

第1章

绪 论

本章主要对研究问题的背景意义、研究现状以及总体工作进行概述。首先介绍面向移动目标跟踪的多星协同规划与调度问题的研究背景与研究意义；其次根据问题的特征及相关性从移动目标运动预测问题、敏捷能力下的单星自主调度问题、多星自主协同规划问题以及机器学习方法在组合优化问题中应用的 4 个方面开展了国内外研究现状的总结分析；最后对本书的内容、组织结构以及创新点进行整体介绍。

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

随着科技文明的进步，人类活动足迹从陆地逐步扩展至海洋与深空，陆海空多域的态势安全成为人类生产生活关注的焦点。海洋和空间中移动目标因其动态不确定性的存在，在多域态势感知中成为不可忽略的因素，同时，对移动目标的有效跟踪在民生与军事方面都有着重要的应用价值。在民生方面，随着经济全球化进一步发展，人们交流和活动的范围急剧扩大，海上舰船活动日益频繁，同时也滋生出各类海盗犯罪、毒品走私、非法渔业、环境污染等问题。此外，人们对太空的开发利用日益广泛，空间环境面临着航天器、太空垃圾等移动目标所带来的诸多安全不确定性。因此，实现对移动目标有效跟踪并及时掌握其态势，能够有效防范其带来的诸多安全隐患。在军事方面，一体化联合作战成为主要的作战方式，快速机动部署理念加快了战争的节奏，精确制导、远程打击的武器毁伤能力巨大，信息化条件下体系作战单元的机动能力更加强大。在战争中，作战体系或者单元的移动部署体现了敌方的战略战术意图，对敌移动目标正确的意图分析

对战场态势预测感知起着举足轻重的作用。无论是海上低速移动舰船还是空间高速移动目标,只有实现对目标的有效跟踪监视,才能为最终的精确打击提供有用的信息引导。

移动目标跟踪的应用场景广泛、价值可观,而遥感卫星作为典型的空间信息采集平台,在移动目标跟踪中具备其特有的优势。遥感卫星基于自身轨道运行,利用星载传感器从太空中获取用户感兴趣的目标信息。遥感卫星的轨道运行特性使得卫星具有观测范围广、运行时间长、不受国界制约等优势。得益于得天独厚的空间信息采集能力,遥感卫星在气象预报、灾难预警、环境保护、大地测绘、海面搜救及军事侦察方面均得到广泛运用并发挥重要作用。然而,当前遥感卫星的观测目标以点状目标、线型目标以及区域目标为主,对具备动态变化特征的移动目标识别、跟踪的应用相对较少或者效能较差。在卫星逐步迈向编队组网、自主智能的时代,将移动目标跟踪推向实际应用、增强多星平台对目标的跟踪效能的需求迫切。

目前,对移动目标的跟踪主要依赖于传统的卫星管控网络,通过卫星任务规划实现对跟踪任务执行序列的优化与执行时间的调度。由于卫星不具备自主能力,目标的发现判别依赖于地面数据处理,目标的跟踪决策依赖于人为制定。针对这种高动态性的目标,从用户需求的提出到搜索跟踪的完成,需要经历“任务规划—指令上传—观测执行—数据下传—图像分析—生成新任务”的多轮闭环交互,如图 1.1 所示。卫星任务规划在地面进行,规划周期通常为一周至数天不等。这种交互模式严重依赖于测控网络和通信网络,在缺乏星间链路条件下,需要很长的时间才能够形成对目标跟踪的闭环,导致任务规划对目标动态信息响应出现严重滞后。此外,在搜索跟踪过程中,所拍摄的图像可能并没有覆盖关注目标,从而产生了大量冗余无效的数据。显然,传统的卫星管控网络在面向移动目标的跟踪搜索存在明显的短板,星上自主已经成为移动目标跟踪搜索的必然趋势。

星上自主任务规划带来的优势使得其成为未来的必然趋势,其对不确定性事件的响应能力将大大提高对移动目标的跟踪能力,还将大大简化目标跟踪流程。目标跟踪信息的处理、任务规划将放置在星上,而地面只需要上注需求信息、接收态势信息与有效压缩图像数据,如图 1.2 所示。

与此同时,侦察环境复杂性、目标运动不确定性、任务高时效性和侦察设备不完善性的存在,使得利用星上自主能力提高对移动目标的跟踪效果这一任务困难复杂,主要体现在以下几个方面。

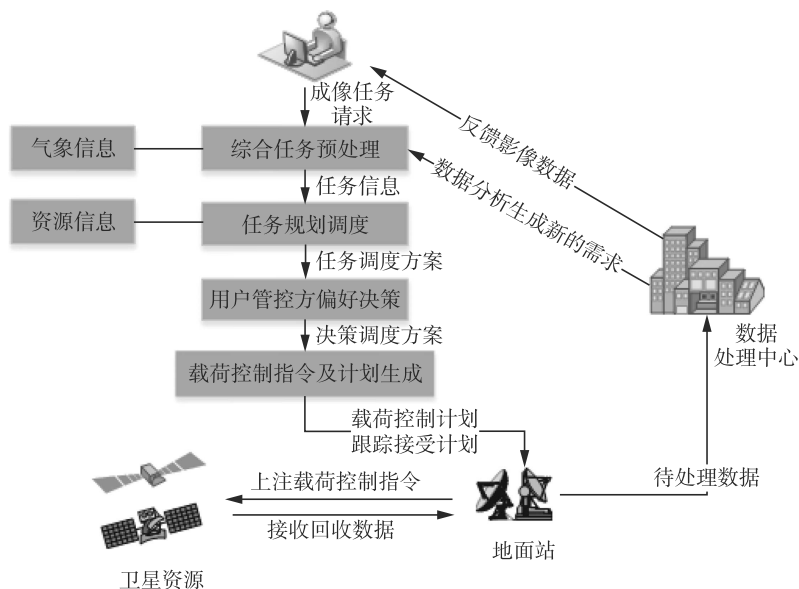


图 1.1 传统卫星管控模式下的多星任务规划流程

(1) 目标的运动具有不确定性。目标运动特性以及反侦查的对抗特性导致目标的位置难以预测。

(2) 目标产生的随机性。在跟踪过程中，随时可能产生新的目标，给规划带来不确定性。

(3) 与静止目标不同，移动目标跟踪需要达到一定的时间分辨率，从而实现对目标的多次跟踪。

(4) 星上图像识别算法对目标的识别存在一定的概率性。不同于地面人工判别，星上图像处理识别算法基于机器学习设计对目标的识别存在概率性，通常对高分辨率的图像识别可满足对目标的甄别，但是对宽幅低分辨率图像识别则难以满足对目标的甄别，需要多次成像以提高识别准确率。

(5) 移动目标对卫星任务规划与决策的时效性要求很高。移动目标需要跟踪卫星具备较快甚至近实时的响应与决策能力，这就注定传统的智能优化与精确算法难以应用，而一般的启发式算法求解效果较差。

(6) 对于空间高速移动目标跟踪，往往还存在跟踪轨迹预测误差问题。当对目标的跟踪间隙过长时，预测误差的积累可能导致目标的丢失。而目标的跟踪精度收敛效果是后验的，即在每次跟踪之后才能得到，这给目标的状态同样带来了不确定性。

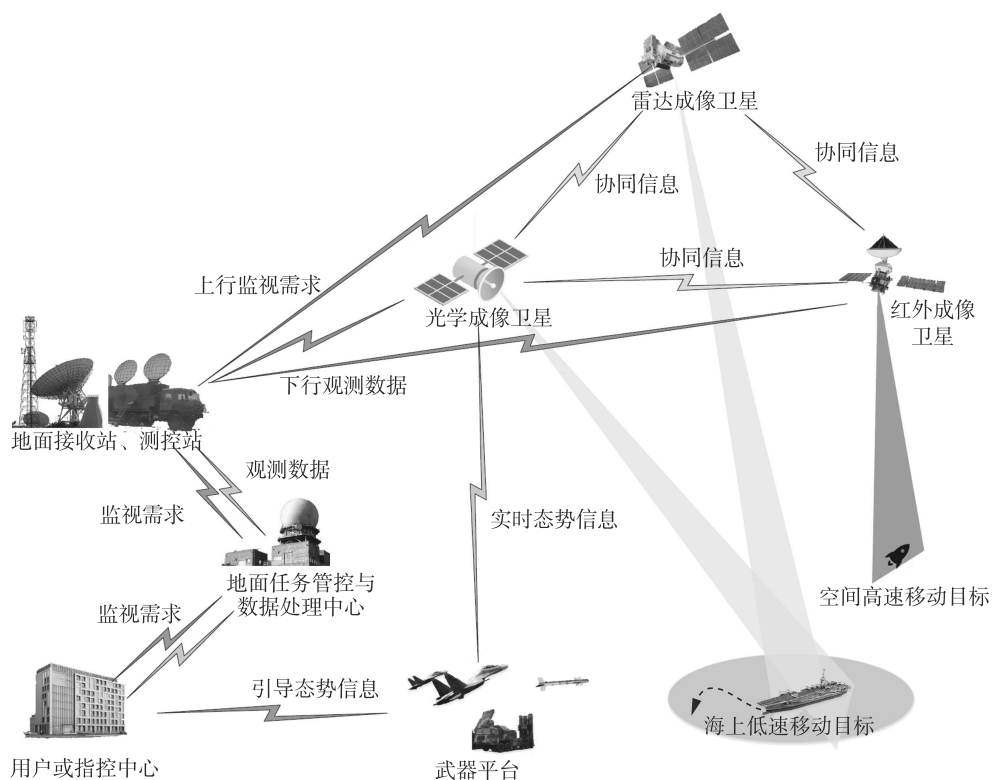


图 1.2 自主智能组网条件下的多星任务规划流程 (见文后彩图)

受限于卫星轨道及星载载荷能力,单星难以完成对移动目标的跟踪任务。随着卫星数目的不断增加,多类型卫星和地面站的有效配合可以实现资源共享和优势互补,从而完成单星由于轨道及能力限制而无法完成的任务。携带不同载荷的多星协同对移动目标进行搜索,可以发挥不同载荷的优势,通过相互引导,采用多传感器数据融合技术获取信息,能够大大提高观测效果。多星协同的前提在于星间通信能力,随着我国星间链路的丰富和完善,星间的信息传输和交换能力日益增强,为多星协同创造了条件。

多星协同与自主调度能够提高卫星对多目标的跟踪以及对不确定事件的响应能力,该领域得到了世界各航天强国的重视,已有许多学者针对该问题展开研究。随着我国遥感卫星技术的快速发展,我国相关人员已逐步开展了对敏捷卫星、快速响应卫星、星间组网、分离模块群等新型遥感卫星的研究工作,以满足日益迫切、复杂的军事情报保障需求和国土监测需求。新型遥感卫星涌现出全新的技术特点和应用模式,对卫星任务规划提出了新的问题。通过调研发现,目前对于移动目标跟踪的研究较少,对传统卫星管控模式下的研究居多,在这些研究中关注

的更多是仅具有侧摆能力的非敏捷卫星,而对于新一代具备三轴姿态机动能力的敏捷卫星的研究较少。新一代敏捷卫星具备三轴姿态机动能力,这使得卫星对目标的观测窗口大大延长,成像活动可以在敏捷卫星对目标可见窗口的任意时刻开始^[1]。同时,敏捷卫星在不同任务之间切换存在姿态转换时间,该时间依赖于前一任务的结束时间与紧后任务的开始时间。敏捷卫星的调度问题是一个具有时间依赖特征的调度问题,其已经被证明是一个 NP-hard (NP 困难)的组合优化问题^[2]。此外,卫星任务规划存在诸多载荷、容量及时序约束,这些约束是硬约束,不可违反。

综上所述,由于移动目标具有意义非凡的应用前景和日益发展的卫星观测能力,有必要针对面向移动目标的多星协同与自主调度技术展开研究。

1.1.2 研究意义

移动目标的跟踪具备非常可观的应用前景和现实价值。随着卫星平台能力的提升以及通信网络的增强,传统的对地观测系统已经难以充分发挥卫星平台的能力,实现对移动目标的精确识别与跟踪,因此迫切需要多颗卫星之间的有效协同和优势互补,以完成单颗卫星因卫星轨道和载荷能力限制无法完成的复杂任务。同时,移动目标动态性需要系统响应及时,因此快速、高质量及精细化的求解多星规划问题是实现有效跟踪的前提。本书的研究意义具体如下。

(1) 理论意义。与传统成像任务调度问题相比,面向移动目标跟踪的多星协同与自主调度问题是一个由运筹学与人工智能等领域组成的交叉学科研究问题,具有以下特点与难点:第一,考虑目标运动不确定性和图像识别的概率性的调度问题,需要新的不确定性建模方法与转化方式;第二,面向移动目标的协同与自主调度问题,其在线动态调度特征对算法的时效性有较高要求;第三,具有三轴姿态机动能力的敏捷卫星存在时间依赖特性,问题求解空间复杂度较非敏卫星大幅增加;第四,移动目标虽然具备特殊性,但是多星系统(multi-satellite system, MSS)依旧面向多类型目标成像,设计合理、高效以及兼容的通用求解框架是首选之道。综上所述,面向移动目标跟踪的多星协同规划与自主调度问题属于一类复杂约束条件下的不确定性组合优化问题,对不确定环境下的大规模多机协同调度问题、具有时间依赖特征的调度问题及分布式架构下的多机协同问题等相关理论的研究具有重要意义。

(2) 实践意义。我国经济日益腾飞,面对复杂的国际环境和周边形势,为维护我国战略利益、及时感知国内及周边态势、有效应对突发事件,面向移动目标的多星协同规划与自主调度研究应用能帮助快速感知环境态势,及时对突发事件

进行战术预判,为后续决策提供情报支撑和信息保障。卫星模块设计以及自主性提高有助于提高整个卫星系统的鲁棒性,同时降低卫星运营成本。卫星自主协同能够减少冗余数据、降低地面管控压力,具有一定的实践意义。

1.2 国内外研究现状与总结

通过上述分析可知,移动目标的跟踪需要及时响应其动态不确定性,而动态不确定性的度量是关键。本书的研究重点为移动目标的不确定性度量问题、敏捷能力下的单星自主调度问题以及多星自主协同规划问题。其中,移动目标的不确定性主要源于其运动特性,对目标运动进行预测能够形成目标不确定性的度量,因此本书将分析移动目标运动预测问题的研究现状。此外,移动目标跟踪依赖于系统的及时响应能力,快速且高质量地求解多星协同调度问题是实现有效跟踪的关键。为此,本书还对机器学习在组合优化问题中的应用现状进行研究总结,以便为本书关键技术研究提供指导。基于此,国内外研究现状分析分为移动目标运动预测问题研究现状、敏捷能力下的单星自主调度问题研究现状、多星自主协同规划问题研究现状以及机器学习方法在组合优化问题中应用现状 4 部分。

1.2.1 移动目标运动预测问题研究现状

移动目标的观测可以分为搜索发现和跟踪监视两个阶段,这两个阶段都依赖于已知信息对移动目标进行位置预测。对于搜索发现阶段,目前存在很多大范围感知探测手段(如超视距雷达以及宽幅探测载荷)能够提供早期发现信息,但是其精度通常达不到甄别要求,往往需要精度更高的探测载荷实施跟踪监视。对于跟踪监视阶段,面对众多移动目标,合理利用跟踪资源是关键,通过运动预测降低目标不确定性是前提。移动目标的预测已经不是一个新问题,其应用领域随着目标的不同而涉及广泛。本书以天基遥感平台关注的海洋舰船与空间飞行器移动目标为例,将目标预测方法分为以下几类。

1. 有模型的目标运动预测方法

(1) 基于力学模型的运动预测。这种运动预测方法一般用在空间飞行器这类高速移动目标上,在目标不做主动运动的情况下,其受到的外力可以通过基本的受力参数(如地球引力、大气阻力等)构建动力学模型进行预测。在这种情况下,目标的运动往往比较规律,但是由于定位的误差及预测模型考虑的外力变化,目标运动预测会存在误差累积效应。张峰等^[3]、王献锋等^[4]、张晶和狄邦达^[5]、黎

慧等^[6]通过对弹道导弹构建的力学模型进行预测,杜广洋和郑学合^[7]则在力学模型基础上利用群内目标的相对运动关系提高预报精度。

(2) 基于插值拟合的运动预测。插值拟合预测的思想是通过目标历史位置的时序数据进行插值拟合,根据拟合的运动曲线对目标的运动进行外推预测其未来的位置。这种预测方法主要采用灰度拟合、时间序列、多项式拟合的方法^[8-11]来预测舰船目标运动趋势。但是这种预测方法如果缺乏环境特征的约束,则往往会导致预测结果失效。

(3) 基于网格状态转移的预测。这种预测方法在最优搜索论^[12]中应用较多,通过将关注区域离散为网格可以将目标的移动转化为所处网格的转移,从而通过网格转移的概率分布来描述目标的位置分布。其优点在于能够利用概率推理、马尔可夫决策过程分析得到有用的结论并指导跟踪任务的选择。在移动舰船目标的跟踪中,慈元卓^[13-14]采用了最优搜索理论,基于贝叶斯推理考虑目标网格转移概率实现对目标的预测。冉承新等^[15]也采用网格预测模型对目标分布概率进行预测。徐一帆^[16]虽然也采用了网格预测的方法,但是其根据不同模型的优势,提出了多模型融合的预测方法,实现多预测模型的优势互补。基于网格的预测能够实现目标运动状态与网格的关联,而网格的分解对求解效率十分关键。

(4) 路径聚类相似匹配的预测。对于一些存在规避利害的主体,其运动时会选择最佳的运动路径以降低成本代价,如民用舰船在航行时会考虑路径的经济性因素。因此,通过对大量的航行数据进行聚类分析,能够得到具体环境下的典型路径集合,再结合预测目标运动轨迹特征进行典型路径的匹配,从而实现对目标的预测。Vasquez 等^[17]采用了路径聚类方法进行研究。此外,Fridman 等^[18-19]在 KINGFISHER (翠鸟)^[20]系统中引入的二阶马尔可夫链预测的方法本质上可以归类为一种多节点的路径聚类匹配的方法。

(5) 目标跟踪理论的预测。基于目标跟踪理论的预测一般采用估计滤波算法(如卡尔曼滤波方法)对目标进行预测。以卡尔曼滤波方法为例,其通过目标预测的时间更新与目标状态预测的度量更新来实现对目标的预测。卡尔曼滤波方法更多地适用于带高斯噪声的匀速或近匀速直线运动模型预测^[21],采用卡尔曼滤波方法能够很好地实现对移动目标的短期预测^[22-25],但是其受限于带噪声的匀速直线运动,在进行长期的预测时,会导致准确性降低。

(6) 运动约束的预测。基于运动约束的预测主要是根据对目标运动既有的认知参数,在预测目标时能够将目标的位置约束在某一区域之内。例如,低速运行的移动舰船目标,由于其必须满足一定的航行经济性、安全性与可行性要求,所以其运动难以超过其最大速度以及航向偏转角。比较典型的运动约束的预测方法有潜在区

域预测法^[26-27]，其思路是通过约束将目标的运动限制在圆形或者扇形潜在区域内。

2. 无模型的目标运动预测方法

这类方法主要为基于机器学习的预测。该类方法主要基于机器学习的方法训练目标运动的航迹数据以获取目标运动预测的网络模型。Mazzarella 等^[28]对船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 数据进行了训练，训练采用人工神经网络模型，利用训练所得网络实现对区域船舶的轨迹预测；De Masi 等^[29]在舰船的运动预测中提出了一种基于径向基神经网络的方法；Valsamis 等^[30]在大数据流的基础上采用机器学习方法对舰船目标未来多个时刻的位置进行预测；徐婷婷^[31]在其研究中设计了一种基于反向传播 (back propagation, BP) 神经网络的航迹预测模型；陈勇青^[32]则进一步考虑海洋环境的干扰，通过结合长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 与 BP 神经网络模型的组合模型实现对舰船目标的预测。采用机器学习进行预测固然具有快速且较好的预测结果，但是往往依赖于训练数据，而且容易造成过拟合。对于缺乏历史数据或者具备对抗特征的目标，预测效果会变得低下。

除上述对移动目标的运动预测模型外，国内外研究学者还开展了一些关于移动目标跟踪监视的任务规划研究，但是这些研究大多局限在非敏捷卫星且卫星自主能力较差，卫星每次过境对目标只有一次观测机会，这在多星的协同跟踪方面降低了对多目标跟踪的效能。在海洋移动目标卫星任务规划相关研究中，能够检索到的较早的一项研究是澳大利亚国防科技局 (defense science and technology organization, DSTO) 所做的研究。在该研究中，Berry 等^[33-34]提出了一种卫星组网传感器系统决策优化问题的一般性框架——高斯-马尔可夫和贝叶斯推理技术 (Gauss-Markov and Bayesian inference technique, GAMBIT)，在该框架下，网格划分方法被用于搜索区域的分解，并采用了基于贝叶斯信息准则的概率更新计算方法，在运动预测方面建立了基于高斯-马尔可夫的运动模型，目标是将信息熵度量的不确定性最小化。在后续研究中，Berry 等^[27]提出了独立搜索、定位及跟踪 3 个阶段来描述移动目标的监视过程，采用 GAMBIT 完成各阶段目标，以实现监视效果最大化。此外，Fridman 等^[18]基于数据学习构建了二阶马尔可夫链实现对目标运动的预测，并提出目标跟踪的机制，但是其研究缺乏卫星复杂约束与星间协同的考量，问题过于简化。

国内方面，卢盼^[26]基于目标先验信息构建了海洋移动目标潜在区域，建立目标运动的预测模型和目标函数为移动目标发现概率最大的规划模型，并设计贪婪算法进行求解。慈元卓^[13]针对移动目标跟踪提出了基于部分可观测的马尔可夫

决策过程 (partial observable Markov decision process, POMDP) 的多星离线任务规划模型和基于模型预测控制 (model predictive control, MPC) 的多星在线滚动任务规划模型, 并给出了相应求解算法。郭玉华^[35] 采用搜索发现与跟踪识别相配合的机制来解决移动目标的监视问题, 在无先验信息条件下, 设计了一种基于网格目标分布概率动态更新的算法; 在先验信息部分已知的条件下, 设计了自适应交互多模型移动目标跟踪监视的算法, 较好地解决了该问题。徐一帆^[16] 针对海洋移动目标提出了多模型航迹预测方法, 并在此基础上提出基于信息度量的单阶段与多阶段联合调度方法。王慧林等^[36] 利用目标先验信息动态构建移动目标潜在区域, 建立其运动预测模型, 并在此基础上建立卫星成像调度规划模型, 设计遗传算法进行求解。王红飞^[37] 针对移动目标的多星协同任务规划问题, 提出了高斯马尔可夫移动目标运动预测模型和目标概率分布更新模型, 在任务规划中设计了自适应人工免疫遗传算法进行求解。高远^[38] 针对非合作移动目标进行了研究, 基于合同网协议建立了多星协商任务分配与规划算法, 但是基于协商的任务分配的机制通信频繁且效率低下, 难以实现对移动目标的快速响应。Zhang 等^[39] 提出一种地面集中静态规划与星上动态规划响应目标的方式来实现对移动目标的协同跟踪, 实现了星地协同与长短周期规划的结合, 但是其考虑的星上自主能力有限, 而且对算法的时效性缺乏具体分析。Zhao 等^[40] 考虑了多类型遥感卫星对舰船目标的快速搜索, 实现了高低轨协同搜索目标, 但是仅仅考虑了首次搜索发现, 缺少后续跟踪的资源分配。

尽管针对移动目标的跟踪国内外已经开展了不少研究, 但是随着卫星敏捷能力与自主能力的增强, 很多规划架构与方法已经不再适用, 尤其是以元启发式为代表的规划方法难以满足星上对不确定性因素的快速响应需求。

1.2.2 敏捷能力下的单星自主调度问题研究现状

技术的变革带来星上图像识别、自主管理等自主能力的增强, 同时也使得卫星的姿态机动能力大幅提高。相对于仅具备单轴姿态机动能力的传统非敏捷卫星, 敏捷卫星拥有灵活的三轴姿态机动能力, 使其对任务的规划调度又多了一层连续变量的优化 (即观测时间的选择), 相比于传统的非敏捷任务规划问题 (仅限于任务的选择) 的求解更为复杂。

Lemaître 等^[41] 较早地引入了敏捷卫星调度问题, 在描述问题时将其归结为基于观测目标选择和目标观测时间调度的组合优化问题, 并给出相应优化模型。他还设计了贪婪算法、动态规划算法、约束规划算法和局部搜索算法进行求解, 并指出 4 种不同的算法各有优劣, 但均对敏捷卫星关键的时间依赖的姿态转换时间

约束进行了简化。由于问题的复杂性,后续研究中少有学者提出了该问题的精确求解方法。其中,Wang 等^[42]针对敏捷卫星提出了一种混合整数优化模型,它通过一些简化手段缩小了问题的求解空间,即在模型中将目标窗口连续的观测角度离散为 3 个观测角度,并将转换时间预先存储起来。Liu 等^[43]、He 等^[44]对前者的改进工作都提出了类似的混合整数规划模型,但是由于问题求解的复杂度较高,在求解规模稍大的算例时就会出现求解困难,最终采用自适应大邻域的元启发式方法进行求解。Peng 等^[45]针对敏捷卫星调度问题考虑了时间依赖的目标收益与时间依赖的转换时间,在构建模型的基础上提出了一种基于局部迭代搜索的双向动态规划方法,该启发式方法优于大部分求解算法。Peng 等^[46]在前面工作的基础上提出了一种精确求解算法,即以自适应双向动态规划方法求解多圈的敏捷卫星调度问题,该算法在求解质量上表现优异,但是采用剪枝策略的精确算法针对同规模不同算例的求解时间会相差很大,依然存在计算时效性问题。

在各类研究中,元启发式方法与启发式方法是用于求解敏捷卫星调度问题较为常见的方法。这些元启发式方法包括基于种群搜索的混合差分进化算法^[1,47]、改进遗传算法^[48-51]以及基于单点搜索的改进型模拟退火算法^[48,52]、禁忌搜索算法^[53-54]。启发式方法包括迭代局部搜索^[55]以及基于优先级构造^[56-57]的启发式算法。元启发式方法相比于一精准确算法求解质量差,但在计算时间上存在优势。启发式方法在求解时间上存在优势,但是其对问题的求解质量相对较差,难以发挥出敏捷卫星的性能。

上述针对敏捷卫星的离线任务规划算法虽然能够求解,在地面规划也能够部署,但是针对星上自主任务规划需要响应多种不确定因素的问题,其对问题的求解时效性仍待提高,在星上部署的可行性较低。当前,增强卫星自主能力以提高卫星对不确定性因素以及动态环境的响应能力,进而提升航天器的响应能力,是未来航天器发展的必然趋势,已受到越来越多研究者的关注。目前,已经投入使用的敏捷自主卫星系统主要包括地球观测卫星 1 号(Earth observing-1, EO-1)、FIREBIRD(focused investigations of relativistic electron burst intensity, range and dynamics)及 OptiSAR(optical and synthetic aperture radar)。

1. EO-1 敏捷自主卫星

EO-1 敏捷自主卫星源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的设计,具备图像识别与自主规划能力。利用星上图像识别能力,EO-1 能够探测到火山喷发、云层覆盖、地壳运动、冰层变化等关注事件并做出响应^[58-59]。星上自主规划能力赋予了 EO-1 快速响应能力, Sherwood 等^[60]对