

控制与决策

Control and Decision

考虑邻域结构动态调整的多星应急调度算法

伍国华, 杜潇, 王心慰, 陈新江, 张雯菲, 毛成辉

引用本文:

伍国华, 杜潇, 王心慰, 陈新江, 张雯菲, 毛成辉. 考虑邻域结构动态调整的多星应急调度算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(7): 1685–1694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0320>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于动态资源权重的多技能项目调度启发式算法

Dynamic resource priority-based heuristics for multi-skill resource constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(10): 2553–2561 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0070>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

一种面向严重受损路网的抢修队调度算法

An algorithm for repair crew scheduling on severely damaged road network

控制与决策. 2021, 36(7): 1663–1671 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1582>

基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1581–1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

考虑邻域结构动态调整的多星应急调度算法

伍国华, 杜 潇, 王心慰, 陈新江, 张雯菲, 毛成辉[†]

(中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘要: 实际应用中的卫星调度方案往往受到外界因素的影响, 例如电磁干扰、卫星失效、云层遮挡以及新任务的动态到达等, 需要在短时间内对原始调度方案进行调整并生成新的调度方案, 以保证卫星系统的稳定性. 对此, 考虑新任务到达情况下的卫星应急调度, 建立多星协同应急调度的整数规划模型, 并提出一种基于动态邻域结构的卫星应急调度算法 (satellite emergency scheduling algorithm based on dynamic neighborhood, SESA-DN). 设计多种类型的邻域结构以及动态的邻域选择策略, 能够根据任务完成情况进行有效反馈, 通过对应急任务的插入与替换生成卫星应急调度方案; 同时, 构建多星应急调度场景, 通过大量仿真实验将 SESA-DN 算法与多种对比算法进行比较. 实验结果表明, SESA-DN 算法的稳定性优于对比算法, 对于多星协同动态调度问题具有很好的适用性.

关键词: 卫星应急调度; 动态邻域结构; 调度算法; 启发式算法; 任务插入; 任务替换

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0320

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 伍国华, 杜潇, 王心慰, 等. 考虑邻域结构动态调整的多星应急调度算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1685-1694.

Multi-satellite emergency scheduling algorithm considering dynamic selection of neighborhood structure

WU Guo-hua, DU Xiao, WANG Xin-wei, CHEN Xin-jiang, ZHANG Wen-fei, MAO Cheng-hui[†]

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The satellite scheduling schemes in practical applications are typically affected by external factors, such as electromagnetic interference, satellite failure, cloud cover, and the dynamic arrival of new tasks, etc. It is necessary to adjust the original scheduling scheme within a short time and generate a new scheduling scheme to ensure the stability of the satellite system. Therefore, considering satellite emergency scheduling when new tasks arrived, this paper establishes an integer programming model for multi-satellite cooperative observation emergency scheduling, and proposes a satellite emergency scheduling algorithm based on a dynamic neighborhood (SESA-DN). This method designs various types of neighborhood structures and dynamic neighborhood selection strategies, which can provide effective feedback in terms of the completion of tasks, and generate satellite emergency scheduling schemes by inserting and replacing emergency tasks. Besides, a multi-satellite emergency scheduling scenario is constructed, and the proposed SESA-DN algorithm is compared with multiple comparison algorithms through a large number of simulation experiments. Experimental results show that the SESA-DN algorithm is more stable than comparison algorithms, and has good applicability to the multi-satellite cooperative dynamic scheduling problem.

Keywords: satellite emergency scheduling; dynamic neighborhood; scheduling algorithm; heuristic algorithm; inserting tasks; replacing tasks

0 引言

对地观测卫星具有覆盖范围广、长期监视、重复观测频率高、信息获取准确有效以及不受空间限制等优点, 在资源勘探、灾害控制、城市规划和环境监测等方面发挥着重要的作用^[1-2]. 卫星调度是基于用

户需求, 在综合考虑卫星资源与观测任务需求的基础上, 将观测资源无冲突地分配给多个观测任务^[3]. 在过去的几十年中, 卫星调度问题得到了深入研究, 其中关于卫星静态调度的研究数量较多, 即假设所有成像任务在调度之前已经提交, 一旦生成调度方案就不

收稿日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-06-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073341); 湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(2019JJ20026).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: mchh99@csu.edu.cn.

再发生改变,直到所有任务都完成^[49]。

然而,对地观测资源是一种稀缺资源且工作环境复杂多变,实际中卫星观测活动会受到多种因素的影响,如卫星应用的环境改变、用户的需求改变、云层影响、太空中的电磁干扰等^[10-11]。上述情况都将导致初始调度方案无法继续执行,需要对初始调度方案进行及时调整以满足用户需求,即应急调度问题^[12]。在应急调度中,任务多具有较强的时效性且以随机方式到达,具有很强的不确定性。此时不仅要求调度算法具有应急调度能力,还需要满足快速响应、效果稳定、与原始方案扰动较小等要求^[13]。

虽然关于卫星应急调度的研究少于卫星静态调度,但仍有一定数量的研究成果。卫星的应急调度问题可视为一类带有时间窗口的并行机调度问题,目前的动态调度研究中,启发式方法是一种被广泛使用的方法。如: Angel-Bello等^[14]针对动态环境下的车间调度问题设计了两种启发式求解方法; Bahroun等^[15]采用分阶段反应式策略解决了动态单机调度问题。对于卫星应急调度,由于应急任务的高时效性要求,大部分研究者都采用了启发式的求解方法。如贺川等^[16]考虑了新任务的不定时到达,建立了多星应急调度的约束满足模型,并设计了一种启发式的滚动优化策略对到达的新任务进行调度,但是这种方法并未考虑对原始调度方案的利用。如果完全舍弃初始调度方案,将新任务与原有任务一起重新使用静态调度算法进行规划,则在面对大规模任务调度时很难满足实时性要求,因此,在动态调度过程中应合理利用初始调度结果^[17]。

一些研究者,如: Verfaillie等^[18]在对法国航空局 SPOT 卫星调度问题的研究中,提出了一种针对单星有新任务到达的动态调度求解思想,将新任务无冲突地插入原始调度方案; 邱涤珊等^[19]则考虑了在原始调度方案的基础上对新到达的应急任务进行合并,建立了多星应急调度的数学规划模型,并设计了一种启发式任务合成策略; Wang等^[20]同样将新任务的到达作为不确定性因素,建立了多星应急调度的多目标规划模型,并基于原始调度方案提出了一种启发式调度方法。上述方法虽然对原始调度方案影响较小,但并未考虑使用应急任务对原始任务进行替换。仅仅考虑无冲突地插入或者合并应急任务并不能够实现观测收益值的最大化,因此,需要设计以原始调度方案为依据,能够实现应急任务插入与原始任务换出的应急调度算法。

变邻域搜索是指通过改变搜索过程中邻域结构

的大小和类型,从而避免局部最优的方法^[21]。这一思想最早由 Mladenović等^[22]提出,通过利用不同动作构成的邻域结构进行交替搜索,能够在集中性与疏散性之间达到很好的平衡^[23]。变邻域搜索在车间调度问题中得到了广泛的应用,如 Sevkli等^[24]在2006年首次将变邻域搜索应用到车间调度问题中,并提出变邻域搜索的关键在于如何调整邻域搜索策略。变邻域搜索同样适用于卫星调度领域。李菊芳等^[25]建立了多星调度的数学模型,并提出了一种变邻域禁忌搜索算法以实现任务的调度,但是面向的是卫星的静态调度,并未考虑新任务到达情况下的应急调度。黄小军等^[26]建立了电子卫星的动态调度模型,并提出了一种变邻域搜索的启发式调度方法,但是只考虑了任务移位邻域的设计与使用,通过大量的任务移位操作优化原有调度计划,并对应急任务进行插入和替换操作,而且该方法并未考虑针对应急任务的调度顺序设计相应的邻域结构和邻域选择策略的动态调整,当应急任务收益值相差较大时容易陷入局部最优解。

综上,本文借鉴变邻域搜索的思想提出一种基于动态邻域结构的卫星应急调度算法 (satellite emergency scheduling algorithm based on dynamic neighborhood, SESA-DN)。首先,卫星调度流程被分为当前待调度任务确定、观测资源匹配、应急任务插入与替换等阶段。在此基础上设计多种类型的邻域结构和动态选择策略,能够以原始调度方案为基础,根据当前任务调度情况对邻域结构进行动态调整,快速生成应急调度方案。本文的主要创新点如下:

1) 针对卫星应急调度问题设计一种新的调度算法,能够依据当前应急任务调度结果进行有效反馈,动态调整邻域结构使用类型;

2) 针对任务调度顺序确定和观测资源匹配设计出多种类型的邻域结构和选择策略,能够充分利用原始调度方案,提高调度收益。

1 问题描述与建模

通常情况下,对地观测卫星采用近地极轨道环绕地球飞行,在前进过程中卫星可以通过自身侧摆将星载设备对地面目标进行扫描。如图1所示,每当卫星飞过目标上空时,都会产生一个扫描条带,对条带覆盖范围内的目标进行扫描成像^[27]。观测条带的宽度和长度取决于卫星的高度、传感器的视场角、卫星偏转角和传感器的观察持续时间。

卫星在一天时间里环绕地球多圈,即具有多个轨道圈次,因此,在一个调度周期里可能多次经过目标上空。卫星经过目标上空时的每一个覆盖条带对应

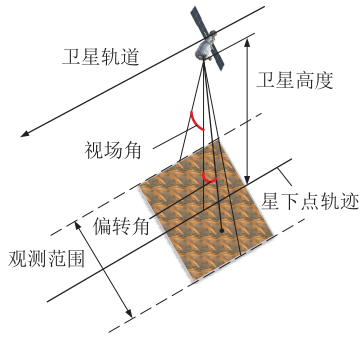


图1 卫星覆盖能力

一个可见时间窗口,目标只能在这个可见时间窗口内被观测.如图2所示,一颗卫星在不同的轨道上对同一目标可能都存在可见时间窗口.因此以卫星轨道作为观测资源,可以有效避免以卫星作为观测资源所产生的时间窗口不唯一的问题.

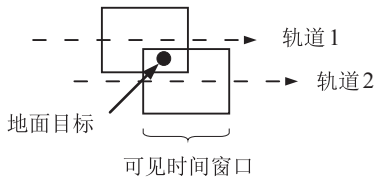


图2 多可见时间窗口

卫星中心将用户提交的观测需求转化为标准任务,生成无冲突的调度方案并通过地面站进行指令上注.但在实际应用中可能会遇到因偶然事件而引发的应急任务,这类任务往往具有时间不确定性、紧迫性以及数量不确定性,需要在规定时间内完成(否则将失去其观测价值),无法等待至下一调度周期.基于这种观测需求,需要以原始调度方案为基础,实现对应急任务的快速插入和原始调度方案的调整.

1.1 基本假设

在卫星应急调度中,导致调度方案进行动态调整的因素有许多,其中新任务的到达是一类主要的动态来源.为了方便建模,本文在参考以往研究^[2,8-9,13,19]的基础上做出如下假设:

- 1) 已知原始调度方案;
- 2) 不存在原始任务的变更;
- 3) 只考虑新任务的到达,不考虑云层遮挡、资源变更、敌方干扰等其他因素;
- 4) 所有任务均为点目标,一个点目标对应一个观测任务;
- 5) 任务只需要被成功观测一次即可,不考虑对任务的重复观测.

1.2 优化目标及约束条件

基于以上假设,本文建立一个卫星应急调度的整数规划模型,使用 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ 表示任务集

合,其中 N 为任务的数量(包括原始调度方案的任务和应急任务).使用 ET 表示应急任务集合,则有 $ET \in T$. 对于每一个任务 i 都有一个与之对应的调度收益值 p_i ,代表成功观测任务 i 所带来收益.

将卫星轨道作为观测资源,使用 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ 表示观测资源集合,其中 M 为轨道数量.使用 $[tws_{ij}, twe_{ij}]$ 表示轨道 j 对任务 i 的可见时间窗口,其中 tws_{ij} 和 twe_{ij} 分别表示窗口的起始时间和终止时间,任务只有在这个窗口内才能够被观测.使用决策变量 $x_{ij} \in \{0, 1\} (i \in T, j \in R)$ 表示任务 i 是否被成功调度:若 $x_{ij} = 1$,则表示任务 i 在轨道 j 上被成功调度;反之 $x_{ij} = 0$.

1.2.1 目标函数

多星应急调度的目标函数如下所示:

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot p_i, \tag{1}$$

为总体完成任务收益值,即原始调度方案上的任务以及应急任务被完成所获得的收益值之和最大化.

1.2.2 约束条件

卫星的观测活动是一个十分复杂的过程,在实际应用中要满足许多约束条件^[8-30],具体如下.

1) 任务唯一性约束.

任务 i 只需要被成功观测一次,无需重复观测,即

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} \leq 1, \forall i \in T. \tag{2}$$

2) 能量约束.

观测任务 i 需要消耗一定的能量,使用 e_i 表示观测任务 i 所消耗的能量, E_j 表示轨道 j 的能量阈值.观测任务所消耗的能量之和不得超过 E_j ,即

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot e_i \leq E_j, \forall j \in R. \tag{3}$$

3) 存储容量约束.

任务 i 的观测数据会占用存储空间.使用 d 表示单位时间所占空间, D_j 表示轨道 j 的存储容量阈值.观测任务所占容量之和不得超过 D_j ,即

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot (twe_{ij} - tws_{ij}) \cdot d \leq D_j, \forall j \in R. \tag{4}$$

4) 时间窗口约束.

卫星在执行相邻观测任务之间需要进行姿态调整,此外,还需要进行设备关机、开机、姿态稳定等操作.使用 θ_{ij} 表示卫星在轨道 j 上观测任务 i 的本体姿态角度, t_o 为设备操作所消耗的时间, v 为卫星侧摆速率.任务 i 与相邻的后续任务 h 之间需要满足如下时

间窗口约束:

$$x_{ij} \cdot \left(\text{tws}_{hj} - \text{twe}_{ij} - t_o - \frac{|\theta_{ij} - \theta_{hj}|}{v} \right) \geq 0. \quad (5)$$

2 基于动态邻域结构的应急调度方法

本文将应急调度分为3个步骤:当前待调度任务的确定、应急任务与观测资源的匹配、应急任务的插入与替换. 其中,当前待调度应急任务的确定及其观测资源的匹配使用了动态邻域结构,会在每次调度时进行动态调整,算法通过动态邻域搜索提高解的质量. 应急任务插入与替换要符合以下要求:

- 1) 若应急任务可以直接插入,则直接插入该任务并将其从应急任务集合ET中移除;
- 2) 当应急任务与原有任务冲突而无法实现插入时,并不直接放回ET中,而是尝试替换原有任务;
- 3) 若应急任务无法替换原有任务,则依旧将其作为未调度任务放回ET中,不进行原有任务的取消;
- 4) 若应急任务替换了原有任务,则被替换的原有任务成为新的应急任务,并被放入ET中,按照调度算法等待调度.

2.1 邻域结构设计

针对当前待调度任务确定和资源匹配这两个关键步骤,本文设计了调度顺序邻域结构与分配轨道邻域结构. 定义 $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}$ 为调度顺序邻域结构. 其中: ε_1 为基于贪婪准则的调度顺序邻域结构, ε_2 为基于随机准则的调度顺序邻域结构. 通过选择 ε 的类型,

在确定任务调度顺序时实现不同调度策略的动态使用. 定义 $\kappa = \{\kappa_1, \kappa_2\}$ 为分配轨道邻域结构. 其中: κ_1 为基于贪婪准则的分配轨道邻域结构, κ_2 为基于随机准则的分配轨道邻域结构. 通过选择 κ 的类型,在确定分配轨道时实现不同调度策略的动态使用. 上述邻域结构具体释义如下.

1) 基于贪婪准则的调度顺序邻域结构.

当 $\varepsilon = \varepsilon_1$ 时,采用贪婪策略确定应急任务的调度顺序. 当进行应急任务重新调度时,首先选择任务收益值 p_i 较高的应急任务作为当前待调度任务.

2) 基于随机准则的调度顺序邻域结构.

当 $\varepsilon = \varepsilon_2$ 时,采用随机策略确定应急任务的调度顺序,在应急任务进行重新调度时,随机选择应急任务作为当前待调度任务进行调度.

3) 基于贪婪准则的分配轨道邻域结构.

当 $\kappa = \kappa_1$ 时,采用贪婪策略确定应急任务所要分配的轨道,在对应急任务进行轨道分配时,优先选择可见时间窗口 tws_{ij} 最早的轨道进行任务分配.

4) 基于随机准则的分配轨道邻域结构.

当 $\kappa = \kappa_2$ 时,采用随机策略确定应急任务所要分配的轨道,在对应急任务进行轨道分配时,随机选择对任务具有观测能力的轨道.

动态邻域搜索通过动态选择 ε 和 κ 的邻域类型来确定当前待调度任务和与之匹配的观测资源,进而实现应急调度,具体搜索过程如图3所示.

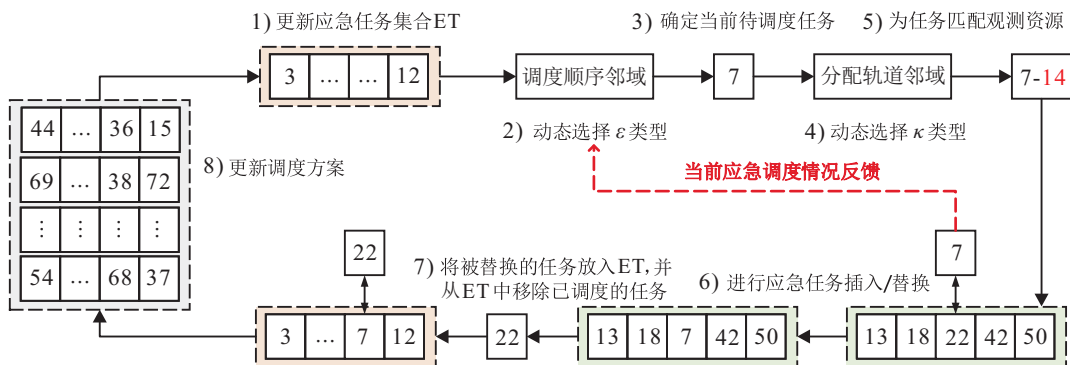


图3 动态邻域搜索过程

- 1) 更新应急任务集合ET.
- 2) 动态选择调度顺序邻域 ε 的类型.
- 3) 根据 ε 从ET中确定当前待调度的应急任务.
- 4) 动态选择分配轨道邻域 κ 的类型.
- 5) 根据 κ 为当前待调度任务匹配观测资源,如图3中为应急任务7匹配的观测资源是轨道14.
- 6) 将当前待调度应急任务通过插入/替换操作在原始调度方案上进行重新调度,如图3所示,使用应急任务7替换原始调度方案中的任务22,并将调度情

- 况进行反馈.
- 7) 若应急任务能够插入原始调度方案,则不产生新的未被调度任务,此时只需要将应急任务从集合ET中移除即可;若原始任务被替换,则原始任务成为新的应急任务,如图3中任务22成为新的应急任务,此时不仅要移除任务7,还需要把任务22放入应急任务集合ET中.
- 8) 更新调度方案,当前应急任务调度流程完成. 在整个动态邻域搜索过程中,当前应急任务调度

结果会对 ε 进行反馈,进而影响选择下一应急任务时 ε 的类型. κ 的类型选择则不受调度结果影响,而是根据概率进行选择.这两种邻域动态选择策略各不相同,以避免算法陷入局部最优.

2.2 动态选择策略

动态邻域搜索过程包括 ε 和 κ 两个邻域动态选择.这两种动态选择策略是基于不同准则设置的,能够实现邻域结构类型的动态调整,从而提高算法的全局搜索能力,具体如下所示.

1) ε 选择策略.

ε 的选择策略是基于当前待调度任务 i 的完成情况而进行调整的.若当前被调度的任务 i 成功实现了插入或替换,则仍使用当前的 ε 类型;否则对 ε 的类型进行更换.如下所示:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1, \text{ 初始}; \\ x_{ij} = 1, \text{ 不更改}\varepsilon\text{类型}; \\ x_{ij} = 0, \text{ 更改}\varepsilon\text{类型}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\forall i \in T, \forall j \in R$. 式(6)表明:在初始情况下 $\varepsilon = \varepsilon_1$;若任务 i 成功实现了插入或替换,则不更改 ε 类型;反之则更改 ε 的类型.例如 ε 当前类型若为 ε_1 ,则更换为 ε_2 ;若 ε 当前类型为 ε_2 ,则更换为 ε_1 .

2) κ 选择策略.

κ 的选择策略不受调度结果影响,而是基于概率原则设计的.定义 pc 为一个大小在区间(0,1)内的概率标准值,定义 pro 为一个大小随机产生在区间(0,1)内的随机概率值.当 pro 大于 pc 时,使用 κ_1 ;否则使用 κ_2 .即

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_1, \text{ } pro > pc; \\ \kappa_2, \text{ } pro \leq pc. \end{cases} \quad (7)$$

2.3 应急任务的插入与替换

由于应急任务可能与原始调度方案中的任务存在冲突,在确定应急任务所匹配的卫星轨道之后,尝试对应急任务进行插入与替换操作.任意轨道 j 上的任务 k 与待调度任务 i 之间的冲突判断准则如下式所示:

$$\begin{cases} t_{we_{ij}} + t_o + \frac{|\theta_{ij} - \theta_{kj}|}{v} > t_{ws_{kj}} > t_{ws_{ij}}, \\ \text{或} \\ t_{we_{kj}} + t_o + \frac{|\theta_{ij} - \theta_{kj}|}{v} > t_{ws_{ij}} > t_{ws_{kj}}. \end{cases} \quad (8)$$

若相邻任务之间的可见时间窗口不满足卫星进行姿态转换和稳定等操作所需要的时间,则任务 i 与任务 k 互相冲突.

1) 应急任务插入.

定义 C_{ij} 为在轨道 j 上与应急任务 i 相冲突的任务集合,且 C_{ij} 在每次迭代过程中都将进行更新.若冲突任务集合 $C_{ij} = \emptyset$,则应急任务 i 在轨道 j 所对应的可见时间窗口 $[t_{ws_{ij}}, t_{we_{ij}}]$ 内进行观测,这种调度方式不会导致观测收益值的降低.应急任务的插入须满足相邻观测任务之间的姿态转换时间约束、轨道能量约束和存储容量约束,如果有一个约束条件未能满足,则不可以进行任务插入操作.

2) 应急任务替换.

若 $C_{ij} \neq \emptyset$,则可以尝试用任务 i 替换 C_{ij} 中的任务.任务替换可能会造成观测收益值的提升或者降低,这取决于任务 i 的观测收益值与 C_{ij} 中任务的观测收益值.为了提升观测收益值,按照下式对任务替换进行判断:

$$\begin{cases} p_i \geq \sum_{k \in C_{ij}} p_k, \text{ 进行替换}; \\ p_i < \sum_{k \in C_{ij}} p_k, \text{ 不进行替换}. \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表明:若任务 i 的观测收益值高于等于 C_{ij} 中任务的观测收益值之和,则使用任务 i 替换 C_{ij} 中的任务;否则不能进行替换.应急任务的替换同样需要满足相邻观测任务之间的姿态转换时间约束、轨道能量约束和存储容量约束.如果有一个约束条件未能满足,则不可以进行任务替换操作.

定义 $n \in [1, G]$ 为当前迭代次数,其中 G 表示算法的最大迭代次数.于是,SESA-DN算法步骤如下:

step 1: 参数初始化.

step 2: 根据 ε 选择当前待调度任务 i .

step 3: 根据 pro 与 pc 值的比较动态选择 κ 类型.

step 4: 根据 ε 为任务 i 选择观测资源 j .

step 5: 更新任务 i 在轨道 j 的冲突任务集合 C_{ij} ,并按照式(8)进行任务冲突判断.

step 6: 若任务 i 与 C_{ij} 中的所有任务都不存在冲突,且插入任务 i 后仍满足约束(2)~(5),则直接在轨道 j 上插入任务 i ,并将任务 i 从应急任务集合 ET 中移除;否则尝试进行任务替换.

step 7: 若任务 i 与 C_{ij} 中的任务满足式(9)的替换条件,则用任务 i 替换轨道 j 上的冲突任务,此时将 C_{ij} 中的任务放入应急任务集合 ET ;若不满足替换条件,则仍将任务 i 放入 ET 中.

step 8: 更新待应急任务集合 ET 和调度方案.

step 9: 依据任务 i 的完成情况按式(6)调整 ε 的类型.

step 10: 循环 step 2~step 9 直至集合 ET 为空或达到算法迭代次数 G .

step 11:输出应急调度方案.

3 仿真实验

实验计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU 2.50 GHz, 内存为 4 G, 使用 Matlab 2016a 进行编程. 多星协同观测场景仿真参数设置如表 1 所示.

表 1 仿真场景参数

场景历元	卫星数量	任务观测收益值	坐标范围
24 h	10	[1, 10]	经度 $15^\circ \sim 45^\circ$ 纬度 $80^\circ \sim 120^\circ$

在仿真场景中, 卫星使用星载传感器对地面目标进行观测, 卫星轨道仿真参数设置如表 2 所示, 卫星能力参数设置如表 3 所示.

表 2 卫星轨道仿真参数

参数类型	参数值
轨道半长轴 / km	6678.14
偏心率	0
倾角 / ($^\circ$)	8.5 \ 28.5 \ 48.5 \ 68.5 \ 88.5 \ 108.5 \ 128.5 \ 148.5 \ 158.5 \ 168.5
真近点角 / ($^\circ$)	0
近地点幅角 / ($^\circ$)	0
升交点赤经 / ($^\circ$)	0

表 3 卫星能力参数

E_j	D_j	t_o	v	G	e_i	d_i
300	2400	13 s	$1^\circ/\text{s}$	100	3	2

实验根据仿真场景设置了 C1、C2、C3、C4 共 4 种原始调度方案, 原始任务均在经度 $15^\circ \sim 45^\circ$ 、纬度 $80^\circ \sim 120^\circ$ 范围内随机生成, 任务之间不存在冲突, 符合实际使用中的卫星调度需求.

参数 pc 的取值对算法的使用效果直接产生影响, 本文设置了对参数 pc 的取值实验, 在 C1 场景下将 SESA-DN 在应急任务数量 10~100 情况下重复运行 25 次, 取调度收益的平均值, 实验结果如表 4 所示. 由表 4 可知, pc 取值为 0.5 时其调度结果稳定优于其他情况, 因此将 pc 值设置为 0.5.

表 4 参数 pc 实验结果

pc 值	应急任务数量									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.1	659	698	743	791	844	885	942	992	1034	1069
0.2	661	698	743	793	844	889	942	992	1040	1079
0.3	661	699	744	793	845	890	942	998	1043	1080
0.4	661	699	744	793	845	890	946	997	1043	1077
0.5	661	700	745	793	846	890	946	998	1043	1080
0.6	661	698	745	793	846	890	946	998	1043	1077
0.7	661	698	744	791	845	889	945	998	1043	1077
0.8	661	698	744	791	845	888	945	992	1042	1074
0.9	661	698	744	791	844	884	941	992	1040	1074

实验设置了在不同原始调度方案以及不同应急任务数量下的应急调度, 在参考以往研究的基础上^[18-19,26,28,31-32], 将本文所提出 SESA-DN 算法与先到先服务算法 (first come first service, FCFS)、截止期越早越优先算法 (earlier deadline first, EDF)、贪婪搜索算法 (greedy search, GS)、随机搜索算法 (random search, RS)、只考虑任务插入算法 (only consider task insert, OCTI) 和基于变邻域搜索的动态调度算法 (dynamic scheduling based on variable neighborhood, DSVN) 进行了比较. 将上述算法在 4 种不同原始调度方案的基础上, 在应急任务数量 10~100 情况下进行应急调度. 所有算法重复运行 25 次并对其求解结果取平均值.

研究的优化目标为任务的调度收益值最大化, 图 4 为不同原始调度方案情况下的应急调度收益值曲线. 由实验结果可知, 本文所设计的 SESA-DN 算法在不同原始调度方案情况下以及不同应急任务数量情况下所产生的应急调度方案的调度收益值大都优于所对比的算法. 几类对比算法与 SESA-DN 算法相比, 在应急任务数量不断增加的情况下其求解效果都有不同程度的下降. 在应急任务数量为 10 的情况下, SESA-DN 与 RS、DSVN 算法的调度收益值差别不大. 但随着应急任务数量的增加, 应急调度难度增大, 对比算法逐渐呈现出求解能力不足的问题.

GS 算法采用贪婪策略, 很容易陷入局部最优解. OCTI 算法只考虑在原始调度方案上无冲突地插入应急任务, 当应急任务数量增多时应急任务与原始调度方案冲突较大, 很难将应急任务进行插入, 此时 OCTI 算法难以获得高质量的应急调度方案.

DSVN 算法虽然采用了变邻域搜索, 在调度计划 C2、20 个应急任务和调度计划 C3、10 个应急任务情况下的调度收益值高于其他算法, 但因其使用的是仅考虑任务移位的邻域结构, 并未考虑对任务调度顺序的邻域设计和邻域选择策略的动态调整, 在确定应急任务调度顺序时只是优先选择收益值较高的任务进行应急调度, 故在应急任务收益值差距较大的情况下很容易陷入局部最优.

FCFS 和 EDF 算法由于采用单一类型的搜索策略, 单纯改变任务的调度顺序并不能动态调整任务与观测资源的匹配策略. 且随着应急任务数量增加, FCFS 和 EDF 呈现算法能力不足的问题, 难以产生新解, 在调度收益值上要远远小于 SESA-DN 算法. RS 算法由于采用随机策略, 尽管可以通过调整应急任务调度顺序和资源匹配方案, 但是不能根据任务的

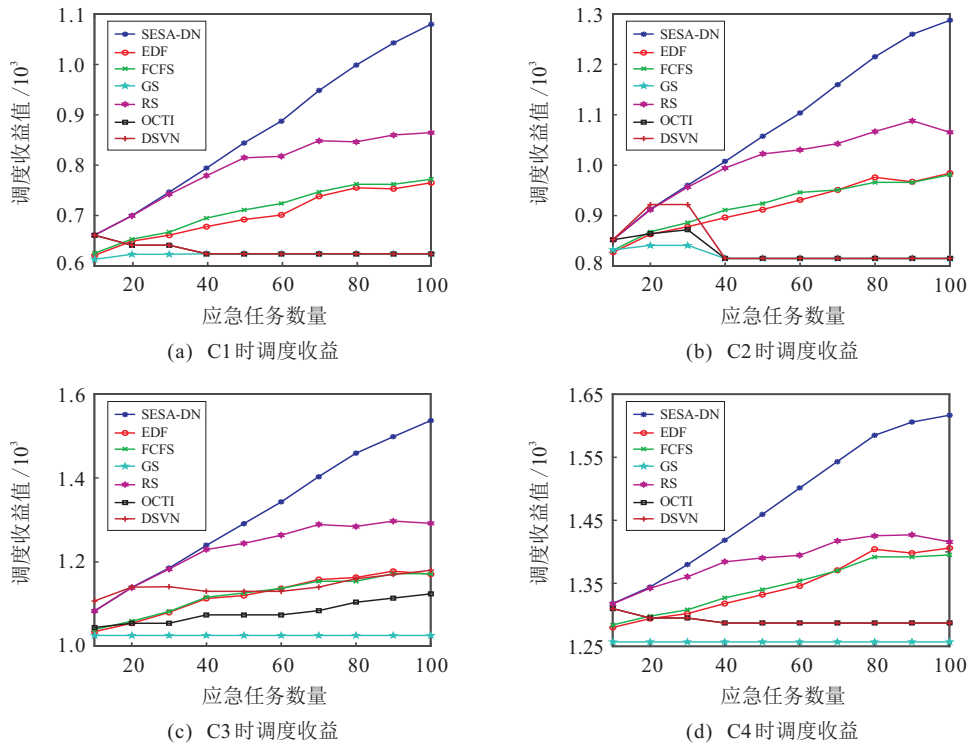


图4 不同设置下的调度收益

调度情况对搜索方向进行调整,难以有效均衡优化目标和解的多样性.随着调度规模的增大,其调度收益值同样远远小于SESA-DN算法.

应急调度还要求算法具有较快的运行速度以及对应急任务的有效调度,算法的运行时间和应急任务的完成情况同样是重要的参考指标.表5为各算法在不同原始调度方案情况下的应急调度实验结果.由表5可知,在算法运行时间方面,SESA-DN与FCFS、EDF、GS、RS、OCTI算法的差别不大,最大运行时间均不超过0.5 s,而DSVN算法的运行时间最长.这是因为DSVN算法只使用任务移位邻域,需要对大量的任务进行移位操作,进而对应急任务进行插入或替换,导致算法运行速度较慢.而SESA-DN算法能够在相似的时间内取得更好的调度结果,所完成的应急任务数量稳定优于所对比的算法,且这种优势会随着应急任务数量的增加而更加明显,其应急任务完成率能够达到53%~100%.其他算法的应急任务完成率则随着应急任务数量的增加明显下降,其最小值均在50%以下.

GS算法的应急任务完成情况最差,在C3原始调度方案、10和20个应急任务以及整个C4原始调度方案情况下完成的应急任务数量为0,其余情况下应急任务完成数量最多不超过6个,远远小于其他算法.这是由于GS算法采用贪婪策略,随着原始调度计划的变化以及应急任务数量的增加,很难实现将应急任务匹配到合适的资源.而DSVN算法由于任务调

度顺序无法调整,导致优先被调度的永远是收益值较高的任务,随着调度规模的增大,解的多样性下降,整体调度收益值偏低.

EDF和FCFS算法的应急任务完成情况差别不大,但是在不同情况下均小于SESA-DN算法.这是由于EDF和FCFS算法只改变调度顺序,在资源匹配上依靠单一的搜索策略,随着调度规模的增大,容易陷入局部最优,难以产生新解.OCTI算法虽然也采用了变邻域搜索策略,但是只考虑在原始调度方案上无冲突地插入应急任务,这虽然能够保证对原始调度计划无影响,但是难以完成对应急任务的调度.而RS算法的应急任务调度结果虽然优于其他所对比的算法,但仍然远远小于SESA-DN算法.

应急任务完成数量代表算法对应急任务的调度能力,但是,应急调度算法同样要考虑任务的总体完成情况,即原始调度方案的任务与应急任务的整体完成情况.图5为不同算法在C1~C4情况下的任务总体完成情况结果.

由图5可知SESA-DN算法总体任务完成率在C1~C4情况下可以稳定保持在80%以上,表明SESA-DN算法能够有效利用原始调度方案,在优化调度收益值的同时实现对原始方案的最小扰动.而对比算法很难在不同情况下保证较高的总体任务完成率.其中:GS、OCTI、DSVN算法的任务总体完成率较低;RS、EDF和FCFS算法随着应急任务数量的增加其完成率有明显的下降趋势,且下降速度明显高于SESA-

表5 各算法实验结果情况对比

原始方案	应急任务数量	应急任务完成数量 / 运行时间 / s						
		SESA-DN	EDF	FCFS	GS	RS	OCTI	DSVN
C1	10	10/0.148 3	4/0.201 8	4/0.168 0	2/0.163 9	10/0.153 5	10/0.174 0	10/0.783 1
C1	20	16/0.158 8	8/0.219 3	8/0.191 4	3/0.163 6	16/0.157 1	5/0.213 5	5/0.879 8
C1	30	25/0.177 3	11/0.228 2	11/0.192 6	3/0.162 2	24/0.164 2	5/0.210 3	5/0.777 2
C1	40	32/0.172 8	15/0.235 0	15/0.208 8	3/0.177 5	29/0.135 9	3/0.254 5	3/0.730 4
C1	50	40/0.187 4	18/0.258 8	18/0.210 0	3/0.163 8	35/0.129 9	3/0.263 2	3/0.718 2
C1	60	46/0.186 0	20/0.287 5	20/0.249 0	3/0.178 6	35/0.123 7	3/0.295 4	3/0.730 4
C1	70	54/0.195 4	23/0.317 6	23/0.261 9	3/0.170 6	39/0.123 8	3/0.335 8	3/0.746 1
C1	80	61/0.201 7	25/0.367 8	25/0.284 7	3/0.176 5	38/0.120 8	3/0.345 6	3/0.738 6
C1	90	68/0.207 4	25/0.379 5	25/0.313 5	3/0.198 7	40/0.121 4	3/0.372 0	3/0.746 6
C1	100	73/0.216 2	26/0.407 7	26/0.341 0	3/0.217 1	39/0.124 5	3/0.401 1	3/0.751 1
C2	10	10/0.143 7	6/0.144 6	6/0.143 8	6/0.150 0	10/0.159 9	10/0.152 4	10/0.592 3
C2	20	19/0.158 8	12/0.155 0	11/0.160 0	6/0.166 2	19/0.186 6	19/0.179 4	9/0.665 4
C2	30	28/0.169 2	15/0.186 8	14/0.182 0	6/0.162 2	27/0.174 6	27/0.179 3	10/0.669 1
C2	40	34/0.165 1	18/0.234 2	17/0.187 4	3/0.175 7	32/0.171 2	32/0.203 1	3/0.633 5
C2	50	42/0.164 5	20/0.211 0	19/0.211 0	3/0.168 8	36/0.155 6	36/0.218 4	3/0.617 9
C2	60	49/0.169 0	23/0.228 0	22/0.231 9	3/0.178 4	38/0.164 2	38/0.302 3	3/0.623 0
C2	70	57/0.190 0	24/0.256 9	23/0.262 0	3/0.186 5	40/0.164 2	40/0.336 0	3/0.637 9
C2	80	64/0.188 8	27/0.279 9	25/0.280 8	3/0.194 2	42/0.151 2	42/0.340 2	3/0.631 1
C2	90	70/0.197 8	26/0.310 9	25/0.313 4	3/0.179 7	44/0.158 8	44/0.387 4	3/0.639 1
C2	100	75/0.213 3	28/0.343 8	28/0.374 6	3/0.211 4	42/0.156 7	42/0.389 2	3/0.650 5
C3	10	9/0.154 2	2/0.149 1	2/0.160 2	0/0.135 8	9/0.169 0	9/0.177 6	10/0.781 6
C3	20	17/0.153 6	5/0.168 8	5/0.205 5	0/0.143 7	17/0.155 8	17/0.227 4	9/0.776 5
C3	30	26/0.166 5	10/0.185 6	10/0.228 0	1/0.161 9	26/0.161 4	26/0.243 1	10/0.796 1
C3	40	34/0.154 6	15/0.194 4	15/0.238 7	2/0.168 6	32/0.154 5	32/0.275 6	10/0.769 6
C3	50	42/0.151 0	17/0.218 7	17/0.258 5	2/0.168 8	34/0.156 1	34/0.310 9	10/0.761 6
C3	60	50/0.159 4	19/0.241 5	19/0.239 8	2/0.176 3	38/0.156 1	38/0.319 9	10/0.760 2
C3	70	59/0.177 6	21/0.275 8	21/0.268 0	2/0.179 7	41/0.156 6	41/0.338 5	11/0.771 1
C3	80	66/0.179 9	22/0.301 3	21/0.313 8	2/0.196 2	40/0.138 2	40/0.368 6	13/0.764 7
C3	90	71/0.191 6	24/0.344 6	24/0.370 4	3/0.190 5	41/0.127 8	41/0.402 0	15/0.676 5
C3	100	77/0.211 8	25/0.391 6	24/0.415 4	3/0.239 9	41/0.123 8	41/0.428 3	16/0.673 0
C4	10	9/0.145 7	4/0.149 3	4/0.144 5	0/0.132 9	9/0.153 7	9/0.139 6	7/0.668 8
C4	20	13/0.156 8	6/0.170 7	6/0.166 6	0/0.141 5	12/0.166 9	12/0.163 4	4/0.645 5
C4	30	19/0.177 1	8/0.200 3	8/0.192 0	0/0.148 4	16/0.163 1	16/0.184 4	4/0.644 3
C4	40	24/0.197 2	10/0.220 2	10/0.212 7	0/0.143 1	19/0.164 5	19/0.196 6	3/0.631 0
C4	50	30/0.193 6	12/0.241 3	12/0.241 2	0/0.158 0	20/0.153 7	20/0.213 4	3/0.624 2
C4	60	36/0.206 0	14/0.275 4	14/0.287 1	0/0.171 0	21/0.164 8	21/0.243 3	3/0.624 9
C4	70	41/0.223 1	16/0.310 3	16/0.296 0	0/0.167 0	24/0.159 2	24/0.265 0	3/0.655 5
C4	80	47/0.230 4	20/0.342 2	19/0.315 2	0/0.169 4	24/0.143 7	24/0.279 4	3/0.637 5
C4	90	51/0.254 4	20/0.356 4	19/0.345 1	0/0.166 2	25/0.156 7	25/0.303 0	3/0.644 4
C4	100	53/0.281 0	21/0.405 9	20/0.365 2	0/0.191 0	23/0.150 0	23/0.337 7	3/0.651 7

DN算法.

综上,本文所设计的SESA-DN算法通过设计多种类型的邻域结构,以及设计有效的邻域结构选择策略,能够依据应急任务完成情况进行有效反馈,对算法的邻域结构进行动态调整,最后通过对应急任务的插入与替换获得高质量的应急调度方案.大量仿真实验表明,这种基于动态邻域结构的多星调度算法在实际的卫星应急任务调度中具有更强适用性,在应急调度收益、算法运行速度、应急任务完成数量、总体任务完成率方面均取得了良好的调度结果.

4 结论

本文设计了一种基于动态邻域结构的卫星应急

调度算法,能够根据任务完成情况动态调整邻域结构以实现应急任务调度顺序确定和资源匹配,并通过任务的插入与替换操作生成应急调度方案.本文进行了大量的仿真实验,测试了不同原始调度方案以及应急任务数量差异下的算法性能.实验结果表明,本文所设计的SESA-DN算法相比于其他启发式算法,在调度收益值、应急任务完成数量、任务总体完成率各方面具有明显优势,在不同实验场景下都能取得更优的调度结果,且能够满足卫星应急调度的时效性要求.对比实验充分验证了SESA-DN算法在卫星应急调度问题中的适应性和鲁棒性,为类似问题的求解提供了新思路.

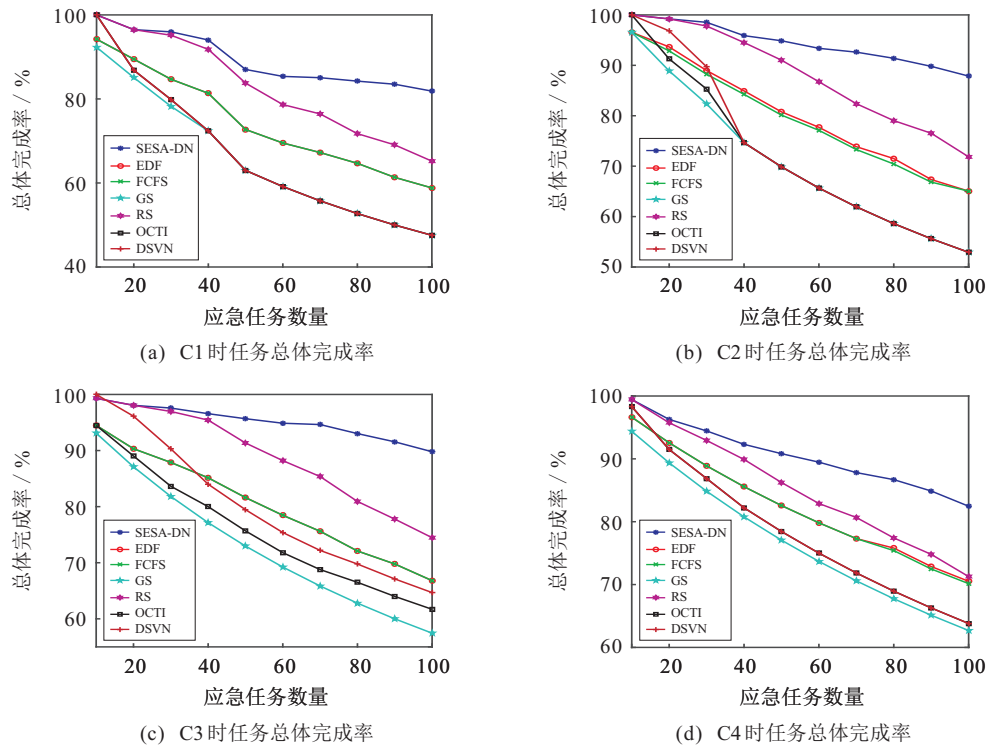


图5 不同设置下的任务总体完成率

参考文献(References)

- [1] 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, and Cybernetics — Part A: Systems and Humans, 2005, 35(2): 213-223.
- [2] Wu G H, Pedrycz W, Li H F, et al. Coordinated planning of heterogeneous earth observation resources[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(1): 109-125.
- [3] Liu S F, Hodgson M E. Satellite image collection modeling for large area hazard emergency response[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 118: 13-21.
- [4] Wolfe W J, Sorensen S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain[J]. Management Science, 2000, 46(1): 148-166.
- [5] 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.
- [6] Vasquez M, Hao J. Upper bounds for the SPOT 5 daily photograph scheduling problem[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2003, 7(1): 87-103.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Wang X W, Han C, Zhang R, et al. Scheduling multiple agile earth observation satellites for oversubscribed targets using complex networks theory[J]. IEEE Access, 2019, 7: 110605-110615.
- [10] Wang X W, Song G P, Leus R, et al. Robust earth observation satellite scheduling with uncertainty of cloud coverage[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(3): 2450-2461.
- [11] Wang X W, Wu G H, Xing L N, et al. Agile earth observation satellite scheduling over 20 years: Formulations, methods, and future directions[J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(3): 3881-3892.
- [12] Zhai X J, Niu X N, Tang H, et al. Robust satellite scheduling approach for dynamic emergency tasks[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 482923.
- [13] 王建江, 朱晓敏, 吴朝波, 等. 面向应急条件的多星动态调度方法[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1151-1164. (Wang J J, Zhu X M, Wu C B, et al. Multi-satellite dynamic scheduling method for emergencies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1151-1164.)
- [14] Angel-Bello F, Vallikavungal J, Alvarez A. Two approaches to handle the dynamism in a scheduling problem with sequence-dependent setup times[J]. Expert Systems With Applications, 2021, 167: 114137.
- [15] Bahroun Z, Shamayleh A, As'ad R, et al. Flexible decision support tool for dynamic single machine scheduling problems[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2021, 38(3): 213-238.

- [16] 贺川, 邱涤珊, 朱晓敏, 等. 基于滚动优化策略的成像侦察卫星应急调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2685-2694.
(He C, Qiu D S, Zhu X M, et al. Emergency scheduling method for imaging reconnaissance satellites based on rolling horizon optimization strategy[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(10): 2685-2694.)
- [17] 陈浩, 李军, 景宁, 等. 适应任务变化的电磁探测卫星动态调度模型及算法[J]. 信号处理, 2009, 25(11): 1659-1665.
(Chen H, Li J, Jing N, et al. The model and algorithm of dynamic scheduling for electromagnetic detection satellite adapted to task change[J]. Signal Processing, 2009, 25(11): 1659-1665.)
- [18] Verfaillie G, Schiex T. Solution reuse in dynamic constraint satisfaction problems[C]. Proceedings of the Twelfth Conference of the American Association of Artificial Intelligence. Seattle, 1994, 23(1): 307-312.
- [19] 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.)
- [20] Wang J J, Zhu X M, Yang L T, et al. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2015, 81(1): 110-124.
- [21] 王钧, 李军, 陈慧中, 等. 一种应急条件对地观测卫星成像调度方法[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1715-1722.
(Wang J, Li J, Chen H Z, et al. A multi-objective imaging scheduling approach of earth observation satellite for emergent conditions[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1715-1722.)
- [22] Mladenović N, Hansen P. Variable neighborhood search[J]. Computers & Operations Research, 1997, 24(11): 1097-1100.
- [23] Ranjbar M, Saber R G. A variable neighborhood search algorithm for transshipment scheduling of multi products at a single station[J]. Applied Soft Computing, 2021, 98: 106736.
- [24] Sevkli M, Aydin M E. A variable neighbourhood search algorithm for job shop scheduling problems[C]. Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Budapest, 2006, 3906: 261-271.
- [25] 李菊芳, 贺仁杰, 姚锋, 等. 成像卫星集成调度的变邻域禁忌搜索算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3040-3044.
(Li J F, He R J, Yao F, et al. Variable neighborhood tabu search algorithm for integrated imaging satellites scheduling problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(12): 3040-3044.)
- [26] 黄小军, 祝江汉, 马满好. 基于变邻域搜索的电子侦察卫星动态调度问题研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(14): 3414-3418.
(Huang X J, Zhu J H, Ma M H. VNS based electronic reconnaissance satellite dynamic scheduling problem research[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(14): 3414-3418.)
- [27] 陈浩, 景宁, 李军, 等. 一种适应资源变化的电磁探测卫星动态调度方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(24): 7833-7837.
(Chen H, Jing N, Li J, et al. Method for changeable resources in electromagnetic detection satellites dynamic scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(24): 7833-7837.)
- [28] Hall N G, Magazine M J. Maximizing the value of a space mission[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 78(2): 224-241.
- [29] Deng M, Liu B J, Li S M, et al. A two-phase coordinated planning approach for heterogeneous earth-observation resources to monitor area targets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(10): 6388-6403.
- [30] He Y M, Xing L N, Chen Y W, et al. A generic Markov decision process model and reinforcement learning method for scheduling agile earth observation satellites[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020(99): 1-12.
- [31] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 一种有新任务到达的多卫星动态调度模型与方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 35-41.
(Liu Y, Chen Y W, Tan Y J. A modeling and algorithm for the new tasks' arriving in multi-satellites dynamic scheduling[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005, 25(4): 35-41.)
- [32] 吴朝波, 徐培德, 王建江, 等. 一种基于双启发式退出规则的多星实时调度算法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(21): 5235-5241.
(Wu C B, Xu P D, Wang J J, et al. A multi-satellite real-time scheduling algorithm based on double heuristic retraction rules[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(21): 5235-5241.)

作者简介

伍国华(1986—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化与决策、机器学习、调度理论及应用、智能交通与物流系统等研究, E-mail: guohuawu@csu.edu.cn;

杜潇(1996—), 男, 硕士生, 从事智能决策与优化、智能交通、卫星调度的研究, E-mail: du_xiao@csu.edu.cn;

王心慰(1991—), 男, 助研, 博士, 从事机场地面调度、卫星调度的研究, E-mail: wxw4110531@gmail.com;

陈新江(1995—), 男, 硕士生, 从事智能决策与优化、智能交通、卫星调度的研究, E-mail: chenxinjiang@csu.edu.cn;

张雯菲(1996—), 女, 硕士生, 从事智能交通、智能优化算法的研究, E-mail: 503999473@qq.com;

毛成辉(1971—), 男, 副教授, 硕士, 从事交通运输规划与管理等研究, E-mail: mchh99@csu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)