

DOI:10.13196/j.cims.2014.12.004

# 面向智能卫星的组件式任务规划建模与求解

张雪婷<sup>1</sup>, 邢立宁<sup>1</sup>, 陈英武<sup>1</sup>, 朱剑冰<sup>2</sup>

(1. 国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094)

**摘要:**为解决目前成像卫星系统任务规划算法通用化差、考虑约束不全面等缺陷,设计并实现了具有 7 种排序策略、8 种观测与回传时间窗选择策略和 8 个分功能组件的任务规划软件架构。该方案采用时间窗裁剪算法,分类考虑不同时间窗重叠的情形,以避免冲突且确保回传在观测之后发生,这种组件式、模块化的启发式方法为下一步实现自主任务规划系统打下了基础。

**关键词:**任务规划;智能卫星;组件式;启发式;时间窗裁剪

**中图分类号:**TP319 **文献标识码:**A

## Component-based mission planning modeling and solution to intelligent satellite

ZHANG Xue-ting<sup>1</sup>, XING Li-ning<sup>1</sup>, CHEN Ying-wu<sup>1</sup>, ZHU Jian-bing<sup>2</sup>

(1. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. General Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To solve the defects and deficiencies of current algorithms with less generality and incomplete constraints, the software architecture of mission planning was designed with 7 sorting strategies, 8 time window selection strategies and 8 sub-function components. By using time window clipping algorithm, different kinds of time window overlap were considered to avoid conflicts and ensure the back-operation activities after observation. Such component-based modular heuristic methods could achieve autonomous mission planning system in the future.

**Key words:** mission planning; intelligent satellite; component-based; heuristics; time window clipping

## 0 引言

由现代智能小卫星组成的分布式成像卫星系统是未来对地观测系统发展的主要趋势,在小卫星技术发展的不断推动下,美国推出了“新盛世计划(new millennium program)”<sup>[1-2]</sup>,其思想是用分布式空间系统实现大卫星难以完成的功能或替代越来越复杂的大卫星。目前,国内外针对智能卫星自主任务规划问题的探索成为一个崭新的前沿课题,具

有需求动态性、约束复杂性、动作序列性和活动持续性的特点,涉及的规划领域知识比较复杂,逻辑关系较强。整体来说,该问题主要包括分布式卫星系统全局规划和局部单星自主控制两部分,本文主要对单星任务规划问题进行研究<sup>[3-5]</sup>。

智能卫星任务规划系统在得到属于自己的任务计划方案后,按照其系统构成、功能和约束条件,将任务序列进一步分解成详细的有效载荷控制指令序列,可由卫星直接执行<sup>[6-9]</sup>。国内外针对任务规划的

收稿日期:2014-07-30;修订日期:2014-09-13。Received 30 July 2014; accepted 13 Sep. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71331008,71101150,61203180);教育部新世纪优秀人才支持计划;高分辨率对地观测青年基金资助项目(GFZX04060103-5-18)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 71331008, 71101150,61203180), the Program for New Century Excellent Talents in University, China, and the Youth Fund Project of High-Resolution Earth Observation, China(No. GFZX04060103-5-18).

模型与算法已有一些研究成果:美国 Pemberton<sup>[10]</sup>建立了约束满足问题模型,使用 ILOG Solver/Scheduler 执行基于约束传播的求解机制;Wolfe<sup>[11]</sup>研究了每个任务只有一个观测时间窗时的卫星调度问题;加拿大 Nicholas<sup>[12]</sup>将单星调度问题看作单机调度问题,建立了相应的整数规划模型。这些模型和算法都在不同程度上解决了单星任务规划的一些问题,然而由于卫星、地面站、任务数量的增多,任务复杂性上升,不同卫星隶属于不同部门等,这些算法大多针对某特定卫星简化了约束条件,可迁移性不强,不能解决任务规划系统的重复性建设问题<sup>[13-16]</sup>。

传统烟囱式的任务规划系统使现有卫星很难实现快速协同,为了适应新型小卫星自主性和分布式的发展需求,需要面向任务、面向资源、面向约束的可扩展任务规划技术。本文首先对问题进行合理简化与假设,构建数学模型,并介绍求解框架和 8 大组件群,其中排序组件群采用基于启发式的 7 种排序策略,观测安排与回传安排组件群采用 8 种时间窗选择策略;设计了时间窗裁剪算法和容量约束机制,解决了时间窗的冲突问题,并确保回传活动安排在观测活动之后,从而提升了时间窗的利用率。最后采用加权理想相似度顺序偏好法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)对不同数据规模下组件策略类型的优化结果进行了对比分析,证明了复合型策略的优势。

## 1 智能卫星任务规划问题

### 1.1 问题描述

智能卫星任务规划具有自主特性,即仅从地面系统接收用户提交的观测任务需求,根据时间窗、传感器侧摆角度和星上电源、容量等约束条件,为其安排合适的卫星及执行时间,并得到各卫星的任务序列,实现一定的优化目标。

该问题可描述为:已知一定数目的任务与其时间窗,通过单颗卫星进行任务规划;任务的回传活动必须安排在其观测完成后;卫星的最大载荷量(固存)已知,且任何时刻卫星的实时负载不大于其固存;卫星对地面站的回传时间窗已知,只能在其时间窗内安排回传活动;没有进行回传的任务和正在进行观测的任务都会占据卫星的存储空间;优化目标为任务的总收益最大、资源消耗最小<sup>[17-18]</sup>。

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 输入条件

(1)每次进行规划的任务总数量为  $N$ ,回传窗口的数目为  $N_{BW}$ 。

(2)每个任务  $T_i(i=1,2,\dots,N)$ 的优先级为  $p_i$ ,需要的观测时间为  $Vt_i$ ,回传时间为  $Bt_i$ ,任务的容量为  $C_i$ 。

(3)每个任务观测窗口  $VW_i(i=1,2,\dots,N)$ 的时间窗为  $[VS_i, VE_i]$ ,只能在其观测时间窗内安排观测活动。

(4)回传窗口  $BW_j(j=1,2,\dots,N_{BW})$ 的时间窗为  $[BS_j, BE_j]$ ,只能在该回传时间窗内安排回传活动。

(5)卫星所能承载的最大载荷量为  $C_{max}$ ,  $t$  时刻卫星的承载容量为  $C_t$ 。

#### 1.2.2 输出条件

(1)决策变量

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{该任务已观测,} \\ 0, & \text{该任务未观测;} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{该任务已回传,} \\ 0, & \text{该任务未回传。} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $i=1,2,\dots,N$ 。

单个任务收益值为分段函数,  $[t_0, t_5]$  为任务收益函数  $pf_i$  的定义域,  $t_0 = VS_i, t_5 = VE_i$ , 即每个观测时间窗被均匀划分为 5 段:

$$pf_i = \begin{cases} 0.6\omega_j, & t_0 \leq t_i \leq t_1; \\ 0.8\omega_j, & t_1 \leq t_i \leq t_2; \\ 1.0\omega_j, & t_2 \leq t_i \leq t_3; \\ 0.8\omega_j, & t_3 \leq t_i \leq t_4; \\ 0.6\omega_j, & t_4 \leq t_i \leq t_5. \end{cases} \quad (3)$$

(2)  $N$  个任务的排序结果

$N$  个任务的排序结果以  $N \times 4$  的矩阵形式输出,其中:第 1 列表示任务的 ID 序号  $T_i$ ,第 2 列表示该任务的实际开始观测时刻  $RVS_i$ ,第 3 列表示该任务的实际开始回传时刻  $RBS_i$ ,第 4 列表示该任务的收益  $pf_i$ 。

$$\begin{bmatrix} T_1 & RVS_1 & RBS_1 & pf_1 \\ T_2 & RVS_2 & RBS_2 & pf_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_N & RVS_N & RBS_N & pf_N \end{bmatrix}. \quad (4)$$

#### 1.2.3 目标函数

该问题的优化目标为在保证成像质量的前提下,以尽可能少的资源消耗实现最大的任务收益,即

以完成观测和回传的任务总收益作为衡量求解结果的度量指标,目标函数为

$$\max PF = \sum_{i=1}^N pf_i \cdot x_i \cdot y_i \quad (5)$$

1.2.4 约束条件

(1)任务的总容量大小不能超过卫星的最大载重量

$$C_t \leq C_{\max} \quad (6)$$

(2)每个任务只能在其观测时间窗内安排观测活动。设任务  $T_i(i=1,2,\dots,N)$  实际开始观测的时刻为  $RVS_i$ :

$$V S_i \leq RVS_i \leq RVS_i + Vt_i \leq VE_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

(3)所有任务只能在回传时间窗内安排回传活动。设任务  $T_i(i=1,2,\dots,N)$  实际开始回传的时刻为  $RBS_i$ :

$$BS_j \leq RBS_i \leq RBS_i + Bt_i \leq BE_j; \quad i = 1, 2, \dots, N, \exists j = 1, 2, \dots, N_{BW}. \quad (8)$$

(4)每个任务只有在安排观测活动之后才能安排回传活动,且每个任务最多只能安排一次观测和一次回传:

$$y_i \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, N; \quad (9)$$

$$RBV_i + Vt_i \leq RBS_i, i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

2 组件式任务规划方法

2.1 求解框架

求解框架主要分为输入信息管理、任务求解管理、输出信息管理三部分,共计 8 个分功能组件:资源信息组件、约束条件组件、网络结构组件、排序组件群、观测安排组件群、回传安排组件群、中间结果管理组件和最终结果管理组件,其核心部分主要包括任务分配、活动调度(分为观测安排与回传安排)、约束检查,而活动调度组件群受约束条件组件限制,需要设立一定的约束检查机制,并将中间结果交于中间结果管理组件管理<sup>[9]</sup>,而通过启发式算法仿真得到的优化结果存储于最终结果管理组件。具体求解框架结构如图 1 所示。

2.2 任务排序组件群

任务排序组件群有 7 个组件,每个组件基于启发式方法设计了不同的排序策略(如表 1),该策略依据概率累计的方式对任务进行随机选择,得到一个排序序列,然后将任务排序结果提交给活动安排模块。

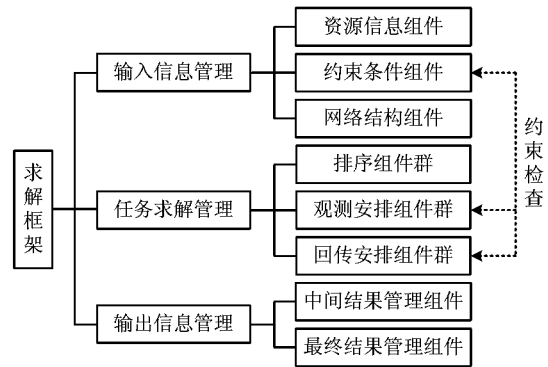


图1 求解框架结构图

表 1 不同排序组件的策略

不同排序组件的策略	公式
【组件 1】按照随机方式对任务进行排序	$P_i = \frac{1}{N}$
【组件 2】优先安排优先级高的任务	$P_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^N p_i}$
【组件 3】优先安排观测时间短的任务	$P_i = 1 - \frac{Vt_i + Bt_i}{\sum_{i=1}^N (Vt_i + Bt_i)}$
【组件 4】优先安排观测时间长的任务	$P_i = \frac{Vt_i + Bt_i}{\sum_{i=1}^N (Vt_i + Bt_i)}$
【组件 5】优先安排优先级与总时间比值小的任务	$P_i = 1 - \frac{p_i / (Vt_i + Bt_i)}{\sum_{i=1}^N p_i / (Vt_i + Bt_i)}$
【组件 6】优先安排优先级与总时间比值大的任务	$P_i = \frac{p_i / (Vt_i + Bt_i)}{\sum_{i=1}^N p_i / (Vt_i + Bt_i)}$
【组件 7】优先安排最佳成像点观测机会早的任务	$P_i = \frac{pf_i}{\sum_{i=1}^N pf_i}$

2.3 观测与回传组件群

观测活动与回传活动具有一定的相似性,都需要进行时间窗约束检查与容量约束检查,再依照一定的策略在可选时间窗内进行活动安排。

观测安排组件首先判断给指定任务安排观测活动的可能性(进行容量约束可行性检测),然后从可选观测时间段内依照时间窗选择策略确定观测开始时间,并提交约束检查,再根据反馈结果确定任务的实际观测开始时间  $RVS_i$ (如图 2)。回传安排组件首先判断给指定任务安排回传活动的可能性,然后从给定任务的可选回传时间段内依照时间窗选择策略安排回传活动,并确保回传活动在观测活动结束后进行,即得到实际回传开始时间  $RBS_i$ (如图 3)。

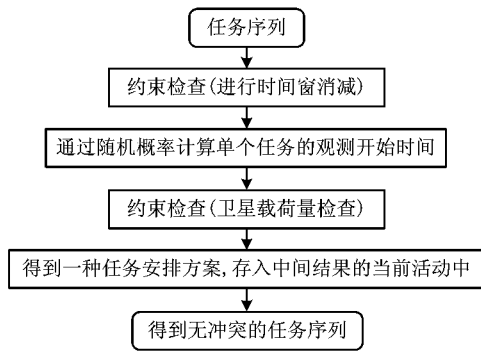


图2 观测活动安排流程图

采用这些策略可以得到无冲突的任务序列(如表 2)。

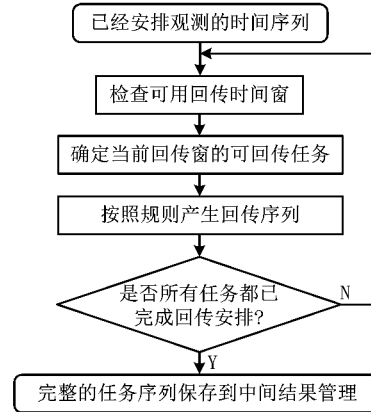


图3 回传活动安排流程图

在观测与回传组件群中具有 8 种组件, 每个组件基于启发式方法设计了不同的时间窗选择策略,

表 2 不同组件的时间窗选择策略

不同组件的时间窗选择策略	观测安排策略公式	回传安排策略公式
【组件 1】简单随机抽取可选时间窗	$P_j = \frac{1}{m_i}$	$P_j = \frac{1}{n_i}$
【组件 2】优先最早可选时间窗	$P_j = 1 - \frac{VS_{ij}}{T}$	$P_j = 1 - \frac{BS_{ij}}{T}$
【组件 3】优先最晚可选时间窗	$P_j = \frac{VS_{ij}}{T}$	$P_j = \frac{BS_{ij}}{T}$
【组件 4】优先中间可选时间窗	$P_j = \frac{ VS_{ij} - T/2 }{T/2}$	$P_j = \frac{ BS_{ij} - T/2 }{T/2}$
【组件 5】优先最短可选时间窗	$P_j = 1 - \frac{ VE_{ij} - VS_{ij} }{\sum_{j=1}^{m_i}  VE_{ij} - VS_{ij} }$	$P_j = 1 - \frac{ BE_{ij} - BS_{ij} }{\sum_{j=1}^{n_i}  BE_{ij} - BS_{ij} }$
【组件 6】优先最长可选时间窗	$P_j = \frac{ VE_{ij} - VS_{ij} }{\sum_{j=1}^{m_i}  VE_{ij} - VS_{ij} }$	$P_j = \frac{ BE_{ij} - BS_{ij} }{\sum_{j=1}^{n_i}  BE_{ij} - BS_{ij} }$
【组件 7】优先时间窗开始时间与窗口长度比值小的可选时间窗	$P_j = 1 - \frac{VS_{ij} /  VE_{ij} - VS_{ij} }{\sum_{j=1}^{m_i} (VS_{ij} /  VE_{ij} - VS_{ij} )}$	$P_j = 1 - \frac{BS_{ij} /  BE_{ij} - BS_{ij} }{\sum_{j=1}^{n_i} (BS_{ij} /  BE_{ij} - BS_{ij} )}$
【组件 8】优先时间窗开始时间与窗口长度比值大的可选时间窗	$P_j = \frac{VS_{ij} /  VE_{ij} - VS_{ij} }{\sum_{j=1}^{m_i} (VS_{ij} /  VE_{ij} - VS_{ij} )}$	$P_j = \frac{BS_{ij} /  BE_{ij} - BS_{ij} }{\sum_{j=1}^{n_i} (BS_{ij} /  BE_{ij} - BS_{ij} )}$

2.4 时间窗裁剪机制

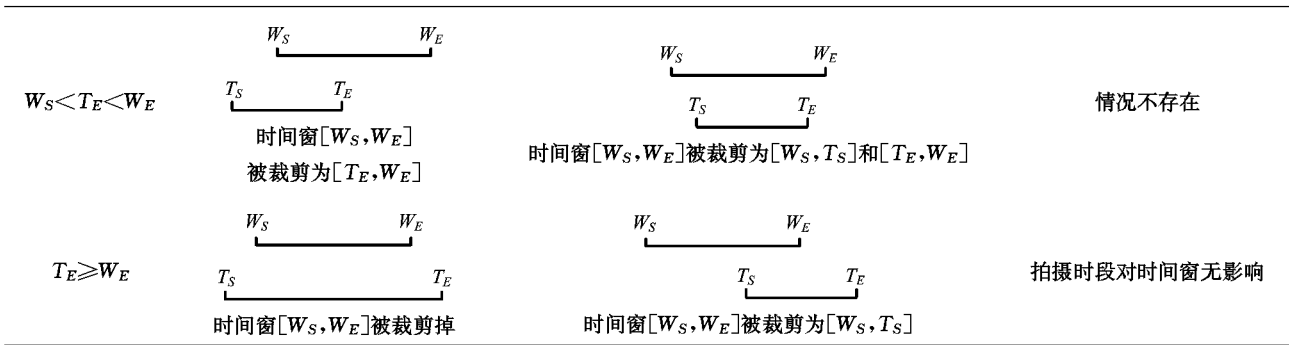
在成像卫星的工作过程中, 每个待观测任务都有自己的观测时间窗, 卫星也有其回传时间窗, 而卫星在同一时刻只能观测一项任务, 显然, 这些时间窗之间存在冲突。不同任务的观测或回传时间窗可能

发生重叠, 为避免这种冲突, 必须在确定时间窗之前对每一个活动的可选时间窗进行剪裁, 以便安排其他活动时将其从可用时间段中剔除, 设新增任务时段为 $[T_s, T_e]$ , 待裁剪的时间窗为 $[W_s, W_e]$ , 时间窗裁剪算法的演示如表 3 所示。

表 3 时间窗裁剪算法示意图

	$T_s \leq W_s$	$W_s < T_s < W_e$	$T_s \geq W_e$
$T_e \leq W_s$	拍摄时段对 时间窗无影响	情况不存在	情况不存在

续表 3



通过对不同时间窗重叠情形的分类考虑,可使时间窗的裁剪更加清晰明了和容易实施,并保证了时间窗的最大利用效率,使任务安排的可行解更接近最优解,实现了在保证观测效果收益的前提下使资源消耗最小。

2.5 约束检查机制

卫星的固存空间是有限的,其存储的观测任务信息不能超过其最大固存量,即不可能将所有任务

同时纳入观测计划,因此要设置一定的容量约束处理机制对固存空间进行维护(如添加活动后信息的更新、擦除过期任务等),以便更加高效地完成观测和回传。本文将整个任务规划过程划分为排序、安排观测活动、安排回传活动、存储空间维护四部分。循环上述操作直到满足结束条件,生成最终方案,其流程图如图 4 所示。

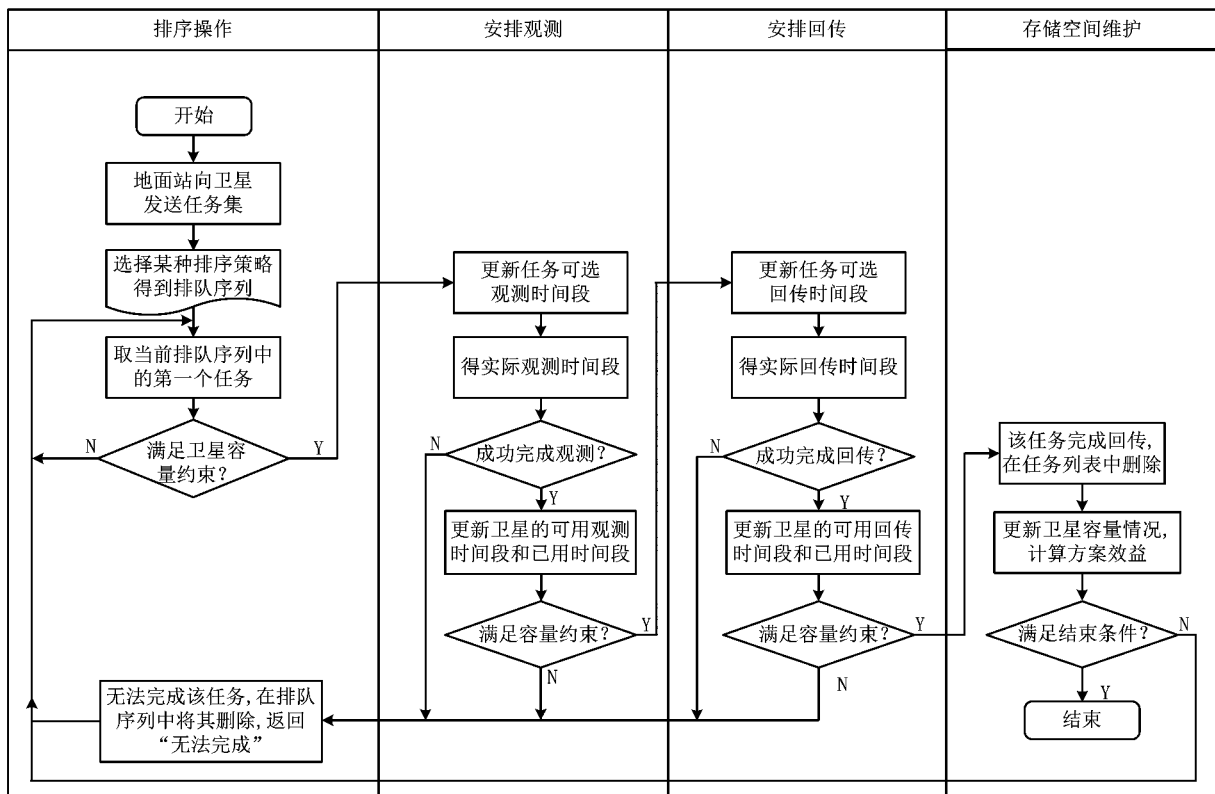


图4 约束检测活动在任务规划系统中的作用

3 实验结果

组件式方法具有良好的模块封装性,为进一步检验其效果和实用性,针对三个不同组件群(排序组

件群、观测组件群、回传组件群)进行不同数据规模下不同策略的对比分析。即设定回传窗口数目为 5,取任务数分别为 10,25,50,100 的四个数据组,进行不同策略组合的优化结果仿真实验,并采用

TOPSIS<sup>[20]</sup>进行评价。首先建立指标体系如图 5 所示,任务规划结果的指标及其权重分别为: $A_1$  任务完成率(0.4), $A_2$  最佳成像时间段任务完成率(0.4), $A_3$  完成任务优先级之和(0.2), $B_1$  回传时间窗利用率(0.1), $B_2$  算法运算时间(0.1)。

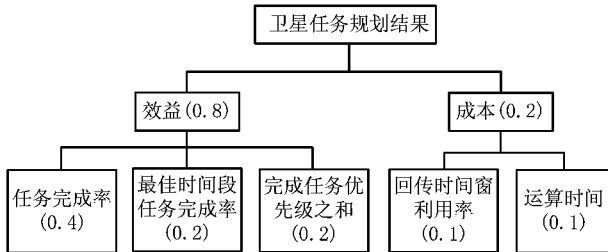


图5 评价指标体系图

$A_1, A_2$  和  $A_3$  为正向指标(越大越好), $B_1$  和  $B_2$  为负向指标(越小越好),可以对每次不同策略组合的实验结果求出理想解和负理想解,再通过计算得到它们之间的欧氏距离,最后根据 TOPSIS 方法得出方案优劣的排序结果,实验结果如表 4 所示。

表 4 TOPSIS 的排序结果

组件群	数据规模	TOPSIS 排序结果
排序组件群	10	6>1>2>7>4>5>3
	25	4>6>1>7>2>5>3
	50	6>7>1>4>3>2>5
	100	6>4>1>2>7>3>5
观测安排组件群	10	1>7>4>2>5>6>8>3
	25	4>7>5>3>2>6>1>8
	50	7>8>6>4>1>5>3>2
	100	4>7>1>3>6>5>2>8
回传安排组件群	10	7>2>5>1>4>8>3>6
	25	5>4>6>2>1>8>7>3
	50	2>5>4>1>7>6>3>8
	100	4>5>7>6>8>3>1>2

针对三个核心求解组件群,在不同数据规模下的 TOPSIS 排序结果如图 6~图 8 所示, $C_i^*$  值越大则评价结果越好。

排序组件群 TOPSIS 的评价结果如图 6 所示,可以看出,策略 6 在不同数据规模下的评价结果均相对较好,策略 5 和策略 3 的评价结果则相对较差。

观测组件群 TOPSIS 的评价结果如图 7 所示,可以看出策略 7 在不同数据规模下的评价结果均相对较好,策略 8 和策略 2 的评价结果则相对较差,但是各个策略的评价结果波动比较明显,受随机性的

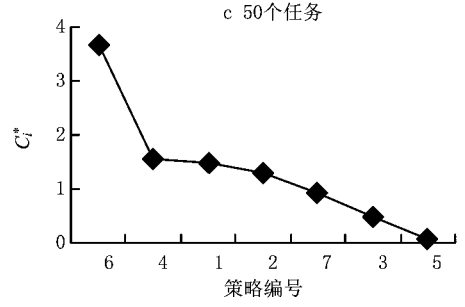
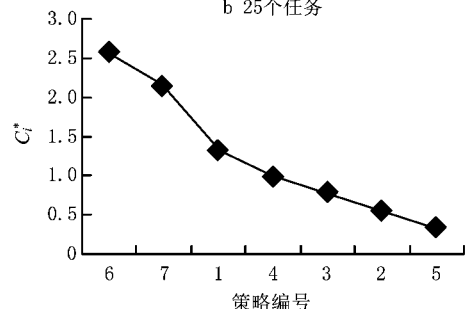
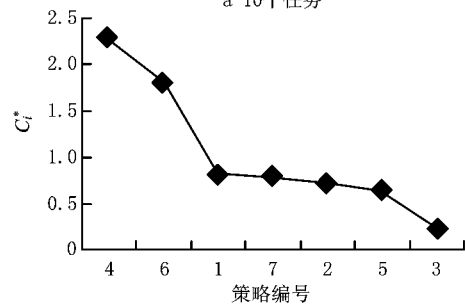
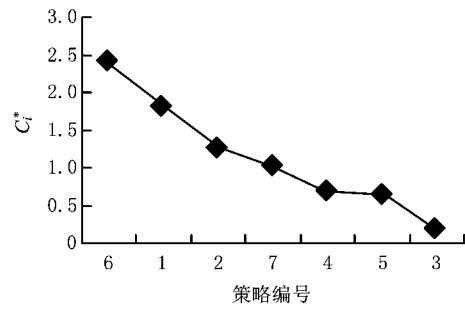


图6 不同数据规模下的排序策略TOPSIS评价结果

影响较大。

回传组件群 TOPSIS 的评价结果如图 8 所示,可以看出,策略 5 在不同数据规模下的评价结果均相对较好,其他策略的评价结果波动比较明显,受随机性的影响较大。

由上述结果可以明显看出,虽然复合型策略在单项指标评价中的表现并不突出,但是在 TOPSIS 方法的综合评价中排序较为靠前,可见复合型策略的综合表现较为良好。

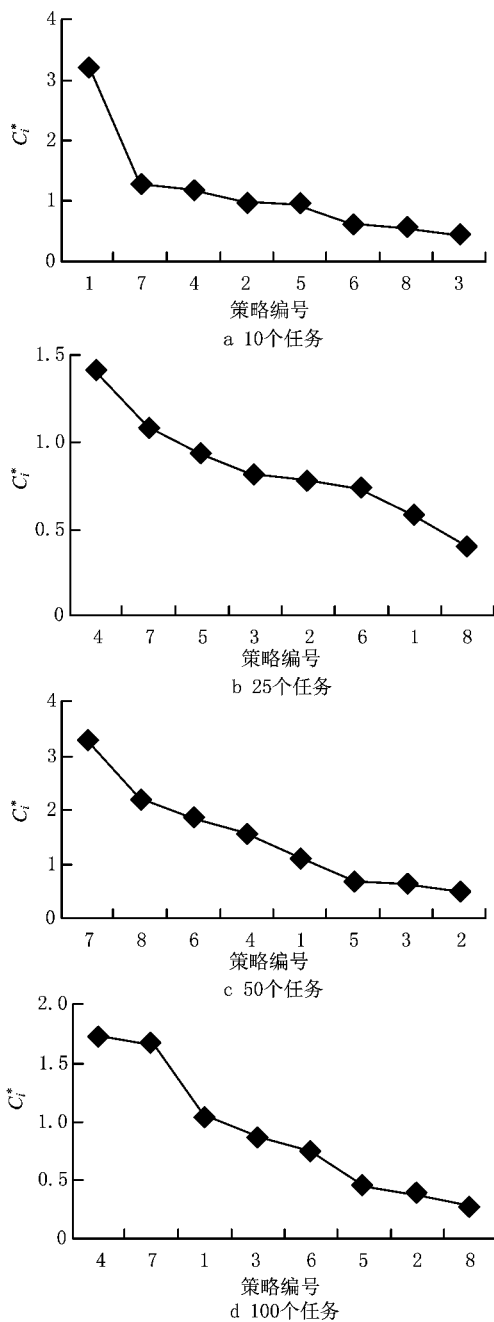


图7 不同数据规模下的观测策略TOPSIS评价结果

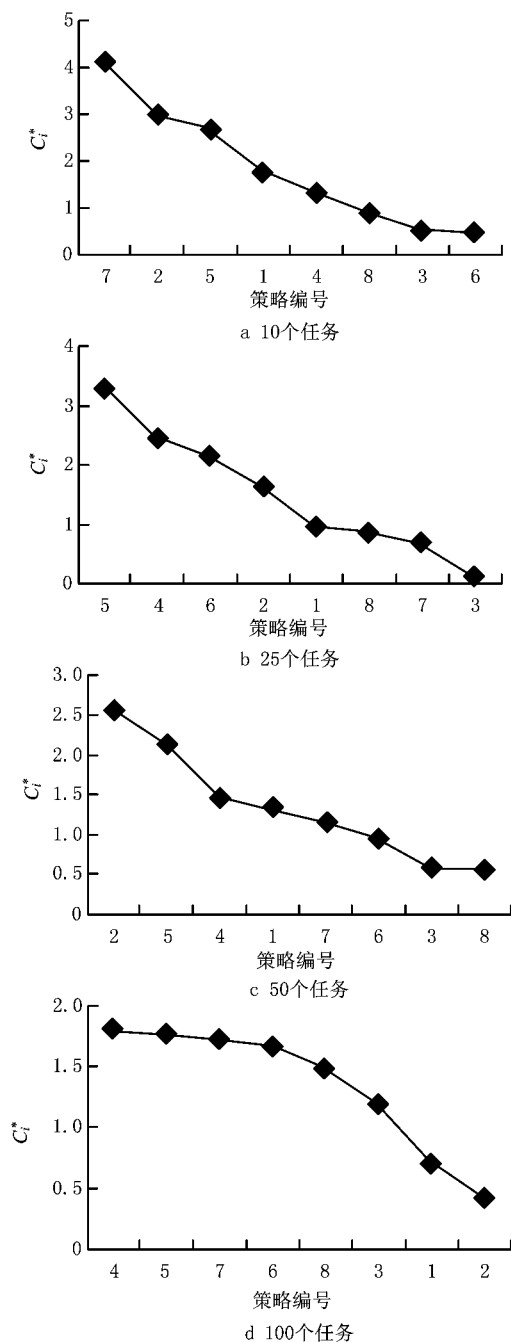


图8 不同数据规模下的回传策略TOPSIS评价结果

### 4 结束语

本文研究了单星任务规划问题,在满足任务观测时间窗、卫星回传时间窗及卫星容量约束的条件下,采用通用化的建模方法,将资源、任务、约束分别进行通用化建模,并采用基于启发式的智能优化求解算法以及时间窗裁剪的创新性处理方式,设计了良好的求解框架,实现了较好的求解效果。在实验结果部分,对组件式框架内不同组件的策略优化结果进行了评价分析,证明了复合型

策略的优异性。

该方法具有一定的健壮性和通用性,可扩展用于智能化自主控制的其他领域,如工厂仓库物资的管控、物流车辆管理等,帮助解决一系列现实问题,这种组件式、模块化的启发式方法也为下一步实现星上自主任务规划系统打下了基础。当然,本文算法建立在理想条件下的简易模型之下,没有考虑卫星的电量约束、云层的干扰作用等,因此该算法还有待进一步丰富和完善,使其更好地应用于工程实

践领域。

### 参考文献:

- [1] SMITH D E, FRANK J, JONSSON A K. Bridging the gap between planning and scheduling[J]. Knowledge Engineering Review, 2000, 15(1): 15-18.
- [2] LI Zhibin. The present development situation and prospects of spacecraft intelligent autonomous control technology[J]. Aerospace Control, 2002, 20(4): 1-7 (in Chinese). [李智斌. 航天器智能自主控制技术发展现状与展望[J]. 航天控制, 2002, 20(4): 1-7.]
- [3] MA Yuanshen, YU Xiaohong, YIN Zhizhong. The modern small satellite technology and development measures[J]. Basic Defense Technology, 2003(5): 13-15 (in Chinese). [马元申, 于小红, 尹志忠. 现代小卫星技术及其发展对策[J]. 国防技术基础, 2003(5): 13-15.]
- [4] SCHETTER T, CAMPBELL M, SURKA D. Multiple agent-based autonomy for satellite constellations[J]. Artificial Intelligence, 2003, 145(1): 147-180.
- [5] WANG Pei, TAN Yuejin. The mission planning problem for earth observing satellites concise review[J]. Computer Research and Application, 2008, 25(10): 2893-2897 (in Chinese). [王沛, 谭跃进. 卫星对地观测任务规划问题简明综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2893-2897.]
- [6] FRATIINI S, CESTA A. The APSI framework; a platform for timeline synthesis[C]//Proceedings of the Workshop on Planning and Scheduling with Timelines. Menlo Park, Cal., USA; AAAI, 2012: 8-15.
- [7] VERFAILLIE G, PRALET C. How to model planning and scheduling problems using timelines[J]. The Knowledge Engineering Review, 2010, 25(3): 319-336.
- [8] XING L N, ROHLFSHAGEN P, CHEN Y W, et al. An evolutionary approach to the multi-depot capacitated arc routing problem[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2010, 14(3): 356-374.
- [9] GRASSET-BOURDEL R, VERFAILLIE G. Planning and replanning for a constellation of agile earth observation satellites [C]//Proceedings of the 21th International Conference on Automated Planning and Scheduling. Menlo Park, Cal., USA; AAAI, 2011.
- [10] PEMBERTON J C, GREENWALD L G. On the need for dynamic scheduling of imaging satellites[J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2002, 34(1): 165-171.
- [11] WOLFE W J, SORENSEN S E. Three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain[J]. Management Science, 2000, 46(1): 148-166.
- [12] NICHOLAS G, MICHAEL J. Maximizing the value of a space mission[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 78(2): 224-241.
- [13] BUHNOVA B, VALLECILLO A, MEDYIDOVIC N, et al. Guest editorial to the Special Issue on Component-Based Software Engineering and Software Architecture[J]. Science of Computer Programming, 2014(90): 67-70.
- [14] PANUNZIO M, VARDANEGA T. A component-based process with separation of concerns for the development of embedded real-time software systems[J]. The Journal of Systems and Software, 2014(96): 105-121.
- [15] LIAN Zhenyu, TAN Yuejin, CHEN Yingwu, et al. A Constraint-based framework for AEOS mission planning and scheduling[C]//Proceedings of ICAPS-12 Workshop on Constraint Satisfaction for Planning and Scheduling. Menlo Park, Cal., USA; AAAI, 2012: 43-50.
- [16] SUN Kai, CHEN Yingwu, WANG Pei. Agile earth observing satellites mission scheduling for disaster and environment monitoring[J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2012(16): 139-146.
- [17] YAO Feng, XING Lining, HE Renjie, et al. Model and algorithm to mission planning of agile earth observing satellites [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(5): 1035-1040 (in Chinese). [姚峰, 邢立宁, 贺仁杰, 等. 灵巧卫星任务规划模型及算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(5): 1035-1040.]
- [18] SUN Kai, XING Lining, CHEN Yingwu. Agile earth observing satellite mission scheduling based on decomposition optimization algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 128-136 (in Chinese). [孙凯, 邢立宁, 陈英武. 基于分解优化策略的多敏捷卫星联合对地观测调度[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 128-136.]
- [19] CHEN Gangyong, YANG Peng, QIU Jing, et al. Optimization method of hierarchical sequential testing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(1): 179-183 (in Chinese). [陈刚勇, 杨鹏, 邱静, 等. 分层顺序测试优化方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 179-183.]
- [20] AMIRI M P. Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(9): 6218-6224.

### 作者简介:

张雪婷(1992—),女,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向:系统规划与管理决策技术,E-mail:zhangxueting0807@163.com;

邢立宁(1980—),男,陕西西安人,副教授,博士,研究方向:管理理论与管理决策技术;

陈英武(1963—),男,湖南益阳人,教授,博士生导师,研究方向:系统规划与管理决策技术;

朱剑冰(1940—),男,安徽宣城人,工程师,博士,研究方向:卫星任务规划技术。