

分 类 号：TP13
研究生学号：2201704069

单位代码：10190
密 级：公 开

長春工業大學
碩士專業學位論文

陈帅奇

2020 年 6 月



多智能体系统的分布式故障估计方法研究

Researches on Distributed Fault Estimation Observer Design of Multi-agent Systems

硕 士 研 究 生：陈帅奇

校 内 导 师：王申全 教授

企 业 导 师：王志乾 研究员

申 请 学 位：工程硕士

领 域：控制工程

所 在 单 位：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2020 年 6 月

授予学位单位：长春工业大学

摘 要

智能体系统是一种具有独立性和自主性的系统,可以通过传感器感知环境,通过效应器自治地作用于环境,自主规划和选择执行策略,大大提高了工程中的工作效率,在实际工程中有着越来越广泛的应用。若干个单独的智能体系统通过通信网络互相协作完成复杂任务,这些单独智能体构成了复杂度更高的多智能体系统。多智能体系统由于其自身特殊性,比传统系统更容易发生故障。通过互相通讯合作的方式可以让多智能体系统完成共同目标或独立目标,如果其中一个智能体发生故障时,往往会对其它智能体产生影响并造成整个多智能体系统无法完成工作。在多智能体系统中引入故障检测与估计技术可以很好的解决上述问题。

本论文利用鲁棒线性矩阵不等式技术和 Lyapunov 函数稳定性理论,研究了多智能体系统的 H_∞ 鲁棒性能,实现多智能体系统在故障情况下,利用设计的分布式故障估计观测器,能够有效的估计故障发生的类型及大小,并保证系统的稳定性。在前面研究基础之上,通过引进分布式中间故障估计器,消除了观测器匹配条件,进一步提高了故障估计的性能。全文的主要工作总结如下:

(1) 针对一类带有模型不确定性的多智能体系统研究分布式故障估计观测器设计问题。首先基于有向通信拓扑定义相对输出估计误差。然后利用构建的可调节参数,设计一种新的分布式故障估计观测器,实现对状态和故障的同时估计。在 H_∞ 极点配置法的基础上,得到可实现的分布式误差估计增益。最后,对该方法在带有扰动和未考虑扰动两种情况下的有效性和可行性进行了分析。

(2) 针对一类多智能体系统研究基于中间估计器的故障估计问题。不同于(1)中的工作,提出了一种基于中间估计器的新型分布式故障估计方法,消除了现有的故障估计方法大多都需要满足观测器匹配条件的限制。利用故障分布矩阵的性质,设计一种中间估计器,对状态和故障同时进行估计。通过构建同时包含原系统状态和中间估计变量的新 Lyapunov 函数,获得了分布式故障估计器存在的充分条件和分布式故障估计观测器的增益矩阵。最后分别针对满足观测器匹配条件和不满足观测器匹配条件两种情况下验证所提方法的有效性。

最后,对全文所做工作进行了总结,指出目前多智能体系统分布式故障估计理论研究中存在的一些问题和进一步发展方向,并对未来的研究工作进行展望。

关键词: 多智能体系统; 分布式故障估计; 模型不确定性; 可调参数; 中间故障估计器

Abstract

Intelligent agent system is an independent and autonomous system, which can perceive the environment by sensors, autonomously act on the environment by effectors, and autonomously plan and select execution strategies, which greatly improves the work efficiency in engineering and has been widely used in practical engineering. The multi-agent system is composed of several agents, which can accomplish the tasks that cannot be accomplished by a single agent through mutual cooperation. Compared with traditional systems, multi-agent systems are more complex and prone to failure. Because the multi-agent system is a system in which the agents cooperate with each other to accomplish a goal or an independent goal, it will affect the other agents if one agent fails and cause the whole multi-agent system to fail to complete the work. In order to solve the above problems, fault detection and estimation techniques are widely used in multi-agent systems. This paper uses the function of Lyapunov stability theory and robust linear matrix inequality (LMI) techniques, the multi-agent system are studied the H_∞ robust performance, distributed fault estimated observer can effectively estimate failure type and size when multi-agent system under fault condition, and guarantee the stability of the system. Based on the previous research, the distributed intermediate fault estimator is introduced to eliminate the matching condition of the observer and further improve the performance of fault estimation. The main work of this paper is summarized as follows:

(1) The design of distributed fault estimation observer for multi-agent systems with model uncertainty is studied. Firstly, relative output estimation error is defined based on directed communication topology. Then a new distributed fault estimation observer is designed based on the built adjustable parameters to realize simultaneous estimation of state and fault. Based on H_∞ pole assignment method, the feasible gain of distributed fault estimation observer is calculated. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified under two conditions, with and without disturbance.

(2) A class of multi-agent system fault estimation problem based on intermediate estimator is studied. Different from the work in (1), a new distributed fault estimation method of intermediate fault estimator is proposed, which eliminates the limitation that most existing fault estimation methods need to satisfy the matching condition of the observer. Based on the properties of fault distribution matrix, an intermediate estimator is designed to estimate both state and fault. By constructing a new Lyapunov function which

includes both the original system state and the intermediate estimation variables, the sufficient conditions for the existence of the distributed fault estimator and the gain matrix of the distributed fault estimation observer are obtained. The effectiveness of the proposed method is analyzed in two cases which are satisfying the observer matching condition and not satisfying the observer matching condition.

Finally, the work done in this paper is summarized, points out some problems and further development direction in the theoretical research on distributed fault estimation of multi-agent systems and predicts the future research work.

Keywords: multi-agent system; distributed fault estimation; model uncertainty; adjustable parameters; intermediate fault estimator

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题来源及研究意义.....	1
1.2 多智能体系统研究概述.....	2
1.2.1 多智能体系统基本概念和特点	2
1.2.2 多智能体系统研究的基本问题	5
1.3 故障检测和估计技术及其发展现状.....	6
1.3.1 传统故障检测和估计技术及其发展现状	6
1.3.2 多智能体系统分布式故障检测和估计技术发展概述及研究现状	7
1.4 本文主要内容与章节安排.....	9
第 2 章 数学基础和预备知识	11
2.1 标记符号	11
2.2 克罗内克积	11
2.3 代数图论	11
2.4 线性矩阵不等式	12
2.5 LKF 稳定性理论.....	13
2.6 H_∞ 鲁棒控制理论基础.....	13
2.7 本章小结	15
第 3 章 带有模型不确定性的多智能体系统分布式故障估计	16
3.1 引言	16
3.2 问题描述	17
3.2.1 模型不确定性多智能体系统	17
3.2.2 误差系统构建	18
3.3 分布式故障估计观测器和控制器协同设计	19
3.3.1 H_∞ 性能分析.....	19
3.3.2 分布式故障估计观测器设计	20
3.4 仿真实验	22
3.5 本章小结	28
第 4 章 基于中间估计器的多智能体系统分布式故障估计	29
4.1 引言	29

4.2 问题描述	30
4.2.1 分布式中间估计器设计	30
4.2.2 基于中间估计器的误差系统构建	31
4.3 基于中间估计器的多智能体系统分布式故障估计观测器设计	32
4.4 仿真实验	33
4.5 本章小结	44
第 5 章 全文总结与展望	45
5.1 全文总结	45
5.2 工作展望	45
致 谢	47
参考文献	48
作者简介	48
攻读硕士学位期间研究成果	54

第1章 绪论

1.1 课题来源及研究意义

随着世界经济的迅猛发展和工业化水平的不断进步,促进了控制系统规模不断扩大,许多高科技领域和民用工业的控制系统逐步向集成化、高智能化、一体化和复杂化等方面发展。在此背景下,多智能体系统因其可以实现集成控制、编队控制、数据融合、并行计算、多机器人合作控制、交通车辆控制等功能被广泛应用于各行各业。多智能体系统大大提高了工业及其他领域的产量和生产效率,方便了人们的出行与生活。但是如果多智能体系统长时间高负荷的工作,或得不到妥善的维护时,很容易发生故障。由于大部分的多智能体系统是在一个环境中交互的多个智能体组成的计算系统,当多智能体系统中某个智能体发生故障或受到干扰时,错误信号会通过智能体之间的通信网络影响到其他智能体,进而会影响到整个智能体系统的性能,造成整个系统的不稳定。

多飞行器编队是一个典型的多智能体系统应用实例,近年来在民生和军事上都得到了大量应用。在2018年5月1日,我国西安1374架飞行器的编队表演打破了“最多的飞行器同时飞行”的吉尼斯世界纪录,同时在表演中出现的失误也引起了业内的广泛关注。在飞行表演的过程中一些飞行器偏离了既定飞行轨迹,使得飞行器在空中拼出了错误的图案。后确定是外界的干扰信号引发无人机通讯系统故障,从而导致了这次失误发生。在军事领域,我国的军用无人机技术得到飞速发展。特别是无人机蜂群战术可以实现无人机用超高的速度和巨大的规模协同进行作战,减少人员伤亡,这点优势将改变未来战争。无人机蜂群战术如图1.1所示。



图1.1 无人机蜂群战术

但是目前的无人机技术容易被电子对抗手段干扰拦截,使得整个无人机蜂群系统发生故障,导致作战失败。不仅如此,当多智能体系统应用在大型工业或者大型机械上时,若系统发生故障而没有被尽快发现和排除,极有可能会造成系统失灵,甚至危及生命,造成无法弥补的灾难性后果。2015年7月德国大众工厂一名工人正在和同事安装机器,身后的工业机器人突然启动撞击了受害人,造成其死亡。在民用领域若多智能体系统发生故障,同样会造成严重的事故。2016年美国亚利桑那州一名女子被优步自动驾驶汽车撞伤之后不幸身亡,因为这台自动驾驶汽车的传感器发生故障。这也是全球首例自动驾驶车辆致人死亡的事故。由此可见,如何减低故障对整个多智能体系统的影响,提高多智能体系统的稳定性、安全性与可靠性有着重要的现实意义。

常规故障诊断方法可以保证故障后系统性的可靠性,但由于多智能体系统中的每个智能体之间通过一致性通信协议紧密联系,传统故障诊断技术不能直接适用于多智能体系统,必须探讨针对多智能体系统的分布式故障诊断方法。但目前对多智能体系统的分布式故障检测问题研究还不够成熟,研究方向大多还基于常规故障诊断方法,所以继续研究和探索分布式故障检测的新理论和新方法,加强故障检测与诊断技术在多智能体系统中的应用和推广,对现代工业化生产、国防和民生都具有十分重要的价值。

1.2 多智能体系统研究概述

1.2.1 多智能体系统基本概念和特点

智能体是指一种具有自治性,反应性,预动性,社会性和进化性的实体。其中自治性是指,智能体具有一定的自我管理和自我调节能力,能够根据外界的变化能够主动调整自身状态,不单单是被动的接受外界影响。反应性是指其能对外界的刺激做出反应的能力。预动性是指能够对即将发生的事情做出判断,提前做出反应。社会性是指,智能体具有和其他智能体进行沟通,合作的能力。可以通过互相配合,集体协作达到既定目标。进化性是指,智能体可以通过学习或积累经验,对自己行为模式进行调整以适应新环境。具有以上特点的程序、软件或者一个实体,如汽车、无人机、机器人等,都可以被看作是一个智能体。在实际应用中,人们通常将智能体嵌入到人们所需要的工作环境中,提高工作效率,方便生产生活。

多智能体系统,是指由多个可以相互协调工作的单一智能体构成的复杂系统,通过互相通讯、协作的方式,来完成单一智能体无法完成的复杂工作。多智能体系统广泛存在于大自然中,在许多生物集群中都发现了群体智能的存在。当需要解决一些复杂问题时,生物群体会选择集体协作的方式或由多个生物个体协同完成工作。比如狼

群协作围捕猎物，鸟类的集体迁徙，鲸鱼和海豚等大型海洋的集体捕食行为等都是多智能体系统在生物群体中存在的实例。狼群协作围捕猎物，鸟类的集体迁徙，鲸鱼和海豚等大型海洋的集体捕食行为分别如图 1.2-1.4 所示。



图 1.2 狼群围捕野牛



图 1.3 鸟类集体迁徙



图 1.4 海豚集体捕食

多智能体系统的应用研究开始于 20 世纪 80 年代中期, 1989 年第一届国际多智能体欧洲学术会议举行, 标志着该理论受到了专家学者的广泛重视。同年, Durfee 和 Lesser 讨论了在多智能体系统中, 如何通过彼此协作的方式在智能体之间分享任务^[1]。后来, 为了满足工程和工业上的需求, 美国麻省理工学院的 Minsky 把生物界的这种社会行为的概念引入到计算科学领域, 提出多智能概念, 使得生物学和计算科学发生交叉^[2]。随后在人工智能领域和现代工业上多智能体系统都被广泛应用。如人造卫星、传感器网络、并行计算、数据融合、多机械臂协同、无人机编队飞行、全自动化智能仓储系统和智能家居等。多智能体系统自问世以来便得到迅速发展, 已经成为一种进行复杂系统分析与模拟的思想方法与工具。近年来, 各学科之间的交叉和渗透式发展, 使得多智能体系统受到越来越广泛的关注。

多智能体系统主要具有以下特点:

(1) 自主性: 在多智能体系统中, 每个智能体都能管理自身的行为并做到自主合作或者竞争。

(2) 容错性: 智能体可以共同形成合作系统用以完成独立或者共同目标, 如果某几个智能体出现了故障, 其他智能体将自主适应新环境并继续工作, 不会使整个系统陷入故障状态。

(3) 灵活性和可扩展性: 多智能体系统本身采用分布式设计, 智能体具有高内聚低耦合特性, 使得系统表现出极强可扩展性。

(4) 协作能力: 多智能体系统是分布式系统, 智能体之间可以通过合适的策略相互协作完成全局目标。

1.2.2 多智能体系统研究的基本问题

多智能体协调控制基本问题包括一致性控制、编队控制、聚结控制，会合控制，分布式故障诊断，分布式故障检测，分布式故障估计和分布式故障容错等。其中编队控制、聚结控制和会合控制可作为一致性控制的衍生控制方法，而分布式故障检测，分布式故障估计和分布式故障容错是分布式故障诊断技术的分支。多智能体系统能否达到一致是实现协调控制的首要条件，因此受到大量学者的关注。

一致性是指多智能体系统中的个体在局部协作和相互通信下，调整更新自己的行为，最终使得每个个体均能达到相同状态，它描述了每个智能体和与其相邻的智能体的信息交换过程。多智能体一致性的基本要素有三个，分别是具有动力学特征的智能体个体；智能体之间用于信号传输的通信拓扑；智能体个体对输入信号的响应，即一致性协议。文献[3]基于矩阵理论、代数图理论和控制理论等，为多智能体网络系统的一致性算法分析提供了一个理论框架，重点讨论了有向信息流的作用，并且针对节点故障、链路故障和系统时延等引起的网络拓扑结构变化进行了系统鲁棒性问题研究。概述了多智能体网络中信息一致性的基本概念，给出了相应算法的稳定性条件和性能分析方法。由于多智能体一致性网络的特殊性，当多智能体系统达到一致，并能够实现协调控制后，保证多智能体系统的稳定性尤为重要，当系统中有故障发生时能快速的发现故障并降低故障对系统的影响是重中之重。由于多智能体系统其自身的特殊性，当其中一个智能体发生故障时，会通过一致性通信协议影响其他智能体发生故障，从而影响整个智能体系统，所以必须提出一种针对多智能体系统的故障诊断技术保证系统的可靠性和稳定性。

故障诊断技术可以对系统运行状态和异常情况作出判断，描述系统故障形式，为系统故障恢复和预防故障发生提供了重要依据。评价一个故障诊断系统的性能主要从以下几个方面：

（1）故障检测的及时性和灵敏度：当故障发生时，故障诊断系统需要在最短的时间内检测到故障，并可以检测微小信号，保证了诊断系统能够在早期检测出故障信号，提前对故障做出反应，减小系统故障危害。

（2）故障的误报率和漏报率：误报是指当系统没有发生故障时，诊断系统出发生故障信号。漏报是指当系统发生故障时，诊断系统却没有检出。降低漏报率和误报率，从而提高故障诊断系统的可靠性。

（3）故障分离能力和辨识能力：是指诊断系统可以区别不同故障和辨别故障大小及时变特性的能力。这两种能力越强，诊断系统对故障定位越准确，便越有利于对故障的评估和维修。

(4) 故障诊断系统的鲁棒性和自适应能力: 鲁棒性是指, 当系统存在外部干扰和噪声等情况时仍保持稳定, 完成故障诊断任务。当被测对象发生改变时, 诊断系统能够根据变化产生的新信息调节自身状态, 以适应新的被测对象, 这种能力称为自适应能力。

以上性能指标是大多现有故障诊断方法研究的主要切入点和研究方向。然而传统的故障诊断方法并不能适用于多智能体系统, 因此, 结合分布式理论的分布式故障检测, 分布式故障估计和分布式故障容错等分布式故障诊断方法应运而生。

1.3 故障检测和估计技术及其发展现状

1.3.1 传统故障检测和估计技术及其发展现状

系统故障是指系统不能执行规定功能的状态, 如当系统运行出错、出现不正常运行状态或发出错误信号时, 这会造成控制系统的功能紊乱, 最终导致系统的输出超出预定范围, 从而大大降低系统的性能。特别是在工业过程中, 如果这类系统一旦发生故障就有可能造成巨大的人员和财产的损失, 这时就需要利用故障检测技术, 及时发现并处理故障, 避免事故的发生。20 世纪以来, 控制系统正朝着大规模、智能化、高度集成化的方向发展, 系统建模更加复杂, 对系统的干扰因素增多, 增加了故障检测的难度。

近年来, 故障检测方法研究主要集中在工程的实际应用上^[4-11]。文献[4]针对油气勘探过程中复杂的数据采集和建模过程, 提出了一种新的基于深度学习神经网络和 Wasserstein 损失函数的方法, 利用地震数据实现了油气勘探系统故障的精准预测。文献[5]针对光伏系统, 提出了一种新颖的基于模型的故障检测方法, 用于光伏系统直流侧光伏组件阴影和故障的早期检测。成功地实现了对光伏系统直流侧的实时监控和临时阴影的检测。文献[6]研究了基于事件触发的非线性网络系统故障检测滤波器设计问题, 提出了一种基于事件触发通信机制、数据量化和通信时延的故障检测滤波器, 利用隶属度函数的松弛矩阵的信息获得了更好的故障检测性能。在故障发生时, 保证了系统的稳定性。[7]针对串联电池组传感器故障, 提出了一种基于模型的故障检测与隔离方案。保证了电池管理系统的健康运行, 防止了电池过充过放情况的发生。文献[8]针对机器人系统, 提出了一个用混合方法构造的在线故障检测模型。并在高保真飞行模拟器、实验室机器人和商用无人驾驶飞机三个机器人平台上实现了故障检测, 保证了系统性能。文献[9]研究了基于未知输入观测器的互联电力系统负载频率控制方法。给出了故障检测和隔离滤波器的可行性解。保证了系统的稳定性。文献[10]针对一类具有乘性故障的自动控制系统, 研究了基于性能的故障检测和容错控制方法。给

出了系统的稳定性条件，保证了在故障发生时系统能够正常运行。文献[11]针对一类具有重复标量非线性和随机扰动的网络切换系统，研究了其故障检测问题。采用事件触发策略来限制信号的传输，利用平均驻留时间稳定性理论，得到了满足期望性能的稳定性充分条件。从以上的研究结果中不难看出，故障检测技术有着广泛的应用背景和重要的应用价值，为了满足不断发展的控制系统对故障检测技术的需要，故障检测的方法研究是非常有必要的。

但传统的故障检测技术往往只能保证常规系统的稳定性，并不能满足多智能体系统需要，这时就需要分布式故障检测方法，实现多智能体系统的故障检测。

1.3.2 多智能体系统分布式故障检测和估计技术发展概述及研究现状

传统的集中式需要占用大量的通信网络资源且不利于维护，相比之下分布式具有资源共享、计算速度快、可靠性高和通信方便等优势，系统安全性可以得到更好保证。分布式具有以下特点：

（1）分布性：分布式系统是由多个控制系统组成，他们往往是分散的，通过彼此间的通讯网络交换信息。因此，整个系统功能是在各个节点处实现的。

（2）自治性：分布式系统的各个节点中都包含各自的感应器和效应器，能够实现数据的独立处理功能。通常情况下，各个节点的系统等级是平等的，没有主次之分，既能自治完成各自工作，又能利用通讯网络协调处理任务。

（3）并行性：一个分布式系统的共同任务可以被划分为若干个子任务，分别在不同的节点上执行。

（4）全局性：在分布式系统中存在一个全局通信机制，使得节点间能够按照既定的通讯模式实时传递信息，沟通任务进程。

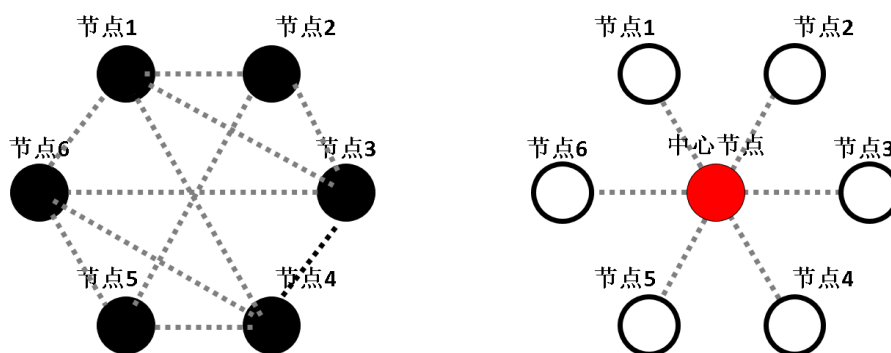


图 1.5 分布式网络与集中式网络

由于多智能系统尤为复杂,需要同时处理大量信息,非常适合分布式处理方法。近年来,涌现出大量关于分布式故障诊断方法的研究成果。其中关于分布式故障检测方法的研究成果见文献[12]和[13]。文献[12]针对一类多智能体系统提出了一种基于降阶未知输入观测器的故障检测方法,在未知输入观测器的设计过程中,只利用了相邻智能体的测量输出。消除了未知输入对残差的影响,降低了观测器维度,保证了系统的稳定性。文献[13]针对带有未知外部干扰的多智能体系统,研究物理层网络的故障检测与估计问题。基于自适应阈值和滑模观测器方法,为每个节点构造分布式故障检测滤波器来检测执行器故障的发生。

在系统发生故障之后,为保证系统能够正常运转或保证其基本功能完整,就需要利用故障容错技术^{[14]-[19]}。文献[14]利用相对输出量而非系统状态,提出了针对每个跟随器的主动容错一致性控制协议。文献[15]利用各子系统之间关联信息设计离散傅里叶变换观测器,在静态输出反馈基础上,利用互联系统的全局输出构建分布式容错控制。在故障发生时,保证了系统的稳定性。文献[16]针对一类非线性不确定多智能体系统,使用局部测量值和相邻智能体之间交换的适当信息,为每个智能体设计一个局部容错控制器,保证系统在故障情况下仍具有满意性能。文献[17]考虑了一类具有多重扰动和执行器故障的大型多电机卷绕系统,并针对此系统提出了一种基于扰动补偿的分布式故障诊断方案,在故障发生时保证了系统的稳定性。文献[18]针对存在执行器故障的多智能体系统,研究了执行器故障下多智能体系统的一致性跟踪问题。用递归最小二乘法和虚拟执行器技术进行故障估计,使故障对系统的影响最小化,保证了系统的稳定性。文献[19]研究了一类带有不匹配模型不确定性的线性多智能体系统,利用相对输出构造了未知输入观测器和一个容错控制器,保证了在故障发生时系统的有效性。

故障估计技术可以当控制系统出现故障时对系统状态进行信息排查,找到故障源并跟踪故障信号模拟出故障信号。通常故障估计系统应包含两个方面:(1)故障检测过程:依据控制系统的输出信息判断系统是否产生故障;(2)故障估计过程:估计出系统的故障信号对系统的影响程度。近年来涌现出大量关于故障估计方法研究的成果^[20-24]。文献[20]针对存在外部干扰的互联系统,利用互联子系统之间的耦合项来构造分布式故障估计观测器,提出了一种基于未知输入观测器的分布式故障估计设计方法。降低了外部干扰对系统稳定性产生的影响。文献[21]研究了带有执行器故障的线性多智能体系统,针对每个智能体,提出了一种基于滑模观测器的估计器模型,实现对估计的精准估计。在文献[22]针对一类具有非线性动态的多智能体系统,利用相邻智能体的输出信息,在同一智能体中构造非线性故障估计观测器。文献[23]针对一类非线性互联系统,提出了一种基于比例积分的故障估计方法。该方法与现有的故障估计方

法相比,有着更小的 H_2 和 H_∞ 性能指标。文献[24]在有限范围内,通过分布式传感器网络研究了其非脆弱分布式故障估计的问题。根据给定的传感器网络拓扑结构,所提的故障估计方法不仅利用了单个传感器的信息,还基于相邻传感器的信息,更好地保证了估计的准确和系统的稳定性。

当系统中的某一部分发生故障时,不仅需要降低故障对整个系统的影响保证系统处于稳定,而且还需将故障与系统的其他部分分离,使其不能对系统其他部分产生影响,这就需要借助故障隔离技术^[25-29]。文献[25]和[26],分别研究了一类线性多智能体系统和一类具有扰动的异构离散时间多智能体系统的故障隔离方法,保证了系统的稳定性。文献[27]采用模型变换方法,建立了一种新的故障检测结论。文献[28]利用局域信息在特殊的智能体上设计了一个全局观测器来检测与其邻接的智能体信息。文献[29]提出了一种基于移动滚动时域估计的分布式迭代故障检测和隔离方案,保证了在故障发生时多智能体的稳定性。

多智能体系统一致性问题研究是一直以来的重点和难点。文献[30]在领导-跟随拓扑结构下研究了带有执行器故障的多智能体系统一致控制问题。构造非线性自适应故障观测器,提出了一种分布式容错一致性控制协议,解决了执行器故障情况下多智能体系统的一致性实现问题。

除此之外,滑模控制方法具有快速响应、对应参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点,在诸多研究中被广泛用来构造分布式故障检测滤波器。文献[31]在无向通信拓扑结构下,设计了一个联合自适应滑模观测器来检测和估计多智能体系统的执行器故障。

综合上述分布式故障检测技术的研究现状不难看出,针对不同系统的分布式故障估计问题依然是当前研究的热点。但是目前针对多智能体系统的分布式故障检测和估计问题的研究还不够完善,且也不能解决故障检测滤波器设计时存在的观测器匹配问题。因此针对该课题的研究具有重要的研究价值和实际意义。

1.4 本文主要内容与章节安排

本论文利用 Lyapunov 函数稳定性理论和鲁棒线性矩阵不等式技术,研究了多智能体系统的 H_∞ 鲁棒性能,设计故障估计观测器,实现智能体在故障情况下,利用设计的故障估计观测器,能够有效的估计故障发生的类型及大小。同时在前面研究基础之上,通过引进分布式中间故障估计器,消除了估计器匹配条件,进一步提高了故障估计的性能。本文的研究内容安排如下:

1. 第一章:阐述了故障估计技术和多智能体系统发展概述和研究现状。

2. 第二章：给出本文研究方法所需要的数学知识和控制理论相关的基本原理，为后续章节做必要准备。

3. 第三章：研究一类带有模型不确定性的多智能体系统分布式故障估计滤波器设计问题。首先基于有向通信拓扑定义相对输出估计误差。然后利用构建的可调节参数，设计一种新的分布式故障估计器。基于 H_∞ 极点配置方法，计算出可行的分布式故障估计器增益。最后分别针对带有扰动和未考虑扰动两种情况下验证所提出方法的有效性和可行性。

4. 第四章：研究一类基于中间估计器的多智能体系统故障估计问题。提出了一种引入中间故障估计器的新型分布式故障估计方法，消除了现有的故障估计方法大多都需要满足观测器匹配条件的限制。利用故障分布矩阵的性质，设计一种中间估计器，对状态和故障同时进行估计。通过构建同时包含原系统状态和中间估计变量的新Lyapunov 函数，获得了分布式故障估计器存在的充分条件和分布式故障估计观测器的增益矩阵。最后通过仿真结果验证所提方法的有效性。

5. 第五章：对全文进行了总结，并对本课题下一步研究工作进行了展望。

第2章 数学基础和预备知识

2.1 标记符号

本文用符号 \mathbb{R} 表示实数集， \mathbb{R}^n 为 n 维欧氏空间。 I 与 0 分别为具有一定维数的单位矩阵和零矩阵。 $*$ 表示对称矩阵中的对应数值。 M^T 表示矩阵 M 的转置， M^{-1} 表示矩阵 M 的逆。 $\text{Sym}\{M\}$ 表示 $M + M^T$ 。 $\text{diag}\{\cdots\}$ 表示块对角阵。 $\|\cdots\|$ 表示欧几里得向量。

2.2 克罗内克积

本文用 \otimes 符号来表示克罗内克积，这种算法使用与两个任意大小的矩阵之间的运算，被广泛的应用在多智能体系统中。

定义 2.1: 矩阵 $A = [a_{ij}]_{m \times n}$ ，矩阵 $B = [b_{ij}]_{p \times q}$ ，则 $A \otimes B$ 是一个 $mp \times nq$ 的分块矩阵即：

$$A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \cdots & a_{mn}B \end{pmatrix}_{mp \times nq} \quad (2-1)$$

引理 2.1: 矩阵 A ， B ， C 和 D 是具有适当维数的矩阵，矩阵之间的克罗内克积满足以下性质：

- (1) $k(A \otimes B) = kA \otimes B = A \otimes kB, k \in \mathbb{R};$
- (2) $(A \otimes B)C = A \otimes C + B \otimes C;$
- (3) $(A \otimes B) \otimes C = A \otimes (B \otimes C);$
- (4) $(A \otimes B)(C \otimes D) = AC \otimes BD。$

2.3 代数图论

在多智能体系统中，通常用有向图和无向图的方式来描述智能体系统之间的通讯关系和通讯拓扑结构。代数图论是多智能体系统研究过程中所使用的最重要且有效的数学工具。

基础知识: 图 $G = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 通常是由一个节点（或顶点）的集合 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 和一个边的集合 $\mathcal{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 组成的。由两节点 $i \in \mathcal{V}$ 和节点 $j \in \mathcal{V}$ 连接起来即为边 $e_{ij} = (i, j)$ ，则可称节点 i 和 j 是相邻的，边 e_{ij} 与这两个节点是互相关联的。在有向图中节点间的连接通常是具有方向性的，如 $i \rightarrow j$ 即 (i, j) 、 $i \leftarrow j$ 即 (j, i) 或 $i \leftrightarrow j$ 。假如在一个代数图中，节点之间的连接若没有方向性，即 $(i, j) = (j, i)$ ，则称该图为一个无向图。从广义上也可以认为，无向图中两节点间的连接为双向的，可以做为一种有向图的特

殊形式存在。若在图 \mathcal{G} 中的一个边连接的两点相同,即 $e_{jj} = (j, j)$,则称这个边为一个自环。本文是针对有向图做的研究,所以接下来内容主要针对有向图来介绍。

邻接矩阵 $\mathcal{A} = a_{ij} \in \mathbb{R}^{n \times n}$:以节点的出度为例。即 a_{ij} 表示第 i 个节点发出到 j 节点所传递的信息。有信息发出,则 $a_{ij} = 1$,反之 $a_{ij} = 0$ 。由此可知,邻接矩阵 \mathcal{A} 内的元素非1即0。因此节点的出度定义为

$$\deg_{\text{out}}(i) = \sum_{j=1}^n a_{ji} \quad (2-2)$$

定义 $\mathcal{D} = \text{diag}\{d(1), d(2), \dots, d(n)\}$ 为图 \mathcal{G} 的度矩阵,其中 $d(i)$ 来表示节点 i 的出度。则将图 \mathcal{G} 的 Laplacian 矩阵定义为

$$L = \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (2-3)$$

定义 $G = \text{diag}\{g(1), g(2), \dots, g(n)\}$ 为图 \mathcal{G} 的自环矩阵,其中 $g(i)$ 来表示节点 i 是否有自环。节点有自环,则 $g(i) = 1$,反之 $g(i) = 0$ 。

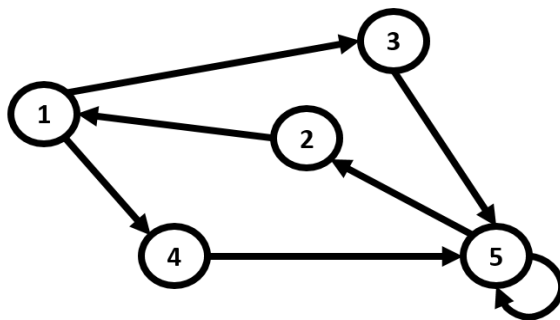


图 2.1 含有 5 个节点的有向图

以图 2.1 为例,是一个包含 5 个节点的有向图,并且在节点 5 上有一个自环。根据以上定义,我们可以得到它的 Laplacian 矩阵和自环矩阵。分别为

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{D} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 线性矩阵不等式

引理 2.2 (Schur 补定理): 给定一个对称矩阵: $S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix}$, 下面三个条件是

等价的:

$$(1) S < 0$$

$$(2) S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$$

$$(3) S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$$

引理 2.3^[32]: 矩阵 $\mathcal{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 的特征值被包含于中心为 $\alpha + j0$, 半径为 τ 的圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 内。当且仅当存在一个正定对称矩阵 $\mathcal{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 满足如下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} -\mathcal{P} & \mathcal{P}(\mathcal{A} - \alpha I_n) \\ * & -\tau^2 \mathcal{P} \end{bmatrix} < 0 \quad (2-4)$$

引理 2.4^[33]: 给定 Y, \mathcal{M} 和 \mathcal{N} 是有着适当维度的矩阵, 其中 Y 是对称矩阵, 则有

$$Y + \mathcal{M} \Sigma \mathcal{N} + \mathcal{N}^T \Sigma^T \mathcal{M}^T < 0 \quad (2-5)$$

对所有满足 $\Sigma^T \Sigma \leq I$ 的矩阵 Σ 成立, 当且仅当存在一个常数 $\lambda > 0$, 使得以下不等式成立

$$Y + \lambda^{-1} \mathcal{M} \mathcal{M}^T + \lambda \mathcal{N}^T \mathcal{N} < 0 \quad (2-6)$$

注释 2.1: 引理 2.4 主要处理模型不确定给系统产生的影响。为了方便系统的分析, 可以简化矩阵 Σ 的限定条件, 如将矩阵 $\Sigma = I$ 。上面的矩阵简化形式, 将直接应用在后续章节证明过程。

2.5 LKF 稳定性理论

由于一些不可预测的因素影响, 会导致系统的性能降低甚至会引起系统不稳定。为了提高控制系统的可靠性和稳定性, 在对系统建模和设计时就需要考虑到各种不确定因素对系统性能的影响, LKF 稳定性理论可以有效的解决这一问题。

引理 2.5: 考虑如下系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) \\ f(0, t) = 0 \end{cases} \quad (2-7)$$

(1) 存在一个有连续一阶偏导数的正定函数 $V(x, t)$;

(2) 若 $V(x, t)$ 的导数 (即 $\dot{V}(x, t)$) 是负定的, 则在原点处的平衡态 $x_e = 0$ 是渐近稳定的。

进一步地, 若 $\|x\| \rightarrow \infty, V(x, t) \rightarrow \infty$ (径向无穷大), 则在远点处的平衡态 $x_e = 0$ 是大范围一直渐进稳定的。此即为连续时间系统的 Lyapunov 稳定性定理。

2.6 H_∞ 鲁棒控制理论基础

在 20 世纪 50 年代提出了鲁棒性概念, 其目的在于排除工作状况变动、外部干扰以及建模误差等不确定因素对系统的影响, 使系统受到上述情况干扰时依然可以保持稳定。在 1981 年, 毕业于 MIT 电机系的 Zames 首次用明确的数学语言描述了 H_∞ 优

化控制理论,提出了优化指标用传递函数阵的 H_∞ 范数来表示^[34]。并在1984年和学者Fracis提出了 H_∞ 设计问题的最初解法。此后,这种解法就得到了大量的推广和研究。成为了一种在控制科学领域常用的数学工具。

针对控制系统的鲁棒性分析主要包括以下的两个方面:

(1) 一是对控制系统进行鲁棒分析,建立系统的数学模型,考虑可能产生的不确定因素对系统的影响,让系统具有良好的性能;

(2) 如何设计鲁棒控制器,在满足系统要求的前提下设计鲁棒性更强的控制器。

图2.2表示一类典型的具有不确定性的控制系统,其中 ΔA 为系统的不确定性。

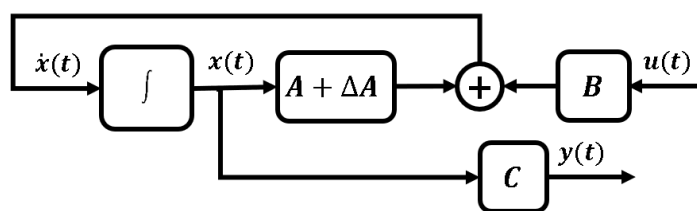


图 2.2 具有模型不确定性的控制系统结构图

考虑如下线性不确定性系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2-8)$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 表示系统的状态向量, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为系统的输入向量,且, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ 表示被调输出, A 、 B 和 C 是具有适当维数的实数阵, ΔA 为不确定项。

为了处理方便,通常情况下假定系统的不确定性是范数有界的,即表示为如下形式:

$$\Delta A = \mathcal{M}\Sigma\mathcal{N} \quad (2-9)$$

其中 \mathcal{M} 和 \mathcal{N} 是有适当维数的实常数矩阵,表征系统具有不确定性结构。 Σ 是不确定矩阵且各元素满足 Lebesgue 可测,则满足下式

$$\Sigma^T \Sigma \leq I_N \quad (2-10)$$

引理 2.6: 如果一个函数矩阵 $F(s) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 在 $\text{Re } s > 0$ 上有界,则

$$\|F(s)\|_\infty = \sup_s \{s_{\max}[F(s)]\} \quad (2-11)$$

称为 $F(s)$ 的 H_∞ 范数。

针对如下系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Ew(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2-12)$$

其中, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量, $w(t) \in \mathbb{R}^m$ 是维数有限的外部干扰输入, $y(t) \in \mathbb{R}^p$

\mathbb{R}^q 是被调输出； A, B, C 是确定的具有一定维数的实数矩阵。则系统 (2-9) 的传递函数矩阵推导为 $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$ 。定义

$$\begin{aligned}\|w\|_2^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} w(t)^T w(t) dt \\ \|z\|_2^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} z(t)^T z(t) dt\end{aligned}\quad (2-13)$$

则 $G(s)$ 的 H_∞ 范数可表示为下式：

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{w \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} \quad (2-14)$$

引理 2.7：给定 $\gamma > 0$ ，状态反馈控制律 $u(t) = Kx(t)$ 称为系统 (2-10) 的 γ^{-1} 次优 H_∞ 控制器。假设下面条件成立：

- (1) 闭环系统(2-10)渐近稳定；
- (2) 系统的初始条件为 0，且被调输出 $y(t)$ 满足

$$J = \int_0^{+\infty} [y^T(t)y(t) - \gamma^2 w(t)^T w(t)] dt \leq 0 \quad (2-15)$$

2.7 本章小结

本章主要介绍了克罗内克积、代数图论、线性矩阵不等式理论、LKF 系统稳定性原理、鲁棒控制基础、 H_∞ 性能指标及控制器设计理论和 Schur 补引理等几个引理，为后续故障检测和控制器设计方法提供理论基础。

第3章 带有模型不确定性的多智能体系统分布式故障估计

本章针对一类带有故障和模型不确定性的多智能体系统,设计带有可调参数的故障估计观测器。首先,基于通信拓扑定义了相对输出估计误差。其次,基于 H_∞ 极点配置方法和采用多约束设计方法,考虑适用于系统的一致性通讯协议,采用 Lyapunov 函数方法保证故障估计的准确性,使估计误差尽可能小。并引入可调参数,进一步提高系统性能,降低系统的保守性。通过所得结果计算出分布式故障估计观测器增益。最后,仿真结果分别从考虑扰动对系统的影响和不考虑扰动对系统的影响两方面来验证所提出方法的有效性和可靠性。

3.1 引言

近年来,随着工业化的发展,现代控制系统的安全性和可靠性越来越受到人们的关注。系统性能或稳定性可能会由于系统发生故障而丧失,从而使系统变得不可靠,因此采用故障诊断方法及时监测系统工作状态,设计故障检测滤波器及时有效的检测系统故障就显得尤为重要。基于模型的故障检测方法是通过将生成的残差与阈值进行比较判断是否有故障发生。目前,基于模型的故障诊断方法的设计和分析已经取得了很多成果^[35-38]。

在多智能体系统中,每个智能体能够独立解决给定子问题,自主推理和规划并选择适当的策略,并以特定方式影响环境。多智能体系统支持分布式应用,具有良好的模块性、易于扩展性并且设计灵活简单,可面向对象针对性的构造多层次、多元化的智能系统,避免了建造庞大系统的负担,同时降低了系统和各个智能体的复杂性,能够有效降低系统的总成本。因其具有诸多优势,被广泛应用于各个领域,如车辆的编队控制、共识控制、多机器人的分布式控制等,是许多现代控制系统中备受关注的研究课题^[39-41]。由于网络通信的不确定性以及许多复杂的实际因素,造成系统很容易发生故障,因此人们需要找到一种可靠的分布式故障诊断方法及时有效的检测多智能体系统中存在故障。由于分布式故障检测技术需要考虑各智能体之间的信息交换,所以研究起来会比集中式系统更加复杂。当故障发生在某一智能体上时,此故障会通过智能体之间网络拓扑结构影响其他无故障智能体,若不能及时有效的检测故障,将会造成系统失稳,严重时会产生灾难性后果。因此研究分布式故障检测技术对提高多智能体系统的安全性具有重要意义。近年来,分布式故障检测方法引起了许多专家学者的关注^[42-44]。文献[43]和[44]分别针对大规模互联系统和互联不确定非线性系统研究

了分布式故障检测与隔离方法。分布式故障估计方法相比于故障检测方法不仅能检测出故障,而且能了解系统发生故障时的故障状态。因此研究多智能体系统分布式故障估计相比分布式故障检测具有更重要研究价值。文献[45]在有向通信拓扑结构下,提出了一种新的基于可调参数的多智能体系统分布式故障估计方法。文献[46]在有向通信拓扑结构下,利用线性矩阵不等式技术研究了多智能体系统的自适应分布式故障估计器。

众所周知,复杂的系统要建立一个精确地数学模型是较困难的,系统模型不可避免地会产生不确定性参数。文献[47],针对一类非均匀不确定线性系统,研究其速度的输出一致性问题。文献[48]研究了不确定多智能体网络的鲁棒同步问题。但上述文献大多集中在速度的一致性问题研究上,针对带有故障和不确定性模型的多智能体系统研究分布式故障检测和故障估计的成果较少,因此针对带有模型不确定的多智能体系统故障估计的研究具有重要的意义。

3.2 问题描述

3.2.1 模型不确定性多智能体系统

考虑如下带有模型不确定性的多智能体系统模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = (A + \Delta A)x_i(t) + Bu_i(t) + D\omega_i(t) + Ef_i(t) \\ y_i(t) = Cx_i(t) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中 $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 、 $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 、 $y_i(t) \in \mathbb{R}^p$ 和 $\omega_i(t) \in \mathbb{R}^d$ 分别是系统的状态向量、系统的输入信号、系统的输出信号和外部扰动信号。 $f_i(t) \in \mathbb{R}^r$ 是执行器故障。矩阵 A 、 B 、 C 、 D 和 E ,为有适当维度的矩阵,其中 E 是满秩的。矩阵 $\Delta A = \mathcal{M}\Sigma\mathcal{N}$ 是系统的模型不确定性参数,其中 Σ 是未知的时变矩阵,且满足 $\Sigma^T\Sigma \leq I_N$ 。

动态系统(3-1)可以改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_i(t) = \bar{A}\bar{x}_i(t) + \bar{B}u_i(t) + \bar{D}v_i(t) \\ y_i(t) = \bar{C}\bar{x}_i(t) \end{cases} \quad (3-2)$$

其中 $\dot{f}_i(t)$ 是第 i 个智能体的故障的导数。并且

$$\begin{aligned} \bar{x}_i(t) &= \begin{bmatrix} x_i(t) \\ f_i(t) \end{bmatrix}, \quad v_i(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ \dot{f}_i(t) \end{bmatrix} \\ \bar{A} &= \tilde{A} + \Delta\tilde{A}, \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & E \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \Delta\tilde{A} = \mathcal{M}\Sigma\mathcal{N} = \begin{bmatrix} M \\ 0 \end{bmatrix} \Sigma \begin{bmatrix} N & 0 \end{bmatrix} \\ \bar{B} &= \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C \quad 0], \quad \bar{D} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3.2.2 误差系统构建

定义第*i*个智能体的输出误差如下:

$$\zeta_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left((\hat{y}_i(t) - y_i(t)) - (\hat{y}_j(t) - y_j(t)) \right) + g_j(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \quad (3-3)$$

其中 a_{ij} 是拉普拉斯矩阵 L 中的项, g_j 是自环矩阵 G 中的项。

考虑增广系统(3-2), 利用输出估计误差并引入可调节参数, 第*i*个智能体系统构建如下分布式故障估计观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = \bar{A}\hat{x}_i(t) + \bar{B}u_i(t) - \bar{H}\zeta_i(t) - \theta\bar{F}\dot{\zeta}_i(t) \\ \hat{y}_i(t) = \bar{C}\hat{x}_i(t) \end{cases} \quad (3-4)$$

其中 $\hat{x}_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 和 $\hat{y}_i(t) \in \mathbb{R}^p$ 分别是观测器的状态向量和输出信号。设计 $\bar{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix}$, 其中 $H_1 \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 、 $H_2 \in \mathbb{R}^{r \times p}$ 是观测器增益矩阵, 标量 θ 和 $\bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}$ ($F \in \mathbb{R}^{r \times p}$)是可调节参数。

定义第*i*个节点的误差向量和误差矩阵为:

$$\bar{e}_{xi}(t) = \hat{x}_i(t) - \bar{x}_i(t), \bar{e}_{fi}(t) = \hat{f}_i(t) - f_i(t), \bar{I}_r = [0 \quad I_r]$$

接下来, 可以得到系统局部动态误差为:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}}_{xi}(t) &= \dot{\hat{x}}_i(t) - \dot{\bar{x}}_i(t) \\ &= \bar{A}\bar{e}_{xi}(t) - \bar{D}v_i(t) - \bar{H}\zeta_i(t) - \theta\bar{F}\dot{\zeta}_i(t) \\ &= \bar{A}\bar{e}_{xi}(t) - \bar{D}v_i(t) \\ &\quad - \bar{H} \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{C}\bar{e}_{xi}(t) - \bar{C}\bar{e}_{xj}(t)) + g_j(\bar{C}\bar{e}_{xi}(t)) \right] \\ &\quad - \theta\bar{F} \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{C}\dot{\bar{e}}_{xi}(t) - \bar{C}\dot{\bar{e}}_{xj}(t)) + g_j(\bar{C}\dot{\bar{e}}_{xi}(t)) \right] \end{aligned} \quad (3-5)$$

并且

$$\bar{e}_{fi}(t) = [0 \quad I_r]\bar{e}_{xi}(t) = \bar{I}_r\bar{e}_{xi}(t) \quad (3-6)$$

为了设计系统的全局故障估计观测器, 需要定义以下全局误差向量

$$\begin{aligned} \bar{e}_x(t) &= [\bar{e}_{x1}^T(t), \bar{e}_{x2}^T(t), \dots, \bar{e}_{xN}^T(t)]^T \\ \bar{e}_f(t) &= [\bar{e}_{f1}^T(t), \bar{e}_{f2}^T(t), \dots, \bar{e}_{fN}^T(t)]^T \\ v(t) &= [v_1^T(t), v_2^T(t), \dots, v_N^T(t)]^T \end{aligned}$$

随后, 可以得到全局误差系统:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}}_x(t) &= (I_N \otimes \bar{A})\bar{e}_x(t) - (I_N \otimes \bar{D})v(t) \\ &\quad - (I_N \otimes \bar{H})((L + G) \otimes \bar{C})\bar{e}_x(t) \\ &\quad - (I_N \otimes \theta\bar{F})((L + G) \otimes \bar{C})\dot{\bar{e}}_x(t) \\ &= (I_N \otimes \bar{A} - (L + G) \otimes (\bar{H}\bar{C}))\bar{e}_x(t) \\ &\quad - (I_N \otimes \bar{D})v(t) - (L + G) \otimes (\theta\bar{F}\bar{C})\dot{\bar{e}}_x(t) \end{aligned} \quad (3-7)$$

得到全局故障估计误差为:

$$e_f(t) = (I_N \otimes \bar{I}_r) \bar{e}_x(t) \quad (3-8)$$

因为 $\bar{F}\bar{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{F} \end{bmatrix} [C \quad 0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \bar{F}C & 0 \end{bmatrix}$, 所以可以直接验证出 $[I + (L + G) \otimes \theta(\bar{F}\bar{C})]$ 是非奇异矩阵。定义非奇异矩阵

$$\bar{\Psi} = I + (L + G) \otimes \theta(\bar{F}\bar{C}) \quad (3-9)$$

通过上述定义对(3-8)进行整理, 可以得到全局动态误差系统如下:

$$\dot{\bar{e}}(t) = \bar{\Psi}^{-1} \left(I_N \otimes \bar{A} + I_N \otimes \Delta \bar{A} - (L + G) \otimes (\bar{H}\bar{C}) \right) \bar{e}_x(t) - \bar{\Psi}^{-1} (I_N \otimes \bar{D}) v(t) \quad (3-10)$$

通过对参数 θ 和 \bar{F} 具体数值的设计, 可以计算出动态误差系统(3-8)和(3-10)的观测器增益。接下来, 基于可调节参数计算观测器增益矩阵 H 并且满足 H_∞ 性能指标。其中引入可调节参数的目的是为了保证故障估计系统的暂态性能, 使用 H_∞ 约束来抑制 $v(t)$ 对故障估计误差的影响。

3.3 分布式故障估计观测器和控制器协同设计

3.3.1 H_∞ 性能分析

定理 3.1: 给定 H_∞ 性能指标 γ 、圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 和非奇异矩阵 $\bar{\Psi}$ 。如果存在正定对称矩阵 $\bar{P} \in \mathbb{R}^{(n+r) \times (n+r)}$ 、矩阵 $\bar{Y} \in \mathbb{R}^{(n+r) \times p}$ 和一个正定标量 λ 则

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & I_N \otimes \bar{I}_r^T & \phi_{14} \\ * & -\gamma I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-11)$$

$$\begin{bmatrix} I_N \otimes (-\bar{P}) & \phi_{12} & I_N \otimes (\bar{P}\bar{M}) \\ * & \phi_{22} & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-12)$$

成立。其中

$$\phi_{11} = \text{Sym} \left\{ \bar{\Psi}^T \left(I_N \otimes (\bar{P}\bar{A}) - (L + G) \otimes (\bar{Y}\bar{C}) \right) \right\} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N})$$

$$\phi_{12} = -\bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{P}\bar{D}))$$

$$\phi_{14} = \bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{P}\bar{M}))$$

$$\phi_{12} = I_N \otimes (\bar{P}\bar{A}) - (L + G) \otimes (\bar{Y}\bar{C}) - \alpha (I_N \otimes \bar{P}\bar{\Psi})$$

$$\phi_{22} = -\tau^2 \bar{\Psi}^T (I_N \otimes \bar{P}) \bar{\Psi} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N})$$

根据引理 2.6 得到系统的性能指标 $\|T_{v(t)e_f(t)}\|_\infty$ 。动态误差(3-11)和(3-13)满足 H_∞ 性能指标 $\|T_{v(t)e_f(t)}\|_\infty < \gamma$, 并且 $\bar{\Psi}^{-1} (I_N \otimes \bar{A} - (L + G) \otimes (\bar{H}\bar{C}))$ 的特征值在 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 中。观测器增益 \bar{H} 为 $\bar{H} = \bar{P}^{-1} \bar{Y}$ 。

证明：定义 Lyapunov 函数：

$$V(t) = \bar{e}_x^T(t)(\bar{\Psi}^T(I_N \otimes \bar{P})\bar{\Psi})\bar{e}_x(t) \quad (3-13)$$

接下来对 $V(t)$ 进行求导并使用引理 2.3、引理 2.4 和引理 2.7，我们可以直接得到(3-11)。如果条件(3-14)成立，则动态误差系统(3-8)和(3-10)满足 H_∞ 性能指标 $\|T_{v(t)e_f(t)}\|_\infty < \gamma$ 。

对于对称正定矩阵 $\bar{\Psi}^T(I_N \otimes \bar{P})\bar{\Psi}$ 和圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ ，如果基于引理 2.3 的条件

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \bar{\Psi}^T \varphi_{12} & \Lambda_{13} \\ * & \varphi_{22} & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-14)$$

成立，则 $\bar{\Psi}^{-1}(I_N \otimes \bar{A} - (L + G) \otimes (\bar{H}\bar{C}))$ 的特征值在圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 中。其中

$$\Lambda_{11} = \bar{\Psi}^T(I_N \otimes (-\bar{P}))\bar{\Psi}$$

$$\Lambda_{13} = \bar{\Psi}^T(I_N \otimes (\bar{P}\mathcal{M}))$$

此外，如果式(3-14)成立的，利用同余变换，将其左乘 $\text{diag}\{\bar{\Psi}^{-T}, I, I\}$ 右乘 $\text{diag}\{\bar{\Psi}^{-T}, I, I\}$ 的转置可以直接得到式(3-12)。

注释 3.1：在某种意义上， H_∞ 性能分析稳定性结果(3-11)和(3-12)相对保守，因为定义的 Lyapunov 函数(3-16)是公用矩阵 $I_N \otimes \bar{P}$ 。接下来，为进一步降低稳定性结果的保守性，作者将给出定理 3.2，在构造 Lyapunov 函数时采用不同的正定矩阵 \bar{P}_1 和 \bar{P}_2 。并根据定理 3.2 结果，给出分布式故障估计观测器的增益矩阵。

3.3.2 分布式故障估计观测器设计

定理 3.2：给定 H_∞ 性能指标 γ ，圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 、标量 ε 和矩阵 $\bar{\Psi}$ 。如果存在正定对称矩阵 $\bar{P}_1, \bar{P}_2 \in \mathbb{R}^{(n+r) \times (n+r)}$ 、矩阵 $\bar{S} \in \mathbb{R}^{(n+r) \times (n+r)}$ 、矩阵 $\bar{Y} \in \mathbb{R}^{(n+r) \times p}$ 和一个正标量 λ 满足

$$\begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11} & \bar{\phi}_{12} & \bar{\phi}_{13} & I_N \otimes \bar{I}_r^T & \bar{\phi}_{11} \\ * & \bar{\phi}_{22} & \bar{\phi}_{23} & 0 & \bar{\phi}_{11} \\ * & * & -\gamma I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-15)$$

$$\begin{bmatrix} I_N \otimes (\bar{P}_2 - \bar{S} - \bar{S}^T) & \bar{\phi}_{12} & I_N \otimes (\bar{S}\mathcal{M}) \\ * & \bar{\phi}_{22} & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-16)$$

成立。其中

$$\bar{\phi}_{11} = \text{Sym}\left\{\bar{\Psi}^T(I_N \otimes (\bar{S}\bar{A}) - (L + G) \otimes (\bar{Y}\bar{C}))\right\} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N})$$

$$\bar{\phi}_{12} = \bar{\Psi}^T(I_N \otimes (\bar{P}_1 - \bar{S}))\bar{\Psi} - \varepsilon(I_N \otimes (\bar{A}^T \bar{S}^T) - (L + G)^T \otimes (\bar{C}^T \bar{Y}^T))\bar{\Psi}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{\phi}_{22} &= -\varepsilon \bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{S} + \bar{S}^T)) \bar{\Psi} \\
 \bar{\phi}_{13} &= -\bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{S} \bar{D})) \\
 \bar{\phi}_{15} &= \bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{S} \mathcal{M})) \\
 \bar{\phi}_{23} &= -\varepsilon \bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{S} \bar{D})) \\
 \bar{\phi}_{25} &= \varepsilon \bar{\Psi}^T (I_N \otimes (\bar{S} \mathcal{M})) \\
 \bar{\varphi}_{12} &= I_N \otimes (\bar{S} \tilde{A}) - (L + G) \otimes (\bar{Y} \bar{C}) - \alpha (I_N \otimes \bar{S}) \bar{\Psi} \\
 \bar{\varphi}_{22} &= -\tau^2 \bar{\Psi}^T (I_N \otimes \bar{P}_2) \bar{\Psi} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N})
 \end{aligned}$$

动态误差(3-8)和(3-10)满足 H_∞ 性能指标 $\|T_{v(t)e_f(t)}\|_\infty < \gamma$, 并且 $\bar{\Psi}^{-1}(I_N \otimes \bar{A} - (L + G) \otimes (\bar{H} \bar{C}))$ 的特征值在 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 中。观测器增益 \bar{H} 为 $\bar{H} = \bar{S}^{-1} \bar{Y}$ 。

证明: 在定理 3.2 中引入了不同的 Lyapunov 函数 $\bar{\Psi}^T (I_N \otimes \bar{P}_1) \bar{\Psi}$ 和 $\bar{\Psi}^T (I_N \otimes \bar{P}_2) \bar{\Psi}$ 。基于定理 3.1 的证明过程, 只需要证明, 在(3-15)中, 当 $\bar{P}_1 = \bar{P}$ 时(3-15) \rightarrow (3-11), 在(3-16)中, 当 $\bar{P}_2 = \bar{P}$ 时(3-16) \rightarrow (3-12)。

如果(3-15)是可行的, 利用同余变换, 将其左乘

$$\begin{bmatrix} I & \bar{\Lambda}_{12} & 0 & 0 & \bar{\Lambda}_{15} \\ 0 & \bar{\Lambda}_{22} & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I \end{bmatrix}$$

右乘它的转置, 就可直接得到(3-11), 其中

$$\begin{aligned}
 \bar{\Lambda}_{12} &= \left(I_N \otimes \tilde{A} - (L + G) \otimes (\bar{H} \bar{C}) \right)^T \bar{\Psi}^{-T} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N}) \\
 \bar{\Lambda}_{15} &= \bar{\Psi}^{-1} (I_N \otimes \mathcal{M}) \\
 \bar{\Lambda}_{22} &= -(I_N \otimes D)^T \bar{\Psi}^{-T}
 \end{aligned}$$

从(3-19)可以推出 $\bar{S} + \bar{S}^T \geq \bar{P}_2 > 0$, 这意味着 \bar{S} 是非奇异的。因为 \bar{P}_2 是正定对称的, 所以不等式 $(\bar{P}_2 - \bar{S}) \bar{P}_2^{-1} (\bar{P}_2 - \bar{S})^T \geq 0$ 成立, 此式也可以表示为 $-\bar{S} - \bar{S}^T + \bar{P}_2 \geq -\bar{S} \bar{P}_2^{-1} \bar{S}^T$ 。因此, 由(3-15)可知

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_{11} & \varphi_{12} & \tilde{\Lambda}_{13} \\ * & \tilde{\Lambda}_{22} & 0 \\ * & * & -\lambda I \end{bmatrix} < 0 \quad (3-17)$$

其中

$$\begin{aligned}
 \tilde{\Lambda}_{11} &= I_N \otimes (-\bar{S} \bar{P}_2^{-1} \bar{S}^T) \\
 \tilde{\Lambda}_{13} &= I_N \otimes (\bar{S} \mathcal{M}) \\
 \tilde{\Lambda}_{22} &= -\tau^2 \bar{\Psi}^T (I_N \otimes \bar{P}_2) \bar{\Psi} + \lambda I_N \otimes (\mathcal{N}^T \mathcal{N})
 \end{aligned}$$

此外, 如果(3-16)是可行的, 利用同余变换, 将其左乘 $\text{diag}\{\bar{\Psi}^{-T}, I, I\}$ 和右乘它的转置可直接得到(3-12)。

3.4 仿真实验

在这一部分中,选取了一个由四架飞行器组成的多智能体系统模型实例^[45],其中每架飞行器被建模为

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2662 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} x_i(t) \\ &+ \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ -5.5200 & 4.4900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u_i(t) \\ y_i(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_i(t)\end{aligned}$$

其中状态 $x_i(t)$ 包含飞行器的水平速度、垂直速度、俯仰速率和俯仰角度。控制输入 $u_i(t)$ 包含纵摇控制和纵摇循环控制。在此系统中可以很容易判断 (A, C) 是可观测的。模型不确定参数假设为 $M = [0.9, 0.1, -0.1, 0]^T$, $N = [0, 0.1, 0.1, 0.9]$ 。假设多智能体系统的通信拓扑图如图 3.1 所示。在该拓扑有向图中第一个节点包含一个自环,其拉普拉斯矩阵 L 和闭环矩阵 G 为:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

显然,矩阵 $(L + G)$ 是不对称的,并且矩阵 $(L + G)$ 的秩为4。根据图 3.1,我们需要构造四个故障估计观测器来构成分布式故障估计观测器。

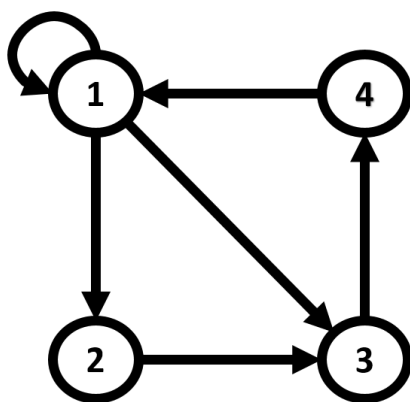


图 3.1 多智能体系统的通讯拓扑图

设计 $F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 则有

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

接下来, 作者将分别针对带有扰动和未考虑扰动两种情况下验证所提出方法的有效性。

情况 1: 不考虑外部扰动时系统的 H_∞ 性能

在此情况下, 扰动作用前的参数矩阵 $D = 0$ 。下面只考虑故障向量下, 验证基于可调参数的分布式故障估计观测器的可行性。选择圆形区域 $\mathcal{D}(\alpha, \tau)$ 的中心为 $7 + j0$ 、半径为7, 可以避免观测器增益 H 的奇异性并保证故障估计观测器的暂态性能, 此设定将适用于整个仿真过程中。

选取可调节参数 $\theta = 2.0$ 、 $\varepsilon = 0.009$ 时, 可以得到数值最小的 H_∞ 性能指标 γ_{min} 。定理 3.1 中 $\gamma_{min} = 1.7139$, 在定理 3.2 中 $\gamma_{min} = 1.5812$ 。观测器增益矩阵为:

$$\bar{H} = \bar{S}^{-1}\bar{Y} = \begin{bmatrix} H_1 \\ \cdots \\ H_2 \end{bmatrix}$$

其中

$$H_1 = \begin{bmatrix} -13.1628 & 0.1483 & 9.5583 \\ 24.1291 & 8.5695 & -9.7150 \\ -81.8196 & 2.3456 & 47.7777 \\ -27.4923 & 0.8496 & 19.8552 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -515.9345 & -1.1925 & 318.1071 \\ 484.3965 & 50.7876 & -240.5621 \end{bmatrix}$$

情况 2: 外部扰动下系统的 H_∞ 性能

在该部分中, 将给出了带有扰动的多智能体系统分布式故障估计仿真结果。设外部扰动参数矩阵 $D = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1]^T$ 。选取可调节参数 $\theta = 2.0$ 、 $\varepsilon = 0.009$ 时。通过求解定理 3.2, 得到最小的 H_∞ 性能指标 $\gamma_{min} = 1.8863$ 和增益矩阵

$$\bar{H} = \bar{S}^{-1}\bar{Y} = \begin{bmatrix} H_1 \\ \cdots \\ H_2 \end{bmatrix}$$

其中

$$H_1 = \begin{bmatrix} -3.6452 & -0.5385 & 3.3363 \\ 7.3518 & 7.6377 & -1.1465 \\ -19.5162 & 4.3255 & 14.0463 \\ -7.6018 & -0.0152 & 7.4432 \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} -191.3231 & 19.6606 & 152.2646 \\ 42.0379 & 17.4747 & -21.9740 \end{bmatrix}$$

假设 $\omega_i(t)$ 为有界的白噪声信号, 执行器故障同时发生在第一节点 $f_1(t) = [f_{11}(t), f_{12}(t)]^T$ 和第三节点 $f_3(t) = [f_{31}(t), f_{32}(t)]^T$, 并具有以下形式:

$$f_{11}(t) = \begin{cases} 0 & 0s \leq t \leq 30s \\ 2(1 - e^{-0.1(t-30)}) & 30s \leq t \leq 100s \end{cases}$$

$$f_{12}(t) = 0$$

并且

$$f_{31}(t) = \begin{cases} 0 & 0s \leq t \leq 30s \\ 2 \sin(0.1(t-30)) & 30s \leq t \leq 100s \end{cases}$$

$$f_{32}(t) = 0$$

其他节点无故障($f_i(t) = 0, i = 2, 4$)。假设 $E = [0, 0; 1, 0; 0, 1; 0, 0]$, 系统初值 $x(t) = [0.1; 0.1; 0.1; 0.1]$, 利用所获得的观测器增益矩阵进行仿真实验。接下来作者将给出智能体 1 和智能体 3 的状态及估计曲线和故障估计曲线, 来阐述本章理论有效性。

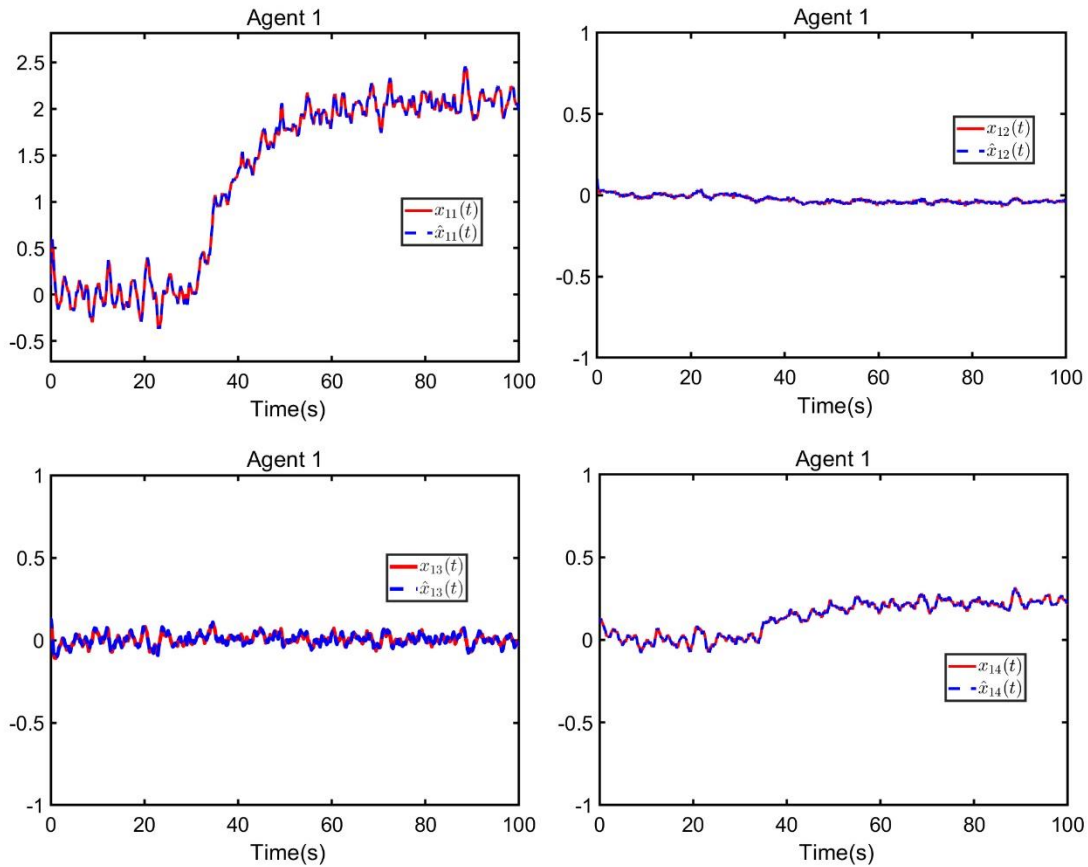


图 3.2 智能体 1 的状态及其估计

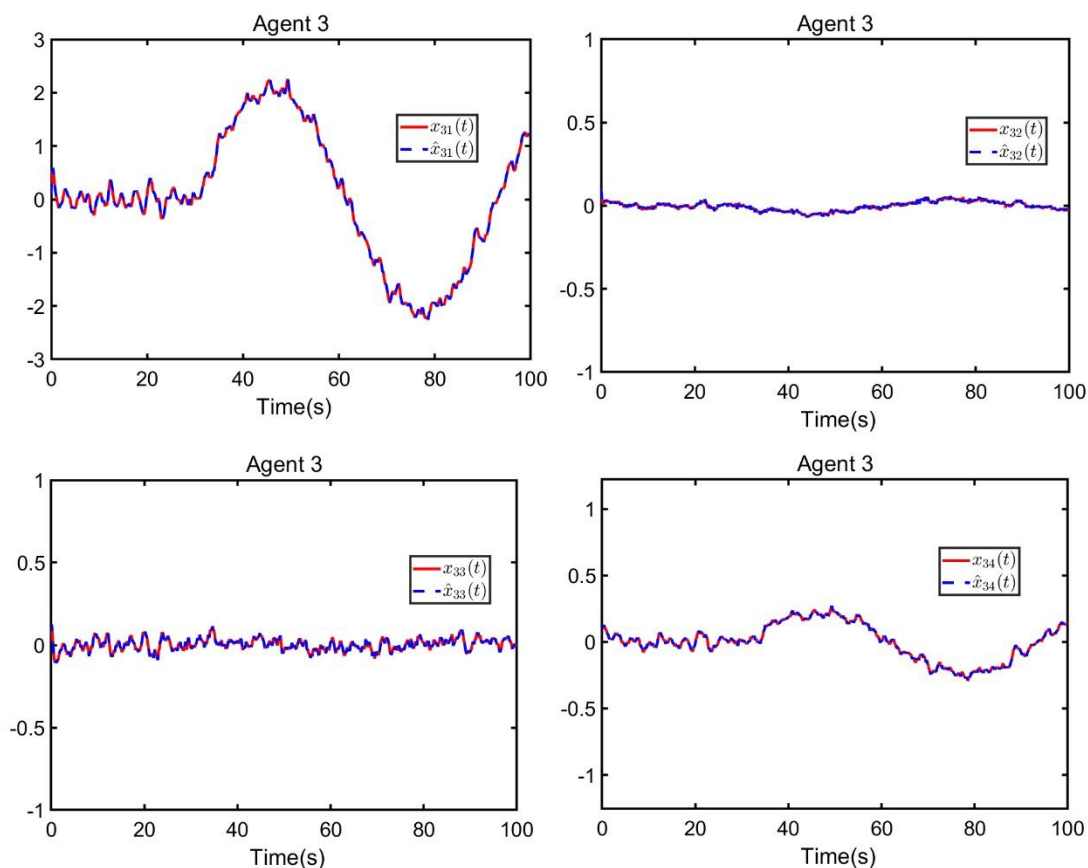


图 3.3 智能体 3 的状态及其估计

通过仿真结果可以看出本文方法可以很好的估计系统状态,在图 3.2 和图 3.3 中实线表示系统的真实状态,虚线是其估计。相应的,智能体 2 和智能体 4 的曲线同样可以画出,因并无故障发生在这两个智能体上,故此从略。接下来,为了进一步阐述故障估计的结果,作者将给出执行器故障 1 和执行器故障 3 的仿真结果,从仿真结果可以验证本文方法的有效性和可行性。

接下来,从仿真图 3.4 和图 3.5 可以看出,设计的分布式估计观测器能够很好的估计执行器故障 1 的第一维状态和执行器故障 3 的第一维状态。估计执行器故障 1 的第二维状态和执行器故障 3 的第二维状态在零点附近,即说明执行器 1 和执行器 3 第二维无故障。为了进一步阐述结果的有效性, $f_{11}(t)$ 和 $f_{31}(t)$ 的故障估计结果如图 3.6 和图 3.7 所示。

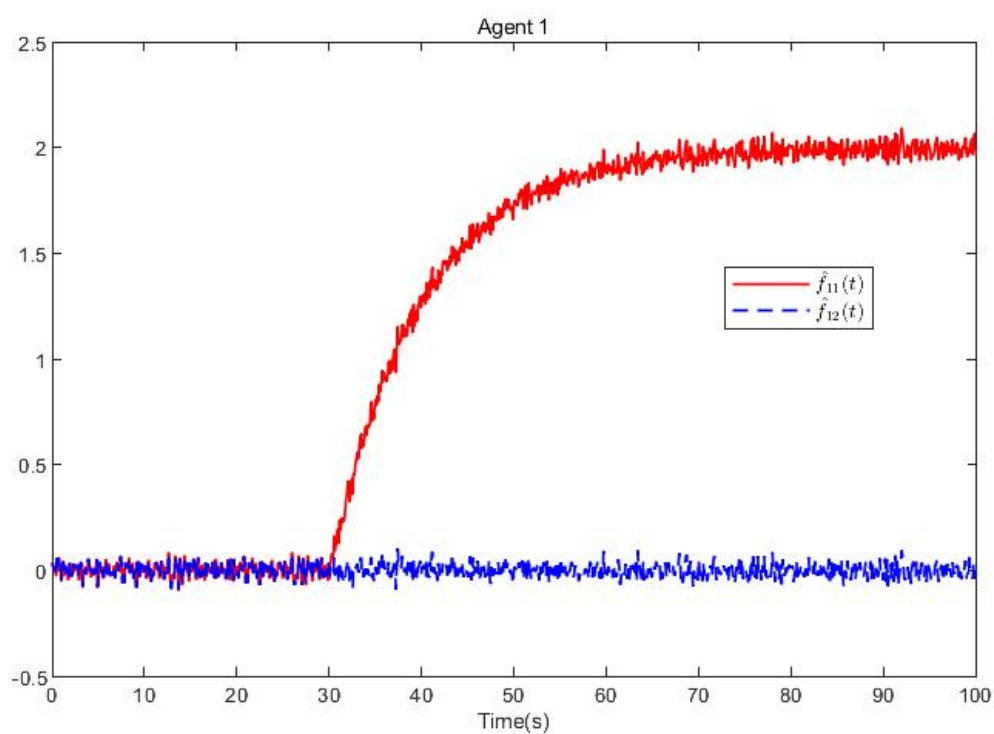


图 3.4 智能体 1 的故障估计仿真结果

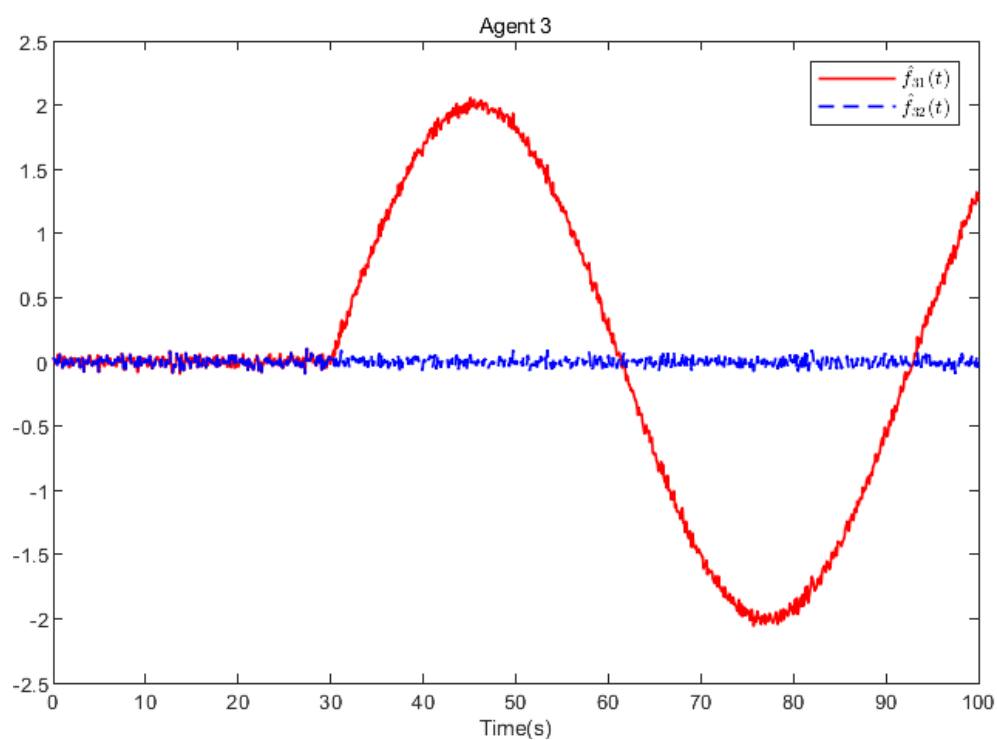


图 3.5 智能体 3 的故障估计仿真结果

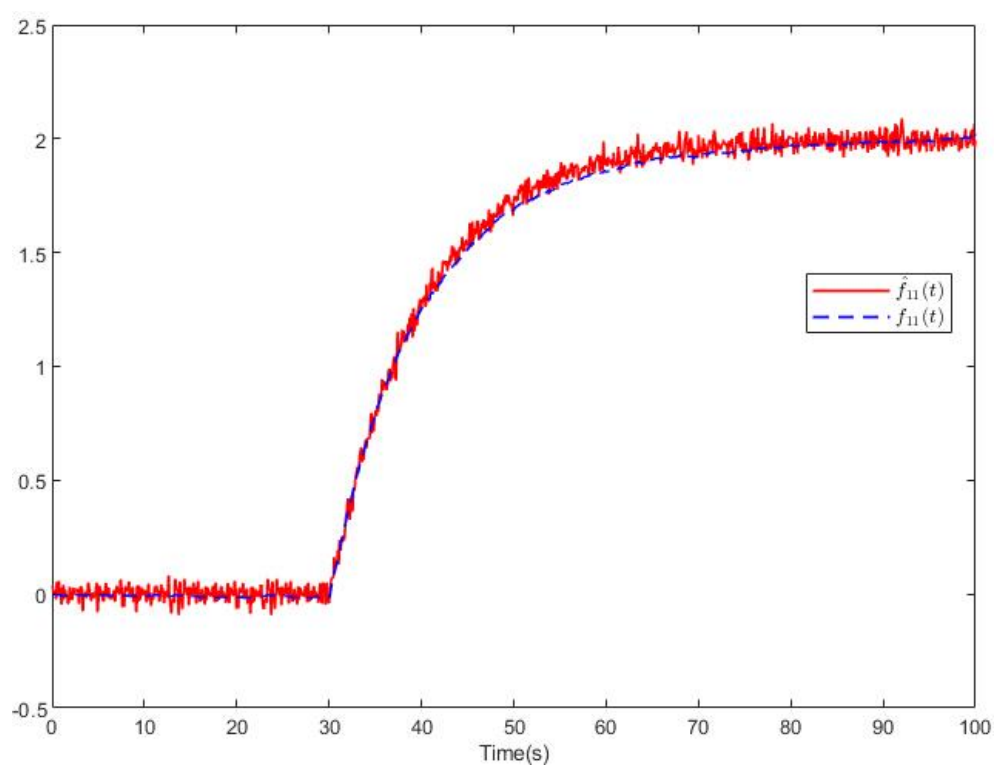


图 3.6 $f_{11}(t)$ 的故障估计仿真结果

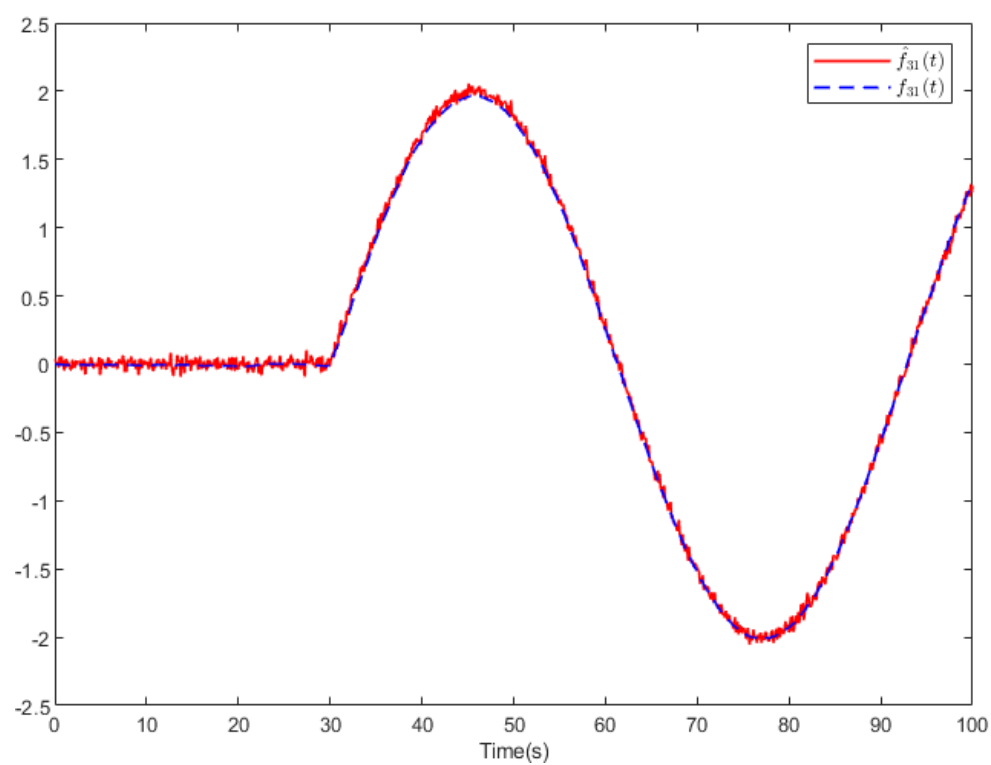


图 3.7 $f_{31}(t)$ 的故障估计仿真结果

3.5 本章小结

在本章中,针对一类带有不确定系统模型的多智能系统,研究并设计了带有可调节参数的分布式故障估计观测器。在有系统扰动和无系统扰动的两种情况下,分析了多智能体系统的分布式故障 H_∞ 性能,在满足期望的 H_∞ 性能指标下设计了分布式估计器和观测器增益矩阵。仿真结果表明了本章方法的有效性和可行性。

第4章 基于中间估计器的多智能体系统分布式故障估计

为了进一步降低故障结果的保守性,本章基于中间估计器方法设计分布式故障估计观测器,消除了观测器匹配条件对故障估计的限制。首先,基于通信拓扑结构定义了多智能体系统和中间估计器系统的相对输出估计误差。随后,通过构建同时包含原系统状态和中间估计变量的新 Lyapunov 函数,得到了全局动态误差系统稳定性充分条件并计算出分布式故障估计观测器的增益矩阵。最后分别针对系统满足观测器匹配条件和系统不满足匹配条件两种情况下验证了该方法的有效性和可行性。

4.1 引言

现有的故障检测方法大多需要满足观测器匹配条件,大大增加了故障估计观测器的设计难度,限制了故障估计技术的发展,基于中间估计器的故障检测方法和传统的故障检测方法相比,消除了观测器匹配条件对故障估计的限制,具有更低的保守性和更高的故障估计精度,引起了许多专家学者的关注。基于中间估计器的故障检测方法在线性系统中的有着大量应用^[49-50]。文献[49]针对一类带有多重故障和外部干扰的线性系统提出了两种容错控制方案。一种是基于中间估计器带有可调参数的容错控制方案,另一种是基于中间估计器的 H_∞ 容错控制方案,针对线性系统分别考虑了具有匹配扰动和具有不匹配扰动两种情况,两种方案都能在故障发生时保证系统的稳定性。文章[50]研究了一类带有传输损耗的时变时滞连续线性系统的故障估计问题,设计了基于中间估计方法的故障估计观测器,得到了故障估计滤波器增益,保证了在故障发生时系统的稳定性。文献[51]-[52]针对非线性系统研究了基于中间估计器的故障估计问题。[51]研究一类李氏式非线性系统的故障估计问题,设计了一种基于中间变量的中间估计器,可以实现对状态和故障同时进行估计,解决了观测器匹配上的限制。保证了系统的稳定性。文献[52]采用协同控制与状态预测相结合的方法,研究了一类非线性物联网网络中多设备分布式故障估计问题。给出了连续时间下马尔科夫链转移矩阵、输出温度和物联网网络温度自动纠错的稳定性充分条件,保证了系统的稳定性。除此之外,也有学者针对马氏跳系统的故障估计问题做了详细研究^[53-54]。文献[53]研究了一类非线性半马氏跳跃系统的故障估计问题,设计了与模态相关的中间变量,用其构造的中间估计器可以精准估计系统的故障信号。同时考虑了部分未知的转移率和量子化输出,并给出了误差系统稳定的充分条件。文献[54]针对一类连续马氏跳系统提出了一种基于中间估计器的故障估计方法。通过使用一系列与模态相关参数及其概

率分布构造了中间变量。当系统发生随机故障时，保证了系统仍能拥有较好的性能。

如今，多智能体系统被广泛应用于各行各业，但因其系统模型的复杂性和智能体之间通信的不确定性，更加容易导致系统故障的发生。当其中一个智能体发生故障时，故障信号会通过智能体间的通信网络传递给其他智能体，从而引发严重的事故。多智能体系统往往结构庞大、价格昂贵，一旦发生事故会造成巨大的经济损失，甚至人员伤亡。故障检测和估计技术能够有效预防系统故障的发生，但是上述文献都是针对传统系统下的故障检测方法，不能直接适用于多智能体系统，而且由于多智能体系统其自身的特殊性及其智能体之间的影响，引入中间估计器方法会增加困难。文献[55]-[57]针对多智能体系统研究了基于中间估计器的分布式故障检测方法。[55]研究了一类具有多故障和不匹配扰动的线性多智能体系统的容错跟踪控制问题，提出了基于分布式中间估计器的容错跟踪协议。中间估计器估计的组合信号考虑了传感器故障、前导输入、过程故障和匹配干扰分量。在此基础上，设计了一种容错跟踪协议来消除组合信号的影响，保证了系统的稳定性和故障估计的准确性。文献[56]针对具有扰动的线性多智能体系统研究分布式跟踪控制问题，提出了一种新的基于观测器的分布式跟踪协议，从而构造了中间估计器。文献[57]研究了一类带有执行器故障和传感器故障的非线性多智能体系统，在假设多智能体系统是有向通讯的前提下，提出了一种新的中间估计观测器设计方法来估计系统状态、执行器故障和传感器故障，保证了系统的鲁棒性。由以上研究成果可以看出，基于中间估计器的故障检测方法不仅普遍适用于传统控制系统，在多智能体系统上也可以有很好的应用，并取得了丰硕的研究成果。

然而现有研究设计中间估计器模型趋于一致，构造 LKF 函数方法过于简单，使得系统仍然具有较高的保守性。与上述研究不同，本文构造了一个新的 LKF 函数，同时对状态和故障进行估计，提高了故障估计精度，并进一步降低系统保守性。

4.2 问题描述

4.2.1 分布式中间估计器设计

考虑如下带有执行器故障的多智能体系统模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = Ax_i(t) + Bu_i(t) + Ef_i(t) \\ y_i(t) = Cx_i(t) \end{cases} \quad (4-1)$$

其中 $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 、 $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$ 、 $y_i(t) \in \mathbb{R}^p$ 和 $f_i(t) \in \mathbb{R}^r$ 分别是系统的状态向量、输入信号、输出信号和执行器故障。矩阵 A 、 B 、 C 和 E 是有适当维度的矩阵。

设计中间估计器为：

$$q_i(t) = f_i(t) - Kx_i(t) \quad (4-2)$$

其中 K 为中间估计值。对(4-2)求导,可以得到如下等式:

$$\dot{q}_i(t) = \dot{f}_i(t) - K(Ax_i(t) + Bu_i(t) + Ef_i(t)) \quad (4-3)$$

4.2.2 基于中间估计器的误差系统构建

定义第 i 个智能体的相对输出误差如下:

$$\zeta_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left((\hat{y}_i(t) - y_i(t)) - (\hat{y}_j(t) - y_j(t)) \right) + g_j(\hat{y}_i(t) - y_i(t)) \quad (4-4)$$

其中 a_{ij} 是拉普拉斯矩阵 L 中的项, g_j 是自环矩阵 G 中的项。 $\hat{y}_i(t) \in \mathbb{R}^p$ 是观测器的输出信号。考虑系统(4-1), 使用相对输出构建的分布式故障估计观测器如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + E\hat{f}_i(t) + H\zeta_i(t) \\ \hat{y}_i(t) = C\hat{x}_i(t) \\ \dot{\hat{q}}_i(t) = -K(A\hat{x}_i(t) + Bu_i(t) + E\hat{f}_i(t)) \\ \hat{f}_i(t) = \hat{q}_i(t) + K\hat{x}_i(t) \end{cases} \quad (4-5)$$

其中 $\hat{x}_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 是观测器的状态向量。设计 $H \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为观测器增益矩阵。接下来, 定义第 i 个节点的动态误差向量

$$\begin{cases} e_{xi}(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t) \\ e_{qi}(t) = q_i(t) - \hat{q}_i(t) \end{cases} \quad (4-6)$$

整理(4-5)和(4-6), 可以得到系统的局部动态误差, 如下所示:

$$\begin{cases} \dot{e}_{xi}(t) = (A + EK)e_{xi}(t) + Ee_{qi}(t) - H \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\bar{C}\bar{e}_{xi}(t) - \bar{C}\bar{e}_{xj}(t)) + g_j(\bar{C}\bar{e}_{xi}(t)) \right] \\ \dot{e}_{qi}(t) = \dot{f}_i(t) - (KA + KEK)e_{xi}(t) - KEe_{qi}(t) \end{cases} \quad (4-7)$$

为了设计系统的全局故障估计观测器, 定义以下全局误差向量:

$$\begin{aligned} e_x(t) &= [e_{x1}^T(t), e_{x2}^T(t), \dots, e_{xN}^T(t)]^T \\ e_q(t) &= [e_{q1}^T(t), e_{q1}^T(t), \dots, e_{qN}^T(t)]^T \end{aligned}$$

得到系统的全局动态误差为:

$$\begin{cases} \dot{e}_x(t) = (I_N \otimes (A + EK) - (L + G) \otimes (HC))e_x(t) + (I_N \otimes E)e_q(t) \\ \dot{e}_q(t) = (I_N \otimes I)\dot{f}(t) - (I_N \otimes (KA + KEK))e_x(t) - (I_N \otimes KE)e_q(t) \end{cases} \quad (4-8)$$

在得出主要结论之前, 做如下两个假设:

假设 1: 未知时变故障 $f_i(t)$ 满足 $\|\dot{f}_i(t)\| \leq \theta$, 其中 $\theta \geq 0$ 。

假设 2: E 是列满列的矩阵。

4.3. 基于中间估计器的多智能体系统分布式故障估计观测器设计

定理 4.1: 如果假设 1 和假设 2 是成立的, 中间估计器(4-5)保证误差系统(4-6)的状态一致最终有界。如果给定标量 $\omega > 0$ 、 $\varepsilon > 0$, 则存在正定对称矩阵 P 、 Q 和矩阵 H 使得以下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & 0 \\ * & \phi_{22} & \phi_{23} \\ * & * & \phi_{33} \end{bmatrix} < 0 \quad (4-9)$$

其中

$$\phi_{11} = \text{Sym}\{I_N \otimes (PA + PEK)\} - \text{Sym}\{(L + G) \otimes (YC)\}$$

$$\phi_{12} = I_N \otimes (PE - A^T K^T Q^T - K^T E^T K^T Q^T)$$

$$\phi_{22} = -\text{Sym}\{I_N \otimes (QKE)\}$$

$$\phi_{23} = Q$$

$$\phi_{33} = -\varepsilon I$$

证明: 选取 Lyapunov 函数

$$V(t) = e_x^T(t)(I_N \otimes P)e_x(t) + e_q^T(t)(I_N \otimes Q)e_q(t)$$

对 $V(t)$ 进行求导, 我们可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \text{Sym}\{e_x^T(t)(I_N \otimes (PA + PEK))e_x(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_x^T(t)((L + G) \otimes (PHC))e_x(t)\} \\ & + \text{Sym}\{e_x^T(t)(I_N \otimes (PE))e_q(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes (QKA + QKEK))e_x(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes (QKE))e_q(t)\} \\ & + \text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes Q)\dot{f}(t)\} \end{aligned}$$

接下来, 令 $PH = Y$ 并对 $\text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes Q)\dot{f}(t)\}$ 使用引理 2.4, 可以得到以下不等式:

$$\text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes Q)\dot{f}(t)\} \leq \frac{1}{\varepsilon} e_q^T(t)(I_N \otimes Q^2)e_q(t) + \varepsilon \theta^2$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \text{Sym}\{e_x^T(t)(I_N \otimes (PA + PEK))e_x(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_x^T(t)((L + G) \otimes (YC))e_x(t)\} \\ & + \text{Sym}\{e_x^T(t)(I_N \otimes (PE))e_q(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes (QKA + QKEK))e_x(t)\} \\ & - \text{Sym}\{e_q^T(t)(I_N \otimes (QKE))e_q(t)\} \\ & + \frac{1}{\varepsilon} e_q^T(t)(I_N \otimes Q^2)e_q(t) + \varepsilon \theta^2 \end{aligned}$$

其中 $K = \omega E^T$ 。设定 $\mathcal{X}_e(t) = [e_x^T(t), e_q^T(t)]^T$ ，则可以把上述不等式转化为 $\dot{V}(t) \leq \mathcal{X}_e^T(t) \Sigma \mathcal{X}_e(t)$,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \bar{\phi}_{11} & \bar{\phi}_{12} \\ * & \bar{\phi}_{22} \end{bmatrix}$$

其中

$$\bar{\phi}_{11} = \text{Sym}\{I_N \otimes (PA + PEK)\} - \text{Sym}\{(L + G) \otimes (YC)\}$$

$$\bar{\phi}_{12} = I_N \otimes (PE - A^T K^T Q^T - K^T E^T K^T Q^T)$$

$$\bar{\phi}_{22} = -\text{Sym}\{I_N \otimes (QKE)\} + \frac{1}{\varepsilon} (I_N \otimes Q^2)$$

对 $\bar{\phi}_{22}$ 使用 Schur 补引理，即可得到(4-9)。证明完毕。

4.4 仿真实验

在这一部分中，作者将构造两个多智能体系统例子，分别针对系统满足观测器匹配条件和系统不满足观测器匹配条件下的两种情况验证所提出方法的有效性。

例 1：系统模型满足观测器匹配条件

在该部分选择跟上一章相同的由四架飞行器组成的多智能体系统模型^[45]，其中每架飞行器被建模为：

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2662 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} x_i(t) \\ &+ \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ -5.5200 & 4.4900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u_i(t) \\ y_i(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_i(t) \end{aligned}$$

其中状态 $x_i(t)$ 包含飞行器的水平速度、垂直速度、俯仰速率和俯仰角度。控制输入 $u_i(t)$ 包含纵摇控制和纵摇循环控制。假设多智能体系统的通信拓扑图如图 4.1 所示。在该拓扑有向图中第一个节点包含一个自环，其拉普拉斯矩阵 L 和闭环矩阵 G 为：

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

显然，对于图 4.1 所示的有向图，矩阵 $(L + G)$ 是不对称的， $(L + G)$ 的秩为 4。根据图 4.1，我们需要四个故障估计观测器来构成分布式故障检测观测器。

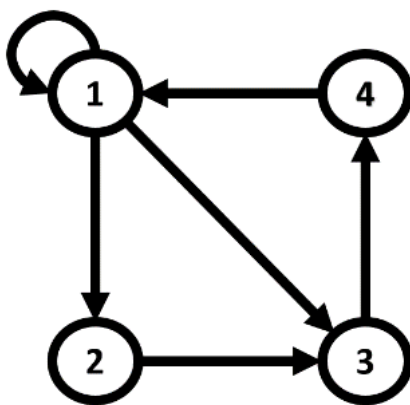


图 4.1 多智能体系统的通信拓扑图

执行器故障同时发生在第一节点 $f_1(t) = [f_{11}(t), f_{12}(t)]^T$ 和第三节点 $f_3(t) = [f_{31}(t), f_{32}(t)]^T$, 故障具有以下形式:

$$f_{11}(t) = \begin{cases} 3, & 20s \leq t < 30s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$f_{12}(t) = 0$$

并且

$$f_{31}(t) = \begin{cases} 2\sin(0.25(t - 20)), & 20s \leq t < 30s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$f_{32}(t) = 0$$

其他节点无故障即 $(f_i(t) = 0, i = 2, 4)$ 。假设 $E = [0, 0; 1, 0; 0, 1; 0, 0]$, $\varepsilon = 1$, $\omega = 2.15$ 。可得到如下的观测器增益:

$$H = \begin{bmatrix} 38.3989 & -18.2135 & 103.9169 \\ -48.4862 & 32.0502 & -128.3600 \\ 58.3440 & -25.5452 & 167.9854 \\ 60.7651 & -26.3459 & 166.4882 \end{bmatrix}$$

假设系统初值 $x(t) = 0.1 \times [1; 1; 1; 1]$, 利用所获得的观测器增益矩阵, 仿真结果如图 4.2 所示。从仿真结果可以看出本文方法可以很好的估计执行器故障。为了进一步阐述故障估计结果, 作者将给出执行器故障 1 和执行器故障 3 的估计结果, 从仿真结果可以验证本文方法的有效性和可行性。

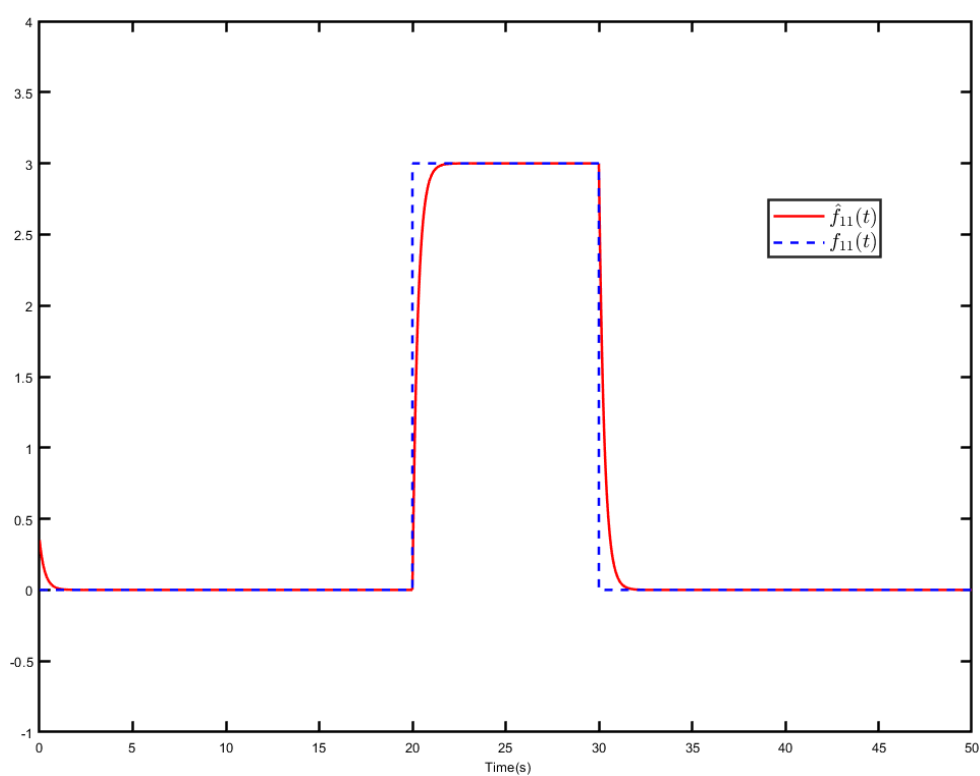


图 4.2 $f_{11}(t)$ 和 $\hat{f}_{11}(t)$ 的仿真信号

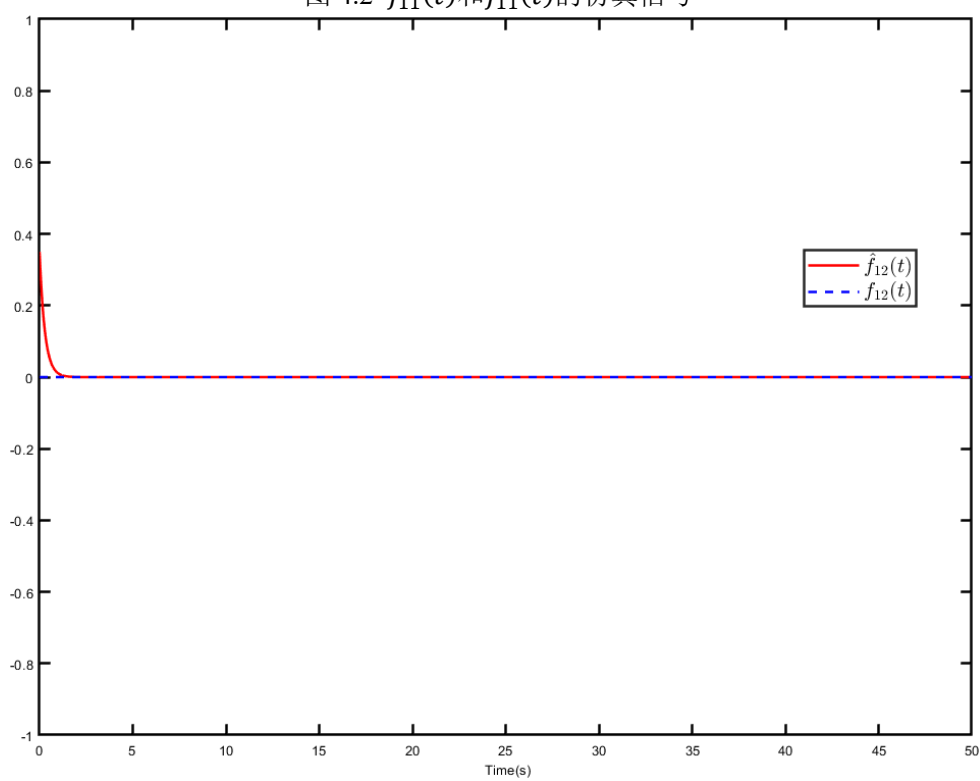


图 4.3 $f_{12}(t)$ 和 $\hat{f}_{12}(t)$ 的仿真信号

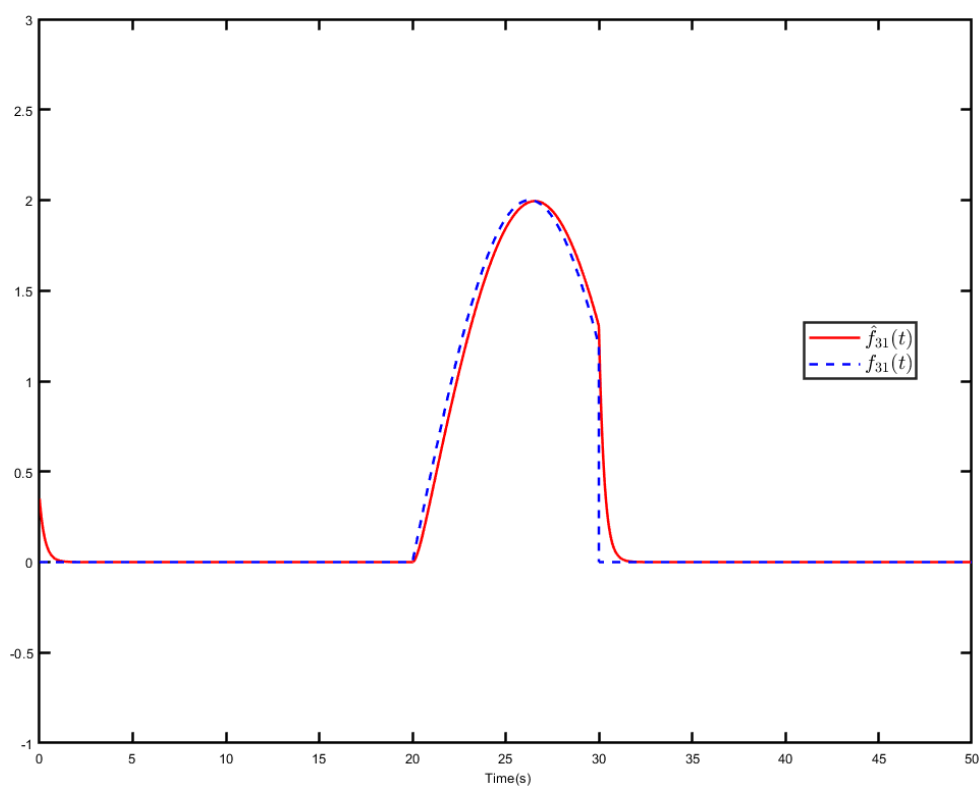


图 4.4 $f_{31}(t)$ 和 $\hat{f}_{31}(t)$ 的仿真信号

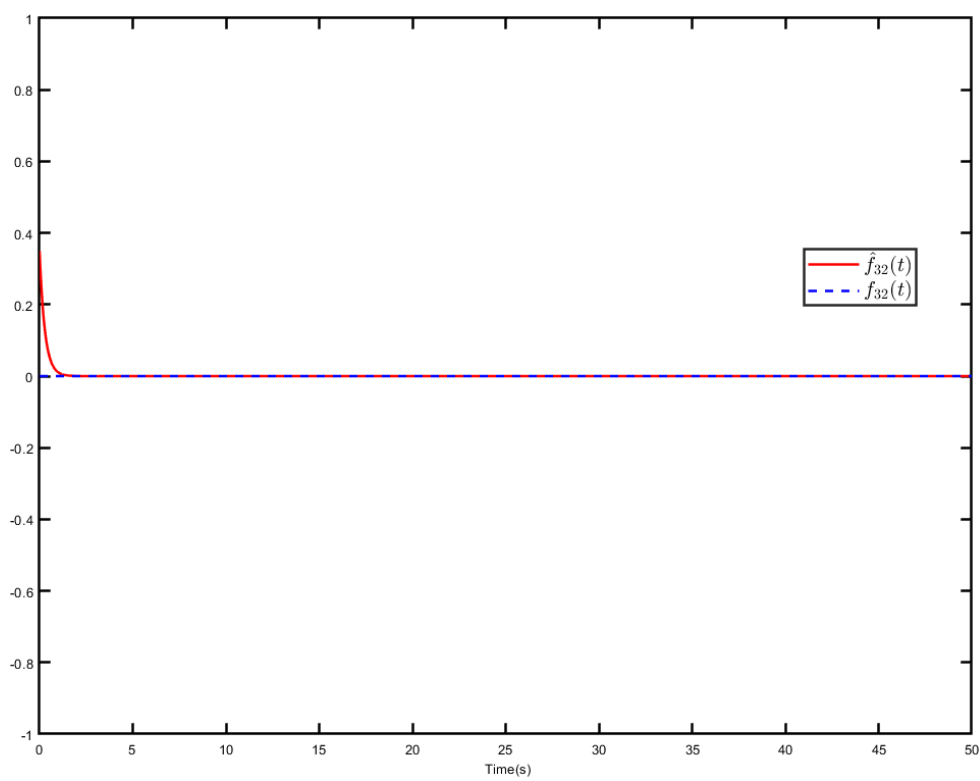


图 4.5 $f_{32}(t)$ 和 $\hat{f}_{32}(t)$ 的仿真信号

例 2: 系统模型不满足观测器匹配条件

为了进一步阐述本章提出的基于中间估计器的分布式故障估计观测器在系统模型不满足观测器匹配条件下的有效性, 该部分重新构造了例 1 中由四架飞行器组成的多智能体系统模型, 其中每架飞行器被建模为:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= \begin{bmatrix} -9.9477 & -0.7476 & 0.2662 & 5.0337 \\ 52.1659 & 2.7452 & 5.5532 & -24.4221 \\ 26.0922 & 2.6361 & -4.1975 & -19.2774 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} x_i(t) \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0.4422 & 0.1761 \\ 3.5446 & -7.5922 \\ -5.5200 & 4.4900 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u_i(t) \\ y_i(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_i(t)\end{aligned}$$

其中状态 $x_i(t)$ 包含飞行器的水平速度、垂直速度、俯仰速率和俯仰角度。控制输入 $u_i(t)$ 包含纵摇控制和纵摇循环控制。假设多智能体系统的通信拓扑图如图 4.1 所示。在该拓扑有向图中第一个节点包含一个自环, 其拉普拉斯矩阵 L 和闭环矩阵 G 为:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

假设第一节点 $f_1(t) = [f_{11}(t), f_{12}(t)]^T$ 和第三节点 $f_3(t) = [f_{31}(t), f_{32}(t)]^T$ 分别发生具有以下形式的执行器故障:

$$f_{11}(t) = 0$$

$$f_{12}(t) = \begin{cases} 0.5\sin(0.3(t-1)), & 40s \leq t < 50s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

并且

$$f_{31}(t) = 0$$

$$f_{32}(t) = \begin{cases} 0.5\cos(0.3(t-1)), & 40s \leq t < 50s \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其他节点无故障即 $(f_i(t) = 0, i = 2, 4)$ 。

假设 $E = [1, -1; 0, 0; -1, 1; 0, 0]$ 。可以注意到本例中 $CE = [0, 0; 0, 0; 0, 0]$, 即 $\text{rank}(CE) = 0$, 不满足观测器匹配条件, 传统故障估计观测器不适用于此类情况。

设定 $\varepsilon = 0.9$, $\omega = 3.5$ 。根据定理 4.1, 可以得到如下观测器增益矩阵

$$H = \begin{bmatrix} 185.3901 & 743.8350 & 1.9558 \\ 13.56772 & 554.7411 & 7.9558 \\ -130.6905 & -516.7318 & 0.9107 \\ -2.2901 & -9.4959 & -0.1121 \end{bmatrix}$$

假设系统初值 $x = 0.1 \times [1; 1; 1; 1]$ ，并利用所获得的观测器增益进行仿真实验。为了进一步阐述故障估计结果，作者将给出每个智能体的状态曲线、状态估计结果、执行器故障 1 和执行器故障 3 的估计结果，从仿真结果可以验证本文方法在不满足观测器匹配条件下的有效性和可行性。

通过图 4.6 至图 4.9 反映的四个智能体系统状态曲线可以看出，相应的执行器故障分别发生在智能体 1 和智能体 3 的第二状态向量上，当故障发生时本章提出的方法可以有效保证系统的稳定性。接下来，图 4.10 和图 4.11 分别表示智能体 1 和智能体 3 的系统状态曲线及其估计曲线。

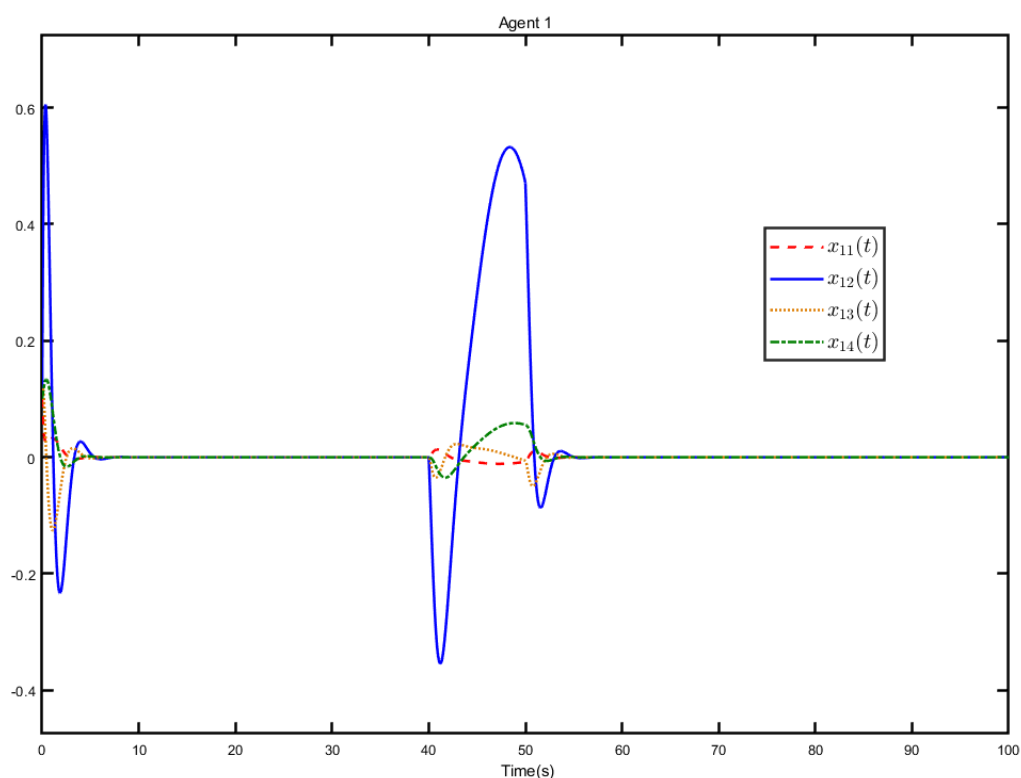


图 4.6 智能体 1 的系统状态曲线

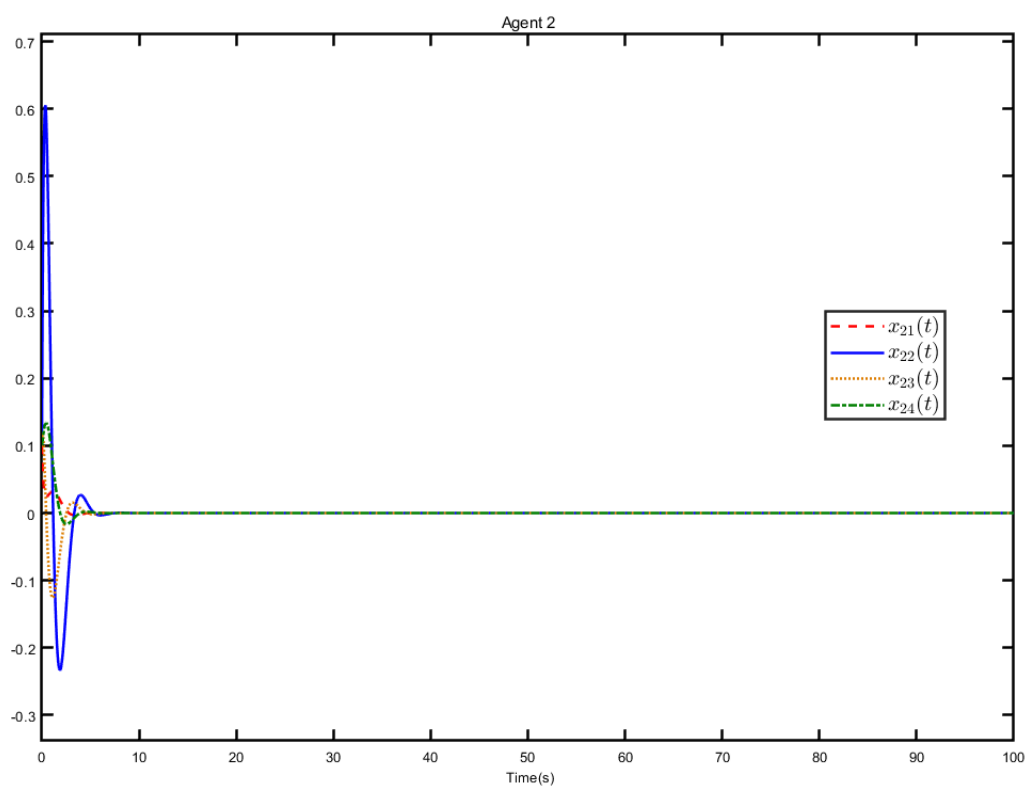


图 4.7 智能体 2 的系统状态曲线

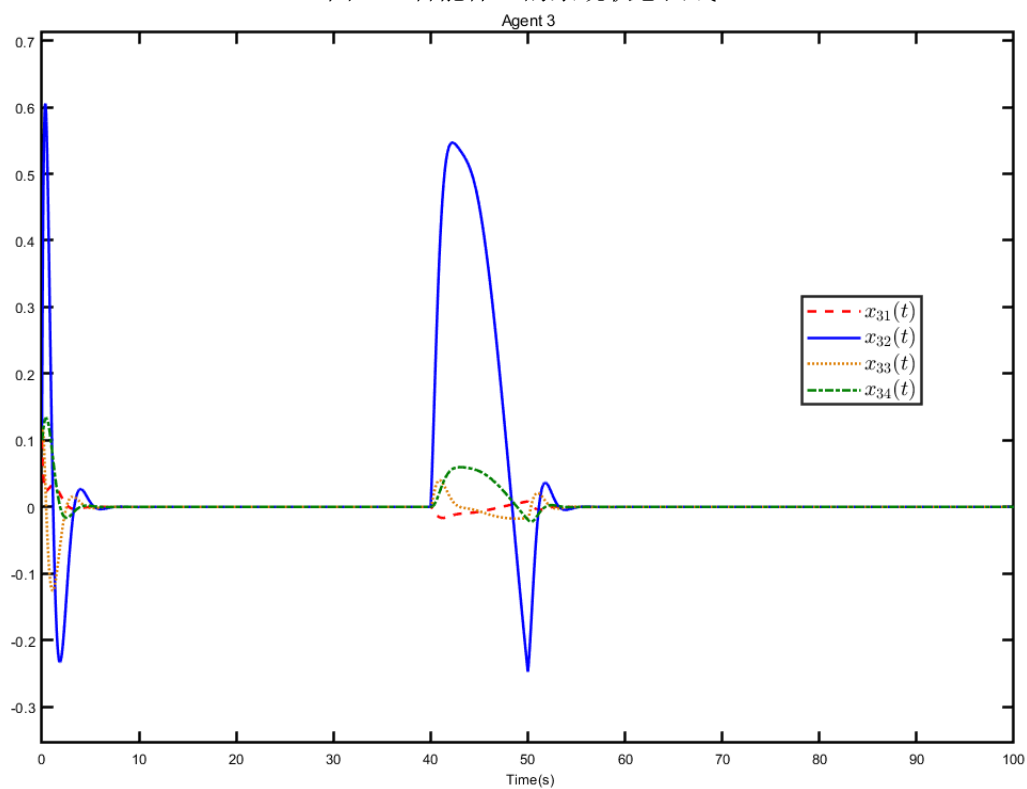


图 4.8 智能体 3 的系统状态曲线

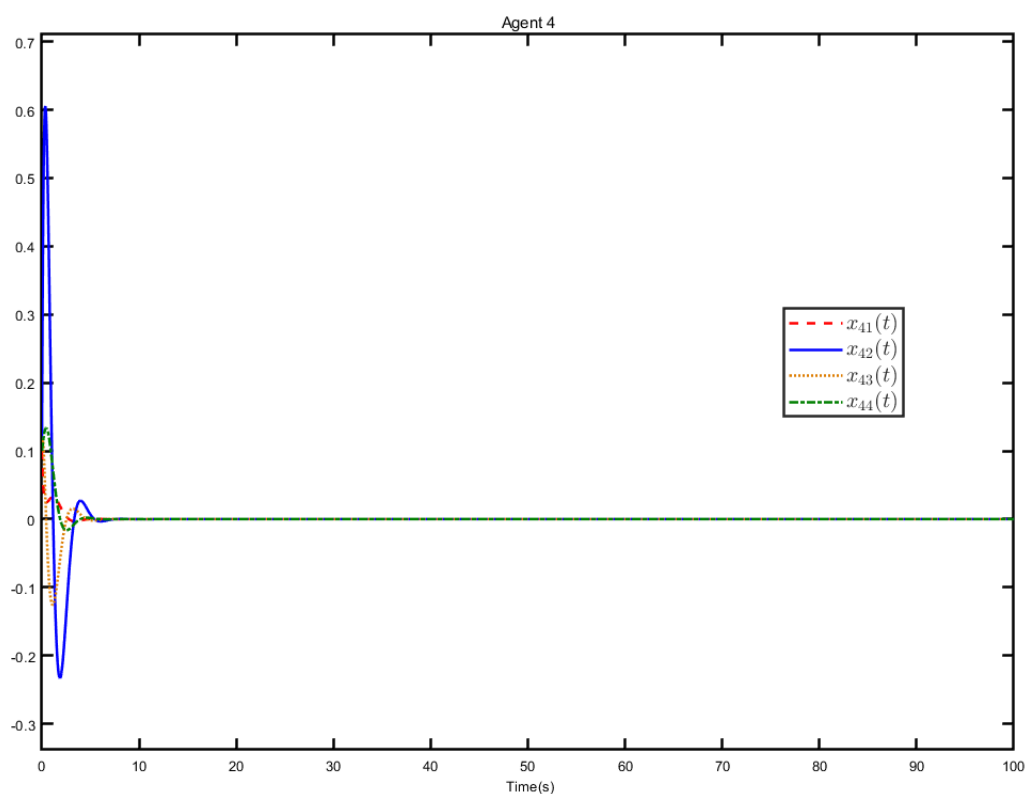


图 4.9 智能体 4 的系统状态曲线

通过以下仿真结果可以看出本文方法可以很好的估计系统状态，在图 4.10 和图 4.11 中实线表示系统的真实状态，虚线是其估计。相应的，智能体 2 和智能体 4 的曲线同样可以画出，因并无故障发生在这两个智能体上，故此从略。接下来，为了进一步阐述故障估计的结果，作者将给出执行器故障 1 和执行器故障 3 的仿真结果，从仿真结果可以验证本文方法的有效性和可行性。

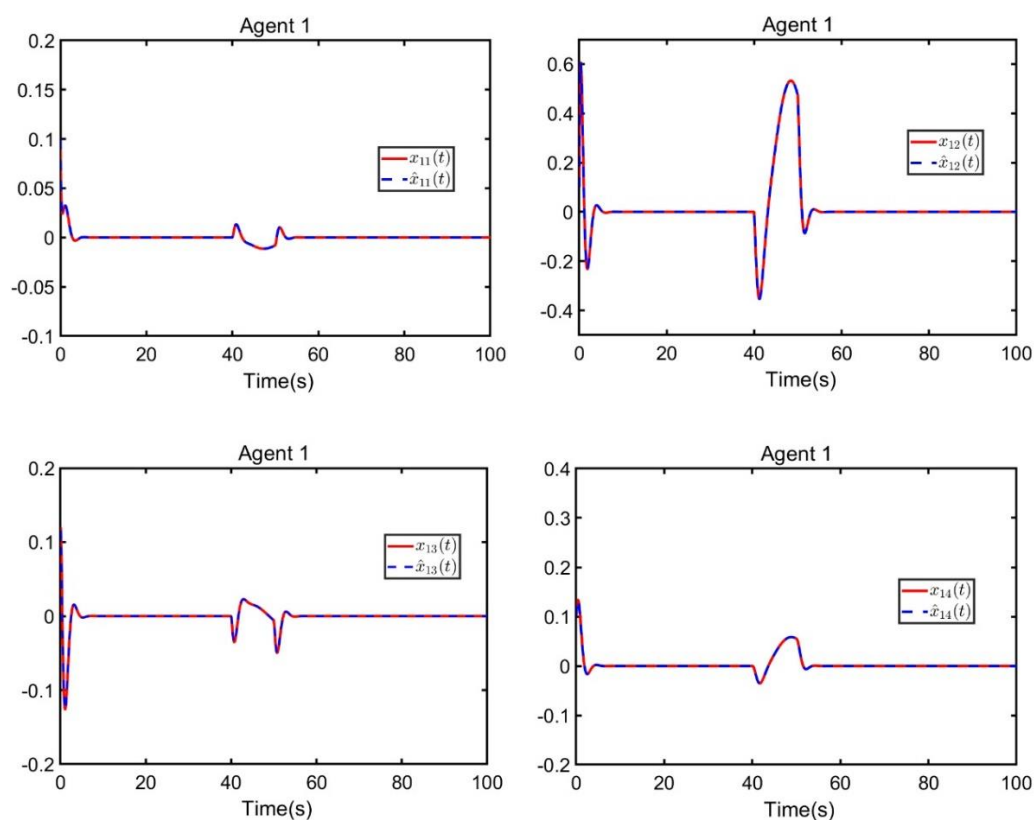


图 4.10 智能体 1 的状态曲线及其估计曲线

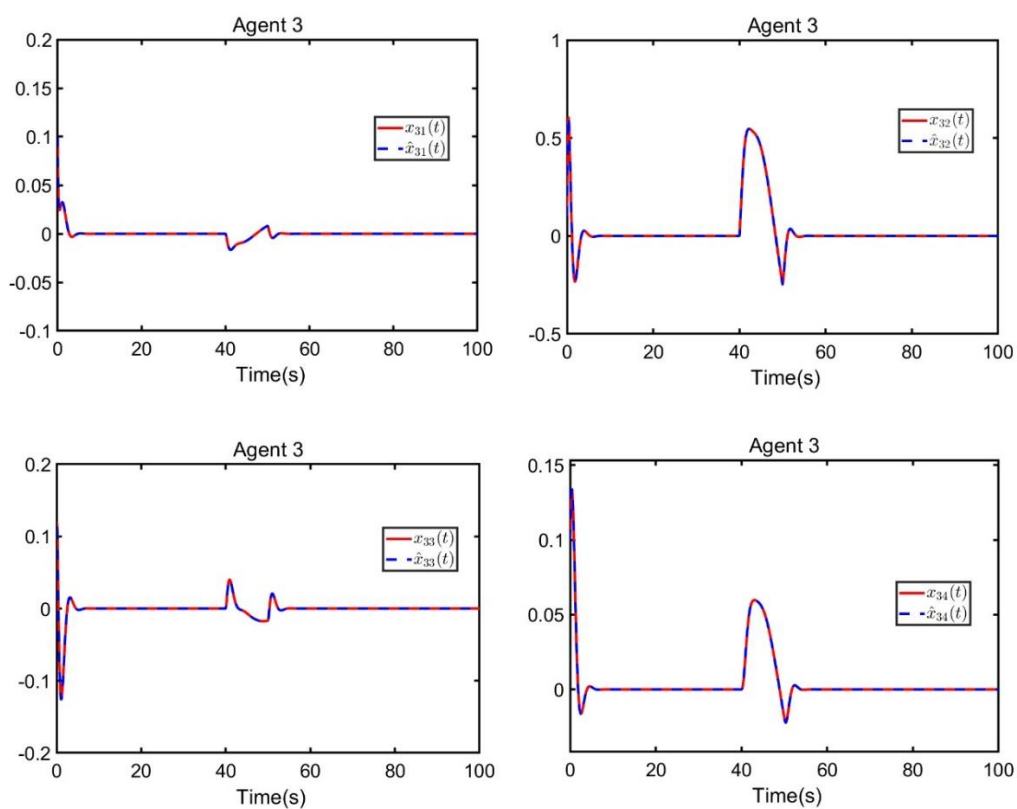


图 4.11 智能体 3 的状态曲线及其估计曲线

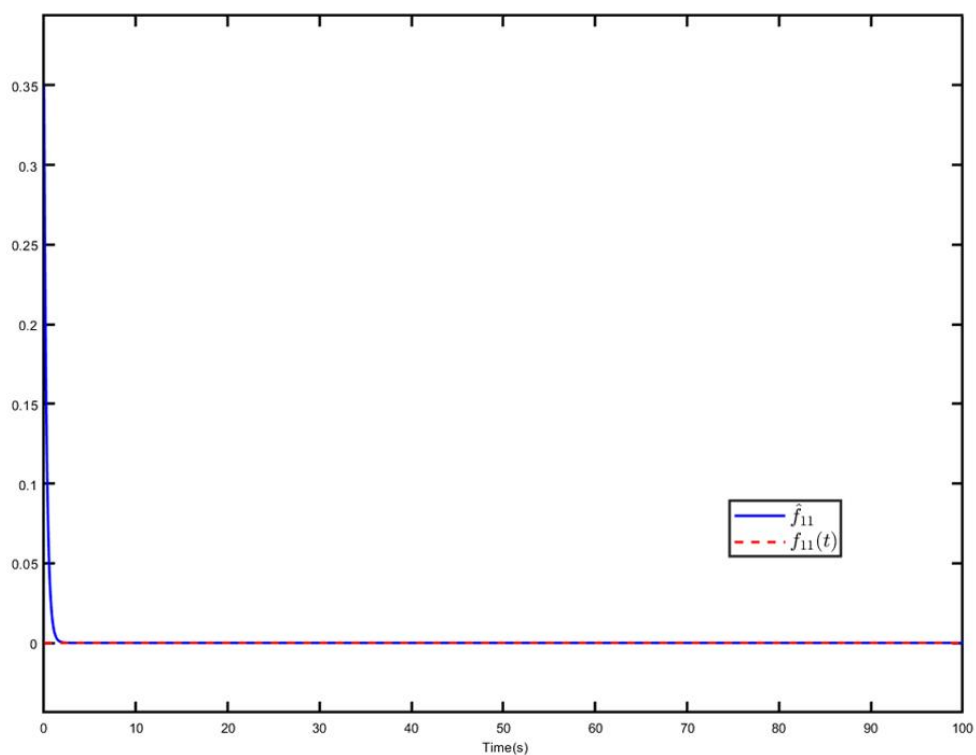


图 4.12 $f_{11}(t)$ 和 $\hat{f}_{11}(t)$ 的仿真信号

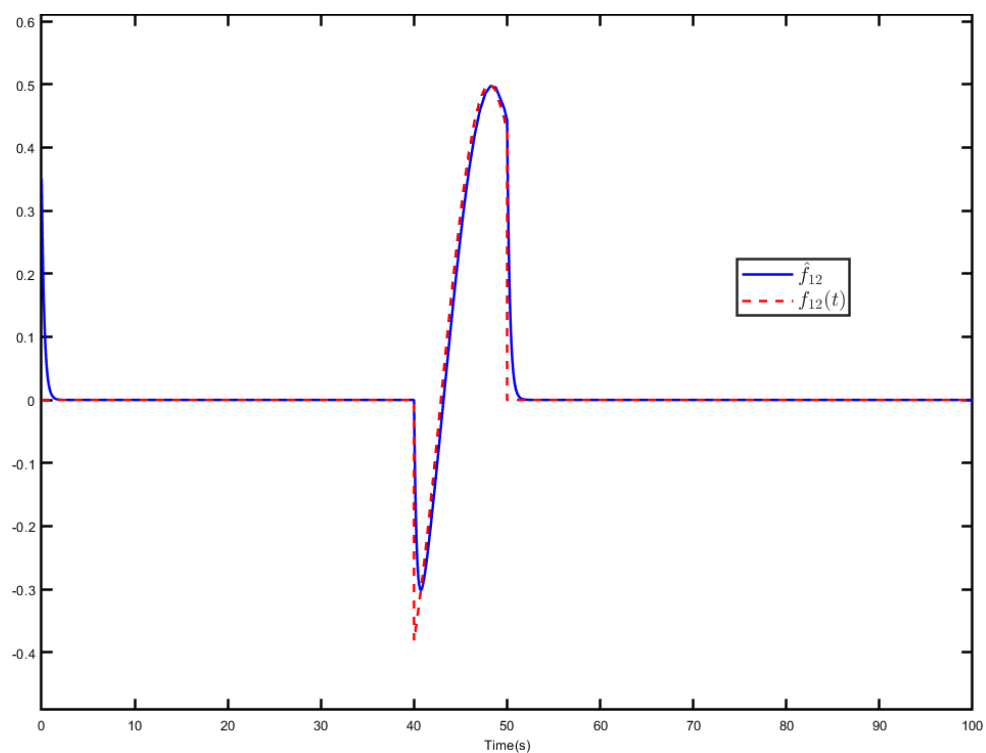


图 4.13 $f_{12}(t)$ 和 $\hat{f}_{12}(t)$ 的仿真信号

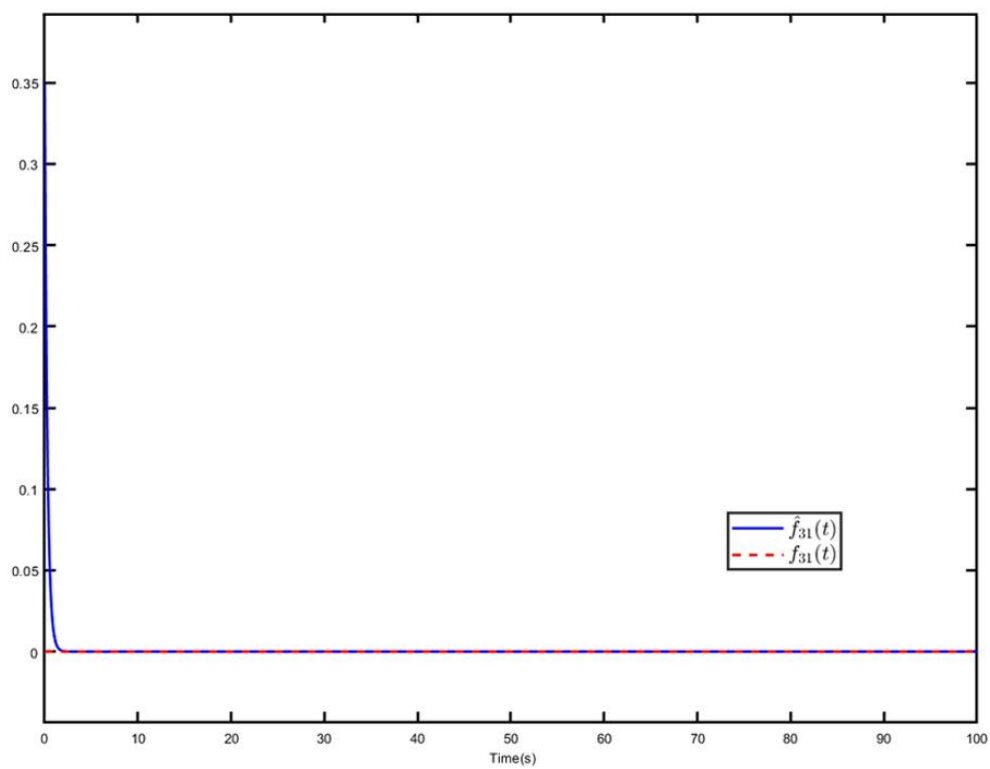


图 4.14 $f_{31}(t)$ 和 $\hat{f}_{31}(t)$ 的仿真信号

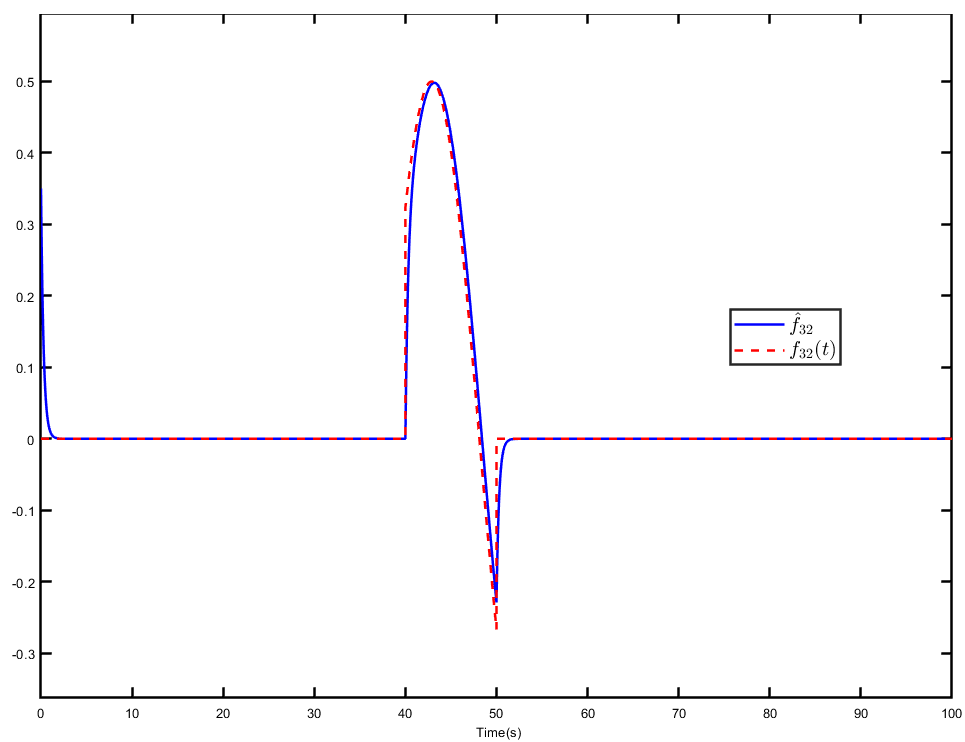


图 4.15 $f_{32}(t)$ 和 $\hat{f}_{32}(t)$ 的仿真信号

图 4.12 至图 4.15 表明本章提出的基于中间估计器的分布式故障估计观测器,在不满足观测器匹配条件下时,可以有效的跟踪故障信号。其中虚线表示故障信号,实线是其估计值。

4.5 本章小结

在本章中,针对一类带有执行器故障多智能系统,设计了基于中间估计器的分布式故障估计观测器。通过构造一个新的 Lyapunov 函数,利用矩阵不等式和 Schur 补引理,保证全局误差系统稳定的充分条件,并以 LMI 形式表示,并得到了分布式故障估计观测器增益矩阵,实现了对状态和故障同时进行估计。仿真结果验证了本章结果的有效性和可行性。

第5章 全文总结与展望

5.1 全文总结

本文针对多智能体系统,基于代数图论、LMI理论、LKF稳定性理论、鲁棒控制理论对分布式故障检测方法进行了深入的探讨和研究。首先,研究一类带有模型不确定性的多智能体系统故障估计问题,提出了一种分布式故障估计观测器的设计方法。随后,针对一类带有执行器故障的多智能体系统,设计了一种基于中间估计器的分布式故障估计观测器。保证系统稳定性的同时,消除了观测器匹配条件限制,进一步降低系统保守性。最后通过仿真实验,验证了方法的有效性和可行性。

本文完成的主要工作如下:

(1) 研究一类带有模型不确定性的多智能体系统分布式故障估计滤波器设计问题。首先基于有向通信拓扑定义相对输出估计误差。然后利用构建的可调节参数,设计一种新的分布式故障估计观测器。基于 H_∞ 极点配置方法,计算出可行的分布式故障估计器增益。最后分别针对带有扰动和未考虑扰动两种情况下验证所提出方法的有效性和可行性。

(2) 研究一类基于中间估计器的多智能体系统故障估计问题。不同于(1)中的工作,提出了一种引入中间故障估计器的新型分布式故障估计方法,消除了现有的故障估计方法大多都需要满足观测器匹配条件的限制。利用故障分布矩阵的性质,设计一种中间估计器,对状态和故障同时进行估计。通过构建同时包含原系统状态和中间估计变量的新Lyapunov函数,获得了分布式故障估计器存在的充分条件和分布式故障估计观测器的增益矩阵。最后通过仿真实验,分别针对满足观测器匹配条件和不满足观测器匹配条件两种情况下验证所提方法的有效性。

5.2 工作展望

多智能体系统结构功能甚为复杂,因此对于此类系统进行数学建模时要分析综合每个智能体系统特性,故障检测时要考虑多智能体系统一致性方法,综合考虑不同于传统系统的控制策略。目前大型多智能体系统的研究仍然存在单一化和理想化,还有许多问题有待解决:

(1) 多智能体系统网络结构复杂、信息量庞大,智能体间通信会占用大量网络资源与通信带宽,当通信带宽不能满足多智能体系统的需要时,极易造成信道堵塞,从而发生智能体系统间通讯时滞和数据丢失。这两种现象会导致智能体之间信息传输

不及时,传递错误信息,发生执行器动作滞后或者错误动作等情况,使得智能体无法按照既定轨迹运动,降低多智能体系统性能,导致多智能体系统事故的发生。但现有时滞和数据丢失的处理方法多针对传统系统,并没有根据多智能体系统的特点提出更加有针对性的处理方法。除此之外,由于多智能体系统比传统系统更加复杂,精准构建多智能体系统时滞和数据丢失模型比较困难。由此可见,研究多智能体系统的通信时滞问题时非常必要。

(2) 故障诊断技术包含故障检测与故障容错技术。本文针对多智能体系统的故障检测与故障估计问题进行了研究,但没有讨论故障容错问题。故障容错是指在故障发生之前或之后,根据检测的故障的信息,采用相应的故障容错方法,保证系统能够正常运转,完成既定目标。此方法对于提高多智能体稳定性有着重要意义,是多智能体领域进一步研究方向之一。

(3) 多智能体系统往往价格昂贵,实际操作难度大,导致大多研究结果只停留在理论层面,无法结合实际进一步研究验证。以无人机组成的多智能体系统为例,一台大疆无人机的价格接近 1 万人民币,通常一个多智能体系统由 4 架以上无人机构成,可见构建一个多智能体系统价格不菲。不仅如此,为了保证实验的准确性、实验数据的有效性以及实验设备和实验人员的安全,无人机实验需要较大的场地,同时对天气风速等方面要求苛刻。综上所述,多智能体系统理论结合实际非常困难。

总而言之,尽管目前对于多智能体系统的故障检测问题已经涌现出了许多的研究成果,但仍有大量未解决的技术难点和值得继续深入研究的有价值的问题。可以肯定的是,随着理论研究的不断深入,多智能体系统的故障检测方法一定会进一步成熟和发展。

致 谢

首先非常感谢我的导师王申全老师，是他的孜孜不倦的教导和一次次百忙之中的批改才使我的毕业论文得以顺利完成。在我的论文撰写过程中，王申全老师时刻跟进我的论文进度，提出建设性的意见，保证了我的论文完成质量。王老师对待学术认真严谨，在面对有难度的课题时，他一丝不苟、实事求是、不轻言放弃的精神深深影响了我，在我以后的求学道路上起到了重要指导意义。在此，我向我的导师表达深深的敬意和由衷的感谢！

另一方面，我要感谢我实验室的师兄师姐、师弟师妹以及其他帮助过我的同学们。在生活中让我感到了无比的温暖，在学术上给予了我很多的帮助。我特别要感谢我的师兄纪文呈宇和师姐王越男，他们在我的课题开展和仿真研究的过程中对我无私帮助，帮助我解决难题，对我论文的完成起到了重要的助力作用。

最后要特别感谢我的父母，谢谢他们一直以来对我的无条件的关心，爱护和支持。感谢所有帮助我关心我的人，希望各位事事随遂愿。

参考文献

- [1] Durfee, Edmund H.; Lesser, Victor R. Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning. in: Distributed artificial intelligence. Morgan Kaufmann, 1989. p. 229-243.
- [2] Minsky, Marvin. The emotion machine: Commonsense thinking, artificial intelligence, and the future of the human mind. Simon and Schuster, 2007.
- [3] Olfati-Saber, R., Fax, J. A., & Murray, R. M.. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1), 215-233.
- [4] Araya-Polo M, Dahlke T, Frogner C, et al. Automated fault detection without seismic processing[J]. The Leading Edge, 2017, 36(3): 208-214.
- [5] Garoudja E, Harrou F, Sun Y, et al. Statistical fault detection in photovoltaic systems[J]. Solar Energy, 2017, 150: 485-499.
- [6] Pan Y, Yang G H. Event-triggered fault detection filter design for nonlinear networked systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 48(11): 1851-1862.
- [7] Liu Z, He H. Sensor fault detection and isolation for a lithium-ion battery pack in electric vehicles using adaptive extended Kalman filter[J]. Applied Energy, 2017, 185: 2033-2044.
- [8] Khalastchi E, Kalech M, Rokach L. A hybrid approach for improving unsupervised fault detection for robotic systems[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 81: 372-383.
- [9] Alhelou H H. Fault detection and isolation in power systems using unknown input observer[M]//Advanced condition monitoring and fault diagnosis of electric machines. IGI global, 2019: 38-58.
- [10] Li L, Luo H, Ding S X, et al. Performance-based fault detection and fault-tolerant control for automatic control systems[J]. Automatica, 2019, 99: 308-316.
- [11] Liu X, Su X, Shi P, et al. Fault detection filtering for nonlinear switched systems via event-triggered communication approach[J]. Automatica, 2019, 101: 365-376.
- [12] Gao X, Liu X, Han J. Reduced order unknown input observer based distributed fault detection for multi-agent systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(3): 1464-1483.
- [13] Xu D, Zhu F, Zhou Z, et al. Distributed fault detection and estimation in cyber-physical

- systems subject to actuator faults[J]. ISA transactions, 2019.
- [14] Yang P, Ma B, Dong Y, et al. Fault-tolerant consensus of leader-following multi-agent systems based on distributed fault estimation observer[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2018, 16(5): 2354-2362.
- [15] Zhang K, Jiang B, Chen M, et al. Distributed Fault Estimation and Fault-Tolerant Control of Interconnected Systems[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2019.
- [16] Khalili M, Zhang X, Polycarpou M M, et al. Distributed adaptive fault-tolerant control of uncertain multi-agent systems[J]. Automatica, 2018, 87: 142-151.
- [17] Chu X, Nian X, Wang H, et al. Distributed fault tolerant tracking control for large-scale multi-motor web-winding systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(4): 543-553.
- [18] Khodabandeh S, Shishavan H K, Hashemzadeh F. Distributed fault tolerant control and estimation for leader-follower consensus of multi-agent systems with actuator faults[C]//2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI). IEEE, 2017: 0872-0877.
- [19] Liu Y, Yang G H. Integrated design of fault estimation and fault-tolerant control for linear multi-agent systems using relative outputs[J]. Neurocomputing, 2019, 329: 468-475.
- [20] Zhang K, Jiang B, Shi P, et al. Distributed fault estimation design of interconnected systems with external disturbances[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(3): 377-386.
- [21] Hajshirmohamadi S, Sheikholeslam F, Meskin N. Actuator Fault Estimation for Multi-agent Systems: A Sliding-mode Observer-based Approach[C]//2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications. IEEE, 2019: 1000-1005.
- [22] Liu X, Gao X, Han J. Distributed fault estimation for a class of nonlinear multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018.
- [23] Zhang K, Jiang B, Shi P. Distributed fault estimation observer design with adjustable parameters for a class of nonlinear interconnected systems[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2018, 49(12): 4219-4228.
- [24] Bu X, Dong H, Wang Z, et al. Non-fragile distributed fault estimation for a class of nonlinear time-varying systems over sensor networks: the finite-horizon case[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2018, 5(1): 61-69.
- [25] Zhang K, Liu G, Jiang B. Robust unknown input observer-based fault estimation of

- leader–follower linear multi-agent systems[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2017, 36(2): 525-542.
- [26] Quan Y, Chen W, Wu Z, et al. Observer-based distributed fault detection and isolation for heterogeneous discrete-time multi-agent systems with disturbances[J]. IEEE Access, 2016, 4: 4652-4658.
- [27] Li Y, Fang H, Chen J, et al. Distributed fault detection and isolation for multi-agent systems using relative information[C]//2016 American Control Conference (ACC). IEEE, 2016: 5939-5944.
- [28] Chen X, Zhang K, Jiang B. Finite-time unknown input observer-based distributed fault diagnosis for multi-agent systems with disturbances[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2018, 37(10): 4215-4233.
- [29] Lauricella M, Farina M, Schneider R, et al. A distributed fault detection and isolation algorithm based on moving horizon estimation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 15259-15264.
- [30] Yang P, Xu M, Li D, et al. Distributed fault tolerant consensus control for multi-agent system with actuator fault based on adaptive observer[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(15): 4207-4217.
- [31] Xu Y, Jiang B, Zhang K. Distributed fault estimation basing on a united adaptive and sliding-mode observer for multi-agent systems[C]//2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC). IEEE, 2016: 1333-1338.
- [32] Gahinet P, Apkarian P. A linear matrix inequality approach to H_∞ control[J]. International journal of robust and nonlinear control, 1994, 4(4): 421-448.
- [33] Liu Y, Jia Y. Robust H_∞ consensus control of uncertain multi-agent systems with time delays[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2011, 9(6): 1086-1094.
- [34] Zames, George. "Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses." IEEE Transactions on automatic control 1981, 26(2): 301-320.
- [35] Chen J, Patton R J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [36] Ding S X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [37] Zhang K, Jiang B, Shi P. Observer-based fault estimation and accomodation for dynamic

- systems[M]. Springer, 2012.
- [38] Wada K, Toriu T, Hama H. An efficient algorithm for simultaneous multiple fault detection in immunity-based system diagnosis[J]. *Int. J. Innov. Comput., Inf. Control*, 2014, 10(5): 1699-1714.
- [39] Ren W, Beard R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control[M]. London: Springer London, 2008.
- [40] 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.
- [41] Hu W, Liu L, Feng G. Consensus of linear multi-agent systems by distributed event-triggered strategy[J]. *IEEE transactions on cybernetics*, 2015, 46(1): 148-157.
- [42] Qin L, He X, Zhou D H. A survey of fault diagnosis for swarm systems[J]. *Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal*, 2014, 2(1): 13-23.
- [43] Teixeira A, Shames I, Sandberg H, et al. Distributed fault detection and isolation resilient to network model uncertainties[J]. *IEEE transactions on cybernetics*, 2014, 44(11): 2024-2037.
- [44] Zhang X, Zhang Q. Distributed fault diagnosis in a class of interconnected nonlinear uncertain systems[J]. *International Journal of Control*, 2012, 85(11): 1644-1662.
- [45] Zhang K, Jiang B, Shi P. Adjustable parameter-based distributed fault estimation observer design for multiagent systems with directed graphs[J]. *IEEE transactions on cybernetics*, 2016, 47(2): 306-314.
- [46] Zhang K, Jiang B, Cocquempot V. Adaptive technique-based distributed fault estimation observer design for multi-agent systems with directed graphs[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(18): 2619-2625.
- [47] Kim H, Shim H, Seo J H. Output consensus of heterogeneous uncertain linear multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, 56(1): 200-206.
- [48] Trentelman H L, Takaba K, Monshizadeh N. Robust synchronization of uncertain linear multi-agent systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(6): 1511-1523.
- [49] Zhu J W, Yang G H. Fault-tolerant control for linear systems with multiple faults and disturbances based on augmented intermediate estimator[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 11(2): 164-172.
- [50] Wang Y, Wang S, Ji W, et al. Fault Estimation for Continuous Time Linear Systems with

- Time-varying Delay Based on Intermediate Estimator over Fading Channels[C]//2018 37th Chinese Control Conference. IEEE, 2018: 1-5.
- [51]Zhu J W, Yang G H, Wang H, et al. Fault estimation for a class of nonlinear systems based on intermediate estimator[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 61(9): 2518-2524.
- [52]Casado-Vara R, Novais P, Gil A B, et al. Distributed continuous-time fault estimation control for multiple devices in IoT networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 11972-11984.
- [53]Liang H, Zhang L, Karimi H R, et al. Fault estimation for a class of nonlinear semi-Markovian jump systems with partly unknown transition rates and output quantization[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(18): 5962-5980.
- [54]Wang G, Yi C, Shen M. Fault estimation for continuous-time Markovian jump systems by a mode-dependent intermediate estimator[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(14): 1924-1931.
- [55]Zhu J W, Yang G H, Zhang W A, et al. Cooperative fault tolerant tracking control for multiagent systems: An intermediate estimator-based approach[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2017, 48(10): 2972-2980.
- [56]Zhu J W, Zhang W A, Yu L, et al. Robust distributed tracking control for linear multi-agent systems based on distributed intermediate estimator[J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355(1): 31-53.
- [57]Han J, Liu X, Gao X, et al. Intermediate Observer Based Robust Distributed Fault Estimation for Nonlinear Multi-Agent Systems with Directed Graphs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019.

攻读硕士学位期间研究成果

在读期间发表的学术论文:

- 1、《Quantized sampled-data control for T-S fuzzy system using discontinuous LKF approach》, 24 April 2019, Frontiers in Neuroscience, 第二作者, 导师第一作者。
- 2、《Distributed Fault Estimation for Uncertain Multiagent Systems With Directed Graphs》, 2019 Chinese Automation Congress, Nov.22-Nov.24, 2019, 第二作者, 导师第一作者。

在读期间参加的科研项目情况:

- 1、吉林省国家自然科学基金项目“20180101333JC”。
- 2、SKLMCCS 资助的“20190104”。
- 3、国家自然科学基金“61503045”。
- 4、国家自然科学基金“61603121”。

在读期间参加的科技竞赛及获奖情况:

- 1、2019 年 7 月, 获得第十四届中国研究生电子设计竞赛东北分赛区团队一等奖。
- 2、2019 年 12 月, 获得研究生国家奖学金。