

应急观测星座优化设计：ATK 二次开发技术的应用

李明铭^{1,2}, 郭帅^{1,2*}, 朱阅誥^{1,2}, 梁彦刚^{1,2}, 董敏^{1,2}, 徐小生^{1,2}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 太空系统运行与控制全国重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要:受卫星数量、规模及机动能力等限制, 现有对地观测星座难以快速响应随机性较强的应急需求。为满足应急对地观测星座快速设计需求, 提出一种应急对地观测星座设计方法。该方法基于航天任务工具箱(aerospace tool kit, ATK)二次开发与覆盖分析功能, 采用一维数据层次聚类方法分组地面目标, 再针对目标分组应用差分进化算法优化限制性 Walker 子星座构型, 最终生成限制性混合 Walker 对地观测星座。仿真结果证明, 相比于常规 Walker 星座以及暴力优化结果, 该方法能迅速生成应急星座, 在保证有效完成对地观测任务前提下减小卫星使用量。

关键词: ATK; 二次开发; 星座设计; 应急对地观测

中图分类号: V448.2 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2025)04-042-10



论文
拓展

Optimization design of emergency observation constellation: application of ATK secondary development technology

LI Mingming^{1,2}, GUO Shuai^{1,2*}, ZHU Yuehe^{1,2}, LIANG Yangang^{1,2}, DONG Min^{1,2}, XU Xiaosheng^{1,2}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Space System Operation and Control, Changsha 410073, China)

Abstract: Due to the limitations of the number of satellites, scale and manoeuvrability, it is difficult for the existing earth observation constellations to respond quickly to emergency needs of a high degree of randomness. In order to meet the demand for rapid design of emergency earth observation constellations, an emergency earth observation constellation design method was proposed. Based on the secondary development and coverage analysis function of the ATK (aerospace tool kit), a one-dimensional data hierarchical clustering method was adopted to group ground targets, and then the differential evolution algorithm was applied to optimize the restricted Walker subconstellation configuration for the target groups, and finally the restricted hybrid Walker earth observation constellation was generated. Simulation results demonstrate that the method can rapidly generate emergency constellations compared with conventional Walker constellations and violent optimisation results, and minimize satellite deployment quantity while ensuring the effective completion of the earth observation mission.

Keywords: ATK; secondary development; constellation design; emergency earth observation

对地观测卫星搭载成像敏感器能够获得地面影像信息, 具有工作时长、观测范围大等优点, 被广泛运用于区域冲突、事故搜救等多个领域。然而单星对地覆盖能力往往无法满足观测需求, 胡佳鑫^[1]也指出我国现有空间资源规模与数量仍不足, 难以快速响应突发对地观测需求。因此结合地面目标分布情况, 快速构建小型对地观测星座系统对满足指定目标的观测需求具有重要

意义。

经典星座设计方法如 Walker 星座设计方法^[2]、花星座设计方法^[3]等具有良好的覆盖特性以及结构稳定性。Ulybyshev^[4]以卫星升交点赤经 Ω 和纬度辐角 u 构造二维图, 提出一种覆盖分析方法为星座设计提供思路。Lee 等^[5]提出一种能满足复杂区域覆盖需求的半解析星座设计方法。龚宇鹏等^[6]提出一种基于覆盖带理论的构

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12402421); 湖南省自然科学基金资助项目(2025JJ60056)

第一作者: 李明铭(2001—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, E-mail: 1142087277@qq.com

*通信作者: 郭帅(1991—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 博士, E-mail: guoshuai14@nudt.edu.cn

引用格式: 李明铭, 郭帅, 朱阅誥, 等. 应急观测星座优化设计: ATK 二次开发技术的应用[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(4): 42-51.

Citation: LI M M, GUO S, ZHU Y H, et al. Optimization design of emergency observation constellation; application of ATK secondary development technology[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(4): 42-51.

型设计方法,满足了偶数覆盖重数的构型设计需求。贺波勇等^[7]以星座全球覆盖率、区域详查时间分辨率等为优化指标构建了对地协同观测混合星座。肖广翰等^[8]提出一种基于大角度探测范围的偶数重连续覆盖星座设计方法,既能解决高、中、低轨空间目标偶数重连续覆盖,也适用于任意纬度地面目标偶数重连续覆盖问题。乔鹏昊等^[9]针对通信卫星对多个地面目标的连续覆盖问题,提出一种基于“上层+下层”两级优化的多目标覆盖卫星星座优化设计方案,避免了较多分散地面目标导致优化结果出现局部最优的情况。胡伟等^[10]面对大范围连续导航需求,使用体系工具箱(systems tool kit, STK)的 Coverage 模块研究全球导航星座部署。以上方法仅考虑连续覆盖问题,存在无法满足某些分散目标观测需求的可能。因此,Savitri 等^[11]结合半解析生成初始值的方式,采用遗传算法优化轨道根数,提高了小规模对地观测星座对区域目标覆盖率与重访性能。Zhang 等^[12]基于提出的限制性 Flower 星座和限制性 Walker 星座两种星座设计概念,提出一种针对区域非连续覆盖的受限星座设计方法。李胜西等^[13]基于限制性 Walker 星座概念,提出一种限制性 Walker 星座设计方法,能生成具有更强快速重访能力的稀疏星座。Mencarelli 等^[14]提出了启发式算法,为不连续覆盖星座设计问题寻找可行解。丁冬等^[15]基于导弹预警需求,采用 STK 的二次开发功能,提出并评估了不同预警星座构型的作战效能。以上星座设计与部署方法仅关注非突发事件的常规需求,然而公共安全事件响应、自然灾害监控等突发需求受到现有观测卫星数量与机动能力的限制不能被快速且高质量满足。此外,随着快响技术发展,卫星制造和发射成本不断降低,部署入轨所需时间也将显著减少,应用库存卫星快速搭建小规模应急对地观测星座将具备可行性。因此,有必要研究一种面向突发任务的应急对地观测星座快速设计方法,通过快速生成低成本观测星座完成侦察监视任务,改善对地观测资源无法满足突发需求的现状。

上述部分研究依赖于国外系列航天任务仿真分析商业软件,罗亚中等^[16]指出国外一系列商用航天软件对我国用户多有限制,采用国外软件展开研究容易受到国外对我国实施的技术封锁。国防科技大学载人航天技术团队开发了航天任务工具箱(aerospace tool kit, ATK),覆盖航天任务分析与设计的基本功能,可用于开展航天任务分析相关研究^[17]。王华等^[18]采用 C++ 语言实现了

通用软件 ATK 的 Planning 模块,使轨道机动规划可以采用通用软件 ATK 求解,张赛等^[19]基于 ATK 研究了一种航天器受控绕飞轨迹设计及规划方法,解决了空间在轨服务需求问题。

因此,本文面向应急对地观测星座快速生成需求,应用 ATK 二次开发模块与覆盖分析模块,先对地面目标进行聚类,然后针对目标聚类分别优化观测子星座,最终生成应急观测星座。

1 应急对地观测星座优化模型

1.1 模型假设

应急对地观测需求发生地点具有随机性,现有空间资源存在无法响应所有需求的可能。因此本文面向多地突发应急需求,研究一种应急观测星座快速设计方法,使用少量卫星监视所有目标。基于上述场景,做出以下假设:

- 1) 不考虑卫星机动;
- 2) 卫星轨道偏心率为 0;
- 3) 卫星为轨道高度相同的低轨卫星;
- 4) 采用高精度轨道预报(high precision orbit propagator, HPOP)模型。

1.2 对地观测星座优化模型

本文所提小规模应急对地观测星座要求用最少数量的卫星满足对指定目标集合的重访覆盖需求,因此可以将目标函数与约束条件分别设置如下:

$$\min S \quad (1)$$

$$T_k < T_k^{\max} \quad k = 1, \dots, n \quad (2)$$

式中, S 为卫星使用数量, k 为地面目标编号, n 为目标数量, T_k 为对 k 号目标最大重访时间, T_k^{\max} 为对目标的最大重访时间上限。

由于星座中卫星的位置与周期决定了覆盖性能,因此可将卫星的轨道根数,即半长轴 a 、偏心率 e 、轨道倾角 i 、近地点辐角 ω 、升交点赤经 Ω 、真近点角 f 作为决策变量,采用优化算法开展暴力优化。然而,即使设置卫星偏心率为 0、近地点辐角为 0° ,轨道高度设置为约束上限,优化算法仍要确定每颗卫星的轨道倾角、升交点赤经以及真近点角。因此,随着卫星数量的增加,决策变量将线性增加导致解的搜索空间急速扩大,暴力优化方法容易陷入局部最优解。

Walker 星座能用构型参数和种子卫星的轨道根数等参数描述,达到显著减小决策变量,便于寻优算法求解的效果。但是,若直接优化一个 Walker 星座作为应急对地观测星座,则 Walker 星座均匀分布的特性将致使部分卫星观测能力被浪

费。所以本文基于限制性 Walker 星座概念,将对地观测星座拆分为 J 个轨道倾角范围受限的 Walker 子星座,对各个子星座分别开展优化。对 j 号子星座,给定其种子卫星半长轴 a_j ,设定偏心率 e_j 为 0、近地点辐角 ω_j 为 0° ,则 j 号子星座的决策变量如下:

$$\begin{cases} N_j & N_j = 1, 2, 3, \dots \\ P_j & P_j = 1, 2, 3, \dots \\ i_j & \varphi_j^{\min} \leq |i_j| \leq \varphi_j^{\max} \\ \Omega_j & 0^\circ \leq \Omega_j \leq 360^\circ \\ f_j & 0^\circ \leq f_j \leq 360^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_j 为 j 号子星座的数量; P_j 为 j 号子星座面数,是 N_j 的一个因数; i_j 为 j 号子星座种子卫星轨道倾角; φ_j^{\min} 为 j 号子星座对应目标分组中地面站的最小纬度绝对值; φ_j^{\max} 为 j 号子星座对应目标分组中地面站纬度绝对值的最大值; Ω_j 为 j 号子星座种子卫星升交点赤经; f_j 为 j 号子星座种子卫星真近点角。

1.3 卫星对地覆盖分析模型

卫星对地覆盖计算需要明确卫星搭载传感器视场的大小与形状,典型视场包括圆锥视场和矩形视场。此外,视场摆动也是影响卫星对地覆盖分析的重要因素。为简化问题,本文将视场摆动的过程等效为一个矩形对地覆盖视场,如图 1 所示,当目标在卫星视场内可认为目标已被观测,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} \delta_H \leq \theta_H \\ \delta_V \leq \theta_V \end{cases} \quad (4)$$

式中: θ_V 为矩形视场的垂直半锥角; θ_H 为矩形视场的水平半锥角; δ_V 为卫星与目标连线矢量垂直夹角; δ_H 为卫星与目标连线矢量水平夹角。

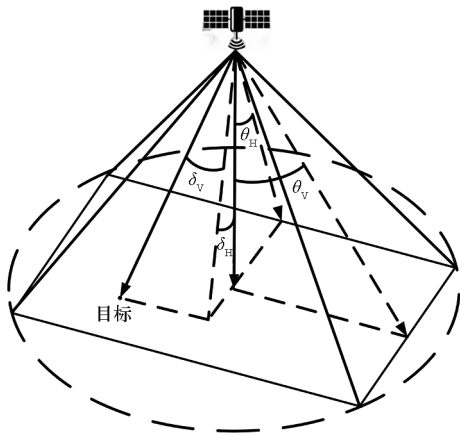


图 1 矩形视场对地覆盖模型

Fig. 1 Rectangular field of view ground coverage model

在前述覆盖模型基础上,统计卫星对目标覆

盖时长、次数等不同参数,可以计算不同覆盖品质参数对卫星覆盖性能进行多方面分析。本文以对目标的**最大重访时间**作为约束,具体公式如下:

$$T_k = \max(t_2 - t_1, \dots, t_M - t_{M-1}) \quad k = 1, \dots, n \quad (5)$$

式中, M 为 k 号目标被观测总次数, t_M 为第 M 次对 k 号目标观测时刻。

2 应急对地观测星座设计方法

对地观测星座构型直接影响其覆盖性能,设计合理星座能在保持对地覆盖性能前提下减少部署卫星数量。传统星座设计需要建立复杂覆盖观测与评价模型,增加了问题难度。通用软件 ATK 的覆盖性分析模块与二次开发模块支持脚本调用软件开展卫星对地覆盖分析,跳过了复杂的覆盖分析建模环节,可显著减小覆盖分析工作量。因此,本文参考 ATK 技术手册^[20],采用 Connect 模式驱动 ATK 软件,调用其覆盖分析模块计算卫星对地面目标覆盖性能,生成各项覆盖品质参数报告,然后以生成的报告数据为依据对星座构型进行优化,最终搭建小规模应急对地观测星座,在完成对地覆盖任务的同时最小化使用卫星数量。

2.1 基于 ATK 二次开发的覆盖分析

ATK 覆盖性分析工具是用于计算想定对象对地面或空间目标覆盖性能的软件工具,支持计算和可视化展示卫星、地面站、传感器等对象的覆盖区域并通过定义不同品质参数如覆盖时间、覆盖间隙等,获得想定对象对特定区域或目标的量化覆盖性能。

虽然覆盖分析模块允许用户计算当前约束下对象间的覆盖关系,输出覆盖效果的数据与图像报告。但上述操作需要在界面上手动进行,无法满足优化过程中的高速迭代需求。ATK 二次开发模块提供了 Connect 模式、MBSE (model-based systems engineering) 模式、Component 模式三种方式对 ATK 进行操作,支持用户使用不同编程语言调用 ATK,满足优化的高速迭代需求。

本文采用 Connect 模式,以编写 C++ 语言脚本发送命令的方式连接 ATK 软件,构造如图 2 所示包括对地观测卫星、传感器、地面站目标以及覆盖品质参数的覆盖分析场景,能够添加对地观测卫星、配置星上传感器搭建应急对地观测星座,添加待观测地面站目标构造完整对地覆盖任务场景,可以基于已有覆盖品质参数仿真分析观测星座对地面目标的覆盖性能,获取数据报告与相应图像支持星座构型优化。

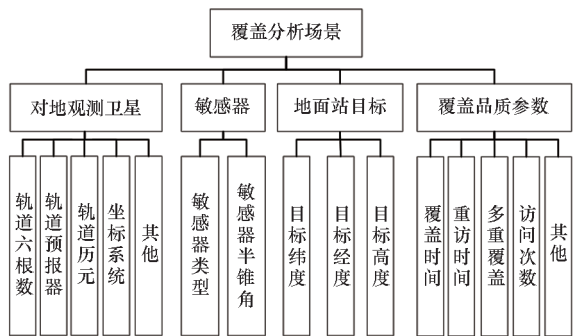


图 2 ATK 覆盖分析场景结构

Fig. 2 Structure of the ATK coverage analysis scenario

2.2 限制性混合 Walker 星座设计方法

基于第 1 节所建对地观测星座优化模型,本

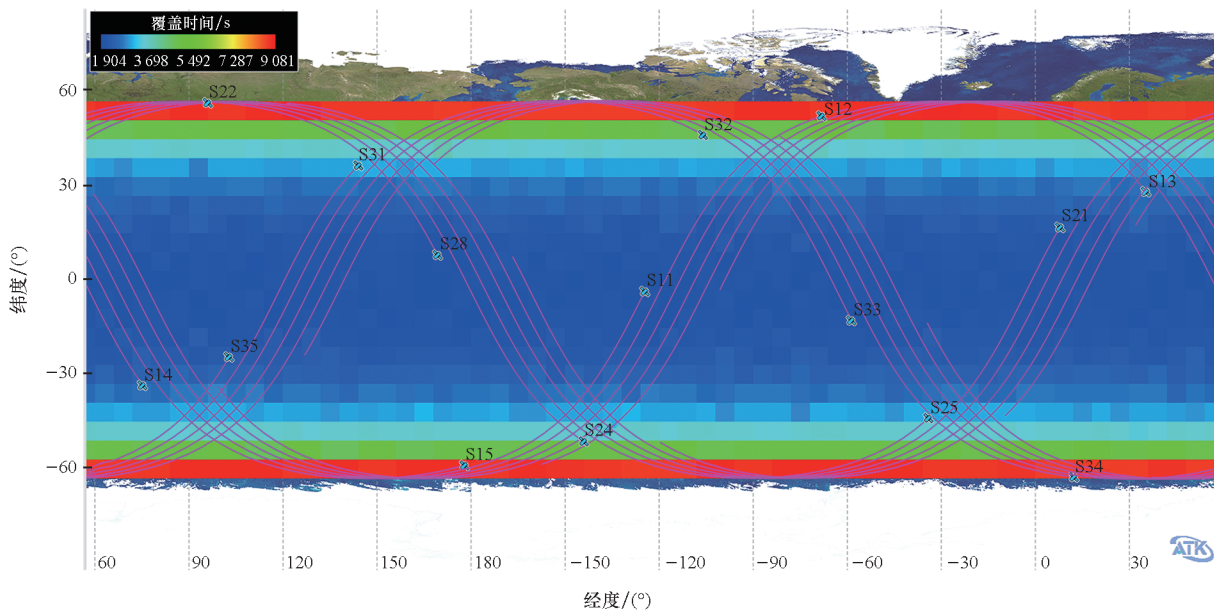


图 3 Walker 星座覆盖时间热力图

Fig. 3 Coverage time heat map of Walker constellation

由于层次聚类方法能够将集中数据按照相似度逐步合并或分割,无须指定聚类数量而是生成聚类树反映数据之间的层次关系。因此本文采用一维数据层次聚类方法对地面目标纬度绝对值集合进行聚类,并依据聚类树所反映层次关系划分若干待观测目标分组。

首先构造地面站纬度绝对值数据集 $D = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$, 其中 φ_n 为 n 号目标的纬度绝对值。

而后初始化簇节点,将每个纬度绝对值数据点视为一个单独簇 $C_i = \{\varphi_i\}$, 则此时共存在 n 个簇。然后采用如下所示平均距离度量计算簇两两之间的距离。

$$d(C_i, C_j) = \frac{1}{|C_i| \cdot |C_j|} \sum_{\varphi_x \in C_i, \varphi_y \in C_j} \|\varphi_x - \varphi_y\| \quad (6)$$

文首先采用一维数据层次聚类法将地面目标分为若干目标分组,然后按顺序应用文献[21]所提差分进化(differential evolution, DE)算法求解对地观测子星座优化模型,逐步满足星座对每个目标分组的覆盖要求。

2.2.1 基于层次聚类的地面目标分组方法

如图 3 所示, Walker 星座由于其均匀对称构型,对其覆盖范围内目标的覆盖时间随地理纬度不均匀对称分布,呈现低纬度覆盖时间短,高纬度覆盖时间相对长的特点。基于该特性,本文将地面目标按照其纬度绝对值聚类为若干类,然后设计同等数量的限制性 Walker 子星座协同对地观测,针对性地满足对地目标覆盖要求。

接着选择簇间距离最近的两个簇 C_i, C_j 合并为新簇 $C_k = C_i \cup C_j$ 。最后重复上述步骤直至所有数据点合并为一个簇,形成树状聚类结果。

2.2.2 基于 ATK 二次开发的限制性混合 Walker 星座优化算法

在地面目标完成聚类后,采用 DE 算法对地面目标分组按纬度绝对值由高到低的顺序依次开展各子星座的迭代优化,具体步骤如图 4 所示。

步骤 1: 依据 ATK 二次开发手册配置 Connect 环境,实现 C++ 链接 ATK。

步骤 2: 调用二次开发命令载入空白想定并配置待观测地面目标。

步骤 3: 采用一维数据层次聚类方法将待观测地面目标分为若干待观测目标分组。

步骤 4: 根据目标分组纬度绝对值大小,由高到低依次添加目标分组并给定对应子星座数量

初值。

步骤 5: 调用命令配置已有卫星与待观测地面目标覆盖关系。

步骤 6: 利用 DE 算法以本轮子星座轨道面数量与种子卫星轨道倾角、升交点赤经、真近点角以及以往各子星座种子卫星真近点角为决策变量,以最小各目标最大重访时间为指标展开优化直至收敛。

步骤 7: 依据优化算法生成的决策变量配置卫星于 ATK 想定中。

步骤 8: 通过命令计算本轮生成子星座与已有子星座对待观测目标组覆盖性能,判断是否满足最大重访时间约束,若不满足则增加一颗卫星并返回步骤 5 重新配置卫星与目标的覆盖关系并再次优化,若满足则进入步骤 9。

步骤 9: 当上述过程收敛后,判断是否添加完所有目标分组,若未添加完则返回步骤 4,若已添加完毕,则输出限制性混合 Walker 星座。

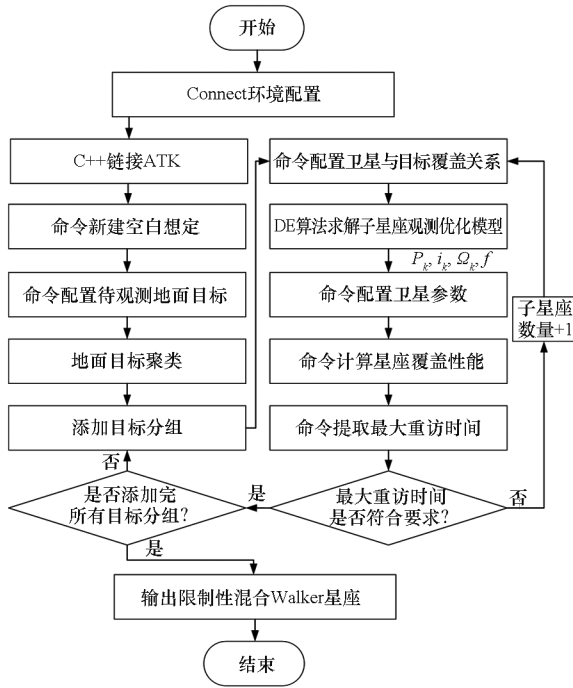


图 4 限制性混合 Walker 星座设计流程
Fig. 4 Design flow of restricted hybrid Walker constellation

值得注意的是,设计方法最终目标虽为最小化卫星数量,但步骤 6 是以对地面目标最大重访时间作为目标函数,原因在于不同卫星数量都对应无数星座可能,优化算法无法直接判断所提方法在该卫星数量约束下能否生成满足约束的星座。该步骤详细流程如图 5 所示,首先由 DE 算法生成初始决策变量包括当前子星座轨道面数量与种子卫星轨道倾角、升交点赤经、真近点角以及

前述已优化过的子星座种子卫星真近点角,而后通过命令在 ATK 想定中配置卫星轨道根数,再经由命令计算星座对待观测目标的覆盖性能并提取其中最大重访时间,然后判断此时是否收敛,如果不收敛则将该值作为 DE 算法的目标函数值作为反馈,继续优化,若已收敛则输出当前最优决策变量。

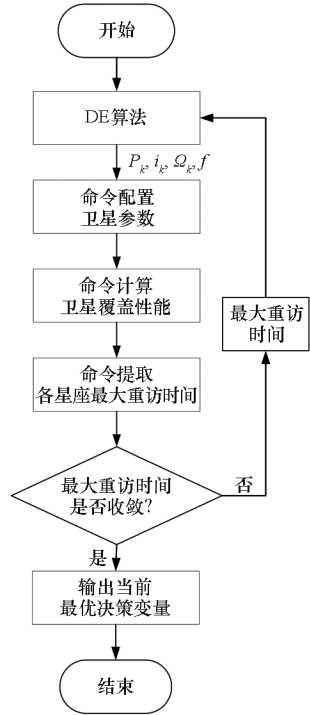


图 5 DE 优化流程
Fig. 5 DE optimization flow

3 系统效能仿真

为验证所提方法先进性,本节将所提方法与直接优化所有卫星轨道根数的暴力优化方法和仅优化一个 Walker 星座构型的单 Walker 星座设计方法作为对比。仿真结果证明限制性混合星座设计方法不仅能使用更少的卫星达到相同重访覆盖效果且算法耗时相对更少。仿真实验环境为 Intel(R) Core(TM) i7 - 10700 CPU @ 2.90 GHz, ATK 版本 v3.0.0.3.1220,在 Visual Studio 2015 采用 C++ 实现编程。

3.1 场景参数设定

本次仿真设定场景时间为 2025 - 01 - 01T00:00:00至 2025 - 01 - 04T00:00:00,共持续3 d。由脚本随机在大陆内部生成 40 个待观测地面目标经纬度,并经由 Connect 模块链接 ATK,将生成的目标经纬度以地面站对象形式配置于 ATK 想定,所有目标观测过程均需满足 6 h 即 21 600 s

的最大重访时间约束。卫星轨道高度参考我国现有低轨对地观测卫星高度^[22]均设为 500 km,携带敏感器视场采用 ATK 默认的矩形视场,矩形视场的垂直、水平半锥角均默认为 45°。

3.2 地面站聚类结果

对生成地面站目标在纬度方向上开展层次聚类,得到如图 6 所示层次聚类树状图,可以发现将该 40 个地面站分为两个目标分组是合适的。

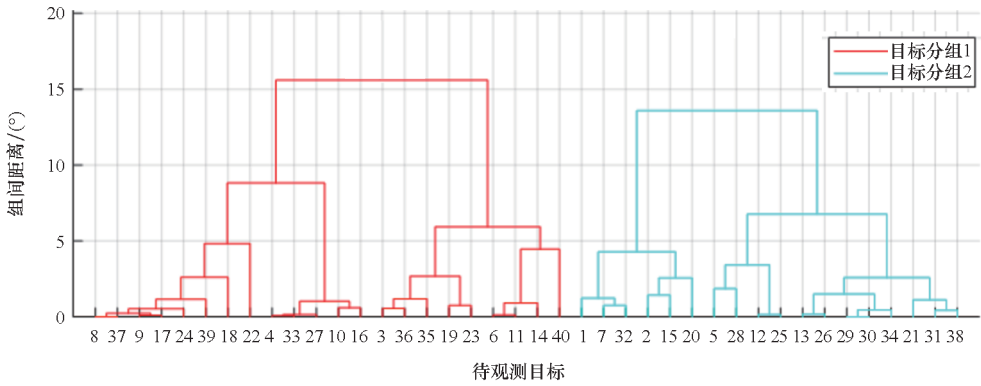


图 6 地面站层次聚类树状图

Fig.6 Hierarchical clustering dendrogram of facility

然后在 ATK 中将所有地面站目标按照图 6 所示分类进行分组,使用 Connect 模块链接 ATK 设置不同组中地面站标签颜色,得到如图 7 所示二维图。

3.3 星座优化结果

3.3.1 限制性混合 Walker 星座优化结果

采用本文所提方法得到限制性混合 Walker 星座卫星轨道根数具体如表 1 所示,需 2 个子星座共 7 颗卫星,然后通过二次开发命令将所得卫星轨道根数配置于 ATK 想定中。而在 ATK 中配置好卫星对地面目标覆盖关系,并选定合适覆盖品质参数开始计算后,可得到如图 8 所示覆盖时间热力图。由图中结果可发现,所提方法构造两层限制性 Walker 星座,在控制决策变量不明显增加前提下解决了单 Walker 星座优化方法覆盖性能分布不均匀的缺点,使得高纬度目标观测任务由子星座 1 单独完成,中低纬度目标观测任务由

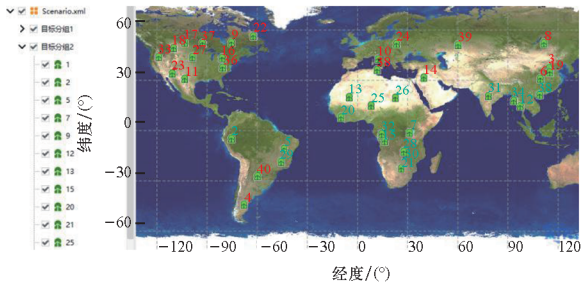


图 7 地面目标聚类二维显示

Fig.7 Two-dimensional display of ground target clustering

表 1 限制性混合 Walker 星座轨道根数

Tab.1 Orbital elements of restricted hybrid Walker constellation

星座编号	卫星编号	a/m	e	$i/(^{\circ})$	$\Omega/(^{\circ})$	$\omega/(^{\circ})$	$f/(^{\circ})$
子星座 1	S1	6 878 137	0	54.366 594	25.479 001 0	0	216.845 900
	S2	6 878 137	0	54.366 594	115.479 001 0	0	306.845 900
	S3	6 878 137	0	54.366 594	205.479 001 0	0	36.845 922
	S4	6 878 137	0	54.366 594	295.479 001 0	0	126.845 922
子星座 2	S5	6 878 137	0	158.032 028	182.171 742 0	0	196.757 012
	S6	6 878 137	0	158.032 028	302.171 742 0	0	316.757 012
	S7	6 878 137	0	158.032 028	62.171 742 0	0	76.757 012

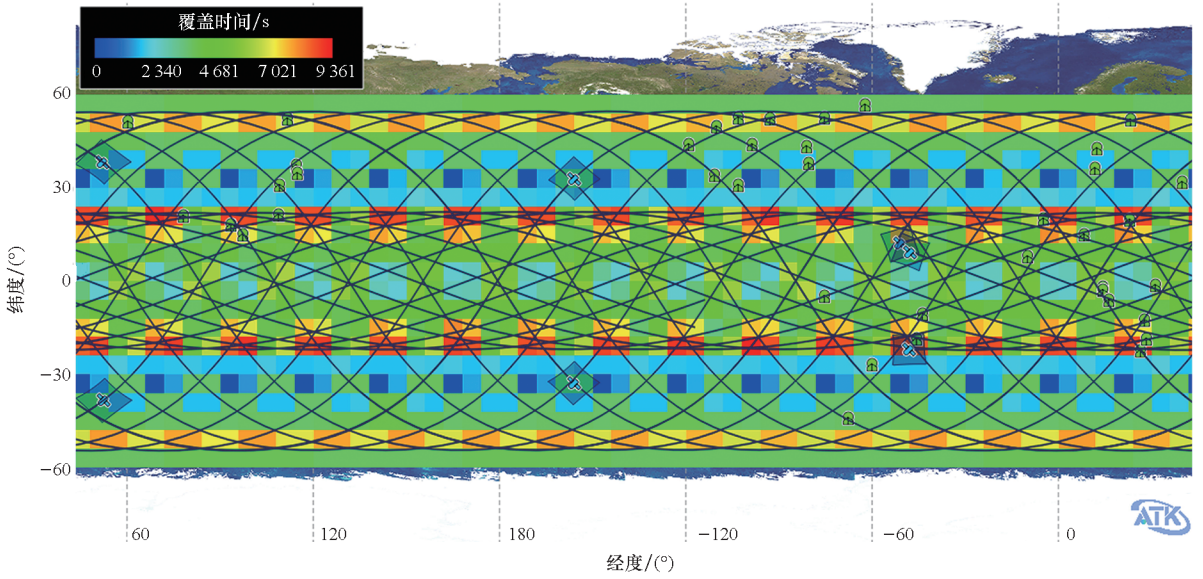


图 8 限制性混合 Walker 星座覆盖时间热力图

Fig. 8 Coverage time heat map of restricted hybrid Walker constellation

子星座 1、2 共同协作完成。

3.3.2 暴力优化结果

暴力优化星座结果如表 2 所示,最少需要 15 颗卫星完成观测任务,同样配置到 ATK 想定中,结果如图 9 覆盖时间热力分布图所示。可以发现,暴力优化算法生成星座结构不规则,对地面目

标聚集较多的北纬 30°至 60°地区覆盖时间最短,卫星覆盖资源没有得到合理配置,存在巨大优化空间。其原因在于该暴力优化方法以卫星的轨道根数为决策变量,卫星数量增加将导致决策变量线性增加,算法搜索空间随之扩大,难以跳出局部最优情况。

表 2 暴力优化星座轨道根数

Tab. 2 Orbital elements for violently optimized constellation

卫星编号	a/m	e	$i/(^\circ)$	$\Omega/(^\circ)$	$\omega/(^\circ)$	$f/(^\circ)$
S1	6 878 137	0	124.266 464	183.483 124	0	67.101 624
S2	6 878 137	0	44.861 618	272.773 059	0	343.610 959
S3	6 878 137	0	54.089 417	118.513 571	0	350.827 137
S4	6 878 137	0	22.959 001	30.990 311	0	232.305 538
S5	6 878 137	0	42.551 237	169.825 075	0	222.662 524
S6	6 878 137	0	23.819 923	184.460 090	0	334.869 282
S7	6 878 137	0	150.745 513	169.589 592	0	204.359 542
S8	6 878 137	0	122.510 923	127.487 527	0	26.750 702
S9	6 878 137	0	164.791 278	283.611 425	0	298.504 452
S10	6 878 137	0	19.910 891	178.359 914	0	171.310 220
S11	6 878 137	0	137.678 793	231.078 638	0	292.267 584
S12	6 878 137	0	59.115 867	27.059 327	0	216.697 317
S13	6 878 137	0	122.005 861	325.885 799	0	173.423 067
S14	6 878 137	0	120.697 685	50.286 592	0	128.548 518
S15	6 878 137	0	137.615 047	271.509 208	0	4.376 981

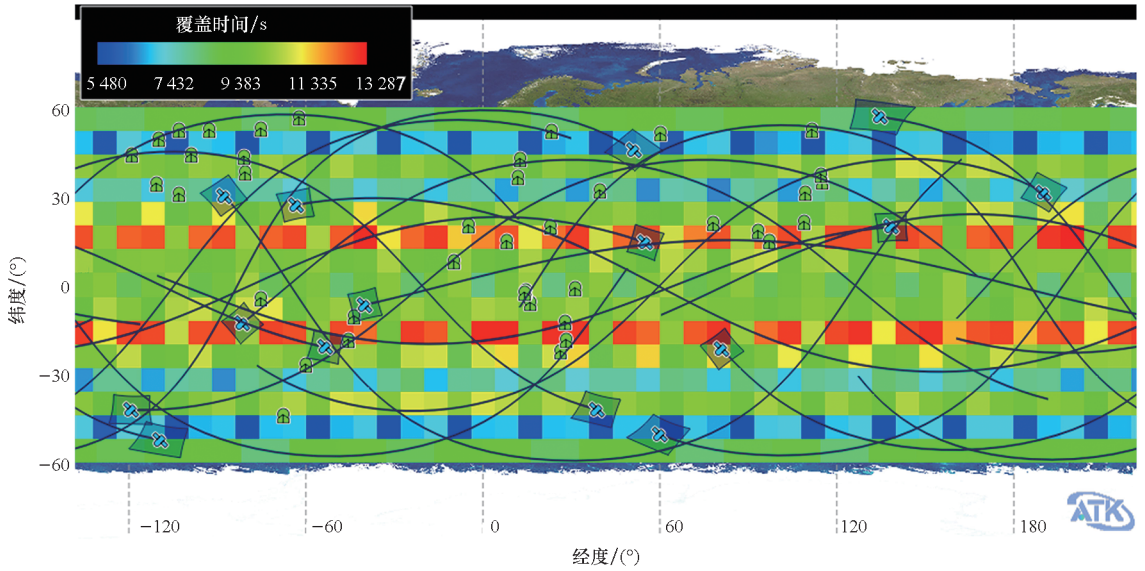


图9 暴力优化星座覆盖时间热力图

Fig. 9 Coverage time heat map of violently optimized constellation

3.3.3 单 Walker 星座优化结果

单 Walker 星座优化方法最少需要 10 颗卫星, 所得卫星轨道根数如表 3 所示, 同样通过二次开发命令将卫星轨道根数配置于 ATK 想定中, 获得如图 10 所示结果。单 Walker 星座直接优化方法与暴力优化算法相比, 以 Walker 星座构型参数为决策变量, 缩小了算法搜索空间, 因而可使用更少卫星满足对地面目标重访覆盖要求。然而由图 10 结果发现生成的星座其轨迹密集分布于高纬地区, 对该部分地区覆盖时间最长, 与之相比中低纬部分轨迹相对稀疏, 覆盖时间短, 说明该方法生成星座覆盖性能沿纬度分布不均, 无法针对性生成星座。

此外对比图 8、图 9 与图 10 左上角区域覆盖时间区间, 可以发现图 8 覆盖时间区间的最小值为 0 s, 最大值为 9 361 s, 均低于图 9、图 10 的覆盖时间区间最小值和最大值。该现象说明相比于其他两种算法, 所提方法由于仅使用了 7 颗卫星,

生成星座对区域覆盖能力偏弱, 但通过针对性优化满足了对指定地面目标最大重访时间约束。

3.4 数据统计对比

统计 3.3 节方法使用卫星数量、算法满足约束耗时、星座对目标平均最大重访时间等数据并制成表 4。由表中数据发现, 限制性混合 Walker 星座设计方法使用卫星数量最少, 最能满足最小化卫星使用量要求, 且耗时相对较低, 相比于暴力优化方法更加高效。然后将场景时间延长, 生成 15 d 平均最大重访时间, 可以发现所提方法平均最大重访时间相比于原始值仅扰动 8.9%, 而单 Walker 星座优化方法和暴力优化方法分别扰动了 23.4% 与 29.8%, 验证了所提方法生成的星座构型具有较强的稳定性。此外, 所提方法在卫星数量为 7、10 以及 15 的场景下, 对地面目标的最大重访时间指标均为最小, 在这三种方法中具有最优性。

表 3 单 Walker 星座轨道根数

Tab. 3 Orbital element for single Walker constellation

卫星编号	a/m	e	$i/(^\circ)$	$\Omega/(^\circ)$	$\omega/(^\circ)$	$f/(^\circ)$
S1	6 878 137	0	52.393 031	299.571 197	0	0
S2	6 878 137	0	52.393 031	335.571 197	0	36
S3	6 878 137	0	52.393 031	11.571 197	0	72
S4	6 878 137	0	52.393 031	47.571 197	0	108
S5	6 878 137	0	52.393 031	83.571 197	0	144
S6	6 878 137	0	52.393 031	119.571 197	0	180
S7	6 878 137	0	52.393 031	155.571 197	0	216
S8	6 878 137	0	52.393 031	191.571 197	0	252
S9	6 878 137	0	52.393 031	227.571 197	0	288
S10	6 878 137	0	52.393 031	263.571 197	0	324

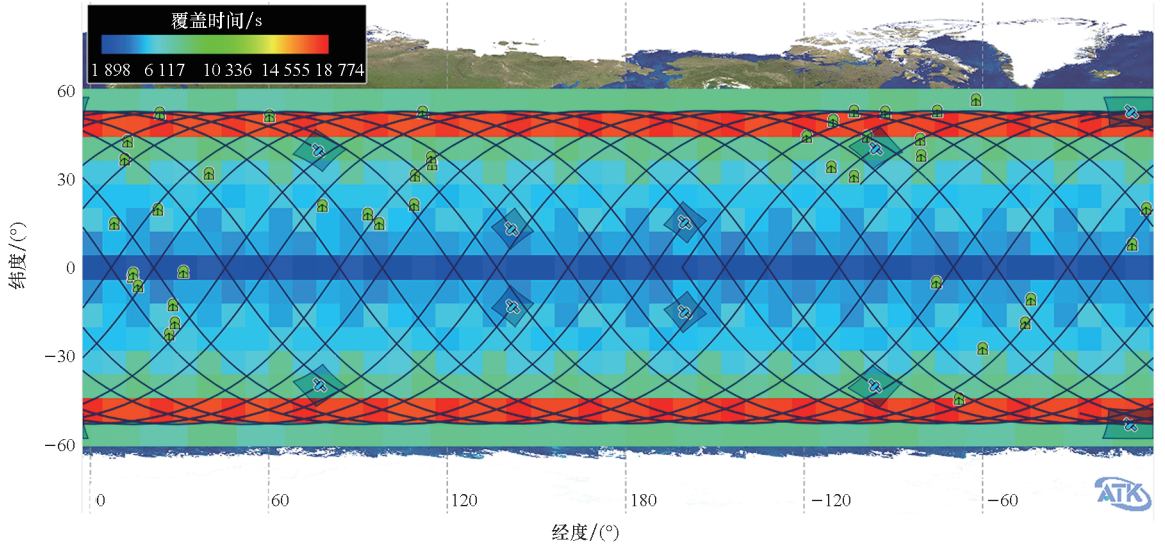


图 10 单 Walker 星座覆盖时间热力图

Fig. 10 Coverage time heat map of single Walker constellation

表 4 算法性能对比

Tab. 4 Algorithm performance comparison

算法性能指标	限制性混合 Walker 星座			单 Walker 星座优化方法			暴力优化方法		
	7 颗	10 颗	15 颗	7 颗	10 颗	15 颗	7 颗	10 颗	15 颗
算法满足约束耗时/s	2 396	3 136	1 826	失败	348	77	失败	失败	14 571
最大重访时间/s	21 313	17 703	10 919	26 989	19 623	15 904	28 549	26 855	20 666
平均最大重访时间/s	14 999	12 985	7 438	16 868	11 505	10 384	23 333	19 419	15 869
15 d 平均最大重访时间/s	16 336	14 237	9 833	23 093	14 199	14 799	33 993	28 542	20 605

值得注意的是,当单 Walker 星座优化方法优化 7 颗卫星时,不仅无法生成符合要求的构型,而且在最大重访时间、平均最大重访时间以及 15 d 最大重访时间等方面均弱于所提方法,说明了所提方法的先进性。而根据图 10 的覆盖时间热力分布图可以发现,单 Walker 星座优化方法受到 Walker 星座构型限制,无法根据地面目标分布生成具有针对性的星座,只能依赖增加卫星数量提高星座对地面目标覆盖性能方式满足任务约束,因而无法最小化卫星使用量。

暴力优化方法则由于决策变量过多,搜索空间大,无法获得全局最优解,针对地面目标覆盖的优化效果差。如表 4 所示,同样优化 15 颗卫星,暴力优化算法生成的构型对地覆盖性能指标远逊于单 Walker 星座优化方法以及所提方法,说明暴力优化算法生成的星座构型属于局部最优构型。

4 结论

为有效应对突发对地观测需求,本文提出一种基于 ATK 的星座快速设计方法,能够面对应急需

求利用库存卫星快速构建对地观测星座,弥补现有卫星观测缺陷。该方法首先根据观测目标纬度绝对值进行层次聚类,获得多个目标分组,然后针对目标分组采用差分进化算法逐步优化观测子星座,最终获得满足需求的观测星座,仿真结果表明:

1) 本文所提限制性混合 Walker 星座设计方法通过调整 Walker 星座构型间接调整卫星轨道根数,相比于暴力优化卫星所有轨道根数,能够减少决策变量个数,避免过早陷入局部最优解。

2) 与单 Walker 星座优化设计方法相比,所提方法将目标聚类为多个目标分组并针对目标分组依次设计限制性 Walker 子星座,充分应用所有卫星观测应急需求,避免了部分卫星观测能力被浪费。

3) 所提方法通过二次开发功能调用 ATK 覆盖分析模块进行星座设计,省略了复杂覆盖分析建模过程,能够直接对星座优化算法开展研究,降低了相关研究工作量。

参考文献 (References)

[1] 胡佳鑫. 面向快速响应的卫星星座部署与重构优化问题

- 研究[D]. 长沙:国防科技大学,2021.
- HU J X. Research on optimization of satellite constellation deployment and reconfiguration for fast response [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021. (in Chinese)
- [2] WALKER J G. Satellite constellations [J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1984, 37: 559–572.
- [3] MORTARI D, WILKINS M P, BRUCCOLERI C. The flower constellations [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2004, 52: 107–127.
- [4] ULYBYSHEV Y. Satellite constellation design for complex coverage [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2008, 45(4): 843–849.
- [5] LEE H W, SHIMIZU S, YOSHIKAWA S, et al. Satellite constellation pattern optimization for complex regional coverage [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2020, 57(6): 1309–1327.
- [6] 龚宇鹏,张世杰. 偶数重连续覆盖的Walker星座设计方法[J]. *宇航学报*, 2022, 43(9): 1163–1175.
- GONG Y P, ZHANG S J. Design method for even-fold continuous-coverage walker constellation [J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(9): 1163–1175. (in Chinese)
- [7] 贺波勇,曹静,周庆瑞,等. 地对地协同观测混合星座多目标优化设计[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(1): 224–232.
- HE B Y, CAO J, ZHOU Q R, et al. Multi-objective optimization of earth cooperative observation hybrid satellite constellation [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(1): 224–232. (in Chinese)
- [8] 肖广瀚,胡泽岩,刘军虎,等. 空间目标偶数重连续覆盖星座设计方法[J]. *航空学报*, 2024, 45(14): 229637.
- XIAO G H, HU Z Y, LIU J H, et al. A design method of even-fold continuous-coverage constellation for space targets [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(14): 229637. (in Chinese)
- [9] 乔鹏昊,李润青,钱雯婧. 基于双层优化的多目标覆盖星座优化设计[J]. *宇航学报*, 2024, 45(9): 1396–1407.
- QIAO P H, LI J Q, QIAN Y J. Satellite constellation design for multi-objective coverage based on double-layer optimization [J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(9): 1396–1407. (in Chinese)
- [10] 胡伟,王劼. 基于STK二次开发的全球导航星座部署研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(23): 6560–6562.
- HU W, WANG J. Research for deployment of global navigation system based on development of STK [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(23): 6560–6562. (in Chinese)
- [11] SAVITRI T, KIM Y, JO S, et al. Satellite constellation orbit design optimization with combined genetic algorithm and semianalytical approach [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 2017(1): 1235692.
- [12] ZHANG T J, SHEN H X, LI Z, et al. Restricted constellation design for regional navigation augmentation [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 150: 231–239.
- [13] 李胜西,李海阳,何湘粤. 面向全球快速重访的限制性Walker星座设计方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2024; 46(12): 4149–4156.
- LI S X, LI H Y, HE X Y. Design method of restricted Walker constellation for global rapid revisit [J]. *System Engineering and Electronics*, 2024; 46(12): 4149–4156. (in Chinese)
- [14] MENCARELLI L, FLOQUET J, GEORGES F. Mathheuristics approaches for the satellite constellation design problem [J]. *Optimization and Engineering*, 2024, 25: 1051–1067.
- [15] 丁冬,何兵,李昕磊,等. 基于STK二次开发的导弹预警星座部署研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2022, 17(7): 664–669.
- DING D, HE B, LI X L, et al. Research on missile early warning constellation deployment based on STK secondary development [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2022, 17(7): 664–669. (in Chinese)
- [16] 罗亚中,孙振江,乔栋. 航天动力学软件发展评述[J]. *力学与实践*, 2017, 39(6): 549–560.
- LUO Y Z, SUN Z J, QIAO D. Survey of astrodynamics software development [J]. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(6): 549–560. (in Chinese)
- [17] 罗亚中,周建平. 航天任务分析与设计工业软件发展战略分析[J]. *力学与实践*, 2024, 46(2): 241–249.
- LUO Y Z, ZHOU J P. Development strategic analysis for space mission analysis and design industrial software [J]. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(2): 241–249. (in Chinese)
- [18] 王华,周晚萌,李海阳,等. 复杂轨道机动规划本体元模型与软件实现[J]. *宇航学报*, 2024, 45(11): 1732–1741.
- WANG H, ZHOU W M, LI H Y, et al. Ontology metamodel and software development for complex orbit maneuver planning [J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(11): 1732–1741. (in Chinese)
- [19] 张赛,杨震,王华,等. 航天器受控绕飞任务规划与自主通用软件实现[J]. *载人航天*, 2024, 30(1): 94–103.
- ZHANG S, YANG Z, WANG H, et al. Mission planning of spacecraft forced fly-around and implementation in proprietary general software [J]. *Manned Spaceflight*, 2024, 30(1): 94–103. (in Chinese)
- [20] ATK项目团队. 航天任务工具箱 ATK[Z/OL]. [2025–02–25]. <https://www.osredm.com/atknudt/atk>.
- ATK Project Team. Aerospace mission toolbox ATK[Z/OL]. [2025–02–25]. <https://www.osredm.com/atknudt/atk>. (in Chinese)
- [21] ZHU Y H, WANG H, ZHANG J. Spacecraft multiple-impulse trajectory optimization using differential evolution algorithm with combined mutation strategies and boundary-handling schemes [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 949480.
- [22] 自然资源卫星遥感云服务平台. 中国卫星[EB/OL]. [2024–12–25]. <https://www.sasclouds.com/chinese/satellite/chinese/zy102c>.
- Natural Resources Satellite Remote Sensing Cloud Service Platform. Chinese satellite [EB/OL]. [2024–12–25]. <https://www.sasclouds.com/chinese/satellite/chinese/zy102c>. (in Chinese)