

DOI: 10.3724/zrht.1674-5825.2025021

一种优化处理测控弧段的启发式算法

师 明^{1,2}, 唐坚强³, 高宇辉^{1,2}, 杨晓晨^{1,2}, 薛乃阳¹

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;
3. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘 要: 针对当前航天器测控跟踪的计划生成及优化过程中难以兼顾计算效率和目标优化的问题, 综合考虑任务属性、耦合关系和约束条件, 构建问题的数学模型, 提出一种通用的基于任务满足原则和效能原则的启发式寻优函数, 用以指导求解过程; 通过算法的回溯后退和参数调优, 缩小求解空间, 加速可行解的收敛, 最终生成航天器测控跟踪计划的优化解。结果表明: 相比完全搜索算法, 启发式算法可以在一个求解框架内求解多个优化目标, 在处理效率和优化结果之间取得了很好的平衡。

关键词: 启发式函数; 航天测控; 任务满足原则; 效能原则; 资源优化

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 1674-5825(2026)01-0072-07

Heuristic Algorithm for Optimizing the Processing of Measurement and Control Arcs

SHI Ming^{1,2}, TANG Jianqiang³, GAO Yuhui^{1,2}, YANG Xiaochen^{1,2}, XUE Naiyang¹

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory of Aerospace Flight Dynamics Technology, Beijing 100094, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: During the generation and optimization of measurement and control tracking plans, it is difficult to balance computational efficiency and optimization goals. To overcome this challenge, a mathematical model was constructed considering the account task attributes, coupling relationships, and constraints. Furthermore, a universal heuristic optimization function based on the principles of task satisfaction and efficiency was developed to guide the solving process. Backtracking and parameter tuning of the algorithms were applied to reduce the solution space, accelerate the convergence of feasible solutions, and ultimately obtain an optimized solution for spacecraft tracking and control plans. A comparison of the results predicted by the complete solution algorithm with those obtained experimentally proved that the developed algorithm achieves a good balance between computational efficiency and fast results.

Key words: heuristic function; aerospace measurement and control; principle of task satisfaction; efficiency principle; resource optimization

1 引言

近年来, 在轨运行的航天器数量呈现井喷式增加, 航天测控资源竞争的矛盾日益突出, 以增加测控站数量的方式来满足需求是不现实的。如何充分利

用现有的测控资源力量, 是亟需研究的重要问题。航天测控资源优化是一个带有时间窗约束的调度问题, 涉及到有限数量的资源和大量时间相关请求的调度, 其计算复杂度被证明是NP(Non-deterministic

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-12-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(72131009); 航天飞行动力学技术重点实验室基金(KJW6142210220301)

第一作者: 师明, 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向为任务智能规划与调度优化。E-mail: shiming1983202@163.com

引用格式: 师 明, 唐坚强, 高宇辉, 等. 一种优化处理测控弧段的启发式算法[J]. 载人航天, 2026, 32(1): 72-78. Shi M, Tang J Q, Gao Y H, et al. Heuristic algorithm for optimizing the processing of measurement and control arcs[J]. Manned Spaceflight, 2026, 32(1): 72-78.

Polynomial)完全问题^[1],求解方法通常分为完全搜索算法、启发式算法以及智能优化算法3类。

完全搜索算法是基于数学规划的精确求解技术,具有逻辑性强、结构严谨、描述问题精确且能够得到最优解等特点。20世纪80年代,美国空军卫星测控网(Air Force Satellite Control Network, AFSCN)为采用混合整数规划模型解决资源不足和测控需求增加之间的矛盾,不断优化MIP(Mixed Integer Programming)模型的求解策略和调度算法。Rojanasoonthon等^[2]采用并行调度机制对多优先级任务构建了混合整数规划模型,算法应用于美国跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)。金光等^[3]针对各测控站设备的数量及其分布进行最优调度,提高地面系统资源利用率,建立了一种非线性泛函优化模型。康宁^[4]提出了基于拉格朗日松弛的分枝定界算法以求解航天测控优化调度问题最优解,采用次梯度优化方法构建了3个设备18颗卫星的问题场景进行仿真实验。近年来,大量研究开发实用求解器,包括德国ZIP公司的SCIP^[5]、IBM的CPLEX^[6]、Gurobi公司的Gurobi^[7]、FICO的Xpress^[8]以及中国杉树科技的COPT。通过复杂的数学分析指导搜索过程,提高了求解效率,在航天、电力、机场等运筹优化应用领域得到广泛应用。

启发式算法通过对问题的针对性分析定义启发式函数,用于求解问题的可行解,并利用特征知识构造达到近似最优的调度方案。这种处理方式缩小了问题求解空间,且不需要复杂的数学计算。例如,郭超等^[9]提出了任务调度优先级和时间窗口选择优先级模型的双层调度模型及算法,针对高价值、高紧迫性任务提高了任务成功率。考虑中继业务中的多滑动时间窗口需求,设计了包含任务时间自由度评价、任务资源匹配、任务插空和资源更新4个影响因子的启发式求解算法,通过智能搜索算法平衡计算时间与求解结果。

智能算法是一种近似求解算法,包括贪婪算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法等。既具有渐近收敛性,又有跳出局部最优解的智能性,在各类调度优化问题中得到广泛应用,并衍生出一系列混合策略。如引入遗传算法^[10,11]以及蚁群算法^[12-14]来解决中继卫星的任务调度问题,也有结合强化学习的方法求解任务调度问题。杜永浩等^[15]在经典爬山法中引入禁忌策略、退火策略和逾期策略,提出一种卫星任务

调度问题通用式协同优化算法。Chen等^[16]将遗传算法应用于多星测控调度问题,提出基于种群扰动和消除策略的遗传算法和任务规划算法。Bianchessi等^[17]提出一种禁忌搜索启发式算法,解决在操作约束下的选择偏好,使用基于列生成的上边界对方案质量进行评估。

工程任务需综合考虑不同任务场景的飞控要求、用户偏好、任务优先级等复杂问题约束,需要在一个处理框架下同时满足多个优化目标。完全搜索算法进行全局最优解的搜索只能设置单一优化目标;智能算法依赖初始种群解的构建策略以及算法与工程约束的适配程度,不具备通用性。

本文针对测控跟踪计划生成及优化问题,综合考虑任务属性、耦合关系和约束条件,构建问题的数学模型,提出一种通用的基于任务满足原则和效能原则的启发式寻优函数,用以指导求解过程;通过算法的回溯后退和参数调优,缩小求解空间,加速可行解的收敛,最终生成航天器测控跟踪计划的优化解。与完全求解算法进行实验比较,以验证算法在典型任务场景下的有效性。

2 问题描述

测控跟踪计划生成的问题可以简述为:给定一组由天基中继卫星、地基测控站组成的异构的测控站,对多个在轨目标航天器匹配测控任务请求。受限于天基测站轨道特性和地基测站的地理分布,每个目标航天器对应一组轨道预报文件,在一个圈次内对应多个测控站,预报文件包含多个可见时间窗口。多个目标航天器可以同时在一个测控站的视野中,并且一个目标可以被多个测控站同时观测到,使得可见时间窗口高度重叠,问题的综合特性更加突出。

测控资源的优化目标是在完成任务周期内所有任务请求的基础上,最小化测控窗口的使用数量,提高测控资源的使用效能。

需要满足如下条件:

1) 中继星的多个天线不会同时工作在相同的点频,即在同一时刻、同一个卫星的不同天线,可视作不同的测控站。

2) 考虑天线跟踪捕获、通信建链等因素,航天器实际使用的跟踪弧段时长小于可见窗口长度。

3) 飞控事件作为规划对象,每个飞控事件都是

一个独立的测控跟踪任务,其属性明确了事件名称、持续时长、优先级、期望开始时间以及资源需求。本文默认飞控事件属性均为已知参数,不做配置方面的研究。

4) 根据任务持续时长,飞控事件可以分为2类。一类是连续跟踪任务,如航天员出舱,需要占用多个测控站的多个可见时间窗口进行接续跟踪,在时间区间上存在搭接,以确保对目标航天器的不间断跟踪;一类是非连续跟踪任务,如进出阴影区帆板打开指令,需要在指定的时间点或时间区间执行,且占用一个单独弧段。

5) 非连续跟踪任务包括3种飞控事件作为同一类规划对象。①周期事件,即在每个圈次的固定时刻需要周期执行的指令,如在任务周期圈次内进出测控区的开关机指令;②关键点任务,即任务指定执行时刻的指令,如航天器姿态调整等,优先级最高;③一般任务,即常规的程遥指令。

6) 在给定的任务周期内,每个测控站可多次跟踪目标航天器,每次跟踪均独占一个可见时间窗口。

为方便描述方法,符号定义如表1所示。

表 1 问题模型的符号定义
Table 1 Definition of symbols used in the model

符号	表征内容
J	多目标航天器集合
M	测控站集合,包括天基中继卫星、地基测控站
VTW	可见窗口集合
VTW_j	航天器 j 的可见窗口集合, $j \in J$
VTW_{jm}	航天器 j 在测控站 m 上的可见窗口集合, $m \in M, j \in J$
R	飞控事件集合
R_j	航天器 j 的飞控事件

定义1:航天器 j 的飞控事件 R_j 是一个五元组,即 $R_j = \langle s_j, l_j, p_j, \alpha_j, \beta_j \rangle, j \in J$ 。

1) s_j 为航天器 j 所要求跟踪开始时间,有2种定义方式。一种是使用圈次,如+100圈,即要求在航天器 j 入轨后第100圈次安排即可,是一个相对时间;另一种是以航天器 j 所在任务的初始时刻计算偏移时刻,如+10 000 s,即以要求该项跟踪需求在任务开始10 000 s后执行,是一个绝对时间。

关键点任务采用偏移时刻的绝对时间表示方法,周期任务采用圈次相对时间的表示方法,连续跟踪任务根据任务优先级确定其中的一种表示方法。

2) l_j 为航天器 j 所要求的跟踪持续时间,单位为s。

3) p_j 为该项跟踪需求的优先级。 $p_j \in [1, 4]$,优先级不同,对测控资源的需求也不同。

4) α_j 为该项跟踪需求的前序任务, $\alpha_j = 0$ 表示该跟踪需求无前序任务,反之表示有前序任务; β_j 即该项跟踪需求的后继任务, $\beta_j = 0$ 表示该跟踪需求无后继任务,反之表示有后继任务。当满足 $\alpha_j = 0 \parallel \beta_j = 0$,即航天器 j 的该项跟踪任务的执行是单独进行的。

定义2:航天器 j 的测控时间窗口 VTW_j 是一个四元组,即 $VTW_j = \langle st, sec, m, j \rangle, m \in M, j \in J$ 。

1) st 表示可见窗口的开始时间;

2) sec 表示可见窗口持续时间。

3 优化算法

测控跟踪计划生成及优化过程可分为三方面:可见窗口的选择、任务的分配以及任务具体测控时间的确定,最后生成测控跟踪计划。

任务安排和冲突消解原则包括两方面:

1) 任务满足原则。满足任务优先级所要求的测控资源,同时考虑该项任务是否有前序和后继任务。一个任务的优先级越高,且是连续跟踪任务,则越需要优先安排该项任务。

定义第一个启发式规则任务满足选择函数见式(1)。

$$f_1(j) = \frac{1}{p_j} + \kappa(\alpha_j + \beta_j), j \in J \quad (1)$$

其中, $f_1(j)$ 是任务 j 的相关函数; κ 是一个正常数; p_j 是该项任务的优先级; α_j 和 β_j 分别表示该项任务是否有前序任务和后继任务,如有,则表示该项任务是一个连续跟踪任务,需要优先安排。

2) 效能原则。当一个任务有多个可见窗口可以选择时,可能带来的零散弧段越少,且该测控站任务安排越集中,该可见窗口被选中的可能性越大。

定义第二个启发式规则测控站效能选择函数见式(2)。

$$f_2(j, t) = \frac{\xi}{sec_j - (l_j + A)} + \lambda w_j(t), j \in J \quad (2)$$

其中, $f_2(j, t)$ 是任务 j 和冲突时刻 t 的相关函数; ξ , λ , A 是正常数; sec_j 是可见窗口大小, l_j 是任务持续时长, A 定义了可在可见窗口内进行测控跟踪的准备时间,是一个预先定义的固定值; $(l_j + A)$ 定义了任务执行所需要的时长,需要落在可见窗口内,且考虑到可

见窗口的独占性,二者的差值越小,不可用的零散空闲弧段越少,测控站的使用效能越高; $w_j(t)$ 为 t 时刻测控站 j 已分配的任务个数,任务安排越集中, $w_j(t)$ 的值越大,测控站使用频率越高,体现了对于测控站选择的偏好。

因此,得到任务安排启发式函数见式(3)。

$$g = f_1(j) + f_2(j, t) \quad (3)$$

通过启发式函数的选择,关键点任务 B 和连续跟踪任务 C 将获得优先安排,周期任务 A 最后安排。任务满足原则和效能原则原则上是矛盾的,满足所有跟踪任务需求势必会产生更多的零散空闲弧段,导致测控站的使用效能降低。因此,要根据2个原则的权重对系数 κ, ζ, λ 进行适当的取值。

在可见窗口集合内,测控跟踪任务的选取会对应多个可用弧段,且相互之间存在交叠情况,联合测控跟踪智能规划调度的目的,在于满足任务跟踪请求的前提下,尽可能生成较少的零散不可用弧段。如果某些弧段选择不合理,一方面会导致任务安排周期上的冲突,另一方面也会带来测控资源的浪费。本文提出的基于冲突回跳的启发式求解算法,一方面基于资源使用的优化目标提出任务安排和冲突消解的策略;另一方面,通过算法的回溯后退和参数调优,缩小了求解空间,加速可行解的收敛。

算法的基本思想包括3项:①以任务满足原则、效能原则为导向进行任务调度和可见窗口的选择,定义任务安排启发式函数 $g = f_1(j) + f_2(j, t)$,综合考虑任务优先级、连续跟踪、测控弧段使用效率和测控站选择偏好等因素;②对于初始可行解进行质量评价,循环迭代指导参数调优,直到生成满足期望的优化解;③记录可见窗口都不满足的约束冲突任务,形成冲突集,利用滑动窗口进行局部寻优和任务的二次安排,以最大化满足测控跟踪需求。

4 处理流程

测控跟踪计划生成及优化处理的流程如图1所示。

步骤一:数据准备。

1)生成问题描述场景。

2)取多个航天器的可见窗口并集,得到可见窗口集合 VTW 。

3)按照开始时间升序对所有测控跟踪任务进行

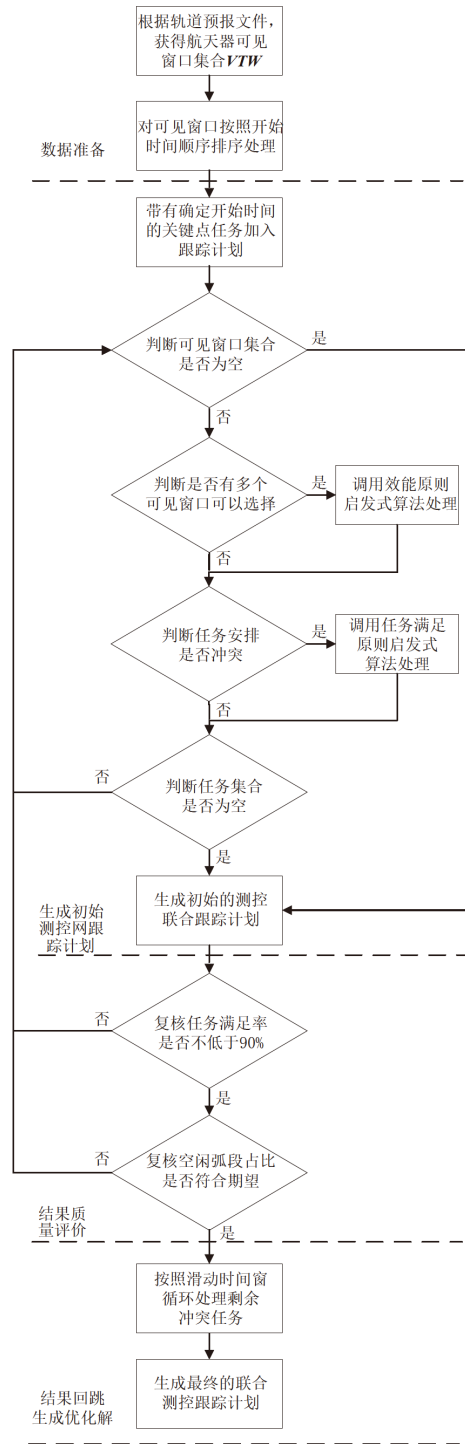


图 1 测控跟踪计划生成及优化处理流程

Fig. 1 Process for generating and optimizing the measurement and tracking plan

排序,排序后的集合记为 R' ,在数据结构上是一个队列。跟踪开始时间是按照圈次标记的,该项任务 j 的开始时间 s_j 是一个时间区间 $[s_j^{\text{start}}, s_j^{\text{end}}]$,取最早开始时间 s_j^{start} 进行排序。

步骤二:生成初始测控网跟踪计划。

1)将带有确定开始时间的关键点任务 j 加入跟踪计划 P_j ,其中, P_j 是一个五元组,相关元素均已经定义,见式(4)。

$$P_j = \langle R_j, st, sec, m, j \rangle \quad (4)$$

设置任务数量 $k = k + 1$ 。

2)判断 VTW 是否为空。如果为空,则结束搜索过程,输出初始测控跟踪计划;否则,按照队列出队顺序在可见窗口集合 VTW 中通过遍历选取合适时间窗口。

3)判断队列中第 i 个任务 $R'[i]$ 是否有多个可见窗口可以选择。如果有,遵循效能原则,使用启发式规则 $f_2(j, t)$ 进行求解,结果放入 P ,已安排任务数量 $k = k + 1$,对已使用的可用窗口进行标记并更新 VTW ;记录可见窗口都不满足的约束冲突任务,形成冲突集 Θ ,未安排任务数量 $n = n + 1$ 。

4)判断队列中第 i 个任务 $R'[i]$ 所选择的可见窗口,是否发生了任务安排冲突。如果有,遵循任务满足原则,使用启发式规则 $f_1(j)$ 进行冲突消解,结果放入 P ,已安排任务数量为 $k = k + 1$,对已使用的可用窗口进行标记并更新 VTW ;同步更新冲突集 Θ ,且 $n = n + 1$ 。

5)判断 R' 是否为空。如果为空,则结束,输出测控跟踪计划;不为空,则跳转至步骤二的2)循环执行。

步骤三:结果质量评价。

1)复核任务满足率是否不低于90%,即测控跟踪计划覆盖任务集合 R 中超过90%的需求。如果满足,则继续执行步骤三的2);如果不满足,则对任务安排启发式函数 $g = f_1(j) + f_2(j, t)$ 的3个系数 κ, ξ, λ 进行调整,跳转至步骤二的2)。

设任务集合 R 中任务数量为 $n + k$,测控跟踪计划中已安排任务数量为 k ,任务满足率 $SatRate$ 的定义见式(5)。

$$SatRate = \frac{k}{n + k} \times 100\% \quad (5)$$

2)复核空闲弧段占比是否符合期望。如果满足,则继续执行步骤四;如果不满足,则对任务安排启发式函数 $g = f_1(j) + f_2(j, t)$ 的3个系数 κ, ξ, λ 进行调整,跳转至步骤二2)。

对于多个复核任务满足率的测控跟踪计划,选择空闲弧段占比最小的方案作为最终结果。

以周为单位计算所有测控站的可用窗口总时长 Σ ,进行任务安排后剩余可用窗口总时长 Ω ,空闲弧段占比 Φ 计算方法定义见式(6)。

$$\Phi = \frac{\Omega}{\Sigma} \quad (6)$$

空闲资源占比越小,测控站 j 就会有更多的弧段保留下来,可以用于保障应急资源调度等其他需求。

步骤四:结果回跳生成优化解。

通过对启发式函数分析可知,冲突集中包含均是周期性任务,任务最早开始时间和最晚开始时间落在一个圈次的时间区间内。可见窗口集合 VTW 中是剩余可用弧段。按照出队顺序对冲突集 Θ 中任务进行调度安排,在 VTW 中查找可用弧段进行任务安排。

1)将第 i 个冲突任务 $\Theta[i]$ 的任务最早开始时间 s_j^{start} 设置为循环搜索的起点。

2) $(s_j^{start} + \Delta t)$ 为步长,在 VTW 中查找是否有对应可见窗口, Δt 是自定义的时间间隔。如果有,则跳转到步骤二2),并依据判断条件执行步骤二3)~5)。

3)如果在 VTW 中没有找到对应可见窗口,则结束循环,测控跟踪计划 P 即为优化解,将其作为最终结果输出。

5 实验分析

本文将规划周期设置为一周,对算法进行测试验证,并通过设置飞控事件的数量,以及不同规模的测控站,构造出不同问题规模的多组测试算例。

航天器集合包括6个目标,天基测控网包括6个不同轨位的中继星,地基测控网作为天基测控网的补充,逐渐增加至9个站。针对连续跟踪任务,任务时长从概率分布 $U[20 \times 60, 100 \times 60]$ (单位:s)中随机取值;对于非连续跟踪任务,任务时长从概率分布 $U[3 \times 60, 5 \times 60]$ 、 $U[5 \times 60, 15 \times 60]$ 、 $U[15 \times 60, 20 \times 60]$ (单位:s)3个概率分布中取值,上述2类飞控事件随机分布在一周的时间跨度内。

对于问题基准,构建混合整数规划模型,设置相同的优化目标,调用规划器COPT求解目标函数和约束方程。由于精确求解算法是一种完全搜索算法,所获得的解可以作为启发式算法的评价基准,表示方法为 $GAP = (\text{启发式算法} - \text{精确求解算法}) / \text{精确求解算法}$ 。 GAP 的值越小,表明越接近最优值; GAP 为负数,表明结果优于模型解。算例测试结果见表2。

结果表明,精确求解算法小规模问题的计算方面具有优势,随着问题规模的增大,搜索空间快速膨大,计算效率随之下降,需要引入列生成算法等方法

表 2 算例测试结果
Table 2 Simulated results for the calculation examples

序号	地面站 数量	飞控事 件数量	精确求解算法		启发式算法		
			窗口 数量	计算 时长/s	窗口 数量	GAP	计算 时长/s
1	5	10	9	11.87	16	0.78	4.18
2	5	15	17	16.38	18	0.06	6.48
3	5	20	10	23.17	19	0.9	8.39
4	5	25	28	9.85	23	-0.18	9.53
5	5	30	34	45.38	24	-0.29	10.68
6	5	10	17	19.36	26	0.53	4.76
7	5	15	29	19.37	28	-0.03	6.38
8	5	20	27	29.83	29	0.07	8.16
9	5	25	37	17.47	30	-0.19	11.15
10	5	30	39	29.67	30	-0.23	12.26
11	9	10	20	15.59	24	0.2	8.15
12	9	15	31	12.78	22	-0.29	12.08
13	9	20	32	36.67	23	-0.28	15.98
14	9	25	41	57.52	23	-0.44	17.09
15	9	30	37	107.1	23	-0.38	18.97
16	9	10	37	15.39	31	-0.16	9.18
17	9	15	29	34.76	31	0.07	11.23
18	9	20	38	32.67	34	-0.11	15.84
19	9	25	42	45.22	33	-0.21	20.59
20	9	30	52	54.41	30	-0.42	22.18
平均	-	-	-	41.23	-	-0.24	15.13

进行问题分解和模型优化,以提高计算效率。而启发式算法的求解速度并未随着问题规模的增大出现明显波动,表明算法在指导搜索过程中发挥明显作用,且获得的优化解也要优于精确求解结果,在求解效率和优化结果方面取得最佳平衡。

后续的研究工作中,结合智能算法研究,利用启发式算法的快速寻优能力和领域知识适配性,配合算法的改进策略,弥补智能算法收敛慢、易陷入局部最优的缺陷;同时借助智能算法的全局搜索能力和自适应学习特性,突破启发式算法求解大规模计算问题的局限性,实现全局最优性与求解效率的平衡,以适配不同的任务场景需求。

6 结论

本文研究测控跟踪计划生成及优化问题,综合考虑任务优先级、前序和后继任务等因素,提出消解测控跟踪计划安排的任务满足原则及其启发式函数;综合考虑最小化零散弧段时长、测站使用偏好等因素,提出测站选择的效能原则及其启发式函数;提出利用滑动窗口进行局部寻优和任务二次安排的策略和实现方法。上述算法可有效避免资源冲突和任务冲突,优化资源利用效率,提高系统的运行效率和

性能。同时,该方法也可根据具体问题的特点和约束条件进行调整和优化,以适应不同的实际应用场景。

参考文献(References)

[1] Barbulescu L, Watson J P, Whitley L D, et al. Scheduling space-ground communications for the air force satellite control network[J]. Journal of Scheduling, 2004(7):7-34.

[2] Rojanasoonthon S, Bard J F, Reddy S D. Algorithms for parallel machine scheduling: A case study of the tracking and data relay satellite system[J]. Journal of the Operational Research Society, 2003, 54(8): 806-821.

[3] 金光, 武小悦, 高卫斌. 卫星地面站资源调度优化模型及启发式算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2004(12): 1839-1847.

Jing G, Wu X Y, Gao W B. Optimization model and heuristic algorithm for satellite ground station resource scheduling[J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2004 (12): 1839-1847 (in Chinese).

[4] 康宁. 航天测控优化调度模型及其拉格朗日松弛求解算法 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

Kang N. Optimization Scheduling Model for Aerospace Telemetry and Control and Its Lagrangian Relaxation Algorithm[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2011 (in Chinese).

[5] Gamrath G, Anderson D,Bestuzheva K, et al. The SCIP optimization suite 7.0[R]. Berlin :Zuse Institut Berlin, 2020.

[6] Bliklú C, Bonami P, Lodi A. Solving mixed-integer quadratic programming problems with IBM-CPLEX[C]//26th RAMP symposium, Hosei University, Tokyo,2014:171-180.

[7] Bixby B. The gurobi optimizer[J]. Transp Research Part B, 2007, 41(2): 159-178.

[8] Berthold T, Farmer J, Heinz S, et al. Parallelization of the FICO xpress-optimizer[J]. Optimization Methods and Software, 2018, 33(3): 518-529.

[9] 郭超, 熊伟, 郝利云. 基于双层优先级的中继卫星系统任务调度算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 5.

Guo C, Xiong W, Hao L Y. Task scheduling algorithm for relay satellite systems based on dual-level priorities[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(5): 5 (in Chinese).

[10] Bingyu S, Feng Y, Yuning C, et al. A Hybrid genetic algorithm for satellite image downlink scheduling problem[J]. Discrete Dynamics in Nature & Society, 2018(8):1-11.

[11] Deng B, Jiang C, Kuang L, et al. Preemptive dynamic scheduling algorithm for data relay satellite systems[C] //2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, 2017:1-6.

[12] 开彩虹, 肖瑶, 方青. 基于人工蜂群算法的中继卫星任务调度研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10):2466-2474.

Kai C H, Xiao Y, Fang Q. Relay satellite scheduling based on Artificial Bee Colony Algorithmmrithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(10):2466-2474 (in Chinese).

[13] 庄树峰. 跟踪与数据中继卫星系统资源调度技术研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

Zhuang S F. Research on Resource Scheduling Technology of

- Tracking and Data Relay Satellite System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [14] 顾中舜. 中继卫星动态调度问题建模及优化技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- Gu Z S. Research on the Relay Satellite Dynamic Scheduling Problem Modeling and Optimizational Technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011 (in Chinese).
- [15] 杜永浩, 邢立宁, 陈盈果, 等. 卫星任务调度统一化建模与多策略协同求解方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 1847-1856.
- Du Y H, Xing L N, Chen Y G, et al. Unified modeling and multi-strategy collaborative optimization for satellite task scheduling[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 1847-1856 (in Chinese).
- [16] Chen M, Wen J, Song Y J, et al. A population perturbation and elimination strategy based genetic algorithm for multi-satellite TT&C scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 65:100912.
- [17] 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.
- (责任编辑: 高慧)