

# 遥感卫星任务规划技术: 现状与展望

胡笑旋<sup>1,2</sup> 王执龙<sup>1,2</sup> 夏维<sup>1,2</sup> 靳鹏<sup>1,2</sup> 王云辉<sup>1,2</sup>

**摘要** 伴随人类对地表图像数据需求的增长和航天技术的进步, 遥感卫星对地观测系统的建设正在全球兴起, 但日益增长的个性化需求和规模化资源对卫星任务规划技术提出了新的挑战. 针对卫星任务规划关键环节, 分别综述了需求筹划和卫星调度的研究现状. 面向未来遥感卫星应用需求, 讨论了任务规划技术面临的挑战, 并结合新型信息技术, 提出了任务规划技术的可能发展方向, 为构建自动化、智能化和网络化的卫星任务规划系统提供借鉴和思路.

**关键词** 遥感卫星, 任务规划, 云边融合, 人机共融, 虚拟星座

**引用格式** 胡笑旋, 王执龙, 夏维, 等. 遥感卫星任务规划技术: 现状与展望 [J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(5): 495-507

DOI 10.3969/j.issn.2096-0204.2023.05.0495

## Mission Planning Technology for Remote Sensing Satellite :Status and Prospect

HU Xiaoxuan<sup>1,2</sup> WANG Zhilong<sup>1,2</sup> XIA Wei<sup>1,2</sup> JIN Peng<sup>1,2</sup> WANG Yunhui<sup>1,2</sup>

**Abstract** With the continuous growth of demand for surface image data and advancement of aerospace technology, the construction of remote sensing satellite earth observation systems is emerging globally, but the growing personalized demand and large-scale resources have also proposed new challenges to the mission planning technology of remote sensing satellites. The current research status of demand planning and satellite scheduling for the key links of the mission planning of remote sensing satellites are overviewed respectively. According to the application needs of future remote sensing satellites, the new challenges faced by mission planning technology are discussed, and a new generation of information technology is combined, the possible development direction of mission planning technology is proposed to provide reference and ideas for establishing the mission planning system with automated, intelligent and networked remote sensing satellites.

**Key words** remote sensing satellites, mission planning, cloud edge fusion, human-computer integration, virtual constellation

**Citation** HU X X, WANG Z L, XIA W, et al. Mission planning technology for remote sensing satellite :status and prospect[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(5): 495-507

遥感卫星具备全天时、全天候和多角度对地观测能力, 在资源普查、农业与环境监测、灾害应急管理、军事侦察与监视等众多领域发挥着极其重要的作用, 是国家的重大空间基础设施<sup>[1-7]</sup>. 加强遥感卫星对地观测系统建设, 已成为我国和世界主要发达国家的重要战略举措, 对社会经济发展、国防建设和科技研究等方面具有重要意义.

美国于1972年成功发射陆地1号卫星(Landsat-1), 翻开了航天对地观测的新篇章<sup>[8]</sup>, 此后遥感卫星观测系统的建设呈现了由单星向多星、星座乃至星群协同应用的演变趋势, 如法国分别于2012年和2014年发射了地球观测系统(systeme probatoire d'observation de la terre SPOT)卫星SPOT-6、SPOT-7, 与全色和多光谱遥感卫星(panchromatic and multi-

spectral remote sensing satellites pleiades)Pleiades-1A和Pleiades-1B进行组网观测<sup>[9]</sup>;我国自1999年起陆续建设了“资源”“环境减灾”“高分”和“海洋”等系列遥感卫星, 目前在轨数量已达数十颗, 形成了具备高空间、时间、光谱分辨率能力的对地观测系统<sup>[10]</sup>. 美国星球实验室(Planet Labs)陆续建设了包含鸽群(flocks)2p, 3p, 3m, 2k和鸽群先锋(dove pioneer)等星座组成的涵盖180颗各类型卫星的观测群<sup>[11]</sup>. 随着卫星数量和能力的不断提升, 以及对地观测需求的持续增长, 如何管好、用好在轨卫星成为重大的战略需求, 而卫星任务规划技术正是解决该问题的核心关键技术之一.

遥感卫星的日常工作过程需要通过任务规划系统进行安排. 任务规划是卫星运控系统的最主要功能之一, 是驱动卫星高效工作的管理引擎. 它以满足多源用户需求为目标, 对异质、分布的卫星载荷和地面站资源进行任务指派, 生成观测、数传和测控计划, 其目的是驱动卫星资源高效、有序地执行对地观测任务, 主要工作环节包括需求筹划和卫星调度. 鉴于任务规划对卫星观测效能发挥的重要作用, 各国相继进行了任务规划系统建设, 如美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的自动化调度和规划环境(automated scheduling and

收稿日期 2021-07-27 录用日期 2021-12-11  
Manuscript received July 27, 2021; accepted December 11, 2021  
国家自然科学基金(71671059, 71521001)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (71671059, 71521001)

1. 合肥工业大学管理学院 安徽 合肥 230009 2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室 安徽 合肥 230009

1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China 2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making, Ministry of Education, Hefei Anhui 230009, China

planning environment, ASPEN)<sup>[12]</sup>, 法国的 SPOT5 卫星调度系统<sup>[13]</sup>, 欧洲空间局的 Cosmo- Pleiades 星座调度系统<sup>[14]</sup>和俄罗斯莫斯科大学的 MisPlan 系统等<sup>[15]</sup>.

遥感卫星任务规划技术的研究主要基于地面集中管控方式, 面向各类型应用场景, 针对有限数量的观测资源进行规划. 本文以卫星任务规划为中心, 对需求筹划方面的研究以“区域目标、点目标”的思路进行梳理, 对卫星调度相关研究按照“静态目标、移动目标、应急目标”的任务类型进行分析, 面向未来卫星应用的规模化、动态化需求, 结合新一代信息技术, 提出了遥感卫星任务规划技术的进一步研究方向.

## 1 需求筹划

### 1.1 需求筹划工作内容

需求筹划是卫星任务规划工作的基础部分, 其主要工作是面向用户提交的复杂观测需求, 考虑卫星工作模式和载荷成像能力, 对需求进行分解、融合、串联等预处理, 生成观测任务集合, 可分为区域目标分解和点目标融合两类.

1) 区域目标分解. 区域目标广泛存在于城乡规划、国土资源调查和农业监测等需求中. 该类目标具有覆盖面积广阔的特点, 但遥感卫星受轨道和载荷参数的影响, 每次观测仅能在有限可见时间窗口内对可视范围内的有限幅宽区域进行成像, 因此, 单颗卫星单次过境难以实现区域目标的全面覆盖, 如图 1 所示. 考虑任务完成的时效性和覆盖性要求, 必须将区域目标分解成为多个子目标的集合, 如图 2 所示.

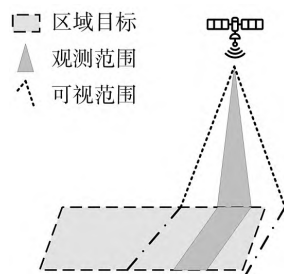


图 1 区域目标单星观测示意图

Fig.1 The schematic diagram of single satellite observation of regional targets

2) 点目标融合. 点目标为成像面积较小的点或区域, 可以被卫星单次过境有效覆盖, 且该类目标通常数量较多, 如图 3 所示. 由于卫星存在圈次能量上限和侧摆约束, 易形成相近点目标观测冲突. 为解决该问题, 常基于卫星成像条带特征, 将地理位置相近, 成像时域要求、分辨率要求相似的任务进行融合, 作为一个目标进行观测, 如图 4 所示.

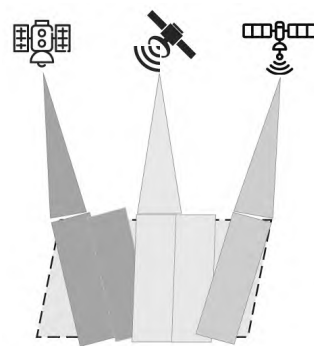


图 2 区域目标多星协同观测示意图

Fig.2 The schematic diagram of multi-satellite collaborative observation of regional targets

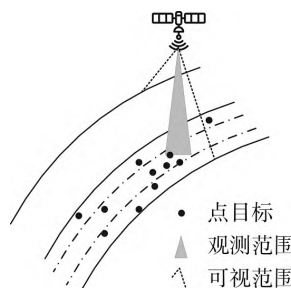


图 3 点目标单星观测示意图

Fig.3 The schematic diagram of single satellite observation of a point target

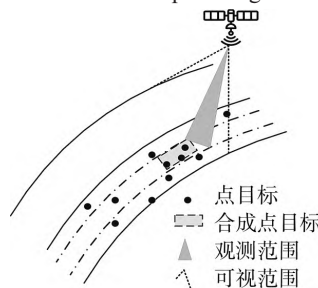


图 4 点目标合成观测示意图

Fig.4 The schematic diagram of synthetic observation of a point target

### 1.2 需求筹划研究现状

#### 1.2.1 区域目标分解

区域目标的分解方式主要有网格和条带两种, 其中, 网格分解是根据预定义的坐标系或条带幅宽和标准长度, 将目标区域划分为若干相邻网格, 作为构造观测方案中条带的基础. 条带分解是在卫星观测范围内, 以设定的传感器偏转角偏移参数对区域目标进行离散化, 划分为平行条带, 作为卫星观测方案中条带的候选集合.

网格分解法是一种基于固定子空间(网格)的目标分解方式, 将问题的最小求解单元进行固化, 能够有效降低条带变长导致的建模困难问题并缩减解空

间, 常用于美国 Landsat 卫星和法国 SPOT 卫星的区域目标分解<sup>[16]</sup>。RIVETT C 将区域分解转化为集合覆盖问题, 然后按照单景模式将其分解为多个独立场景<sup>[17]</sup>。伍崇友借鉴了 ARVIDSON T J 等对 Landsat 卫星单景划分的方法<sup>[18-19]</sup>, 根据卫星星下线、载荷视场宽度和单次成像长度, 将全球表面划分为平行相邻且连续的单景网格, 并提出了一种基于访问时间窗与单景周期起始时段相似性的候选单景筛选办法和基于优先级的动态调整方法。杨文沅等考虑敏捷卫星的非沿迹成像能力, 以卫星单景将区域目标网格化, 作为观测条带的候选构建集合<sup>[20]</sup>。DU B 等将区域目标离散为观测节点, 将区域覆盖问题转化为路径访问问题<sup>[21]</sup>。朱外明针对区域目标覆盖问题, 提出了一种基于网格的条带嵌套逼近构造策略<sup>[22]</sup>。

条带分解法是一种基于变长子空间(条带)的目标分割方式, 相较于网格分解法, 该方法具备更为灵活的组合方式, 但在一定程度上增加了建模与求解的难度, 常见于推扫式卫星的任务规划研究。LEMAITRE M 等提出了多边区域的不重叠等幅宽条带划分方法<sup>[23]</sup>。阮启明等在 Lemaitre 的基础上考虑了卫星最大观测范围<sup>[24]</sup>, 提出了基于传感器偏移参数的等幅宽平行可重叠条带划分方法, 丰富了候选可能性且避免了不可用条带的出现。此后的一些研究均是基于卫星有限观测范围下观测角度离散化条带划分模式的适应性研究, 主要集中于坐标系转换、条带数据模型设计和条带分解方式等方面。例如: 李菊芳和白保存提出了基于立体几何的条带计算方法<sup>[25-26]</sup>, 依据卫星的飞行径向, 按照不同观测角下的幅宽对区域目标进行动态分解。杨剑等考虑不同侧摆角度和目标形状不规则导致的时间窗延迟开始和提前结束问题, 为条带数据设计了时间标记<sup>[27]</sup>。潘耀等考虑条带重叠导致的复杂集合运算及频繁的高斯投影导致的计算效率问题, 提出了变幅宽不交叠平行条带划分方法<sup>[28]</sup>。

在一些研究中, 常将区域目标分解和对应的卫星调度进行一体化建模与求解。考虑区域观测需求中要求尽可能全面覆盖的特征, 大部分求解方法均以覆盖性、完成时效性等指标为目标函数, 并以区域目标的离散化网格统计观测方案的覆盖性能。李曦针对多星单区域目标观测问题, 以空间分辨率和时间分辨率优先为目标设计了模型<sup>[29]</sup>, 采用遗传算法和贪婪算法求解, 并以等经纬度差网格计算访问条带对目标区域的覆盖情况。阮启明认为整体收益最大化优先级高于观测成本最小化, 并以此为基础研究了分级优化策略, 设计了 3 种亚启发式算法, 提出了基于空间网格的区域目标覆盖率计算方法, 解决了观测条带重叠时整体收益的计算问题<sup>[24]</sup>。杨剑设计了单任务与全任务查全相均衡的局部收益准则, 并以基于目标分布的启发式

规则指导迭代求解<sup>[27]</sup>。WANG H F 等提出了基于全球参考网格系统二维阵列计算目标覆盖率的方法<sup>[30]</sup>。章登义等设计了基于等时间步长的条带覆盖方案搜索方法<sup>[31]</sup>。DU B 等和 JI H R 等将区域覆盖问题建模为路径规划问题, 并分别提出了改进蚁群算法和基于路径演绎的求解方法<sup>[21, 32]</sup>。XU Y J 等分别以最大区域覆盖和最少资源利用为优化目标提出了改进的 NS-GA-II 算法<sup>[33-34]</sup>。ZHU W M 等和 HU X X 等针对区域目标覆盖问题, 提出了最大覆盖面积、最小完工时间和最小覆盖成本 3 个子问题, 并设计了基于网格离散化的拉格朗日松弛算法、两阶段启发式求解算法和隐枚举算法<sup>[35-37]</sup>。

### 1.2.2 点目标合成

在点目标合成方面有调度前预先合成和调度过程内动态合成两种方式, 其中调度前预先合成是在满足载荷分辨率、成像角度、可见时域和单次开机时长等约束条件下按照合并可行性进行任务合成, 形成待观测任务集合, 调度过程内动态合成即在调度的过程中通过启发式规则, 动态地指导任务合成与调度过程相融合。

点目标的预先合成认为任务合成关系是任务执行时间窗间的点对点关系, 因此, 主要采用图论的方式, 将目标合成问题转化为团划分问题进行求解。许语拉等针对单星任务合成问题, 提出了匹配冲突元任务概念<sup>[38-39]</sup>, 在此基础上建立了聚类关系图, 设计了基于优先合并和团聚类合并准则的近似团划分算法, 针对多星任务合成问题, 提出了基于相容关系的聚类算法。郝会成针对敏捷卫星任务合成问题, 构建了基于约束满足的任务聚类图模型, 将问题转化为联通团划分问题, 并设计了改进的蚁群算法进行求解<sup>[40]</sup>。郭雷基于最小侧摆角规则、最小资源冗余规则, 设计了聚类图中的边权重, 并提出了基于团划分的任务聚类算法<sup>[41]</sup>。WANG J J 等建立了任务合并图(task merging graph, tmg)模型<sup>[42]</sup>, 提出了基于团划分的任务合并算法(task merging algorithm based on clique partition, CP-TM)。潘耀等构建了任务聚类图模型, 并提出了基于权值矩阵、收益矩阵和终点矩阵的改进单轨最优团划分聚类方法<sup>[43]</sup>。张铭等面向密集型卫星调度, 设计了一种基于逐星逐轨遍历的候选任务集合构造算法<sup>[44-45]</sup>, 提出了一种基于精英解的烟花算法进行求解。

调度过程内动态合成考虑任务合成的丰富可能性, 多采用多阶段或迭代的求解方式, 如启发式规则指导下的任务合成算法, 或具有特殊解空间构造方式的亚启发式算法。白保存等针对整体优化策略, 提出了以任务需求度、资源竞争度、时间窗口竞争度、最小侧摆角和最小冗余规则指导的动态合成启发式算



法和基于改进邻域的模拟退火算法,针对分解优化策略搭建了任务指派和任务合成规划两阶段求解框架,设计了基于动态规划思想的迭代求解算法<sup>[46-50]</sup>。邱涤珊等针对应急任务规划问题,提出了一种基于任务需求度规则指导的考虑任务动态合成的规划算法<sup>[51]</sup>。蒋晓分析了观测需求特征的冗余关系<sup>[52]</sup>,建立了点目标合成的条件约束模型,设计了遗传算法对问题进行求解。此外,王钧提出了基于成像角度归类和任务满足归类的预处理方式<sup>[53]</sup>,建立了多目标有向图模型,设计了一种基于非支配排序遗传算法的成像路径搜索算法。

## 2 卫星调度

### 2.1 卫星调度工作内容

卫星调度是卫星任务规划的核心部分,其主要工作是根据观测任务要求和载荷能力等属性,解决由资源稀缺性和任务多样性导致的资源争用和任务冲突,将任务分配给特定的卫星和载荷,生成最大化观测效能的观测和数传计划,按照处理对象的不同,可分为面向静态目标的卫星调度、面向移动目标的卫星调度和面向应急目标的卫星调度3类。

1) 面向静态目标的卫星调度。静态目标指单颗卫星单次过境可以实现有效覆盖的、地理位置固定不变的元任务,常表现出任务在不同资源不同时段的执行替代性,如图5所示,任务 $ta_1$ 在时段 $t_1$ 可被卫星 $sa_1$ 观测,在时段 $t_2$ 可被卫星 $sa_2$ 观测;任务在同一资源的执行冲突性,如图6所示,任务 $ta_3$ 和任务 $ta_4$ 可被卫星 $sa_3$ 分别在时段 $t_3$ 和时段 $t_4$ 观测,任务 $ta_2$ 和任务 $ta_3$ 可被卫星 $sa_3$ 在同一时段 $t_3$ 观测,但受限于卫星成像视场角约束不能同时观测;以及对资源能量及存储的上限逾越性,大量静态目标共同观测,对卫星资源的存储和能量需求总量将超出卫星资源的能力上限。因此,需要针对这些约束条件进行建模求解。

2) 移动目标。移动目标为地理位置不断变动的

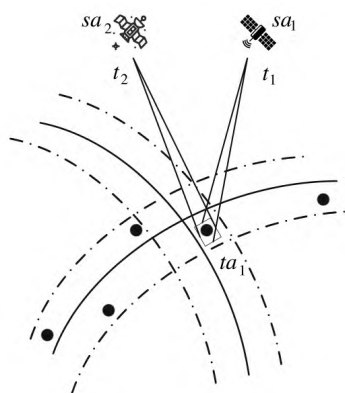


图5 任务执行替代性示意图

Fig.5 Alternative schematic diagram of task execution

目标,如陆地行驶的车辆和海洋航行的船舶,该类目标具体位置、运动方向是不确定的,常转化为区域搜索和跟踪监视任务。与区域目标具有一定的相似性,但由于移动目标的高机动性,导致其不能简单视为区域覆盖任务,如图7所示,基于区域覆盖模式进行卫星调度:在时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 分别观测条带 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ ,但是移动目标在相应时间所处位置分别在 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ ,这将造成观测机会的浪费。因此,在调度过程中需要考虑目标的动态性因素。

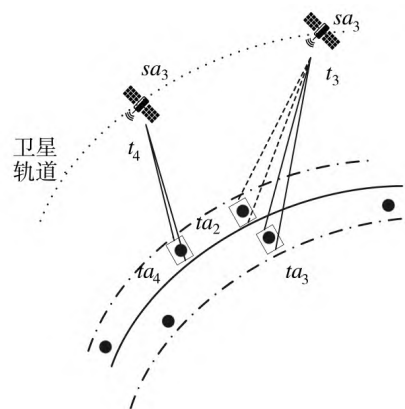


图6 任务执行冲突性示意图

Fig.6 The schematic diagram of task execution conflict

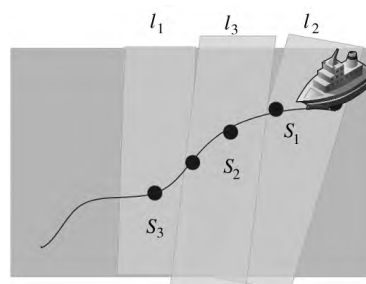


图7 移动目标示意图

Fig.7 The schematic diagram of moving target

3) 应急目标。应急目标常表现为由突发事件导致的观测任务,如抗震救灾、军事侦察过程中对天基成像信息的需求,该类目标具有到达时间随机性高,时效性要求高、任务重要性高等特点,难以在事件发生之前进行预测与调度,通常需要在当前执行方案的基础上进行快速调整。但是由于已有方案已上注,将其完全擦除重新上注,将造成较大的资源浪费,因此,在针对应急目标重调度的过程中要在保证调度效果和速度的基础上,尽量降低对原方案的扰动。

### 2.2 卫星调度研究现状

#### 2.2.1 面向静态目标的卫星调度

面向静态目标的卫星调度是一类典型的组合优

化问题, 由于资源和任务的规模化, 导致其求解复杂度急剧上升, 相关算法研究主要集中于: 精确算法、启发式算法和亚启发式算法。

精确算法常以数学解析方式求解, 具备寻得全局最优解的能力, 但受限于其计算复杂度, 难以适用于大规模问题, 多通过拉格朗日松弛、列生成和分支定价的方式拆解搜索空间, 达到减小问题规模的目的。GABREL V 针对 SPOT5 单星调度问题, 基于图论的方式建立了顶点弧模型, 并采用列生成方式进行求解<sup>[54]</sup>。LIN W C 将单星调度问题建模为整数规划, 并采用拉格朗日松弛和线性搜索结合的方式进行求解, 最后使用约束检查启发式规则对方案进行可行性调整<sup>[55]</sup>。相似的, LIAO D Y 将福卫 2 号卫星 (FORMOSAT-2) 调度问题转化为其近似上界问题, 对其卫星容量约束进行拉格朗日松弛, 并利用线性搜索和次梯度方法进行求解, 最后使用启发式规则进行可行性调整<sup>[56]</sup>。JANG J 针对阿里郎 2 号卫星 (Korea Multi-Purpose Satellite, KOMPSAT-2) 调度问题, 采用拉格朗日法和次梯度方法进行求解, 并使用贪婪插入算法构造初始解, 以列固定规则削减子问题规模<sup>[57]</sup>。WANG J J 设计了一种基于分支定价思想指导多星约束生成的求解方法<sup>[58]</sup>。

启发式算法主要通过基于领域知识设计的启发式规则指导解的构造过程, 鉴于影响卫星调度的重要因素为时间窗间的冲突、任务的资源占用和任务执行收益, 因此, 大多研究均通过分析时间窗的交叠程度和替代性、任务收益和资源耗用比等方面设计启发式规则。启发式算法速度相对较快, 对大规模卫星调度问题具有较好的适用性。WANG P 针对卫星观测与数传综合调度问题, 以时间窗长度、任务持续时长和任务权重设计了任务灵活性因子, 以任务的冲突集合设计了任务回溯因子, 基于冲突避免思想, 提出了一种考虑优先级、辅以有限回溯的启发式算法<sup>[59-60]</sup>。XU R 设计了以卫星剩余存储、卫星剩余观测时长、任务优先级、任务时间窗工作时长、任务时间窗存储占用和剩余时间窗数量计算的优先效益, 和以任务优先级及任务时间窗冲突集计算的优先机会成本启发式因子<sup>[61]</sup>, 并以此为基础, 提出了基于卫星索引的时间窗定位 (satellite index-based time windows positioning, SITP) 算法和基于全局的时间窗定位 (global based time windows positioning, GTP) 算法。CHEN X Y 以时间窗交叠时段数量和长度、任务权重, 设计了一种新颖的冲突度启发式因子, 并设计了基于时间贪婪、权重贪婪的初始方案生成方法和基于差分进化的方案调整方法<sup>[62-63]</sup>。XIE P 将时间窗的冲突关系表示为网络, 以节点的总可见时间窗口的重叠比例与任务优先级的乘积计算边的权重, 以节点入度和出度定义了时间

窗灵敏度 (time window sensitivity, TWS) 和时间窗影响 (time window influence, TWI) 因子, 并在此基础上考虑时间窗关系的累积性设计了权重的迭代更新规则<sup>[64]</sup>。

亚启发式算法主要包含蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法等群类和邻域搜索类算法, 相关研究主要集中于种群的构造、邻域的构造和逃逸方式的设计, 如蚁群和遗传个体的表示、遗传的交叉变异规则、蚁群的信息素更新、模拟退火的退火及回火计划和禁忌搜索的邻域构建等。该类算法相较于启发式算法, 在人类经验规则的基础上增加了随机搜索过程, 通常需要较长时间的迭代收敛, 优化能力和求解效率介于精确算法和启发式算法之间, 是一类最常用的卫星调度算法。

在蚁群算法方面, WU G H 基于任务的可能观察顺序, 以任务为节点, 以时序可行性为边构建了一个无环有向图模型, 提出了以蚂蚁基于调度约束及图内各边信息素构造方案的思路, 设计了基于任务优先级进行局部搜索的混合蚁群优化算法<sup>[65]</sup>。GUO H 和邱涤珊基于蚁群系统和最大最小蚂蚁系统思想, 考虑了任务优先级、观测时间区间等影响转移概率的因素, 设计了信息素更新和寻优策略<sup>[66-67]</sup>。靳鹏等基于图的思想将卫星调度问题建模为独立集问题, 设计了观测任务信息素和数传任务信息素, 提出了考虑局部搜索的双信息素蚁群算法<sup>[68]</sup>。

在遗传算法方面, SUN B L 等提出了基于遗传算法的卫星调度方式, 以任务执行收益、任务不完整性惩罚和任务执行代价, 设计了方案的适应度函数, 但未给出交叉变异后的方案调整方法<sup>[69]</sup>。ZHENG Z X 针对遗传算法的收敛性和计算时间问题, 设计了一种改进的遗传算法, 该方法参考动态突变策略和自适应突变策略的优点, 设计了基于终止代数和跳出条件的迭代规则, 以弥补遗传算法易陷入局部最优和收敛时间过长等不足<sup>[70]</sup>。WU K 提出了一种改进的非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III) 调度算法, 改进了生态保护 (Niche-Preservation) 操作, 设计了控制轮廓线形状的方法, 通过惩罚远离权重向量的成员来控制种群多样性<sup>[71]</sup>。

在模拟退火算法方面, HE R J 提出了一种快速模拟退火算法, 针对任务特征构造了插入、合成、删除和分解等多种邻域结构, 并采用随机扰动、重启动和重排列等方式跳出局部最优<sup>[72]</sup>。WU G H 提出了一种自适应模拟退火算法, 设计了插入、删除和任务迁移两种邻域结构, 并在此基础上设计了一种基于历史执行经验的邻域自适应分配机制, 通过引入额外参数解决连续不满意迭代次数导致的温度上升过快问题<sup>[73]</sup>。HE L 基于双层编程和分而治之的思想, 设计了自适应大邻域搜索算法, 该算法内层采用局部搜索方式进



行方案的生成和修复,外层采用模拟退火准则来控制搜索过程<sup>[74]</sup>。

在禁忌搜索算法方面, BIANCHESSI N 提出了一种带有反循环机制的禁忌搜索算法,放宽了任务时间窗口约束,将约束违反行为添加到目标函数内作为惩罚项,以保证搜索的广泛性<sup>[75]</sup>。 HABET D 将调度问题映射为约束优化问题,以基于插入试探的部分枚举方式进行禁忌搜索邻域的构造,为降低随机效应,将最小化成像操作过渡时间作为次要优化目标<sup>[76]</sup>。 SARKHEYLI A 考虑任务的优先级和时间、资源限制,基于着色理论对问题进行建模,设计了一种基于点集颜色迁移的邻域构造方法,针对观测资源和数传资源联合调度问题,设计了以时间窗冲突度为启发式因子指导任务选取并构造邻域解的方式<sup>[77]</sup>。

### 2.2.2 面向移动目标的卫星调度

移动目标具有位置不确定性和动态性等特征,与静态目标具有较大差异。为此,常将该问题分解为移动目标预测和移动目标搜索两个相对独立,但又具有一定耦合关系的子问题,通过目标位置预测减少不确定性,然后以目标搜索为指导,调度卫星开展观测活动。

在移动目标位置预测方面,主要从历史数据和有限的已知轨迹入手,运用高斯运动预测、贝叶斯概率更新、卡尔曼滤波以及神经网络等方式,分析数据内蕴含的规律,从而进行位置预测。慈元卓等提出了一种高斯目标转移概率密度函数与贝叶斯概率分布更新规则相结合的方法,以降低移动目标的不确定性<sup>[78]</sup>。井亮研究了视觉图像与卡尔曼滤波相结合的移动目标跟踪算法,并在此基础上实现了连续自适应均值漂移(continuously adaptive mean-shift, CamShift)与卡尔曼滤波的结合<sup>[79]</sup>。谢彬等提出了一种基于欧氏距离相似性计算和最小描述长度原理的改进移动目标轨迹预测算法<sup>[80]</sup>。王家威等提出了一种基于改进自适应遗传算法优化卷积神经网络参数的目标优化识别算法(convolutional neural network-improved adaptive genetic algorithm, CNN-IAGA)和一种目标检测与特征提取方法,在此基础上设计了一种基于图像特征融合的轨迹预测方法<sup>[81]</sup>。胡玉可等设计了一种基于对称分段路径距离的数据预处理方法和基于门控循环神经单元(gated recurrent unit, GRU)的轨迹预测模型<sup>[82]</sup>。徐一帆等分析了海洋移动目标运动为中低速运动且遵守一定航行规程的特征,设计了基于插值预处理的灰色预测方法,实现了多方式融合的多模型预测方法<sup>[83]</sup>。

在移动目标搜索方面,由于单颗卫星资源不能长时监视同一区域,因此,多采用搜索图结合移动预测模型,估计移动目标的潜在区域,并调度多颗卫星开

展接续观测。 BERRY P E 提出了一种移动目标搜索的通用框架,设计了基于贝叶斯估计和信息熵度量的资源最优分配策略<sup>[84]</sup>。慈元卓等设计了基于部分马尔科夫决策过程的离线调度模型和基于预测控制的在线滚动调度模型,考虑随机搜索、概率最大化、信息熵增量最大化等要素,提出了5种求解算法,并进行了对比分析<sup>[85-86]</sup>。梅关林等提出了一种基于搜索图内目标实时概率分布自适应调整结合KL散度的调度方法<sup>[87]</sup>。梁星星等建立了海洋移动目标的空天协同连续观测模型,设计了移动目标潜在位置分析及概率分布更新方法,提出了空天资源协同的目标分组方法和基于轨迹预测的路径调度算法<sup>[88-89]</sup>。张海龙分析了多障碍海域特征,基于高斯运动模型和贝叶斯概率更新规则,改进了搜索图更新方法和动目标预测方法,并在此基础上构建了两端闭环协同的动目标搜索方法<sup>[90-91]</sup>。

### 2.2.3 面向应急目标的卫星调度

应急目标观测任务一般是突发的、紧急的,具有很强的时效性要求,需要考虑如何将任务快速插入到既有任务队列中并优先执行,同时也要考虑对既有任务队列不造成很大的扰动。该类调度问题的主要算法可以归结为启发式算法、亚启发式算法、滚动时域策略与启发式算法相结合等3类。

在启发式算法方面,其主旨思想是基于任务重要性、观测机会的多寡、时间窗的冲突性进行分析,设计相应的启发式因子,指导任务的选择与调度过程,可分为仅考虑时间窗互斥性的调整启发式算法和消解时间窗互斥性的合成启发式算法。仅考虑时间窗互斥性的调整启发式算法,在满足任务时间窗互斥性基本约束条件的基础上,以设计的启发式因子选择任务,并通过插入、删除、移位和替换的操作进行方案调整。张利宁等提出了一种考虑任务替换的启发式调整算法,并基于任务灵活度、冲突集、争议部分和剪枝操作,设计了5种替换任务的选择策略<sup>[92]</sup>。刘勇提出了面向收益最大化和方案扰动最小化的卫星重调度目标,设计了任务权重与静态任务优先的启发式算法<sup>[93]</sup>。WANG J J 等分析了插入新任务、取消已安排任务、改变任务属性等动态特征,提出了插入、删除、再插入和插入、移位、删除、再插入两种算法<sup>[94]</sup>。消解时间窗互斥性的合成启发式算法,考虑新到达任务可能与既有任务队列中的任务存在耦合关系,可以通过任务合成的方式消除冲突,降低方案调整的扰动,提升方案的总体任务完成率。刘洋等提出了一种考虑任务合并、修复与移位的多星动态任务调度方法<sup>[95]</sup>。WANG J J 等提出了一种一种具有任务合并、后移和恢复功能的动态紧急调度算法(dynamic emergency scheduling algorithm with task merging, backward

shift and rehabilitation, TMBSR-DES) 动态调度算法, 综合考虑了任务合成、后移和修复策略<sup>[42]</sup>。邱泽珊等分析了最优、延迟和扰动 3 类合成任务, 设计了一种基于任务需求度指导的动态启发式调度算法<sup>[51]</sup>。

在亚启发式算法方面, WU G H 等针对卫星应急任务调度提出了一个闭环导向图模型, 设计了一种蚁群优化与本地迭代搜索结合的算法<sup>[96]</sup>。郭超等基于任务优先级和时间裕度构造了重调度目标, 并采用遗传算法进行求解<sup>[97]</sup>。ZHAI X J 等提出了一种基于非占优排序遗传算法与启发式算法相结合的动态调度算法, 综合考虑了应急任务的完成期限、常规任务的影响和调度的鲁棒性等因素<sup>[98]</sup>。

滚动时域即按照一定阈值对时间轴进行切片, 将问题分解至多个子区间内, 一方面能够将大规模、长时域调度问题转化为小规模、短时域问题, 以降低调度复杂度; 另一方面能够以较小的时间步长进行事件的动态响应, 以提升调度效率。HE C 等分析了应急任务到达独立性特征和任务完成失效性特征, 设计了考虑调度时刻对调度效果影响的滚动框架与启发式算法结合的求解策略<sup>[99]</sup>。QIU D S 等综合考虑应急任务的到达与工期独立性, 将成像侦察卫星应急调度问题转换为约束满足问题, 基于滚动优化策略与启发式算法相结合的思想, 提出了 3 种应急调度算法<sup>[100]</sup>。王超超和靳鹏等分析了应急调度中的数传影响, 提出了基于固定周期的统筹和基于测控站的局部调整相结合的两阶段调度策略, 设计了到达时间优先回溯、截止时间优先回溯、到达时间优先替换和截止期优先替换 4 种求解启发式规则<sup>[101-102]</sup>。SUN H Q 等提出一种基于事件驱动的滚动时域(rolling horizon, RH)策略, 设计了一种基于插入规则、移位规则、回溯规则、删除规则和重新插入规则(insertion, shifting, backtracking, deletion, and reinsertion, ISBDR)的启发式算法<sup>[103]</sup>。

### 3 总结与展望

发展卫星对地观测能力是国家重大需求。在实际需求的驱动下, 遥感卫星任务规划技术在理论研究和工程应用中已经取得了很大的进展, 本文综述了遥感卫星任务规划的研究现状, 按照其工作环节划分为需求筹划和卫星调度两部分, 并针对各部分研究内容, 按照“区域目标分解、点目标融合、面向静态目标的卫星调度、面向移动目标的卫星调度和面向应急目标的调度”5 个方面进行了相关研究的梳理。通过分析, 不难发现以下趋势与特点:

1) 在需求筹划方面, 相关研究主要集中于区域目标分解和点目标融合, 呈现出筹划资源由单一到丰富, 筹划场景由简单抽象到类真实仿真, 筹划要素

由单一到精细化的发展趋势, 部分筹划研究除考虑目标的覆盖性要求外, 还对卫星的侧摆、俯仰等机动能力, 任务需求度、资源竞争度, 投影坐标系转换误差和敏捷卫星的非沿迹观测等特征筹划的影响进行了探究。

2) 在卫星调度方面, 相关研究对静态目标、移动目标和应急目标等多种类型的任务进行了充分的探索, 在不同领域根据问题特征的差异性, 对精确算法、启发式算法和亚启发式算法进行了适应性设计, 并在移动目标预测方面初步引入了基于神经网络的人工智能方法, 从整体上呈现出调度方法对求解效率和求解智能化的不断追求。

近年来, 我国遥感成像卫星持续高密度发射, 商业遥感卫星也迅速发展, 使得对地观测系统不断完善。面向未来的遥感卫星应用需求, 任务规划技术仍然面临新的挑战, 主要体现在如下方面:

1) 需求复杂化、来源多样化, 需求筹划难度提升。遥感卫星应用领域的不断拓宽带来了不断增长的用户需求。用户需求具有数量繁多、时效性高、时域覆盖宽、空域覆盖广等复杂特征。与此同时, 应急任务快速响应的需求呈现常态化趋势。为此, 对海量用户需求的优化分解合成、统筹需求筹划、应急需求快速响应成为关键的技术挑战。

2) 资源规模化、运行复杂化, 卫星调度难度加大。随着在轨卫星数量的不断增加, 呈现出从多星、星座到大规模星群的发展趋势。卫星星群一般具有高低轨协同、多载荷配合的工作体系, 使得其系统管理架构日趋复杂, 任务规划的难度急剧上升。为此, 迫切要求实现自动化、智能化、网络化的任务规划系统, 以充分发挥多星多载荷的协同优势, 提高对地观测效能。

当前, 以云计算、大数据、物联网、人工智能、区块链等为主要内容的新一代信息技术蓬勃发展和广泛渗透, 为卫星任务规划技术升级发展提供了充分的技术支撑。下面从若干方面展望遥感卫星任务规划技术的发展方向。

1) 云边融合的综合任务规划技术。云边融合的任务规划技术是指通过建立“地面+星上”的分布式任务规划系统架构, 以地面云中心提供全局集中式任务规划服务, 星上(边缘端)提供实时自主任务规划服务。区别于传统的任务规划模式, 云边融合的任务规划是一种“云端处理、边缘计算、按需汇聚、分级管控”分布式协同任务规划新模式, 地面和星上的计算能力能够有效协同、能力互补, 以有效降低地面系统的计算负荷, 并实现及时的需求筹划和资源调度。

2) 人机共融的任务规划技术。随着人工智能技术的发展, 未来的卫星任务规划过程将具有典型的人



机共融特征, 人类智能和人工智能融合互补, 既发挥人类对复杂需求的深度理解和准确认知能力, 又发挥机器的海量存储和快速计算能力. 而这两者如何有效融合, 尚存在很多科学技术上的挑战. 为此, 需要在基于人机交互的需求获取与推荐、基于人类经验的任务规划算法智能增强、基于人机交互的任务规划方案决策等方面开展研究工作.

3) 虚拟星座任务规划技术. 虚拟星座(virtual constellation) 是指由面向特定的任务需要, 由不同轨道、不同类型的卫星共同组成的一个相互配合、功能互补、数据共享的对地观测系统. 虚拟星座是管理大规模卫星群的灵活解决方案, 能够实现跨平台的系统应用, 并具有良好的扩展能力. 然而虚拟星座是一种开放式动态资源联盟, 卫星资源分布于不同的管理主体, 具有不同的观测能力, 资源间的合作存在大量的不确定性. 因此, 如何建立虚拟星座中卫星资源之间的任务合作机制, 进而构建任务-资源匹配方法与卫星调度方法成为了任务规划技术的重要研究挑战.

#### 4 结论

任务规划技术是遥感卫星应用中的核心技术之一, 实现对遥感卫星的指挥调度和运行管理. 经过多年的发展, 任务规划技术在理论研究与实际应用中均获得了丰硕的成果, 但面向遥感卫星应用的未来需求, 任务规划技术仍然面临着诸多挑战. 本文针对卫星任务规划的关键环节, 基于各环节主要业务进行分类梳理综述, 总结了各部分研究取得的成果, 并面向当前遥感卫星应用的发展趋势, 分析了当前研究面临的不足与挑战, 提出了遥感卫星任务规划未来的可能发展方向, 包括云边融合的综合任务规划技术、人机共融的任务规划技术和虚拟星座任务规划技术. 希望通过本文的工作, 能够对我国遥感卫星任务规划技术的发展起到促进作用.

#### References

- [1] 屈泉西, 安萌, 梁德印. 中国遥感卫星在农业领域的应用现状与未来发展 [J]. 卫星应用, 2018, 75(3): 30-33.  
QU Q Y, AN M, LIANG D Y. Application status and future development of Chinese remote sensing satellites in agriculture [J]. Satellite Application, 2018, 75(3): 30-33.
- [2] 宋玉今. 卫星遥感技术在国土资源调查中的应用 [J]. 现代商业, 2010, 12(36): 60-61.  
SONG Y J. Application of satellite remote sensing technology in land and resources survey [J]. Modern Business, 2010, 12(36): 60-61.
- [3] 蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等. 中国海洋卫星遥感应用进展 [J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 113-124.  
JIANG X W, HE X Q, LIN M S, et al. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 113-124.
- [4] 黄宇民, 范一大, 马骏, 等. 中国遥感卫星系统灾害监测能力研究 [J]. 航天器工程, 2014, 23(6): 7-12.  
HUANG Y M, FAN Y D, MA J, et al. Research on disaster monitoring ability of chinese remote satellite system [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(6): 7-12.
- [5] 范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1170-1184.  
FAN Y D, WU W, WANG W, et al. Research progress of disaster remote sensing in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 1170-1184.
- [6] 赵程亮, 张占月, 刘瑶. 光学侦察卫星信息支援应用效能评估研究 [J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(3): 236-239.  
ZHAO C L, ZHANG Z Y, LIU Y. Application effectiveness evaluation of optical reconnaissance satellite with space-based information support [J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(3): 236-239.
- [7] 张世杰, 段晨阳, 苏杭. 空间主被动安全威胁及其减缓策略 [J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 92-98.  
ZHANG S J, DUAN C Y, SU H. Natural-artificial space security threats and their mitigation strategies [J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 92-98.
- [8] 姜高珍, 韩冰, 高应波, 等. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LDCM 前瞻 [J]. 遥感学报, 2013, 17(5): 1033-1048.  
JIANG G Z, HAN B, GAO Y B, et al. Review of 40-year earth observation with Landsat series and prospects of LDCM [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(5): 1033-1048.
- [9] 李栋, 董正宏, 刘晓昂. 遥感卫星应用发展现状及启示 [J]. 中国航天, 2020(1): 46-53.  
LI D, DONG Z H, LIU X A. The status quo and enlightenment of remote sensing satellite application development [J]. Aerospace China, 2020(1): 46-53.
- [10] 《国际太空》编辑部. 遥感卫星篇 [J]. 国际太空, 2018(1): 18-23.  
Editorial Department. Remote sensing satellites [J]. Space International, 2018(1): 18-23.
- [11] CHRISTOPHERSON J B, CHANDRA S N R, QUANBECK J Q. 2019 Joint agency commercial imagery evaluation—land remote sensing satellite compendium [M]. Reston: Department of the Interior & U.S. Geological Survey, 2019.



- [12] CHIEN S, RABIDEAU G, KNIGHT R, et al. ASPEN — automated planning and scheduling for space mission operations[C]// SpaceOps, 2000.
- [13] VASQUEZ M, HAO J K. A “logic- constrained” knapsack formulation and a tabu algorithm for the daily photograph scheduling of an earth observation satellite[J]. Computational Optimization and Applications, 2001, 20(2): 137- 157.
- [14] BIANCHESSI N. Planning and scheduling problems for earth observing satellites: models and algorithms[D]. Milano: Università degli Studi di Milano, 2006.
- [15] MALYSHEV V, BOBRONNIKOV V. Mission planning for remote sensing satellite constellation[M]. Heidelberg: Springer Dordrecht, 1998.
- [16] 阮启明, 谭跃进, 李菊芳, 等. 对地观测卫星的区域目标分割与优选问题研究 [J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 98- 100. RUAN Q M, TAN Y J, LI J F, et al. Research on the segmentation and optimal selection of regional targets for earth observation satellites[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(1): 98- 100.
- [17] RIVETT C, PONTECORVO C. Improving satellite surveillance through optimal assignment of assets[C]// Defence Science and Technology Organisation: Edinburgh, Australia, 2003.
- [18] 伍崇友. 面向区域目标普查的卫星调度问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. WU C Y. Research on satellite scheduling problem for area targets survey[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [19] ARVIDASON T J, GASEH J, GOWARD S N. Landsat7's long-term acquisition Plan - - an innovative approach to building a global archive[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(1): 13- 26.
- [20] 杨文沅, 贺仁杰, 耿西英智, 等. 面向区域目标的敏捷卫星非沿迹条带划分方法 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 82- 87. YANG W Y, HE R J, GENGXI Y Z, et al. Area target oriented non- along- with- track strip partitioning method for agile satellite[J]. Science Technology and Engineering 2016, 16(22): 82- 87.
- [21] DU B, LI S, SHE Y C, et al. Area targets observation mission planning of agile satellite considering the drift angle constraint[J]. Journal of Astronomical Telescopes Instruments & Systems, 2018, 4(4): 1- 19.
- [22] 朱外明. 面向多星协同观测的区域覆盖优化方法 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019. ZHU W M. Multiple earth observation satellites cooperative observing area covering optimization method[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [23] LEMAITRE M, GERARD V, Jouhaud F, et al. Selecting and scheduling observations of agile satellites[J]. Aerospace Science and Technology, 2002, 6(5): 367- 381.
- [24] 阮启明. 面向区域目标的成像侦察卫星调度问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. RUAN Q M. Research on photo- reconnaissance satellites scheduling problem for area targets observation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [25] 李菊芳, 姚锋, 白保存, 等. 面向区域目标的多星协同对地观测任务规划问题 [J]. 测绘科学, 2008, 33(S1): 54- 56. LI J F, YAO F, BAI B C, et al. Cooperative mission planning problem for area targets observation by multi satellites [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(S1): 54- 56.
- [26] 白保存, 阮启明, 陈英武. 多星协同观测条件下区域目标的动态划分方法 [J]. 运筹与管理, 2008, 17(2): 43- 47. BAI B C, RUAN Q M, CHEN Y W. Dynamic segmenting method of polygon for remote sensing satellites observing[J]. Operations Research and Management Science, 2008, 17(2): 43- 47.
- [27] 杨剑. 基于区域目标分解的对地观测卫星成像调度方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. YANG J. Research on earth observation satellite imaging scheduling method based on regional target decomposition[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [28] 潘耀, 池忠明, 饶启龙, 等. 基于视场角的遥感卫星成像多边形区域目标动态分解方法 [J]. 航天器工程, 2017, 26(3): 38- 42. PAN Y, CHI Z M, RAO Q L, et al. Dynamic segmenting method of polygon target based on fov for remote sensing satellite imaging[J]. Spacecraft Engineering, 2017, 26(3): 38- 42.
- [29] 李曦. 多星区域观测任务的效率优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. LI X. Research on efficiency optimization in the process of multi- satellites performing area target surveillance task [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [30] WANG H F, LI X Z. Research on the optimization method of dynamic partitioning area target for earth observation satellites[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 3159- 3163.
- [31] 章登义, 郭雷, 王骞, 等. 一种面向区域目标的敏捷成像

- 卫星单轨调度方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 901-905.  
ZHANG D Y, GUO L, WANG Q, et al. An improved single-orbit scheduling method for agile imaging satellite towards area target[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(8): 901-905.
- [32] JI H R, HUANG D. A mission planning method for multi-satellite wide area observation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(6): 1-9.
- [33] XU Y J, LIU X L, HE R J, et al. Multi-objective satellite scheduling approach for very large areal observation[C]// 2nd International Conference on Artificial Intelligence Applications and Technologies, Shanghai, 2018.
- [34] CHEN Y X, XU M Z, SHEN X, et al. A multi-objective modeling method of multi-satellite imaging task planning for large regional mapping[J]. Remote Sensing, 2020, 12(3): 344.
- [35] ZHU W M, HU X X, XIA W, et al. A three-phase solution method for the scheduling problem of using earth observation satellites to observe polygon requests[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 130: 97-107.
- [36] ZHU W M, HU X X, XIA W, et al. A two-phase genetic annealing method for integrated earth observation satellite scheduling problems[J]. Soft Computing, 2019, 23(1): 181-196.
- [37] HU X X, ZHU W M, AN B, et al. A branch and price algorithm for EOS constellation imaging and downloading integrated scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2019, 104: 74-89.
- [38] 许语拉, 徐培德, 王慧林, 等. 基于团划分的成像侦察任务聚类方法研究[J]. 运筹与管理, 2010, 9(4): 143-149.  
XU Y L, XU P D, WANG H L, et al. Clustering of imaging reconnaissance tasks based on clique partition[J]. Operations Research and Management Science, 2010, 9(4): 143-149.
- [39] 许语拉. 卫星成像侦察任务聚类方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
XU Y L. Research on clustering of satellite imaging reconnaissance tasks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [40] 郝会成. 敏捷卫星任务规划问题建模及求解方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
HAO H C. Research on mission planning problem modeling and solving method of agile earth observation satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [41] 郭雷. 敏捷卫星调度问题关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.  
GUO L. Research on key problems of agile satellite imaging scheduling problem[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [42] WANG J J, ZHU X M, QIU D S, et al. Dynamic scheduling for emergency tasks on distributed imaging satellites with task merging[J]. Parallel & Distributed Systems IEEE Transactions on, 2014, 25(9): 2275-2285.
- [43] 潘耀, 饶启龙, 池忠明, 等. 改进的遥感卫星成像任务单轨最优团划分聚类方法[J]. 上海航天, 2018, 35(3): 34-40.  
PAN Y, RAO Q L, CHI Z M, et al. Improved clustering method of spot target based on best clique partition in single orbit for remote sensing satellite imaging[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(3): 34-40.
- [44] 张铭. 对地观测卫星任务调度技术研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.  
ZHANG M. Research on mission scheduling technology of earth observation satellites[D]. Zhengzhou: Strategic Support Force Information Engineering University, 2018.
- [45] 张铭, 王晋东, 卫波. 基于改进烟花算法的密集任务成像卫星调度方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2712-2719.  
ZHANG M, WANG J D, WEI B. Satellite scheduling method for intensive tasks based on improved fireworks algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(9): 2712-2719.
- [46] 白保存. 考虑任务合成的成像卫星调度模型与优化算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
BAI B C. Modeling and optimization algorithms for imaging satellites scheduling problem with task merging[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [47] 白保存, 慈元卓, 陈英武. 基于动态任务合成的多星观测调度方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2646-2649.  
BAI B C, CI Y Z, CHEN Y W. Dynamic task merging in multi-satellites observing scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(9): 2646-2649.
- [48] 白保存, 陈英武, 贺仁杰, 等. 基于分解优化的多星合成观测调度算法[J]. 自动化学报, 2009, 35(5): 596-604.  
BAI B C, CHEN Y W, HE R J, et al. Scheduling satellites observation and task merging based on decomposition optimization algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(5): 596-604.
- [49] 白保存, 贺仁杰, 李菊芳, 等. 卫星单轨任务合成观测问题及其动态规划算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1738-1742.  
BAI B C, HE R J, LI J F, et al. Satellite orbit task merging problem and its dynamic programming algorithm[J]. Systems

- Engineering and Electronics, 2009, 31(7): 1738- 1742.
- [50] 白保存, 徐一帆, 贺仁杰, 等. 卫星合成观测调度的最大覆盖模型及算法研究 [J]. 系统工程学报, 2010, 25(5): 651- 658.  
BAI B C, XU Y F, HE R J, et al. Maximum coverage model and algorithm for satellite scheduling observation with task merging[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(5): 651- 658.
- [51] 邱涤珊, 王建江, 吴朝波, 等. 基于任务合成的对地观测卫星应急调度方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1430- 1437.  
QIU D S, WANG J J, WU C B, et al. Emergency scheduling method of earth observation satellites based on task merging [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(7): 1430- 1437.
- [52] 蒋晓. 单成像卫星的需求分析与融合技术研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.  
JIANG X. Requirement analysis and fusion technology research of single imaging satellite[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [53] 王钧. 成像卫星综合任务调度模型与优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.  
WANG J. Research on modeling and optimization techniques in united mission scheduling of imaging satellites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [54] GABREL V, MURAT C. Mathematical programming for earth observation satellite mission planning[J]. Operations Research in Space and Air, 2003, 79: 103- 122.
- [55] LIN W C, LIAO D Y, LIU C Y, et al. Daily imaging scheduling of an earth observation satellite[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans, 2005, 35(2): 213- 223.
- [56] LIAO D Y, YANG Y T. Imaging order scheduling of an earth observation satellite[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2007, 37(5): 794- 802.
- [57] JANG J, CHOI J, BAE H J, et al. Image collection planning for Korea multi- purpose SATellite- 2[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 230(1): 190- 199.
- [58] WANG J J, DEMEULEMEESTER E, QIU D S. A pure proactive scheduling algorithm for multiple earth observation satellites under uncertainties of clouds[J]. Computers & Operations Research, 2016, 74(11): 1- 13.
- [59] WANG P, REINELT G. A heuristic for an earth observing satellite constellation scheduling problem with download considerations[J]. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 2010, 36: 711- 718.
- [60] WANG P, TAN Y J. A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(2): 322- 335.
- [61] XU R, CHEN H P, LIANG X L, et al. Priority- based constructive algorithms for scheduling agile earth observation satellites with total priority maximization[J]. Expert Systems with Application, 2016, 51(6): 195- 206.
- [62] CHEN X Y, REINELT G, DAI G M, et al. A mixed integer linear programming model for multi- satellite scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275(2): 694- 707.
- [63] CHEN X Y, REINELT, DAI G M, et al. Priority- based and conflict- avoidance heuristics for multi- satellite scheduling [J]. Applied Soft Computing, 2018, 69: 177- 191.
- [64] XIE P, WANG H, CHEN Y N, et al. A heuristic algorithm based on temporal conflict network for agile earth observing satellite scheduling problem[J]. IEEE Access, 2019, 7: 61024- 61033.
- [65] WU G H, LIU J, MA M H, et al. A two- phase scheduling method with the consideration of task clustering for earth observing satellites[J]. Computers & operations research, 2013, 40(7): 1884- 1894.
- [66] GUO H, QIU D S, WU G H, et al. Tasks scheduling method for an agile imaging satellite based on improved ant colony algorithm[J]. System Engineering Theory and Practice, 2012, 32(11): 2533- 2539.
- [67] 邱涤珊, 郭浩, 贺川, 等. 敏捷成像卫星多星密集任务调度方法 [J]. 航空学报, 2013, 34(4): 882- 889.  
QIU D S, GUO H, HE C, et al. Intensive task scheduling method for multi- agile imaging satellites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(4): 882- 889.
- [68] 靳鹏, 余堃. 卫星目标资源综合优化调度仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2018, 35(2): 16- 21.  
JIN P, YU K. Simulation study on integrated scheduling of satellite target resources[J]. Computer Simulation, 2018, 35(2): 16- 21.
- [69] SUN B L, WANG W X, XIE X, et al. Satellite mission scheduling based on genetic algorithm[J]. Kybernetes, 2010, 39(8): 1255- 1261.



- [70] ZHENG Z X, GUO J, GILL E. Swarm satellite mission scheduling & planning using hybrid dynamic mutation genetic algorithm[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137: 243-253.
- [71] WU K, ZHANG D X, CHEN Z H, et al. Multi-type multi-objective imaging scheduling method based on improved NS-GA- for satellite formation system[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2551-2565.
- [72] HE R J, GAO P, BAI B C, et al. Models, algorithms and applications to the mission planning system of imaging satellites [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2011, 31(3): 411-422.
- [73] WU G H, WANG H L, PEDRV CZ W, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 113(11): 576-588.
- [74] HE L, LIU X L, LAPORTE G, et al. An improved adaptive large neighborhood search algorithm for multiple agile satellites scheduling[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 100(DEC.): 12-25.
- [75] BIANCHESSI N, CORDEAU J F, DESROSIERS J, et al. A heuristic for the multi-satellite, multi-orbit and multi-user management of Earth observation satellites[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 750-762.
- [76] HABET D, VASQUEZ M, VIMONT Y. Bounding the optimum for the problem of scheduling the photographs of an agile earth observing satellite[J]. *Computational Optimization & Applications*, 2010, 47(2): 307-333.
- [77] SARKHEYL A, BAGHERI A, GHORBANI- VAGHEI B, et al. Using an effective tabu search in interactive resources scheduling problem for LEO satellites missions[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2013, 29(1): 287-295.
- [78] 慈元卓, 贺仁杰, 徐一帆, 等. 卫星搜索移动目标问题中的目标运动预测方法研究 [J]. *控制与决策*, 2009, 24(7): 1007-1012.  
CI Y Z, HE R J, XU Y F, et al. Method of target motion prediction for moving target search by satellite[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(7): 1007-1012.
- [79] 井亮. 基于视觉图像的移动目标跟踪技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
JING L. Research on the technology of moving object tracking based on visual image[D]. Naging: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [80] 谢彬, 张琨, 张云纯, 等. 基于轨迹相似度的移动目标轨迹预测算法 [J]. *计算机工程*, 2018, 44(9): 177-183.  
XIE B, ZHANG K, ZHANG Y C, et al. Trajectory prediction algorithm for mobile target based on trajectory similarity[J]. *Computer Engineering*, 2018, 44(9): 177-183.
- [81] 王家威. 基于图像处理的移动目标识别与轨迹预测的研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
WANG J W. Research of moving target recognition and trajectory prediction based on image processing[D]. Xuzhou: China University of Mining, 2019.
- [82] 胡玉可, 夏维, 胡笑旋, 等. 基于循环神经网络的船舶航迹预测 [J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(4): 871-877.  
HU Y K, XIA W, HU X X, et al. Vessel trajectory prediction based on recurrent neural network[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(4): 871-877.
- [83] 徐一帆, 谭跃进, 贺仁杰, 等. 海洋移动目标多模型运动预测方法[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(3): 22-27.  
XU Y F, TAN Y J, HE R J, et al. Multi-model prediction for maritime moving target motion[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(3): 22-27.
- [84] BERRY P E, FOGG D A B, PONTECORVO C. GAMBIT: gauss- markov and bayesian inference technique for information uncertainty and decision making in surveillance simulations[R]. DSTO, Edinburgh, South Australia: [publisher unknown], 2003.
- [85] 慈元卓, 徐一帆, 谭跃进, 等. 卫星对海洋移动目标搜索的几种算法比较研究 [J]. *兵工学报*, 2009, 30(1): 119-125.  
CI Y Z, XU Y F, TAN Y J, et al. Comparison of several algorithms for maritime moving target search by satellite[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(1): 119-125.
- [86] 慈元卓. 面向移动目标搜索的多星任务规划问题研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.  
CI Y Z. Multi-satellite mission planning for moving target search[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [87] 梅关林, 冉晓旻, 范亮, 等. 面向移动目标的卫星传感器调度技术研究 [J]. *信息工程大学学报*, 2016, 17(5): 513-517.  
MEI G L, RAN X M, FAN L, et al. Research on satellite sensor scheduling technology for moving target[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2016, 17(5): 513-517.
- [88] 梁星星. 面向海上移动目标跟踪观测的空天协同任务规划研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.  
LIANG X X. Research on aerospace cooperative mission planning for continuation observation of maritime moving targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology

- gy, 2016.
- [89] 梁星星, 修保新, 范长俊, 等. 面向海上移动目标的空天协同连续观测模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(1): 229-240.  
LIANG X X, XIU B X, FAN C J, et al. The aerospace cooperative planning model for maritime moving target continuation observation[J]. Systems Engineering- Theory & Practice, 2018, 38(1): 229-240.
- [90] 张海龙. 多障碍物海面移动目标多星协同搜索方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
ZHANG H L. Research on multi-satellite cooperative search method for moving target on multi-obstacle sea[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [91] 张海龙, 夏维, 胡笑旋, 等. 面向多障碍物海面卫星搜索目标方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(10): 105-111.  
ZHANG H L, XIA W, HU X X, et al. Method for moving targets search by satellites on multi-obstacle sea[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(10): 105-111.
- [92] 张利宁, 黄小军, 邱涤珊, 等. 对地观测卫星任务规划的启发式动态调整算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(30): 241-245.  
ZHANG L N, HUANG X J, QIU D S, et al. Heuristic dynamic adjust of task scheduling for earth observing satellite[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(30): 241-245.
- [93] 刘勇. 天文卫星机遇目标任务重规划方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.  
LIU Y. Research on astronomical satellite target of opportunity task re-planning algorithm[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences University, 2019.
- [94] WANG J J, ZHU X M, ANG L T, et al. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites[J]. Journal of Computer & System Sciences, 2015, 81(1): 110-124.
- [95] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 一类多卫星动态调度问题的建模与求解方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2696-2699.  
LIU Y, CHEN Y W, TAN Y J. Modeling and solution of the problem of multi-satellites dynamic scheduling[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(12): 2696-2699.
- [96] WU G H, MA M H, ZHU J H, et al. Multi-satellite observation integrated scheduling method oriented to emergency tasks and common tasks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(5): 723-733.
- [97] 郭超, 熊伟, 刘呈祥. 基于优先级与时间裕度的卫星应急观测任务规划[J]. 电讯技术, 2016, 56(7): 744-749.  
GUO C, XIONG W, LIU C X. Mission planning of satellite emergency observations based on priority and time margin degree[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(7): 744-749.
- [98] ZHAI X J, NIU X N, TANG H, et al. Robust satellite scheduling approach for dynamic emergency tasks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1-20.
- [99] HE C, ZHU X M, GUO H, et al. Rolling-horizon scheduling for energy constrained distributed real-time embedded systems[J]. Journal of Systems & Software, 2012, 85(4): 780-794.
- [100] QIU D S, HE C, LIU J, et al. A dynamic scheduling method of earth-observing satellites by employing rolling horizon strategy[J]. The Scientific World Journal, 2013: 1-11.
- [101] 王超超. 成像卫星应急调度问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
WANG C C. Research on imaging satellite emergency scheduling problem[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [102] 靳鹏, 王超超, 夏维, 等. 考虑卫星指令上注的两阶段应急任务规划[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(4): 115-123.  
JIN P, WANG C C, XIA W, et al. Two-phase emergency mission planning with satellite instruction release[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(4): 115-123.
- [103] SUN H Q, XIA W, HU X X, et al. Earth observation satellite scheduling for emergency tasks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(5): 931-945.
- 胡笑旋 (1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为卫星调度与无人机任务规划。  
王执龙 (1993-), 男, 学士, 主要研究方向为卫星调度与人工智能。本文通信作者。  
夏维 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星智能调度与控制。  
靳鹏 (1969-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星任务筹划与调度。  
王云辉 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星调度与效能评估。