

卫星任务调度统一化建模与多策略协同求解方法

杜永浩, 邢立宁[†], 陈盈果, 向 尚

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410073)

摘要: 针对卫星任务调度“一星一系统”、测运控分离的现状,以卫星执行任务产生的星上独立事件和星地协同事件作为调度对象,以事件可执行时机作为调度资源,建立卫星任务调度统一化约束满足模型,将传统运控任务调度与测控任务调度纳入统一的建模方法.为保障模型的通用性和适应性,设计包含构造启发式、智能优化和针对性算法改进的多策略协同求解方法,搭建卫星任务调度算法与调度模型松耦合、模块化的系统架构.实验测试表明,所提出方法能够弥补传统模型在敏捷遥感卫星任务调度和高轨卫星测控调度场景下的局限性,在Benchmark问题和实际应用场景中均表现出良好的适用性和优化效果.

关键词: 卫星任务调度; 统一化建模; 约束满足; 多策略协同; 智能优化方法

中图分类号: V474; TP18

文献标志码: A

Unified modeling and multi-strategy collaborative optimization for satellite task scheduling

DU Yong-hao, XING Li-ning[†], CHEN Ying-guo, XIANG Shang

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In current satellite management, each satellite is usually equipped with a special system, and the satellite operation task scheduling and the tracking task scheduling are often separately conducted. This paper analyzes the characteristics of resource occupancy in satellite task scheduling and establishes a unified constraint satisfaction model, which takes satellite onboard independent events and satellite downlink events as scheduling objects, and event executable opportunities as key scheduling resources. With this model, the traditional satellite operation task scheduling and tracking task scheduling are integrated into a unified modeling method. To ensure the generality and adaptability of the model, a multi-strategy collaborative solving framework with heuristic construction, intelligent optimization and specific algorithm improvement is formulated, contributing to a loosely coupled and modular architecture of the satellite task scheduling algorithm and model. Experiment results show that the proposed method can make up for the limitations of traditional models in agile remote sensing satellite scheduling and tracking scheduling of different orbiting satellites, and it has good applicability and optimization effects on Benchmark and practical problems.

Keywords: satellite task scheduling; unified modeling; constraint satisfaction; multi-strategy collaboration; intelligent optimization method

0 引言

作为一种先进的天基信息平台,卫星已在经济、军事、民生等领域起到不可替代的作用.随着我国卫星技术的不断发展和卫星应用的普及,各行各业的用户向卫星管控部门提出了大量的任务需求.为应对大规模、多元化的任务需求,卫星任务调度成为卫星管控的首要内容.

卫星任务调度是指卫星在轨运行过程中,卫星管控部门针对卫星使命任务和日常维护需要,在满足各

类约束条件的前提下,分配卫星载荷和地面管控资源,制定卫星在轨运行和地面管控计划,以实现卫星任务收益的最大化^[1-5].卫星任务调度问题不仅涉及卫星载荷资源,还涉及保障其正常运行的地面管控资源;不仅包含卫星使命任务,还包含日常维护需求.可见,卫星任务调度涉及子问题众多、涵盖面广,故合理、有效的建模方式对卫星任务调度问题的描述与求解具有重要意义.

卫星任务调度问题同时具有序列优化和资源优

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-05-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773120, 61873328); 国家杰出青年科学基金项目(61525304); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(2014-92); 湖南省研究生科研创新项目(CX2018B022).

责任编辑: 刘士新.

[†]通讯作者. E-mail: xinglining@gmail.com.

化的特点,既要决策任务执行的先后顺序,又要分配任务执行所需的资源.常用的卫星任务调度模型包括线性规划模型^[6-9]、图论模型^[10-12]、路径规划模型^[13-15]和约束满足模型^[16-19]等.线性规划模型很难处理卫星任务调度问题中的非线性收益与非线性约束,且卫星任务调度问题的NP难特性决定了精确求解方法只适用于小规模的任务调度场景^[18].图论和路径规划模型能够直观反映卫星任务调度序列优化的特点,但在现阶段敏捷卫星可见窗口时长、高轨卫星可用测控弧长远大于任务时长的场景中,还需通过紧前安排、成像质量优先等启发式规则将任务序列映射到时间轴上,这一解的转换过程占用优化时间,且在启发式规则的影响下易陷入局部最优解.与上述模型相比,约束满足模型在求解卫星任务调度问题时具有更强的灵活性,在处理非线性约束、敏捷型卫星、多星协同和一体化任务等调度问题中得到了充分应用.

不同卫星的任务目的、能力特征与管理体制造成现阶段卫星管控“一星一系统”、测运控分离的现状.针对这一现状,学者们尝试采用一体化的约束

满足模型描述一些卫星的测运控任务联合调度问题^[20-24],但这些模型仍较多地依赖于卫星应用场景的特征,例如采用指定数传站、基于规则的数传调度等特定手段,很难突破“一星一系统”的管理现状.另外,卫星任务是否能够实施一体化的任务调度,不仅取决于卫星任务调度的模型,还取决于该星现行的卫星管控体制.故本文认为,真正意义上的“测运控一体”并非只是实现某几颗卫星在应用层面的统一,而是具有共性特征的测运控任务在调度模型与方法层面的统一.基于统一化的调度模型与方法,卫星管控部门可以开展增量式的系统开发和灵活的多星管理搭配,这是打破“一星一系统”壁垒、打通卫星测运控一体化管理模式的有效途径.

鉴于此,本文从卫星任务资源占用的特点出发,建立卫星任务调度统一化约束满足模型,给出包含构造启发式、智能优化和针对性算法改进的多策略协同求解框架,搭建如图1所示的建模与求解松耦合、模块化的卫星任务调度问题求解架构.从方法层面统一了卫星任务调度问题,并在实验测试中验证了所提出方法的问题适用性和求解效果.

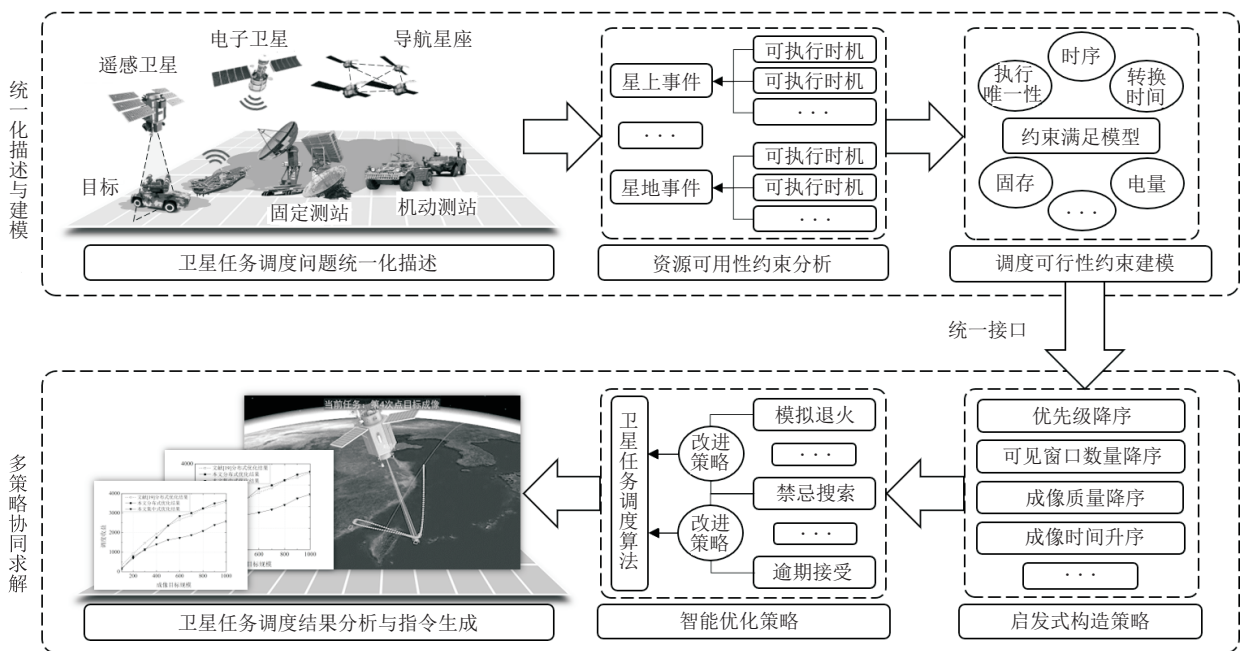


图1 卫星任务调度统一化建模与多策略协同求解总体流程

1 卫星任务调度问题统一化描述

1.1 问题描述与假设

在我国卫星管控的现行体制下,卫星运控部门和测控部门共同承担着卫星全周期的管控任务,其中运控部门主要负责卫星的运营控制,根据卫星用户的任务需求,编排卫星任务计划;测控部门负责卫星的遥测与轨道控制,保障卫星的正常运行.考虑到卫星运

控部门和测控部门的职能差异,本文对卫星任务进行如下分类与定义.

定义1(卫星运控任务) 为实现卫星使命任务和任务数据的回传,在卫星特定工作模式和星上载荷的支撑下,由卫星运控部门针对任务目标或数据接收目标制定的一类卫星工作任务.

定义2(卫星测控任务) 为保障卫星正常运行,满足卫星动作指令上注、数据接收、飞行与轨道数据

遥测等一系列日常工作需要,在卫星载荷和地面管控资源的共同支撑下,由卫星测控部门针对在轨卫星制定的一类星地通讯任务。

由上述定义可知,卫星运控任务由运控部门负责调度,而卫星测控任务由测控部门负责调度,但二者在星上或地面资源占用方面有诸多重合之处,不利于资源统筹与任务管理。由此,本文摆脱了传统任务视角下的建模思维,从运控任务与测控任务资源占用特点出发,以卫星视角对任务执行过程中产生的卫星事件进行区分。

定义3(星上独立事件) 由卫星载荷独立完成的一类事件,即卫星运控任务中的使命任务部分,简称星上事件(onboard event, OE)。

定义4(星地协同事件) 由卫星载荷和地面管控资源共同完成的一类事件,包含卫星运控任务中的数据回传部分和卫星测控任务,简称星地事件(downlink event, DE)。

以遥感卫星任务调度问题为例,卫星运控任务与测控任务调度的关系如图2所示。

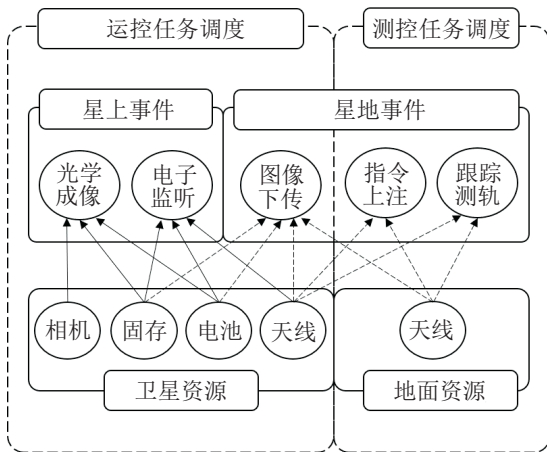


图2 卫星运控任务与测控任务调度关系示例

作为典型的调度问题,资源分配是任务调度过程中至关重要的环节^[25]。但与传统的车间调度问题不同,卫星任务资源种类繁多,不能单纯地以卫星作为任务调度的唯一资源。由此,准确把握调度问题中的关键资源,是卫星任务调度统一化建模与求解的核心。考虑到卫星轨道运动的周期性和重访性,结合卫星调度研究中以可见时间窗口作为主要资源的传统做法,本文以事件可执行时机(executable opportunity, EO)作为卫星任务的调度资源。

定义5(事件可执行时机) 针对某一卫星事件,在调度周期内该事件可以被执行的某一时刻。

事件可执行时机具有如下性质:1)独占性,对于卫星任务而言,一旦选择了某一事件可执行时机,该事件就无法在其他时机执行;2)时序性,事件可执行

时机反映了事件被执行的时间,同时也映射了卫星任务执行的顺序;3)多元性,卫星事件往往拥有多次可执行时机,这些机会可由不同地面测控站、不同卫星或不同轨道提供。上述性质决定了事件可执行时机在卫星任务调度问题中关键资源的地位,任务调度决策、收益评估和约束检查都将围绕事件可执行时机展开。

1.2 基本假设

基于上述定义以及卫星管控的实际情况,为标准化描述卫星任务调度问题,并在一定程度上降低问题规模与难度,作出如下假设:

- 1) 卫星只搭载一个相机、固存、天线和电池等资源,且不会发生故障;
- 2) 地面测站代表由一个测控天线或相控阵组成的固定式或机动式测控设施;
- 3) 受限于星载相机与通讯技术,卫星或测站在同一时刻只能执行一类事件,且不能中断;
- 4) 受限于星载固存技术,固存擦除后数据清空;
- 5) 地面测站能量、存储等资源充裕,不考虑人员排班问题;
- 6) 不考虑星上固存、电池等载荷资源消耗的不确定性;
- 7) 考虑到高纬度地区任务需求通常较少,卫星在高纬度轨道区进行对日充能,星载电池在此过程中完成充电;
- 8) 遥感卫星在轨工作模式包括记录模式、回放模式、实传模式和近实传模式等;
- 9) 导航卫星至少对一个测站可见,且均通过星地链路进行时间同步;
- 10) 中继卫星视为具有电量与存储约束的测站。

1.3 问题变量

记卫星任务集合为 R ,其中运控任务集合为 R_O ,测控任务集合为 R_T ,且 $R = R_O \cup R_T$ 。对任意卫星任务 $r_i \in R$ 而言,其主要属性如表1所示。

表1 卫星任务主要属性及说明

任务属性	说明	R_O	R_T
收益(p_i)	由卫星用户或管控部门定义的,反映任务重要程度和紧急程度的量值	•	•
时长(d_i)	执行该任务所需要的时间	•	•
耗电量(q_i)	执行该任务所需要消耗的星载电池电量	•	•
数储量(m_i)	执行该任务所需要占用的星载固存容量	•	
前序任务(u_i)	执行该任务所需要连续执行的前置任务	•	

在卫星任务与事件分类的基础上,事件可执行时机又可分为星上事件可执行时机(onboard executable opportunity, OEO)和星地事件可执行时机(downlink executable opportunity, DEO). 本文以此作为卫星任务执行的关键资源,将卫星任务调度问题的决策变量统一表示为

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & r_i \text{的星地事件在} deo_{ij} \text{执行;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad r_i \in R. \quad (1)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & r_i \text{的星上事件在} oeo_{ij} \text{执行;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad r_i \in R_O. \quad (2)$$

$$z_i = \begin{cases} 1, & r_i \text{完成后星载固存被擦除;} \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad r_i \in R_O. \quad (3)$$

其中: x_{ij} 反映了卫星运控或测控任务的星地事件是否在其可执行时机 $deo_{ij} \in DEO_i$ 执行;针对运控任务 $r_i \in R_O$ 而言, y_{ij} 反映了该运控任务 r_i 的星上事件是否在其可执行时机 $oeo_{ij} \in OEO_i$ 执行. 此外,由于运控任务中卫星固存擦除的需要, z_i 反映了在运控任务 $r_i \in R_O$ 完成后,卫星是否对星载固存进行擦除. 上述决策变量反映了卫星任务与任务资源的匹配关系,不仅决定了卫星星上事件、星地事件以及卫星固存擦除动作的执行时间和顺序,还确定了执行该事件的卫星或地面测站,为任务调度模型搭建与约束检查提供了重要前提.

2 卫星任务调度约束满足模型

本节对卫星任务调度中的约束进行分类筛选,建立卫星任务调度约束满足模型,为此类问题提供统一化的数学建模方法.

2.1 约束分析

卫星任务调度问题中存在着众多复杂的约束,为了缩减任务调度问题规模,降低解空间搜索难度,约束分析与约束预处理十分必要. 结合卫星任务调度问题的约束特点,将卫星任务调度的约束分为两类,如表2所示.

由表2可知,第1类约束为资源可用性约束,即影响卫星事件可执行时机是否可用的一类约束. 在此类约束作用下,部分事件可执行时机不可用,造成卫星任务潜在收益的降低. 另一方面,此类约束缩减了卫星任务调度的解空间,有利于提升问题调度速率和优化质量. 由于资源可用性约束仅决定事件可执行时机是否可用,约束检查可以伴随着事件可执行时机的生成与筛选同时进行,是一类可预处理、与调度过程无关的约束.

表2 卫星任务调度约束分类

约束类型	举例
资源可用性约束	可见时间窗口约束 运控任务的执行质量约束 运控任务指定卫星、轨道约束 测控任务的天线仰角约束 测控任务指定天线、轨道约束 测站的禁用时段、弧段约束等
调度可行性约束	任务执行唯一性约束 任务时序约束 卫星转换时间约束 测站转换时间约束 星载电量约束 星载固存约束等

第2类约束是调度可行性约束,即无法经过预处理,影响任务相互关系和调度结果是否可行的一类约束. 在此类约束的影响下,可行解和更优解的搜索变得更加困难,故此类约束增加了调度问题求解难度,也反映了卫星任务调度问题区别于其他调度问题的逻辑特征. 调度可行性约束是卫星任务调度数学建模过程中需要描述的主要约束.

2.2 数学建模

在对资源可用性约束进行预处理后,影响卫星任务调度结果是否可行的约束还包括执行唯一性约束、时序约束、卫星转换时间约束、测站转换时间约束等;卫星运控任务还需要额外满足星载电量约束和星载固存约束等,如表3所示. 这些约束将影响星上事件或星地事件的相互关系,无法通过预处理的方式筛选或简化,只能通过建立约束满足模型的方式进行消解.

记 R_O^* 和 R_T^* 分别为 R_O 和 R_T 中被执行的任务集合,并记 $R^* = R_O^* \cup R_T^*$. 记 S 为卫星集合, O_j 为卫星 s_j 的轨道集合, o_{jk} 为轨道集合 O_j 中的轨道. 在卫星任务调度问题统一化描述与约束分析的基础上,建立如下卫星任务调度约束满足模型:

$$\sum_{i=1}^{|R^*|} p_i, \quad r_i \in R^*. \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{|DEO_i|} x_{ij} \leq 1, \quad \forall r_i \in R. \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{|OEO_i|} y_{ij} \leq 1, \quad \forall r_i \in R_O. \quad (6)$$

$$\text{pre}(r_i) = u_i, \quad \forall r_i \in R^*. \quad (7)$$

$$b_{D,i} \geq b_{O,i}, \quad \forall r_i \in R_O^*. \quad (8)$$

$$b_{O,i'} - e_{O,i} \geq \Delta_O(r_i, r_{i'}),$$

$$b_{O,i} < e_{O,i'} + \Delta_O(r_{i'}, r_i) \wedge s(r_i) = s(r_{i'}),$$

$$\forall r_i, r_{i'} \in R_O^*;$$

表3 卫星任务调度问题约束及说明

约束项	说明	数学公式	R_O	R_T
执行唯一性约束	任意任务($r_i \in R$)至多只能被执行一次	(5)和(6)	•	•
时序约束	任意被执行任务($r_i \in R^*$)的逻辑约束或时间顺序约束必须满足(例如,区域目标成像任务中,卫星条带成像子任务需满足一定顺序);任意被执行运控任务($r_i \in R_O^*$)的星地事件不得早于其星上事件(例如,成像卫星任务的数传事件不得早于其成像事件)	(7)和(8)	•	•
卫星转换时间约束	卫星转换时间包括星上事件转换时间 Δ_O 、星地事件转换时间 Δ_D 和不同事件下工作模式转换时间 Δ_M .如图3(a)所示,任意被同一颗卫星执行的两个任务,执行任务的卫星转换时间需满足一定要求	(9)	•	•
测站转换时间约束	如图3(b)所示,任意被同一地面测站执行的两个任务,执行任务的天线仰角或工作模式转换时间 Δ_A 需满足一定要求	(10)	•	•
星载电量约束	任意卫星($s_j \in S$)单轨执行任务的总耗电量不能超过星载电池的耗电阈值 Q	(11)	•	
星载固存约束	任务卫星($s_j \in S$)在两次星载固存擦除间隔 $[t_n(s_j), t_{n+1}(s_j)]$ 内执行任务的固存占用总量不能超过星载固存的阈值 M ,且该间隔内的任务必须同时完成星上事件和星地事件	(12)和(13)	•	

$$b_{D,i'} - e_{D,i} \geq \Delta_D(r_i, r_{i'}), \quad \forall r_i, r_{i'} \in R^*. \tag{10}$$

$$b_{D,i} < e_{D,i'} + \Delta_D(r_{i'}, r_i) \wedge s(r_i) = s(r_{i'}), \quad \sum_{i=1}^{|R^*|} q_i \leq Q_j, \quad o(r_i) = o_{jk}, \quad \forall o_{jk} \in O_j. \tag{11}$$

$$\forall r_i, r_{i'} \in R^*;$$

$$b_{O,i'} - e_{D,i} \geq \Delta_M, \quad \sum_{i=1}^{|R_O^*|} m_i \leq M_j, \quad t_n(s_j) \leq b_{O,i} \leq t_{n+1}(s_j) \wedge s(r_i) = s_j, \tag{12}$$

$$b_{D,i} < e_{O,i'} + \Delta_M \wedge s(r_i) = s(r_{i'}), \quad \forall r_i \in R_O^*, \quad s_j \in S.$$

$$\forall r_i \in R^*, \quad r_{i'} \in R_O^*;$$

$$b_{D,i'} - e_{O,i} \geq \Delta_M, \quad t_n(s_j) \geq e_{D,i}, \quad t_n(s_j) \geq b_{O,i} \wedge s(r_i) = s_j, \tag{13}$$

$$b_{O,i} < e_{D,i'} + \Delta_M \wedge s(r_i) = s(r_{i'}), \quad \forall r_i \in R_O^*, \quad s_j \in S.$$

$$\forall r_i \in R^*, \quad r_{i'} \in R^*.$$

(9)

其中:式(4)表明卫星调度问题的优化目标为最大化任务收益;式(5)~(13)分别为表3所列的卫星任务调度问题的约束;式(9)分别检查了卫星星上事件转

$$b_{D,i'} - e_{D,i} \geq \Delta_A(r_i, r_{i'}),$$

$$b_{D,i} < e_{D,i'} + \Delta_A(r_{i'}, r_i) \wedge a(r_i) = a(r_{i'}),$$

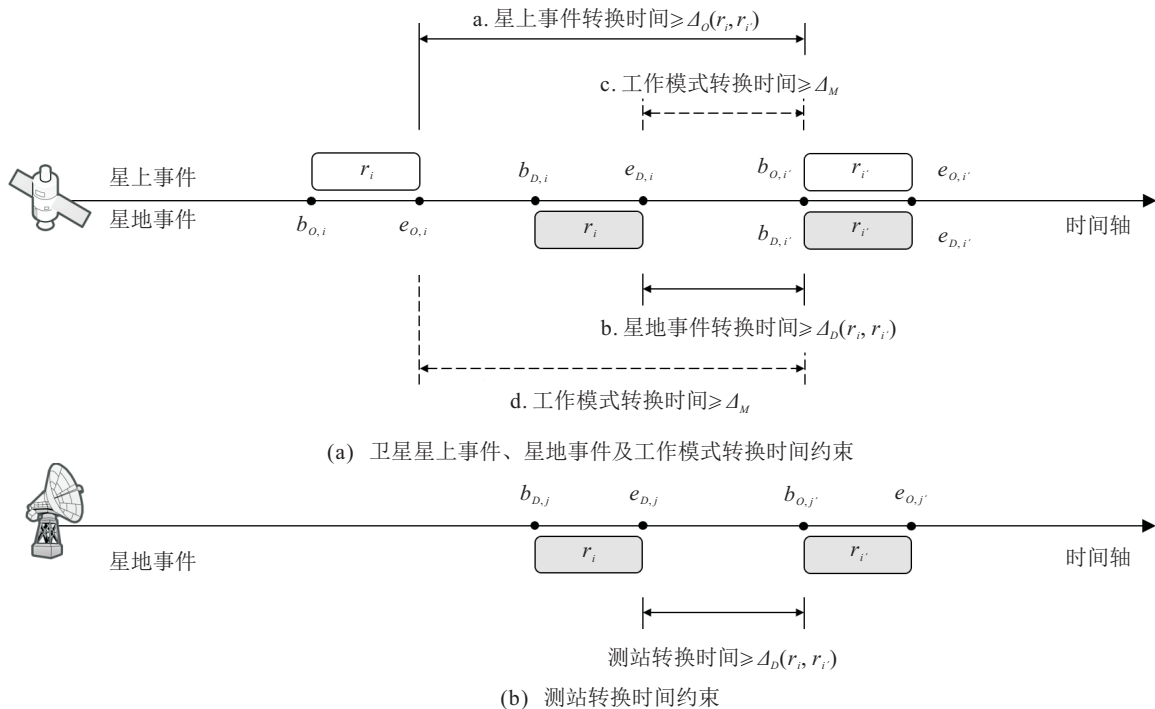


图3 卫星转换时间与测站转换时间约束示意图

换时间 Δ_O 、星地事件转换时间 Δ_D 和工作模式转换时间(即星上事件与星地事件的转换时间) Δ_M 的约束,如图3(a)所示;式(10)检查了地面测站转换时间 Δ_A 的约束,如图3(b)所示; $s(r_i)$, $o(r_i)$ 和 $a(r_i)$ 为执行任务 r_i 的卫星、轨道和测站; $b_{O/D,i}$ 和 $e_{O/D,i}$ 分别为任务 r_i 星上事件/星地事件的开始时刻和结束时刻; $\text{pre}(r_i)$ 为卫星执行任务 r_i 的前一个任务; $t_n(s_j)$ 为由决策变量 z_i 决定的卫星 s_j 的第 n 个固存擦除时刻; Q_j 和 M_j 分别为卫星 s_j 的星载电池与固存阈值.

综上,以事件可执行时机为调度资源的卫星任务调度问题约束满足模型已构建完成. 本文建立的卫星任务调度模型不仅为此类问题提供了统一化的描述方法,同时也为卫星任务调度算法的设计与配置提供了统一接口.

3 多策略协同求解方法

为提升卫星任务调度统一化模型的求解效果,突出模型求解的通用性和问题适用性,本节给出包含构造启发式、智能优化和针对性改进的多策略协同求解框架. 在统一化卫星任务调度模型的基础上,包含构造启发式和基于通用邻域结构的智能优化算法保障了求解方法的通用性,而基于卫星领域知识的算法改进策略则提升了求解方法的针对性. 3种策略相互协同,为卫星任务调度问题统一化模型提供了通用、有效的求解途径.

3.1 启发式构造策略

启发式构造策略具有操作简单、运算速度快的优点,符合人的主观经验,是现行卫星任务调度系统中的常用手段. 常用的卫星任务调度启发式构造策略有任务紧前排序、成像质量优先等,这里给出一种依次确定决策变量取值的通用启发式构造框架.

input: 以策略A对卫星任务集合 R^0 中的元素进行排序;

output: 初始调度解 R^1 .

```

1  for  $i = 1, 2, \dots, |R^0|$  do
2    以策略B对事件可执行时机集合  $OEO_i$ 、 $DEO_i$ 
   中的元素进行排序
3    for  $j = 1, 2, \dots, |OEO_i|$  do
4       $y_{ij} = 1$  并更新  $R^1$ 
5      if  $R^1$  满足全部约束 then
6        进入步骤13
7      else if 仅违反固存容量约束且  $z_{i-1} = 0$  then
8         $z_{i-1} = 1$  并返回步骤5
9      else
10      $y_{ij} = 0$ 

```

```

11     end if
12   end for
13   for  $k = 1, 2, \dots, |DEO_i|$  do
14      $x_{ik} = 1$  并更新  $R^1$ 
15     if  $R^1$  满足全部约束 then
16        $i++$  并返回步骤2
17     else
18        $x_{ik} = 0$ 
19     end if
20     if  $k = |DEO_i|$  then
21        $y_{ij} = 0, j++$  并返回步骤4
22     end if
23   end for
24 end for
25 return  $R^1$ 

```

该框架以卫星任务为单元,在满足约束的前提下,根据某种策略有序构造星上事件和星地事件,同时兼顾星载固存擦除与事件执行的逻辑关系. 其中,策略A包括:优先级降序、可见窗口数量降序、最早可见时间窗时刻升序等;策略B包括:成像质量降序、成像时间升序等. 上述策略可以根据不同的用户需求和需求进行修改,以提升在不同调度场景下的调度合理性. 步骤7和步骤8表示若卫星星上固存达到阈值无法再执行任务 r_i 时,则在其前一个任务 r_{i-1} 执行后对固存进行格式化擦除并重新安排任务 r_i 的星上事件,即常用的“满即擦”策略. 步骤20~步骤22表示若遍历任务 r_i 的星地事件可执行时机仍无可行解,则取消该任务的星上事件,该任务调度失败. 实践经验表明,启发式构造策略往往能在短时间内生成一个可行解,可以为进一步的迭代优化提供优质、可行的初始解.

3.2 智能优化策略

禁忌搜索、模拟退火、逾期接受等元启发式算法既保留了经典爬山算法的渐近收敛性,又具有跳出局部最优解的智能性,在各类调度问题得到广泛应用,并衍生出一系列混合策略的优质算法. 在卫星任务调度统一化模型的基础上,本节基于经典爬山法的算法框架,充分利用了禁忌策略、退火策略和逾期策略,设计了一种卫星任务调度问题通用式协同优化算法.

input: 初始解 R^1 , 算法终止条件,空禁忌表 L^T ,空逾期表 L^L ,初始退火温度;

output: 改进调度解 R .

```

1   $R = R^1$ 
2  while 未达到算法终止条件 do

```

```

3  获取R的邻域R'
4  if f(R') > f(R) then
5      R = R' 并进入步骤17
6  else if 启用禁忌策略且 R' ∈ LT then
7      返回步骤2
8  end if
9  if 选择模拟退火算法 then
10     模拟冷却降温, 获取当前温度T
11     p = exp[(f(R') - f(R))/T]
12     R = p > rand(0, 1) ? R' : R
13 else if 选择逾期接受算法 then
14     RL = 逾期表中首个元素
15     R = f(R') ≥ f(RL) ? R' : R
16 end if
17 更新禁忌表LT和逾期表LL
18 end while
19 return R
    
```

该算法步骤3的邻域操作是算法实现局部搜索的主要方式,主要通过式(1)~(3)中的0-1决策变量 x_{ij} , y_{ij} 和 z_i 自变、交换实现. 步骤10~步骤12的模拟退火算法和步骤14、步骤15的逾期接受算法决定了算法接受劣解、跳出局部最优的机制,可以在该算法框架中灵活选配. 而步骤6和步骤7的禁忌策略检查了算法搜索过程中的局部最优解,为开辟新的解空间提供了保障,可与模拟退火算法或逾期接受算法混合使用. 步骤17中禁忌表与逾期表的元素更新遵循“先进先出”原则. 同时,为提升算法的问题适用性,禁忌表 L^T 与逾期表 L^L 的长度可通过下式中的自适应系数 τ 和 ξ 设定:

$$L^T = \text{int}(\tau \cdot |R^1|), \quad (14)$$

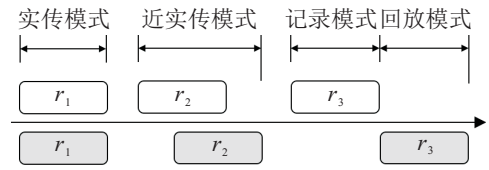
$$L^L = \text{int}(\xi \cdot |R^1|). \quad (15)$$

3.3 针对性改进策略

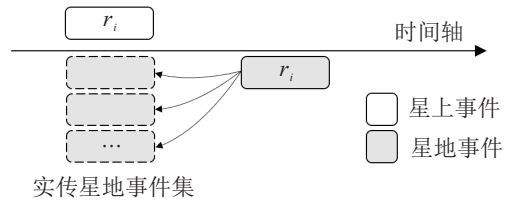
针对性改进策略是指在求解卫星任务调度的实际问题中,在上述启发式构造策略和智能优化策略的基础上进行具有问题针对性的改进举措. 由此,针对性改进策略是依赖于上述启发式构造策略和智能优化策略,同时又具有鲜明的问题适用性的一种附加策略. 考虑到在资源、规模和约束各异的卫星任务调度问题中,上述通用化的启发式构造策略和智能优化策略很可能难以取得出色的优化效果,故充分分析问题特征,结合工程调度实践经验,设计卫星任务调度过程中的针对性改进策略显得尤为重要.

由于不同的针对性改进策略往往适用于不同的卫星任务调度场景,这里以遥感卫星成像与数传任

务一体化调度问题中一种针对性改进策略作为示例. 如图4(a)所示,卫星的实传模式(即星上事件与星地事件重合,且不占有固存)较其他模式更加节省时间和固存资源,充分利用卫星实传模式很可能提升卫星任务收益. 但完全依赖式(1)和(2)中的决策变量,会使卫星星上事件与星地事件的执行时间重合的概率较低,故可以设计如图4(b)所示的实传邻域结构,概率性地将任务调度结果中非实传模式调整为实传模式. 如此一来,通用化的邻域结构与针对性的实传邻域策略共同作用于算法邻域搜索的过程中,既保留了智能优化算法的随机性,又引入了实践经验的启发性. 实践表明这一策略对算法性能有明显提升.



(a) 不同工作模式星上事件与星地事件的时间关系



(b) 由非实传模式调整为实传模式操作

图4 遥感卫星实传邻域构造策略

此外,卫星测控任务调度中针对不可消解冲突的邻域构造策略^[26],大规模或复杂任务调度中的组合优化、分解优化策略也对缩减解空间、提升优化速率起到重要作用. 由此,在卫星任务调度问题统一化建模与求解的过程中,不应脱离问题本质. 充分分析问题特征,汲取工程调度实践经验,在统一化建模与求解方法的基础上设计针对性的改进策略,也是卫星任务调度优化必不可少的环节.

4 实验测试

基于卫星任务调度统一化建模与多策略求解方法,本节针对敏捷遥感卫星任务调度问题和多星测控任务调度问题进行实例测试. 每个问题均包含Benchmark测试和工程应用测试. 测试的计算环境为Windows 10 Intel(R) core i7-7600处理器(2.80 GHz), 8G RAM,编译环境为Java 1.8.0.

4.1 敏捷遥感卫星任务调度

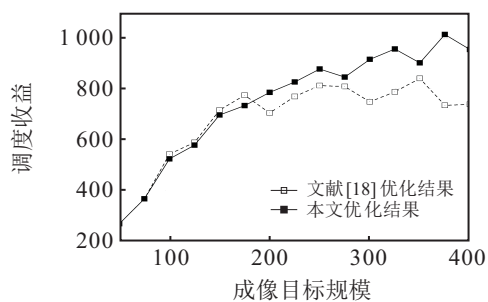
本节Benchmark问题选取文献[18-19]中敏捷卫星成像任务调度算例,卫星轨道参数如表4所示. 其中,文献[18]中测试的卫星为1#,文献[19]中测试的

表4 敏捷遥感卫星轨道参数

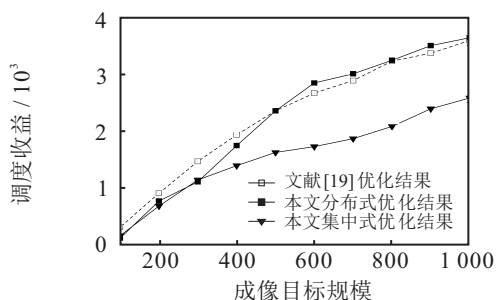
卫星	轨道半长轴/m	轨道偏心率	轨道倾角/(°)	近地点角距/(°)	升交点赤经/(°)	平近点角/(°)
1#	7 141 701.7	0.000 627	98.596 4	95.506 9	342.307	125.265 8
2#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	175.720	0.075 0
3#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	145.720	30.075 0
4#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	115.720	60.075 0
5#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	85.720	90.075 0
6#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	55.720	120.075 0
7#	7 200 000.0	0.000 627	96.576 0	0	25.720	150.075 0

卫星为2#~7#,任务目标均随机分布于 $3^{\circ}\text{N}\sim 53^{\circ}\text{N}$, $74^{\circ}\text{E}\sim 133^{\circ}\text{E}$ 之间的矩形区域内.优化时间与文献[18-19]保持一致.本文卫星任务调度算法采用禁忌逾期接受算法,禁忌表长度系数 τ 和逾期表长度系数 ζ 分别为0.3和20.

在单星成像任务调度仿真算例中,文献[18]在算法搜索过程中,先构建卫星任务序列,再依据成像质量优先的启发式规则决定每个任务的执行时刻.这一解的转换过程易造成搜索时间的浪费,且在启发式规则的影响下易陷入局部最优解,本质上没有摆脱非敏捷卫星任务调度中以路径规划模型为基础的调度框架.而在本文的任务调度模型中,式(2)中的决策变量 y_{ij} 直接决定每个卫星任务的执行时刻,反映了卫星任务的执行序列,具备获取全局最优解的模型基础.图5(a)所示的单星成像任务调度仿真对比表明,本文建模与求解方法在相同的优化时间内,表现出显著优于文献[18]的优化效果.



(a) 单星仿真调度场景对比结果



(b) 多星仿真调度场景对比结果

图5 敏捷遥感卫星成像任务调度仿真对比测试

在多星成像任务调度仿真算例中,文献[19]对文献[18]的模型与算法进行了改进,引入对任务执行时刻的决策,与本文模型原理相似.文献[19]设计了一种自适应式的多星任务分配与分布式调度算法,由图5(b)可知其优化效果在相同时间内显著优于本文的集中式任务调度效果.由于文献[19]采用的自适应任务分配框架与其任务调度算法耦合紧密,无法直接套用,本文采用一种基于任务可调度性预测的任务分配框架^[27],实现了多星任务的分布式优化,其优化效果与文献[19]较为接近.而本文方法的优势在于,调度模型与优化算法完全分离,优化算法可模块化配置,摆脱了任务调度算法、分配算法与模型紧耦合的局限,在卫星任务调度的现实问题中具有良好的适用性和可拓展性.

为验证本文建模与求解方法在实际问题中的适用性,本文方法还被应用于高景系列卫星和某新型遥感卫星的成像任务与数传任务一体化调度问题中.应用结果表明,本文建模与求解方法有效描述了遥感卫星成像任务、数传任务、固存擦除等一体化的优化调度问题,解决了上述卫星任务调度的实际困难,有效缩减了任务调度时间.而其中针对算法改进的实传邻域策略在同等优化时间的条件下对调度结果平均提升了17%,可见算法针对性改进策略对提升统一化模型的应用效果具有重要作用.

4.2 多星测控任务调度

本节Benchmark问题选取美国空军航空技术学院(air force institute of technology, AFIT)提供的7个同时包含低轨卫星和高轨卫星的多星测控任务调度场景^[28],测控任务规模列于表5.为提升优化效率,同时引入文献[26]提出的针对不可消解冲突的邻域构造策略,对比测试结果及优化时间列于表6,表中结果为调度失败的最小任务数.

由表6可知,在引入针对性邻域策略的基础上,本文方法的计算结果与数学规划求解器CPLEX的结

表5 多星测控任务调度算例规模

算例	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
任务规模	322	302	311	318	305	299	297

表6 多星测控任务调度仿真结果与优化时间对比测试

算例	CPLEX	含邻域策略的 本文方法	无邻域策略的 本文方法
1#	6 (114 s)	6 (37 s)	6 (96 s)
2#	3 (142 s)	3 (12 s)	3 (42 s)
3#	2 (142 s)	2 (15 s)	2 (50 s)
4#	2 (309 s)	2 (14 s)	2 (71 s)
5#	2 (303 s)	2 (21 s)	2 (82 s)
6#	5 (1736 s)	5 (16 s)	5 (56 s)
7#	4 (48 s)	4 (6 s)	4 (25 s)

果均一致,且优化速率明显高于CPLEX.然而,在无邻域策略的帮助下,本文的智能优化策略虽然也能获得最优解,但优化速率明显降低.测试结果表明,本文的统一化卫星任务调度建模与求解方法在多星测控任务调度问题中也具有良好的适用性,同时针对性改进策略对提升问题求解效率也起到不可或缺的作用.

此外,考虑到该Benchmark问题规模较小、约束单一,可以通过CPLEX很好地求解,故开展了我国部分在轨卫星测控任务调度实例测试.在测试中,本文方法成功地处理了天线仰角、转换时间等10余项复杂的卫星任务调度实际约束,构建了短周期测控调度和长周期测控调度模型,进一步验证了本文统一化的建模与求解方法在解决实际卫星测控需求中的适用性.

5 结论

为打破卫星任务调度“一星一系统”壁垒,实现测控任务的一体化管控,本文系统地梳理了卫星任务调度问题的关键事件、资源与约束,设计了一种卫星任务调度统一化建模与多策略协同求解方法.该方法的主要贡献有:

1) 将卫星运控任务调度和测控任务调度纳入统一的建模方法中.从方法层面统一了卫星任务调度模型,支撑了增量式的系统开发和灵活的多星管理搭配,为打破卫星任务调度“一星一系统”壁垒、打通卫星测控一体化管理模式提供了有效途径,并在实验测试中验证了方法的问题适用性.

2) 搭建了卫星任务调度算法策略与调度模型松耦合、模块化的系统架构.所提出的统一化建模方法为调度模型与算法策略之间提供了统一的接口,有助于模型与不同算法策略的搭配与改良,在实验测试中验证了方法的优化效果.

所提出的统一化建模与多策略求解方法能够解决现阶段卫星任务调度的实际困难,对充分发挥卫星载荷能力、利用星地管控资源、实现卫星使命任务具有重要现实意义.不足之处在于该方法目前主要解决的是地面统一管控模式下的卫星任务调度问题,适用于考虑全局性约束的集中式或非完全分布式的调度场景.而针对建立在星间通讯技术基础上的卫星自主任务调度问题,所提出方法还将进一步与人工智能技术深度结合,以满足未来卫星上智能与快速响应的发展需求.

参考文献(References)

- [1] Karapetyan D, Minic S M, Malladi K T. Satellite downlink scheduling problem: A case study[J]. Omega, 2015, 53: 115-123.
- [2] Xiong J, Leus R, Yang Z Y, et al. Evolutionary multi-objective resource allocation and scheduling in the Chinese navigation satellite system project[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(2): 662-675.
- [3] 杜永浩, 邢立宁, 陈盈果. 多平台海上协同搜索与路径优化策略研究[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0464.
(Du Y H, Xing L N, Chen Y G. Strategies of maritime cooperative searching and path optimization using multiple platforms[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0464.)
- [4] 耿远卓, 郭延宁, 李传江, 等. 敏捷凝视卫星点目标聚类与最优观测规划[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0800.
(Geng Y Z, Guo Y N, Li C J, et al. Optimal mission planning with task clustering for staring mode agile satellite[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2018.0800.)
- [5] Wu K, Zhang D X, Chen Z H, et al. Multi-type multi-objective imaging scheduling method based on improved NSGA-III for satellite formation system[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(8): 2551-2565.
- [6] Chu X G, Chen Y N, Tan Y J. An anytime branch and bound algorithm for agile earth observation satellite onboard scheduling[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(9): 2077-2090.
- [7] She Y C, Li S, Zhao Y B. Onboard mission planning for agile satellite using modified mixed-integer linear programming[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72: 204-216.
- [8] Valicka C G, Garcia D, Staid A. Mixed-integer programming models for optimal constellation scheduling given cloud cover uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 275(2): 431-445.
- [9] 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.
- [10] 陈浩, 李军, 景宁, 等. 电磁探测卫星星上自主规划模型及优化算法[J]. *航空学报*, 2010, 31(5): 1045-1053. (Chen H, Li J, Jing N, et al. Scheduling model and algorithms for autonomous electromagnetic detection satellites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 1045-1053.)
- [11] Li J, Li J, Chen H, et al. A data transmission scheduling algorithm for rapid-response earth-observing operations[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, 27(2): 349-364.
- [12] Álvarez A J V, Erwin R S. An introduction to optimal satellite range scheduling[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 49-71.
- [13] Yarr N, Ceriotti M. Optimization of inter-satellite routing for real-time data download[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2018, 54(5): 2356-2369.
- [14] He Y M, He L, Wang Y, et al. Autonomous mission replanning method for imaging satellites considering real-time weather conditions[J]. *Journal of Computational & Theoretical Nanoscience*, 2016, 13(10): 6967-6973.
- [15] 李菊芳, 谭跃进. 卫星观测联合调度问题的VRP与JSP模型[J]. *系统工程*, 2006, 24(6): 111-115. (Li J F, Tan Y J. VRP and JSP models of coordinate scheduling problem for observing satellites[J]. *Systems Engineering*, 2006, 24(6): 111-115.)
- [16] 谢平, 杜永浩, 姚锋, 等. 敏捷成像卫星自主调度技术综述[J]. *宇航学报*, 2019, 40(2): 127-138. (Xie P, Du Y H, Yao F, et al. Literature review for autonomous scheduling technology of agile earth observation satellites[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(2): 127-138.)
- [17] 李志亮, 李小将, 孙伟. 考虑成像质量的敏捷卫星任务调度模型与算法[J]. *宇航学报*, 2017, 38(6): 590-597. (Li Z L, Li X J, Sun W. Task scheduling model and algorithm for agile satellite considering imaging quality[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(6): 590-597.)
- [18] Liu X L, Laporte G, Chen Y W, et al. An adaptive large neighborhood search metaheuristic for agile satellite scheduling with time-dependent transition time[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 86: 41-53.
- [19] 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: 12-25.
- [20] Bianchessi N, Righini G. Planning and scheduling algorithm for the COSMO-SkyMed constellation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2008, 12(7): 535-544.
- [21] Sarkheyli 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 and Technology*, 2013, 29(1): 287-295.
- [22] Wang J, Jing N, Li J, et al. A multi-objective imaging scheduling approach for earth observing satellites[C]. *Proceedings of the 9th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. London: IEEE, 2007: 2211-2218.
- [23] Wang P, Reinelt G, Gao P, et al. 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.
- [24] 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.
- [25] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. *控制与决策*, 2018, 33(3): 385-391. (Wang L, Wang J J, Wu C G. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(3): 385-391.)
- [26] Luo K P, Wang H H, Li Y J, et al. High-performance technique for satellite range scheduling[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 85: 12-21.
- [27] 邢立宁, 王原, 何永明, 等. 基于BP神经网络的星上任务可调度性预测方法[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(S1): 117-124. (Xing L N, Wang Y, He Y M, et al. An earth observation satellite task schedulability prediction method based on BP artificial network[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(S1): 117-124.)
- [28] Air force office of scientific research. Exploiting elementary landscapes for search (AFSCN scheduling problems)[DB/OL]. [2019-1-21]. <http://www.cs.colostate.edu/sched/data.html>.

作者简介

杜永浩(1993—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: duyonghao15@163.com;

邢立宁(1980—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: xinglining@gmail.com;

陈盈果(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事智能优化理论与应用等研究, E-mail: argguo@163.com;

向尚(1990—), 男, 博士生, 从事智能优化理论与应用的研究, E-mail: xiangshang165@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)