

基于模型的网络控制系统故障诊断综述

文利燕, 彭 晨, 裴灵犀

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对网络化控制系统存在随机时延、丢包、异步等问题, 在分析网络控制系统不同数学模型基础上, 详细介绍了故障诊断与容错控制的常用方法: 即基于信息调度模型的方法、基于时延模型的方法、基于 T-S 模糊模型的方法. 并相应地分析了每种方法的原理及其优、缺点. 另外, 还对近年来常用方法的最新发展结果进行了总结分析. 最后指出该领域有待进一步研究的若干问题和发展趋势.

[关键词] 网络控制系统, 故障诊断, 信息调度, 时延, T-S 模糊

[中图分类号] TP277 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)01-0039-06

Overview on Fault Diagnosis of Networked Control System Based on the Models

Wen Liyan, Peng Chen, Pei Lingxi

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The network-induced delay, packet dropout, asynchronous and other peculiarities of networked control systems (NCS) may degrade the performance of closed-loop systems. We have to develop new theory and techniques for control systems that operate through data network. This paper reviews the main ideas and results on fault diagnosis of NCS, including the fault diagnosis for NCS with information scheduling, fault diagnosis approaches based on the simplified time-delay system models, and the T-S fuzzy model. The further problems to be studied in this field and the development trends are also proposed.

Key words: NCS, fault diagnosis, information scheduling, time-delay, T-S fuzzy

随着计算机网络的广泛使用和网络技术的不断发展, 控制系统的结构正在发生变化. 传统的点对点连接方式转化为网络连接方式, 由分布式控制系统取代独立控制系统. 众多传感器、执行器和控制器等系统的主要功能部件通过网络相连接, 相关的信号和数据通过通信网络进行传输和交换, 避免了彼此间专线的敷设, 实现资源共享、远程操作和控制, 提高系统的诊断能力、方便安装与维护, 并能有效减少系统的重量和体积、增加系统的灵活性和可靠性^[1]. 将控制系统中至少有一个或者多个回路经过计算机网络实现闭环的控制称为网络化控制系统 NCS(Networked Control Systems)^[2].

网络化控制系统的故障诊断与容错控制不同于传统控制系统, 由于数据传输中存在网络带宽限制和信息碰撞等, 很多情况下会使得信息的传输不可避免地存在延迟和丢包的问题, 这就使得网络化控制系统的故障诊断与容错控制比一般的控制系统更为复杂^[3]. 所以网络化控制系统的故障诊断与容错控制是一个非常有理论意义和现实意义的研究课题.

从不同的角度考虑问题, 可以建立不同的 NCS 数学模型. 而在不同的 NCS 模型下, 研究网络控制系统的故障诊断和容错控制方法是不同的. 下面分别介绍 NCS 基于信息调度模型的方法、基于时延模型的方法以及基于 T-S 模糊模型的方法. 同时介绍了状态估计法、等价空间法、信号处理方法、矩阵结构方法和神经网络法基于时延模型的故障诊断方法. 并提出需进一步研究的问题.

收稿日期: 2010-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60704024).

通讯联系人: 彭 晨, 博士, 教授, 研究方向: 网络控制系统和鲁棒控制. E-mail: 63050@njnu.edu.cn

由于篇幅限制,基于数据包丢失和网络通信限制的故障诊断的最新结论和方法,这里不再给出相应综述.

1 基于信息调度模型的方法

当控制系统是多输入多输出系统或者是多个线性子系统耦合而成的大系统时,为了能充分利用有限的网络带宽资源又能保证闭环系统的稳定性,需设计信息的调度方法,在最大限度地降低网络拥塞的同时又最大限度的降低信息丢失对控制系统的影响.为了对这种具有信息调度机制的网络化控制系统进行容错控制研究,需要先构造系统的数学模型^[4,5].

在有通信约束的情形下,如图 1 所示, G 表示控制系统对象; S 和 H 分别表示采样器和保持器; S_c 为信息调度方法框图. \bar{y}_k 、 \bar{u}_k 、 y_k 和 u_k 分别表示系统的输出信号、系统输入信号、控制器输入信号和控制器输出信号,他们均为离散时间信号.

通过重构系统模型 G 和调度模型 S_c ,可以得到系统信息调度模型 $G _ S_c$.对系统 G 采用不同的信息调度方式,可以获取不同的信息调度模型.文献^[6]中构造的信息调度模型只是其中的一种.

基于建立的系统模型,可以对系统进行相应的故障诊断与容错控制研究.通过构造状态观测器和滤波器等,获得残差函数,从而实现系统的故障诊断.也可以将其他的许多传统的故障诊断和容错控制方法扩展到相应的 NCS 控制系统.

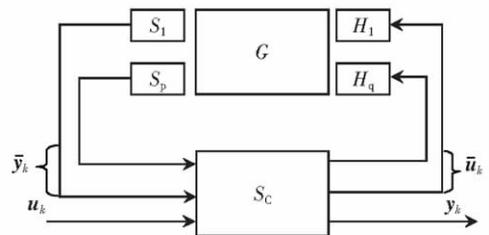


图 1 控制系统信息调度框图

Fig.1 NCS with information-scheduling

2 基于时延模型的方法

通过数据网络传输控制信息时,通常会产生网络诱导时延.采用不同的网络协议会使时延具有不同的性质.下面分 6 部分介绍基于时延模型的 NCS 系统的故障诊断与容错控制方法.即:状态估计法、等价空间法、信号处理法、矩阵结构法、神经网络法以及其他的常用方法.

2.1 基于状态估计的方法

与传统的控制系统一样,网络控制系统的状态也直接反映了系统运行状况,因此基于状态估计的故障诊断与容错控制方法在 NCS 系统中也尤为重要.基于状态估计的方法通常可以归纳为两种:基于滤波器的方法和基于观测器的方法.

近年来关于该方面的研究有很多,文献^[7]假定网络诱导时延为随机的,将故障过程和检测过程看作是不同的马尔可夫时变过程,建立故障隔离滤波器.文献^[8]中基于多率采样和增广矩阵方法,将具有随机长时延的 NCS 建模为马尔可夫跳变系统,并利用 Riccati 方程对系统鲁棒性分析,并设计了 H_∞ 滤波器.考虑到自由多状态时延系统,文献^[9]基于文献^[6]中马尔可夫系统的有界实引理,研究了一类具有随机时延和随机丢包的离散时间 NCS 的故障检测问题,其所期望的故障检测滤波器存在的充分条件由一组线性矩阵不等式(LMIs)给出.文献^[10]中将具有不同网络诱导时延的 NCS 建模为 T-S 模型,然后提出了基于奇偶方程和模糊观测器故障检测的方法.在很多文献中还经常看到鲁棒故障检测观测器方法,数据驱动 Kalman 滤波器、滑模观测器法、自适应观测器相结合等方法.

关于该问题的研究成果已有很多,但是对于具有非理想网络状况的网络控制系统的故障检测与容错控制问题,例如网络诱导时延、数据包丢失等,都还没有一个统一的架构.因此,文献^[11]中就提出了具有非理想网络状况的线性时不变网络系统的故障检测和容错控制以及稳定性的有关问题,基于马尔可夫跳变系统的有界实引理,利用线性矩阵不等式设计了 H_∞ 滤波器.文献^[11]与之前的方法比,其最突出的优点就是更具一般性,更加符合实际系统的要求.文献^[12]中为了增强故障检测系统的鲁棒性,通过设定阈值,研究了基于观测器的故障检测问题.

以上方法大都基于马尔可夫链概率转移矩阵(TPM),然而这一矩阵的获得是非常困难的,因此学者加强了关于网络控制系统通信网络统计特性的研究.目前关于通信网络统计特性的文献并不多见.文献^[9]均假设通信网络的时延在上下界之间满足均匀分布.但是近年来的研究表明 NCS 的网络诱导时延并

不是均匀分布的^[14],而且具有多重分性^[14,15].文献[16]提出一种新的方法,即考虑网络控制系统时延的非均匀分布和多重分性,从而对系统进行分析与研究.

2.2 基于等价空间的方法

等价空间组成元素为等价向量,等价空间残差生成方法可以直接应用到传感器和执行器故障中而不需要功能部件的先验知识^[17].此方法的关键是通过在一定长度的窗口内收集批量输入和测量输出数据,从而构造一个残差生成器.

随着网络控制系统的迅速发展,人们越来越关注网络控制系统故障诊断与容错控制方面的研究.但是,在 NCS 中基于等价空间的故障检测与容错控制研究并不多见.文献[18]通过选择最优测量数据,研究了分散 NCS 的等价空间故障检测问题.文献[19]中研究了一类线性离散时变系统等价空间的故障估计问题.文献[15]研究一类离散时延系统的等价空间的故障分离问题,尽管文献[19]并不是针对 NCS 系统研究的,但是由于 NCS 系统在一定的假设条件下,可以建模为离散时延系统等,因此我们可以将相应的等价空间的方法与结论推广到 NCS 系统.同样文献[20]研究的等价空间法在 T-S 模糊模型故障估计中的应用也可以推广使用.

如果系统残差对未知输入可实现全解耦,那么我们可以设计一个最优故障检测系统(PFD).假如这个 PFD 是不可能实现的,那么我们可以将残差生成问题转化为一个最优化的问题.其中一个有效的解决方案就是将空间向量的最优选择变成一个一般的特征根—特征向量的问题.

2.3 基于信号处理的方法

假设网络控制系统的网络诱导时延是随机未知的,并且小于采样周期 h . NCS 描述如下^[21]

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{g}(k) + \bar{\mathbf{B}}_d\mathbf{d}(k) + \bar{\mathbf{B}}_f\mathbf{f}(k), \\ \mathbf{y}(k) &= \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{d} 为 NCS 系统的未知输入; \mathbf{f} 为故障输入. 其中:

$$\mathbf{g}(k) = -\bar{\Gamma}_1\Delta\mathbf{u}(k), \Delta\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-1). \quad (2)$$

式(1)和(2)中,把时延 τ_k 引入到离散模型中的一未知项 $\mathbf{g}(k)$ 中,那么需要设计的故障诊断系统对此不确定项应具有鲁棒性.

对具有时延的 NCS,使用传统的基于残差生成器的等价关系,若等价向量具有低通特性,那么故障检测系统对未知项 $\mathbf{g}(k)$ 具有鲁棒性.但是若其具有高通或者带通特性时,那么 $\mathbf{g}(k)$ 则会影响系统的性能.为了减少时延等不确定性因素对系统性能的影响,文献[21]考虑在系统的残差发生器的后面加一个低通滤波器.

近年来,关于这方面的研究也不少.比如文献[22]中研究了一种新的基于等价空间和平稳小波变换(SWT)的故障检测方法.文献[23]研究了一类具有随机网络诱导时延的 NCS 的故障检测问题.其主要区别在于,前者可以位于任意的频率处,而后者基于 SWT 的后置滤波器被强制位于低频处.关于低通设计的具体结果见文献[22,23].

2.4 基于矩阵结构的方法

由等式(1)和(2)可知,未知输入 $\mathbf{d}(k)$ 和未知项 $\mathbf{g}(k)$ 的最大不同就是 $\mathbf{g}(k)$ 中的未知矩阵 $\bar{\Gamma}_1$,假设 $\mathbf{d}(k)$ 是已知的.并假设将矩阵 $\mathbf{g}(k)$ 转化为已知部分乘以未知部分的形式,其中的已知部分可以从已知的信息中提取(比如矩阵 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \Delta\mathbf{u}_k$),而未知部分是与时延 τ_k 相关的信息.那么我们就可以使用传统的鲁棒故障检测方法来设计残差发生器,其对未知项具有鲁棒性,那么其也对时延 τ_k 具有鲁棒性.因为已知部分与矩阵 $\bar{\mathbf{B}}_d$ 相似,所以可以将已知项称为 $\mathbf{g}(k)$ 项的结构矩阵.几种常用的方法,在文献[25,26]中已分别讨论.

文献[25]中,利用泰勒逼近法,得 $\mathbf{g}(k) \approx \bar{\mathbf{E}}_{\tau,k}\tau_k, \bar{\mathbf{E}}_{\tau,k} = -\mathbf{B}\Delta\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{g}(k)$ 其左边部分 $\bar{\mathbf{E}}_{\tau,k}$ 是已知的结构向量,而右边部分是未知的 τ_k .在文献[24]中,利用特征值分解和 Pade 逼近法,可以得到 $\mathbf{g}(k) \approx \bar{\mathbf{E}}_{\tau,k}\tau_k, \bar{\mathbf{E}}_{\tau,k}$,由证明结果可知道后者方法对未知项的鲁棒性更强.文献[24,25]都是采用将网络诱导时延的不确定项 $\mathbf{g}(k)$ 项通过逼近的方法转化为未知部分 τ_k 和已知部分 $\bar{\mathbf{E}}_{\tau,k}$.而其中都没有涉及到 $\mathbf{d}(k)$ 项.基于此文獻^[21]提出了更加精确的网络诱导时延的结构矩阵.在这种方法中不仅讨论了未知网络诱导时延,还讨论了一般的未知扰动项 $\mathbf{d}(k)$,其采用 Cayley-Hamilton 定理和主元分析方法.该方法相对于前面的两种方法

的优点是充分考虑了网络诱导时延的已知信息. 文献 [27] 中在得到系统时延特征矩阵后, 提出了自适应的故障诊断方法, 但是该方法只适应于时延小于采样周期的情况.

2.5 基于神经网络的方法

基于模型的故障诊断方法对系统模型的精度要求很高, 但在实际的工业过程控制中不可能建立精确的数学模型. 因此定量分析故障诊断方法在实际应用中受到一定限制^[17]. 在传统的控制系统中, 为了解决这一难题, 使得基于知识的故障检测方法得到了迅速发展. 这里主要讨论神经网络在 NCS 故障诊断与容错控制中的应用.

在网络控制系统中, 由于诱导时延具有时变和随机性, 因此很难找到一个合适的采样周期. 针对该问题, 文献 [28] 借助 BP 神经网络预测工具, 进行时延预测, 进而采用以时延为周期的变周期采样方法, 推导出新的无时延网络控制系统模型, 网络控制系统变周期采样方法很大程度上好于固定速率采样. 文献 [29] 通过神经网络路预测补偿了由于网路时延带来的延迟采样值, 从而使网络控制系统的故障检测问题变为传统控制系统的故障检测问题.

尽管神经网络功能强大, 但神经元个数较多、结构较复杂时, 其实现是非常困难的. 故在采用此方法时一定要做好优化问题, 以免造成神经网络结构过于复杂冗余.

2.6 其他方法

在前面的几部分, 一般假设系统的最大时延小于采样周期. 而在实际应用中, 网络诱导时延可能大于采样周期, 有些情况下的长时延会引起系统数据传输的错序等, 从而影响网络控制系统性能, 因此研究具有长时延的 NCS 故障诊断与容错控制问题十分重要.

文献 [30] 提出了一种具有未知诱导时延的 NCS 的故障检测方法, 该未知诱导时延可能大于采样周期 h , 并且采用了文献 [31] 中提出的多故障处理法来处理 NCS 的诱导时延问题. 从另一个角度来看, 文献 [30] 中提出的方法, 也可以视为是多维泰勒逼近法, 即文献 [22] 中一维泰勒逼近法的扩展. 文献 [32] 中提出适用于任意时延的 NCS 的故障检测新方法, 先将不确定性的时变时延转化成不确定性的时变凸多面体问题, 然后利用模型匹配来实现最优残差发生器的设计. 该方法应用了具有参数依赖的 Lyapunov 函数的有界实引理, 大大降低了系统保守性.

目前, NCS 的故障检测与诊断方法主要集中在上述几类方法的研究, 其中, 状态估计、等价空间、矩阵结构方法需要建立较为精确的数学模型, 3 种方法既独立, 又相关, 其多应用在线性系统中, 在非线性系统中的研究则较少. 神经网络可以模拟任何非线性函数以及从样本中进行学习, 其在故障诊断中得到了广泛应用. 基于信号处理的故障诊断方法虽然发展得比较完善, 但对非线性系统的故障诊断的应用还不多, 其中小波变换技术是这种方法中的热点.

3 基于 T-S 模糊模型的方法

近年来, NCSs 的建模、分析与设计一直受到人们的广泛关注. 为了研究网络控制系统的稳定性问题, 已经建立了大量的数学模型: 文献 [33] 建立了 NCSs 的马尔可夫跳变模型, 文献 [10] 建立了 NCSs 的 T-S 模型, 在此模型上采用等价空间方法, 建立了基于模糊观测的故障诊断方法, 相应的基于混合模型的容错控制研究在文献 [34] 中提出. 而在文献 [35, 36] 中将网络控制系统建模为连续模型和混合模型. 大多数的模型都是网络控制系统的线性模型, 而非线性模型并不多见. 这一部分我们介绍非线性系统的相关问题. 在文献 [36] 中建立了非线性网络控制系统的混合数学模型, 其中的连续部分和离散部分分别表示系统对象和控制器. 基于该混合模型的 NCSs 故障诊断和容错控制的研究有很多, 比如文献 [37] 介绍了一类基于离散马尔可夫跳变模型的 NCSs 的 H_∞ 故障检测滤波器的设计问题. 文献 [36-38] 利用欧拉逼近方法将文献 [10] 中的 T-S 模糊模型推广到了非线性系统, 从而得出具有马尔可夫传输延迟的非线性 NCSs 的 T-S 模糊模型, 并在一些几何条件下将 T-S 模糊模型转化为输出状态反馈模型, 从而有利于研究基于观测器的故障诊断问题. 文献 [39] 中提出了一类非线性 NCSs 的故障诊断方法, 首先将具有共享网络的 NCS 系统建模为非线性时变系统, 然后基于该模型设计周期性的通信序列以保证系统的可达性、可观性, 从而可设计一种基于观测器故障诊断方法, 实现具有通信约束系统的故障诊断.

4 总结与展望

本文概述了近年来常用的网络控制系统基于模型的故障诊断方法,其主要思想是将控制系统中存在的网络简化为对控制系统所产生的若干种影响因素,进而建立恰当的数学模型,从而将一般的故障诊断与容错控制理论与方法推广应用到网络控制系统。

NCS 建模所要考虑的因素主要有节点驱动方式、网络时延、噪声扰动、数据包丢失等。节点驱动方式有时钟驱动和事件驱动。网络时延有随机时延、恒定时延、时变时延、有界时延、周期时延或不确定时延。针对不同的驱动方式和时延特性,有着不同的建模方法。网络时延作为网络控制系统必须考虑的因素,研究基于时延模型的故障诊断具有广泛的理论价值和现实意义。信息调度策略是影响时延的重要因素,其可以保证系统实时信息的传输,避免信息传输冲突,从而最大限度地减少时延,目前该方面的研究已得到了广泛重视。实际中的大多数问题都是非线性问题,而该问题的建模、分析等仍然没有得到很好的解决,利用模糊理论研究该问题具有重要意义,另外 NCS 中的不确定长时延问题也可以利用该方法解决。

关于 NCS 故障诊断与容错控制方法有很多,本文只是归纳总结了其中的一部分。相对于一般的控制系统,网络控制系统的故障诊断与容错控制研究还需要进一步完善。首先 NCS 的建模问题,现有模型对网络时滞具有严重的依赖性,而且在非线性系统中难以实现;其次大多数的研究主要针对某一特定性能的设计,而缺少对系统整体设计与总体性能的研究;另外,非线性系统的故障诊断与容错控制的理论研究比较薄弱,现有故障诊断方法在实际应用中的实现还存在很多问题。

[参考文献](References)

- [1] 岳东,彭晨, Han Qinglong. 网络控制系统的分析与综合 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Yue Dong, Peng Chen, Han Qinglong. Analysis and Synthesis of Networked Control System [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Fang Huajing, Ye Hao, Zhong Maiying. Fault diagnosis of networked control systems [J]. Annual Reviews in Control, 2007 (31): 55-68.
- [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 Zhihong, Fang Huajing. Fault-tolerant control of networked control systems with random time-delays [J]. Information and control, 2006, 35(5): 584-587. (in Chinese)
- [4] Nilsson J. Real-time control systems with delays [D]. Sweden: Lund Institute of Technology, 1998.
- [5] Luck R, Ray A. Experimental verification of a delay compensation algorithm for integrated communication and control systems [J]. International Journal of Control, 1994, 59: 1 357-1 372.
- [6] Peter Seiler, Raja Sengupta. A bounded real lemma for jump systems [J]. IEEE Trans Automatic Control, 2003, 48(9): 1 651-1 654.
- [7] Dominique Saulter, Li Shanbin, Aubrun Christopher. Robust fault diagnosis of networked control system [J]. Int J Adapt Control Signal Process, 2009, 23: 722-736.
- [8] Mao Zehui, Jiang Bin, Shi Peng. H_{∞} fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems [J]. IET Control Theory and Application, 2007, 1(5): 1 336-1 343.
- [9] He Xiao, Wang Zidong, Ji Y D, et al. Network-based fault detection for discrete-time state delay systems: a new measurement model [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2008, 22: 510-528.
- [10] Zheng Ying, Fang Huajing, Hua O Wang. Takagi-Sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with Markov delays [J]. IEEE Trans Syst, 2006, 36(4): 924-929.
- [11] Peng Chen, Yue Dong, Tian Engang, et al. Observer-based fault detection for networked control systems with quality of services [J]. Applied Mathematical Modeling, 2010, 34: 1 653-1 661.
- [12] Sauter Dominique, Boukhobza Taha. Robustness against unknown networked induced delays of observer based FDI [J]. Proc IFAC Safe process, 2006, 18(1): 331-336.
- [13] Tipsuwan Y, Chow Moyuen. Gain scheduling middleware: a method logy to enable existing controllers for networked control and teleportation part I: networked control [J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2004, 51(6): 1 218-1 227.
- [14] Tian Yuchu, Yu Zuguo, Fridge Colin. Multifractal nature of network induced time delay in networked control systems [J]. Physics Letters A, 2007, 361(1/2): 103-107.
- [15] Yue Dong, Zhang Yijun, Tian Engang, et al. Delay-distribution-dependent exponential stability criteria for discrete-time recurrent neural networks with stochastic delay [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2009, 19(7): 1 299-1 306.
- [16] Peng Chen, Yue Dong, Yang Jiquan. Delay-distribution-dependent fault detection of networked control systems with stochastic

- quality of services [J]. *International Journal of Systems Science*, 2010, 41(6): 687-697.
- [17] 杜云成, 石红瑞, 杨晓波. 控制系统故障诊断方法综述 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2008(5): 9-13.
Du Yuncheng, Shi Hongrui, Yang Xiaobo. A survey of fault diagnosis methods in control systems [J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2008(5): 9-13. (in Chinese)
- [18] Peng Tao, Ding Steven X, Gui W H, et al. A parity space approach to fault detection for networked control systems via optimal measurement selection [C] // *Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*. Shanghai: IEEE, 2009: 6 694-6 699.
- [19] Zhong Maiying, Ding Steven X, Han Qinglong, et al. Parity space-based fault estimation for linear discrete time-varying systems [J]. Preprint submitted to *IEEE Trans on Automatic Control*, 2010, 55(7): 1 726-1 731.
- [20] Nguang Singking, Zhang Ping, Ding Steven X. Parity relation based fault estimation for nonlinear systems: an LMI approach [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2007, 4(2): 164-168.
- [21] Ye Hao, He Rui, Liu Heng, et al. A new approach for fault detection of networked control systems [J]. *Journal of System Identification*, 2006, 14: 654-659.
- [22] Ye Hao, Wang Guizeng, Ding Steven X. A new parity space approach for fault detection based on stationary wavelet transform [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(2): 281-287.
- [23] Ye Hao, Wang Yongqiang. Application of parity relation and stationary wavelet transform to fault detection of networked control systems [C] // *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore: IEEE, 2006.
- [24] Wang Yongqiang, Ye Hao, Cheng Yue, et al. Fault detection of NCS based on eigendecomposition and Pade approximation [C] // *Supervision and Safety of Technical Processes 2006*. Beijing: IEEE, 2007.
- [25] Ye Hao, Ding Steven X. Fault detection of networked control systems with network-induced delay [C] // *Proceedings of the 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Kunming: IEEE, 2004.
- [26] 霍志红. 网络化控制系统容错控制研究 [D]. 武汉: 华中科技大学控制科学与工程系, 2006: 1-125.
Huo Zhihong. Research on fault-tolerant control for networked control systems [D]. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2006: 1-125. (in Chinese)
- [27] Wang Yongqiang, Ye Hao, Wang Guizeng. Fault detection of NCS based on eigendecomposition [J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(12): 1 903-1 911.
- [28] 刘建刚, 刘碧玉, 李美兰. 一类新的基于神经网络预测的变周期网络控制系统采样方案 [J]. *佳木斯大学学报: 自然科学版*, 2009, 27(3): 356-358.
Lui Jiangan, Liu Biyu, Li Meilan. A new variable-period sampling scheme for networked control systems with random time delay based on BP neural network prediction [J]. *Journal of Jiamusi University: Nature Science Edition*, 2009, 27(3): 356-358. (in Chinese)
- [29] 张捷, 薄煜明, 吕明. 基于神经网络预测的网络控制系统故障检测 [J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(1): 19-24.
Zhang Jie, Bo Yu Ming, Lu Ming. Fault detection of networked control systems based on neural network prediction [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2010, 34(1): 19-24. (in Chinese)
- [30] Wang Yongqiang, Ye Hao, Wang Guizeng. A new method for fault detection of networked control systems [C] // *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore: IEEE, 2006.
- [31] Gertler J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems* [M]. New York: Marcel Dekker, 1998.
- [32] Wang Yongqiang, Ding Steven X, Ye Hao, et al. A new fault detection scheme for networked control systems subject to uncertain time-varying delay [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(10): 5 258-5 268.
- [33] Xia Y Q, Zhu Z, Mahmoud M S. H_2 control for networked control systems with Markovian data losses and delays [J]. *ICIC Express Letters*, 2009, 3(3): 271-276.
- [34] Mao Zehui, Jiang Bin. Fault identification and fault-tolerant control for a class of networked control systems [J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2007, 3(5): 1 121-1 130.
- [35] Wang Yan, Sun Zengqi. H_∞ Control of networked control system via LMI approach [J]. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2007, 3(2): 343-352.
- [36] Mao Zehui, Jiang Bin, Shi Peng. Fault detection for a class of nonlinear networked control systems [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2010, 24(7): 610-622.
- [37] Mao Zehui, Jiang Bin, Shi Peng. H_∞ Fault detection filter design for networked control systems modeled by discrete Markovian jump systems [J]. *IET Control Theory and Application*, 2007, 1(5): 1 336-1 343.
- [38] Mao Zehui, Jiang Bin, Ding Steven X. A fault-tolerant control framework for a class of non-linear networked control systems [J]. *International Journal of Systems Science*, 2009, 40(5): 449-460.
- [39] Mao Zehui, Jiang Bin, Shi Peng. Protocol and fault detection design for nonlinear networked control systems [J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems (II: Express Briefs, March)*, 2009, 56(3): 255-259.

[责任编辑: 刘 健]