

前 言

多智能体系统理论源于对自然界群体行为机制的系统解析,其核心思想源于动物群体协作模式与生态系统稳态演化规律。这些自组织现象揭示了个体通过简单规则交互即可涌现出高度自组织化与强环境适应性的群体智能特征,为分布式协同控制提供了仿生学启示。多智能体系统是由多个自主智能体通过局部交互耦合而成的统一系统,每个智能体运用其感知和接收的局部信息来实现个体目标,通过智能体之间的协作来共同实现系统的总体目标。与单智能体相比较,多智能体协同工作具有更多的优势,如协调性、分布性以及鲁棒性等。智能体可以应用于传感器、航天器以及机器人等设备实体,根据其自身耦合性、通信分布规律以及控制协议来自主实现高难度的目标,如跟踪定位、围捕以及运输等。协同控制的理论研究推动实际工程的发展,在各行各业中都存在多智能体系统协同控制应用的痕迹,例如,军事领域内水下无人艇跟踪定位船只,工业物流领域内多辆无人车保护运输大量货物,日常生活中智能交通信号传输以及无人机在广阔农田上喷洒农药等。然而,近年来对多智能体系统一致性的研究已经不能满足人类实际生产生活的需求,更复杂的编队协同控制引起了学者的广泛关注。

本书利用图论以及李雅普诺夫稳定性等有关知识,针对存在切换拓扑、未知输入扰动和输入饱和等因素的情形,对多智能体系统时变编队跟踪控制、双边时变编队跟踪控制,以及时变编队包含跟踪控制等问题进行了研究。

本书共 13 章。第 1 章阐述了多智能体系统的研究背景和意义,并对多智能体系统编队控制的国内外研究现状进行介绍。第 2 章介绍本书需要用到的一些基本概念与知识。第 3 章介绍了切换拓扑下异构多智能体系统的时变编队跟踪控制问题。第 4 章研究了有向拓扑下多智能体系统的固定时间时变编队跟踪控制问题。第 5 章讨论了有符号拓扑下多智能体系统的预定义时间时变编队跟踪控制问题。第 6 章介绍了具有未知输入领导者的多智能体系统的双边时变编队跟踪控制问题。第 7 章介绍了具有未知输入领导者的单边 Lipschitz 非线性系统的时变编队跟踪控制问题。第 8 章研究了具有未知输入领导者的事件触发下的非线性系统的时变编队跟踪控制问题。第 9 章研究了基于观测器的多智能体系统自适应时变编队跟踪控制问题。第 10 章介绍了基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队跟踪控制问题。第 11 章讨论了基于观测器的多智能体系统时变编队包含跟踪控制问题。第 12 章介绍了基于观测器的多智能体系统自适应时变编队包含跟踪

控制问题。第 13 章研究了基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队包含跟踪控制问题。

本书得到了以下项目的资助：国家自然科学基金项目“不完全信息下多智能体系统协同控制”(No. 62271195)、“网络攻击下网络化系统性能分析与优化设计”(No. 62303169)和湖北省自然科学基金项目“多智能体系统协同控制与博弈决策研究”(No. 2025AFA040)。

限于作者水平，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2026 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 多智能体系统的协同控制研究现状	2
1.2.1 不同拓扑下多智能体系统的协同控制	3
1.2.2 非线性多智能体系统的协同控制	5
1.3 多智能体系统编队控制的研究现状	6
1.3.1 时变编队控制	6
1.3.2 双边时变编队控制	7
1.4 本书的主要内容	8
参考文献	9
第 2 章 基本概念与知识	14
2.1 代数图论的基本概念和性质	14
2.2 稳定性的基本概念和结论	15
2.2.1 渐近稳定性	15
2.2.2 固定时间稳定性	16
2.2.3 预定义时间稳定性	16
2.3 其他相关概念和结论	16
参考文献	17
第 3 章 切换拓扑下异构多智能体系统的时变编队跟踪控制	19
3.1 引言	19
3.2 模型建立与问题描述	20
3.3 主要结论	21
3.3.1 设计分布式观测器	21
3.3.2 设计分布式控制器	23
3.4 数值仿真	27
3.5 本章小结	30
参考文献	31

第 4 章 有向拓扑下多智能体系统的固定时间时变编队跟踪控制	32
4.1 引言	32
4.2 模型建立与问题描述	33
4.3 主要结论	34
4.3.1 设计固定时间观测器	35
4.3.2 设计固定时间控制器	39
4.3.3 改进的控制协议	40
4.4 数值仿真	42
4.5 本章小结	46
参考文献	46
第 5 章 有符号拓扑下多智能体系统的预定义时间时变编队跟踪控制	47
5.1 引言	47
5.2 模型建立与问题描述	48
5.3 主要结论	49
5.3.1 已知 $\tilde{L}_1$ 的多智能体预定义时间时变编队控制	49
5.3.2 未知 $\tilde{L}_1$ 的多智能体预定义时间时变编队控制	53
5.4 数值仿真	56
5.5 本章小结	59
参考文献	60
第 6 章 具有未知输入领导者的多智能体系统的双边时变编队跟踪控制	61
6.1 引言	61
6.2 模型建立与问题描述	61
6.3 主要结论	63
6.3.1 基于观测器的双边编队跟踪控制	63
6.3.2 基于观测器的连续性双边编队跟踪控制协议	67
6.4 数值仿真	70
6.5 本章小结	74
参考文献	75
第 7 章 具有未知输入领导者的单边 Lipschitz 非线性系统的	
时变编队跟踪控制	76
7.1 引言	76
7.2 模型建立与问题描述	76
7.3 单边 Lipschitz 非线性系统的时变编队跟踪控制下的主要结论	78
7.4 数值仿真	82
7.4 本章小结	85

参考文献	86
第 8 章 具有未知输入领导者的事件触发下的非线性系统的 时变编队跟踪控制	87
8.1 引言	87
8.2 模型建立与问题描述	87
8.3 基于事件触发策略的非线性系统时变编队跟踪控制下的主要结论	88
8.4 数值仿真	95
8.5 本章小结	97
参考文献	97
第 9 章 基于观测器的多智能体系统自适应时变编队跟踪控制	99
9.1 引言	99
9.2 模型建立与问题描述	100
9.3 主要结论	101
9.3.1 控制协议设计	101
9.3.2 稳定性与可行性分析	102
9.4 数值仿真	106
9.5 本章小结	109
参考文献	109
第 10 章 基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队跟踪控制	111
10.1 引言	111
10.2 模型建立与问题描述	111
10.3 主要结论	113
10.3.1 基于状态反馈的多智能体自适应双边时变编队跟踪控制	113
10.3.2 基于输出反馈的多智能体自适应双边时变编队跟踪控制	115
10.5 数值仿真	118
10.6 本章小结	121
参考文献	121
第 11 章 基于观测器的多智能体系统时变编队包含跟踪控制	122
11.1 引言	122
11.2 模型建立与问题描述	122
11.3 主要结论	124
11.3.1 不连续的时变编队包含跟踪控制	124
11.3.2 连续的时变编队包含跟踪控制	131
11.4 数值仿真	136
11.5 本章小结	139

参考文献	140
第 12 章 基于观测器的多智能体系统自适应时变编队包含跟踪控制	141
12.1 引言	141
12.2 模型建立与问题描述	142
12.3 主要结论	143
12.3.1 不连续的自适应时变编队包含跟踪控制	143
12.3.2 连续的自适应时变编队包含跟踪控制	156
12.4 数值仿真	164
12.5 本章小结	169
参考文献	169
第 13 章 基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队包含跟踪控制	170
13.1 引言	170
13.2 模型建立与问题描述	170
13.3 主要结论	172
13.3.1 基于状态反馈的自适应双边时变编队包含跟踪控制	172
13.3.2 基于输出反馈的自适应双边时变编队包含跟踪控制	177
13.4 数值仿真	182
13.5 本章小结	188
参考文献	188

第1章 绪 论

多智能体系统的编队控制问题引起了社会各界人士的关注，并且在众多领域有很高的实际应用价值，如工业领域、军事领域、航天领域等。随着时代的快速发展，现代工业任务的难度不断增加，系统的复杂程度呈几何式攀升，多智能体系统编队控制已经逐渐成为重要的研究热点。本章首先介绍多智能体系统的研究背景及意义，然后对多智能体系统编队控制的研究现状进行分析，最后介绍本书的主要内容。

1.1 研究背景及意义

自然界中，广泛存在的群体协作现象体现了个体依靠局部规则实现复杂全局行为的独特能力。例如，鸟群迁徙时形成“人”字队形，通过队形排列减少风阻和节省能量；鱼群通过紧密编队躲避捕食者，展现出高度协调的能力；蚂蚁通过化学信号标记最佳路径，并且利用分工协作快速搬运物体；狼群通过分工合作围猎，以最小代价获取最大收益^[1]。这些自然现象启发了多智能体系统的研究^[2]，人类能够借鉴这种协作模式解决复杂的工程和社会问题。

多智能体系统(multi-agent system, MAS)是由多个具有独立的传感、计算及通信能力的智能体组成的分布式系统，这些智能体通过相互通信与协作完成特定任务^[3]。在实际应用中，智能体有机器人^[4]、无人机^[5]或车辆^[6]等。受自然界协作现象的启发，智能体的独立决策与交互能力使多智能体系统在应对动态、不确定性强的复杂环境时展现出显著优势。近年来，多智能体系统发展迅速，并逐步成为控制理论、人工智能及工程应用等领域的重要研究方向。

多智能体系统为解决复杂问题提供了高效的技术支撑，因此在众多领域有很高的实际应用价值。在智能交通系统中，多智能体系统通过分布式控制实现了联网自动驾驶车辆的协同编队。这不仅促进了多车辆间的信息共享与协调驾驶，还大幅提升了道路利用效率和交通安全性^[7]。在无人机集群中，多智能体系统能够实现无人机的编队飞行，并且通过分布式感知与协作快速覆盖目标区域，完成巡逻、监测、搜救及物资投放等任务^[8]。在工业自动化与智能制造中，多智能体系统通过协同机器人技术实现了生产线任务的高效分工与动态调度，提高了资源利用效率和物流作业的精准性^[9]。在智能电网中，多智能体系统利用分布式方法对

能源资源进行合理分配,并通过智能协作提高了电网运行效率、稳定性和故障恢复能力。在国防领域,多智能体系统被广泛应用于无人机、无人车和水下无人潜艇的协同作战,提升了侦察、巡逻和任务执行的智能化程度与效率。而在物联网与智能家居领域,多智能体系统促进了设备间的协作,通过分布式控制实现温控、安防和资源优化管理等功能。总之,多智能体系统凭借强大的分布式决策与协作能力,成为推动智能化发展的重要技术支撑,在多个领域中展现出深远的应用价值和广阔的前景。

一致性控制、编队控制和包含控制等都是多智能体系统协同控制的主要研究内容。随着人工智能技术的飞速发展,多智能体系统的编队协同控制问题引起了社会各界人士的关注。在工业领域,京东成功打造了世界首个无人仓库,将群体机器人应用到仓库货物的存储、取出及运输上,整个仓储系统的运行效率有极大的提高。在军事领域,通过利用多无人机编队^[10],在敌方领域完成探索、监视以及特定目标的轰炸等任务,可以很大程度上减少战场上人员的伤亡。在航天领域,利用多颗小卫星的编队^[11]可以提高卫星网络系统的可靠性,完成单个航天器难以实现的空间探测等复杂任务。因为多智能体编队协同在完成任务时具有较高的工作效率,所以也逐渐应用到智能电网、无线传感器网络、交通路况协调^[12]等领域。随着时代的快速发展,现代工业任务的难度不断增加,系统编队控制的复杂程度呈几何式攀升,多智能体系统编队控制已经逐渐成为重要的研究热点。多智能体以合适的编队队形协同工作,有助于提高系统的效率,节约人力资源。因此,多智能体系统的协同控制研究是极富现实意义的。

1.2 多智能体系统的协同控制研究现状

多智能体系统是由多个自主智能体通过局部交互耦合而成的统一系统,每个智能体运用其感知和接收的局部信息来实现个体目标,通过智能体之间的协作来共同实现系统的总体目标,如表演、协作运输、围捕等。与单智能体相比,多智能体协同工作具有更多的优势。例如:

(1) 多个智能体作为一个群体协同完成给定的任务时,分配到单个智能体的任务复杂度大大降低,可以满足单个智能体难以提供的效率和容错率。因此,多智能体系统具有较强的鲁棒性。

(2) 多智能体系统通过智能体之间的相互合作来弥补单个智能体的不足,因此,对于智能体结构和功能的要求会更低,成本也会减少。

(3) 多智能体系统的工作效率更高,因为智能体之间可以通过交流通信,分享和反馈各自的状态信息,辅助智能体完成任务。

关于多智能体系统的协同控制问题，主要分为以下三个方面。

1. 拓扑结构

拓扑结构描述了智能体之间的信息交换和交互方式，是多智能体系统协同控制的关键因素。在固定拓扑中，智能体之间的通信关系不随时间变化；而在切换拓扑中，智能体之间的通信关系随着时间动态变化。拓扑结构的变化直接影响智能体间的信息流动和协作能力，对系统稳定性和鲁棒性具有重要影响。

2. 动力学模型

动力学模型是描述多智能体系统中每个智能体状态随时间变化规律的数学表达式，也是分析和设计控制算法的基础。智能体的动力学模型可以分为一阶动力学^[13]、二阶动力学^[14]、线性定常系统^[15,16]及欧拉-拉格朗日系统^[17-19]等。不同动力学模型的选取不仅影响系统的稳定性分析，还直接决定了协同控制算法的设计复杂度和实际可行性。

3. 控制目标

多智能体系统协同控制的目标通常根据具体任务需求而定，主要有一致性控制^[20,21]、编队控制^[22]、包含控制^[23]等。控制目标的设定直接影响系统的控制协议设计，针对不同目标需要引入适应性的控制策略和性能指标。

1.2.1 不同拓扑下多智能体系统的协同控制

对于实际工程场景中仍存在局部功能失效、突发干扰及不可预测的信息丢失等异常工况下的功能维持问题，切换拓扑可以通过重新配置网络来恢复或者改善性能，提高整体系统的鲁棒非线性。另外，在网络资源受限的场景下，切换拓扑可动态实施负载均衡策略，有效降低信道拥塞风险，同时通过通信优先级动态分配确保关键任务链路的服务质量。切换拓扑在多智能体系统中的作用吸引了大量学者的关注。

2010年，Ni等^[24]针对高阶系统在固定和切换拓扑的两种情况进行了讨论比较。基于系统中同时含有领导者和跟随者的情况，设计了使系统能够完成一致性任务的控制协议。2023年，Zhu等^[25]针对多智能体系统的一致性问题的展开探究。在切换拓扑和含有未知动态的情况下，提出了一种基于时变衰减函数的预定义时间自适应一致性控制策略。另外，该策略可以实现对跟踪误差收敛所需时间的灵活调控。2023年，Lv等^[26]首次研究了在固定和切换拓扑下网络化多智能体系统一致性问题的全分布式规定时间控制方法。与固定时间一致性的现有结果不同，所提出的方法消除了对全局拓扑信息的需求，同时在与初始条件无关的规定时间

内达成一致。2023 年, Liu 等^[27]基于切换拓扑展开对多智能体系统一致性控制问题的探究。结合模糊逻辑系统, 提出了一种全分布式的全局一致控制方法。创新性地采用模糊逻辑系统实现未知非线性扰动估计, 为系统提供非线性动态补偿机制。针对多智能体系统的切换拓扑, 提出了一种使用新的分段可微函数对代理的状态和一致性误差进行重构的机制, 该机制使状态和一致性误差在每个切换时刻为 0, 并有助于基于屏障函数的控制设计, 以防在切换时刻出现意外的控制器动作。

除了切换拓扑, 当前基于有向拓扑结构的时变编队控制研究已经受到大量学者的关注。有向拓扑通过定向通信链路描述智能体间的非对称交互关系, 其边方向表征信息流的单边传输特性。每个智能体可沿出边向特定对象发送信息, 而无需建立双向通信通道或依赖对称反馈路径, 这种拓扑能够实现信息流的精准路由控制, 有效管理系统的全局通信结构。通过约束通信路径的指向性, 既可优化带宽资源的定向分配, 规避通信拥堵, 又能构建层次化任务分发网络——上层节点沿出边分解任务指令, 下层节点通过入边接收专属任务, 从而形成高效的任务执行拓扑, 提升整体任务执行效率。

2019 年, Wang 等^[28]针对具有高阶线性及有向拓扑结构的多智能体系统, 研究其全分布式编队控制问题。针对现有时变编队协议依赖全局通信信息与全代理状态完备性的局限性, 设计了新型自适应协议设计框架。通过融合动态输出反馈机制与序贯观测器架构, 实现了基于局部交互信息的协议参数自主调节, 进一步给出了时变编队可行性约束的条件, 并提出满足该约束条件的分布式控制算法, 在避免全局信息依赖的同时保障了时变编队的保持。2023 年, Pei 等^[29]针对多智能体系统群一致性展开了研究, 设计了包含离散时间智能体与连续时间智能体的混合多智能体系统动力学模型, 并针对该类系统提出分布式控制协议。随后, 基于矩阵论与图论, 得到了固定有向拓扑结构下群一致性实现的充要条件。2023 年, Yin 等^[30]研究了网络攻击场景下多无人机集群的编队控制问题, 创新性地提出基于事件触发机制的攻防协同控制策略。面向有向拓扑约束下的无人机集群系统, 通过动态补偿机制与事件触发决策的协同设计, 提出了具有入侵容忍特性的分布式编队控制策略。该策略利用事件触发条件动态调节通信频次, 结合攻击补偿算法重构受攻击节点的控制输入, 实现了通信资源优化配置与编队鲁棒性控制的统一。

此外, 有符号拓扑在多智能体系统中具有重要理论与现实意义。其边权的正负特性可描述智能体间的合作与竞争关系, 如社会网络中的信任与对抗、生态系统的捕食与共生等复杂交互场景。研究有符号拓扑能揭示二分一致性、群集分化等独特动力学行为, 突破传统无符号拓扑仅描述协作的局限性。针对具有异构目标与任务的智能群体, 双向协同控制机制可实时交互状态信息并动态调整决策策略, 如无人机编队通过位置信息共享, 实现自主路径规划与防撞协调。通过设计兼容符号约束

的控制协议,可提升系统对异质交互的鲁棒性,扩展其在分布式决策、博弈论等领域的适用性,为现实世界中协同与对抗共存的复杂系统提供理论框架。

有符号拓扑因为这样的优势,在近几年获得了大量学者的关注。2021年,Yan等^[31]针对有向符号拓扑的情况展开讨论。基于领导者含有未知输入的情况,提出了自适应非光滑控制策略,仅需智能体间的邻域输出反馈信息;通过设计分布式观测器估计领导者状态,避免了对拉普拉斯矩阵特征值的依赖,实现基于符号图的时变编队跟踪控制任务。2022年,Zhang等^[32]基于事件触发通信机制,针对符号有向图下异构线性多智能体系统展开研究。针对领导者同构的情况,提出完全分布式事件触发控制协议,使跟随者在无全局拓扑信息条件下实现预设编队构型。对于领导者异构动态情形,将领导者划分为虚拟领导者输出可测组与不可测组,分别设计状态观测器估计虚拟领导者状态,并据此设计分层控制策略,实现异构领导者编队跟踪与输出同步。两类方案均通过事件触发机制降低通信频次,且控制协议仅依赖局部邻域交互信息。

1.2.2 非线性多智能体系统的协同控制

在实际应用中,大多数系统不能用线性系统来描述,非线性项和未知项会给系统控制带来不稳定的影响,因此,针对非线性系统,探索使系统控制达到稳定的策略是至关重要的。2017年,Li等^[33]针对异构离散时间非线性多智能体系统,设计了在不确定性结构中智能体可以完成控制目标的协议(控制目标是指在跟踪领导者的同时,使智能体的输出达到所需的队形)。2020年,Siavash等^[34]针对非线性随机多智能体系统,设计了容错编队控制协议,解决了在执行器故障、干扰和时变加权拓扑情况下的编队控制问题。2021年,Rehan等^[35]针对非线性多智能体系统,设计了自适应事件触发控制协议,使智能体最终达到一致性。2022年,Yan等^[36]针对一类利普希茨(Lipschitz)非线性多智能体系统,设计出一种新型的基于边缘的自适应算法,解决了两种分布式时变编队的跟踪问题,即无领导编队和领导-跟随编队的情况。2023年,Pham等^[37]针对有向拓扑图下非线性多智能体系统,设计了事件触发下分布式控制协议,解决了非线性多智能体系统的领导-跟随编队问题。Razaq等^[38]针对非线性系统,探讨了一种新的基于观测器的输入饱和和多智能体一致性跟踪方法。该方法涉及网络通信输出和估计的独立拓扑结构,以处理更复杂、更现实的情况。Li等^[39]研究了具有输入饱和的单边Lipschitz系统的群一致性问题。单边Lipschitz系统不像传统的Lipschitz系统那样保守,其非线性常数可以是正的或负的。2024年,Wang等^[40]考虑到执行器失效会对系统性能产生巨大影响,因此,针对不确定非线性多智能体系统,提出了一种基于自适应模糊控制技术的固定时间收敛策略,使智能体在时变执行器故障下也能在固定时间内完成编队目标。Golmisheh等^[41]为异构非线性多智能体系统设计了安全的去中

心化、分布式训练的最优编队控制策略。Yang 等^[42]针对高阶多智能体系统,设计了具有鲁棒性的控制协议,使智能体在通信延迟和异构不确定性的影响下,仍然能完成预期的时变编队。其中,系统不仅考虑了节点局部动力学中出现的参数扰动、非线性和外部干扰,还考虑了不同节点互连中的非线性耦合。

以上众多研究成果都是在 Lipschitz 函数条件的假设下来研究的。针对非线性系统的研究一直在不断深入,学者提出神经网络拟合非线性函数的新方法,这种方法扩大了非线性系统的范围。2020 年, Yue 等^[43]借助神经网络和非平滑分析,分析并设计了基于节点和基于边缘的两种控制策略,这两种策略都能保证时变编队误差渐近收敛,并能抵抗未知匹配干扰。2022 年, Dong 等^[44]针对异构非线性多智能体系统,设计自适应神经网络控制协议,通过利用自适应神经网络的近似来补偿未知的非线性函数,使系统完成时变输出编队跟踪目标。Chang 等^[45]为非线性多智能体系统构建了一种基于神经网络的自适应控制方法,系统在执行器受到攻击的情况下,仍可以实现期望的控制目标。2023 年, Meng 等^[46]开发了神经自适应跟踪控制器,用于跟踪虚拟轨迹,解决了不平衡有向网络上多智能体博弈的广义纳什均衡搜索问题。Wang 等^[47]针对异构非线性多智能体系统,构建了一种有限时间观测器,用以估计领导者的状态和系统矩阵,补偿未知输入的影响,并且设计了有限时间控制器,使系统能够达到编队控制目标。Jiang 等^[48]针对有向图的二阶非线性多智能体系统,提出了一种复杂度低且性能有保证的规定时间编队控制方案,其中,系统的未知动态模型和外部扰动由基于神经网络和滑模控制的函数近似器和扰动观测器组合处理。2024 年, Liu 等^[49]针对在三维空间的一个基于偏微分方程的多智能体系统,提出了一种神经自适应控制方法来解决系统的不确定性问题,此方法可以适应系统参数不断变化的情况。

1.3 多智能体系统编队控制的研究现状

编队控制是多智能体系统的基础和重要研究方向,在协同控制中有着重要地位。受现实生活中生物群系统的启发,旨在驱动智能体实现理想队形的编队控制受到了广泛关注。在实际应用中,为了处理障碍物的干扰或其他复杂任务的需要,智能体还需要随着时间的推移不断变换队形。因此,在某些实际情况下,系统的编队是需要动态调整的,即时变编队控制。相比于编队控制,时变编队控制更适用于一些实际项目。例如,为了躲避障碍物的影响,无人机必须切换队形。再比如,在许多大型聚会活动中,无人机能在表演过程中改变队形,使表演更加精彩。

1.3.1 时变编队控制

随着多智能体协同控制技术的发展及工业应用的需要,简单的一致性控制目

标已经不能满足人们对于多智能体系统协同控制的期望,编队控制的研究方向应运而生。编队控制的任务是指随着时间的变化,多个智能体在控制协议的作用下,能通过相邻智能体的局部通信交流形成并维持预设的几何结构(编队队形)。2007年, Ren^[50]以二阶动力学模型为系统,基于一致性算法研究了编队控制的问题。研究表明,许多现有的领导者-跟随者、行为和虚拟结构/虚拟领导者编队控制方法,可以统一在建立一致性的一般框架内。2009年, Xie 等^[51]给出了一种分布式信息反馈机制,使智能体能够渐进收敛形成一个预设的编队队形。每个智能体只需要根据自己的速度信息和来自相邻智能体的未知信息来完成反馈控制。同时也证明了,如果通信拓扑图是连通的,那么就能保证闭环系统时变编队的稳定性。2015年, Liu 等^[52]设计的控制协议可以让具有一般动力学模型的多智能体在有限时间内实现预设的编队,其中编队的队形和完成编队的时间可以根据任务的需要预先设定。

上面所列举的研究成果都是讨论固定队形的编队控制问题。在许多外部环境迅速变化的实际场景中,队形随环境的变化而变换显得极其重要,如避障和协同作战。2021年, Li 等^[53]针对避障、外部干扰和具有无向拓扑的通信结构,对一组具有二阶模型的多智能体系统编队控制问题进行了讨论。设计了一种自适应编队控制算法。在此控制算法下,编队跟踪误差可以在一定时间内收敛到关于0的无穷小邻域内,同时,多个智能体可以有效避免碰撞。Long 等^[54]在系统存在未知参数的情况下,将动态事件触发机制引入到欧拉-拉格朗日系统的时变编队控制协议设计的过程中去,从而大幅度地降低了通信能源的消耗,同时理论上证明了每个智能体都不会出现芝诺行为。研究表明,采用所提出的控制方案,所有的闭环信号都是均匀有界的,并且所有的智能体都可以完成时变编队。2022年, Wu 等^[55]提出了一个分布式时变编队控制协议,能够引导多个智能体在无序初始状态下快速到达预定的编队队形。受惊鸟和类似生物启发,他们提出了一个分布式防撞控制器,以躲避移动的未知障碍物,并进一步说明了控制器在固定和切换拓扑结构上的稳定性。

1.3.2 双边时变编队控制

以上研究只考虑了智能体之间的合作关系,然而,在其他场景中,智能体之间也有合作与竞争共存的关系。比如竞技比赛中,相同阵营的队员内部是合作关系,与不同阵营的队员之间是竞争关系。在这种关系中,智能体通常会分成两个不同的群组,同一组中的智能体是合作关系,任意两个不同群组的智能体是竞争关系。这种既有合作关系又有竞争关系的多智能体系统的时变编队形式,被称为双边时变编队。

2012年, Altafini^[56]首次考虑了智能体之间具有竞争关系的情况,证明了在有

符号的通信拓扑上,所有智能体可以达到一致性。在 Altafini 的基础上, Hu 等^[57]对同时存在合作关系和竞争关系的多智能体系统编队问题进行了讨论。给出了智能体能够实现双边编队的充分必要条件。2020 年, Wang 等^[58]讨论了存在混合脉冲的二阶非线性多智能体系统的双边编队问题,提出了具有状态反馈的控制器和脉冲协议,再借助平均脉冲区间和增益得出了双边编队控制协议的设计标准,使具有混合脉冲的二阶非线性多智能体系统可以达到双边编队的目标。2021 年, Cai 等^[59]对具有有限通信资源下不确定线性多智能体系统的双边时变编队控制问题进行了研究。提出了具有数据采样的自适应双边时变编队控制协议,有效地节省了通信资源,减少了通信负担。此外,设计的控制协议中非线性项被用来抑制系统不确定性所带来的影响。2022 年, Li 等^[60]对一类具有多个领导者和不确定性的一般线性多智能体系统的双边时变编队跟踪问题展开了讨论。根据相邻智能体之间的相对信息,设计了独立的异步全分布式事件触发控制协议,并证明了芝诺行为不会发生在任何一个智能体上。2023 年, Zhao 等^[61]针对非线性离散时间多智能体系统,探讨了具有未知动力学模型和对抗性相互作用下的在线学习和节能控制问题。2024 年, Wen 等^[62]针对有符号随机切换拓扑条件下的异构线性多智能体系统,研究了由布朗运动产生的随机扰动的全分布式双边时变编队跟踪控制,其通信拓扑的随机切换信号是由时间均质马尔可夫过程控制。Huang 等^[63]开发了一种有向通信拓扑下的非线性多智能体系统自适应模糊双边跟踪控制策略,其中,模糊逻辑系统被用来近似未知的非线性动力学。

1.4 本书的主要内容

本书介绍近年来多智能体系统编队控制方面的研究成果。本书共 13 章。

第 1 章介绍多智能体系统的研究背景和意义,讲述多智能体系统编队控制的国内外研究现状,并概述本书的主要研究内容。

第 2 章介绍本书需要用到的一些基本概念与知识,为后续章节奠定基础。

第 3 章介绍切换拓扑下异构多智能体系统的时变编队跟踪控制问题。针对跟随者对领导者不完全知情的情况,设计了估计领导者的状态观测器。基于观测器输出的观测信息,提出满足切换拓扑的控制协议,并且得出系统实现时变编队跟踪任务的充分条件。

第 4 章介绍有向拓扑下多智能体系统的固定时间时变编队跟踪控制问题。设计了一种固定时间时变编队观测器,使系统能够实现在一个固定的时间内形成时变编队,并且跟随者能够跟随领导者的轨迹进行运动。

第 5 章介绍有符号拓扑下多智能体系统的预定义时间时变编队跟踪控制问题。设计了一种新的预定义时间时变编队控制协议,以实现时变编队跟踪控制。

此外,该协议还被进一步拓展到智能体间整体通信拓扑结构未知的情形。

第6章介绍具有未知输入领导者的多智能体系统的双边时变编队跟踪控制问题。在领导者的输入有界未知且智能体状态不可用的情况下,构建了一种自适应双边时变编队跟踪控制策略。

第7章介绍具有未知输入领导者的单边 Lipschitz 非线性系统的时变编队跟踪控制问题。在领导者的输入有界未知且智能体状态不可测的非线性系统上,提出了一种自适应时变编队跟踪控制器。此外,还提出了满足单边 Lipschitz 条件和二次内有界函数约束的时变编队跟踪控制协议。

第8章介绍具有未知输入领导者的事件触发下的非线性系统的时变编队跟踪控制问题。在领导者的输入有界未知且智能体状态不可测的情况下,提出了非线性多智能体系统的动态事件触发时变编队跟踪协议。

第9章介绍基于观测器的多智能体系统自适应时变编队跟踪控制问题。为了减少因为连续不间断通信和数据更新而造成的网络负担,提出了事件触发策略下的时变编队跟踪协议,并证明了芝诺行为不会发生在任何智能体上。

第10章介绍基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队跟踪控制问题。在领导者具有未知控制输入的情况下,分析了智能体之间合作与竞争关系并存的双边时变编队跟踪问题。分别设计了状态反馈和输出反馈的自适应双边时变编队控制协议,并且得到了系统完成预设的双边时变编队的充分条件。

第11章介绍基于观测器的多智能体系统时变编队包含跟踪控制问题。设计了一种基于观测器的时变编队包含跟踪协议,并且通过证明得到真实领导者可以实现预期的编队并跟踪虚拟领导者的轨迹,同时,跟随者可以进入领导者所跨过的凸包。此外,又提出了一种连续协议来避免非零输入引起的大抖振。

第12章介绍基于观测器的多智能体系统自适应时变编队包含跟踪控制问题。设计了一种动态事件触发策略下的时变编队包含跟踪控制协议,并且证明了所有智能体都不会出现芝诺行为。此外,又设计了一种连续协议来避免在实际运行中出现大抖振的问题。

第13章介绍基于观测器的多智能体系统自适应双边时变编队包含跟踪控制问题。设计了智能体之间合作与竞争关系并存的双边时变编队包含跟踪控制协议。此外,利用状态观测器来观测系统中难以获得的状态,并且给出了系统实现双边时变编队包含跟踪控制的充分条件。

参 考 文 献

- [1] 刘小峰,陈果,刘宇,等. 动物集群行为的机制和应用[J]. 科学通报, 2023, 68(23): 3063-3076.
- [2] 王祥科,李迅,郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013,

- 28(11): 1601-1613.
- [3] 杨富昭, 任彦仰, 王琳, 等. 二阶多智能体系统一致性问题的时滞分析[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(6): 6-10.
- [4] 方虹斌, 彭海军. 先进机器人中的动力学与控制专刊序[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 1-4.
- [5] 庄亚楠, 苗国英, 孙英博. 基于事件触发的多无人机群快速编队控制[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(6): 48-53.
- [6] 郭胜辉, 罗世坚, 黄大荣, 等. 自动驾驶车辆道路跟驰与状态一致性控制[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(2): 394-412.
- [7] Wang Y, Lin S, Wang Y, et al. Robustness analysis of platoon control for mixed types of vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(1): 331-340.
- [8] Dong X, Hua Y, Zhou Y, et al. Theory and experiment on formation-containment control of multiple multirotor unmanned aerial vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 16(1): 229-240.
- [9] Yao D, Li H, Lu R, et al. Event-based distributed sliding mode formation control of multi-agent systems and its applications to robot manipulators[J]. Information Sciences, 2022, 614: 87-103.
- [10] 宗令蓓, 谢凡, 秦世引. 基于 MAS 的无人机编队飞行智能优化控制[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1326-1333.
- [11] 吕建婷, 曹喜滨, 高岱. 编队飞行卫星的自适应姿态协同控制[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1516-1520.
- [12] 承向军, 杨肇夏. 基于多智能体技术的城市交通控制系统的探讨[J]. 北京交通大学学报, 2002, 26(5): 47-50.
- [13] 陈韬, 彭世国. 有领导者的一阶多智能体系统在切换拓扑下的快速有限时间一致性控制[J]. 中国科技信息, 2017(11): 78-81.
- [14] Yu W, Chen G, Cao M. Some necessary and sufficient conditions for second-order consensus in multi-agent dynamical systems[J]. Automatica, 2010, 46(6): 1089-1095.
- [15] 杨东岳, 梅杰. 有向图中基于扰动观测器的线性多智能体系统一致性[J]. 自动化学报, 2018, 44(6): 1037-1044.
- [16] Liu K, Ji Z. Dynamic event-triggered consensus of general linear multi-agent systems with adaptive strategy[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(8): 3440-3444.
- [17] Li C, Chen L, Guo Y, et al. Formation-containment control for networked Euler-Lagrange systems with input saturation[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 91: 1307-1320.
- [18] Li P, Xu S, Chu Y, et al. Finite-time agent-following rendezvous for Euler-Lagrange multi-agent systems with an uncertain leader[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(6): 1766-1775.
- [19] Wang S, Zhang H, Baldi S, et al. Leaderless consensus of heterogeneous multiple Euler-Lagrange systems with unknown disturbance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 68(4): 2399-2406.
- [20] Bai N, Duan Z, Wang Q. Distributed optimal consensus of multi-agent systems: A randomized