

绪 论

近年来,我国卫星技术经历深度变革,单星体积小型化、星上系统智能化和星间链路网络化技术的蓬勃发展为实施大规模星群“建设、管理、应用”提供了技术基础。与此同时,随着空间任务需求的日益增长和空间服务形式的愈发丰富,如何高效开发和利用大规模星群能力,实现星群中各卫星自主在线协同,以快速响应多样化和个性化的需求,成为一个备受瞩目的问题。本章从面向大规模星群的星上任务在线协同问题(onboard tasks online collaborative problem for large-scale satellites constellations,OOCPLS)的研究背景与意义出发,深入分析研究现状,并由此阐述本书研究内容。

1.1 研究背景与意义

随着微电子、微机电和集成电路等新技术的发展和卫星设计研制理念的创新,卫星的技术性能更高、经济成本更低、研制周期更短,大规模卫星系统进入快速发展时期^[1]。大规模星群系统一般由运行在不同轨道平面、高度和相位的数百、数千甚至上万颗卫星构成,能够极大丰富遥感数据支撑及天基信息服务手段,对我国建设航天强国、保障国防安全和发展社会经济具有重要意义。

对此,我国正积极布局新型智能卫星和大规模星群系统的建设发展。依据2024年2月26日发布的《中国航天科技活动蓝皮书(2023年)》^[2],中国航天深入贯彻落实习近平总书记重要指示批示精神,加快推动航天强国建设,2023年共实施67次发射任务,位列世界第二;2024年,中国航天全年实施68次发射任务,多个大规模星群系统将加速组网建设。此外,截至2024年8月,以“千帆”系统为代表的大规模星群系统和以“楚天”为代表的大规模星群系统已经开启首批组网卫星发射。2024年8月6日,“千帆”系统于太原成功发射,该系统规划实现超1.4万颗低轨宽频多媒体卫星组网^[3]。2024年5月21日,“楚天”星座的“楚天”系统的首颗卫星于酒泉发射升空,该系统计划建设300颗超低轨道通导遥一体

卫星星座^[4]。

与此同时,目前世界上各军事经济强国也在争相构建大规模星群系统,并发展其相关理论研究^[5]。大规模星群发射计划层出不穷,相关领域呈爆炸式发展态势^[6]。美国太空探索技术公司 SpaceX 推出的“星链”(Starlink)大规模星群系统^[7]已成为目前在轨最大的星群系统。2024 年 5 月 10 日,SpaceX 发射 20 颗星链 V2 Mini 卫星,至此,星链卫星发射总数达 6 393 颗,代表着其 4.2 万颗的大规模星群发射计划正在逐步推进,也意味着大规模通信星群已经由方案设想变成现实^[8]。此外,英国的“一网”(OneWeb)^[10]、美国行星实验室的“鸽群”(Flock)^[11]等大规模星群系统的实践也反映了该领域的应用与研究热潮。当前部分大规模星群系统发射部署计划及参数如表 1.1 所示^[12]。

表 1.1 部分大规模星群系统发射部署计划及参数

星 座	运 营 商	卫 星 数	轨道高度/km	轨道倾角/(°)
OneWeb	英国 OneWeb 公司	720	1 200	87.9
Starlink	美国 SpaceX 公司	6 393 30 000	335.9~1 325 328~580	42~81 —
Telesat	加拿大 Telesat 公司	117	1 000	50
Flock	美国行星实验室	285	420	52
鸿雁	中国航天科技集团有限公司	300	1 100	—
虹云	中国航天科工集团有限公司	156	1 040	—
楚天	中国航天科工集团有限公司	300	<300	—
千帆	上海垣信卫星科技有限公司	14 000	550	—

大规模星群系统带来的不仅是简单的卫星数量增多,还是卫星系统运行模式和业务逻辑的深刻变革。大规模星群系统将更加依靠卫星的自主协同能力来处理更加复杂的业务需求,并由此带来了新的协同与调度问题。

(1) 在卫星技术层面,星间链路能力的发展和星载算力的提升为星上任务在线协同提供了坚实的技术基础。卫星星座可以通过搭载激光或微波通信载荷构建星间链路,以实现卫星之间的直接通信,包括高带宽的数据传输和高频率的指令交换,而不需要地面站的参与。基于星间通信,卫星能够在执行任务时完成星间信息交换与任务协同分配,从而实现多星协作与优势互补,提升星群的自主性和整体性能。具体而言,携带不同成像载荷的异构卫星可以发挥不同载荷的优势,通过数据交换和信息融合,能够有效提升任务执行质量。此外,随着卫星专用芯片领域的发展,星载算力不断提升,使得卫星能进行复杂星上计算任务,如实时数据分析、图像处理、轨道预推以及态势推理,这些任务在传统的卫星系统中往往需要在地面站进行。因此,未来星座系统中的卫星不再仅仅是数据遥感的执行工具,还是具备星上感知、决策、规划、控制等自主能力的智能平台。

(2) 在业务需求层面,随着大规模星群能力的显著提升,用户对于卫星服务的

实时性和个性化需求不断增长,特别是遥感任务。这种增长不仅体现在对快速获取数据的基本需求上,还表现在用户需求的多样化和个性化上。例如,单个移动目标在线跟踪感知和对大规模区域态势感知就属于两种不同的应急需求。对于单个移动目标的在线跟踪任务,用户需要卫星能够持续跟踪目标,提供连续的图像数据以保持实时监控,如对非法渔船、野生动物迁徙或军事目标的监测。这类任务通常呈现频繁到达特点,即呈现到达频次高但是同一时刻到达任务数量少的特点,因此对卫星系统的响应速度提出更高要求。大规模区域态势感知任务是一种对特定区域进行集中观测的任务。例如,当地震、洪水或森林火灾等自然灾害发生时,用户需要卫星能够快速覆盖受影响区域。这类任务通常呈现批次到达特征,即任务到达的频次与上述频繁到达任务模式相比较低。综上,在面对不同类型的任务需求时,需要差异化的卫星在线协同方法以获得针对性的任务规划方案。此外,卫星应急任务需求总体呈现出愈发频繁趋势,用户不仅期待卫星完成既定任务,还期待其能够快速响应星上突发事件,为应急情况提供实时遥感数据支持。

在技术进步和需求增长的双重推动下,面向大规模星群系统的在线协同问题逐渐引起广泛关注。这种协同要求卫星之间能够高效地共享信息和资源,更强调综合运用卫星的星上自主决策和规划能力。然而,爆发式增长的卫星节点数目及伴随而来的更为复杂的用户需求,对高效发挥大规模星群协同能力提出了严峻的挑战。具体来说,主要有3个方面的挑战。

(1) 挑战1:大规模星群的卫星规模特性使得现有的星上协同方法难以适应。OOCPLS是一个涉及管理科学、航天工程和运筹优化等多学科融合的复杂组合在线优化问题。该问题包含多种经典组合优化问题以及在线调度优化问题的子问题,优化变量众多,并且复杂的时间耦合约束各异。因此,实现大规模星群的星上任务在线协同在整体上具有极大的挑战性。随着卫星数量的增加,传统面向单个卫星或少量卫星的星上协同算法在运行速度或算法效果方面存在局限性,难以满足大规模星群对海量资源的高效管理需求。设计合理的在线协同架构和算法,以提升整个星群的感知效率,并确保更多感知任务能够被及时、准确、高质量地完成,是大规模星群在线任务协同面临的另一重大挑战。

(2) 挑战2:复杂动态的大规模星群通信网络给星上任务协同带来挑战。随着卫星系统向大规模、多层轨道面部署的方向发展,跨层轨道间的星间链路能够提升星上协同能力并优化信息传输时延,但同时轨道相对运动和空间环境的影响使得链路通断更为频繁,增加了大规模星群星上在线协同架构设计的复杂性。此外,在由多层轨道面异构星座组成的大规模星群中,卫星间的信息同步与共享受到星间链路限制,无法保障实时共享完整信息,这为在线协同算法中星上任务分配策略和星间信息交换机制的设计带来了进一步挑战。

(3) 挑战3:任务的高时效性和任务到达模式的多样性给协同算法设计带来

挑战。大规模星群系统的发展带来了更复杂、更大规模的任务需求,同时,对星上在线任务调度算法提出了更高的要求。在多样化的应急任务在线到达模式下,需要算法能够进行差异化设计,以适应不同任务到达模式下调度问题的特点。而在此背景下,现有以地面管控系统为主的卫星任务调度方法难以向星上在线协同系统移植。

本书解决上述挑战的思路如下:①针对挑战1,本书将为大规模星群系统的星上任务在线协同设计一种分簇协同架构,实现大规模星群协同问题的有效降维;②针对挑战2,本书将提出一种自适应分簇方法以应用上述分簇协同架构,实现星群在复杂动态通信环境下的自组织分簇,各卫星通过运行预先部署在星上的分簇算法自主加入和离开簇,并设置卫星在簇内的不同角色,以规范后续星间在线协同机制;③针对挑战3,本书面向不同任务到达模式和星群特殊场景,结合竞拍博弈、势能博弈等理论方法,将设计多项在线协同算法,以分布式或去中心化的架构实现差异化场景中的卫星协同。

1.2 研究现状

本书的研究工作致力于深入探讨大规模星群在线协同问题,本节内容的组织与本书整体研究架构互相对应。对研究现状的讨论将依次从大规模星群发展建设、协同架构、分簇方法和任务协同方法现状方面依次展开,其中,前3者研究现状主要围绕如何将大规模星群分解为层级结构,而任务协同方法的研究旨在层级结构的基础上实现多星在任务分配方面的有效协作。最后,通过对国内外研究现状的分析与总结,指出当前研究存在的不足和限制,为后续研究内容的展开提供思路。

1.2.1 大规模星群发展建设现状

大规模星群由多层面、异构的大规模星座组成,通过各个星座功能上的相互配合以及卫星载荷能力的相互补充,来提供全球范围内无缝的宽带互联网连接和实时的高分辨率成像数据。因此,大规模星群能够为国家安全领域的关键任务,如溢油监测、海上搜救、核应急响应与监管、地震救援等提供强有力的技术支持^[13]。首先,本节将概述大规模星群建设现状,列举并分析最具代表性的星座部署案例以及管控架构研究现状。其次,对面向大规模星群的星上自主协同架构现状进行系统性梳理,以评估不同架构的优劣。最后,本节还将深入探讨星群协同架构中的具体算法,特别是用于调整分层协同结构的分簇算法,评估其性能并分析其适用性。鉴于目前对大规模星群分簇问题(cluster formation problem for large-scale satellite, CFPLS)算法的研究相对有限,而此类星群在分簇问题上与移动自组织网络(mobile ad-hoc networks, MANETs)分簇问题具有相似性,本节将进一步扩展对相关算法研究现状的讨论。

1. 大规模星群发展建设情况

当下大规模星群的建设和发展取得了显著成效,相关技术的进步和航天飞行器生产成本的降低为构建大规模星群提供了可行性。当前大规模星群系统主要分为大规模通信卫星系统^[14]和大规模成像卫星系统^[15]两大类。近年来,SpaceX^[7]、OneWeb^[16]和Telesat^[17]等卫星通信领域的企业积极推进大规模通信卫星系统的建设计划,以期实现数据传输速率的大幅提升,并引领手机直接接入卫星通信的技术革新^[18]。当前最有代表性的大规模通信卫星系统和星座部署计划如下。

(1) Starlink^[7]:由美国 SpaceX 公司主导的低轨道巨星座,计划构建一个由 4.2 万颗卫星组成的网络,旨在提供通信传输、卫星成像和遥感探测等多种服务。该系统当前已实现全地域、全天时的侦察能力,空间态势感知能力以及天基防御打击能力。

(2) OneWeb^[16]: OneWeb 系统是英国 OneWeb 公司主导研制并建设运营的大规模通信星座,目前由 648 颗卫星组网而成,旨在构建一个全球性的宽带互联网服务,特别是为那些地理位置偏远、传统宽带基础设施难以覆盖或完全没有覆盖的地区提供连接。

(3) 千帆^[19]: 千帆低轨大规模卫星星座由中国上海垣信卫星科技有限公司提出。该星座包括三代卫星系统,采用全频段、多层次多轨道星座设计,预计发射总计 1.4 万颗卫星,是全球较大的卫星互联网系统之一。该系统旨在为全球用户提供无死角、高速稳定的网络接入服务。

除上述大规模通信卫星系统外,美国商业航天公司 Spire^[20]、美国 Planet Labs^[11]以及美国国防高级研究计划局^[21]等组织或公司,正在积极部署大规模遥感卫星系统。美国国家侦察局计划扩大其大型军用成像卫星的规模,2023 年计划在未来 10 年将其运营的卫星数量提高到现在的 4 倍^[15]。与传统的高性能多功能单颗卫星相比,大规模遥感星座通过百颗级卫星的均匀分布,能够提供快速的全球观测能力,显著提升全球遥感图像的时间分辨率,达到近实时的“全球直播”效果,从而满足日益多样化和复杂化的任务需求^[22]。以下是一些具有代表性的大规模遥感卫星系统和星座部署计划。

(1) 狐猿(Lemur)^[20]:由美国 Spire 公司发射并运营,该星座由低轨道多用途接收器(low earth multi-use receiver)立方星(cubesat)组成。目前在轨卫星数量超过 100 颗,主要部署在 400~500km 的近地轨道,提供 3~5m 分辨率的卫星图像。美国 Spire 公司宣称,得益于其星座的高重访率,Lemur 星座能够实现近乎实时的全球数据收集。

(2) Flock^[11]:由美国 Planet Labs 研制,计划包含 285 颗立方星,每颗卫星质量约 5kg,搭载光学望远镜和 3m 分辨率的高分辨率相机,实现全球每日覆盖。截至 2024 年,该公司计划发射下一代“鹈鹕”(Pelican)卫星星座,并研制“唐纳雀”(Tanager)高光谱分辨率卫星星座,以期提升观测能力、增加观测手段和丰富数据

类型。

(3) 楚天^[4]: “楚天”星座是由中国航天科工集团有限公司空间工程总体部提出并启动的超低轨通遥一体星座,计划部署 516 颗卫星,截至 2024 年 5 月,已完成首发试验星研制以及发射,预期在 10min 以内为用户提供全球范围任意位置的通信和观测服务。

此外,美国 BlackSky 公司、美国 Hera Systems 公司、加拿大 UrtheCast 公司、阿根廷 Satellogic 公司等也相继提出基于小卫星平台构建高分辨率且短回访周期的大规模卫星星座的构想^[12]。

2. 大规模星群管控架构研究

在面对非大规模星群的多星协同问题时,多数研究采用一种星地一体管控架构^[23]。该架构是对传统地面管控模式的优化与补充,其核心在于将部分任务规划和计划调整的权限下放至卫星,赋予其星上自主执行的能力。在这种管控架构下,卫星系统既能利用地面强大的算力优势,又能充分利用星上的自主能力。星上自主能力具体体现在以下 3 个方面:①星上自主规划与决策可以对新探测的地面情况进行及时响应^[24];②星上自主云判能够避免卫星执行无用的已规划光学成像任务^[25];③星上自主图像分析处理能够帮助卫星排除无用的遥感图像^[26],或从遥感图像中提取信息以生成新任务。

Kennedy^[27]在其研究中成功地将星地一体管控架构应用于大规模星群的协同作业中,设计并实现了一个小卫星星座规划与调度(planning and scheduling, P&S)系统,解决了上百颗卫星的遥感数传任务一体化规划调度问题。P&S 系统依据星地一体协同架构,将系统分为部署于地面的全局规划器和部署于各个星上的本地规划器。在系统运行过程中,全局规划器生成规划方案并上注卫星;星上建立反应式决策/规划机制,接收到规划方案后依据本地资源信息开启重规划。这种结合了地面粗规划与星上重规划的星地一体式协同架构,在小规模星群场景中被更加广泛地应用。例如,Damiani 等^[28]在 Brid 项目和 Fuego 项目^[29]中开发的多星自主任务规划系统、德国航空航天中心开发的航天器星上自主任务规划系统^[30]以及美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)应用在地球观测卫星 1 号(Earth observing-1, EO-1)^[24]上的自主科学实验包^[31],该实验包主要包括星上自主规划与调度软件(continuous activity, scheduling, planning, execution, and replanning, CASPER)^[32],均是该架构应用的典型案例。

尽管星地一体管控架构在卫星任务规划与调度方面取得了显著进展,其在卫星间的协同方面仍存在局限,主要表现为卫星仅针对自身任务进行调整与重规划,未能充分发挥卫星间的协同效益。鉴于此,面向大规模星群的协同研究逐渐向星上转移,在星地协同架构的基础上,面向星上应急到达的各项需求任务,为卫星间的协同提供创新的协同架构设计方案。

1.2.2 大规模星群协同架构现状

若将卫星系统中各卫星视为自主决策的智能体,则大规模星群在线协同指各卫星通过在线调整各自的决策和行为,来实现特定的优化目标或保持系统整体行为的一致性,确保系统整体效能最大化。在此基础上,大规模星群协同架构表示卫星系统中各卫星工作时的组织形式,明确各卫星的决策和职能,并在此基础上进一步明确各卫星之间的组织关系和数据流向。对比上述大规模星群的组织架构,大规模星群协同架构聚焦星上在线协同,只关注卫星间的协同和组织关系,作为星地一体化组织架构的补充和延展。为全面调研卫星系统的协同架构,以下将从更为普遍情况下的多星系统协同架构出发,进一步介绍大规模星群协同架构研究现状。

在对不同智能水平的卫星进行分类的基础上,Schetter 等^[33]首次提出了 4 种卫星协同架构的概念,包括自顶向下架构、集中式架构、分布式架构和完全分布式架构。然而,鉴于这些架构之间界限的模糊性,Song 等^[34]在前人研究的基础上,对卫星协同架构进行了更为严格的划分,将其明确为集中式协同架构、分布式协同架构和去中心化(分散式)协同架构 3 种主要类型。在集中式协同架构中,存在一个中心决策节点负责所有的协同和决策过程,掌握所有卫星的全局状态信息,实现任务分配和全局规划。中心决策卫星将任务分配和规划结果作为指令,直接传递给其他卫星。这些卫星的系统功能相对简化,主要根据中心决策卫星的指令执行任务,而不参与决策与规划过程。相对地,在分布式协同架构中,每个卫星都具备一定程度的自主决策能力。中心决策卫星依旧作为信息交换和决策的中心,但其决策过程会融合其他卫星的规划反馈结果。在去中心化协同架构中,各卫星处于平等地位,不存在卫星作为中心决策节点,而是各个卫星通过交互和沟通实现任务决策和规划。

进一步地,考虑到大规模星群的规模化特性,多数大规模星群协同架构研究借鉴智能系统协同架构,采用“分而治之”的分层级协同策略。这种策略通过区域划分和分层自治,为大规模卫星系统的管理提供了一种有效且可行的解决方案。其中,部分学者依据卫星飞行轨迹的固定性和卫星的轨道高度特性,设计了固定分层架构^[35-38]。

Qin 等^[35]针对一个由 384 颗卫星组成的 LEO 卫星网络,采用一种固定分簇协同架构,将星群网络分为 3 个簇,每个簇 128 颗卫星,并在此架构上设计了星间数据更新机制、资源选择机制以及任务分配机制。所有机制部署在分簇架构的簇首(cluster head)卫星上,簇首卫星简单计算各个成员卫星的重要因子,并将任务统一分配给重要因子较高的卫星节点。

李国梁^[36]将分布式星座按照轨道高度进行分组,将高轨道中继卫星作为组长,对其轨道下方覆盖的低轨道卫星开展协同和分配。在考虑通信延迟、能量限制后,对应急任务设计多种自主协同方式。在后续研究中,Zhang 等^[39]延续了包含

中继卫星的星簇网络协同架构,解决了大规模星群网络中联合数据下载和资源管理问题。

Fang 等^[37]将大规模通信星群网络与体面通信网络统一考虑,将其建模为星地一体混合网络,提出了3种基本协同架构(分别命名为模型X、模型L和模型V),星地一体混合网络协同可以视为这3种基本协同架构的组合。

宋冰玉^[38]将由数百颗星构成的低轨道大规模星座按照轨道面进行固定分组,同一轨道面的卫星自动成为一个分簇,并且该分簇在整体运行过程中保持不变。当任务到达时,先在星座的簇间进行粗分配;每个小组收到任务集合后,再由簇内的卫星开展自主协同,最终分配给簇内最适合执行的卫星。

然而,上述架构更适用于具有固定轨迹的、同轨道高度且同构的大规模星座,在面对星间链路动态变化和星群网络拓扑时变,尤其是由多层异构星座组合而成的大规模星群的情况下,其适用性受限。因此,另一部分学者提出了一种动态分层级的协同架构^[40-42]。

宋剑锋^[40]提出了一种自管理域划分的架构,并针对其中涉及的管理域划分算法和协作模型等进行了研究,有效应对了小型星群在簇结构初始化建立及其动态变化过程中的管理问题。但是,该算法对于由复杂异构卫星构成的大规模星群尚未进行深入研究和适用性分析。

Bonnet 等^[41]对 Fuego 项目^[29]的对地观测卫星集群,采用一种基于任务的动态联盟协同架构。该架构规定卫星之间通过通信构建共同的知识库,并为需要多个卫星协同完成的复杂任务构建联盟编队。该架构考虑了通信约束,但研究中并未对通信约束情况下架构设计的不同所带来的协同效果进行对比分析,尤其是在单星规划中采用的优化求解器求解方式,其是否能够满足星上响应的时效性要求仍然存疑。

李宁等^[42]提出一种分布式域管控策略,通过分簇算法将大规模星群分为不同管控域,以解决大规模卫星星群在单节点管控下面临的系统通联性差、地面资源依赖度高等问题。所用分簇算法综合考虑卫星轨道信息、移动信息、能量信息和资源载荷信息选择簇首卫星,然后依据簇首卫星确认其邻居卫星形成管理域。这种策略为未来的空间资源管理,尤其是大规模星群的管理,提供了一种新的思路。

然而,现有协同架构在设计时往往忽视了星间链路的通信和连接特性,通常假设星间链路实时联通。这种假设在小规模星群场景下可能成立,但在大规模星群系统中难以满足。在大规模星群协同问题中,卫星之间的信息交互速率是影响星间协同效果的主要因素。此外,通信开销约束是大规模星群系统面临的现实问题,并且通信交互对卫星星上能源消耗的影响较大,这一点不容忽视。

1.2.3 大规模星群分簇方法现状

考虑到前述大规模星群网络中通信链路特性带来的挑战,学者们进一步将卫

星网络建模为移动自组织网络(MANETs),并基于这种网络模型设计分层协同架构。大规模星群的协同架构的设计问题与 MANETs 中的分簇问题类似,都对网络中的节点进行层级划分。当前,国内外学者已在 MANETs 以及其延伸的无人机动态网络、车辆自组织网络(vehicular ad-hoc networks, VANETs)等领域做了大量工作,可为设计大规模星群协同架构提供思路和技术路线。

当前,大部分面向 MANETs 动态分簇的研究都采用综合指标评分法,以评判网络中节点是否适合作为簇首,然后依据簇首及其邻近节点的关系来构建簇结构^[43-48]。在这一过程中,节点的能量水平^[43-44]、移动性特征^[45]以及信任度^[46]等指标常被用作簇首节点选择的关键参数。例如,Nagendranath 等^[47]提出了一种指标加权求和法来选择簇首; Ergenç 等^[48]为进一步规范化指标选取方法,设计了一种基于可靠性的聚类算法,采用量化簇的密集程度、伸缩性、流量密度和负载均衡性,构建了一个完整指标体系,并利用交叉验证来选择合适的指标; Song 等^[49]利用优化图核和多图核的原理,提出了一种基于 d-hop 图核的聚类算法; Aftab 等^[50]则提出了一种基于区域群移动性特征的自组织聚类方案,以提高整个网络的稳定性和可扩展性。

无人机动态网络作为 MANETs 的一个延伸分支,在移动模型上具有更小的自由度,即无人机的移动受到其任务约束。通常情况下,执行相同任务的无人机倾向于保持相似的速度和方向^[51]。针对这一特征,Yu 等^[52]从鸟类迁徙的生物学行为中获得灵感,提出了一种仿生机动性预测分簇算法。该算法以运动稳定性和链路形成概率作为无人机分簇的主要指标,并通过优化这两个指标来降低网络拥塞,提升簇集体移动时的通信效率和系统性能。除此之外,簇结构的稳定性也是分簇过程需要考虑的重要指标之一。Lu 等^[53]考虑了通过链路可用性和边界的影响来获得稳定的无人机簇结构。Guo^[54]等提出了一种基于 Q-Learning(Q 学习)强化学习的簇首选择方法,通过设计节点在不同无人机动态网络状态下的收益和动作空间,来学习特定的簇首选择策略。

VANETs 作为 MANETs 的另一个分支,其网络中节点的移动受道路几何形状、规则和驾驶员意图约束。因此,现有工作在 VANET 动态分簇问题的移动性模型中加入了更多的指标,如车辆移动信息熵^[55]、车辆移动稳定性^[56]等。Wang 等^[57]设计了一种基于实时速度的车辆动态离开或加入簇的分簇关联策略,同时,提出了一种协同调度算法,选择发送车辆和相应的广播数据项。Maglaras 等^[58]通过半马尔可夫过程(semi-Markov process)对车辆的移动性和运动方式建模,并提出了一种基于社会学模式和路线稳定性的聚类算法。Chai 等^[59]提出了一种改进的 K 调和均值(K-harmonic means)算法,该算法综合考虑了簇成员节点与簇首节点之间的相对速度、距离以及候选簇首节点的可用带宽。Zhao 等^[55]提出了一种基于模糊 C 均值算法的自适应车辆聚类算法,以最小化车辆分簇能耗开销。

然而,星群网络具有与无人机网络和车辆网络完全不同的常规移动特性,这使

得当前的分簇方法无法用于星群网络。具体来说,卫星节点的移动特性是由其所处的固定轨道的特性决定的,这意味着卫星节点之间的联系是周期性的,并且每颗卫星在网络中的最大链路数是一致的。这些特点使得卫星网络的拓扑结构与地面网络存在显著差异。

为提升大规模星群的协同效率,分簇技术也被引入卫星网络的研究中。Akyildiz 等^[60]最早提出了一种多层网络架构以实现星群网络分簇管理,其中,每个星簇由一颗中轨道卫星及其覆盖范围内的所有低轨卫星构成。这一方案有效地降低了卫星路由表更新的计算复杂性,并减轻了网络的通信负担。随后,Chen 和 Ekici^[61]进一步提出了双层网络分簇方法,将中轨道卫星节点作为簇首,定期收集低轨卫星节点的状态信息,并更新路由表。更多关于多层卫星结构的研究可参考 Kawamoto 等^[62]的研究和 Nishiyama 等^[63]的研究。除基于轨道高度进行分簇外,江玉洁等^[64]充分利用卫星链路中存在的同轨长期稳定链路,提出了一种基于链路约束的分簇方法。该方法将与稳定链路相关的同轨道节点定义为核心簇内成员,而将异轨道节点视为一般成员。这种方法操作简单、流程简洁,有效地解决了星间网络结构相对简单的小规模卫星网络分簇问题。在此基础上,吕志超^[65]关注卫星网络分簇问题中能耗因素,结合星间相对运动和星间链路的建立条件,采用低能耗自适应聚类层次(low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH)协议分簇算法动态选择簇首卫星,以实现星群自组织分簇。沙鹏翔^[66]为低轨巨型星座网络设计了一种基于地理位置的分簇方法,并采用 A* 算法在每个簇中选择与簇内成员节点通信总跳数最少的节点作为簇首节点。该方法的优势在于计算复杂度低且易于执行,但在处理卫星间约束时进行了大量简化,主要考虑了星间位置作为分簇的依据。以上方法^[64-66]都考虑了卫星节点的能量约束,因此更适用于通信卫星网络,而对于遥感成像卫星的特征和约束考量较少。除此之外,当前大多数分布式分簇方法聚焦提出可行的启发式分簇方式,而鲜有对分簇模型和理论进行深入分析,为单个节点离开或加入簇的决策提供理论支撑的方法。

为解决上述挑战,联盟构成博弈被应用于 MANETs 自组织分簇中。该方法不仅能够在网络分簇问题中展现良好的性能,还能将最终收敛的簇结构表征为纳什均衡簇结构,为节点离开或加入簇的决策提供理论支撑^[67]。作为博弈论的一个分支,联盟构成博弈最先被应用于通信领域的资源管理与分配问题,如认知网络中的频谱感知^[68]、频谱共享^[69]、合作通信^[70]等。Yang 等^[71]基于联盟构成博弈建立了任务分配问题模型,并提出了一种自组织任务分配算法,在此基础上设计了联盟交换策略和对数线性学习策略以改进算法求解效率,并证明了算法收敛于纳什均衡,有效解决了有限成本下的异构智能体任务分配问题。

除此之外,学者们通过分析和利用联盟构成博弈模型与网络区域划分问题模型的相似性,将其应用于社区发现与重叠社区检测^[72],并提供了一个形式化的分析框架,用以研究理性参与者之间的复杂相互作用^[73]。受到该应用启发,Massin