互联系统容错控制的研究回顾与展望

杨 浩[1] 姜 斌[1] 周东华[2,3]

摘 要 互联系统的容错控制是近年来控制领域的研究热点, 具有重要的理论价值和实际意义. 本文阐述了互联系统容错控制的基本结构和主要思想, 总结了带有机械互联、网络互联和模型虚拟互联的三类互联系统的容错控制最新研究成果, 并对该研究方向进行了展望.

关键词 互联系统, 容错控制, 协同控制, 网络控制

引用格式 杨浩, 姜斌, 周东华. 互联系统容错控制的研究回顾与展望. 自动化学报, 2017, **43**(1): 9−19

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160193

Review and Perspectives on Fault Tolerant Control for Interconnected Systems

YANG Hao[1] JIANG Bin[1] ZHOU Dong-Hua[2,3]

Abstract Fault tolerant control (FTC) of interconnected systems is a remarkable aspect of the control field in recent years, which has both important academic and engineering values. This paper introduces the basic structure and main idea of the FTC design for interconnected systems, and makes a comprehensive review of the recent theoretical results on the FTC of systems with mechanical interconnections, network interconnections, and model virtual interconnections. Some perspectives are also provided.

Key words Interconnected systems, fault tolerant control (FTC), cooperative control, control of networks

Citation Yang Hao, Jiang Bin, Zhou Dong-Hua. Review and perspectives on fault tolerant control for interconnected systems. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 9−19

随着控制系统规模的日益增大和不断提高的控制品质要求, 越来越多的复杂系统具有多子系统互联的特性, 由于各个子系统都有着不同的动态特性和控制要求, 因此无法再运用单一系统模型建模, 而运用互联系统建模是一种行之有效的办法. 互联系统由一组子系统通过一定的耦合机制组成, 通过各个子系统的共同作用达到满意的局部 (每个子系统) 和全局 (整个互联系统) 性能[1]. 互联系统的耦合机制可以分为两大类[2]: 1) 机械互联,即子系统之间通过机械部件连接, 例如多体航天器的各个刚性部件和挠性部件通过特定的铰链机构连接[3]、大规模智能电网的各个节点通过传输线路连接[4]; 2) 网络互联, 即子系统之间通过通信网络相互连接. 例如机器人编队、飞行器编队等多智能体系统[5]. 由于系统固有的互联特性, 很多单一系统的控制方法很难应用于互联系统, 因此对互联系统的研究有着重要的理论意义和应用价值. 经过数十年的发展, 互联系统的分析和设计取得了令人鼓舞的进展[1].

现代精密的控制系统对各部件的可靠性和准确性的要求越来越高, 系统内部各个环节的故障都可能彻底改变系统行为, 导致系统性能下降, 甚至不稳定. 容错控制的目的在于通过控制器的调节使得故障系统仍能保持满意的性能或者至少达到可以接受的性能指标. 经过 30 余年的发展, 该领域涌现出丰硕的研究成果[6−9].

互联系统的容错控制问题近年来引起了越来越多的重视. 互联系统存在两大类故障: 1) 子系统故障, 影响每一个子系统的动态特性, 例如执行器故障、传感器故障等; 2) 耦合故障, 影响耦合机制的行为, 例如机械铰链故障、网络通信故障等.

互联系统的容错控制技术研究具有重要的理论价值和迫切的实际需要. 1) 来自学术研究的需要. 众

收稿日期 2016-02-29 录用日期 2016-09-30
Manuscript received February 29, 2016; accepted September 30, 2016
国家自然科学基金 (61490703, 61473143, 61622304), 江苏省自然科学基金 (BK20160035), 中央高校基本科研业务费 (NE2014202, NE2015002, NE2015103), 流程工业与自动化国家重点实验室开放课题资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61490703, 61473143, 61622304), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20160035), Fundamental Research Funds for the Central Universities (NE2014202, NE2015002, NE2015103), and State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries
本文责任编委 夏元清
Recommended by Associate Editor XIA Yuan-Qing
1. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106 2. 山东科技大学电气工程与自动化学院 青岛 266590 3. 清华大学自动化系 北京 100084
1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106 2. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590 3. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084

所周知, 互联系统的稳定性只有在非常严格的条件下才能满足, 对每个子系统和耦合机制都有严格的约束. 目前许多工作都关注于互联系统的离线设计, 保证互联系统按照期望的状态工作. 然而故障会突然改变子系统和耦合机制的行为, 而容错控制策略必须在线运用[10−12], 以维持系统在故障情况下的稳定性, 这给理论研究带来了巨大的挑战; 2) 来自工程应用的需要. 由于实际系统的复杂性, 许多系统都利用互联系统建模, 这些系统对于安全性和可靠性的要求非常高, 因此迫切需要有效的容错控制技术.

机械互联和网络互联都具有明确的物理背景的耦合机制. 除此之外, 还有一类复杂系统本身没有明确的互联特性, 但为了便于对其分析和设计, 将原系统分解为多个具有不同特性或用途的子系统, 进而运用互联系统模型和方法加以研究, 这一类耦合称为模型虚拟互联, 例如奇异摄动理论将系统分为快、慢两个子系统, 非最小相位控制理论将系统分为直接受控部分和零动态等[13]. 互联系统方法一直是研究复杂系统容错控制的重要手段之一.

本文对互联系统容错控制的研究进行全面梳理和总结. 需要指出的是, 作为容错控制的基础和前提, 故障诊断一直是控制科学中的研究热点和难点, 互联系统的故障诊断也取得了一定的成果, 可以参考文献 [14−16], 本文内容安排如下: 第 1 节阐述互联系统容错控制的基本结构和主要思想, 第 2 节、第 3 节和第 4 节分别讨论带有机械互联、网络互联和模型虚拟互联的互联系统容错控制方法, 第 5 节给出总结和展望.

1 基本结构和主要思想

考虑由 m 个子系统组成的互联系统模型

$$\dot{x}_i = f_i(x, \theta_i, u_i), \quad i \in M = 1, 2, \cdots, m \tag{1}$$

其中, $x = \{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$ 表示系统状态集, x_i 表示子系统 i 的状态, $u = \{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$ 表示系统控制集, u_i 表示子系统 i 的控制器, $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_m\}$ 表示系统故障集, $\theta_i = \{\theta_i^s, \theta_i^c\}$ 表示子系统 i 的故障, 其中 θ_i^s 表示子系统 i 自身的故障, θ_i^c 表示子系统 i 与其他子系统之间的耦合故障. $f = [f_1^{\mathrm{T}}, f_2^{\mathrm{T}}, \cdots, f_m^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$, f_i 表示互联系统的向量场. 容错控制问题即当故障存在的情况下, 保证 x 收敛于平衡点.

虽然模型 (1) 是一般的非线性函数形式, 无法反应具体的子系统动态特性和耦合特性, 但可以看出, 由于子系统间的耦合, 每个子系统的动态方程都可能会受到其他子系统的影响, 并且每个子系统不但受到自身的故障影响, 也会受到耦合故障的影响.

互联系统的容错控制目标有两大类: 1) 满足个体性能指标, 从每个子系统的层面, 考察每个子系统在故障情况下如何实现稳定性、动态特性、最优性等; 2) 满足全局性能指标, 从互联系统的全局, 考察整个系统在故障情况下如何实现全局的稳定性、一致性、同步性、最优性等.

针对这两大类目标, 容错控制的核心思想也可分为两大类: 1) 个体容错, 这种思想的本质是从子系统层面出发, 深入分析互联环境对每个子系统的动态性能的影响, 将互联视为子系统的干扰, 研究如何调节子系统的局部控制器和互联机制去补偿互联对子系统的影响, 从而实现个体性能指标, 这种容错思想在机械互联系统中有着广泛的应用; 2) 全局容错, 这种思想的本质是从全局层面出发, 深入分析每个子系统的动态特性和互联特性对整个互联系统的影响, 将子系统和互联视为影响全局互联系统的关键因素, 研究如何调节子系统的局部控制器和互联机制使得子系统能够协同工作, 从而实现全局性能指标, 这种容错思想尤其适用于网络互联系统.

上述两种思想既有明显区别, 又有密切关联, 个体性能指标和全局性能指标往往是一致的, 例如机械互联系统, 所有子系统的稳定性也就意味着系统的全局稳定性; 而对于网络互联系统, 所有子系统对其相邻子系统的跟踪性能直接决定了整个互联系统的一致性、同步性. 对于某些同时带有机械互联和网络互联的系统, 个体性能指标和全局性能指标需要同时考虑, 因此两种容错思想需要综合应用, 例如在配电网的自愈控制体系中, 最核心的两环控制逻辑是指慢速全局响应环和快速局部控制环, 两环控制相互协调, 同时保证全局的优化和局部的故障调节[17].

在上述容错思想的指导下, 形成了三种典型的互联系统的容错控制结构, 如图 1 所示.

1) 集中式 (Centralized), 整个互联系统存在一个集中的监测器, 每个子系统通过监测器获得所有子系统的状态信息和故障信息[1], 这种结构为子系统控制器的设计带来极大便利, 可以将互联系统看成一个整体 $\dot{x} = f(x, \theta, u)$ 设计容错控制器 u, 再由每个子系统分别实现, 每个控制器的形式为 $u_i(x, \theta)$, 然而这种结构的实现成本很高, 只适合规模较小的互联系统.

2) 分布式 (Distributed), 每个子系统有自己的监测器, 只与跟它耦合的子系统进行状态和故障信息的交互, 可以充分利用与子系统 i 耦合的所有子系统 j 的状态信息, 设计控制器 $u_i(x_i, \theta_i, x_j, \theta_j)$, $j \in N(i)$. $N(i)$ 为与子系统 i 耦合的子系统集. 这种结构较集中式结构成本大大降低, 且更易实现, 在大规模互联网络系统中有着广泛的应用.

[1] 当状态和故障不能直接获得, 也可以只获得子系统的部分状态信息、输出信息或状态估计信息、故障估计信息等, 本文只考虑最理想的情况.

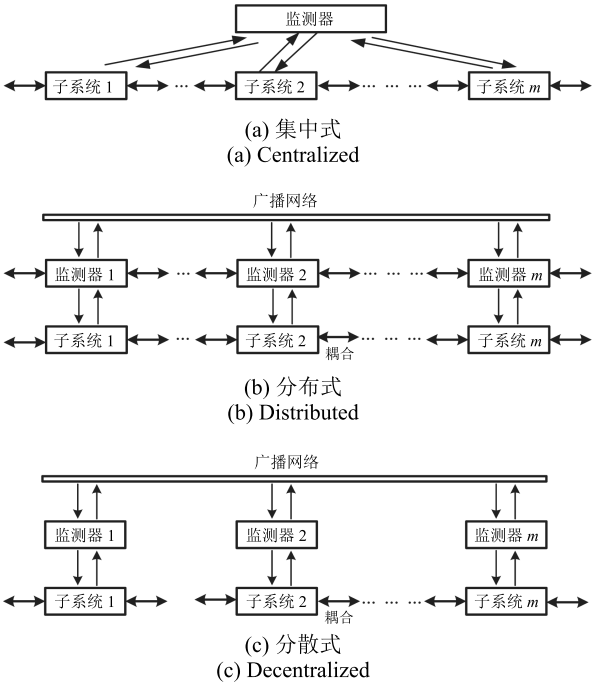


图 1　互联系统的容错控制结构

Fig. 1　The fault-tolerant control structure of the interconnected system

3) 分散式 (Decentralized), 每个子系统只根据自己的状态信息和故障信息设计自身的容错控制器 $u_i(x_i,\theta_i)$, 这种结构不需要任何子系统间的状态和故障信息交互, 设计简单, 容易实现, 但对系统的耦合特性有较强的约束.

三种控制结构的主要区别在于子系统间信息交互的程度不同, 需要指出的是, 除了状态和故障信息之外, 往往还有一些重要的低密度信息, 例如各种指令、信号符号等, 需要在子系统间交互, 这可以用低能耗的广播网络实现, 因此在分布式和分散式控制结构下, 各个子系统间依然存在着重要信息全局分享的渠道, 如图 1 所示.

基于上述三种控制结构, 提出了多种互联系统容错控制方法, 主要有两大类: 1) 独立容错, 当某个子系统内部或者与之相关的耦合机制发生故障后, 通过调节该子系统自身的控制器以实现容错目标; 2) 协同容错, 即某个子系统内部或者与之相关的耦合机制发生故障后, 通过综合调节该子系统和其他子系统的控制器以及整个系统的耦合机制以实现容错目标. 可以看出, 独立容错是传统非互联系统容错控制方法的直接推广, 而协同容错则是充分利用系统的互联和协作特性.

对于机械互联和网络互联系统, 由于其规模较大, 集中式控制结构鲜有应用, 文献 [18] 研究了对称循环互联系统的集中式容错控制方法. 本文只讨论分布式或分散式结构, 对于模型虚拟互联系统, 由于系统规模小, 一般采用集中式结构.

2　机械互联系统容错控制

2.1　问题描述和发展脉络

考虑机械互联系统模型

$$\dot{x}_i = f_i(x_i,u_i,\theta_i^s) + \sum_{j\in N(i)} h_{ij}(x_j,\theta_{ij}^c) \tag{2}$$

其中, h_{ij} 表示子系统 j 对子系统 i 的耦合效应, θ_{ij}^c 表示子系统 i 与子系统 j 之间的耦合故障. 模型 (2) 可以清楚地反映耦合机制对子系统动态的影响. 容错控制的目标就是设计 u_i 使得所有状态收敛于平衡点. 因此这种容错目标可以看作是个体容错目标, 即每个子系统的状态收敛于平衡点.

由于存在着子系统间的耦合机制, 每个子系统都会直接受到与其相连的其他子系统的影响, 这种互联环境给每个子系统的容错控制问题带来极大的挑战, 因此机械互联系统容错控制的关键问题是如何克服耦合机制对子系统容错性能的影响.

针对上述关键问题的容错控制方法发展脉络如下: 首先提出了基于分布式结构的独立容错控制方法, 由于这种方法需要子系统之间的信息交互, 于是进一步提出了分散式结构的独立容错控制方法, 这两类方法都只调节故障子系统自身的控制器, 而没有充分利用系统的互联特性, 因此分布式和分散式的协同容错控制方法应运而生, 这种方法综合调节每个子系统的控制器和互联机制, 丰富了互联系统的容错控制手段, 然而上述方法考虑的系统中子系统的构成都是固定不变的, 针对组成可变的互联系统, 基于组成重构的分布式和分散式协同容错控制方法显得更为重要, 这给互联系统的容错控制带来极大的灵活性.

2.2　独立容错

从分布式结构开始讨论系统 (2) 的容错控制设计, 塞浦路斯 Polycarpou 团队在该方向做出了一系列贡献[19−20], 主要思想是将耦合项 h_{ij} 视为子系统 i 的不确定项, 进而运用鲁棒容错控制方法设计 u_i 以补偿耦合项对子系统 i 的影响, 从而实现子系统 i 对耦合的鲁棒性, u_i 的基本形式如下:

$$u_i(x_i,\theta_i^s,x_j,\theta_{ij}^c) \tag{3}$$

其中, x_i, x_j 可以直接获得或者通过观测器获得, θ_i^s, θ_{ij}^c 可以通过故障估计机制获得[14−16].

分布式结构使得 u_i 的设计可以利用子系统 j 的状态信息, 这更易实现对耦合项的补偿. 文献 [21] 针对带有执行器故障、耦合故障以及外部扰动的线性互联系统, 提出了一种分布式的直接自适应状态反

馈鲁棒跟踪控制策略. 文献 [22] 研究了带有执行器故障和未知函数的非线性互联系统, 提出一种基于模糊自适应观测器的分布式容错控制策略. 上述容错控制设计不需要调节其他子系统的控制器, 因此称为独立容错.

有些互联系统的部分子系统状态信息很难获得, 例如大型挠性航天器, 挠性部件的状态往往都无法直接测量, 因此都对挠性状态做有界性的假设, 只用刚体的状态信息设计整个航天器姿态系统的容错控制律[23], 这种情况下, 分散式结构就显得尤为重要. 文献 [24] 继续沿着鲁棒控制的思路, 针对子系统 i 运用神经网络去逼近未知的耦合项, 进而利用神经网络的学习信息设计 u_i 以补偿耦合项的影响. 此时 u_i 变为如下形式:

$$u_i(x_i, \theta_i^s, \tilde{h}_{ij}) \tag{4}$$

其中, $\tilde{h}_{ij}$ 是用神经网络逼近的耦合项.

文献 [25] 设计的分散式独立容错控制没有在子系统中补偿耦合项, 而是给出了整个系统的耦合项需要满足的全局条件, 类似的方法在有限时间容错控制[26] 以及复杂网络的容错同步问题[27] 中也得到了应用, 这种方法体现出的全局思想即是协同容错的核心思想.

2.3 协同容错

众所周知, 互联系统的稳定性与子系统的动态特性和耦合特性都有密切关联, 协同容错不再像独立容错那样, 在各子系统内局部分析耦合特性、进而局部容错, 而是从互联系统的全局出发, 充分利用各个子系统、耦合机制等多种因素的协同作用进行容错设计.

文献 [28] 从全局的角度分析了所有耦合机制对整个系统的性能影响, 运用回路小增益原理[29] 建立全局可容错条件: 假设在 u_i, $i \in M$ 的作用下, 每个子系统都存在一个 Lyapunov 函数 $V_i(x_i)$, 使得

$$\lim_{t\to\infty} |x_i(t)| = 0, \ \forall V_i(x_i) \geq \max_{j\in N(i)} \gamma_{ij} V_j(x_j) \tag{5}$$

$$\gamma_{i_1 i_2}\gamma_{i_2 i_3}\cdots\gamma_{i_r i_1} < 1 \tag{6}$$

其中, $\forall i_j \in M$, $i_j \neq i_{j'}$, 如果 $j \neq j'$, 那么整个互联系统在 u_i 的作用下, 在原点处是稳定的. 条件 (5) 和条件 (6) 揭示了耦合效应对于全局互联系统性能的影响机理, 该条件对耦合特性提出了明确约束, 要求互联拓扑结构中的任何回路的增益乘积都要小于 1, 基于该条件, 文献 [28] 设计了基于各模态控制器综合调节的分散式容错协同控制策略, 该策略通过子系统的共同调节去补偿耦合项. 多子系统的存在给容错控制设计带来了更多的自由度.

某些互联系统的耦合机制也是可以设计的元素之一, 耦合重构是除了子系统控制器调节之外, 协同容错控制的又一重要手段, 典型的例子就是绳系卫星, 各个卫星之间通过绳子连接, 每颗卫星根据连接端口的绳子角度和张力判断其与其他卫星的相对构型, 文献 [30] 提出的偏移控制 (Offset control) 策略着眼于调节连接端口的位子、张力和角度, 进而调整卫星之间的耦合效应, 以实现整个绳系卫星系统的控制目标. 文献 [28] 进一步针对一类耦合拓扑结构可切换的互联系统, 提出一种耦合重构策略, 运用切换系统方法保证了系统在耦合重构过程中的稳定性.

上述协同容错控制策略没有改变互联系统的现有组成. 实际应用中的很多互联系统, 尤其是工业过程控制系统和电网系统, 由于任务或者维护的需要, 某些子系统需要升级或替换, 某些子系统需要暂时停止工作, 某些子系统需要停止工作, 暂时中断和其他子系统的连接, 而某些新的子系统会加入[31], 这些因素使得该类互联系统具有子系统组成可变的特性. 文献 [32] 针对这样一类互联系统提出一种即插即用的分布式容错控制策略, 当某个子系统发生故障后, 将其拔出互联系统, 避免该故障在系统中传播, 并对剩余的互联系统进行局部的子系统控制器和耦合拓扑结构的调整, 等待该故障子系统修复后再重新插入互联系统. 文献 [33] 强调了即插即用特性对于网络系统容错控制的重要性, 指出这种容错策略应保证插入或拔出任何部件对网络系统的其他部分不产生影响, 不需要对其他部分的控制器进行重构, 基于这种思想, 文献 [34] 提出一种分散式的即插即用协同容错控制策略, 该策略无需调整任何子系统的控制器, 而是充分利用子系统组成的可变特性, 基于回路小增益原理, 通过插入 (新子系统) 或拔出 (故障子系统或正常子系统) 操作实现容错控制目标. 文献 [17, 35] 针对电网的自愈问题, 探讨了微网与主网的联通与断开控制策略, 其本质思想即是通过对电网的组成进行动态重构, 从而实现电网的安全和自愈功能.

综上所述, 机械互联系统的容错控制的三种实现方式分别为子系统控制器调节、耦合机制重构、子系统组成重构, 表 1 对机械互联系统容错控制方法进行了分类和对比, 可以看出互联系统可供设计的元素越多 (冗余度越高), 容错控制的手段就越丰富.

3 网络互联系统容错控制

3.1 问题描述和发展脉络

控制领域中研究较多的网络互联系统是多智能体系统, 这类系统由许多节点通过网络相互连接, 通过协同控制实现某些群体目标.

表 1 机械互联系统容错控制方法总结

Table 1 The summary of fault-tolerant control methods for systems with mechanical interconnections

互联系统特性	容错控制方法	实现方式
固定耦合	分布/分散式独立容错	调节故障子系统 i 的控制器 u_i
固定耦合	分布/分散式协同容错	综合调节故障子系统 i 和其他健康子系统 j 的控制器 u_i, u_j, $j \in M - \{i\}$
耦合强度和拓扑结构可变	分布/分散式协同容错	综合调节故障子系统 i 和其他健康子系统 j 的控制器 u_i, u_j, $j \in M - \{i\}$, 以及系统互联拓扑机构和耦合项
组成可变	分布/分散式协同容错	重构子系统组成以及系统互联拓扑机构和耦合项

考虑如下系统:

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, \theta_i^s) + u_i(x_i, x_j, \theta_i^c), \quad j \in N(i) \tag{7}$$

其中, θ_i^s 表示智能体 i 的故障, 每个智能体可以获得与其信息交互的智能体 (称为邻居集, 记为 $N(i)$) 的状态信息. 因此多智能体的控制设计一般都采用分布式结构, 根据智能体是否从外界接收信息又可分为主从结构 (Leader-following) 和无主结构 (Leaderless), 主从结构即有部分智能体作为领队从外界接受信息, 而其他智能体作为跟随者通过网络连接获得 "领队" 的信息, 从而实现协同控制, 无主结构即所有智能体都不接受外界信息, 只是专注于内部的协同任务, 故没有领导者. 此外, 也有一些分散式控制结构, 如虚拟中心 (Virtual center) 结构, 即所有智能体都跟随一个虚拟领队, 并实现与该虚拟领队的协同控制目标, 这种结构下, 各智能体之间不需要信息交互.

容错控制目标是系统的一致性, 即,

$$\lim_{t\to\infty} |x_i - x_j| = 0$$

因此, 协同控制器 u_i 一般都包含状态的误差项 ($x_i - x_j$), 将此误差作为反馈信息, 进而实现一致性. 此外还有很多其他控制问题, 例如目标聚集、轨迹跟踪、编队保持等, 都可转化为一致性问题加以研究. 这种容错目标可以看作是全局容错目标.

模型 (7) 与模型 (2) 的最大区别在于, 多智能体之间没有机械耦合, 而是通过协同控制器产生了耦合效应, 而这种耦合效应是可以设计的, 因此协同控制器的设计必然是多智能体系统容错控制的主要手段, 而协同控制器的设计依赖于子系统间的网路通信, 因此网络互联系统容错控制的关键问题是如何将网络拓扑特性、网络传输特性和子系统的动态特性相结合, 以实现容错目标.

模型 (7) 包括了网络通信故障 θ_i^c, 例如数据丢包、带宽变化、延时异常等, 注意到关于多智能体系统的很多研究工作都着眼于处理网络的不确定性、不可靠性、非连通性等, 网络故障容错问题作为一个特例, 已经涵盖在这些工作中, 可以参考综述文献 [5].

多智能体系统模型起源于计算机领域, 中文译名为多代理系统, 这种模型可以有效刻画计算机网络连通特性. 我们首先简单介绍一下计算机领域的多代理系统容错策略, 从中可以受到一些启发. 最常用的策略就是代理复制 (Agent replication)[36], 基本思想是当某个代理发生故障, 则复制出一个正常的代理替换故障代理, 这种策略非常适合一个软件在多个主体上有表现的情形. 后续文献提出了一些更为复杂且适用性更强的代理复制机制, 如动态代理复制[37], 自适应代理复制[38] 等. 在故障代理没有备份机制的情况下, 文献 [39] 提出多代理系统重组 (Reorganization) 技术, 将故障代理需要完成的任务转移给其他正常的代理, 以保证整个系统的正常运行, 这类任务重新分配问题也可以运用离散事件系统的自动机理论加以研究[40]. 文献 [41] 研究了计算机多处理器 Banyan 网络的容错控制问题, 通过增加额外的硬件节点和连接以实现容错控制功能, 可以保证原先的 Banyan 拓扑结构, 文献 [42] 则着重考虑了在代理故障情况下的网络连通性, 以及信息传递的路径重构问题. 可以看出利用冗余依然是容错的主要思想.

控制领域的多智能体系统容错控制的发展脉络如下: 独立容错控制方法和协同容错控制方法几乎是并行发展的, 对于前者, 首先研究了线性多智能体系统, 着重讨论了该类系统中智能体的执行器故障, 进而研究了非线性多智能体系统; 对于后者, 首先研究了线性多智能体系统在最优控制框架下的容错控制问题, 保证整个系统在故障下的全局最优性能, 之后关于非线性多智能体的协同容错控制方法开始出现, 上述方法仅限于多智能体系统组成不变的情况, 在多智能体系统的组成可变的情况下, 进一步提出了基于组成重构的容错控制方法.

3.2 独立容错

当智能体 i 发生故障时, 一个自然的想法就是调节 u_i 以补偿故障对该智能体的动态影响, u_i 的基本形式如下:

$$u_i = u_{is}(x_i, \theta_i^s) + u_{ic}(\alpha(x_i - x_j)) \tag{8}$$

其中, u_{is} 用于调节智能体 i 自身的动态, 而 u_{ic} 是协同控制部分, 通过调节函数 α 这种思路是非互联系统容错控制的直接推广, 在很多文献中得以运用. 针对线性多智能体系统, 文献 [43] 研究了一类带有停止响应 (Outage) 和能效损失的执行器故障的线性多智能体, 设计了基于故障估计滑模观测器和虚拟执行器技术的分布式容错控制策略, 文献 [44] 和文献 [45] 针对带有执行器故障和不匹配参数不确定的智能体提出了自适应容错控制方法, 文献 [46] 设计了基于辅助控制器的容错控制策略, 辅助控制器根据故障检测的信息动态作用于故障智能体. 对于非线性多智能体系统, 文献 [47] 针对带有未知动态和时变故障的非线性多智能体系统, 提出了分布式自适应模糊跟踪容错控制策略, 该策略去掉了需要已知未知函数逼近误差上界的假设. 文献 [48] 针对带有执行器故障和领队未知输入的线性和 Lipschitz 非线性多智能体系统, 提出了自适应容错跟踪控制方法, 故障智能体的协同控制律参数根据故障信息在线更新, 以实现故障情况下的一致性. 文献 [49] 通过模糊逻辑逼近非线性, 进而在跟随者故障智能体设计基于故障估计的分布式模糊容错控制方法. 上述的容错控制策略只是调整故障智能体自身的控制器, 因此是独立容错.

在分布式结构下 u_i 的调节依然需要用到智能体 i 邻居的信息. 有两类基于分散式结构的容错控制方法, 第一类是虚拟中心方法, 故障智能体调节自己的控制器以保持和虚拟中心的相对构型, 并不与其他多智能体交互信息[50]; 第二类是内外环控制方法, 每个智能体的动态系统分为内环和外环两个子系统的级联形式, 内环的输出是外环的输入, 主要设计思想是先设计外环输入 (虚拟控制) 以实现协同控制目标 (虚拟控制的设计依然是分布式的, 需要用到邻居的信息), 得到期望的外环输入之后, 再设计内环输入 (智能体真正的控制器) 以使得内环的输出跟踪期望的外环输入. 文献 [51] 提出了一种基于内外环结构的无人机容错编队控制方法, 当无人机发生故障时, 设计内环控制器以使得依然能够跟踪外环所需的期望值, 从而将多机编队容错控制问题转化为了单机容错跟踪控制问题. 文献 [52] 进一步考虑了内外环容错控制中的碰撞避让问题. 这种方法依然是在分布式结构之下, 只是在内环设计容错控制器, 不直接使用其他邻居的信息, 因此也可视为分散式控制.

3.3 协同容错

协同容错的思想是当某个智能体发生故障时, 综合调节多个智能体的控制器. 加拿大 Khorasani 团队在线性多智能体协同容错控制方向做出了重要工作, 文献 [53] 分析了在最优控制框架下的无人机编队容错控制问题, 表明执行器的增益损失故障不会破坏系统的稳定性和一致性目标, 只会影响系统的瞬态性能改变智能体的收敛率, 而如果是漂浮故障, 则一致性无法保证, 但稳定性可以保证, 进一步提出一种全局协同容错控制策略, 调整领队和正常跟随者的动态行为以适应故障智能体的行为变化; 文献 [54] 运用微分对策控制理论研究了线性多智能体系统的全局最优容错控制问题, 给出了全局最优容错控制方案, 并以分布式的形式实现, 微分对策理论也被成功运用在一类带有执行器故障的随机时变多机编队系统的容错控制问题[55]; 文献 [56] 和文献 [57] 分别针对线性系统无人机编队和卫星编队提出三层结构的容错控制策略, 底层故障恢复 (调节故障飞行器的控制器以补偿其执行器故障), 编队层故障恢复 (调节整个编队其他正常飞行器的控制器以弥补由于故障飞行器导致的整体编队的输入能耗损失) 和高层 (负责协调底层和编队层); 文献 [58] 运用离散时间系统理论着重讨论了这种结构中的高层最优容错控制策略; 文献 [59] 针对线性多智能体系统提出一种自适应容错控制策略, 通过引进故障指标去刻画故障估计的准确性对于整个系统一致性的影响, 在该指标的作用下, 通过调整正常智能体协同控制律的权重以补偿故障智能体的控制降级.

文献 [60] 首次针对非线性多智能体系统, 发现了通信协议对于容错协同控制目标的影响机理, 通过调整故障智能体周围智能体的协同控制律实现容错. 文献 [61] 提出了一种基于轨迹重构的无人机容错编队策略, 当某架无人机发生故障无法跟踪编队的预定轨迹时, 则调整整个编队的轨迹, 使得故障无人机依然能够实现跟踪, 这种策略以降低系统性能为代价实现容错, 是性能降级思想[62] 在多智能体系统的推广.

上述方法都着眼于如何维持故障情况下多智能体系统的整体性能, 因此一个基本原则就是保持多智能体系统的完整, 在容错控制过程中, 多智能体系统的组成保持不变. 但是当某个智能体发生严重故障甚至彻底损坏时, 上述方法往往无能为力. 在这种情况下, 就有必要对系统的组成进行重构. 文献 [63] 以高铁为对象, 研究了一类既有机械连接又有网络连接的互联系统, 高铁的每节车厢都与相邻车厢有机械互联 (每节车厢可看作机械互联系统的一个子系统), 而一组车厢和另一组车厢之间有网络互联 (每组车厢可看作多智能体系统的一个子系统), 牵引控制时, 每一组车厢只用到其中一节主车厢的控制器, 文献 [63] 提出的容错策略主要思想是一旦某主车厢的执行机构发生故障, 则用到该组内其他

车厢的控制器, 一旦一组车厢的执行机构全部完全失效, 则进行车厢组的重构, 该组与相邻组合并, 并由原相邻组的控制器控制. 如果把一组车厢看成一个智能体, 那么这种容错控制方法本质上就是系统组成的重构, 将故障的智能体与正常的智能体合并, 使得故障从系统中消失.

系统组成重构方法在其他一些多智能体系统也有应用, 文献 [64] 提出的无人机容错编队控制基本思想就是让故障无人机离开编队, 而对剩余的机群进行队形调整. 文献 [65] 针对多机器人编队运动中可能出现的机械故障和网络故障, 提出了一种基于相邻矩阵的容错控制方法, 该方法将故障机器人移出编队, 并调整编队中剩余机器人的协同控制器, 以维持原先的队型. 文献 [66] 将失效的智能体从系统中移出, 并调整剩余智能体的协同控制律从而对网络拓扑结构进行重构, 以恢复系统的一致性. 文献 [67] 研究了一类航天器编队的容错控制问题, 在该类编队的任务过程中, 往往需要某些航天器之间进行对接或分离, 而某些航天器会离开编队, 某些新的航天器会加入编队. 文献 [67] 运用变维数切换系统模型对其建模, 进而提出了一种基于组成变化的容错编队控制策略, 通过故障航天器的离开编队和与正常航天器对接两种方式消除故障对编队系统的影响. 这种组成重构的容错方式与计算机领域的代理复制以及机械互联系统的即插即用本质上是相同的. 组成的可变性给容错控制带来了更大的自由度.

综上所述, 网络互联系统容错控制的实现方式可分为协同控制器重构和子系统重构两大类, 表 2 对网络互联系统容错控制方法进行了分类和对比.

4 模型虚拟互联系统容错控制

与互联系统不同, 还有几类比较特殊的单一系统, 本身并没有明显的互联特性, 然而运用互联系统方法可以更为有效地分析和设计这些系统的容错控制.

1) 基于分解的容错控制. 对于难以直接分析和设计的复杂系统, 往往将复杂系统通过某种方式分解为若干个子系统, 再分别处理, 分解方法是处理复杂系统容错控制的重要手段.

文献 [68] 和文献 [69] 针对线性和非线性系统分别提出了基于系统分解思想的故障估计和容错控制方法, 首先利用故障和输出分布矩阵对系统进行坐标变换, 将系统转换为两个子系统的互联形式, 其中一个子系统不受故障的影响, 在此基础上结合已知条件设计降阶的观测器估计未知的状态变量; 另一个子系统是包括故障, 但是其状态可观测, 设计自适应观测器产生状态估计值去实现故障的估计, 解决了具有参数不确定动态系统的鲁棒诊断精度欠佳问题, 实现了故障和系统干扰的分离, 显著提高了故障估计的快速性、准确性和鲁棒性.

文献 [70] 针对具有空间分布参数特性的颗粒结晶过程控制系统, 首先建立偏微分系统, 并将该偏微分系统分解成有限个子系统的互联形式, 使得每个子系统只有一个控制输入, 而不受其他控制输入的影响, 进而针对执行器故障在每个子系统中分别设计故障诊断与容错控制策略. 这种分解思想将故障对系统的影响分解到各个子系统中, 从而方便地实现了故障的隔离和定位.

文献 [71] 针对复杂系统设计容错传感器网络, 为了便于设计, 将复杂系统分解为一系列互联的子系统, 保证系统仍然可观且需要的传感器个数最少. 系统分解使得可以分别对每个子系统设计降维观测器而不是对整个复杂系统升级高维观测器.

2) 奇异摄动理论. 奇异摄动问题是非线性控制理论的重要课题之一, 由于很多工程系统中各个模块的时间尺度不同, 奇异摄动理论将这类系统分解为快系统和慢系统两个部分, 进而基于互联系统的小增益原理分析系统的稳定性, 所得结论表明如果快系统能够足够快地收敛, 那么其对慢系统的影响就可以视为慢系统动态方程中的一个很小的耦合项. 奇异摄动理论已经成功用于非线性系统的分离原理[72], 将观测器误差系统和被控系统看成两个互联的子系统, 只要高增益观测器的增益系数足够大, 观测器的估计误差收敛足够快, 两个子系统间的小增益原理即可满足,这使得控制器的设计无需考虑观测

表 2 网络互联系统容错控制方法总结

Table 2 The summary of the fault-tolerant control methods for systems with network interconnections

互联系统特性	容错控制方法	实现方式
组成不变	分布/分散式独立容错	调节故障子系统 i 的控制器 u_i 以及子系统 i 获得信息的通信协议
组成不变	分布式协同容错	综合调节故障子系统 i 和其他健康子系统 j 的控制器 $u_i, u_j, j \in M - \{i\}$ 以及这些子系统获得信息的通信协议
组成可变	分布式协同容错	重构子系统组成以及系统网络拓扑机构和通信协议

器的估计值. 基于这种思想, 文献 [73] 针对一类非线性系统提出了基于高增益故障估计观测器的容错控制方法, 足够大的观测器增益使得状态估计和故障估计的速度相对于容错控制的速度足够快, 从而使得故障估计和容错控制可以分开独立设计.

3) 非最小相位系统. 非最小相位非线性系统可建模为直接受控子系统和零动态的互联系统, 文献 [74] 针对直接受控子系统中带有的故障, 设计了两种滑模控制器, 其中二阶滑模控制器可以镇定零动态但不能镇定直接受控系统, 另一种一阶滑模控制器则相反, 可以镇定直接受控系统, 却不能镇定零动态, 通过在这两种滑模控制器之间切换以保证整个系统在故障下的稳定性. 文献 [75] 研究了一类切换非最小相位系统, 不需要在非最小相位模态内部对其不稳定零动态进行补偿, 也不需要镇定直接受控系统稳定, 因为每个模态的零动态和直接受控系统的状态会有不同, 如果每个模态的直接受控状态可以构成整个状态空间, 则可以充分利用各个模态的稳定动态之间的平衡机理, 设计出有效的基于时间和状态的镇定切换律, 这种容错控制思想充分利用切换系统多模态的冗余特性, 与互联系统组成重构的思想类似.

5 总结与展望

本文系统总结了互联系统的容错控制研究成果, 从独立容错到协同容错, 从子系统控制器调节到耦合重构, 再到系统组成重构, 全面介绍了互联系统的各类容错控制方法. 可以看出互联环境给容错控制带来了很多难题, 但也为容错控制提供了更丰富的手段. 虽然在该方向上取得了不少成果, 但仍然有许多问题需要做进一步研究. 最后, 对该方向的发展趋势做一个展望:

1) 互联系统容错控制的性能分析、评估与优化. 目前大部分互联系统的容错控制研究仅限于探讨系统在平衡位置的稳定性, 而对于互联系统的动态性能 (如瞬态超调)、静态性能 (如稳态误差)、性能降级程度等指标的分析、评估与优化成果鲜有报道. 大部分工程系统对动态和静态性能指标都有很高的要求, 例如多机编队、轨道交通、智能电网等, 在保证系统稳定性的前提下, 进一步分析和评估容错性能指标并对其予以优化显得非常迫切, 如何将单一系统的性能分析、评估与优化方法推广到互联系统值得深入研究.

2) 互联系统类型的拓展. 目前大部分互联系统的容错控制研究所考虑的互联系统模型都具有式 (1) 的形式, 这种模型确实在工程实践中应用广泛, 且便于推广现有的单一系统容错控制方法, 然而很多实际系统用这种模型难以准确描述. 拓展互联系统的类型是拓展容错控制方法适用范围的必经途径, 例如可以研究分布参数互联系统、分数阶互联系统、多尺度互联系统等, 这些互联系统的容错控制需要将常微分方程理论、偏微分方程理论、分数阶理论、多尺度融合理论、以及容错控制理论进行深入结合.

3) 故障类型的拓展. 目前大部分互联系统的容错控制研究考虑的故障大多是常规的执行器和传感器故障, 而对于一些难以检测和调节的故障研究甚少, 例如间歇性故障、微小故障、复合故障等, 这些故障对系统的安全性、可靠性以及寿命都会产生严重的影响, 而且在单一系统中, 难以用常规的容错控制方法处理, 在更为复杂的互联环境下, 耦合的存在会给这些故障的调节带来巨大的学术挑战, 然而互联系统多个子系统的存在也会为容错控制提供一种冗余, 从而发展出更灵活更丰富的容错手段.

References

1 Antonelli G. Interconnected dynamic systems: an overview on distributed control. *IEEE Control Systems*, 2013, **33**(1): 76−88

2 Patton R J, Kambhampati C, Casavola A, Zhang P, Ding S, Sauter D. A generic strategy for fault-tolerance in control systems distributed over a network. *European Journal of Control*, 2007, **13**(2−3): 280−296

3 Di Gennaro S. Output stabilization of flexible spacecraft with active vibration suppression. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, **39**(3): 747−759

4 Vournas C D, Papadias B C. Power system stabilization via parameter optimization-application to the Hellenic interconnected system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1987, **2**(3): 615−622

5 Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control. *IEEE Control Systems*, 2007, **27**(2): 71−82

6 Blanke M, Kinnaert M, Lunze J, Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin: Springer, 2006.

7 Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Modern Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
(周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000.)

8 Hu Chang-Hua, Xu Hua-Long. *Design and Analysis of Fault-Tolerant Control and Fault Diagnosis for Control System*. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
(胡昌华, 许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计. 北京: 国防工业出版社, 2000.)

9 Jiang Bin, Mao Ze-Hui, Yang Hao, Zhang You-Min. *Fault Diagnosis and Fault Regulation for Control Systems*. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
(姜斌, 冒泽慧, 杨浩, 张友民. 控制系统的故障诊断与故障调节. 北京: 国防工业出版社, 2009.)

10 Liu L, Wang Z S, Zhang H G. Adaptive fault-tolerant tracking control for MIMO discrete-time systems via reinforcement learning algorithm with less learning parameters. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, DOI: 10.1109/TASE.2016.2517155, to be published

11 Wang Z S, Liu L, Zhang H G, Xiao G Y. Fault-tolerant controller design for a class of nonlinear MIMO discrete-time systems via online reinforcement learning algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2016, **46**(5): 611−622

12 Liu L, Wang Z S, Zhang H G. Adaptive NN fault-tolerant control for discrete-time systems in triangular forms with actuator fault. *Neurocomputing*, 2015, **152**: 209−221

13 Khalil H K. *Nonlinear Systems* (3rd edition). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

14 Meskin N, Khorasani K. Actuator fault detection and isolation for a network of unmanned vehicles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(4): 835−840

15 Keliris C, Polycarpou M M, Parisini T. A distributed fault detection filtering approach for a class of interconnected continuous-time nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, **58**(8): 2032−2047

16 Zhang X D, Zhang Q. Distributed fault diagnosis in a class of interconnected nonlinear uncertain systems. *International Journal of Control*, 2012, **85**(11): 1644−1662

17 Guo Zhi-Zhong. Scheme of self-healing control frame of power grid. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, **29**(10): 85−91
(郭志忠. 电网自愈控制方案. 电力系统自动化, 2005, **29**(10): 85−91)

18 Zhang Ying-Wei, Liu Jian-Chang, Zhang Si-Ying. Reliable control for a class of interconnected systems. *Control and Decision*, 2005, **20**(8): 901−904, 908
(张颖伟, 刘建昌, 张嗣瀛. 一类复杂系统的容错控制. 控制与决策, 2005, **20**(8): 901−904, 908)

19 Panagi P, Polycarpou M M. Distributed fault accommodation for a class of interconnected nonlinear systems with partial communication. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(12): 2962−2967

20 Panagi P, Polycarpou M M. A coordinated communication scheme for distributed fault tolerant control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 386−393

21 Jin X Z, Yang G H. Distributed adaptive robust tracking and model matching control with actuator faults and interconnection failures. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, **7**(5): 702−710

22 Tong S C, Huo B Y, Li Y M. Observer-based adaptive decentralized fuzzy fault-tolerant control of nonlinear large-scale systems with actuator failures. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, **22**(1): 1−15

23 Xiao B, Hu Q L, Zhang Y M. Fault-tolerant attitude control for flexible spacecraft without angular velocity magnitude measurement. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, **34**(5): 1556−1561

24 Panagi P, Polycarpou M M. Decentralized fault tolerant control of a class of interconnected nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(1): 178−184

25 Lou Wen-Tao, Tong Shao-Cheng. Adaptive fault-tolerant tracking control of fuzzy interconnected systems using Takagi-Sugeno fuzzy models. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2014, **28**(5): 111−119
(娄文涛, 佟绍成. 一类模糊 T-S 模型互联系统的自适应容错跟踪控制. 模糊系统与数学, 2014, **28**(5): 111−119)

26 Hua C C, Li Y F, Wang H B, Guan X P. Decentralised fault-tolerant finite-time control for a class of interconnected nonlinear systems. *IET Control Theory and Applications*, 2015, **9**(16): 2331−2339

27 Wang Z S, Li T S, Zhang H G. Fault tolerant synchronization for a class of complex interconnected neural networks with delay. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2014, **28**(10): 859−881

28 Yang H, Jiang B, Staroswiecki M, Zhang Y M. Fault recoverability and fault tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems. *Automatica*, 2015, **54**: 49−55

29 Liu T F, Hill D J, Jiang Z P. Lyapunov formulation of ISS cyclic-small-gain in continuous-time dynamical networks. *Automatica*, 2011, **47**(9): 2088−2093

30 Godard, Kumar K D, Tan B. Fault-tolerant stabilization of a tethered satellite system using offset control. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, **45**(5): 1070−1084

31 Bendtsen J, Trangbaek K, Stoustrup J. Plug-and-play control-modifying control systems online. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(1): 79−93

32 Riverso S, Boem F, Ferrari-Trecate G, Parisini T. Fault diagnosis and control-reconfiguration in large-scale systems: a plug-and-play approach. In: Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2014. 4977−4982

33 Kambhampati C, Patton R J, Uppal F J. Reconfiguration in networked control systems: fault tolerant control and plug-and-play. In: Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety of Technical Processes. Beijing, China: IFAC, 2006. 126−131

34 Yang H, Jiang B, Staroswiecki M. Fault tolerant control for plug-and-play interconnected nonlinear systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, **353**(10): 2199−2217

35 Zhang Wei-Ya, Li Yong-Li, Sun Guang-Yu, Jin Wei, Li Xiao-Ye. Hierarchical-partitioned voltage control under security safeguard system of microgrid. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(13): 1−7, 15
(张玮亚, 李永丽, 孙广宇, 靳伟, 李小叶. 微电网安全防御体系下电压分层分区控制. 电力系统自动化, 2015, **39**(13): 1−7, 15)

36 Guerraoui R, Schiper A. Software-based replication for fault tolerance. *Computer*, 1997, **30**(4): 68−74

37 Guessoum Z, Briot J P, Marin O, Hamel A, Sens P. Dynamic and adaptive replication for large-scale reliable multi-agent systems. *Software Engineering for Large-Scale Multi-Agent Systems*. Heidelberg, Berlin: Springer, 2003. 182−198

38 Guessoum Z, Faci N, Briot J P. Adaptive replication of large-scale multi-agent systems-towards a fault-tolerant multi-agent platform. *Software Engineering for Large-Scale Multi-Agent Systems IV*. Heidelberg, Berlin: Springer, 2006. 238−253

39 Mellouli S. A reorganization strategy to build fault-tolerant multi-agent systems. *Advances in Artificial Intelligence*. Heidelberg, Berlin: Springer, 2007. 61−72

40 Karimadini M, Lin H. Fault-tolerant cooperative tasking for multi-agent systems. *International Journal of Control*, 2011, **84**(12): 2092−2107

41 Bataineh S M, Allosl B Y. Fault-tolerant multistage interconnection network. *Telecommunication Systems*, 2001, **17**(4): 455−472

42 Bermond J C, Homobono N, Peyrat C. Large fault-tolerant interconnection networks. *Graphs and Combinatorics*, 1989, **5**(1): 107−123

43 Zhou B, Wang W, Ye H. Cooperative control for consensus of multi-agent systems with actuator faults. *Computers and Electrical Engineering*, 2014, **40**(7): 2154−2166

44 Wang X, Yang G H. Cooperative adaptive fault-tolerant tracking control for a class of multi-agent systems with actuator failures and mismatched parameter uncertainties. *IET Control Theory and Applications*, 2015, **9**(8): 1274−1284

45 Ma H J, Yang G H. Adaptive fault tolerant control of cooperative heterogeneous systems with actuator faults and unreliable interconnections. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, **61**(11): 3240−3255

46 Chen G, Song Y D. Robust fault-tolerant cooperative control of multi-agent systems: a constructive design method. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, **352**(10): 4045−4066

47 Shen Q K, Jiang B, Shi P, Zhao J. Cooperative adaptive fuzzy tracking control for networked unknown nonlinear multiagent systems with time-varying actuator faults. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, **22**(3): 494−504

48 Zuo Z Q, Zhang J, Wang Y J. Adaptive fault-tolerant tracking control for linear and Lipschitz nonlinear multi-agent systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6): 3923−3931

49 Wang Wei, Wang Dan, Peng Zhou-Hua. Fault-tolerant control for synchronization of uncertain nonlinear multi-agent systems. *Control and Decision*, 2015, **30**(7): 1303−1308
(王巍, 王丹, 彭周华. 不确定非线性多智能体系统的分布式容错协同控制. 控制与决策, 2015, **30**(7): 1303−1308)

50 Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, **4**(4): 387−403

51 Xu Q, Yang H, Jiang B, Zhou D H, Zhang Y M. Fault tolerant formations control of UAVs subject to permanent and intermittent faults. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, **73**(1−4): 589−602

52 Liu Z X, Yu X, Yuan C, Zhang Y M. Leader-follower formation control of unmanned aerial vehicles with fault tolerant and collision avoidance capabilities. In: Proceedings of the 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Denver, CO, USA: IEEE, 2015. 1025−1030

53 Semsar-Kazerooni E, Khorasani K. Team consensus for a network of unmanned vehicles in presence of actuator faults. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(5): 1155−1161

54 Semsar-Kazerooni E, Khorasani K. Optimal consensus algorithms for cooperative team of agents subject to partial information. *Automatica*, 2008, **44**(11): 2766−2777

55 Shi Jian-Tao, He Xiao, Zhou Dong-Hua. Cooperative fault tolerant control for multi-vehicle systems. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2015, **49**(6): 819−824
(史建涛, 何潇, 周东华. 多机编队系统的协同容错控制. 上海交通大学学报, 2015, **49**(6): 819−824)

56 Azizi S M, Khorasani K. Cooperative actuator fault accommodation in formation flight of unmanned vehicles using relative measurements. *International Journal of Control*, 2011, **84**(5): 876−894

57 Azizi S M, Khorasani K. A hierarchical architecture for cooperative actuator fault estimation and accommodation of formation flying satellites in deep space. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**(2): 1428−1450

58 Tousi M M, Khorasani K. Optimal hybrid fault recovery in a team of unmanned aerial vehicles. *Automatica*, 2012, **48**(2): 410−418

59 Saboori I, Khorasani K. Actuator fault accommodation strategy for a team of multi-agent systems subject to switching topology. *Automatica*, 2015, **62**: 200−207

60 Yang H, Staroswiecki M, Jiang B, Liu J Y. Fault tolerant cooperative control for a class of nonlinear multi-agent systems. *Systems and Control Letters*, 2011, **60**(4): 271−277

61 Yu X, Liu Z X, Zhang Y M. Fault-tolerant formation control of multiple UAVs in the presence of actuator faults. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, **26**(12): 2668−2685

62 Zhang Y M, Jiang J. Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, **39**(3): 838−848

63 Wang Y J, Song Y D, Gao H, Lewis F L. Distributed fault-tolerant control of virtually and physically interconnected systems with application to high-speed trains under traction/braking failures. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(2): 535−545

64 Giulietti F, Pollini L, Innocenti M. Autonomous formation flight. *IEEE Control Systems*, 2000, **20**(6): 34−44

65 Shi Gui-Fen, Fang Hua-Jing. Fault tolerance of multi-robot formation based on adjacency matrix. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2005, **33**(3): 39−42
(石桂芬, 方华京. 基于相邻矩阵的多机器人编队容错控制. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2005, **33**(3): 39−42)

66 Zhang J H, Xu X M, Hong L, Yan Y Z. Consensus recovery of multi-agent systems subjected to failures. *International Journal of Control*, 2012, **85**(3): 280−286

67 Yang H, Jiang B, Cocquempot V, Chen M. Spacecraft formation stabilization and fault tolerance: a state-varying switched system approach. *Systems and Control Letters*, 2013, **62**(9): 715−722

68 Jiang B, Wang J L, Soh Y C. Robust fault diagnosis for a class of linear systems with uncertainty. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, **22**(5): 736−740

69 Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault diagnosis based on adaptive observer for a class of non-linear systems with unknown parameters. *International Journal of Control*, 2004, **77**(4): 367−383

70 Giridhar A, El-Farra N H. A unified framework for detection, isolation and compensation of actuator faults in uncertain particulate processes. *Chemical Engineering Science*, 2009, **64**(12): 2963−2977

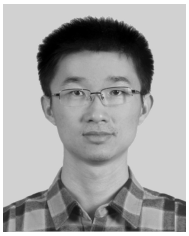
71 Chamseddine A, Noura H. Sensor network design for complex systems. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2012, **26**(6): 496−515

72 Atassi A N, Khalil H K. A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, **44**(9): 1672−1687

73 Du M, Mhaskar P. Isolation and handling of sensor faults in nonlinear systems. *Automatica*, 2014, **50**(4): 1066−1074

74 Wang Y Q, Zhou D H, Gao F R. Robust fault-tolerant control of a class of non-minimum phase nonlinear processes. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(6): 523−537

75 Yang H, Jiang B, Zhang H G. Stabilization of non-minimum phase switched nonlinear systems with application to multi-agent systems. *Systems and Control Letters*, 2012, **60**(10): 1023−1031



杨 浩 南京航空航天大学自动化学院教授. 主要研究方向为切换与互联系统的容错控制及其应用. 本文通信作者.
E-mail: haoyang@nuaa.edu.cn
(**YANG Hao** Professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest covers fault tolerant control of switched and interconnected systems and their applications. Corresponding author of this paper.)

姜 斌 南京航空航天大学自动化学院教授. 主要研究方向为智能故障诊断与容错控制及其应用.
E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn
(**JIANG Bin** Professor at the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest covers intelligent fault diagnosis and fault tolerant control and their applications.)

周东华 山东科技大学和清华大学教授. 主要研究方向为动态系统的故障诊断与容错控制, 故障预测与最优维护技术.
E-mail: zdh@mail.tsinghua.edu.cn
(**ZHOU Dong-Hua** Professor at Shandong University of Science and Technology and Tsinghua University. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, fault prediction, and optimal maintenance.)