(k) &= C^+\underline{x}(k) - C^-\bar{x}(k), \\ \bar{y}(k) &= C^+\bar{x}(k) - C^-\underline{x}(k), \\ \underline{r}(k) &= V(\bar{y}(k) - \underline{y}(k)), \\ \bar{r}(k) &= V(\bar{y}(k) - \underline{y}(k)). \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\bar{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 和 $\underline{x}(k) \in \mathbf{R}^n$ 表示对状态 $x(k)$ 的上下界估计; $\bar{y}(k) \in \mathbf{R}^q$ 和 $\underline{y}(k) \in \mathbf{R}^q$ 表示对输出 $y(k)$ 的上下界估计; $\bar{r}(k) \in \mathbf{R}^s$ 和 $\underline{r}(k) \in \mathbf{R}^s$ 表示上下界残差; $\underline{L} \in \mathbf{R}^{n \times q}$, $\bar{L} \in \mathbf{R}^{n \times q}$, $\underline{F} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\bar{F} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为观测器增益; $V \in \mathbf{R}^{s \times q}$ 为一正矩阵.

得到的误差系统为

$$\begin{aligned} \underline{e}(k+1) &= (A - \underline{L}C + \underline{F})\underline{e}(k) + \underline{F}\bar{e}(k) + B\omega(k) - (B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k)) + Ef(k), \\ \bar{e}(k+1) &= (A - \bar{L}C + \bar{F})\bar{e}(k) + \bar{F}\underline{e}(k) + B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k) - B\omega(k) - Ef(k). \end{aligned} \quad (6)$$

如果矩阵 $(A - \underline{L}C + \underline{F})$, $(A - \bar{L}C + \bar{F})$, \underline{F} , \bar{F} 是非负的,则在初始条件 $\underline{x}(0) \leq x(0) \leq \bar{x}(0)$ 和无故障的情况下,有:

- 1) $\underline{e}(k) \geq 0, \bar{e}(k) \geq 0$;
- 2) $\underline{x}(k) \leq x(k) \leq \bar{x}(k)$;
- 3) $\underline{y}(k) \leq y(k) \leq \bar{y}(k)$;
- 4) $0 \in [\underline{r}_i(k), \bar{r}_i(k)], i = 1, 2, \dots, s$.

在有故障的情况下,即使矩阵 $(A - \underline{L}C + \underline{F})$, $(A - \bar{L}C + \bar{F})$, \underline{F} , \bar{F} 是非负的,误差动态的非负性也不能得到保证,因此,此时的残差区间可作为检测故障的残差和阈值.于是,基于区间观测器故障检测技术的

主要思想是设计观测器,使得:

- 1) 误差动态(6)是稳定且非负的;
- 2) 增大残差区间的鲁棒性;
- 3) 提高残差区间的故障敏感度.

通过引入 l_1 和 H_∞ 性能指标,并借助于松弛变量,使 Lyapunov 矩阵和系统矩阵得以解耦,从而,非负限制得以从 Lyapunov 矩阵转移到松弛矩阵上,使得不同的性能指标同时满足,估计误差的非负性限制通过 LMI 条件得到保证.此时的故障检测决策方案描述如下.

故障检测决策方案:如果至少有一个残差区间满足 $0 \notin [\underline{r}_i(k), \bar{r}_i(k)]$,则报警.

图5给出了区间观测器产生的残差区间.在故障发生前,区间特性 $0 \in [\underline{r}(k), \bar{r}(k)]$ 成立.当 $0 \notin [\underline{r}(k), \bar{r}(k)]$ 时,成功检测出故障.

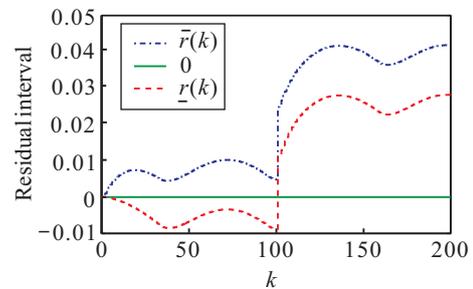


图5 区间观测器产生的残差区间

2 事件触发机制下的故障检测区间观测器设计

随着计算机技术迅速发展,控制系统也正在向数字化及网络化方向发展,因此,考虑采样方式对故障检测性能的影响是一个重要的问题.基于传统周期采样方式的故障检测方法能够成功检测故障,但是难免会存在浪费通信和计算资源的弊端.近年来,事件触发机制逐渐兴起,其主要目标是降低通信负担.其策略是通过给出一个预先设定的条件来判断是否传输数据.

最近,很多基于事件触发的故障检测结果被相继提出^[34-38].其中,文献[35-38]针对离散系统提出了基于滤波器和传统 Luenberger 观测器的事件触发故障检测方法,只有满足事件触发条件时,测量输出才被传输到滤波器或观测器.结果表明,事件触发机制在保证故障诊断性能的前提下,降低了通信负担.值得一提的是,文献[39]针对离散线性系统提出了一种基于事件触发区间观测器的故障检测方法:首先,考虑到扰动和事件误差的影响,构造一个事件触发的区间观测器,用以产生上下界残差;然后,给出一系列观测器设计条件.

2.1 问题描述

考虑离散模型(4), 并且假设 A 是 Schur 稳定的, 则在无故障情况下, 输出是有界的, 即 $\|y(k)\| \leq Y(k)$. 为了降低通信负担, 首先提出如下事件触发机制, 使得系统输出在不满足如下条件时才被传输给区间观测器:

$$\sigma y^T(k)y(k) - \varepsilon \tilde{\delta}^T(k)\tilde{\delta}(k) > 0. \quad (7)$$

其中: $\sigma > 0$ 和 $\varepsilon > 0$ 为事件参数; $y(k)$ 为当前输出; 且

$$\tilde{\delta}(k) = \begin{bmatrix} 2Y(k)\|\underline{L}\|E_n - \underline{L}\delta(k) \\ 2Y(k)\|\bar{L}\|E_n + \bar{L}\delta(k) \\ \delta(k) \end{bmatrix},$$

$$\delta(k) = \tilde{y}(k) - y(k),$$

$$\tilde{y}(k) = y(k_i), \quad k \in [k_i, k_{i+1}), \quad i, k \in \mathbf{N}. \quad (8)$$

\underline{L} 和 \bar{L} 为观测器增益; k_i 为第 i 个触发时刻, $k_{i+1} > k_i$; $\delta(k)$ 为事件误差, 表示当前输出 $y(k)$ 与上一次传输的输出 $\tilde{y}(k)$ 之间的差. 如果 $y(k)$ 满足不等式(7), 则它将被不被传输. 只有当 $y(k)$ 不满足条件(7)时, 它才会被传输给区间观测器.

2.2 事件触发区间观测器

事件触发区间观测器构造如下:

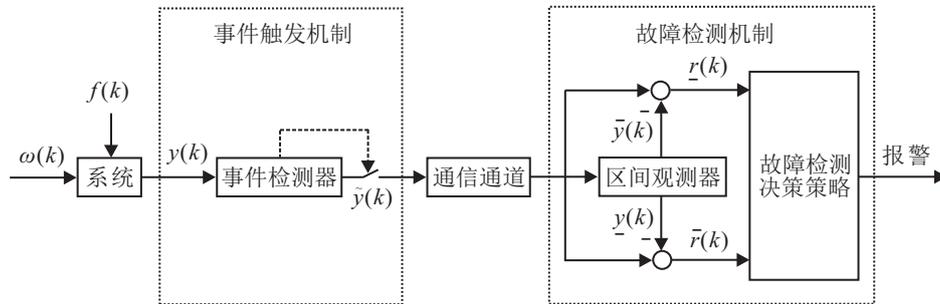


图6 基于事件触发区间观测器的故障检测方案

3 基于参数依赖区间观测器的线性参数变化系统故障检测

固有非线性及较大的运行范围是很多实际系统不可忽略的特性. 线性时不变系统不能完全描述这样的实际系统. 事实上, 线性参数变化系统在描述上述特性时是有优势的. 线性参数变化系统可以看成是不同工作点的一系列线性系统. 采用线性参数变化系统来描述实际系统的优势在于能够充分利用线性系统理论处理问题. 就保守性而言, 一方面, 与参数不依赖的 Lyapunov 函数相比, 参数依赖的 Lyapunov 函数能够降低保守性; 另一方面, 在参数可测的情况下, 设计参数依赖的控制器和滤波器也是一种减小保

$$\begin{aligned} x(k+1) &= (A - \underline{L}C)x(k) + \underline{L}\tilde{y}(k) - \underline{F}(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)) + B^+\underline{\omega}(k) - B^-\bar{\omega}(k) - 2Y(k)\|\underline{L}\|E_n, \\ \bar{x}(k+1) &= (A - \bar{L}C)\bar{x}(k) + \bar{L}\tilde{y}(k) + \bar{F}(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)) + B^+\bar{\omega}(k) - B^-\underline{\omega}(k) + 2Y(k)\|\bar{L}\|E_n, \\ \underline{y}(k) &= C^+\underline{x}(k) - C^-\bar{x}(k), \\ \bar{y}(k) &= C^+\bar{x}(k) - C^-\underline{x}(k), \\ \underline{r}(k) &= V(\tilde{y}(k) - \bar{y}(k)), \\ \bar{r}(k) &= V(\tilde{y}(k) - \underline{y}(k)). \end{aligned} \quad (9)$$

一方面, 事件触发条件(7)通过构造增广的事件误差, 将区间特性考虑在内; 另一方面, 在构造事件触发区间观测器(9)时, 不但将扰动的上下界作为观测器的输入, 而且输出的界也被考虑在内. 通过引入扰动抑制、故障敏感以及非负性能指标, 文献[39]给出了事件触发区间观测器的 LMI 设计条件, 并给出了基于残差区间的故障检测机制, 从而在保证故障检测性能的前提下, 降低了通信负担. 图6给出了事件触发机制下, 基于区间观测器的故障检测方法原理.

守性的方法. 此方法的主要优势在于能够充分利用系统信息.

近年来, 线性参数变化系统的故障检测备受关注. 例如, 文献[40-41]提出了 H_∞/H_- 滤波器以实现鲁棒性和故障敏感性指标; 文献[42]应用多胞型未知输入比例积分观测器来估计系统状态和故障信号. 然而, 该故障诊断方法中均采用的是参数不依赖的 Lyapunov 函数. 为了降低保守性, 文献[43]采用参数依赖的 Lyapunov 函数设计了一个多胞型线性参数变化滤波器, 但是, 由于引入了参数不依赖的松弛变量, 该方法仍然是保守的.

综合上述考虑, 文献[44]针对离散线性参数变

化系统提出了一种基于区间观测器的故障检测方法. 首先,构造一个参数依赖的故障检测区间观测器;然后,引入 l_1 和 H_∞ 性能以提高残差区间鲁棒性和故障敏感性;最后,参数依赖的扰动抑制、故障敏感和非负条件被转化成一系列LMI. 该方法通过仿真算例验证了其有效性和优越性.

3.1 问题描述

考虑如下离散线性参数变化系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(\alpha)x(k) + B(\alpha)\omega(k) + E(\alpha)f(k), \\ y(k) &= C(\alpha)x(k). \end{aligned} \quad (10)$$

其中:假设 $\Omega(\alpha) = (A(\alpha), B(\alpha), E(\alpha), C(\alpha)) \in \mathcal{R}$, \mathcal{R} 为一个有 N 个顶点的凸有界多面体域,即

$$\mathcal{R} = \left\{ \Omega(\alpha) = \sum_{i=1}^N \rho_i(\alpha)\Omega_i; \sum_{i=1}^N \rho_i(\alpha) = 1, \rho_i(\alpha) \geq 0 \right\};$$

$\Omega_i = (A_i, B_i, E_i, C_i)$ 表示多胞型的第 i 个顶点.

3.2 参数依赖的区间观测器

在假设故障存在已知上下界的情况下,设计了如下区间观测器:

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= (A(\alpha) - \underline{L}(\alpha)C(\alpha))\underline{x}(k) + \underline{L}(\alpha)y(k) + \\ & B^+(\alpha)\underline{\omega}(k) - B^-(\alpha)\bar{\omega}(k) - \\ & \underline{F}(\alpha)(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)), \\ \bar{x}(k+1) &= (A(\alpha) - \bar{L}(\alpha)C(\alpha))\bar{x}(k) + \bar{L}(\alpha)y(k) + \\ & B^+(\alpha)\bar{\omega}(k) - B^-(\alpha)\underline{\omega}(k) + \\ & \bar{F}(\alpha)(\bar{x}(k) - \underline{x}(k)), \\ \underline{y}(k) &= C^+(\alpha)\underline{x}(k) - C^-(\alpha)\bar{x}(k), \\ \bar{y}(k) &= C^+(\alpha)\bar{x}(k) - C^-(\alpha)\underline{x}(k), \\ \underline{r}(k) &= V(\alpha)(y(k) - \bar{y}(k)), \\ \bar{r}(k) &= V(\alpha)(y(k) - \underline{y}(k)). \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $V(\alpha) \in \mathbf{R}^{s \times s}$ 为一正矩阵; $\underline{L}(\alpha) \in \mathbf{R}^{n \times q}$, $\bar{L}(\alpha) \in \mathbf{R}^{n \times q}$, $\underline{F}(\alpha) \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\bar{F}(\alpha) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为待定的参数依赖观测器增益.

利用LMI处理技术以及Polya定理,可将扰动抑制、故障敏感和非负条件转化成有限个LMI. 由于充分利用了系统信息,通过应用参数依赖的Lyapunov函数和松弛矩阵得到的区间观测器设计条件比参数

不依赖的方法保守性更小.

4 带有未知互联项的T-S模糊大系统故障隔离

考虑到线性模型不足以充分描述实际系统中固有的非线性特性,模糊逻辑技术作为近似复杂非线性系统的有效工具,吸引了众多学者的关注. 模糊系统的故障诊断问题也越来越受到重视. 例如,文献[45-46]针对具有已知上下界隶属度函数的T-S模糊系统,结合切换技术,设计了自适应观测器用于诊断执行器故障. 文献[47]同样针对具有未知隶属度函数的T-S模糊系统,提出了具有时变增益的故障检测滤波器,其增益在一些固定增益之间切换. 此外,文献[48]针对隶属度函数已知的T-S模糊系统,利用有限频技术提出了传感器故障诊断滤波器设计方法. 文献[49]针对将系统输出作为前提变量的T-S模糊系统,充分考虑传感器故障对前提变量和分区的影响,在多模型的框架下,设计了一系列分段故障检测和隔离滤波器,使其中的每一个滤波器都对应一种特定类型的故障,采用模型匹配的思想达到检测与隔离的目的.

由于重要的实用性,互联系统已得到广泛研究. 像电力系统、航空航天系统以及生态系统等实际系统,都是以多个子系统互联的形式存在的. 事实上,针对模糊大系统,故障隔离问题更具挑战性,特别是带有未知互联项的大系统,故障隔离更难实现. 其原因在于每个子系统中发生的故障可能由于互联项的存在而影响其他没有发生故障的子系统. 特别地,文献[50-51]提出了非线性观测器以产生残差信号. 但是,上述结果只是考虑了故障检测问题. 进一步,文献[52]设计了故障检测与隔离观测器,阈值则是通过计算估计误差动态的解析解实现的. 此外,文献[53]利用文献[54]中处理未知互联项的环路小增益定理,针对考虑了量化测量的T-S模糊大系统提出了分段滤波器,结合传统阈值设计方法给出了一种故障隔离机制. 由此可见,针对带有未知互联项的模糊大系统,如何找到一种新颖的故障隔离方法仍是一个开放性的问题.

文献[55]主要研究带有未知互联项的模糊互联大系统故障隔离问题. 首先,基于输出分区技术构造分段区间观测器;然后,通过求解扰动抑制、故障敏感和非负条件实现观测器的设计. 据笔者所知,这是第一次在区间观测器的框架下考虑互联系统的故障隔离问题. 其主要贡献如下:1)未知互联项的界被构造成区间观测器中的一项,因此,由未知互联项

带来的其他子系统的故障和扰动的影响被充分考虑在内; 2) l_1 性能被用来提高残差区间的鲁棒性, 同时, H_∞ 性能的引入, 使得每个残差区间只对自身子系统的故障敏感; 3) 区间观测器的设计是基于分段 Lyapunov 函数和松弛变量技术的. 这样, 该方法比基于共同及对角的 Lyapunov 函数方法保守性更小.

4.1 问题描述

考虑一个由 N 个模糊子系统 $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 构成的互联系统, 每个子系统描述如下:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \sum_{g=1}^{\mu_i} h_{ig}(y_i(k)) [A_{ig}x_i(k) + B_{ig}\omega_i(k) + D_{ig}\Psi_i(y(k)) + E_{ig}f_i(k)], \\ y_i(k) &= C_i x_i(k). \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $y_i(k) = [y_{i1}(k), y_{i2}(k), \dots, y_{iq_i}(k)]^T \in \mathbf{R}^{q_i}$ 是 S_i 的输出向量; μ_i 及 $h_{ig}(y_i(k))$ 表示模糊规则数和标准化后的隶属度函数; $y(k) = [y_1^T(k), y_2^T(k), \dots, y_N^T(k)]^T \in \mathbf{R}^q$ 是整个系统的输出向量, $\sum_{i=1}^N q_i = q$; $\Psi_i(y(k)) = [\Psi_{i1}(y(k)), \Psi_{i2}(y(k)), \dots, \Psi_{im_i}(y(k))]^T : \mathbf{R}^q \rightarrow \mathbf{R}^{m_i}$ 表示未知互联项.

首先利用隶属度信息, 将整个输出空间划分为工作区域和交叉区域. $\{S_{il}\}_{l \in F^i} \subseteq \mathbf{R}^{q_i}$ 表示输出空间的一个区域划分, F^i 代表所有区域下标的集合. 对于每个区域 S_{il} , 集合 $K_i(l)$ 包含了该区域内所有系统矩阵的下标. 因此, 在每一个区域内, 子系统 S_i 可以描述为

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \sum_{m \in K_i(l)} h_{im}(y_i(k)) [A_{im}x_i(k) + B_{im}\omega_i(k) + D_{im}\Psi_i(y(k)) + E_{im}f_i(k)], \\ y_i(k) &= C_i x_i(k), \quad y_i(k) \in S_{il}, \quad l \in F^i. \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} h_{im}(y_i(k)) &> 0, \\ \sum_{m \in K_i(l)} h_{im}(y_i(k)) &= 1. \end{aligned}$$

针对上述系统, 考虑满足如下假设的互联项:

假设 2 未知互联项 $\Psi_i(y(k))$ 是有界的, 且已知的界函数为 $\underline{\Psi}_i(y(k)) : \mathbf{R}^q \rightarrow \mathbf{R}^{m_i}$ 和 $\bar{\Psi}_i(y(k)) : \mathbf{R}^q \rightarrow \mathbf{R}^{m_i}$, 即

$$\underline{\Psi}_i(y(k)) \preceq \Psi_i(y(k)) \preceq \bar{\Psi}_i(y(k)) \quad (14)$$

对所有 $y(k) \in \mathbf{R}^q$ 均成立.

4.2 分段区间观测器

针对子系统 S_i 构造了如下的分段区间观测器:

$$\begin{aligned} \underline{x}_i(k+1) &= \sum_{m \in K_i(l)} h_{im}(y_i(k)) [(A_{im} - \underline{L}_{il}C_i)\underline{x}_i(k) + \underline{L}_{il}y_i(k) - \underline{F}_{il}(\bar{x}_i(k) - \underline{x}_i(k)) + B_{im}^+\omega_i(k) - B_{im}^-\bar{\omega}_i(k) + D_{im}^+\underline{\Psi}_i(y(k)) - D_{im}^-\bar{\Psi}_i(y(k))], \\ \bar{x}_i(k+1) &= \sum_{m \in K_i(l)} h_{im}(y_i(k)) [(A_{im} - \bar{L}_{il}C_i)\bar{x}_i(k) + \bar{L}_{il}y_i(k) + \bar{F}_{il}(\bar{x}_i(k) - \underline{x}_i(k)) + B_{im}^+\bar{\omega}_i(k) - B_{im}^-\omega_i(k) + D_{im}^+\bar{\Psi}_i(y(k)) - D_{im}^-\underline{\Psi}_i(y(k))], \\ \underline{y}_i(k) &= C_i^+ \underline{x}_i(k) - C_i^- \bar{x}_i(k), \\ \bar{y}_i(k) &= C_i^+ \bar{x}_i(k) - C_i^- \underline{x}_i(k), \\ y_i(k) &\in S_{il}, \quad l \in F^i. \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $\underline{x}_i(k) \in \mathbf{R}^{n_i}$ 和 $\bar{x}_i(k) \in \mathbf{R}^{n_i}$ 表示 $x_i(k)$ 的下界和上界估计; $\underline{y}_i(k) \in \mathbf{R}^{q_i}$ 和 $\bar{y}_i(k) \in \mathbf{R}^{q_i}$ 表示 $y_i(k)$ 的下界和上界估计; $\underline{L}_{il} \in \mathbf{R}^{n_i \times q_i}$, $\bar{L}_{il} \in \mathbf{R}^{n_i \times q_i}$, $\underline{F}_{il} \in \mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ 以及 $\bar{F}_{il} \in \mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ 是待定的观测器增益.

带有未知互联项的大系统故障隔离问题是非常复杂的. 其原因在于子系统故障的影响会通过未知互联项传播, 而这种传播对各个系统带来的影响是未知的, 很难被利用起来. 在上述区间观测器设计过程中, 充分利用了可用的信息, 使得由互联项引入的影响被区间包容. 此外, 当第 i 个子系统故障发生时, 由第 i 个观测器产生的区间关系将不再成立. 而且, 由于故障敏感指标的引入, 残差区间变化将更加明显.

下界残差 $\underline{r}_i(k)$ 及上界残差 $\bar{r}_i(k)$ 构成了子系统 S_i 的残差区间. 在提出观测器设计条件时, 考虑到区间特性和扰动抑制性能指标, $0 \in [\underline{r}_{iz}(k), \bar{r}_{iz}(k)]$ 对于 $z = 1, 2, \dots, s_i$ 成立, 并且残差区间的鲁棒性在引入 l_1 性能后将得到提高. 当 $f_i(k)$ 发生时, 误差动态的非负性不能得到保证, 而且, H_∞ 性能能够最大化故障 $f_i(k)$ 对残差的影响.

图 7 描述了故障隔离方案. 由第 i 个观测器产生的第 i 个残差将直接用于隔离第 i 个子系统故障. 因此, 所提故障隔离方案不需要设计残差评价函数和阈值. 具体决策方案描述如下.

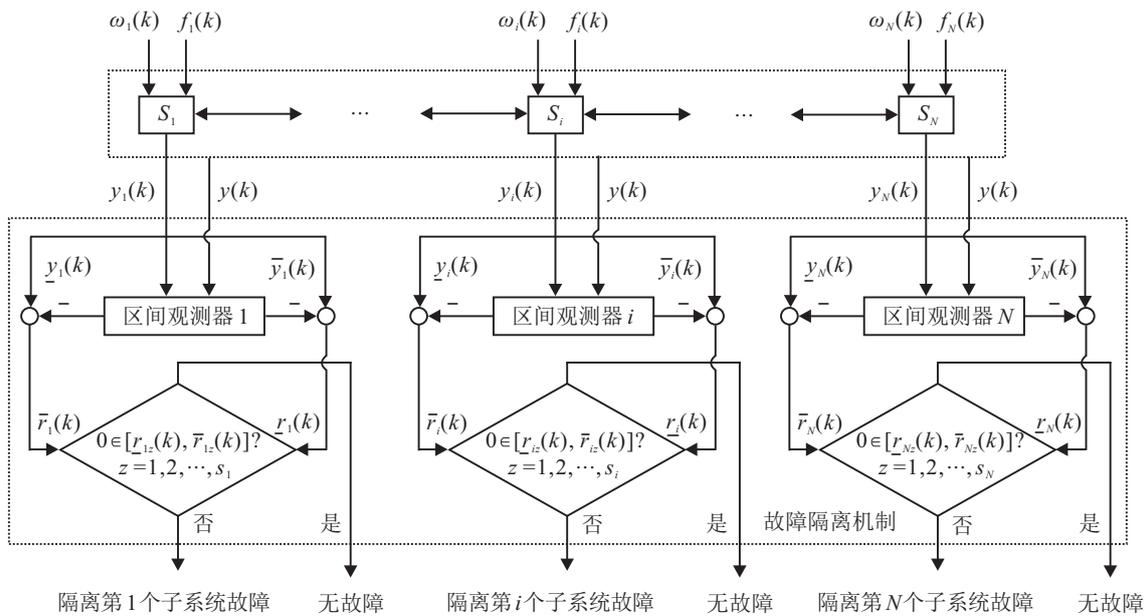


图7 带有未知互联项的模糊大系统的故障隔离方案

故障隔离决策方案: 如果至少有一个残差区间满足 $0 \notin [r_{iz}(k), \bar{r}_{iz}(k)]$ ($z = 1, 2, \dots, s_i$), 则第 i 个子系统故障被隔离出来。

以图8和图9为例, 在 $101 \leq k \leq 201$ 时, $0 \notin [r_1(k), \bar{r}_1(k)]$, $0 \in [r_2(k), \bar{r}_2(k)]$ 成立; 而且在 $k \geq 301$ 时, $0 \notin [r_2(k), \bar{r}_2(k)]$, $0 \in [r_1(k), \bar{r}_1(k)]$. 由此可以判断: 在 $101 \leq k \leq 201$ 时, 子系统1发生故障; 而在 $k \geq 301$ 时, 子系统2发生故障. 很明显, 子系统故障能够被成功地隔离出来。

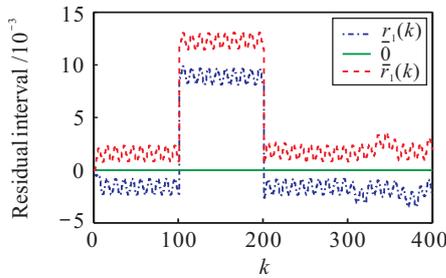


图8 子系统1的残差区间

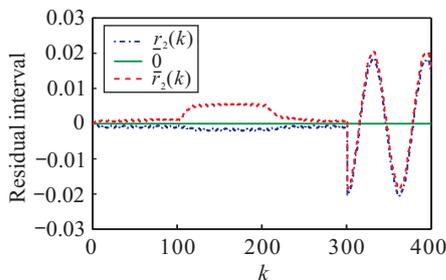


图9 子系统2的残差区间

5 多智能体系统的故障隔离区间观测器设计

近年来, 多智能体系统引起了广泛关注. 这类系统的一个重要的特点是各个智能体之间的相互通

信, 因此, 智能体动态和拓扑图是两个至关重要的因素. 正是由于通信的存在, 当每个智能体发生故障时, 其作用将会传播给其他智能体, 影响无故障智能体的运行, 从而使得整个智能体无法完成任务, 甚至导致灾难性的事故. 因此, 为了保证完成任务和提高安全性, 多智能体系统的故障隔离备受关注. 但是, 由于系统本身的复杂性, 故障隔离问题也是一个巨大的挑战. 最近, 文献[56-57]针对多智能体系统提出了分布式故障检测与隔离滤波器, 故障隔离被转化成一个优化问题. 但是, 上述文献没有考虑由输入引入的通信信息. 文献[58]针对网络多机器人系统提出了基于观测器的分布式故障检测与隔离机制, 并且基于残差动态的解析解设计了自适应阈值. 文献[59-60]针对二阶多智能体系统设计了基于未知输入观测器的故障检测与隔离机制. 进一步, 文献[61]设计了高阶智能体系统的故障隔离未知输入观测器. 然而, 匹配条件限制了该方法的应用。

文献[62]针对离散多智能体系统, 提出了一种新颖的故障隔离方法. 首先, 为了隔离某个智能体故障, 在其邻居智能体上构造一系列基于邻居相关输出的区间观测器. 整个系统的扰动、每个智能体故障的界以及邻居智能体的输出均被构造成观测器的输入. 因此, 每个智能体都能确定是哪个邻居发生了故障. 然后, 通过引入 l_1 和 H_∞ 性能提高了残差区间的鲁棒性和对故障的敏感性. 同时, 通过引入松弛变量使得系统矩阵与 Lyapunov 矩阵解耦. 正因为如此, 误差动态的非负性可以在避免对 Lyapunov 矩阵做结构限制的前提下得到保证. 从而, 观测器可以通过同时

求解一系列LMI条件而得到. 最后,当零值被包含在某一残差区间内,而在其他区间之外时,故障被成功地隔离出来.

对于多智能体系统而言,阈值设定仍然是至关重要的,并且是一个具有挑战性的问题. 文献[62]针对特定的智能体设计了区间观测器,其中,将可能发生的故障信号的界构造观测器的一项. 当区间观测器匹配上此智能体故障时,零值将保持在区间之内;当发生不匹配故障时,零值将在残差区间之外. 不同于上述多智能体系统的故障诊断结果,文献[62]所提出的区间观测器不但能产生残差信号,而且能直接给出阈值. 因此,该方法在不需要设计残差评价函数和阈值的情况下就能达到故障隔离的效果.

5.1 智能体动态

考虑由 N 个智能体构成的系统,第 i 个智能体动态如下:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \hat{A}x_i(k) + \hat{B}u_i(k) + \hat{D}\omega_i(k) + \hat{E}f_i(k), \\ y_i(k) &= \hat{C}x_i(k). \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $x_i(k) \in \mathbf{R}^n, u_i(k) \in \mathbf{R}^m, y_i(k) \in \mathbf{R}^q$ 分别为状态、输入和输出向量; $\omega_i(k) \in \mathbf{R}^p$ 表示上下界已知的外部扰动, $f_i(k) \in \mathbf{R}^s$ 表示故障信号, $s \leq q < n$; $\hat{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}, \hat{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}, \hat{D} \in \mathbf{R}^{n \times p}, \hat{E} \in \mathbf{R}^{n \times s}, \hat{C} \in \mathbf{R}^{q \times n}$ 为已知的常数矩阵. 不失一般性,假设矩阵 \hat{E} 是列满秩的, $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ 是可镇定可观测的,并且假设只有一个智能体发生故障.

假设3 存在已知的界函数 $\underline{f}_i(k) \in \mathbf{R}^s, \bar{f}_i(k) \in \mathbf{R}^s$ 使得

$$|f_i(k)| \preceq \bar{f}_i(k). \quad (17)$$

类似于文献[54]和文献[63],不等式(17)描述了一类上下界已知的故障信号,且 $\underline{f}_i(k) = -\bar{f}_i(k)$.

首先,针对多智能体系统设计如下的输出反馈控制器:

$$\begin{aligned} u_i(k) &= K \sum_{j=1}^N a_{ij}(y_i(k) - y_j(k)), \\ i &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (18)$$

将式(18)代入(16)中,得到如下闭环动态:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \hat{A}x_i(k) + \hat{B}K\hat{C} \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i(k) - x_j(k)) + \hat{D}\omega_i(k) + \hat{E}f_i(k), \\ y_i(k) &= \hat{C}x_i(k). \end{aligned} \quad (19)$$

进而,整个闭环多智能体系统可以表示为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + D\omega(k) + Ef(k), \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1^T(k), x_2^T(k), \dots, x_N^T(k)]^T \in \mathbf{R}^{Nn}, \\ y(k) &= [y_1^T(k), y_2^T(k), \dots, y_N^T(k)]^T \in \mathbf{R}^{Nq}, \\ \omega(k) &= [\omega_1^T(k), \omega_2^T(k), \dots, \omega_N^T(k)]^T \in \mathbf{R}^{Np}, \\ f(k) &= [f_1^T(k), f_2^T(k), \dots, f_N^T(k)]^T \in \mathbf{R}^{Ns}, \\ A &= I_N \otimes \hat{A} + \mathcal{L} \otimes \hat{B}K\hat{C}, \\ D &= I_N \otimes \hat{D}, E = I_N \otimes \hat{E}, C = I_N \otimes \hat{C}. \end{aligned}$$

不同于单系统故障隔离方法,对于多智能体而言,智能体间的相互作用是不得不考虑的问题,因此,必须考虑控制输入的作用. 与已有的多智能体相关的故障检测与隔离结果相比,例如文献[56-57],文献[62]首先设计了控制器,从而充分考虑了智能体间的相互通信. 与文献[59]和文献[61]相比,文献[62]中假设只有输出信息是可用的.

5.2 基于邻居相关输出的区间观测器

多智能体系统(20)可被重新描述为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + D\omega(k) + E_{-i}f_{-i}(k) + E_i f_i(k), \\ Y_p(k) &= W_p y(k), p \in \mathcal{N}_i. \end{aligned} \quad (21)$$

其中: $f_{-i}(k)$ 是除去 $f_i(k)$ 的其他故障信号构成的向量; E_i 是由矩阵 E 的第 $(i-1)s+1$ 列到第 is 列构成的矩阵; E_{-i} 是由矩阵 E 除去 E_i 剩余的列构成; $Y_p(k) \in \mathbf{R}^{|\mathcal{N}_p|q}$ 是智能体 p 可用的输出信息; $W_p = W \otimes I_q$ 且 $W \in \mathbf{R}^{|\mathcal{N}_p| \times N}, \mathcal{N}_p = \mathcal{N}_p \cup \{p\}, |\mathcal{N}_p|$ 为集 \mathcal{N}_p 的基数.

基于动态(21),在智能体 p 上构造如下基于其邻居 i 相关输出的区间观测器:

$$\begin{aligned} \underline{x}_i^p(k+1) &= (A - \underline{L}_i^p W_p C) \underline{x}_i^p(k) + \underline{L}_i^p W_p y(k) - \underline{F}_i^p (\bar{x}_i^p(k) - \underline{x}_i^p(k)) + D^+ \underline{\omega}(k) - D^- \bar{\omega}(k) + E_i^+ \underline{f}_i(k) - E_i^- \bar{f}_i(k), \\ \bar{x}_i^p(k+1) &= (A - \bar{L}_i^p W_p C) \bar{x}_i^p(k) + \bar{L}_i^p W_p y(k) + \bar{F}_i^p (\bar{x}_i^p(k) - \underline{x}_i^p(k)) + D^+ \bar{\omega}(k) - D^- \underline{\omega}(k) + E_i^+ \bar{f}_i(k) - E_i^- \underline{f}_i(k), \\ \underline{Y}_i^p(k) &= (W_p C)^+ \underline{x}_i^p(k) - (W_p C)^- \bar{x}_i^p(k), \\ \bar{Y}_i^p(k) &= (W_p C)^+ \bar{x}_i^p(k) - (W_p C)^- \underline{x}_i^p(k). \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $\bar{x}_i^p(k) \in \mathbf{R}^{N^n}$ 和 $\underline{x}_i^p(k) \in \mathbf{R}^{N^n}$ 为整个系统状态 $x(k)$ 的上下界估计; $\bar{Y}_i^p(k) \in \mathbf{R}^{|\mathcal{N}_p|q}$ 和 $\underline{Y}_i^p(k) \in \mathbf{R}^{|\mathcal{N}_p|q}$ 为 $Y_p(k)$ 的上下界估计.

对于多智能体系统(21),在智能体 p 上设计的区间观测器(22)可以用于隔离发生在其邻居 i 上的故障. 以下将分两种情况讨论:

1) 当 $f_i(k)$ 发生时,在假设只有一个故障发生的前提下,可得 $f_{-i}(k) = 0$,如果设计观测器矩阵使得误差系统是非负的,则这种情况下的主要目标是:当发生匹配故障时,提高残差区间的鲁棒性.

2) 当 $f_j(k) (j \neq i)$ 发生时,在假设只有一个故障发生的前提下,可得 $f_i(k) = 0, f_{-i}(k) \neq 0$,故障信号 $f_j(k)$ 被包括在 $f_{-i}(k)$ 中. 此时即使误差系统矩阵是

非负的,误差动态的非负性仍不能得以保证. 这种情况下的主要目标是:当不匹配故障发生时,提高残差区间的不匹配程度.

由于通信的存在,多智能体系统的故障隔离问题比较复杂. 当某一智能体发生故障时,其影响将传播到其他智能体,使无故障智能体的运行不正常. 区间观测器(22),一方面使得匹配故障包容在区间内,另一方面,不匹配故障被排除在区间之外. 进一步,引入 l_1 和 H_∞ 性能指标能够使残差区间鲁棒性和对故障的敏感性增加. 基于上述分析,在智能体 $p \in \mathcal{N}_i$ 上设计的区间观测器(22)可以用于隔离 $f_i(k)$. 详细的故障隔离方案描述如图10所示,相应的故障隔离决策方案如下:

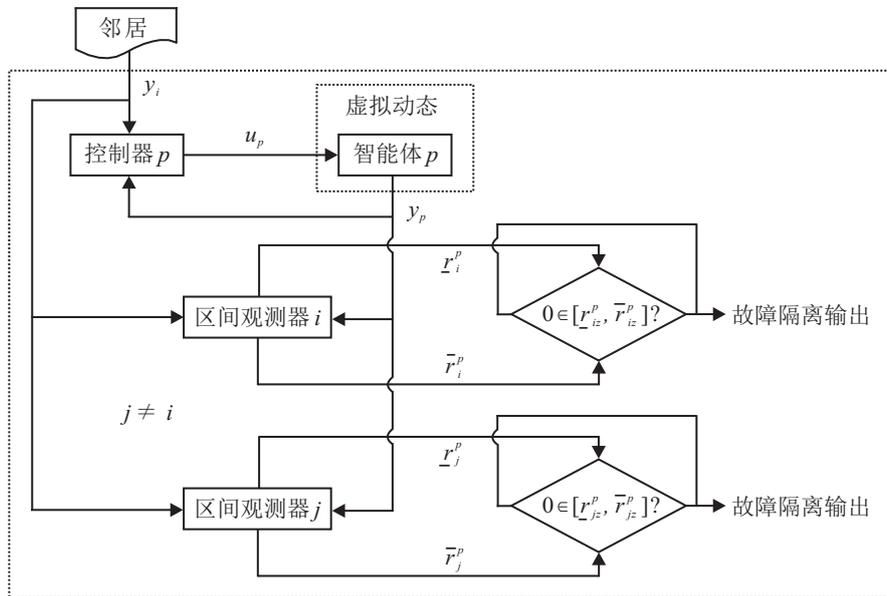


图10 基于区间观测器的多智能体故障隔离方案

如果以下两个条件成立,则报警:

- 1) $0 \in [r_{iz}^p(k), \bar{r}_{iz}^p(k)], \forall z = 1, 2, \dots, |\bar{\mathcal{N}}_p|q;$
- 2) 至少有一个残差区间满足

$$0 \notin [r_{jz}^p(k), \bar{r}_{jz}^p(k)], \forall j \neq i.$$

以图11所示通信图为例,假设 $p = 2, i = 4$,即假设故障 $f_4(k)$ 发生. 为了隔离此故障,在智能体2上设计基于邻居相关输出的区间观测器. 图12~图14给出了在智能体2上相对于其邻居1、3、4产生的

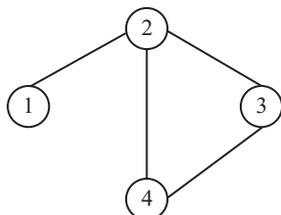


图11 通信图

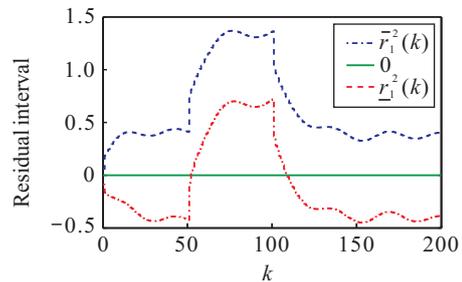


图12 在智能体2上相对于其邻居1产生的残差区间

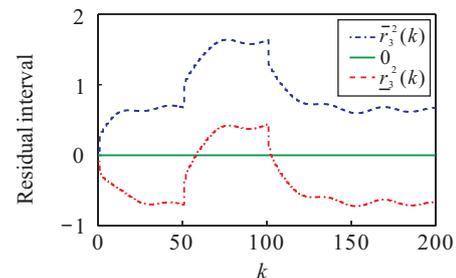


图13 在智能体2上相对于其邻居3产生的残差区间

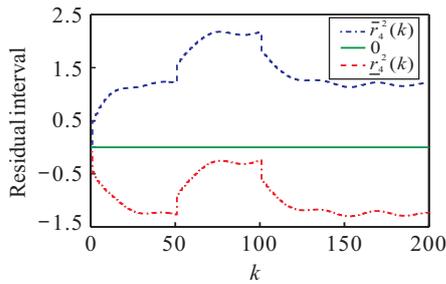


图 14 在智能体2上相对于其邻居4产生的残差区间

残差区间. 由图 14 可以看出 $0 \in [r_4^2(k), \bar{r}_4^2(k)]$. 但是, 在 $51 \leq k \leq 101$ 时, 由图 12 和图 13 可以看出, $0 \notin [r_4^2(k), \bar{r}_4^2(k)]$ 且 $0 \notin [r_3^2(k), \bar{r}_3^2(k)]$, 由此判断智能体 4 发生故障. 即智能体 4 发生的故障能够成功地被其邻居 2 隔离出来.

6 结论与展望

自 1971 年 Beard 提出故障检测的概念以来, 故障诊断技术作为提高系统安全性和可靠性的重要手段日益引起人们的重视, 近 40 年来涌现了大量研究成果. 特别地, 基于状态估计的故障诊断方法迅猛发展, 该方法的主要任务是产生残差以及计算残差评价函数和阈值. 观测器作为一种有效的残差产生器备受瞩目. 此外, 针对复杂系统的故障检测与隔离阈值的设计也成为了研究热点. 所幸的是, 区间观测器的发展为故障检测与隔离提供了一种简洁直观的方法. 以区间观测器所产生的残差区间与零值之间的关系作为故障检测与隔离决策的依据, 使得基于区间观测器的方法在不需要设计残差评价函数和阈值的情况下就能够达到检测与隔离的目的. 但是, 目前针对区间观测器的理论研究正处于起步阶段, 基于区间观测器的故障诊断方法尚不成熟. 尽管已有文献针对线性系统、线性参数变化系统、T-S 模糊互联系统以及多智能体系统研究了基于区间观测器的故障检测与隔离问题, 并给出了更为宽松、有效的设计条件, 但是, 还有很多需要完善之处和亟待解决的问题, 例如:

1) 带有输出量化系统的故障检测与隔离问题.

在经典的观测器设计与故障诊断理论研究中, 通常假设系统的输出能够直接传送到观测器端. 这种方式难免会存在浪费通信和计算资源的弊端. 因此, 在数字化、网络化和智能化的现代故障检测系统中, 信息量化是不可或缺的一个环节. 如何针对带有输出量化系统设计基于区间观测器的故障检测与隔离机制是一个值得研究的问题.

2) 基于数据的故障检测与隔离问题.

本文所提基于区间观测器的故障检测与隔离方

法是基于模型的方法, 即在模型已知的情况下设计的策略. 然而, 一些现代大型复杂化工业过程无法依靠传统方法建立精确的物理模型, 同时, 这类系统会产生大量反映过程运行机理和运行状态的数据, 因此, 如何利用这些数据来提高系统可靠性成为了亟待解决的问题. 如何将本文中的区间思想与基于数据的检测与隔离方法相融合是下一步重点研究内容.

3) 基于区间观测器的容错控制问题.

实际工程系统设计过程中, 在及时将故障检测与隔离出来的基础上, 还需保证系统稳定且使得闭环系统具有较理想的性能. 针对线性系统及非线性系统, 如何设计基于区间观测器故障诊断信息的容错控制器是值得考虑的课题.

参考文献(References)

- [1] Beard R V. Failure accommodation in linear systems through selfreorganization[D]. Cambridge: Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [2] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms, and tools[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 3-11.
- [3] Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, et al. A review of process fault detection and diagnosis, Part I: Quantitative model-based methods[J]. Computer and Chemical Engineering, 2003, 27(3): 293-311.
- [4] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 5-10. (Zhou D H, Ye Y Z. Modern fault diagnosis and fault tolerant control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 5-10.)
- [5] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. London: Kluwer, 1999: 1-22.
- [6] 杨光红, 王恒, 李霄剑. 基于模型的线性控制系统故障检测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-35. (Yang G H, Wang H, Li X J. Model based fault detection of linear control system[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-35.)
- [7] Liu J, Wang J L, Yang G H. An LMI approach to minimum sensitivity analysis with application to fault detection[J]. Automatica, 2005, 41(11): 1995-2004.
- [8] Wang J L, Yang G H, Liu J. An LMI approach to H_2 -index and mixed H_2/H_∞ fault detection observer design[J]. Automatica, 2007, 43(9): 1656-1665.
- [9] Li X B, Zhou K M. A time domain approach to robust fault detection of linear time-varying systems[J]. Automatica, 2009, 45(1): 94-102.
- [10] Wang H, Yang G H. A finite frequency domain approach to fault detection for linear discrete-time systems[J]. Int J of Control, 2008, 81(7): 1162-1171.
- [11] Yang G H, Wang H. Fault detection for a class of uncertain

- state-feedback control systems[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2010, 18(1): 201-212.
- [12] Long Y, Yang G H. Fault detection in finite frequency domain for networked control systems with missing measurements[J]. *J of the Franklin Institute*, 2013, 350(9): 2605-2626.
- [13] Li X J, Yang G H. Fault detection and isolation for uncertain closed-loop systems based on adaptive and switching approaches[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(13): 2916-2937.
- [14] Zhong G X, Yang G H. Fault detection for uncertain switched systems with time-varying delays[J]. *J of the Franklin Institute*, 2015, 352(4): 1455-1475.
- [15] Shi Z, Gu F, Lennox B, et al. The development of an adaptive threshold for model-based fault detection of a nonlinear electro-hydraulic system[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(11): 1357-1367.
- [16] Saijai J, Ding S X, Abdo A, et al. Threshold computation for fault detection in linear discrete-time Markov jump systems[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2014, 28(11): 1106-1127.
- [17] Johansson A, Bask M, Norlander T. Dynamic threshold generators for robust fault detection in linear systems with parameter uncertainty[J]. *Automatica*, 2006, 42(7): 1095-1106.
- [18] Khan A Q, Ding S X. Threshold computation for fault detection in a class of discrete-time nonlinear systems[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2011, 25(5): 407-429.
- [19] Luenberger D G. Observing the state of a linear system[J]. *IEEE Trans on Military Electronics*, 1964, 8(1): 74-80.
- [20] Gouze J L, Rapaport A, Hadj Sadok M Z. Interval observers for uncertain biological systems[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 133(1): 45-56.
- [21] Mazenc F, Dinh T N, Niculescu S I. Interval observers for discrete-time systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(17): 2867-2890.
- [22] Mazenc F, Bernard O. Interval observers for linear time-invariant systems with disturbances[J]. *Automatica*, 2011, 47(1): 140-147.
- [23] Mazenc F, Bernard O. Asymptotically stable interval observers for planar systems with complex poles[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2010, 55(2): 523-527.
- [24] Efimov D, Perruquetti W, Raissi T, et al. On interval observer design for time-invariant discrete-time systems[C]. *Proc of the 2013 European Control Conf. Zurich*, 2013: 2651-2656.
- [25] Efimov D, WPerruquetti W, Raissi T, et al. Interval observers for time-varying discrete-time systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(12): 3218-3224.
- [26] Chebotarev S, Efimov D, Raissi T, et al. Interval observers for continuous-time LPV systems with L_1/L_2 performance[J]. *Automatica*, 2015, 58: 82-89.
- [27] Zheng G, Efimov D, Perruquetti W. Design of interval observer for a class of uncertain unobservable nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2016, 63: 167-174.
- [28] Cai X S, Lyu G Y, Zhang W. Stabilisation for a class of non-linear uncertain systems based on interval observers[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(13): 2057-2062.
- [29] He Z W, Xie W. Control of non-linear switched systems with average dwell time: Interval observer-based framework[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(1): 10-16.
- [30] Meseguer J, Puig V, Escobet T. Fault diagnosis using a timed discrete-event approach based on interval observers: Application to sewer networks[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(5): 900-916.
- [31] Tornil-Sin S, Ocampo-Martinez C, Puig V, et al. Robust fault diagnosis of nonlinear systems using interval constraint satisfaction and analytical redundancy relations[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44(1): 18-29.
- [32] Fernandez-Canti R M, Blesa J, Tornil-Sin S, et al. Fault detection and isolation for a wind turbine benchmark using a mixed Bayesian/set-membership approach[J]. *Annual Reviews in Control*, 2015, 40: 59-69.
- [33] Rotondo D, Fernandez-Canti R M, Tornil-Sin S, et al. Robust fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cells using a Takagi-Sugeno interval observer approach[J]. *Int J of Hydrogen Energy*, 2016, 41(4): 2875-2886.
- [34] Wang Y L, Shi P, Lim C C, et al. Event-triggered fault detection filter design for a continuous-time networked control system[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2016, 46(12): 3414-3426.
- [35] Liu J L, Yue D. Event-based fault detection for networked systems with communication delay and nonlinear perturbation[J]. *J of the Franklin Institute*, 2013, 350(9): 2791-2807.
- [36] Li S B, Sauter D, Xu B G. Fault isolation filter for networked control system with event-triggered sampling scheme[J]. *Sensors*, 2011, 11(1): 557-572.
- [37] Hajshirmohamadi S, Davoodi M, Meskin N, et al. Event-triggered fault detection and isolation for discrete-time linear systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(5): 526-533.
- [38] Li H Y, Chen Z R, Wu L G, et al. Event-triggered fault detection of nonlinear networked systems[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2017, 47(4): 1041-1052.
- [39] Zhang Z H, Yang G H. Event-triggered fault detection for a class of discrete-time linear systems using interval observers[J]. *ISA Trans*, 2017, 68: 160-169.
- [40] Grenaille S, Henry D, Zolghadri A. A method for designing fault diagnosis filters for LPV polytopic systems[J]. *J of Control Science and Engineering*, 2008,

- 2008: 1-11.
- [41] Henry D. Structured fault detection filters for LPV systems modeled in an LFR manner[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012, 26(3): 190-207.
- [42] Hamdi H, Rodrigues M, Mechmeche C, et al. Fault detection and isolation in linear parameter-varying descriptor systems via proportional integral observer[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012, 26(3): 224-240.
- [43] Wei X K, Verhaegen M. LMI solutions to the mixed H_2/H_∞ fault detection observer design for linear parameter-varying systems[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2011, 25(2): 114-136.
- [44] Zhang Z H, Yang G H. Fault detection for discrete-time LPV systems using interval observers[J]. *Int J of Systems Science*, 2017, 48(14): 2921-2935.
- [45] Wang H M, Ye D, Yang G H. Actuator fault diagnosis for uncertain T-S fuzzy systems with local nonlinear models[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 76(4): 1977-1988.
- [46] Yang G H, Wang H M. Fault detection and isolation for a class of uncertain state-feedback fuzzy control systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2015, 23(1): 139-151.
- [47] Li X J, Yang G H. Fault detection for T-S fuzzy systems with unknown membership functions[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2014, 22(1): 139-152.
- [48] Li X J, Yang G H. Fault detection in finite frequency domain for Takagi-Sugeno fuzzy systems with sensor faults[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2014, 44(8): 1446-1458.
- [49] Wang H M, Yang G H, Ye D. Fault detection and isolation for affine fuzzy systems with sensor faults[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2016, 24(5): 1058-1071.
- [50] Keliris C, Polycarpou M M, Parisini T. A distributed fault detection filtering approach for a class of interconnected continuous-time nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2013, 58(8): 2032-2047.
- [51] Keliris C, Polycarpou M M, Parisini T. A robust nonlinear observer-based approach for distributed fault detection of input-output interconnected systems[J]. *Automatica*, 2015, 53: 408-415.
- [52] Boem F, Ferrari R M G, Parisini T, et al. Distributed fault diagnosis for continuous-time nonlinear systems: The input-output case[J]. *Annual Reviews in Control*, 2013, 37(1): 163-169.
- [53] Wang H M, Yang G H. Decentralized fault detection for affine T-S fuzzy large-scale systems with quantized measurements[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, DOI: 10.1109/TFUZZ.2017.2724019.
- [54] Wang H M, Yang G H. Decentralized state feedback control of uncertain affine fuzzy large-scale systems with unknown interconnections[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2016, 24(5): 1134-1146.
- [55] Zhang Z H, Yang G H. Interval observer-based fault isolation for discrete-time fuzzy interconnected systems with unknown interconnections[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2017, 47(9): 2413-2424.
- [56] Davoodi M R, Khorasani K, Talebi H A, et al. Distributed fault detection and isolation filter design for a network of heterogeneous multiagent systems[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2014, 22(3): 1061-1069.
- [57] Chadli M, Davoodi M, Meskin N. Distributed state estimation, fault detection and isolation filter design for heterogeneous multi-agent linear parameter-varying systems[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 11(2): 254-262.
- [58] Arrichiello F, Marino A, Pierri F. Observer-based decentralized fault detection and isolation strategy for networked multirobot systems[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1465-1476.
- [59] Shames I, Teixeira A M H, Sandberg H, et al. Distributed fault detection for interconnected second-order systems[J]. *Automatica*, 2011, 47(12): 2757-2764.
- [60] Shi J T, He X, Wang Z D, et al. Distributed fault detection for a class of second-order multi-agent systems: An optimal robust observer approach[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2014, 8(12): 1032-1044.
- [61] Liu X H, Gao X W, Han J. Observer-based fault detection for high-order nonlinear multi-agent systems[J]. *J of the Franklin Institute*, 2016, 353(1): 72-94.
- [62] Zhang Z H, Yang G H. Distributed Fault detection and isolation for multi-agent systems: An interval observer approach[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, Accepted.
- [63] Ma H J, Yang G H. Adaptive logic-based switching fault-tolerant controller design for nonlinear uncertain systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(4): 404-428.

(责任编辑: 李君玲)