

4-19-2022

Idea of Infinitesimal Method-introduced Hybrid TT&C Resources Joint Scheduling

Naiyang Xue

1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China; 2163628670@qq.com

Dan Ding

2. Department of electronic and optical engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China; ddnjr@163.com

Hongmin Wang

2. Department of electronic and optical engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

Yile Fan

1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Idea of Infinitesimal Method-introduced Hybrid TT&C Resources Joint Scheduling

Abstract

Abstract: Aiming at the study on the motion performance of a two-dimensional variable stiffness snake-robot, a Simulink/Adams co-simulation model is established, *and the effects of the damping coefficient, the stiffness parameters and the angular frequency of the variable stiffness actuator on the motion energy consumption are analyzed. To realize the synchronous control of joint trajectory and stiffness, a motion controller based on two-layer CPG is proposed.* The results show that the damping coefficient can effectively reduce the proportion of starting energy consumption of the variable stiffness snake-like robot, and the ratio of starting energy consumption increases with the stiffness parameter increasing at low speed. The energy consumption of the variable stiffness snake-like robot has a peak value at high speed, so the movement under this condition should be avoided.

Keywords

snake-like robot, variable stiffness actuator, bio-inspired control, energy consumption, central pattern generator

Authors

Naiyang Xue, Dan Ding, Hongmin Wang, Yile Fan, and Zhongqian Liu

Recommended Citation

Naiyang Xue, Dan Ding, Hongmin Wang, Yile Fan, Zhongqian Liu. Idea of Infinitesimal Method-introduced Hybrid TT&C Resources Joint Scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(4): 826-835.

引入微元法思想的混合测控资源联合调度方法

薛乃阳¹, 丁丹^{2*}, 王红敏², 樊怡乐¹, 刘仲谦¹

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学 电子与光学工程系, 北京 101416)

摘要: 针对混合测控资源联合调度中存在的资源属性繁多、偏好差异大以及可能出现的调度弧段冲突等问题, 借鉴单体制测控网调度研究中的任务需求描述方法, 对混合测控任务需求的特点进行分析, 给出其任务需求的规范化描述。以测控调度收益值最大为目标, 建立混合资源联合调度模型; 引入微元法思想, 提出了可用弧段扩展复用方法, 以此为基础提出了基于改进遗传算法的求解策略。仿真结果表明: 所建模型和相应的解冲突算法能有效提高测控需求满足率和测控收益。

关键词: 航天测控; 混合测控资源联合调度; 微元法; 调度收益; 任务满足率

中图分类号: TP391;V57

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2022)04-0826-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0998

Idea of Infinitesimal Method-introduced Hybrid TT&C Resources Joint Scheduling

Xue Naiyang¹, Ding Dan^{2*}, Wang Hongmin², Fan Yile¹, Liu Zhongqian¹

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of electronic and optical engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: To address the issues related to the mixed hybrid telemetry, track and command(TT&C) resource, including multiple attributes, large differences in preferences and scheduling conflicts when resources are limited in joint scheduling, on the basis of the description method in the single system TT&C network scheduling research, the characteristics of the hybrid TT&C task requirements are analyzed and the standardized description of the hybrid TT&C resource scheduling task requirements is provided. With the goal of maximizing the return value of TT&C scheduling, a hybrid resource joint scheduling model is established. A solution strategy based on an improved genetic algorithm is proposed by introducing the idea of infinitesimal method and applying an extended multiplexing method for the available arc segments. The simulation results show that the proposed model and the corresponding conflict resolution algorithm can effectively improve the mission satisfaction rate and scheduling revenue.

Keywords: telemetry, track and command(TT&C); joint scheduling of hybrid TT&C resources; infinitesimal method; scheduling revenue; mission satisfaction rate

引言

地面测控系统是整个航天系统的重要组成部分, 为航天器的在轨正常运行和应用效能的充分发挥提供必不可少的支持^[1]。混合测控资源联合调度是在对卫星测控任务需求进行分析的基础上, 针对国有和民用/商用不同属性的各类卫星

测控需求, 分配国有或民用/商用测控资源及执行时间, 以使所有卫星需求的整体满足情况最好, 测控资源调度效益达到最优。将卫星与测控资源按照管理属性(模式)划分成国有和民商用两类。国有属性是指卫星和测控资源的归属权归国家或者军队所有。民用和商用属性是指卫星和测

收稿日期: 2020-12-14

修回日期: 2021-01-19

第一作者: 薛乃阳(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为航天测控。E-mail: 2163628670@qq.com

通讯作者: 丁丹(1980-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为航天测控。E-mail: ddnjr@163.com

控资源的归属权为民间组织或者商业公司所有。由于微小卫星的需求量随着国内商业航天的兴起呈爆发式增长, 将带来更多微小卫星“星座”组网的地面测控需求^[2]。而现有的国家传统航天测控资源, 需要完成更多的国家级任务。民用和商用航天测控主要参与在轨商业卫星的管理, 同时也可以对传统航天测控体系形成有效补充。因此, 如何在提高测控任务满足率的同时兼顾到不同属性的测控资源的差异性, 使得测控方案尽可能满足具有不同属性测控资源的约束, 从而实现混合测控资源的联合优化调度, 是一个亟待解决且很有意义的问题。

测控资源调度问题是一个典型的超订购问题^[3], 对类似问题的研究主要有: Marinelli等^[3]对伽利略导航星座的通信调度进行研究时, 将其视为资源约束下的SRS调度问题(satellite range scheduling problem with resource constraints, SRSP-RC), 建立了时间下标的0-1线性规划模型, 以被成功调度任务数量为适应度函数对其进行求解。Stottler等^[4]对美国空军卫星控制网的调度问题结合人类调度员的经验研制了MIDA系统进行冲突消解。以我国的国有航天测控网为对象, 李玉庆等^[5]建立了多个低轨卫星和地基测控站的场景数学模型并利用改进遗传算法对结果进行了求解。陈锋等^[6]对我国国有测控网的低轨和高轨卫星建立了包含天基和地基测控资源的天地资源一体化调度模型, 以任务需求加权满足率最大为目标, 采用遗传算法进行求解。张天娇等^[7]对天地基测控资源联合调度问题采用遗传-蚁群混合优化算法进行求解, 提高了求解性能。

在测控资源调度问题的研究中, 主要集中在国家基础设施这单个管理体制下的测控资源调度, 针对不同管理体制下的混合测控资源联合调度研究较少。而从国内外的发展现状来看, 国有和民用商用航天测控等多元测控模式并存协调发展是大势所趋^[8]。本文在描述混合测控资源特点和低轨卫星任务需求的基础上, 将不同的约束用数学语言

进行科学描述, 建立混合测控资源调度模型; 根据问题实际需求, 为解决测控弧段利用率不高, 出现多星同时过站的冲突问题, 将较长的可见弧段采用微元法的思想进行分割拓展复用, 并简要给出一种改进遗传算法求解策略, 提高了测控任务满足率和测控调度计划的生成质量。

1 混合测控资源的特点

国有航天测控基础设施与民用、商用测控公司这两类测控资源的建立背景和主要服务对象不同, 在运营管理等存在差异。国有航天测控网需要尽可能保障国家级测控任务安全可靠的完成, 已经发展成为天地空一体化协调发展、系统高效可靠运行、可按需提供各种天地测控能力的大测控系统^[9]。而商业航天是指以市场为主导, 采用市场手段运用市场机制, 按照市场规律开展的航天活动。与国有测控资源相比, 民用和商用测控资源需要考虑经济性、市场驱动性等特点。因此, 准确分析两种测控资源管理体制特点是建立准确合理模型的基础。

1.1 测控管理模式不同

虽然国有测控网与民商测控网都是由测控中心与分布于各地的测控站组成, 但是商用测控网的测控管理模式更加多元。传统的国有测控网采用封闭/客户端模式的服务器架构, 然而商业测控公司为了更好地适应市场需求, 采用了开放的卫星任务中心支持对外联网的新模式^[10]。这种开放的架构整体构建在云服务之上, 测控站通过电信网络运营商的交换机和服务器, 所有数据都是通过云数据库来集中处理和分发。测控大厅里显示的测控软件也运行在云服务之上, 基于这种开放架构, 客户可以通过笔记本电脑甚至手机等移动设备, 通过公用网络连接云服务器, 实现随时随地都能查看卫星任务, 实现测控中心任务的透明化。正是由于商业测控资源具有较强的可扩展性, 给混合测控资源联合调度提供了便利的基础。

1.2 建站的范围和方式不同

我国的国有测控站主要依靠自建，由陆基、天基(中继卫星)和海基(测量船)测站组成。其中，陆基站主要分布在我国境内，建立海外站较困难，覆盖的圈次和范围比较有限。虽然测量船可以作为海外机动站，但是成本和费用较高，受海况和天气影响，不能长期固定在某区域执行任务。而民商用测控公司可以较方便地选择在境外的全球范围内建站，在建站的方式上不仅可以自建测控站，还可以租用或者开展国际合作请求测控支持。因此，将国有和民商测控资源联合调度可以填补国有测控网在空间范围内受限的不足，提高测控任务满足率，取得更好的测控收益。

1.3 不同属性测控资源服务偏好不同

不同属性的测控资源对提供测控服务的测控资源服务偏好不同，表现为对航天器的测控任务规划调度优先级不同。比如，国有测控资源在同等条件下要优先保障国家级的航天任务，确保可靠、安全地执行任务；而民用和商用测控资源则通常根据客户对公司的重要程度以及相应卫星的测控特点，按照低成本，高效率的原则综合考虑卫星测控任务的优先程度。通过测控资源和航天器的属性分类来定义测控资源服务偏好，可以有效地评价测控调度方案的合理性。

1.4 频率管理的权限不同

国有测控网和民用、商用测控网在可以使用的频率范围上存在差异。目前我国航天测控网具备 S 频段、C 频段、X 频段、Ka 频段和超短波等 5 种频段测控支持能力^[11]。非国有测控网使用的频率范围受法律等政策的限制。比如，在我国，S 频段上行信号属于国家资源，主要用于国防或政府主导的民用卫星测控，而民用和商业测控公司只能发送 X 频段的上行指令，非国有测控网所属测站不能在官方允许的情况下私自向卫星发射 S 频段上行信号^[10]。

上述特点表明，混合测控资源联合调度要根据测控资源和航天器的属性，在测控资源较充裕时，优先选择属性相同的测控资源和目标进行测控任务；而在测控资源有限、测控任务较多的情况下，可以考虑进行不同属性的测控资源和卫星之间的任务调度分配，但同时也要遵循上述约束，以提高整个测控网的利用效率和调度方案的可行性。

2 混合测控资源联合调度模型

本文将测控资源与航天器的属性分为国有和非国有(民用、商用)两大类。在分析混合测控资源特点后，根据测控资源和航天器的属性来设置具体的约束条件，采用科学抽象的方法进行了数学描述。为了研究问题的方便，假设卫星全为低轨卫星，混合测控资源只考虑陆基固定站，且都为全功能站(民商测站没有 S 频段上行的功能)。

2.1 变量及符号约定

设场景中卫星集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ ，测控站集合 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_g, \dots, R_r\}$ 。卫星 S_2 的测控对测控网的频段要求分为 3 种，表示为 $SF_k \in \{1, 2, 3\} = \{\text{USB}, \text{UXB}, \text{VHF}\}$ ；卫星归属属性 $SAF_k \in \{1, 2\} = \{\text{国有卫星}, \text{民用/商用卫星}\}$ ； SP_k 为用户卫星优先级。测控站属性 $RAF_j \in \{1, 2\} = \{\text{国有测控站}, \text{民用/商用测控站}\}$ ；测控站设备频段 $RF_j \in \{1, 2, 3\} = \{\text{USB}, \text{UXB}, \text{VHF}\}$ ，对应用户卫星测控频段；测控站执行 2 个任务之间的最短转换为 RT_i 。

调度周期内卫星 S_i 与测控站 R_i 的可见时间窗口集合为 A ，其中，对 $\forall A_k \in A$ 可表示为： $A_k = \{AS_k, AR_k, AW_k^s, AW_k^e, APr_k\}$ 。其中， AS_k 和 AR_k 分别为测控弧段对应的用户卫星和测控资源代号； AW_k^s 和 AW_k^e 分别为弧段开始时间和结束时间； APr_k 为对该测控弧段进行调度的收益，是由用户卫星和测控资源管理体制属性共同决定的。不同的属性组合，定义的收益值不同。由于测控任务弧段与卫星、测控资源与任务执行时间窗口具有一一对应的

关系, 且可见弧段所包含的信息具有唯一性与完备性, 因此, 本文选择测控弧段作为调度对象。

对于测控任务特殊需求, $Req_i = \{0, 1\} = \{\text{非S频段上行}, \text{S频段上行}\}$ 。卫星 S_i 与所有测控资源形成的弧段集合为 SA_i , 与 S_i 实际调度计划表中相关的弧段集合为 SJ_i 。测控资源 R_k 的所有可测弧段集合为 RA_k , RJ_k 表示在实际调度表中与 R_k 有关的所有测控弧段集合。测控任务在集合中按照起始时间的先后顺序排序, $RJ_k t_i^s$ 与 $RJ_k t_i^e$ 分别是 RJ_k 中第 l 个测控窗口的实际测控任务开始和结束时间。对卫星 S_i , 设定在调度开始时间和结束时间存在 SN_i 条测控需求 (这些需求的执行时间窗口不重叠)。卫星的测控任务前后关系要求 $SAT_i \in \{0, 1\} = \{\text{不存在}, \text{存在}\}$, 分别表示任务之间不存在、存在时间前后间隔要求。 SD_i 、 ST_D_i 、 ST_C_i 分别为此卫星测控任务要求的最短持续时间和2个任务之间的最短和最长间隔时间 (若任务属性 $SAT_i = 0$, 则不存在 ST_D_i 、 ST_C_i), 为3个常数。

卫星 k 的测控任务集合 J_k , 测控任务在集合中按照起始时间的先后顺序排序, $J_k t_i^s$ 与 $J_k t_i^e$ 分别是 J_k 中第 l 个测控窗口的实际测控任务开始和结束时间。综合考虑不同管理体制下的测控资源对测控对象的偏好程度和用户卫星优先级, 定义测控任务综合优先级。采用式(1)计算方法定义卫星 i 在测控弧段 A_i 下的测控任务综合属性优先级 JP_k :

$$\begin{aligned} & \forall J_k \in Req_i, A_i \in SA_i \\ & JP = SP_i + APr_i \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 数学模型

卫星测控资源调度问题是一种复杂的大规模组合优化问题^[12]。为了有效寻找到实际可以使用的较优测控调度方案, 需要建立合适的约束条件和贴合优化目标的目标函数。

根据混合测控资源调度问题的特点, 在借鉴国有测控资源的约束描述方法^[5, 7, 12-13]的基础上, 采用数学语言对混合测控调度的所有约束条件进行规范化描述。具体的约束条件设置如下:

(1) 时间窗口有效性约束

由于地球曲率的原因, 所有的测控任务都必须在卫星与测控站可见的时间窗口内进行。在对任务 J_k 进行调度规划时, 需要满足约束 C_1 。

$$\begin{aligned} C_1 = & \{\forall A_i \in A, \exists J_k \in J: \\ & AW_i^s \leq J_k t_i^s \leq J_k t_i^e \leq AW_k^e\} \end{aligned} \quad (2)$$

测控站 R_k 在测控调度方案中要执行 $|RJ_k|$ 次任务。当执行完一个测控任务后, 需要设置设备的复位与下次任务的准备时间 RT_j , 才能执行下一个测控任务:

$$\begin{aligned} C_2 = & \{\forall R_k \in R, m \text{ 为整数}, \\ & \text{且 } \forall 0 < m < |RJ_k|: \\ & RJ_k t_{m+1}^s - RJ_k t_m^e + RT_j \geq 0\} \end{aligned} \quad (3)$$

为了体现民用和商用测控资源市场化的特点, 对于某商用测控站, 在特定时间段内只对特定重要用户的卫星提供测控服务, 非特殊情况, 一般不满足其他普通用户的测控需求, 设此商用测控站为 R_b , 重要卫星代号为 S_i , 时间段为 $t_{im}^s \sim t_{im}^e$ 。

$$\begin{aligned} C_3 = & \{\forall A_i \in A, AS_k \neq S_i \\ & \text{或 } AR_k \neq R_b, \text{ 若 } t_{im}^s \leq AW_i^s \leq t_{im}^e, A_i \neq SA_i\} \end{aligned} \quad (4)$$

(2) 测控频段一致性约束

在测站 R_k 的所有可测弧段 RA_k 中, 测控资源 R_k 可发送与接收的测控频段 RF_k 要包括卫星 S_i 所需频段 SF_i , 在此弧段内才能建立通信链路:

$$\begin{aligned} C_4 = & \{\forall 0 < m < |RA_k|, \\ & m \text{ 为整数, 当 } AS_k(m) = l \text{ 时:} \\ & SF_i \in RF_k\} \end{aligned} \quad (5)$$

对国有卫星某圈次只能由国有测站执行的特殊任务, 例如需要用S频段上行信号上注遥控指令等, 这一时间窗口的任务只能由国有测控资源来完成。

$$\begin{aligned} C_5 = & \{\text{若 } Req_k = 1, \exists A_i \in JA_i, \\ & AR_i \in A_i, SF_k = 1: \\ & RF_k = 1, RAF_i = 1\} \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 测控设备独占性约束

根据测控设备的实际情况, 测控设备在同一时刻只能为一颗卫星提供测控服务。

$$C_6 = \{\forall A_i, A_j \in A, \text{若 } AR_i = AR_j \text{ 且 } AS_i \neq AS_j; [AW_i^s, AW_i^e] \cap [AW_j^s, AW_j^e] = \emptyset\} \quad (7)$$

(4) 测控任务约束

每个测控任务最多只能被完成一次，不再参与后续的任务调度。

$$C_7 = \{\forall S_i \in S, A_p, A_q \in SA_i; (AS_p = AS_q) \cap (AR_p = AR_q) \cap (AW_p^s = AW_q^e) = \emptyset\} \quad (8)$$

卫星在调度期内的实际安排调度次数不高于要求的测控次数。

$$C_8 = \{\forall S_k \in S, |SJ_k| \leq SN_k\} \quad (9)$$

每个测控任务的执行时间必须不短于测控最短支持时间。

$$C_9 = \{\forall J_k \in SJ_k, SD_k \leq J_k t_i^e - J_k t_i^s\} \quad (10)$$

当卫星的测控任务有前后关系的要求时，此卫星的任意 2 个时间上相邻的测控任务，间隔要在此卫星 2 个任务之间的最短和最长时间间隔内。

$$C_{10} = \{\forall S_i \in S, \text{若 } SAT_i = 1 \text{ 且 } \forall A_m, A_n \in SJ_i \text{ 则: } D_k \leq AW_n^s - AW_m^e \leq ST_C_i(AW_m^s < AW_n^s)\} \quad (11)$$

在混合测控资源联合调度问题中，由于测控资源的有限性，当卫星提出的测控任务数量较大时，就有可能产生任务冲突。以需求的加权满足率和测控资源偏好之和最大为调度目标，以 24 h 为基本调度周期，确定目标函数和约束条件：

$$\begin{cases} Obj = \max(N \times 30 + \sum_{i=1}^N JP_i - \sum_{j=1}^n JP_j) \\ \text{s.t. } C_1 \sim C_{10} \end{cases} \quad (12)$$

式中： N 为被成功调度的测控任务数量； n 为不满足 $C_1 \sim C_{10}$ 约束条件的测控任务数量。

3 测控可用弧段的获取

测控可用弧段的获取主要包括可见弧段预处理和基于微元法思想的长弧段扩展复用两步。由于测控调度的直接对象为测控资源和卫星的测控可用弧段，所以可用测控弧段的数量和质量直接影响着其组成的调度方案的好坏。可见弧段预处理是指进行

星站可见性计算，获得测控可见弧段。但是，通过分析得到的可见弧段可知，有一些弧段的时间窗口过长，存在与紧随其后的测控任务时间上存在冲突的可能，所以本文设计了基于微元法思想的长弧段扩展方法来产生测控可用弧段，可以有效避免冲突，从而达到提高测控任务实际满足率的目的。

3.1 基于 STK 与 MATLAB 互联的可见弧段预处理

通过 STK 软件与 MATLAB 互联，获取场景中所有卫星与测控资源的可见弧段信息。本文根据可见弧段作为测控任务调度的直接对象。由于可见弧段信息包含场景中卫星与测站的时间窗口信息，与第 2 章中设定的各项约束条件与目标函数相结合，可以产生符合条件的测控调度方案并进行评价打分。

为了方便准确地获取可见弧段信息，本文采用将 MATLAB2014b 与 STK 11.4 互联的方式来获取场景中的卫星与测站可见弧段信息。通过编写 MATLAB 程序，调用 STK 的 IAgStkObjectRoot 函数集和相应的接口函数，实现可见测控弧段的计算和自动存储。

3.2 基于微元法思想的长弧段扩展复用

在得到初始可见测控弧段后，采用基于微元法思想的长弧段扩展复用方法可以有效避免任务冲突，生成更高质量的测控调度方案。通过分析 STK 计算出的星站可见弧段时间窗口可知，对于同一个测控站，在某段时间内可能会出现多个卫星同时过站的情况，而根据约束 C_2 ，测站同一时间只能对一个目标提供测控服务，这就出现了多星同时过站的时间窗口冲突。为了解决这种冲突，本文提出了基于微元法思想的长弧段扩展复用方法。

微元法思想是分析、解决物理问题中的常用方法，也是从部分到整体的思维方法。其主要思路是“化整为零”，先分析“微元”，再通过“微元”分析整体。本文对调度过程中可能出现的时间冲突问题采用微元法思想进行改善，先对较长

时间窗口的测控弧段进行分割, 然后在利用算法寻找最优调度方案时, 通过选择分割出的不同起始时间的小弧段来替换原长弧段, 达到使整体调度方案尽量避免冲突的目的。如图1所示, 采用此方法将1条11 min的长弧段分割成5条8 min的可替代小弧段。首先, 设置测控任务最短持续时间、被划分测控长弧段最短时长。在本文中设置的数值分别为7 min与9 min; 其次, 选出STK计算出的所有时长大于9 min的可见窗口进行处理, 将符合条件的时间窗口从起始可见时间起, 按照0.5 min为一组, 依次按照8 min的长度截取可用测控弧段, 组成一个个“微元”; 最后, 将上一步截取的新的可用测控弧段按照时间顺序编入可用时间窗口总调度表中, 替代原来的长弧段任务, 起到解决整体冲突问题的作用。基于微元法思想的长弧段扩展复用方法主要体现在算法求解之前的弧段预处理中, 是后面算法寻优的基础。

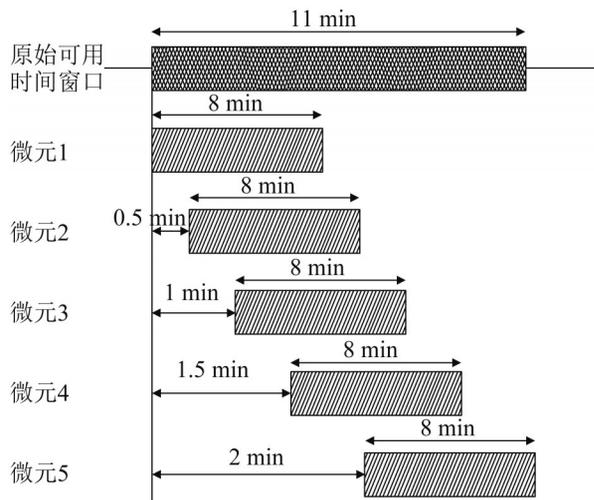


图1 基于微元法思想的长弧段扩展复用示意图

Fig. 1 Long-arc segment extended multiplexing diagram based on the idea of infinitesimal method

4 基于改进遗传算法的求解策略

从建立的模型可以看出, 混合测控资源联合调度主要针对国有和民用/商用测控资源固定情况下可见弧段的调度, 这是混合测控资源调度的核心。在采用微元法思想进行弧段扩展复用后, 在得到每

个需求的可用弧段集合的基础上, 本文给出了利用改进遗传算法求解问题的优化方法。本文设计的改进遗传算法主要对资源属性定义、染色体编码方法、将编码中任务弧段ID序号, 按照约束条件分配给相应需求这三个方面进行了优化设计。

4.1 资源属性定义

资源属性定义是指将测控资源和卫星的管理体制(国有或者民用/商用)、名称以及测控任务类型分类保存到相应矩阵, 并以此为基础生成约束条件的判断依据。由于混合测控资源调度问题中各资源包含的属性较繁杂, 而资源属性是改进遗传算法中适应度值计算的依据, 因此需要在算法中设计适当的资源属性定义方法。

本文采用 struct 结构数组来保存混合测控资源中的属性信息, 数据结构如图2所示。将所有属性分为测控资源属性与卫星属性两大类。在测控资源属性下定义2个结构体, 分别储存测控站的名称与隶属关系 RAF_k ; 在卫星属性下定义3个结构体, 分别储存卫星的名称、隶属关系 SAF_k 和任务类型 Req_i 。当需要查询某个资源属性时, 由于储存时采用全下标编址的方法, 可以根据卫星或者测控站的存放顺序找出任意资源的属性信息, 从而使场景资源的每一个属性按相同的方法存储起来, 方便定义、添加和查找。

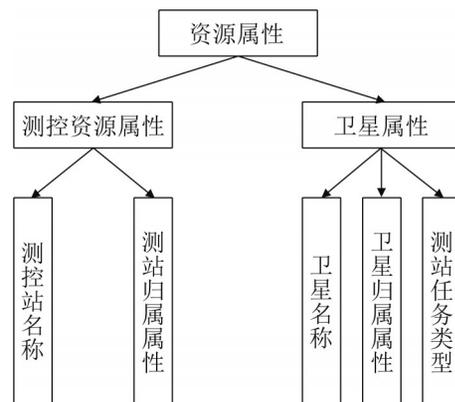


图2 资源属性定义结构图

Fig. 2 Resource attribute structure definition diagram

4.2 染色体的编码与解码

(1) 为了适应问题的求解，本文对遗传算法的编码和解码方式进行了改进。经过微元法拓展处理后的可见弧段都赋有唯一的 ID 号，把这些弧段 ID 号作为基因型进行整数编码，形成染色体。将每个弧段在可用测控弧段列表中排列的顺序序号设置为该弧段的 ID 号。图 3 展示了本文将卫星 1、2、3 测控调度方案表示在染色体上的方法，如图 3 所示，相同卫星的调度窗口排列在染色体上相邻位置，卫星 1 在调度时间内有 3 个测控需求，卫星 2、3 在调度时间内各有 4 个测控需求。每个卫星任务的基因型是在可见弧段集合 SA_i 中随机选择的。

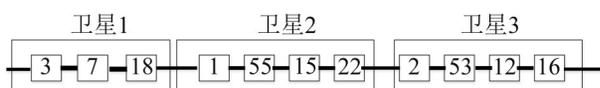


图 3 调度方案在染色体上的编码方式示意图
Fig. 3 Schematic diagram of coding method of scheduling scheme on chromosome

(2) 对染色体依据以下规则按时间顺序从前至后依次解码，生成适应度。染色体上的基因按照图 3 所示的排列顺序，将此 ID 号对应到可用弧段集合列表中即可依次解码，形成调度计划。根据调度计划中每个弧段卫星和测控资源的归属属性，根据规则赋予该弧段的测控收益值。测控收益值的确定方法如下：当此测控弧段与上一个测控任务不存在 C_2 与 C_{10} 冲突时，如果测控资源与接受测控服务的卫星归属属性相同，赋高收益值；如果不同，赋低收益值。当此测控弧段与上一个测控任务存在 C_2 与 C_{10} 冲突时，将赋值为相应收益值的相反数，并且在最终输出最优方案时，将当前冲突的任务舍弃。最后，将收益值和实际成功调度的任务数量代入混合测控资源调度的目标函数，计算出调度方案最终的适应度值。通过这种算法设计，可以将遗传算法的寻优特性巧妙地应用到调度方案解冲突中。

4.3 遗传组件设计

为了尽可能避免算法早熟，提高求解质量，本

文采用基于“轮盘赌”法的选择算子。根据混合测控资源联合问题实际，本文设计的改进遗传算法求解流程结构框图如图 4 所示。其中，交叉和变异操作分别采用单点交叉算子和单点随机变异算子。需要特别注意的是，本文较传统的遗传算法求解过程增加了约束条件检验这一步骤。由于求解测控调度问题的过程中存在很多较复杂的约束条件，为了保证生成的每一个染色体都是可行解，染色体上的任何基因变化之后都要分别进行约束条件 C_1 、 $C_3 \sim C_5$ 、 $C_7 \sim C_9$ 的检验，对不满足上述要求的基因进行重新选择并替换。这样逐代选取较优解，并插入到下一代产生新种群。算法的终止条件是设置固定的进化代数，当达到最低进化代数时，算法终止。最后，把最终得到的优化调度方案中收益值为负的测控弧段删去，输出最优调度方案。

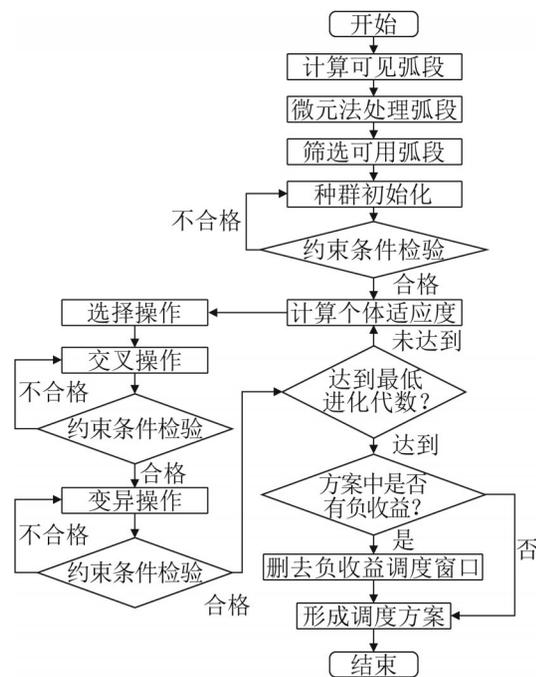


图 4 改进遗传算法的求解流程图
Fig. 4 Improved genetic algorithm solution flow chart

5 算例与结果分析

5.1 场景设计

创建一个仿真场景，场景总调度时间为 2020-08-09

T 00:00:00—2020-08-10 T 00:00:00。场景中含 24 颗低轨卫星, 3 个地面站。场景中的卫星有 16 颗是国有卫星。8 颗是民用或者商用卫星。每个卫星 TLE 双行轨道根数中的 SSC 号、归属属性 SAF_k 以及前后关系要求 SAT_i 如表 1 所示, 测控任务最短持续时间 SD_i 设置为 7 min。若此卫星测控任务存在逻辑上的先后关系(即 $SAT_i=1$), 此卫星 2 个任务之间最长、最短间隔时间 ST_C_i 、 ST_D_i 分别设置为 1 440, 30 min; 每个卫星在测控调度时间内随机设置 4~6 个测控需求, 最早开始时间和最晚结束时间同调度时间。卫星优先级在 1~5 之间随机生成。场景中测站位置和归属属性 RAF_i 列表如表 2 所示, 所有测站的最短转换时间 RT_i 设置为 5 min。商业测站 3 在 840~960 min 时只能对商用卫星提供测控服务。另外, 随机选择 4 颗国有卫星, 在首圈测控时需要通过国有测站上传 S 波段上行信号。此场景下测控资源和卫星分布概貌如图 5 所示。

5.2 算法求解

首先用 STK 仿真计算场景测控时间段内所有的可见弧段信息, 可以得到 391 条所有测站与卫星的可见弧段, 接着进行基于微元法思想的可见弧段扩展处理, 经过初步筛选, 得到了 3 098 条卫星测控任务可用弧段。为了更好地说明采用微元法思想

来进行弧段复用方法的优势, 设置了一组对照组。对照组直接以 STK 计算并筛选出的 323 条可用测控弧段为对象进行测控任务调度。适应度函数即为混合测控资源调度模型中的目标函数。在计算适应度函数时, 算法设置的测控资源收益如表 3 所示。

表 1 测站位置和属性列表

位置和属性	测站编号		
	1	2	3
经度/(°)	46.8	39.505	7.493 33
纬度/(°)	130.32	75.929	134.634
RAF_i	1	1	2

表 2 卫星基本信息列表

卫星 SSC 号	SAF_k	SAT_i	卫星 SSC 号	SAF_k	SAT_i
40 894	2	0	43 099	2	0
40 961	2	1	43 260	2	1
43 254	1	1	43 262	1	0
39 548	1	1	43 275	2	1
40 213	1	1	43 946	1	1
44 215	1	1	44 207	1	0
40 144	1	0	44 534	1	0
39 013	1	0	44 539	2	1
40 109	1	0	44 622	2	0
40 111	1	0	44 785	1	1
40 305	1	1	46 025	2	0
40 878	1	1	46 462	1	0

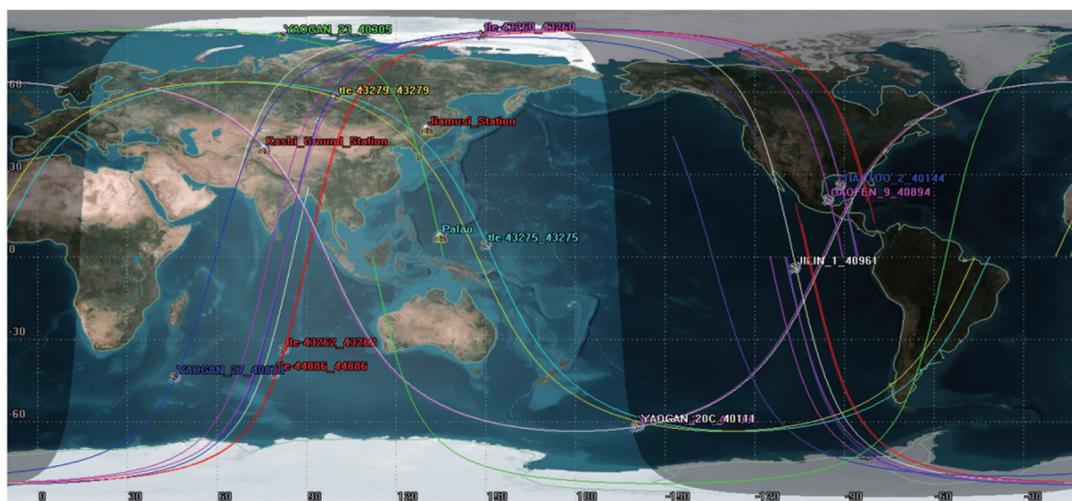


图 5 场景中测控资源和卫星分布概貌

Fig. 5 Overview of measurement and control resources and satellite distribution in scene

表3 测控资源收益表
Table 3 Measurement and control resource income statement

测控资源归属属性 (RAF _k)	卫星归属属性 (SAF _k)	调度收益 (APr _k)
1	1	10
1	2	5
2	1	6
2	2	10

5.3 计算结果与分析

实验系统配置为 Inter Core(TM) i7-9750H CPU @2.60GHz, DDR4 8G RAM, Wi-ndows10, 算法采用 MATLAB2019a 实现。利用遗传算法求解时, 种群规模为 40, 代沟设置为 0.9, 交叉概率设置为 0.8, 变异概率设置为 0.6, 进化代数 为 600。程序求解时间为 12.45 s, 遗传算法求解出的优化过程中调度收益的变化情况如图 6 所示。根据采用微元法拓展的混合测控资源调度方案画出的甘特图如图 7 所示。不同卫星的测控任务用不同的颜色表示, 设图中弧段前后两个数字分别为 X、Y, 则每个任务的 X/Y 代号表示第 X 颗卫星在总测控调度计划中排列为 Y 的测控任务。

从图 6 可以看出, 在测控调度收益优化提高方面, 采用微元法的混合测控调度要明显高于没有采用微元法的对照组的测控收益值, 微元法和对照组 2 种方法最优结果的测控收益值分别为 4 688 和 4 204。通过程序计算, 在测控任务满足率方面, 场景中卫星总共提出了 125 条测控需求, 采用微元法拓展可用弧段的方法满足了 116 条需求, 任务满足率为 0.928; 而没有采用这种方法的对照组只满足了 107 条需求, 任务满足率为 0.856。所以, 从本算例的求解效果可以看出, 本文提出的基于微元法思想扩展可用弧段的方法可以有效提高混合测控资源联合调度中调度方案的收益值。另外, 本文通过遗传算法对混合测控资源调度问题进行了初步研究, 发现其在求解性能上还有提高的空间。

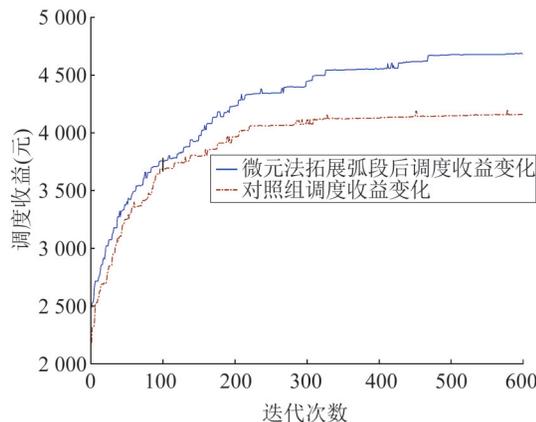


图6 引入微元法前后调度收益变化趋势对比图
Fig. 6 Comparison chart of scheduling income changes before and after introduction of the micro-element method

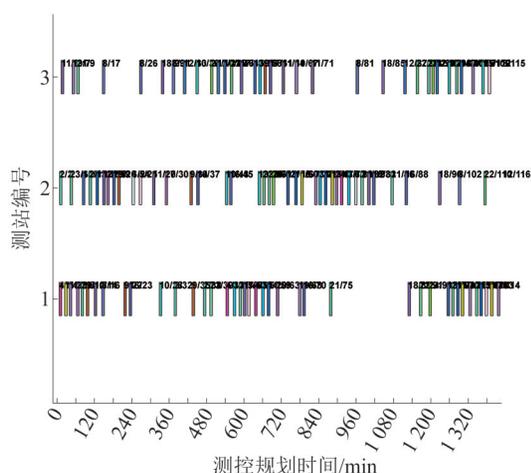


图7 最优化调度方案的任务甘特图
Fig. 7 Task Gantt chart of optimal scheduling plan

6 结论

混合测控资源联合调度问题是具有大规模、多约束、高冲突的典型组合优化问题。针对此问题的研究, 对未来协调发展国有和民用、商用测控多元化航天测控模式具有较大的现实意义。本文对该问题进行细致的研究和科学的描述, 建立了混合测控资源调度模型, 并针对问题的特点提出了基于微元法思想扩展复用长弧段的方法的解冲突策略, 应用了基于遗传算法的求解策略。应该注意到, 混合测控资源的联合调度问题是一个特殊而复杂的问题, 国有和民用、商用测控资源

管理部门对其要求会有不同的重点, 本文所建模型是对混合测控资源的整体测控收益做出的评估; 此外, 提出的微元法求解冲突思想和基于遗传算法的求解策略是对该问题求解的一种初步尝试, 需要在对其求解效果, 可用性方面作进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李晓萌. 航天测控与数传任务动态处理模式与响应流程研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
Li Xiaomeng. Research on the Process and Response Processing Mode of Space TT&C and Data Transmission Tasks for Dynamic Environment[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [2] 宋永生, 李铎, 陈劲睿. 商业航天测控管理[J]. 数字通信世界, 2019, 7(16): 29.
Song Yongsheng, Li Duo, Chen Shaorui. Commercial Aerospace Measurement and Control Management[J]. Digital Communication World, 2019, 7(16): 29.
- [3] Marinelli F, Nocella S, Rossi F, et al. A Lagrangian Heuristic for Satellite Range Scheduling with Resource Constraints[J]. Computers & Operations Research (S0305-0548), 2011, 38(11): 1572-1583.
- [4] Stottler R, Richards R. Managed Intelligent Deconfliction and Scheduling for Satellite Communication[C]//2018 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2018: 1-7.
- [5] 李玉庆, 王日新, 徐敏强, 等. 基于改进遗传算法的一类多资源测控调度问题研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(1): 85-90.
Li Yuqing, Wang Rixin, Xu Minqiang, et al. An Improved Genetic Algorithm for a Class of Multi-Resource Range Scheduling Problem[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(1): 85-90.
- [6] 陈峰, 武小悦. 天地测控资源一体化调度模型[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1405-1412.
Chen Feng, Wu Xiaoyue. Space and Ground TT&C Resource Integrated Scheduling Model[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1405-1412.
- [7] 张天骄, 李济生, 李晶, 等. 基于混合蚁群优化的天地一体化调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1555-1562.
Zhang Tianjiao, Li Jisheng, Li Jing, et al. Integrated Scheduling Method for Heaven and Earth Based on Hybrid Ant Colony Optimization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(7): 1555-1562.
- [8] 徐爱民, 张国亭. 对我国商业航天测控管理有关问题的初步探讨[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(3): 157-163.
Xu Aimin, Zhang Guoting. Discussions on TT&C Management of Commercial Space in China[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(3): 157-163.
- [9] 杨诗瑞. "编织"中国航天测控网[J]. 太空探索, 2020(9): 22-27.
Yang Shirui. "Weaving" Chinese TT&C Network[J]. Space Exploration, 2020(9):22-27.
- [10] 郭夏锐. 商业卫星测控发展现状及趋势[J]. 国际太空, 2019(10): 44-48.
Guo Xiarui. Status and Trends of Commercial Satellite Measurement and Control[J]. International Space, 2019(10): 44-48.
- [11] 雷永刚, 张国亭. 面向未来的微纳卫星测控管理[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(3): 164-172.
Lei Yonggang, Zhang Guoting. Micro-Nano-Satellite Control for the Future[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(3): 164-172.
- [12] 张娜, 柯良军, 冯祖仁. 一种新的卫星测控资源调度模型及其求解算法[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2140-2145.
Zhang Na, Ke Liangjun, Feng Zuren. A New Model for Satellite TT&C Resource Scheduling and Int Solution Algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2140-2145.
- [13] 凌晓冬. 多星测控调度问题建模及算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
Ling Xiaodong. Modeling of Multi-Star TT&C Scheduling Problems and Algorithm Resea-Rch[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.