

考虑合成机制的多星应急任务调度

靳 鹏^{1,2}, 唐晓茜^{1,2,*}

(1. 合肥工业大学管理学院, 安徽 合肥 230009; 2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘 要:以应急任务优先调度为原则,保证观测总收益的基础上最小化对原调度序列的扰动是多星应急任务调度领域急需解决的问题。首先,分析应急任务完成时间和观测收益关系,建立考虑时间依赖性收益的数学规划模型。其次,基于遗传算法,提出考虑合成机制的多星应急任务调度算法。设计任务合成、插入和替换算子完成应急任务插入,考虑任务观测收益、序列扰动和最短观测时间设计适应度函数,设计交叉、变异、全局修复算子迭代优化调度序列。最后,通过数值实验表明设计的算法能够显著提高调度质量,适用于多星应急任务调度问题。

关键词:对地观测卫星; 应急任务; 遗传算法; 合成机制

中图分类号: V 19

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.04.25

Multi-satellite emergency task scheduling with merging mechanism

JIN Peng^{1,2}, TANG Xiaoxi^{1,2,*}

(1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the principle of priority scheduling of emergency tasks, it is an urgent problem in the field of multi-satellite emergency task scheduling to minimize the perturbation to the original scheduling sequence on the basis of ensuring the total revenue of observations. Firstly, the relationship between the completion time and the observation revenue of emergency tasks is considered, and a mathematical programming model with time-dependent revenue is established. Besides, a multi-satellite emergency task scheduling algorithm with the merging mechanism based on the genetic algorithm is proposed. In the devised algorithm, task merging operator, task insertion operator and task replacement operator are designed to insert emergency tasks; the fitness function is designed by combining the observation revenue, sequence perturbation and minimum observation time; crossover operator, mutation operator and global repair operator are proposed to iterate and optimize scheduling sequences. Finally, numerical experiments indicate that the designed algorithm can significantly improve the scheduling quality, which is suitable for the multi-satellite emergency task scheduling problem.

Keywords: earth observation satellite; emergency task; genetic algorithm; merging mechanism

0 引 言

对地观测卫星是空间范围内的一种成像资源^[1-2],根据用户对地球表面目标的成像需求,利用星载传感器,在满足卫星成像的约束条件下,对地球表面目标进行观测,获取图

像信息^[3-5]。由于具有成像效果好、覆盖区域广且不受国界限制等优点,在环境监测、资源探测、灾害预警、军事侦察等领域发挥着重要作用^[6]。当地震、火灾等紧急情况发生时,充分利用卫星资源对受灾区域成像已经成为一种获取图像信息的重要手段,能够为救援部门提供重要的决策信息支

收稿日期:2021-03-17; 修回日期:2021-06-21; 网络优先出版日期:2021-11-09。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20211109.1937.011.html>

基金项目:国家自然科学基金(72071064)资助课题

* 通讯作者。

引用格式:靳鹏,唐晓茜.考虑合成机制的多星应急任务调度[J].系统工程与电子技术,2022,44(4):1270-1281.

Reference format: JIN P, TANG X X. Multi-satellite emergency task scheduling with merging mechanism[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(4): 1270-1281.

持。应急任务的观测会对原调度序列产生影响,如何设计高效的卫星应急任务调度方法,在保证观测总收益的基础上最小化对原调度序列的扰动是多星应急任务调度领域急需解决的问题。

应急任务具有两大特点:① 及时性,希望任务越早成像越好。应急任务的到达伴随着期望完成时间,但当任务实际完成时间比期望完成时间晚时,所获得的图像信息仍然有价值^[7];② 随机性,任务到达的时间和数量是不确定的。在轨卫星成像过程中存在卫星状态改变、云层影响^[8-10]或用户需求转变等多种不确定性,导致用户提交的应急任务呈现随机性特点。虽然应急任务的到达是随机的,但调度任务并给卫星上注观测指令是统一完成的。本文在任务统一调度情况下研究多星应急任务调度问题。

卫星对任务观测成像需要满足时间窗、姿态转换时间、存储限制等多方面约束^[11-13]。近年来,用户的观测需求量持续上涨,远大于卫星资源负载能力,星上任务呈现饱和状态。在尽量减少对初始调度序列扰动的情况下完成应急任务调度变得更加复杂。

目前,国内外学者已经对多星应急任务调度问题展开大量研究。文献[14-20]采用蚁群算法、局部迭代搜索算法、粒子群算法和遗传算法等启发式算法完成应急任务调度。文献[21]以最大化任务观测收益和数量为目标,提出直接插入或删除插入(insert directly or insert by deleting, IDD)算法和直接插入、移位插入、删除插入和被删除任务重插入(insert directly, insert by shifting, insert by deleting, and reinsert the tasks deleted, ISDR)算法完成应急任务调度。文献[22]以任务调度总权重最大和应急任务提前完成时间最长为目标,在ISDR算法的基础上加入回溯算子,设计插入、移位、回溯、删除和重插入(insertion, shifting, backtracking, deletion, and reinsertion, ISBDR)算法解决问题。两种算法都以移位、重插入的方式处理常规任务,但都未考虑对初始调度序列的扰动情况。另外,上述文献并未突出应急任务完成时间对观测收益的影响,认为应急任务的观测收益恒定不变。

现实中资源有限、任务繁多,任务以最佳侧摆角独立观测时完成率低且资源利用不充分。因此,学者采用任务合成机制增大任务观测数量和收益,提高卫星资源利用率。文献[23-27]建立合成任务的调度模型,以最大化任务观测收益为目标,采用模拟退火算法、蚁群算法和动态规划算法等启发式算法完成合成任务调度。文献[28-30]应用最小派系划分思想实现任务合成,基于图论建立模型,设计启发式算法求解问题。文献[31]设计启发式规则实现任务合成与动态调度,但未建立相关模型。上述文献都是在常规任务间执行任务合成,并未考虑对应急任务的合成操作。

应用任务合成机制处理应急任务的研究较少。文献[7]侧重于对应急任务合成位置选择的研究,不存在整体寻优过程。文献[32-34]考虑应急任务与常规任务合成的同时以

最大化任务观测收益和最小化序列扰动为目标,设计启发式算法完成应急任务的动态调度。这对原来任务序列的鲁棒性要求较高,调度难度也较大。

本文综合考虑应急任务完成时间和观测收益指标,建立有时间依赖性收益的数学规划模型。将合成机制与遗传算法融合解决多星应急任务调度问题,提出考虑合成机制的多星应急任务调度算法(genetic algorithm with task merging for emergency task scheduling, GA-TM-ETS)。算法以应急任务优先调度为原则,首先设计任务合成、插入、替换等3种算子完成向初始调度序列添加应急任务的操作;其次考虑任务观测收益、序列扰动和最短观测时间等因素设计适应度函数,提高算法搜索速度;最后设计基于组基因的交叉算子和变异算子,结合全局修复算子进行序列寻优。实验表明所设计的GA-TM-ETS算法能够显著提高调度质量,适用于多对地观测卫星应急任务调度。

1 问题描述

对地观测卫星应急任务调度问题有以下描述。

给定一组卫星 S ,在调度周期 H 内存在轨道集合 $O=\{O_1, O_2, \dots, O_j, \dots, O_{|J|}\}$, $|J|$ 为轨道数量。

本文以轨道作为资源的最小调度单元,任一卫星轨道圈次 O_j 的属性可以用六元组 $\langle \sigma_j, \text{span}_j, m_j, M_j, v_j, \gamma_j \rangle$ 表示。其中, σ_j 表示轨道 O_j 上传感器视场角, span_j 表示传感器最长开机时间, m_j 表示传感器单位时间成像的存储系数, M_j 表示轨道最大存储量, v_j 表示传感器偏转速率, γ_j 表示传感器姿态稳定时间。

任一任务 t_i 的属性可以用六元组 $\langle d_i, ws_i^s, we_i^e, \theta_i^s, \omega_i, f_i \rangle$ 表示。其中 d_i 表示任务观测时间长度, ws_i^s 表示任务 t_i 在轨道 O_j 上的观测开始时间, we_i^e 表示任务 t_i 在轨道 O_j 上的观测结束时间, θ_i^s 表示任务 t_i 在轨道 O_j 上的观测侧摆角度, ω_i 表示任务的观测收益, f_i 表示任务期望完成时间。对于常规任务来说,期望完成时间不做限制,观测收益固定;对于应急任务来说,存在期望完成时间,观测收益具有时间依赖性。

任意轨道 O_j 上,存在一组已规划且未执行观测的常规任务调度序列 $\text{Seq}_j = \{t_1^j, t_2^j, \dots, t_n^j\}$, n 为任务数量。调度开始后,根据任务选择规则从应急任务集 TE 中选择任务,并向各常规任务调度序列上安排所选任务。可能的安排方式有任务合成、任务插入和任务替换。

1.1 任务合成

卫星以一定侧摆角和时间窗对任务观测成像时形成观测条带。在一个观测条带内,满足某种约束条件下,将多个地理位置相近的任务同时观测的过程为任务的合成观测。如图1所示,应急任务 t_i 和常规任务 t_r 满足卫星侧摆角约束和传感器单次最长开机时间约束,可以在卫星的一个观测条带内合成观测。

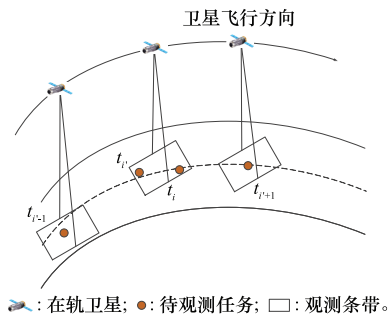


图 1 任务合成图

Fig. 1 Diagram of task merging

1.1.1 侧摆角约束

侧摆角定义为星载传感器沿垂直星下线方向转动而偏离星地连线的角度^[7]。卫星以固定侧摆角执行观测时,在视场角覆盖范围内的多个任务能够合成观测。如图 2 所示,应急任务 t_i 和常规任务 $t_{i'}$ 分别以各自侧摆角度成像,用 $\theta_{i'}$ 表示任务 $t_{i'}$ 在轨道 O_j 上的观测侧摆角。当两任务能够合成观测时,应满足以下约束:

$$\theta_{i'} \cap \theta_i \neq \emptyset \quad (1)$$

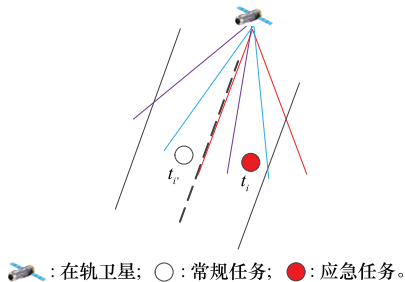


图 2 侧摆角约束

Fig. 2 Swing angle constraint

令两任务侧摆角最小值 $\theta_{\min}^j = \min \{ \theta_{i'}, \theta_i \}$, 侧摆角最大值 $\theta_{\max}^j = \max \{ \theta_{i'}, \theta_i \}$, 任务合成观测需满足卫星视场角覆盖范围内能够对所有任务可见,有以下约束:

$$|\theta_{\max}^j - \theta_{\min}^j| \leq \sigma_j \quad (2)$$

1.1.2 单次最长开机时间约束

卫星传感器的一次开机时长必须满足任务成像时长的需求。如图 3 所示,当应急任务 t_i 和常规任务 $t_{i'}$ 合成时,用 $ws_{i'}^j$ 表示任务 $t_{i'}$ 在轨道 O_j 上的观测开始时间, $we_{i'}^j$ 表示观测结束时间,合成任务 t_{com} 在轨道 O_j 上的观测开始时间 $ws_{\text{com}}^j = \min \{ ws_{i'}, ws_i^j \}$, 观测结束时间 $we_{\text{com}}^j = \max \{ we_{i'}, we_i^j \}$, 有以下约束:

$$we_{\text{com}}^j - ws_{\text{com}}^j \leq \text{span}_j \quad (3)$$

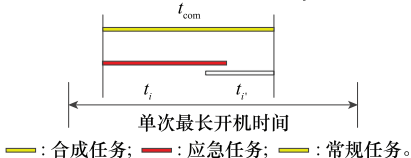


图 3 最长开机时间约束

Fig. 3 Maximum boot time constraint

应急任务 t_i 和常规任务 $t_{i'}$ 合成后在一个观测条带内被看作一个元任务执行观测,有其自身属性。合成任务 t_{com} 在轨道 O_j 上的观测侧摆角度 θ_{com}^j 取各元任务的最佳侧摆角度平均值: $\theta_{\text{com}}^j = (\theta_{i'}^j + \theta_i^j) / 2$; 观测时间窗 TW_{com}^j 为各元任务的观测开始时间最小值和观测结束时间最大值间的时间间隔: $TW_{\text{com}}^j = [ws_{\text{com}}^j, we_{\text{com}}^j]$; 任务合成观测的潜在收益称为联合收益,联合收益系数为 p , 合成任务 t_{com} 的收益 $w_{\text{com}} = p \times (w_i + w_{i'})$ 。

轨道 O_j 上传感器对两连续常规任务 $t_{i'}$ 和 $t_{i'+1}$ 成像时,用 $\theta_{i'+1}^j$ 表示任务 $t_{i'+1}$ 在轨道 O_j 上的观测侧摆角。任务 $t_{i'}$ 观测完成到下一任务 $t_{i'+1}$ 观测开始的姿态转换时间 $c_{i',i'+1}^j$ 表示为 $c_{i',i'+1}^j = |\theta_{i'}^j - \theta_{i'+1}^j| / v_j + \gamma_j$ 。

如图 4 所示,应急任务 t_i 和常规任务 $t_{i'}$ 满足任务合成条件,且合成任务 t_{com} 与前后在轨任务满足时间窗约束和姿态转换约束,则任务 t_i 以任务合成方式执行观测。

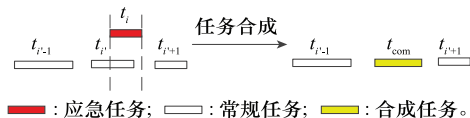


图 4 任务合成

Fig. 4 Task merging

1.2 任务插入

应急任务 t_i 直接插入到轨道 O_j 上常规任务 $t_{i'}$ 和 $t_{i'+1}$ 之间时,应满足:①应急任务 t_i 的观测开始时间不小于常规任务 $t_{i'}$ 的观测结束时间与两任务在轨道 O_j 上的姿态转换时间 $c_{i',i}^j$ 之和,即

$$we_{i'}^j + c_{i',i}^j \leq ws_i^j \quad (4)$$

②任务 $t_{i'+1}$ 的观测开始时间不小于应急任务 t_i 的观测结束时间与两任务在轨道 O_j 上的姿态转换时间 $c_{i,i'+1}^j$ 之和,即

$$we_i^j + c_{i,i'+1}^j \leq ws_{i'+1}^j \quad (5)$$

如图 5 所示,常规任务 $t_{i'}$ 和 $t_{i'+1}$ 之间存在足够长的空闲时间片段,应急任务 t_i 满足任务插入式(4)和式(5),将其插入观测。

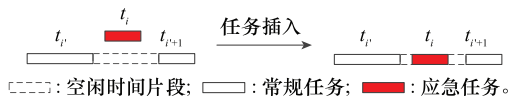


图 5 任务插入

Fig. 5 Task insertion

1.3 任务替换

应急任务 t_i 替换轨道 O_j 上原任务 $t_{i'}$ 时,应满足:①应急任务 t_i 的观测开始时间不小于常规任务 $t_{i'-1}$ 的观测结束时间与两任务在轨道 O_j 上的姿态转换时间 $c_{i'-1,i}^j$ 之和,即

$$we_{i'-1}^j + c_{i'-1,i}^j \leq ws_i^j \quad (6)$$

②任务 $t_{i'+1}$ 的观测开始时间不小应急任务 t_i 的观测结束时间与两任务在轨道 O_j 上的姿态转换时间 $c_{i,i'+1}^j$ 之和,即

$$we_i^j + c_{i,i'+1}^j \leq ws_{i'+1}^j \quad (7)$$

如图6所示,任务 t_i 满足替换在轨任务 $t_{i'}$ 的式(6)和式(7),用 t_i 替换 $t_{i'}$ 执行观测。

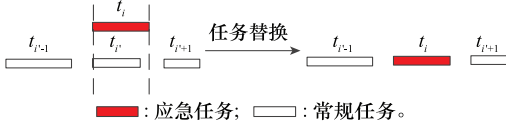


图6 任务替换

Fig. 6 Task replacement

2 调度模型

2.1 完成时间-收益函数

设置以下函数表示应急任务实际完成时间 af_i 和收益 w_i 的关系,如图7所示。其中, $w_i^{\max}$ 是应急任务 t_i 的最大观测收益; $w_i^{\min}$ 是最小观测收益; f 为用户期望最晚完成时间阈值。

$$w_i = \begin{cases} w_i^{\max}, 0 \leq af_i \leq f_i \\ \frac{af_i - f_i}{f - f_i} (w_i^{\min} - w_i^{\max}) + w_i^{\max}, f_i < af_i < f \\ w_i^{\min}, f \leq af_i \end{cases} \quad (8)$$

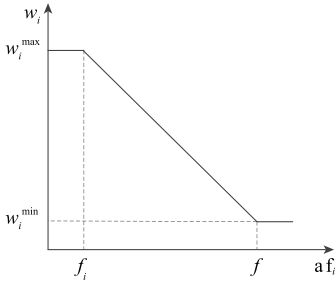


图7 应急任务完成时间-收益

Fig. 7 Emergency task completion time-revenue

2.2 扰动

应急任务的插入可能会扰乱初始调度序列。本文对初始调度序列上的常规任务设计了两种处理方式:删除任务或更换任务执行位置。设 $p_\lambda (\lambda=1,2)$ 为任务第 λ 种处理方式的影响权重,当删除任务时 λ 取1,当更换任务执行位置时 λ 取2,并且 $p_1 > p_2$ 。

考虑常规任务调度序列 Seq_j ,应急任务插入后,轨道 O_j 上的扰动 δ_j 表示为

$$\delta_j = \sum_{i'=1}^n \sum_{\lambda=1}^2 p_\lambda \text{turb}_\lambda(i', j) \quad (9)$$

其中, $\text{turb}_\lambda(i', j)$ 定义为

$$\text{turb}_\lambda(i', j) = \begin{cases} 1, \text{轨道 } O_j \text{ 上任务 } t_{i'} \text{ 采用第 } \lambda \text{ 种方式处理} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

2.3 数学规划模型

数学规划模型以合成任务为描述对象。设任务集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$, N 为待观测的合成任务数量。当待观测任

务中只包含一个元任务时,该任务也被看作合成任务。

2.3.1 目标函数

本文的调度目标优先考虑最大化任务观测总收益:

$$\max \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i^j \quad (11)$$

$$x_i^j = \begin{cases} 1, \text{任务 } t_i \text{ 在轨道 } O_j \text{ 上被执行} \\ 0, \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

另一个调度目标考虑对原任务调度序列扰动最小:

$$\min \sum_{j=1}^{|J|} \delta_j \quad (13)$$

2.3.2 约束条件

每个任务只能被观测一次:

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_i^j \leq 1, i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

任务的观测结束时间一定不小于任务观测开始时间:

$$ws_i^j \leq we_i^j \quad (15)$$

两连续观测任务间的时间间隔至少满足姿态转换时间约束,其中, M 是一个很大的正数:

$$(we_i^j + c_{i,j+1}^j) \cdot x_i^j \leq ws_{i+1}^j \cdot x_{i+1}^j + M \cdot (1 - x_{i+1}^j), \\ i = 1, 2, \dots, N-1; j = 1, 2, \dots, |J| \quad (16)$$

应急任务观测完成时间具体表示为

$$af_i = \begin{cases} we_{\text{com}}^j, i \text{ 是合成任务} \\ we_i^j, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

轨道上任务成像的存储空间不能超过单轨最大存储限制:

$$\sum_{i=1}^N x_i^j \cdot m_j \cdot (we_i^j - ws_i^j) \leq M_j, j \in \{1, 2, \dots, |J|\} \quad (18)$$

因此,多星应急任务调度问题可表示为上述具有时间依赖性收益的数学规划模型。

3 算法设计

遗传算法是基于自然选择和生物进化理论的演化算法,因其具有较强的广域搜索能力而被广泛应用于解决组合优化问题。本文以遗传算法为基础设计GA-TM-ETS算法求解问题。以应急任务优先调度为原则,首先,设计任务合成、插入和替换算子完成应急任务向常规调度序列的插入过程;其次,考虑任务观测收益、序列扰动和最短观测时间等因素设计适应度函数,提高算法搜索速度;最后,根据编码方式,设计基于组基因的交叉算子和变异算子,结合全局修复算子完成序列寻优。

3.1 编码方式

本文采用十进制的编码方式,以轨道为单元构造组基因,用组基因矩阵表示任务调度方案。

首先在调度周期内为卫星划分轨道并编号,每个轨道编号后存放在该轨道上执行的任务序列,每条轨道及其任务序列组成一个组基因。所有组基因组成组基因矩阵,一个组基因矩阵代表一个完整的卫星调度方案。如图8所

示,调度周期内卫星共存在 n 条轨道,在轨道 2 上最先执行任务 16,最后执行任务 47;在轨道 n 上依次执行任务 18、任务 19 和任务 39。

1	4	21	5	36	26	9
2	16	3	31	47		
3	14	12	15	17	23	8
⋮	⋮					
n	18	19	39			

■ : 轨道; □ : 任务。

图 8 编码方式

Fig. 8 Encoding method

3.2 任务急切度

定义任务急切度确定应急任务安排顺序。

定义 1 急切度

应急任务 t_i 的急切度 urg_i 反映任务等待观测的迫切程度。使用任务观测收益和从调度时刻开始到期望完成时间之内的时间窗数量衡量任务急切度,表示为

$$\text{urg}_i = w_i / \text{TWF}_i \quad (19)$$

其中, TWF_i 为任务 t_i 从调度时刻开始到期望完成时间之间的时间窗数量。在应急任务调度过程中,更倾向于优先调度收益更大或时间窗数量更少的任务。

3.3 任务合成算子

应急任务 t_i 首先以任务合成的方式完成调度。任务合成算子操作步骤如下:

步骤 1 根据应急任务 t_i 在各轨道上的观测机会,将对 t_i 有时间窗的轨道放入 t_i 的候选轨道集 COS_i 中;

步骤 2 在 COS_i 中的轨道上确定能够与 t_i 合成观测的在轨任务,获得任务 t_i 的候选合成任务集 CMTS_i ;

步骤 3 若 CMTS_i 不为空,转步骤 4;若为空,转步骤 6,考虑任务插入算子;

步骤 4 从 CMTS_i 中随机选择并删除任务,将选中常规任务与应急任务 t_i 执行合成操作,获得合成任务 t_{com} ;

步骤 5 判断 t_{com} 与在轨任务的冲突情况。若与前后任务不存在冲突,则直接将 t_i 以任务合成方式插入;若存在冲突且冲突任务为常规任务时,将常规任务删除后合成,更新调度序列;若存在冲突且冲突任务为应急任务,不执行合成,转步骤 3;

步骤 6 任务合成算子操作终止。

3.4 任务插入算子

当任务不能以合成方式插入时,利用任务插入算子完成调度。任务插入算子操作步骤如下:

步骤 1 在 COS_i 中的各个轨道中根据任务时间窗确定任务 t_i 的可插入位置,获得候选插入任务集 CITS_i ;

步骤 2 若 CITS_i 不为空,转步骤 3;若为空,转步骤 5,考虑任务替换算子;

步骤 3 从 CITS_i 中随机选择并删除任务,执行任务插入操作,转步骤 4;

步骤 4 判断 t_i 与在轨任务的冲突情况。若与前后任务不存在冲突,则直接将 t_i 插入;若存在冲突且冲突任务为

常规任务,将常规任务删除后再插入,并更新调度序列;若存在冲突且冲突任务为应急任务,不执行插入,转步骤 2;

步骤 5 任务插入算子操作终止。

3.5 任务替换算子

当任务合成算子和任务插入算子不能完成任务调度时,考虑任务替换算子。任务替换的目的是完成观测收益更高的任务,被替换的任务暂时存放在该染色体的未完成任务集(unscheduled tasks list, UTL)中,等待重插入。任务替换算子操作步骤如下:

步骤 1 从 COS_i 中随机选择并删除可观测任务 t_i 的轨道,执行任务替换,转步骤 2;

步骤 2 判断 t_i 与在轨任务的冲突情况。若与前后任务不存在冲突,则直接将 t_i 以任务替换方式插入;若存在冲突且冲突任务为常规任务时,将常规任务删除后替换,并更新调度序列;若存在冲突且冲突任务为应急任务,不执行替换;

步骤 3 任务替换算子操作终止。

3.6 适应度函数

遗传算法中种群个体的优劣由适应度衡量。本文联合任务观测收益、序列扰动和最短观测时间 3 个指标构造适应度函数,评判个体优劣。为说明最短观测时间指标,定义无效观测和有效重复观测。

定义 2 无效观测

任务合成观测时,各元任务时间窗间可能存在时间间隔。执行观测时,传感器在该时间间隔内成像并存储数据,产生无效观测,如图 9 所示。

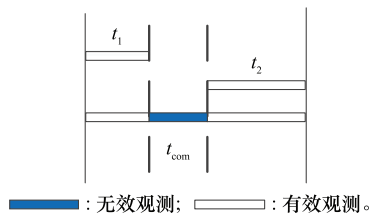


图 9 无效观测

Fig. 9 Ineffective observation

定义 3 有效重复观测

任务合成观测时,各元任务的时间窗间可能存在重叠。执行观测时,卫星一次扫描可以完成对多个元任务片段的观测,最大化利用卫星资源,产生有效重复观测,如图 10 所示。

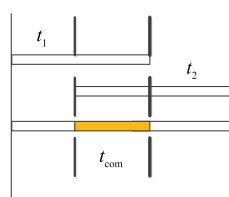


图 10 有效重复观测

Fig. 10 Effective repeated observation

当任务合成观测时,应急任务对合成位置的选择会直接影响卫星的成像时长。如图 11 所示,应急任务 t_i 可以和轨道 O_1 上的任务 t_1 或轨道 O_2 上的任务 t_2 合成观测,合成

后任务的观测时长分别为 d_1 和 d_2 。因为 $d_2 < d_1$ ，则选择与任务 t_2 合成，在最短观测时间 d_2 内执行观测，从而最小化无效观测，最大化有效重复观测，充分利用卫星资源。

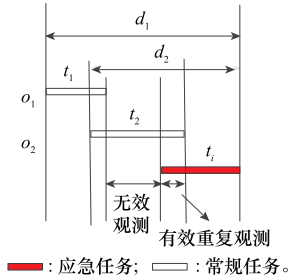


图 11 最短观测时间说明图

Fig. 11 Diagram of minimum observation time

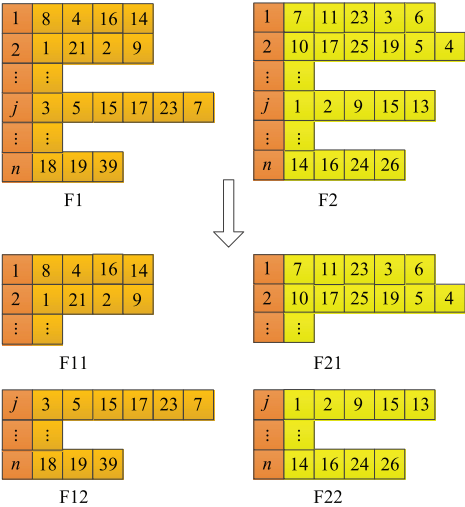


图 12 染色体交叉

Fig. 12 Chromosome crossover

综上,适应度函数设置下式所示:

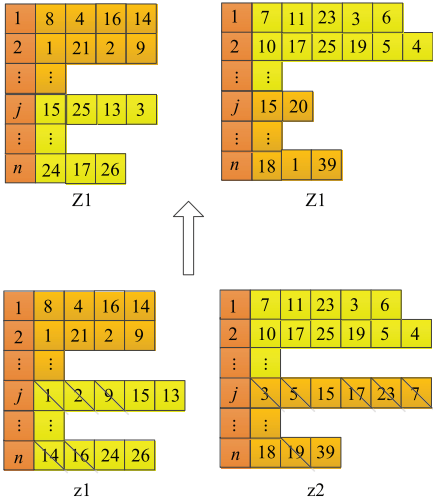
Fitness =

$$\sum_{j=1}^{|J|} \sum_{i=1}^N d_i \cdot x_i^j + \sum_{j=1}^{|J|} \delta_j - \sum_{j=1}^{|J|} \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i^j \quad (20)$$

两条染色体比较时,总观测时间更短,序列扰动更小,观测总收益更大的染色体序列更优。

3.7 交叉算子

针对本文的编码方式,设计组基因片段单点交叉方式执行染色体交叉操作。交叉策略是将选中的两条父代染色体根据随机选择的轨道编号分为两部分,交换后半部分组基因矩阵片段后删除重复任务,并执行任务重插入操作,获得子代染色体,如图 12 所示。



具体交叉步骤如下:

- 步骤 1 计算种群中各染色体的适应度值,将种群中染色体根据适应度值非升序排序,更新种群中染色体顺序;
- 步骤 2 从种群的前半部分随机选取待交叉的父代染色体 F1,从整体种群中随机选取待交叉的父代染色体 F2;
- 步骤 3 随机生成轨道编号 j ;
- 步骤 4 以轨道 j 为分割点,将 F1 分为矩阵片段 F11 和 F12,将 F2 分为矩阵片段 F21 和 F22;
- 步骤 5 在矩阵片段 F22 中删除 F11 中已存在的任务,在 F12 中删除 F21 中已存在的任务;
- 步骤 6 依次拼接矩阵片段 F11 和 F22,获得子代染色

体 z_1 ;依次拼接矩阵片段 F21 和 F12,获得子代染色体 z_2 ;

步骤 7 从 z_1 、 z_2 的 UTL 中分别向染色体 z_1 、 z_2 中重新插入任务,最终获得子代染色体 Z_1 、 Z_2 ;

步骤 8 采用精英策略从四条染色体 F1、F2、 Z_1 、 Z_2 中选择适应度函数较小的两条染色体放回种群中。

3.8 变异算子

基于轨道组基因设计变异算子。随机选择轨道圈次,将该圈次的任务进行变异。变异策略是将选中组基因上的所有任务重新放入该染色体的 UTL 中,与未完成任务一起重新插入,如图 13 所示。

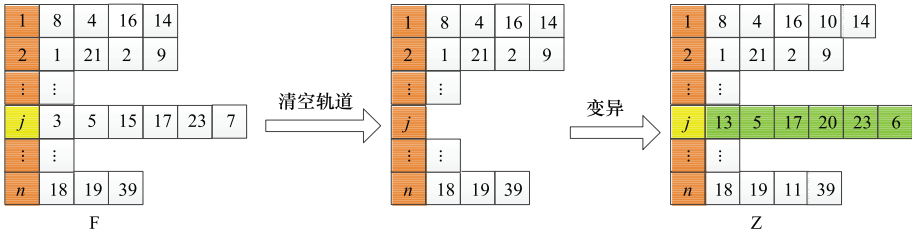


图 13 染色体变异

Fig. 13 Chromosome mutation

具体变异步骤如下：

步骤 1 在种群中随机选取染色体 F,在 F 中确定变异轨道编号 j ;

步骤 2 将选中轨道 j 上的任务放至该染色体的 UTL 中,清空选中轨道;

步骤 3 从 UTL 中向染色体中重新插入任务,获得子代染色体 Z;

步骤 4 采用精英策略从两条染色体 F 和 Z 中选择适应度函数较小的染色体放回种群中。

3.9 全局修复算子

前面任务的调度过程主要考虑各任务间时间窗的冲突关系,并未根据卫星轨道的全局约束对任务分配进行限制,可能存在不符合轨道存储限制的不可行解。全局修复算子考虑卫星轨道整体约束,最终寻找最优解时,当在轨任务与轨道最大存储限制出现冲突时,优先删除具有更小收益的常规任务来消除冲突。

3.10 算法主要流程

GA-TM-ETS 算法主要由初始种群的生成和种群序列寻优两部分组成。

3.10.1 初始种群生成

应用任务合成、插入和替换算子将集合 TE 中的任务插入到初始调度序列可得到染色体,重复此过程即可获得初始种群 population。设初始种群数量为 pop,初始调度序列为 Seq。初始种群生成的算法如算法 1 所示。

算法 1 初始种群生成算法

```
1 Initialize the set TE,pop,Seq;
2 Set popnum=1;
3 Calculate urgi for  $t_i \in \text{TE}$  and sort TE by it from high to low;
4 for popnum=1 to pop do
5   for each  $t_i$  in TE do
6     if  $t_i$  and  $t_{i'}$  in Seq satisfy the constraints (1)~(3) then
7       Merge task by task merging operator;
8     else if  $t_i$  and  $t_{i'}$  in Seq satisfy the constraints (4) and (5) then
9       Insert task by task insertion operator;
```

```
10    else if  $t_i$  and  $t_{i'}$  in Seq satisfy the constraints (6) and (7) then
11      Replace task by task replacement operator;
12    end if
13  end for
14 end for
```

3.10.2 种群序列寻优

初始种群经过交叉变异寻优和全局修复算子修复过程获得最终调度序列 Chromosome*。设种群最大迭代次数为 maxiter,种群序列寻优的算法如算法 2 所示。

算法 2 种群序列寻优算法

```
1 Initialize the set population;
2 Set iter=0;
3 for iter=0 to maxiter do
4   Cross by crossover operator;
5   Mutate by mutation operator;
6   iter++;
7 end for
8 Repair by global repair operator;
9 Select and return Chromosome*
```

4 仿真实验

本节通过对比实验验证 GA-TM-ETS 算法的有效性。实验在 Intel(R) Core(TM) i5-6500CPU 处理器、16.0G 内存、64 位 Windows7 环境运行,基于 myeclipse2017 编程环境采用 java 语言实现。

实验中,初始调度序列采用遗传算法生成。实验利用仿真软件模拟真实环境生成 3 颗卫星,调度周期为 24 小时,卫星参数设置如表 1 所示。随机生成 100、200、400 个常规任务集合和 20、40、60 个应急任务集合,常规任务观测收益在区间[0,1]内随机生成,应急任务观测收益在区间[1,2]内随机生成。为避免数据偶然性,每种数据规模下分别对应生成 3 组数据执行实验,每组数据算例运行 30 次并取平均值作为该组数据实验结果,每种规模下的 3 个数据实验结果取平均值得到最终该规模实验结果,最终得到9 组实验。

表 1 卫星参数信息
Table 1 Satellite parameter information

卫星编号	卫星名称	单轨最大 存储限制	传感器 旋转速率/(°/s)	单次最长 开机时间/s	传感器 稳定时间/s	传感器 视场角/(°)
1	FENGYUN_1D_27431	200	5	50	3	12
2	FENGYUN_3A_32958	210	3	60	4	10
3	GAOFEN_1_39150	190	4	55	2	14

由于多星调度问题的多变性和复杂性,各个科研团体在考虑不同的实际应用下进行研究,目前在该领域没有公认的 benchmark 测试集。为验证算法的有效性,本文进行 3 组对比实验。首先,将不考虑合成机制的应急任务调度

算法 (genetic algorithm for emergency task scheduling, GA-ETS)与 IDI 算法^[21]对比,验证本文设计的基础算法的有效性;其次,将 GA-TM-ETS 算法和 GA-ETS 算法对比,证明合成策略在算法中的重要作用;最后,进行参数敏感性

分析,确定各规模实验中各参数值的最优组合。

4.1 算法有效性实验

GA-ETS 算法和 IDI 算法的共同点在于,两算法中都不存在合成机制。为验证基础的 GA-ETS 算法的有效性,将 GA-ETS 算法和 IDI 算法对比,实验结果如表 2 及图 14

所示。

为使 IDI 算法更加适用于本文的研究背景,将算法做出如下修改:将卫星对任务的可见时间窗作为观测时间窗,将应急任务根据优先级非降序排序并依次选择任务,遍历选中任务的时间窗,插入任务。

表 2 GA-ETS 算法和 IDI 算法结果

Table 2 Results of GA-ETS algorithm and IDI algorithm

序号	常规任务 规模	应急任务 规模	GA-ETS			IDI			收益差值 相对值/%
			收益	扰动	运行时间/s	收益	扰动	运行时间/s	
1	100	20	54.53	28.4	7.000	48.44	28.4	0.457	12.57
2		40	78.68	30.0	13.390	69.00	29.1	0.454	14.03
3		60	92.49	30.8	25.530	80.92	28.9	0.464	14.30
4	200	20	68.53	47.5	16.460	62.07	45.1	3.153	10.41
5		40	94.38	47.1	22.000	85.52	46.7	3.473	10.36
6		60	107.22	49.0	34.880	97.72	46.1	3.584	9.72
7	400	20	89.00	77.2	57.170	81.24	72.1	19.559	9.55
8		40	112.65	76.1	65.500	104.72	70.6	20.246	7.57
9		60	125.49	75.3	82.190	117.00	71.9	17.747	7.26

通过分析表 2 中两算法收益列和图 14(a)可知,当常规任务规模分别为 100、200、400 时,随着应急任务规模的增加,GA-ETS 算法和 IDI 算法的观测总收益都逐渐增加,且变化趋势相同,说明 GA-ETS 算法作为 GA-TM-ETS 算法的基础设计算法是有效的。表 2 最后一栏表示收益差值相对值,其计算公式为:收益差值相对值=(GA-ETS 观测收益-IDI 观测收益)/IDI 观测收益。依据计算结果可知,常规任务规模为 100 时,应急任务规模为 20、40、60 情况下 GA-ETS 算法的观测收益比 IDI 算法分别提高 12.57%、14.03%、14.30%,最高提高 14.30%;常规任务规模为 200 时,应急任务规模为 20 情况下 GA-ETS 算法的观测收益比 IDI 算法提高最多,最高提高 10.41%;常规任务规模为 400 时,应急任务规模为 20 的情况下 GA-ETS 算法的观测收益比 IDI 算法提高最多,最高提高 9.55%。实验结果表明 GA-ETS 算法优于 IDI 算法。

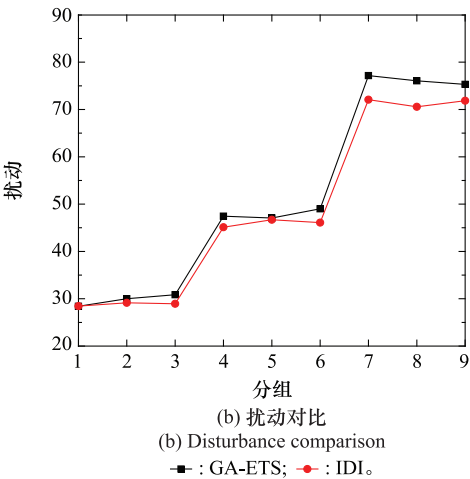
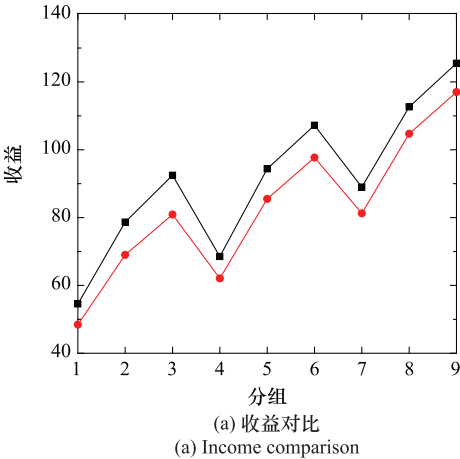


图 14 GA-ETS 算法和 IDI 算法实验结果对比

Fig. 14 Comparison of the experimental results of GA-ETS algorithm and IDI algorithm

扰动度量时,分别将任务删除和任务移位的干扰量设置为 1 和 0.5。根据表 2 中两算法扰动列和图 14(b)分析可得,GA-ETS 算法的调度扰动量不小于 IDI 算法,但扰动差值在区间(0,5.5)之内。在 GA-ETS 算法的观测收益明显大于 IDI 算法的条件下,扰动量的少量增加是可以接受的。

分析表 2 中两算法运行时间列可知,IDI 算法运行很快,大规模实验下完成调度仅需约 20 s。GA-ETS 算法的交叉变异过程需要判断各任务时间窗之间的冲突,消耗一定的时间成本,运行相对较慢,大规模实验下完成调度需 82.190 s。但在 GA-ETS 算法的观测收益明显大于 IDI 算法的条件

下,运行时间的少量增加是可以接受的。

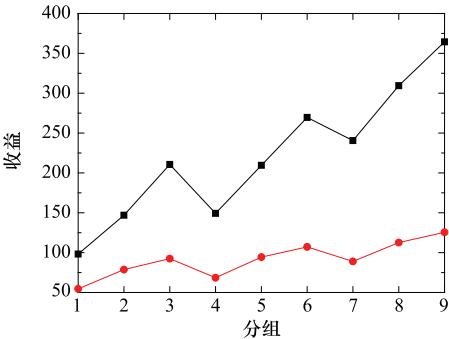
4.2 验证合成机制的重要作用

GA-ETS 算法融合任务合成机制后得到 GA-TM-ETS

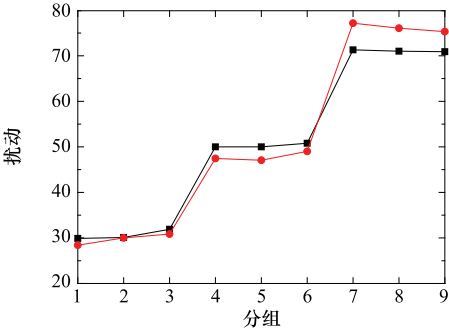
算法。本节将 GA-TM-ETS 算法和 GA-ETS 算法对比,验证合成机制在 GA-TM-ETS 算法中的重要作用,实验结果如表 3 及图 15 所示。

表 3 GA-ETS 算法和 GA-TM-ETS 算法结果
Table 3 Results of GA-ETS algorithm and GA-TM-ETS algorithm

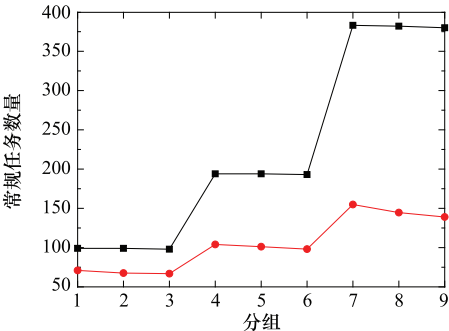
序号	常规任务规模	应急任务规模	GA-TM-ETS					GA-ETS				
			收益	扰动	常规任务完成数量	应急任务完成数量	运行时间/s	收益	扰动	常规任务完成数量	应急任务完成数量	运行时间/s
1		20	98.19	29.9	99	19	6.615	54.53	28.4	71	13	7.000
2	100	40	146.93	30.1	99	39	13.205	78.68	30.0	68	24	13.390
3		60	210.61	31.9	98	59	24.660	92.49	30.8	67	31	25.530
4		20	149.25	50.0	194	19	16.135	68.53	47.5	104	13	16.460
5	200	40	209.48	50.0	194	39	22.842	94.38	47.1	101	24	22.000
6		60	269.56	50.8	193	59	36.427	107.22	49.0	98	32	34.880
7		20	240.59	71.3	383	19	58.242	89.00	77.2	155	14	57.170
8	400	40	309.44	71.0	382	39	66.945	112.64	76.1	145	24	65.500
9		60	364.41	70.9	380	58	85.052	125.49	75.3	139	31	82.190



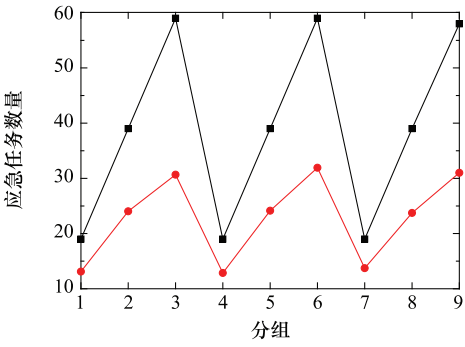
(a) 收益对比
(a) Income comparison



(b) 扰动对比
(b) Disturbance comparison



(c) 常规任务数量对比
(c) Comparison of the number of regular tasks



(d) 应急任务数量对比
(d) Comparison of the number of emergency tasks
■ : GA-TM-ETS; ● : GA-ETS。

图 15 GA-TM-ETS 算法和 GA-ETS 算法实验结果对比
Fig. 15 Comparison of experimental results of GA-TM-ETS algorithm and GA-ETS algorithm

分析表 3 中两算法收益列和图 15(a)可知,9 组任务规模下,GA-TM-ETS 算法获得的观测收益都明显高于 GA-ETS 算法。其次,当常规任务规模为 100 时,应急任务规模为 20、40、60 情况下,GA-TM-ETS 算法观测收益分别超出 GA-ETS 算法 43.66、68.25、118.12;当常规任务规模为 200 时,应急任务规模为 20、40、60 情况下,GA-TM-ETS 算法观测收益分别超出 GA-ETS 算法 80.72、115.1、162.34;当常规任务规模为 400 时,应急任务规模为 20、40、60 情况下,GA-TM-ETS 算法观测收益分别超出 GA-ETS 算法 151.59、196.80、238.92,即当常规任务规模不变时,随着应急任务规模增大,GA-TM-ETS 算法超出 GA-ETS 算法的观测收益差值增大,说明任务合成机制在越大应急任务规模下效果越明显。

分析表 3 中两算法扰动列和图 15(b)可知,当常规任务数量为 100 和 200 时,GA-TM-ETS 算法的扰动量大于 GA-ETS 算法,但差值在区间(0,3)内;当常规任务数量为

400 时,GA-TM-ETS 算法的扰动量小于 GA-ETS 算法,且差值最大为 5.9。此现象出现的原因可以解释为:当任务间存在冲突时,任务合成机制的存在可以将冲突的常规任务与应急任务在原位置合成观测或在其他位置合成观测,减少对常规任务的拒绝或移位,有效减少对原序列的扰动量。但当常规任务数量为 100 和 200 时,任务合成机制对于减小扰动量的作用效果不明显,当常规任务数量为 400 时减小扰动量的效果较明显。

如表 3 中两算法常规任务和应急任务完成数量列及图 15(c)和图 15(d)所示,同等任务规模下,GA-TM-ETS 算法的常规任务和应急任务完成数量都远大于 GA-ETS 算法。GA-TM-ETS 算法能够表现出良好性能的原因在于,合成策略有效避免了任务时间窗之间的冲突,将原本因存在时间窗冲突或姿态转换时间不足而拒绝的任务合成观测,且合成观测具有联合收益,最终在增加了任务观测数量的基础上,大大提高了任务观测收益。

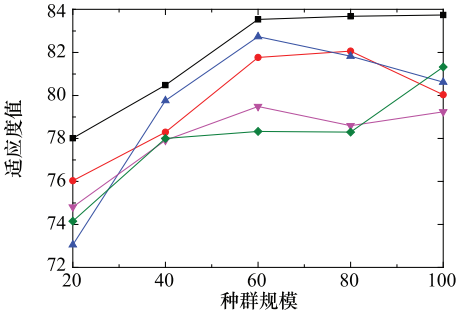
分析表 3 中两算法运行时间列可知,9 组任务规模下,GA-TM-ETS 算法的最长运行时间不超过 86 s,且算法调度的任务数量和获得的观测收益明显好于 GA-ETS 算法,说明该算法可以在应急任务开始调度的较短时间内及时高质量完成调度。

4.3 参数敏感性分析

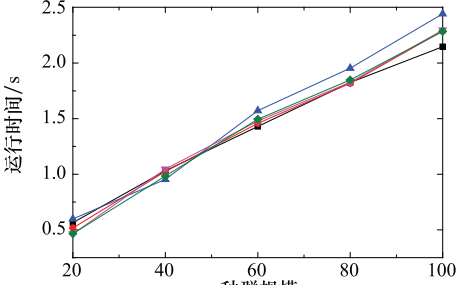
不同参数值的设置会直接影响算法性能。GA-TM-ETS 算法以传统遗传算法为设计基础,其中涉及少量参数,如交叉概率、种群规模等。不同的参数组合会获得不同的调度结果,但各参数间存在多种参数组合,所有参数最优组合很难被找到。

启发式算法可以获得问题的较优解或以一定概率获得问题的最优解,在求解的过程中,最好状态是达到问题目标和时间成本之间的平衡状态,牺牲大量的时间获得更好的解的做法往往是不科学的。本文在 9 组任务规模下,采用控制变量法,在不同的参数组合下进行大量的实验,分析不同任务规模下的参数敏感性,试图找到任务观测收益和消耗时间之间的平衡状态。

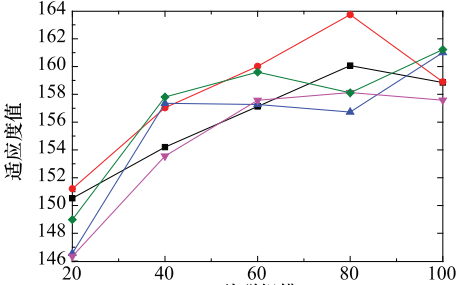
图 16 展示 3 种不同应急任务规模下,5 种不同交叉概率和种群规模的组合实验结果。分析图 16 可知,无论在何种任务规模下,程序运行时间随着种群规模的增大几乎呈线性增长,各个交叉概率的设置值对程序运行时间不会产生明显影响。在不同的交叉概率下,随着种群规模的增大,适应度值出现峰值。经实验结果分析,GA-TM-ETS 算法中参数最终设置为:应急任务规模为 20 时,交叉概率为 0.80,种群规模为 60;应急任务规模为 40 时,交叉概率为 0.85,种群规模为 80;应急任务规模为 60 时,交叉概率为 0.80,种群规模为 80。



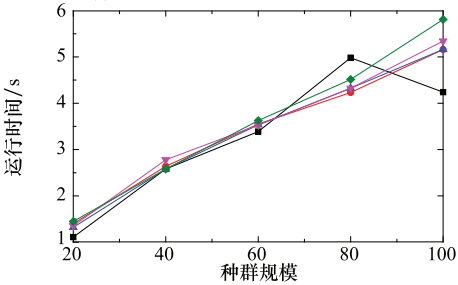
(a) 第1种任务规模下的适应度值
(a) Fitness value under the first task scale



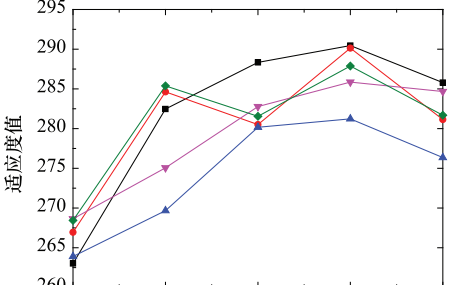
(b) 第1种任务规模下的运行时间
(b) Runtime under the first task scale



(c) 第4种任务规模下的适应度值
(c) Fitness value under the fourth task scale



(d) 第4种任务规模下的运行时间
(d) Runtime under the fourth task scale



(e) 第7种任务规模下的适应度值
(e) Fitness value under the seventh task scale

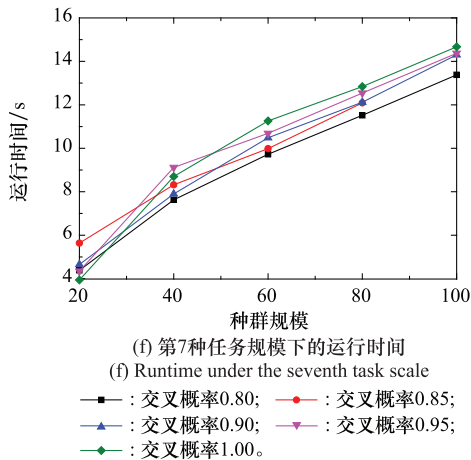


图 16 GA-TM-ETS 算法不同种群规模和交叉概率的参数敏感性分析

Fig. 16 Parameter sensitivity analysis of GA-TM-ETS algorithm with different population sizes and crossover probability

5 结 论

本文主要研究多星应急任务调度问题。首先,根据应急任务特点,考虑应急任务完成时间和观测收益的关系,建立具有时间依赖性收益的合成任务数学规划模型。其次,以遗传算法为基础设计 GA-TM-ETS 算法求解问题。算法以应急任务优先调度为原则,首先设计任务合成、插入和替换算子完成应急任务向常规调度序列的插入操作。再次,考虑任务观测收益、序列扰动和最短观测时间等因素设计适应度函数,提高算法搜索速度。然后,根据编码方式,设计基于组基因的交叉算子和变异算子,结合全局修复算子完成序列寻优。最后,通过对比实验对算法的性能进行分析和比较,结果表明 GA-TM-ETS 算法可以在保证观测总收益且最小化对原调度序列的扰动的基础上解决多星应急任务调度问题。

在未来工作中依旧存在许多待解决的问题:① 优化数学模型,比如增加用户对成像卫星类型的要求约束和考虑成像质量的约束;② 考虑现实情况,在任务可见时间窗内考虑观测时间窗的提前或延迟策略,增强任务调度的鲁棒性。

参考文献

- [1] 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 and Operations Research, 2017, 86(4): 41–53.
- [2] XU R, CHEN H P, LIANG X L, et al. Priority-based constructive algorithms for scheduling agile earth observation satellites with total priority maximization[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 51: 195–206.
- [3] QI J T, GUO J J, WANG M M, et al. A cooperative autonomous scheduling approach for multiple earth observation satellites with intensive missions[J]. IEEE Access, 2021, 9: 61646–61661.

- [4] WANG S, LIN Z, CHENG J H, et al. Task scheduling and attitude planning for agile earth observation satellite with intensive tasks[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 90(4): 23–33.
- [5] BARKAOUI M, BERGER J. A new hybrid genetic algorithm for the collection scheduling problem for a satellite constellation[J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(9): 1390–1410.
- [6] CHEN X Y, REINELT G, DAI G M, et al. Priority-based and conflict-avoidance heuristics for multi-satellite scheduling[J]. Applied Soft Computing, 2018, 69(4): 177–191.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WANG J J, HU X J, HE C. Reactive scheduling of multiple EOSs under cloud uncertainties: model and algorithms[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(1): 163–177.
- [10] WANG J, DEMEULEMEESTER E, HU X, et al. Expectation and SAA models and algorithms for scheduling of multiple earth observation satellites under the impact of clouds[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(4): 5451–5462.
- [11] WANG X W, SONG G P, LEUS R, et al. Robust Earth observation satellite scheduling with uncertainty of cloud coverage[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(3): 2450–2461.
- [12] CHEN X Y, GERHARD R, DAI G M, et al. A mixed integer linear programming model for multi-satellite scheduling[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 275(2): 694–707.
- [13] E Z B, SHI R H, GAN L, et al. Multi-satellites imaging scheduling using individual reconfiguration based integer coding genetic algorithm [J]. Acta Astronautica, 2021, 178: 645–657.
- [14] LI L X, MA W Z, LIU X L, et al. Research on TSGA algorithm satellite data transmission scheduling[C]//Proc. of the International Conference on Management Science & Engineering, 2014: 56–61.
- [15] WU G H, MA M H, ZHU J H, et al. Multi-satellite observation integrated scheduling method oriented to emergency tasks and common tasks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(5): 723–733.
- [16] 贺川, 朱晓敏, 邱涤珊. 面向应急成像观测任务的多星协同调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4): 726–731.
- [17] HE C, ZHU X M, QIU D S. Cooperative scheduling method of multi-satellites for imaging reconnaissance in emergency condition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(4): 726–731.
- [18] WANG J M, LI J F, TAN Y J. Study on heuristic algorithm for dynamic scheduling problem of earth observing satellites[C]//Proc. of the 8th ACIS International Conference on the Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel Distributed Computing, 2007: 9–14.
- [19] 郭超, 熊伟, 刘呈祥. 基于优先级与时间裕度的卫星应急观测任务规划[J]. 电讯技术, 2016, 56(7): 744–749.
- [20] GUO C, XIONG W, LIU C X. Mission planning of satellite emer-

- gency observations based on priority and time margin degree[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(7): 744–749.
- [18] NIU X N, TANG H, WU L X, et al. Imaging-duration embedded dynamic scheduling of earth observation satellites for emergent events[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 731734.
- [19] GUO C, XIONG W, LIU C X. Research on emergency mission planning of earth observation satellites[C]//Proc. of the IEEE 1st International Conference on Computer Communication and the Internet, 2016.
- [20] NIU X N, TANG H, WU L X. Satellite scheduling of large areal tasks for rapid response to natural disaster using a multi-objective genetic algorithm[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 28: 813–825.
- [21] WANG M C, DAI G M, VASILE M, et al. Heuristic scheduling algorithm oriented dynamic tasks for imaging satellites[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(5): 234928.
- [22] SUN H Q, XIA W, HU X X, et al. Earth observation satellite scheduling for emergency tasks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(5): 931–945.
- [23] ZHAO Y B, DU B, LI S. Agile satellite mission planning via task clustering and double-layer tabu algorithm[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 122(1): 235–257.
- [24] 白保存, 贺仁杰, 李菊芳, 等. 卫星单轨任务合成观测问题及其动态规划算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1738–1742.
- BAI B C, HE R J, LI J F, et al. Satellite orbit task merging problem and its dynamic programming algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(7): 1738–1742.
- [25] LONG X Y, WU S F, WU X F, et al. A GA-SA hybrid planning algorithm combined with improved clustering for LEO observation satellite missions[J]. Algorithms, 2019, 12(11): a12110231.
- [26] LIU X L, BAI B C, CHEN Y W, et al. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 230: 687–700.
- [27] WU G H, WANG H L, WITOLD P, et al. Satellite observation scheduling with a novel adaptive simulated annealing algorithm and a dynamic task clustering strategy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 113: 576–588.
- [28] QIU D S, WU G H, LIU J, et al. A two-phase scheduling method with the consideration of task clustering for earth observing satellites[J]. Computers and Operations Research, 2013, 40(7): 1884–1894.
- [29] LONG J, CHEN S L, LI C, et al. A task clustering method for multi agile satellite based on clique partition[C]//Proc. of the International Conference on Intelligent Computation Technology & Automation, 2018: 332–336.
- [30] LONG X Y, WU S F, CUI B J, et al. Analysis of satellite observation task clustering based on the improved clique partition algorithm[C]//Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2019: 1314–1321.
- [31] 白保存, 慈元卓, 陈英武. 基于动态任务合成的多星观测调度方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(9): 2646–2649.
- BAI B C, CI Y Z, CHEN Y W. Dynamic task merging in multi-satellites observing scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(9): 2646–2649.
- [32] WANG J J, ZHU X M, QIU D S, et al. Dynamic scheduling for emergency tasks on distributed imaging satellites with task merging[J]. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(9): 2275–2285.
- [33] NIU X N, TANG H, WU L X, et al. Imaging-duration embedded dynamic scheduling of Earth observation satellites for emergent events[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(4): 731734.
- [34] 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.

作者简介

靳 鹏(1969—),男,副教授,博士,主要研究方向为运筹与优化、卫星任务规划。

唐晓茜(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为卫星任务规划。