

# Review of Network Fault Tolerant Switching Control System

Yiwei Feng, Yuanbo Yang

College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu  
Email: ywfeng@yeah.net, yuanboyng@yeah.net

Received: Aug. 1<sup>st</sup>, 2017; accepted: Aug. 25<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In this paper, we briefly review the problems and development status of network fault tolerant control systems, and the main characteristics and problems of network fault tolerant control system. Then, the development status of network fault tolerant control system is discussed from aspects of stability analysis, controller design and so on, and the switching network fault tolerant control system is discussed emphatically. Finally, some problems and difficulties in the field are pointed out.

## Keywords

Network Fault Tolerant Switching Control, Stability Analysis, Fault Diagnosis, Controller Design

---

# 网络容错切换控制系统研究综述

冯宜伟, 杨渊博

兰州理工大学电气工程与信息学院, 甘肃 兰州  
Email: ywfeng@yeah.net, yuanboyng@yeah.net

收稿日期: 2017年8月1日; 录用日期: 2017年8月25日; 发布日期: 2017年8月30日

---

## 摘要

本文简要回顾了网络容错控制系统相关的问题和发展现状, 以及网络容错控制系统的主要特点和存在的问题。然后, 从网络容错控制系统的稳定性分析、控制器设计等不同侧面讨论了网络容错控制系统发展的现状, 重点讨论了网络容错切换控制系统。最后, 指出了该领域亟待解决的一些热点与难点问题及其未来的发展愿景。

## 关键词

网络容错切换控制, 稳定性分析, 故障诊断与检测, 控制器的设计

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

早在 20 世纪 90 年代, 网络控制系统(Network Control System, 简记为 NCS)的概念开始引起学术研究者的注意, 从那时起已经产生了大量的理论工具和结果[1] [2] [3] [4] [5]。NCS 的现场设备, 传感器, 执行器和控制器通过共享的有线或无线网络互连。由于 NCS 通信架构的灵活性, 减少了系统布线, 易于系统诊断和维护, 安装和维护的低成本和高可靠性等优点, 如今 NCS 已经成为深入研究的主题。NCS 为控制领域的扩展提供了空前的机遇, 充分体现了控制系统的分布化、网络化、模块化以及节点智能化的发展趋势[6]。但 NCS 通常包括大量的动态相互作用的不确定分量, 通常难以建模。这些系统本质上是复杂的, 并且涉及难以建模的局部和全局嵌入式控制和诊断结构的层次。NCS 的传感器, 执行器和反馈控制器之间的数据交换总是受到通信介质(1)时间延迟, (2)数据包丢失和(3)有限信道的数据量化等不确定性网络诱导因素约束, 如图 1 所示。在 NCS 中, 一个时间段内仅允许有限数量的传感器和执行器与控制器通信。如果网络过载, 由于网络上的业务量比可以传输的业务量更多, 则传输延迟和分组丢失率开始显著增加, 并且超过数据速率限制。此外, NCS 的总体行为受到网络的有限带宽的影响, 其被定义为每单位时间可以发送的最大数据量[7]。NCS 的复杂性是当今的一个重大的挑战, 主要是因为相互连接的动态系统结构有更多的不确定因素, 网络不但会出现时滞、丢包、扰动、带宽受限等传输通道问题, 也会产生信号衰减等网络故障。NCS 在行为方面也可以被认为是复杂的[8], 各种形式的复杂性也是由于某种程度的自动重新配置的能力可能会带来不明原因或不可预测的行为。所以, 由于网络在现实中起着至关重要的作用, 为使网络系统避免这种行为, 并产生可靠的容错控制(Fault Tolerant Control, 简记为 FTC)性能的问题已经成为当前的重要研究课题。

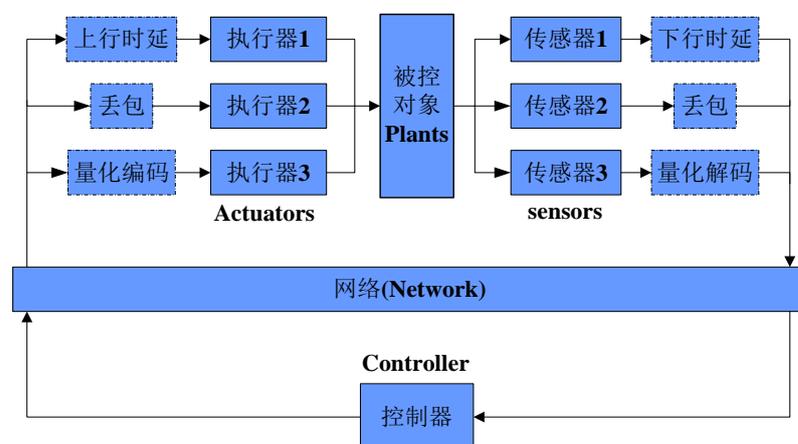


Figure 1. Network control system diagram

图 1. 网络控制系统示意图

关于 FTC 方面, 其思想最早可以追溯到 1971 年, 以 Niederlinski 提出完整性控制(Integral Control)的新概念为标志[9], 1980 年 Siljak D. D.发表的关于可靠镇定的文章是最早开始专门研究容错控制的文章之一, 然而直到 1993 年, 国际上才出现了由国际自动控制联合会(International Federation of Accountants, 简记为 IFAC)的 Patton 教授撰写的容错控制的综述文章。此外, 美国空军对具有高度可靠性容错能力战斗机的开发, 不断推进着 FTC 理论的迅速发展。而值得指出的是, 我国在容错控制理论上的研究与国外基本上同步。1987 年叶银忠等就发表了容错控制的论文, 并于次年发表了这方面的第一篇容错控制的综述文章, 国内发表的这方面的综述文章还有 1993 年南英等所著的《容错控制进展》, 1994 年葛建华等出版了我国第一本容错控制的学术专著。近年来, 还有很多学者都对容错控制做了大量研究, 提出了很多值得借鉴的方法[9]-[14]。容错控制是在解决复杂动态系统可靠性控制过程中研究出了一种新的控制技术, 可以说容错控制是控制系统安全运行的最后一道控制线。而由于距离限制、布线等等的因素, 许多容错控制器尤其主动容错控制器通常会承担很大的计算负担, 那么利用网络控制的便利, 网络不但可以承担部分控制器的作用, 同时也能大大减少控制器的计算负担, 甚至在控制器故障下也能保证系统正常运行, 所以网络控制对现有的容错控制研究有着重要的补充意义。

如今, 网络控制已在航空、航天系统, 能源、化工系统等各类工业系统中都普遍存在。而不确定的网络因素导致系统在进行分析与综合时会产生很多问题, 如使系统所得到信息是完全滞后或者缺失的信息, 尤其在系统存在扰动或产生故障的情况下, 由于信息的滞后或者缺失使控制器无法对即时控制信息作出正确的判断和调整, 从而导致系统的控制性能明显降低甚至可能导致系统发散, 严重地很可能造成设备和人身安全事故。因此, 网络的容错控制系统研究受到了控制界学者们的广泛关注[15] [16] [17]。

## 2. 问题描述

容错控制系统的设计主要包含两个问题: 用于判断一个系统或某个元部件是否发生故障的故障诊断机构的设计和容忍故障并仍能保证系统的稳定运行容错控制器的设计。而网络控制系统由于时变的网络环境(如拥塞)和信道质量将导致采样和解码之间存在不确定的影响, 我们重点关注的是时延、丢包及由于带宽有限的量化误差可能恶化 NCS 的性能这三个问题。

综上, 根据考虑因素的不同, 我们在当今网络容错控制的理论研究中总结出以下两个大方面: (1) 网络控制系统中不确定因素在系统回路中的故障诊断问题; (2) 设计合适的容错控制器, 克服网络中不确定因素产生的故障问题。

### 2.1. 网络容错控制系统的故障诊断问题

随着计算机的组成越来越复杂、通信接口数目逐渐增多、装配密度不断增大, 这些都将导致故障概率的增加, 另外, 各种系统使用环境也变得越来越复杂, 因而, 可靠性问题也越来越重要。NCS 的容错控制与故障诊断尤为重要, 一般系统的故障诊断与 NCS 容错控制有所不同, 更具有复杂性和特殊性, 而任何容错控制器设计的前提就是要先做好系统的故障诊断, 检测到故障才能处理故障。NCS 的故障诊断的研究主要是基于系统数学模型的方法, 由于网络传输中的时延、数据包丢失、数据传送方式以及非线性系统等不同的因素, NCS 故障模型的建立就是一个难点。文献[18] [19] [20] [21] [22]都研究了在网络时延影响下的故障检测问题, 通过 Lyapunov 稳定理论验证了系统的稳定性并设计了合适的控制器。其中文献[18]作者通过将系统建模为具有恒定延迟的马尔科夫跳跃线性系统研究了执行器故障模型, 并根据锥互补线性化算法给出了状态反馈容错控制器; 而文献[19]则研究了传感器故障模型, 通过 LMI 设计了一种鲁棒反馈控制器, 确保了闭环系统在所有可能的传感器故障情况下都渐近稳定。两篇文献所考虑的随机试验均为固定短时延状态下的故障模型, 考虑的系统均为线性系统, 且若对传感器和执行器同时故障检

测, 所得模型就变得更加复杂, 需要更加深入的研究。相对于[18] [19], 文献[20]则研究了一类未知的输入和时变延迟的不确定模型的故障检测问题, 作者将模型建立为一个 Takagi-Sugeno(T-S)模型, 并通过 LMI 设计了鲁棒故障检测系统, 虽然考虑到了时变延迟, 但依旧为线性系统下的短时延状态模型。更进一步, 文献[21] [22]讨论了非线性网络容错控制的故障检测问题。其中文献[21]比较全面的讨论了网络恶化和信号衰减两种网络故障下的故障监测问题, 通过提出一种滑模控制策略保证故障和扰动耦合的补偿, 但由于是非线性系统且带有未知控制器参数的自适应估计, 其系统模型本身比较复杂; 相比于[20], 文献[22]则研究了一类非线性系统 T-S 模糊模型问题, 由于系统模型具有规范有界不确定性, 作者设计了一个可接受的鲁棒故障检测滤波器, 以保证所产生的具有规定性能的残余系统的渐近稳定性。同时 NCS 的分布性及网络带宽和数据包大小都有一定限制, 所以网络的传输常常会采用多包传输的形式, 这也是对 NCS 进行故障检测与诊断所遇到的又一个问题。如文献[23], 由于网络采用的多包传输形式, 随机丢包就需要考虑在模型中是否需要建立观测器; 而文献[18] [22] [23] [24]研究的丢包都属于低丢包率, 当出现较高的丢包率时, NCS 可能失去有效性, 对故障的检测与诊断就更加重要。

## 2.2. 网络容错控制系统的控制器设计问题

网络容错控制系统的控制器设计, 依具体的系统及故障的不同有很大的差异, 根据考虑因素的不同很多学者做出了相应的研究, 比较有代表性的就是网络控制系统的鲁棒容错控制, 自适应容错控制以及切换容错控制的研究。

### (1) 网络鲁棒容错控制

无论是主动容错控制, 还是被动容错控制, 都需要具有关于模型不确定性与外界扰动的鲁棒性。这是容错控制可以应用于实际系统的重要前提之一。因此鲁棒容错控制问题一直受到各学者的高度重视, 已成为目前容错控制领域的热点研究方向, 而这在网络容错控制领域中也热点研究方向。然而, 由于主动容错控制器设计的复杂性, 现如今的大多数文献都属于被动容错控制。如文献[25]作者考虑了网络引起的延迟和数据包丢失, 研究了基于动态输出反馈的网络鲁棒容错控制, 因为有限参数且不使用模型转换, 而引入了延迟的下限, 使结果保守性较差; 文献[20]研究了不确定的 T-S 模型的鲁棒故障检测系统的设计问题, 所考虑为非线性短时延模型系统; 文献[26]研究的系统就有不确定性, 提出了鲁棒控制问题的 $H_{\infty}$ 形式化, 要基于动态观测器, 较为保守; 文献[27]研究了分布式网络控制系统(DNCSs)中的鲁棒容错控制问题, 但对 DNCSs 多是具有固定结构的 DNCSs, 仅考虑延时和丢包, 在可能的恶劣工作环境下, 容错控制器更容易失效。目前, 在量化控制方面的研究成果都还存在一定的保守性, 且多在稳定性的分析, 如文献[28]就分析了基于对数量化器的离散系统稳定性问题。

### (2) 网络自适应容错控制

自适应本身就具有自矫正功能, 而容错控制又有修复故障的功能, 两者结合在一起就能使系统发生故障后仍能保持或接近原有系统的性能。而正因网络控制的复杂性, 自适应容错就属于典型的主动容错控制, 所以对 NCS 的自适应容错控制的研究多在于对自适应控制模型的设计。如文献[29]中对具有时延和丢包的 NCS 的自适应控制进行了研究, 其研究中最大问题就是要找到采样周期的上限, 而由于所产生采样周期的上限是时变的, 所以如何建立合适的反馈观测器就成了难点; 文献[30]则研究了一类不确定多输入-单出三角形形式的离散时间系统, 作者将神经网络近似看作未知非线性函数, 设计了一种自适应容错控制方案, 与当时的一些方法相比, 文中提出的方法之一就是引入后台技术来实现容错控制任务; 文献[31]中, 作者也假设神经网络故障模型是控制输入的未知非线性函数, 设计了一种基于神经网络的容错控制器, 与前文相比, 提高了容错效率; 文献[32]中, 作者也将神经网络近似看作未知非线性函数, 只是将自适应容错控制器分成了内外两部分, 对系统故障做到了更好地容错; 文献[33]则研究一类具有未知强关

联的不确定互联非线性系统的自适应分散容错跟踪控制问题, 作者同样将容错控制器分成了两部分并增加了鲁棒故障检测方案来补偿执行器故障和系统不确定性, 又使系统的容错效率进一步提高。

### (3) 网络切换容错控制

切换系统是由一个系列的子系统和一个切换信号组成, 切换信号指定每一个时刻轨迹上要被激活的子系统。切换容错多属于被动容错方法, 与其他控制方法相比, 虽然时滞切换系统具有很强的工程背景, 但多在于对系统的故障诊断检测、设备执行器的饱和—偏置—失效以及系统稳定性分析, 对控制器的设计问题研究较少, 而在其他不确定网络存在的问题, 如丢包、量化, 对网络切换容错控制系统的研究多在于理论。如文献[34] [35]研究了离散时间切换系统下的故障检测问题; 文献[36]研究了具有时滞的切换系统的故障诊断问题; 文献[37]重点研究了时滞切换系统的主动容错控制问题; 文献[38]进一步在基于切换广义观测器的方法的基础上, 研究了时滞切换系统的传感器故障估计和补偿方法的问题; 文献[39]研究了具有执行器故障的离散时间切换系统的动态输出反馈容错控制器设计的问题; 文献[40]则研究了复杂一些的 DFTC 问题, 包括有效性损失/偏置等。但以上文献都侧重于系统稳定性的验证和理论的证明, 只有文献[41]考虑了一类不确定的切换线性延时系统的容错控制并将其应用在水污染控制系统中。所以对如今网络切换容错控制系统的研究在实际应用方面还需要更加关注。

## 3. 研究方法

在实际工业过程中, NCS 主要考虑数据包丢失、网络诱导时延及网络量化等影响网络系统性能的问题, 需要根据系统的某些观测信息作出判决, 再通过对容错控制器的设计克服系统出现的故障, 使系统可以继续稳定运行。在网络容错控制系统的故障检测与诊断和几种比较有代表性的控制系统研究中, 针对处理时延、丢包等不确定性问题时, 最多使用的方法就是 Lyapunov 函数及线性矩阵不等式(LMI):

首先通过求解系统相应的 LMI 设计系统控制器, 再通过构造推导 Lyapunov 函数, (如  $V_i \left( x = \frac{\partial V(x)}{\partial x} \right)$ ,

$\forall i \in \Lambda$ , 系统中如果存在一个 Lyapunov 函数  $v(x) > 0$ , 那么显然系统是渐近稳定的)来验证系统的稳定性。针对不同问题的模型还需要具体问题具体分析, 选择适应的辅助方法。而对基于量化器模型的网络控制系统的研究一般有几个方向: (1)是直接对量化器的研究; (2)是对量化误差的分析; (3)是针对分布在不同区域的量化器采用不同的量化策略。由于不会单独再去设计量化控制器, 所以对量化问题的处理就融入容错控制器的设计部分。

### 3.1. 网络容错控制系统故障诊断研究

根据 NCS 中的时延、数据包丢失以及数据传送方式的不同等因素, 对网络容错控制系统可以建立不同类别与容错控制被越来越多的学者所关注。文献[18] [22] [42] [43] [44] [45]针对时延影响研究了控制系统的故障诊断问题, 其中文献[18]将 NCS 建模为具有恒定延迟的马尔可夫跳跃线性系统(MJLS), 基于马尔可夫(Markov)跳跃线性系统的理论和使用 Lyapunov-Krasovskii 功能方法, 使系统具有恒定的延迟, 便于执行器的故障检测, 为具有部分未知的转移概率的容错控制系统导出了用于随机稳定性的充分条件; 文献[44]针对具有延迟的离散时间 T-S 模糊系统的容错饱和和控制(FTSC)问题, 开发了具有饱和约束的基于观察者的控制设计的充分条件。该文献基于多个 Lyapunov 函数和松弛变量, 使用锥形互补技术在 LMI 项中设计条件, 使在控制器上存在永久传感器故障和饱和时也保持渐近稳定性; 文献[45]针对随机故障和随机延迟的一类离散时间 NCS 的静态输出反馈随机稳定和干扰衰减问题, 将不同的随机过程被建模为马尔可夫链, 并且所得到的闭环系统属于离散时间 MJLS 的类别。而文献[22] [42]则基于非线性系统下研究了时延系统的故障诊断问题, 其中文献[22]研究了一类离散时间非线性系统的鲁棒故障检测问题, 将模型

由具有规范边界不确定性的 T-S 仿射动力学模型表示, 目的是设计一个允许的故障检测滤波器, 保证所得残余系统具有规定性能的渐近稳定性; 文献[42]研究了一个非线性动态网络控制系统受时变延迟的集成 FTC 问题。为了方便残差产生, 网络引起的延迟影响被转换成一种时变不确定性, 然后基于故障诊断程序获得的不确定性和故障信息, 开发了 FTC 组件以补偿不确定性和故障的方法, 从而达到了在没有故障的情况下, 使用标称控制器来处理系统不确定性。在处理时延的问题上, 许多学者也同时考虑到网络丢包对系统故障检测的影响, 如文献[23] [25] [43]。其中文献[23]中作者基于残差发生器和残差估计器设计系统的奇偶空间和状态观测器作为故障诊断方法, 在随机丢包 NCS 中, 将丢包对系统产生的影响转化为系统的随机参数项, 并通过参考模型用一个新的优化指标来处理随机参数项; 文献[25]中将数据包丢失看作是一种特殊形式的时延, 基于动态反馈控制策略, 提出了执行器故障时的时延鲁棒控制策略, 在该控制器的设计中应用了 LMI 原理。在 NCS 中, 而当丢包率低时, NCS 的故障检测具有有效的性能, 而文献[43]则关注的是, 如果 NCS 中的丢包率高时, NCS 可能失去有效性条件下的具有正态的分布式属性的故障检测。作者提出了一种改进的加权和平方残差(IWSSR)故障检测方法, 对丢包率高的问题, 提出了一种规范有限的故障检测方法, 避免了需要创新满足正态分布的限制。同时也有学者在网络通信约束问题方做了相关研究, 如文献[46]提出了一种具有通信约束的非线性 NCS 类别的 FTC 方法, 使用欧拉近似法将 T-S 模糊模型建立为一个新的非线性 NCSs 模型, 然后通过考虑传感器故障和执行器故障, 提出了一种基于鲁棒控制理论和信息调度的非线性 NCS 的 FTC 方法。

### 3.2. 网络鲁棒容错控制系统研究

鲁棒控制理论是针对实际工程中模型不确定性发展起来的。在实际应用中, 可以将所有问题都考虑成具有不确定性的数学模型, 用鲁棒控制理论去解决受到时延、丢包和外界扰动等不确定性影响的 NCS 设计问题。国内外对鲁棒容错控制器的研究比较多, 文献[19] [26] [42] [47]研究了鲁棒时延容错控制, 其中文献[19]中针对传感器故障具有不确定时间延迟的一类 NCS, 重点讨论的是基于状态反馈的鲁棒容错控制的问题。文献基于 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法, 将状态反馈控制器设计为确保闭环系统在所有可能的传感器故障情况下渐近稳定; 文献[47]涉及具有状态延迟和随机执行器故障的 NCS, 作者通过使用输入延迟方法, 获得状态和输入中的等效连续时间广义时间延迟系统。应用延迟分解方法, 可以充分考虑延迟的工厂状态信息, 且所提出的方法不涉及松弛变量或任何模型变换; 文献[42]研究了一个非线性动态网络控制系统受时变延迟的集成 FTC 问题, 为了方便残差产生, 网络引起的延迟影响被转换成一种时变不确定性, 然后基于故障诊断程序获得的不确定性和故障信息, 开发了 FTC 组件以补偿不确定性和故障的方法, 从而达到了在没有故障的情况下, 使用标称控制器来处理系统不确定性; 文献[26]研究了一类具有状态时间延迟的不确定系统的鲁棒控制, 作者同时探讨了基于观测器的故障检测和 LMI 的控制器设计方法。文献[5] [25]中, 作者分别用不同方法处理了网络丢包的影响, 文献[25]基于动态输出反馈控制策略, 将数据包丢失看作是一种特殊形式的时延, 提出了执行器故障时的时延鲁棒控制策略; 而文献[5]基于这种更一般的非线性 NCS 模型, 通过选择适当的 Lyapunov 函数和采用新的离散 Jensen 类型不等式, 导出足够的条件以建立最大可允许分组丢失率和非线性水平与指数稳定性的数量关系的 NCS, 并利用圆锥互补线性化算法或求解相应的 LMI 设计了输出反馈控制器, 且该控制器具有很强的鲁棒性。文献[48]中, 作者将数据分组丢失的 NCS 描述为交换系统模型, 分别采用丢包依赖型 Lyapunov 函数, 用于任意分组丢失过程和马尔可夫分组丢失过程, 在两方面同时考虑了丢包和时延问题。由于如今网络量化问题越来越引起社会关注, 文献[49]则针对非线性 NCS 系统中控制器参数存在摄动的问题, 考虑传感器到控制器和控制器到执行器均存在随机丢包和量化误差, 作者提出了一种加性非脆弱量化  $H_\infty$  控制器的设计方法, 利用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法, 将该问题转化为线性矩阵不等式约束和线性目标函数

的凸优化问题进行求解。其控制器在容许的参数摄动、丢包概率和量化密度条件下, 不仅能保证闭环 NCS 的稳定性和性能要求, 而且是非脆弱的。以上文献所考虑的 NCSs 都为固定结构, 而文献[27]则将这个问题扩展到可变结构的 DNCSs, 作者考虑了时延和丢包之外, 还考虑每个子系统具有不同量化器的条件, 由此设计了一种强大的鲁棒容错控制器。

### 3.3. 网络自适应控制容错控制系统研究

由于对 NCS 的自适应容错控制多在于对自适应控制模型的设计, 所以有很多学者开始融合将自适应方法融合在其他的控制方法中, 且已有很多研究面向了神经网络。文献[29]针对存在状态相关干扰的网络诱发延迟的线性网络控制系统问题, 提出了一个新的自适应模型, 并基于 Lyapunov 稳定性理论, 推导出系统的新的延迟相关稳定性标准。文献[50]中考虑了更加复杂的系统, 对于时延、丢包以及具有一定规律的 Markov 丢包的系统, 有效的利用切换思想, 在元件可能失效的情况下, 比较理想的实现了对系统的容错控制。文献[21]在解决一类非线性耦合混沌系统时延网络故障问题时, 通过对网络的恶化、信号衰减、扰动非线性耦合和时变时滞的混沌系统的 FTC 设计考虑, 提出了一种自适应估计滑模控制策略, 保证了故障和扰动联轴器的补偿。文献[30]中, 作者将基函数神经网络看成一种非线性函数, 设计了一种自适应容错控制方案, 与之前文献的一些方法相比, 作者提出的方法之一就是引入后台技术来实现容错控制任务。文献[31]研究了一类具有未知未建模动态系统的容错控制问题, 作者也是将神经网络看成一种未知的非线性函数, 利用神经网络的基本功能和隐含函数定理的属性, 设计了一种基于神经网络的容错控制器。文献[32]提出了一种自适应滑模 FTC 方案, 以解决超强飞行器的鲁棒和快速的姿态跟踪问题, 作者结合滑动模式控制理论, 在故障系统的外环和内环分别设计了容错控制器。文献[51]研究了一类具有输入量化、外部干扰和执行器故障的不确定非线性系统的自适应跟踪控制问题, 作者在控制律中引入了一种新的光滑函数, 通过切换信号以消除基于第一步构造的中间控制律对量化的影响。文献[33]则研究一类具有未知强关联的不确定互联非线性系统的自适应分散容错跟踪控制问题, 为了实现良好的跟踪性能, 作者使用图论方法, 基于神经网络的鲁棒自适应分散 FTC 方案补偿了执行器故障和系统的不确定性。

### 3.4. 网络切换控制容错控制系统研究

切换系统属于混合动力系统, 而时间延迟是许多物理过程的固有特性、不稳定和性能差的主要来源, 而具有时滞的切换系统具有很强的工程背景, 早在网络控制系统中就有应用[52]。文献[35]研究了具有区间时变时滞的离散切换系统的故障检测滤波器设计问题, 通过构造新颖的切换 Lyapunov 函数, 获得用于残余系统的新标准, 并基于此, 根据 LMI 建立了用于存在上述滤波器的充分条件, 保证了产生的残留信号与故障信号之间的差异尽可能小; 文献[37]通过利用故障诊断观测器, 在切换系统条件下提出了一种自适应故障估计算法, 可以快速和准确地估计故障信号, 并基于故障估计和观测器的信息将容错控制器设计为保证闭环系统的稳定性, 通过 LMI 为自适应观测器和容错控制器的存在导出了足够的条件; 文献[39]研究了具有执行器故障的离散时间切换系统的动态输出反馈容错控制器设计的问题, 通过使用降阶观测方法和切换 Lyapunov 函数技术, 实现了具有执行器故障的离散时间切换系统的故障估计算法。文献[35][37][39]是在线性系统下对时滞切换系统的研究, 文献[38]则在基于切换广义观测器的方法的基础上, 提出了一种新的时延切换描述符状态观测器来估计状态和传感器故障, 在传感器故障的估计的基础上, 设计了一个高效的容错控制过程, 实现非线性系统传感器的故障补偿。量化问题在时滞切换系统中的研究成果还较少, 文献[53]则基于切换系统模型分析了带动态量化器离散时滞系统的稳定性问题, 利用 Lapunov-Krasovkii 泛函方法给出了系统渐近稳定的充分条件; 文献[54]在分析同时带均匀量化器和对数量化器的网络控制系统的稳定性问题时, 考虑了量化效应、数据丢包、时变时滞和通信约束等缺陷同时

存在的情况, 将量化效应表示为添加的范数有界干扰, 把网络控制系统建模成一个线性离散不确定切换系统。文献[41]考虑的水污染控制中, 使用了慢切换方法, 主控制器用于稳定执行器故障, 而其标称系统的时滞系统(即无故障)不需要改变任何结构或控制器参数。

#### 4. 存在的问题及展望

综上, 通过对国内外网络控制系统现状的研究, 以及对处理网络诱导因素的问题总结, 我们很清楚地认识到, 广大学者对网络容错控制方面已有了一定重视, 且已经取得了非常丰硕的成果。针对不确定网络容错控制系统, 对网络特有的如时延、丢包、信道带宽有限及量化等异于经典控制系统的特点, 仍然存在许多有待改进的地方:

第一, 目前, 对于网络容错控制系统的研究已近有了一定丰硕的成果, 然而由于许多系统鲁棒性的需求, 很多成果主要集中于网络鲁棒容错控制和自适应容错控制系统, 对于网络容错切换控制系统的研究正逐渐受到更过的关注, 所以对网络容错切换控制系统的故障检测及控制方法的研究当中, 仍然存在许多需要努力的地方。

第二, 很多学者在研究网络容错切换控制系统的稳定性问题时, 应对时滞问题, 得到了很多研究成果。目前文献数据表明, 很多关于网络切换容错控制系统的研究结果大多只涉及系统镇定性的问题, 如检测故障—执行的偏置失效—分析稳定性, 而在网络控制领域, 研究控制系统的性能是十分必要, 建立计算高效和易于实现的控制编码—解码和控制策略去设计控制器, 具有重要理论和实际意义, 所以在网络容错切换控制系统的丢包、量化及控制器设计研究当中, 仍然存在许多需要努力的地方。

第三, 除了文献[41], 其他许多的研究成果都局限于理论, 都是基于一定的假设为前提, 不利于在实际的应用中推广, 对于网络容错切换控制系统的实际应用研究较少。比如同时再出现故障后, 如何设计容错控制方案, 更好地减小量化误差, 增强容错控制系统的性能, 并将其用于实际应用中仍有待于进一步研究。因此, 网络容错控制的思想理念必须与实际生产中的系统相联系, 才会有更加理想的成果。

第四, 非线性系统控制一直以来都是控制界研究的难点和热点, 而对网络容错切换控制的研究自然更是如此。考虑非线性对象本身的复杂性, 目前对非线性网络容错控制的研究思路正如对非线性系统容错控制的研究思路一样, 主要也就是将在线性系统研究的方法推广至非线性系统中。所以现有对非线性系统控制的研究大多针对特定非线性系统, 且研究成果相对较少, 有待进一步研究。

#### 5. 结语

本文综述了基于网络的容错控制系统的发展及研究现状, 主要介绍了近年来网络容错控制系统稳定性的研究进展。现有的基于网络的容错控制系统的研究主要是以设计模型来解决系统的稳定性问题, 重点是处理网络系统运行时所遇到的问题, 使网络系统的控制更具有稳定性, 同时研究的思想理念必须与实际生产中的系统相联系, 才会有更加理想的成果。

#### 参考文献 (References)

- [1] Chae, S. and Nguang, S. (2014) SOS Based Robust  $H(\infty)$  Fuzzy Dynamic Output Feedback Control of Nonlinear Networked Control Systems. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **44**, 1-1.
- [2] Quevedo, D. and Jurado, I. (2013) Stability of Sequence-Based Control with Random Delays and Dropouts. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **59**, 1296-1302. <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2286911>
- [3] Tavassoli, B. (2014) Stability of Nonlinear Networked Control Systems over Multiple Communication Links with Asynchronous Sampling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **59**, 511-515. <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2274711>
- [4] Li, F. Shi, P. Wu, L. and Basin, M. (2015) Quantized Control Design for Cognitive Radio Networks Modeled as Non-

- linear Semi-Markovian Jump Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **62**, 2330-2340. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2351379>
- [5] Zhang, Y. and Fang, H. (2011) Stabilization of Nonlinear Networked Systems with Sensor Random Packet Dropout and Time-Varying Delay. *Applied Mathematical Modelling*, **35**, 2253-2264. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.038>
- [6] 刘于之. 不确定网络控制系统鲁棒分析与事件触发控制研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [7] Lian, F., Moyne, J. and Tilbury, D. (2001) Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. *IEEE Control Systems Magazine*, **21**, 66-83. <https://doi.org/10.1109/37.898793>
- [8] Kambhampati, C., Klinkhieo, S. and Patton, R.J. (2007) A Strategy for Fault Tolerant Control in Networked Control Systems in the Presence of Medium Access Constraints. *Proceedings of the European Control Conference 2007*, Kos, 3709-3716.
- [9] Niederlinski, A. (1971) A Heuristic Approach to the Design of Linear Multivariable Interacting Control Systems. *Automatica*, **7**, 691-701. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(71\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0005-1098(71)90007-0)
- [10] Saljak, D.D. (1980) Reliable Control Using Multiple Control Systems. *International Journal of Control*, **31**, 303-329. <https://doi.org/10.1080/00207178008961043>
- [11] Blanke, M. (2007) Diagnosis and Fault-Tolerant Control for Ship Station Keeping. *Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, 27-29 June 2005, 1379-1384.
- [12] Jiang, J. and Yu, X. (2012) Fault-Tolerant Control Systems: A Comparative Study between Active and Passive Approaches. *Annual Reviews in Control*, **36**, 60-72.
- [13] 李俊岭, 杨光红. 自适应容错控制的发展与展望[J]. 控制与决策, 2014(11): 1921-1926.
- [14] Yang, H., Jiang, B., Staroswiecki, M. and Zhang, Y. (2015) Fault Recoverability and Fault Tolerant Control for a Class of Interconnected Nonlinear Systems. *Automatica*, **54**, 49-55.
- [15] Lien, C. and Yu, K. (2008) Robust Reliable Control for Uncertain Time-Delay Systems with IQC Performance. *Journal of Optimization Theory and Applications*, **138**, 235-251. <https://doi.org/10.1007/s10957-008-9374-6>
- [16] Gao, Z., Breikin, T. and Wang, H. (2008) Reliable Observer-Based Control against Sensor Failures for Systems with Time Delays in Both State and Input. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans*, **38**, 1018-1029. <https://doi.org/10.1109/TSMCA.2008.923050>
- [17] 肖民卿. 传感器有故障的 Delta 算子线性不确定系统的鲁棒 D-稳定[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 183-185.
- [18] Wei, L., Niu, W.Q., Dong, E.Z. and Yang, C. (2011) Fault-Tolerant Control of Networked Control Systems with Short Random Delays. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, **2**, 180-184.
- [19] Liu, J., Jiang, B., Zhang, K. and Mao, Z. (2013) LMI-Based Robust Fault-Tolerant Control for Networked Control Systems. *ICIC Express Letters*, **7**, 513-518.
- [20] Ahmadizadeh, S., Zarei, J. and Karimi, H.R. (2014) A Robust Fault Detection Design for Uncertain Takagi-Sugeno Models with Unknown Inputs and Time-Varying Delays. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, **11**, 98-117.
- [21] Jin, X. and Yang, G. (2013) Adaptive Sliding Mode Fault-Tolerant Control for Nonlinearly Chaotic Systems against Network Faults and Time-Delays. *Journal of the Franklin Institute*, **350**, 1206-1220.
- [22] Guo, H., Qiu, J., Tian, H. and Gao, H. (2014) Fault Detection of Discrete-Time T-S Fuzzy Affine Systems Based on Piecewise Lyapunov Functions. *Journal of the Franklin Institute*, **351**, 3633-3650.
- [23] 吕明, 吴晓蓓, 陈庆伟. 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): 325-328.
- [24] Zhang, Y., Liu, Z., Fang, H. and Chen, H. (2013)  $H^\infty$  Fault Detection for Nonlinear Networked Systems with Multiple Channels Data Transmission Pattern. *Information Sciences*, **221**, 534-543.
- [25] Wei, L., Huichao, C. and Jun, W. (2011) Robust Fault-Tolerant Control for Uncertain NCS Based on Dynamic Output Feedback. *The 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Shanghai, 179-186.
- [26] Hadil, S. (2015) Robust Simultaneous Fault Detection and Control Approach for Time-Delay Systems. *9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Paris, 1244-1249.
- [27] Ge, Y., Wang, J., Zhang, L., Wang, B., et al. (2016) Robust Fault Tolerant Control of Distributed Networked Control Systems with Variable Structure. *Journal of the Franklin Institute*, **353**, 2553-2575.
- [28] Xia, Y., Yan, J., Shi, P. and Fu, M. (2013) Stability Analysis of Discrete-Time Systems with Quantized Feedback and Measurements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **9**, 313-324. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2218113>
- [29] Tahoun, A.H. and Fang, H.J. (2009) Adaptive Stabilization of Networked Control Systems with Delays and State-Dependent Disturbances. *17th Mediterranean Conference on Control & Automation Makedonia Palace*, Thessaloniki, 622-627.

- [30] Liu, L., Wang, Z. and Zhang, H. (2015) Adaptive NN Fault-Tolerant Control for Discrete-Time Systems in Triangular Forms with Actuator Fault. *Neurocomputing*, **152**, 209-221.
- [31] Shen, Q., Jiang, B. and Shi, P. (2016) Adaptive Fault Tolerant Control against Actuator Faults. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **31**, 147-162. <https://doi.org/10.1002/acs.2689>
- [32] Zhai, R., Qi, R. and Jiang, B. (2016) Adaptive Sliding Mode Fault-Tolerant Control for Hypersonic Aircraft using RBF Neural Networks. 2016 *Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yinchuan, May 2016, 1109.
- [33] Li, X.-J. and Yang, G.-H. (2017) Neural-Network-Based Adaptive Decentralized Fault-Tolerant Control for a Class of Interconnected Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, **99**, 1-12.
- [34] Wang, D., Wang, W. and Shi, P. (2009) Robust Fault Detection for Switched Linear Systems with State Delays. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, **39**, 800-805. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2008.2007498>
- [35] Jiang, B., Du, D. and Cocquempot, V. (2011) Fault Detection for Discrete-Time Switched Systems with Interval Time-Varying Delays. *International Journal of Control, Automation and Systems*, **9**, 396-401. <https://doi.org/10.1007/s12555-011-0223-2>
- [36] Dongsheng, D., Jiang, B. and Peng, S. (2010) Fault Diagnosis for Switched Systems with Time Delay. *International Conference on Control and Automation-ICCA*, Xiamen, 2162-2165.
- [37] Du, D., Jiang, B. and Shi, P. (2011) Active Fault-Tolerant Control for Switched Systems with Time Delay. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **25**, 466-480. <https://doi.org/10.1002/acs.1224>
- [38] Du, D., Jiang, B. and Shi, P. (2012) Sensor Fault Estimation and Compensation for Time-Delay Switched Systems. *International Journal of Systems Science*, **43**, 629-640. <https://doi.org/10.1080/00207721.2010.517867>
- [39] Du, D., Tan, Y. and Zhang, Y. (2015) Dynamic Output Feedback Fault Tolerant Controller Design for Discrete-Time Switched Systems with Actuator Fault. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, **16**, 93-103.
- [40] Wang, X. and Yang, G.-H. (2016) Distributed Fault-Tolerant Control for a Class of Cooperative Uncertain Systems with Actuator Failures and Switching Topologies. *Information Sciences*, **370-371**, 650-666.
- [41] Jin, Y., Fu, J., Zhang, Y. and Jing, Y. (2014) Fault-Tolerant Control of a Class of Switched Time-Delay Systems with Average Dwell Time Method. *IFAC Proceedings*, **47**, 11673-11678.
- [42] Wu, W. and Fang, H. (2014) Integrated Fault-Tolerant Control Methodology for Non-Linear Dynamical Networked Control Systems Subject to Time-Varying Delay. *IET Control Theory and Applications*, **8**, 535-545. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2013.0488>
- [43] Qiao, C. and Sun, S. (2015) Fault Detection for Networked Systems with Random Delays and Packet Losses. *Journal of Process Control*, **35**, 80-88.
- [44] Benzaouia, A., El Hajjaji, A., Hmamed, A. and Oubah, R. (2015) Fault Tolerant Saturated Control for T-S Fuzzy Discrete-Time Systems with Delays. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, **18**, 60-71.
- [45] Sauter, D., Aberkane, S. and Ponsart, J.C. (2015) Stabilization of Networked Fault Tolerant Control Systems. 2007 *9th European Control Conference*, Lisbon, 3695-3700.
- [46] Wang, Y., Jiang, B. and Mao, Z. (2009) Fault-Tolerant Control Design for a Kind of Nonlinear Networked Control System with Communication Constraints. *Control and Decision Conference*, Guilin, 951-956.
- [47] Wang, S., Feng, J. and Zhang, H. (2014) Robust Fault Tolerant Control for a Class of Networked Control Systems with State Delay and Stochastic Actuator Failures. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **28**, 798-811. <https://doi.org/10.1002/acs.2372>
- [48] Zhao, M.Y. and Liu, H.P. (2011) Fault Tolerant Control of Network Control Systems with Packet Loss and Time Delay. *International Journal of Automation and Computing*, **8**, 244-253. <https://doi.org/10.1007/s11633-011-0579-z>
- [49] 刘艳, 潘丰. 丢包网络化控制系统非脆弱量化  $H^\infty$  控制[J]. 信息与控制, 2016, 45(3): 320-327.
- [50] Hong, H.Z., Yuan, Z. and Chang, X. (2011) A Robust Fault-Tolerant Control Strategy for Networked Control Systems. *Journal of Network and Computer Applications*, **34**, 708-714.
- [51] Li, Y. and Yang, G. (2016) Adaptive Asymptotic Tracking Control of Uncertain Nonlinear Systems with Input Quantization and Actuator Faults. *Automatica*, **72**, 177-185.
- [52] Kim, D.K., Park, P. and Ko, J.W. (2004) Output-Feedback  $H^\infty$  Control of Systems over Communication Networks using a Deterministic Switching System Approach. *Automatica*, **40**, 1205-1212.
- [53] Li, M., Dou, L., Sun, H. and Sun, J. (2013) Stability Analysis of Dynamic Quantized Systems with Time-Varying Delay. *9th Asian Control Conference on Istanbul Turkey*, 6.
- [54] Loon, S., Donkers, M., Wouw, N. and Heemels, W. (2013) Stability Analysis of Networked and Quantized Linear Control Systems. *Nonlinear Analysis Hybrid Systems*, **10**, 111-125.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-677X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[dsc@hanspub.org](mailto:dsc@hanspub.org)