

前言 | Preface

美国于 2014 年推出第三次“抵消战略”,提出以大量低成本、相互协作的武器系统,实现大规模集群作战的构想,用于突破敌方防御系统,对敌方目标实施饱和攻击等作战任务,并制定了详细的发展路线图。2016 年,美国把人工智能列为未来军事智能化的核心技术,并明确包括先进有人/无人作战编组、网络化自主武器、人机协作等在内的 5 项关键技术。2017 年,美国国防部高级研究计划局战略技术办公室提出“马赛克战”概念,强调将相互协作的有人、无人系统以及多域指挥与控制节点等低成本系统灵活组合,产生可以动态调整且高度自治的分布式作战力量,实现非对称作战。2020 年,美国战略与预算评估中心发布《马赛克战:利用人工智能和自主系统来实施决策中心作战》研究报告把人机/集群智能协同和自主作战、人工智能辅助作战决策与指挥控制作为支撑新的制胜机理和作战概念的核心技术。2017 年,我国国务院印发《新一代人工智能发展规划》,并把自主协同控制与优化决策理论以及群体智能理论等列入 8 项基础理论。2019 年,我国国防部刊发《加速推进军事智能化》评论,把智能集群战、人机协同作战等列为智能化战争的基石。从上述国内外系列的国家战略和举措可以看出,无人集群系统智能协同作战正在成为未来军事智能化必然发展趋势和核心内容。

无人集群系统智能协同作战依赖于信息交互、感知认知、决策规划、制导控制等层面的技术。协同制导控制作为执行层的主要内容可以为无人集群系统提供有利的时间和空间保障,是集群智能协同中的关键核心技术,也是当前学术界和产业界共同关注的研究热点。在学术界,协同控制可以追溯到 2002 年,以多智能体系统一致性控制或者同步控制为代表的研究开启了分布式协同控制理论研究的先河。其后至今,陆续衍生了编队控制、编队跟踪控制、合围控制、编队-合围控制等研究方向。在产业界,协同控制至少可以追溯到 2012 年,基于局部有限邻居之间相对信息交互的分布式协同控制的思想,在无人机和无人车等无人系统上开展了

以编队控制为代表的实验验证。其后至今,从以无人机蜂群为代表的编队飞行,发展到天、临、空、地、海等多域或者跨域无人集群系统协同控制试验验证。虽然多智能体协同控制理论已经被研究了 20 多年,但是与具体无人系统和复杂应用场景结合的无人集群系统分布式协同控制理论及应用研究还方兴未艾。

自 2009 年开始,本书作者在国家自然科学基金青年、面上、优青、重点项目,新一代人工智能国家科技重大专项,中央军委装备发展部和中央军委科学技术委员会等重大、重点基金和项目的支持下,对无人集群系统自主协同的概念内涵、技术体系架构、分布式编队合围控制等理论、方法、技术及应用验证进行了深入的研究。编队合围理论成果已成功在多旋翼无人机、固定翼无人机、巡飞弹、无人车等集群系统上进行了实际验证,取得了良好的成效。部分研究成果已经发表高水平 SCI 论文 100 余篇,授权国家发明专利 30 余项。作者团队培养了 40 余名研究生和指导了 4 篇一级学会的优秀博士论文撰写,获军事技术发明奖一等奖、国防技术发明奖三等奖、中国指挥与控制学会科学技术进步奖一等奖、中国发明协会技术发明奖一等奖、空军无人争锋比赛三届冠军等,对集群系统智能协同制导控制理论研究和工程应用起到了很好推动作用。

鉴于国内目前尚无关于集群系统编队合围控制理论及应用相关的专著,在国家科学技术学术著作出版基金的资助下,有必要把近 15 年来的部分研究成果撰写成专著出版。本书共 9 章,分别总结了一致性控制、编队控制、编队跟踪控制、合围控制及编队-合围控制五个方面的内容。此外,把高阶集群系统编队合围控制的理论成果在无人机集群系统上进行了应用验证,并在自主搭建的基于四旋翼无人机的实验平台上开展了系列实飞验证。具体而言,第 1 章为概论,介绍了集群智能产生的背景、概念内涵、技术体系架构及编队合围控制相关的研究现状。第 2 章介绍了代数图论、空间分解理论、稳定性理论等基本理论。第 3 章介绍了在非一致时变延迟、交互拓扑不确定性及时变外部扰动同时存在的情况下的集群系统状态实用一致性控制,给出了状态实用一致函数的显式表达式及一致误差的界。第 4 章分别研究了具有延迟的时变状态编队控制、基于静态输出反馈的时变输出编队,提出了时变编队可行性条件、实现时变编队的充要条件及控制协议的设计算法,并通过 5 架四旋翼无人机室外环境下自主时变编队的多组飞行实验对理论结果进行了验证。第 5 章针对具有切换拓扑的集群系统时变编队控制进行了介绍,给出了对拓扑切换具有适应能力的分布式控制协议及设计方法,获得了实现时变编队的判据及拓扑切换驻留时间的阈值条件,并通过 4 架四旋翼无人机对拓扑切换条件下时变编队控制结果进行了实飞验

证。第6章分别使用状态反馈和输出反馈对固定/切换拓扑条件下集群系统的自适应编队控制进行了介绍,基于自适应理论构造了不依赖集群系统对应的拉普拉斯矩阵特征值的分布式控制协议,并基于李雅普诺夫稳定性理论对所提算法的收敛性进行了证明。第7章分别对具有多个领导者以及领导者存在未知时变输入、未知干扰、拓扑切换等约束条件下的时变编队跟踪控制问题进行了研究,利用拉普拉斯矩阵的性质,给出了集群系统实现时变编队跟踪的充要条件及控制协议的设计算法,并开展了3架四旋翼无人机对1架进行围捕的编队跟踪实飞验证。第8章分别针对具有时变延迟的正常高阶线性集群系统和奇异集群系统状态合围控制问题以及正常高阶线性集群系统输出合围控制问题进行了研究,给出了控制协议的设计算法及收敛性判据。第9章分别对集群系统状态和输出编队-合围控制问题进行了研究,给出了集群系统实现状态和输出编队-合围的充分条件,以及确定编队-合围控制协议中增益矩阵的方法,并在5架四旋翼无人机平台上进行了编队-合围控制的实飞验证。

在本书出版之际,由衷感谢清华大学钟宜生教授、石宗英副教授,火箭军工程大学席建祥教授,新加坡南洋理工大学胡国强教授,北京航空航天大学李清东副教授、于江龙副教授、韩亮副教授、刘亦石副教授、冯智副教授、闫芮副教授、李晓多讲师,北京航空航天大学汪瑞博士、王庆博士、李恒博士、吕晓康博士、王婷婷博士、苏翎菲博士等为本书的相关研究工作以及编写提供的指导、帮助和支持。

本书涉及的研究工作获得了国家自然科学基金(U2241217, 62473027, 62473029, 62403038, 62203032),北京市自然科学基金(JQ23019, 4232046),中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001),北京市科协青年人才托举工程(BYESS2022186),新一代人工智能国家科技重大专项(2020AAA0108200),航空科学基金(2022Z071051015),中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-23-T-207, YWF-23-L-1138)以及中央军委装备发展部、中央军委科学技术委员会等项目的持续支持,在此,向国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、北京市科学技术委员会、中华人民共和国科学技术部、中央军委装备发展部、军委科技委的支持表示感谢。

本书是作者在集群系统分布式协同控制领域阶段性的研究成果总结,由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2024年4月

目录 | Contents

第 1 章 概论	001
1.1 概念内涵及应用前景	001
1.2 研究现状	009
1.2.1 集群系统一致性控制	009
1.2.2 集群系统编队控制	012
1.2.3 集群系统编队跟踪控制	015
1.2.4 集群系统合围控制	015
1.2.5 集群系统编队-合围控制	017
1.3 有待解决的问题	017
1.4 本书内容安排	019
1.5 本章小结	024
第 2 章 基本概念和理论	025
2.1 图论	025
2.2 线性空间一致性分解	027
2.3 矩阵理论	027
2.4 线性系统理论	028
2.5 奇异系统理论	030
2.6 本章小结	031
第 3 章 集群系统一致性控制	032
3.1 引言	032
3.2 问题描述	033

3.3	一致性问题转化及初步结果	035
3.4	状态实用一致性分析	038
3.5	数值仿真	045
3.6	本章小结	047
第4章	集群系统编队控制	049
4.1	引言	049
4.2	延迟条件下的时变状态编队控制	050
4.2.1	问题描述	050
4.2.2	时变状态编队收敛性分析	052
4.2.3	状态编队可行性分析及协议设计	055
4.2.4	数值仿真	059
4.3	时变输出编队控制	063
4.3.1	问题描述	064
4.3.2	时变输出编队收敛性分析	065
4.3.3	输出编队可行性分析及协议设计	068
4.3.4	数值仿真	075
4.4	无人机集群时变编队控制及实验验证	078
4.4.1	问题描述	078
4.4.2	无人机集群时变编队分析及协议设计	079
4.4.3	四旋翼无人机编队平台介绍	084
4.4.4	基于四旋翼无人机的时变编队仿真及实验	085
4.5	本章小结	090
第5章	拓扑切换条件下的集群系统编队控制	091
5.1	引言	091
5.2	无向拓扑切换下的时变状态编队控制	092
5.2.1	问题描述	092
5.2.2	无向拓扑切换下的时变编队收敛性分析	093
5.2.3	无向拓扑切换下的时变编队可行性及协议设计	095
5.2.4	数值仿真	100

5.3	有向拓扑切换下的时变状态编队控制	102
5.3.1	问题描述	103
5.3.2	有向拓扑切换下的时变编队收敛性分析	104
5.3.3	有向拓扑切换下的时变编队可行性分析及协议设计	109
5.3.4	数值仿真	112
5.4	拓扑切换下的无人机集群时变编队控制及实验验证	114
5.4.1	问题描述	114
5.4.2	拓扑切换下的无人机时变编队分析及协议设计	116
5.4.3	四旋翼无人机编队平台介绍	121
5.4.4	基于四旋翼无人机的时变编队仿真及实验	122
5.5	本章小结	129
第6章	集群系统自适应编队控制	130
6.1	引言	130
6.2	固定拓扑下的输出反馈自适应编队控制	131
6.2.1	问题描述	132
6.2.2	自适应状态时变编队控制协议设计与分析	132
6.2.3	数值仿真	138
6.3	切换拓扑下的状态反馈自适应编队控制	142
6.3.1	问题描述	142
6.3.2	自适应状态时变编队控制协议设计与分析	143
6.3.3	数值仿真	147
6.4	切换拓扑下的输出反馈自适应编队控制	155
6.4.1	问题描述	155
6.4.2	输出反馈自适应编队控制协议设计与分析	156
6.4.3	数值仿真	161
6.5	本章小结	164
第7章	集群系统编队跟踪控制	165
7.1	引言	165
7.2	具有多领导者的时变编队跟踪控制	166

7.2.1	问题描述	167
7.2.2	时变编队跟踪可行性条件分析	169
7.2.3	时变编队跟踪控制协议设计	173
7.2.4	数值仿真	174
7.3	自适应分组时变编队跟踪控制	176
7.3.1	问题描述	176
7.3.2	控制协议设计与收敛性分析	180
7.3.3	数值仿真	193
7.4	无人机集群时变编队跟踪控制及实验验证	202
7.4.1	问题分析	202
7.4.2	无人机集群时变编队跟踪控制分析	204
7.4.3	无人机集群时变编队跟踪控制协议设计	207
7.4.4	基于四旋翼无人机的时变编队跟踪仿真及实验	209
7.5	本章小结	214
第 8 章	集群系统合围控制	215
8.1	引言	215
8.2	延迟条件下正常集群系统状态合围控制	216
8.2.1	问题描述	216
8.2.2	状态合围控制分析	218
8.2.3	状态合围控制协议设计	219
8.2.4	数值仿真	222
8.3	延迟条件下奇异集群系统状态合围控制	224
8.3.1	问题描述	224
8.3.2	问题转化及初步结果	226
8.3.3	状态合围控制分析及控制协议设计	229
8.3.4	数值仿真	233
8.4	正常集群系统动态输出合围控制	234
8.4.1	问题描述	235
8.4.2	输出合围控制分析	236
8.4.3	输出合围控制协议设计	240

8.4.4 数值仿真	242
8.5 本章小结	245
第 9 章 集群系统编队-合围控制	246
9.1 引言	246
9.2 状态编队-合围控制	247
9.2.1 问题描述	247
9.2.2 问题转化及初步结果	249
9.2.3 状态编队-合围控制分析及控制协议设计	251
9.2.4 数值仿真	257
9.3 输出编队-合围控制	259
9.3.1 问题描述	259
9.3.2 问题转化及初步结果	261
9.3.3 输出编队-合围控制分析及控制协议设计	265
9.3.4 数值仿真	270
9.4 无人机集群编队-合围控制及实验验证	273
9.4.1 问题描述	273
9.4.2 无人机集群编队-合围控制分析及协议设计	275
9.4.3 基于四旋翼无人机的编队-合围仿真及实验	281
9.5 本章小结	288
参考文献	289

1.1 概念内涵及应用前景

在自然界中,多个生物个体聚集在一起就组成了生物群体,如兽群、鸟群、鱼群、昆虫群和微生物群等。生物学家很早就发现,群体比单一个体在觅食、逃避天敌、迁徙等方面更有优势^[1-3]。生物群体中的个体在视听感知能力、运动能力及智力水平等方面都是有限的,只能基于局部范围内的信息来决策进而完成相对简单的行为模式。但是通过个体自身的运动及相互之间的交互作用构成大规模群体后,就能够将有限的个体能力聚集起来,克服单一个体能力上的不足,在整体上涌现出功能和机制更为强大和复杂的行为,即群体行为(swarming behavior)^[4]。图 1-1 给出



图 1-1 自然界中的群体行为

了自然界中蚁群觅食、菌落演化、鸟群迁徙以及鱼群巡游四种群体行为的示例。

与单一个体相比,自然界中群体的优势主要体现在以下几个方面^[5]:

(1) 通过团队协作,提高捕食效率。例如,蚁群通过互相协作可以搬动比单个蚂蚁重上千倍的食物;食人鱼通过成群结队地轮番攻击可以在短时间内吃掉一头肥壮的公牛。

(2) 利用群体的力量,提高生存概率。例如,角马群在迁徙时,健壮的公角马分别走在队伍的前面和后面,母角马和幼角马则走在队伍的中间。在遭遇敌害时,角马群向前奔跑形成势不可挡的冲击力,使群体迅速脱离险境。很多海洋深处的生物是通过声呐来搜寻和定位猎物的,高密度的鱼群很容易被误认为一个庞然大物,让猎食者望而生畏。

(3) 减小运动阻力,节省能量。以大雁人字形编队飞行为例,编队中的大雁可以利用临近大雁飞行时产生的上升气流来减少自身的飞行阻力,进而降低飞行中的能量消耗,利于实现远距离的迁徙。

现代仿生学的发展历程表明,对自然界中群体行为的研究有助于解释人类社会中复杂的群体现象及解决工程技术领域中遇到的诸多问题^[6]。一方面,人类社会中存在着各式各样的群体行为,如人群恐慌、时尚传播以及股市动荡等,对自然界中群体行为的研究在揭示大自然秘密的同时能更深刻地阐释和理解人类社会活动及经济活动的规律。另一方面,该研究的重大进展将会为人类科技进步提供新思想、新原理和新理论。因此,近年来针对群体行为的建模、分析和控制已经成为科学领域内一个重要的研究课题。研究者将实际中具有与上述自然界中群体行为类似现象的系统抽象为群体系统(crowd systems),将群体层面涌现的远超个体复杂的行为或者强大能力称为群体智能(crowd intelligence)。在国务院于2017年7月8日印发的《新一代人工智能发展规划》中,群体智能理论被列为8项基础理论之一,群体智能也位列新一代人工智能的五大赛道之一。群体系统以及群体智能的概念和内涵还在随着研究的深入而持续发展。目前而言,业界一般认为群体系统包括三类典型的对象,第一类是人群,尤其以面向开源社区软件工程的众包协作开发为代表,关注的是如何激发大量的程序员的软件开发效率,并有效汇聚成大软件工程成果;第二类是无人集群系统(unmanned swarm systems),尤其以无人机、无人车、无人艇等无人系统为基本单元通过局部交互构成有机整体完成复杂任务为代表,关注的是如何设计分布式的协同算法实现效能的非线性提升;第三类是人和无人系统或者无人集群系统构成的有人/无人的混合系统,尤其以人和无人集群系统协同执行任务为代表,关注的是如何充分发挥人和无人系统的互补优势,实现混合效能的增强。

本书主要是从自动控制的角度来研究群体协同行为的建模、调控、理论分析等内容,因此本书中群体内的对象主要是具有一定自治或者自主调控能力的无人系

统,也就是无人集群系统,简称集群系统或集群。集群系统作为一种复杂的网络化系统,具有重要的学术研究意义和工程应用价值。如何让集群系统涌现出集群智能(swarm intelligence),即通过集群内无人系统或者智能体之间的局部有限邻居节点之间的相对信息反馈实现集群宏观尺度上效能的显著提升,一直是集群系统协同控制关注的焦点。集群智能与协同控制也成为贯穿“十三五”(2016—2020)和“十四五”(2021—2025)的研究热点。该领域的持续火热得益于自主无人系统(autonomous unmanned system)和多智能体系统(multi-agent systems)两个领域研究的发展与完善。这两个领域的成果以及有机融合支撑并成就了无人集群系统以及集群智能与协同控制的繁荣。

通常可以从三个维度来认识一个集群系统,即智能体、交互方式和行为规则,这三个维度有时候也被称为构成集群系统的三个要素(图1-2)。其中,智能体是构成集群系统的基本单元,例如可以是无人机、无人车、无人艇、导弹等单个无人系统;交互方式主要描述集群中智能体之间的相互作用的关系(interaction relationship),例如,可以是智能体之间信息传输的拓扑网络关系;行为规则是智能体接收到交互信息后的反应规律,例如,可以是协同控制律的生成规则。



图1-2 构成集群系统的三个要素

集群系统具有四个典型特征,即自主性、协同性、扩展性和涌现性(图1-3)。自主性主要是指集群系统可以不依赖人、服务器或者外部中心节点的参与自主完成任务的能力;协同性是指集群系统内部的智能体之间通过局部交互协调合作完成任务的能力;扩展性是指集群系统对内部智能体数量增减的弹性自适应能力,尤其支撑集群系统的算法是否具备大规模可拓展能力;涌现性是指集群系统宏观行为或者功能等具有的单个智能体能力 $1 + 1 \gg 2$ 的非线性增强的能力,即集群宏观能力不是单个智能体能力简单的线性叠加。需要特别强调的是,一个系统是否属于集群系统或者是否具有集群智能不是以系统中具有的智能体或者无人系统的数量来论的,而是以支撑的算法是否具备上述四个典型特征来判定的。使用这四个特征也很容易甄别目前的无人机灯光秀表演不属于集群智能。目前的无人机灯光秀表演已经可以做到5 000架以上的无人机的规模,虽然数量上非常庞大,但是都是基于程序控制或者服务器控制,并且都高度依赖差分的卫星导航定位系统,因此并不自主。此外,目前的灯光秀表演中,无人机和无人机之间并不存在交互,也就是相互之间没有协同性。这种程序式的集中式控制算法也不具备大规模的扩展性。最后,灯光秀中展示的图案是可以直接线性地拆解或者还原到每一架无人机的飞行航迹上的,也就是说宏观上展示出的图案是无人机航迹点的简单的线性拼



图 1-3 集群系统的四大典型特征

接,并不具备非线性的涌现能力。

集群系统作为一个网络化、体系化的复杂系统,需要多层次的能力支撑才能完成具体的任务。图 1-4 给出了集群系统完成任务所需的支撑能力与技术的体系架构。其中,群体智能基础理论主要涉及智能激发、汇聚、度量等机理和机制,属于基础底座。自组织交互网络构建、协同感知认知、协同决策规划、协同控制和协同制导属于能力和技术层面必备的 5 个要素,这 5 个要素之间的关系可以在已有的军事作战的感知-判断-决策-执行循环(OODA 循环^[7])的基础上拓展为 IOODA 循环,即交互-感知-判断-决策-执行循环。其中,自组织交互网络构建是集群系统特有的,也是传统的 OODA 循环中没有体现的,主要为智能体之间信息交互提供渠道,目前比较容易实现的方式是通过数据链来构建数据传输的通道以提供链路层的保障,可以类比于人的“神经系统”;协同感知认知主要包括对集群内部提供局部感知以及相对导航能力,对集群外部提供环境和态势信息以及目标的指示、识别、跟踪并基于信息和知识做一些推理和判断,为集群协同提供信息层的保障,可

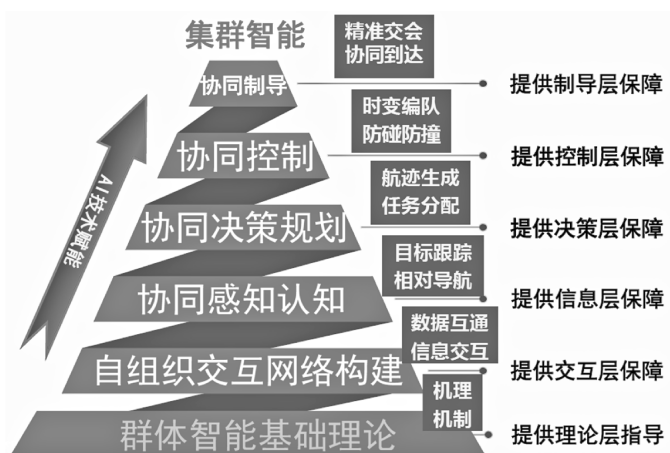


图 1-4 集群系统完成任务所需的支撑能力与技术体系架构

以类比于人的“眼睛”;协同决策规划主要完成任务分解、分配,轨迹规划等方案或者指令的生成,为集群协同提供决策层的保障,可以类比于人的“大脑”;协同控制和协同制导同属于执行层,主要通过控制集群包括时变编队、防碰避障等宏观运动行为保证整体运动的协调性并通过控制集群与目标之间的相对时空关系实现对目标的跟踪或打击,为集群协同提供有利的时空保障,可以类比于人类的“小脑”和“肌肉”。这五个方面是有机衔接,相互耦合的,共同支撑集群系统完成任务并涌现出智能。

集群智能以及自主协同控制与优化决策本身就属于我国《新一代人工智能发展规划》中的重要内容,不过提到人工智能人们首先想到的是深度学习和强化学习等高级机器学习相关的内容。的确,智能的核心是学习进化。随着集群智能相关研究的深入,深度学习和强化学习等也正在与集群的 IOODA 循环的各个功能模块进行融合,例如,基于深度学习的协同目标识别,基于强化学习的协同决策与控制近些年也都取得了一些初步的成果^[8,9]。

虽然集群智能有5个能力和技术层面必备的要素,本书主要聚焦执行层的协同控制相关研究,即如何设计分布式的控制器让集群系统实现特定的协同行为。目前,根据不同的协同行为,集群系统协同控制领域内已经产生了众多紧密相关而又截然不同的研究分支,如一致性控制(consensus control)^[10]、编队控制(formation control)^[11]、合围控制(containment control)^[12]、编队-合围控制(formation-containment control)^[13]、一致跟踪控制(consensus tracking control)^[14]、编队跟踪控制(formation tracking control)^[15]、蜂拥控制(flocking control)^[16]以及追踪-逃逸控制(pursuit-evasion control)^[17]等。本书中编队合围控制的研究主要涵盖了前五个分支,其中,一致性控制是编队控制的基础,同时也是编队控制的一种特例;编队控制只是强调队形的形成、保持及变换,并不涉及对整个编队宏观运动的控制。可以同时调控编队队形以及编队宏观运动的是编队跟踪控制。编队控制及合围控制是编队-合围控制的基础,两者及一致性控制、一致跟踪控制、编队跟踪控制都可以看作编队-合围控制的特例。这些分支的研究成果在微纳卫星集群协同探测、无人机集群协同搜救、弹群协同突防、异构弹群饱和打击以及无人艇集群协同反潜等领域内都有着广阔的应用前景。下面列举几个工程应用的实例。

1. 微纳卫星集群协同探测

20世纪90年代,有学者提出了“虚拟卫星”的概念,指出大卫星的功能可以由多个功能相对单一、结构相对简单的小卫星通过保持特定的编队相互协作来实现。相对于单个大卫星,“虚拟卫星”具有如下典型优势。首先,各小卫星分布在相当大的空间区域内,能够提供较大的孔径和测量基线同时对同一目标进行不同视点的观测。将这些小卫星得到的数据进行融合,可以提高“虚拟卫星”系统有效载荷数据的精度,满足深空探测及三维成像等技术要求。其次,“虚拟卫星”的功能散

布在各个单元小卫星上,当某个小卫星故障时,可以对小卫星之间的协同关系进行调整使整个系统降级使用,避免出现系统完全瘫痪的情况。此外,由于小卫星易于发射,可以在较短时间内补充新的小卫星对系统进行修复,从而使整个系统的鲁棒性及可维护性大大提高。最后,组成“虚拟卫星”的小卫星具有研制周期短、可批量生产,对运载器载荷要求低、可批量发射或搭载发射等特点,使得发射的难度、风险和成本大大降低。图 1-5 给出了美国国防部高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出的卫星集群编队探测的示意图。2015 年,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射了四颗具有相同的结构与功能的卫星,每颗卫星均携带了等离子分析仪、高能粒子探测器、磁强计、电场仪器等探测设备。这四颗卫星通过编队控制在空间构成了一个边长可以变化的四面体在环绕地球飞行的同时协同对等离子体进行探测,辅助人们探究“磁重联”的奥秘。近年来,随着美国太空探索技术公司 (SpaceX) 星链 (Starlink) 计划的实施,已经有 1 万颗左右的卫星被部署,该计划的最终卫星部署的数量为 4.2 万颗。如此大规模的卫星集群如果想高效运作,包括编队控制在内的集群协同技术势必会发挥不可替代的重要作用。



图 1-5 美国 DARPA 提出的卫星集群编队探测示意图

2. 无人机集群协同搜救

无人机是一种可搭载多种设备和装置并能重复使用的无人驾驶飞行器,具有体积小、重量轻、机动性高、隐蔽性强、造价低和无人员伤亡等特点。随着无人机应用领域的不断扩张、使用要求的不断提高以及单架无人机在载荷、续航等多方面局限性的凸显,无人机以集群的样式协同执行任务成为必然的发展方向。无人机集

群具有单架无人机无法比拟的诸多优势。例如,固定翼无人机集群通过特定的编队飞行可以有效降低飞行阻力,减少能耗,延长飞行时间或者增加有效载荷,完成单架无人机很难完成的任务。尤其在协同搜救领域,单架无人机携带的搜救设备扫描幅宽有限,在森林火灾、地震、海难等大面积、高动态作业区域人员搜救场景下,单架无人机在搜救实时性、覆盖面、效率、精度等方面均无法满足实用需求。这种情况下,如果采用无人机集群协同搜救,就可以根据扫描幅宽以及区域大小,配置一定规模的无人机并设计协同覆盖的编队队形,发挥数量和协作优势,飞行一次就可以获得待搜救区域的全局信息,避免了单架无人机频繁往复连续多次飞行只能得到碎片化的信息的问题,如图1-6所示。当前,无人机集群系统已经成为最为典型的集群系统之一,也是距离实际工程应用最近的对象,在军事和民用领域都有广阔的应用前景。



图1-6 无人机集群协同搜救示意图

3. 弹群协同突防

导弹作为精确制导武器已经成为现代战争中制胜的重要法宝。但是随着世界军事大国和强国防空反导体系的建立及完善,如何能够突破反导体系的重重拦截,到达作战区域就成了一个十分重要的难题。例如,美国的“宙斯盾”“萨德”等反导系统,俄罗斯的S400、S500等反导系统对单枚来袭的导弹都有很高的拦截成功率。可以说,传统的单弹作战的样式在先进反导系统面前已经无法发挥效用。图1-7给出了美国DARPA提出的弹群协同突防示意图。弹群协同作战作为一种新的应用样式在突防方面具有显著的优势。一方面,弹群可以通过时变编队控制在敌方拦截导弹对我方实施拦截的过程中快速变换突防队形,协同规避拦截弹或者设置诱饵弹在前的突防队形,用诱饵弹消耗掉拦截弹,为后续导弹开辟出突防通道,实现协同突防。另一方面,弹群可以通过对到达时间的协调控制,实现同时出现在敌方反导系统中,通过数量及实时性,饱和敌方反导系



图 1-7 美国 DARPA 提出的弹群协同突防示意图

统,为突防提供有利条件。

4. 异构弹群饱和打击

未来战争正在向精准化、集群化和体系化发展,对精确制导弹药的需求量剧增,尤其战争的烈度和持续时间更使得低成本成为集群作战中不容回避的一个问题。装备高性能导引头的导弹固然具备了良好的作战能力,但是在集群样式的情况下,规模化成本是非常高昂的。能否让装备高性能导引头的导弹与装备低性能导引头的导弹在不降低作战效能的情况下协同作战就成了破解“打得起”困境的关键。受牧羊犬牧羊的启发,让少量高配置导弹作为领弹,大量低配置导弹作为从弹,使用编队-合围控制技术,领弹负责识别攻击区域的边界或包络,从弹在领弹形成的包围圈内散布并伴随飞行,这样领弹就担负起了“牧羊犬”的角色,协同导引从弹实现对目标区域的“地毯式”饱和攻击。图 1-8 给出了高低搭配的异构弹群饱和打击示意图。这种高低搭配的异构弹群通过编队-合围技术不仅保证了作战效能,更凭借对高配导弹的少量需求大大降低了成本,使得作战效费比大幅提升。



图 1-8 高低搭配的异构弹群饱和打击示意图

1.2 研究现状

在集群系统协同控制领域内,一致性控制、编队控制、编队跟踪控制及合围控制与编队-合围控制五者之间存在着紧密的联系。从一致性控制到编队控制与编队跟踪控制,再从编队控制、合围控制到编队-合围控制是一种层层深入、循序渐进的过程。虽然一致性控制、编队控制、编队跟踪控制及合围控制等协同控制中的众多问题都可以统一到编队-合围控制的框架下,但是后者研究的进展很大程度上要依赖前几个方面研究上的突破。本书中的编队合围控制的研究主要针对上述的五个分支,下面将对其研究现状逐一进行介绍。此外,由于本书把编队控制的理论结果在无人机平台上进行了应用并给出了实验结果,因此,在对编队控制研究现状进行回顾时将对无人机编队控制的研究现状进行概述。

1.2.1 集群系统一致性控制

一致性控制问题是集群系统协同控制众多问题中一个十分基础和重要的问题。集群系统实现了一致是指集群系统中的智能体就某些共同感兴趣的变量实现相同或一致。这些实现一致的变量通常被称为协调变量。为了实现一致,集群系统中的智能体之间通常存在着局部的相互作用关系。这种相互作用是通过各智能体依据邻居智能体的信息构建自身的控制器或者协议(protocol)来实现的。

虽然一致性控制问题已经成为控制领域的一个研究热点,但它并不是一个新的问题。早在20世纪80年代,计算机科学领域的Borkar和Varaiya^[18]及Tsitsiklis和Athans^[19]开展了异步一致性在分布式计算中应用的研究。1995年,物理学家Vicsek等^[20]提出了一个自驱动粒子群的运动模型(Vicsek模型)。在该模型中,每个粒子按照相同的速率和不同的初始方向在平面上运动,粒子当前的运动方向由上一时刻其自身及邻居运动方向的平均值来确定。数值仿真结果表明:当粒子群的密度较大且环境噪声较小时,所有粒子的运动方向最终实现一致。Jadbabaie等^[21]利用代数图论和矩阵理论的分析工具对线性化、无噪声的Vicsek模型进行了理论研究,证明了如果集群系统的作用拓扑是联合连通的(jointly connected),则所有智能体的运动方向将趋于一致。

2004年,Olfati-Saber和Murray^[10]研究了连续时间一阶集群系统的一致性问题。对于一个具有自主性的一阶集群系统,集群系统中每个智能体的动力学特性可以用所示的单积分器模型来描述:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), i = 1, 2, \dots, N \quad (1-1)$$

其中, $x_i(t)$ 表示第 i 个智能体的状态(协调变量), $u_i(t)$ 表示第 i 个智能体的控制输入(控制协议)。如果 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x_i(t) - x_j(t)) = 0$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$), 那么称集群系统(1-1)实现一致。对于作用拓扑是固定的情况, 文献[7]给出了如式(1-2)所示的控制协议:

$$u_i(t) = \sum_{j \in N_i} w_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1-2)$$

其中, N_i 表示第 i 个智能体的邻居集合, w_{ij} 表示第 j 个智能体到第 i 个智能体的作用强度。Olfati-Saber 和 Murray 证明了在协议(1-2)的作用下, 如果作用拓扑是强连通的(strongly connected)且平衡的(balanced)则集群系统(1-1)可以实现一致。在文献[10]和[21]基础上, Ren 和 Beard^[22] 在 2005 年进一步研究了具有有向作用拓扑的一阶集群系统的一致性控制问题并指出在切换拓扑的情况下, 如果在任意切换区间内的作用拓扑的并集都包含一个生成树(spanning tree), 则集群系统可以实现一致。Lin 等^[23] 把 H_∞ 控制方法应用到具有作用拓扑不确定性和外部扰动的一阶集群系统中并给出了系统实现一致的充分条件。文献[24]讨论了定常及时变延迟对具有无向作用拓扑的一阶集群系统的影响, 并给出了集群系统实现一致的充要条件。利用频域分析的方法, Tian 和 Liu^[25] 研究了同时具有传输延迟和输入延迟的一阶集群系统的一致性问题。文献[26]—[28]分别给出了一阶集群系统在时变延迟和切换拓扑存在的情况下实现一致的判据。

以上回顾了集群系统一致性控制的早期发展过程及一阶集群系统一致性控制的代表性研究成果。近年来, 集群系统一致性控制的研究得到了快速的发展, 涌现出了丰富的研究成果。下面将以集群系统中智能体动力学特性的阶次为依据对二阶集群系统和高阶集群系统一致性控制的研究现状进行概述。

1. 二阶集群系统一致性控制研究

在实际应用中, 很多运动系统的动力学特性可以用二阶模型来描述, 比如车辆系统及轮式机器人系统。因此, 二阶集群系统的一致性研究就显得很有意义。在常见的二阶集群系统一致性相关的文献中, 对于任意智能体 i , 其动力学特性可以用如式(1-3)所示的二阶积分器来描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

其中, $x_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 分别表示位置和速度, $u_i(t)$ 是控制输入。Xie 和 Wang 在文献[29]中提出了如下一致性协议:

$$u_i(t) = k_v v_i(t) + \sum_{j \in N_i} w_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1-4)$$