空间站长期运营在轨事件与飞船访问统筹规划

张嘉城, 朱阅詠, 罗亚中*

国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073

*E-mail: luoyz@nudt.edu.cn

收稿日期: 2021-02-05; 接受日期: 2021-03-31; 网络版发表日期: 2021-09-18

摘要 空间站总体运营任务规划是一类对象规模庞大且约束关系复杂的问题, 其主要包括飞船访问序列规划、在轨事件分配规划和需求物资补给规划. 为简化问题, 过去的研究仅对飞船规划、事件规划和物资规划中的某一类子问题单独进行建模和求解. 本文提出了一种考虑多元要素间耦合关系的统筹规划方法, 可同时求解综合规划方案. 首先, 构建了空间站总体规划领域概念模型, 以描述规划对象属性及其间的内在联系. 其次, 为处理各子问题间的复杂约束关系, 提出了基于分解的单个可行方案求解方法. 最后, 基于进化算法优化方案, 提出了应用于多变量规模复合问题的进化策略, 从而克服了不同子问题规模差异对优化的影响. 应用算例分析表明, 所提出的规划模型与方法可有效化解统筹规划中的复杂约束, 所提出的复合问题进化策略可显著提高优化效率.

关键词 空间站, 运营任务, 顶层规划, 进化算法

1 引言

空间站是一类可以在近地轨道长期运营, 并支持数名航天员巡访、驻留, 进行空间观测和微重力环境实验的综合性载人航天器. 运营任务规划是实施空间站长期运营管理的关键技术^[1]. 为支持国际空间站运营, 以美国为首的各成员国开发了运营规划系统^[2]. 我国空间站“天宫”将于2022年左右建成并进入全面运营阶段^[3]. 为满足我国空间站工程需求, 自2007年起国内展开了空间站运营任务规划技术的研究^[4].

按照规划周期与规划颗粒度不同, 将空间站运营任务规划分为总体层规划, 任务层规划和执行层规划^[1]. 本文研究面向总体层规划. 总体层规划的规划周期通常为3~5年, 其中包含6~10个班次的航天员乘组

先后访问驻留. 每一班次的航天员乘组驻留周期称为一个任务周期. 总体层规划的主要目的是产生顶层运营方案, 包括每个任务周期内要执行的事件列表、乘组的驻留与轮换方案、飞船的发射序列和货船的物资装载方案等. 事件是指空间站上进行的任务活动, 包括平台维护和维修、交会对接、乘员生命保障和科学实验等.

目前, 关于总体层规划的研究主要涉及三类: 事件总体规划、物资补给总量规划和飞船发射序列规划. Zhang等人^[5]分析研究了空间站长期运营事件总体分配规划方法. 文献^[6~8]研究了空间站运营物资补给规划模型与方法. Ho等人^[9,10]提出了一种考虑事件执行时间与物资补给耦合关系的一体化规划方法. Lin等人^[11]提出了一种统筹规划飞船发射序列与物资补给

引用格式: 张嘉城, 朱阅詠, 罗亚中. 空间站长期运营在轨事件与飞船访问统筹规划. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 651–666

Zhang J C, Zhu Y H, Luo Y Z. Integrated planning of on-orbit events and transport visits for long-term space station operation (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 651–666, doi: [10.1360/SST-2021-0057](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0057)

方案的多目标优化模型。然而, 实际工程中, 待规划的事件、物资、飞船三者间皆存在着复杂的耦合关系: 物资补给是事件顺利执行的基础; 载人飞船发射序列决定了影响事件执行计划的乘员驻留方案; 货船发射序列决定了物资补给的时效性。目前, 还缺乏综合考虑三者联系的统筹规划模型与方法研究。在其他领域, 文献[12,13]研究了多卫星自动任务分配规划方法, 文献[14]提出了一种多光学卫星观测任务规划方法。然而, 由于规划特性、规划需求和约束形式存在较大差异, 这些研究难以直接应用到更为复杂的空间站运营规划问题上。

相比文献[5~11], 本文系统地构建了空间站运营总体层统筹规划模型。为处理问题中的复杂约束, 提出了描述规划对象属性和联系的领域概念模型和基于分解的统筹规划可行方案求解方法。所提出的单个方案求解方法是基于元启发式算法框架设计的。本文利用具有较强通用性和全局收敛性的进化算法对方案进行优化。所提出的基于分解的方案求解方法定义了一种由优化变量到规划方案的映射方式。在该映射过程中结合各规划对象间内在联系设计了多项约束化解策略, 使面向任意变量取值更容易获得可行解。方案优化过程中, 提出了一种应用于多变量规模复合问题的进化策略, 以消除各子问题设计变量规模差异对优化效率的影响。

2 问题描述

2.1 问题概述

本文方法对空间站未来3~5年运营中的飞船发射序列、事件分配方案、物资装载方案进行总体层面的规划, 协调飞船事件物资之间的约束关系, 在提高事件执行率与物资上行率的同时降低总成本。本文所研究问题属于空间站运营顶层规划范畴, 其旨在协调总体需求与约束关系, 根据事件执行需求及物资上行需求求解对飞船的总体需求, 协调成本与效益对冗余需求进行裁剪。事件规划时仅考虑航天员在轨工作时间总量约束, 而物资规划时仅考虑装载总量约束。所出具方案为数年内航天员训练及任务准备、大型长周期产品投产和火箭发射任务准备提供总体依据。而在底层运营规划中, 则会根据多项在轨资源约束求解事件的详细执行计划, 且在物资装载时须考虑打包方式、整

体布局和质心配比等细节。

本文所研究的空间站运营总体层统筹规划问题本质上是一类装包问题, 如图1所示。事件分配至各任务周期的过程可类比为二维装包问题, 容量通过航天员人时计量。人时定义为执行某事件需要各航天员投入的工作时间总和。同样, 物资装载至各货运飞船的过程亦可类比为二维装包问题, 此时容量通过质量和体积计量。在规划中, 首先进行飞船发射序列规划, 获得乘员驻留方案和货船补给时间, 再将事件和物资分别放入各任务周期和各货船。

不同于一般的装包问题, 空间站总体层统筹规划问题是一类由飞船发射规划、事件规划和物资规划等多个子问题组成的复合问题, 且各子问题间存在着复杂的约束关系。因此, 处理该问题需在装包问题本质的基础上, 构造描述各子问题间约束关系的数学模型, 并设计处理约束的规划逻辑与方法。

问题的解决流程如图2所示。首先, 构建描述各规划实体要素的概念模型, 基于进化算法框架明确各子问题的设计变量、约束条件和目标函数。然后, 构造由一组设计变量取值到一套统筹规划方案的映射, 进而计算对应的一组目标函数的值。最后, 在传统进化算法框架下对方案进行优化。由于事件规划是以各任务周期为基准的, 且货运补给任务也应在各任务周期确定后再进行规划。另外, 在物资装载前需先确定货船的发射时间。因此, 本文采取了载人飞船发射序列规划、事件总体分配规划、货运飞船发射序列规划、物资补给规划、冗余事件及物资裁剪的顺序, 由各子问题的设计变量逐步计算相应规划方案。

2.2 概念模型

文献[15]提出使用本体模型对空间站运营任务规划概念建模。本文在其基础上对空间站长期运营在轨事件与飞船访问统筹规划中各实体要素的概念模型进行描述, 包括事件概念模型、物资概念模型、载人飞船概念模型和货运飞船概念模型, 如图3所示。

事件概念模型中, N_D^e 是识别事件的唯一编号; P 为事件优先级, 从高到低分为1~4级, 1, 2级为必需执行的重要事件, 3, 4级为普通事件; 优先级是事件规划取舍所参考的一项主要属性, 具体的定义方式不限于此; 需要强调的是对于本文方法事件优先级的定义需

图 1 (网络版彩图)空间站运营总体层统筹规划示意图

Figure 1 (Color online) Illustration of top-level integrated planning for space-station operation.

区分重要事件和普通事件并具有明显层级划分, 其中重要事件必须执行而普通事件可酌情裁剪; E , C , H , $M_{r.c.}$, $V_{r.c.}$ 分别代表该事件执行需要消耗或占用的电能、通信、人时等资源以及需求物资的质量与体积。 $T_{e.e.}$, $T_{l.e.}$ 分别是事件的最早、最晚执行时间。

物资概念模型中, N_{ID}^c 是识别物资的唯一编号; I 为物资重要性, 从高到低分为 1~4 级, 1, 2 级为必需上行的重要物资, 3, 4 级为普通物资; 类似于事件优先级, 物资重要性的定义亦不限于此, 但需区分重要物资和普通物资并体现层级划分; M , V 分别为该物资的质量与体积; $T_{e.s.}$, $T_{l.s.}$ 分别是物资的最早、最晚上行时间。

载人飞船概念模型中, N_c 是搭载乘员人数; $D_{m.v. \min}$, $D_{m.v. \max}$ 分别为最短、最长停靠时间, 即每一班次乘员在轨驻留的最短、最长时间; 载人飞船访问后将对接停靠于空间站, 直至该任务周期结束时搭载航天员返回地面; $\Delta T_{c.r. \max}$ 为乘员轮换时间上限; 相邻两班乘组同时在轨进行工作交接期间定义为乘员轮换; $\Delta T_{u.m. \max}$

为无人在轨驻留最长时间; $N_{m.v. \max}$ 为载人飞船的额定数量; $C_{m.v.}$ 为单艘使用成本。

货运飞船概念模型中, $D_{c.v. \min}$, $D_{c.v. \max}$ 分别为最短、最长停靠时间; $I_{c.v. \min}$, $I_{c.v. \max}$ 分别为相邻两艘货运飞船发射的最短、最长时间间隔; $M_{\max}$, $V_{\max}$ 分别为运载物资的质量、体积上限; $N_{c.v. \max}$ 为货船的额定数量; $C_{c.v.}$ 为单艘使用成本。

工程实际中, 载人飞船除搭载航天员进行天地往返之外, 还会上行少量乘员供给类物资(大约 300 kg)及下行少量空间实验样品(大约 50 kg)。由于载人飞船上下行所涉及物资样品的种类单一且数量较少, 通常可人为直接作规划, 故其不在本文方法考虑范畴内。货运飞船在将物资上行后便充当在轨储货仓的角色, 其将在之后的某次货船补给前携废弃物坠入大气层自毁。通常货船分离坠毁前装载废弃物的原则是尽可能地满载, 而不区分废弃物类型, 故其也不在本文方法涉及范畴内。

图2 (网络版彩图)问题求解流程示意图

Figure 2 (Color online) Illustration of the problem solution flow.

2.3 设计变量

文献[5]中将事件所分配至的子周期作为设计变量,将资源物资供给上限作为约束条件,将事件执行对资源物资需求的均衡性作为目标函数。文献[6~10]将物资的上行时间和上行量作为设计变量,将飞船运载能力作为约束条件,将补给总成本和物资上行时效性作为目标函数。文献[11]在文献[6~10]的基础上,增加

了描述飞船发射时间的设计变量、限制发射间隔的约束条件,以及描述发射独立性的目标函数。

基于上述研究,本文设计变量包括飞船的发射时间和在轨停靠时长、事件所分配至的任务周期,以及物资所装载至的货运飞船。

$$[\mathbf{X}_1; \mathbf{X}_2; \mathbf{X}_3; \mathbf{X}_4]$$

$$= [T_{m.v.l}^1, \Delta T_{m.v.d}^1, \dots, T_{m.v.l}^i, \Delta T_{m.v.d}^i, \dots, T_{m.v.l}^{N_{m.v.\max}}, \Delta T_{m.v.d}^{N_{m.v.\max}}; X_{e1}, \dots, X_{en_{e\max}}; T_{c.v.l}^1, \dots, T_{c.v.l}^i, \dots, T_{c.v.l}^{N_{c.v.\max}}; X_{c1}, \dots, X_{cn_{c\max}}]$$

$$n = 2N_{m.v.\max} + n_{e\max} + N_{c.v.\max} + n_{c\max}$$

式中, n 为设计变量个数; $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4$ 分别对应载人飞船规划、事件规划、货运飞船规划和物资规划; $T_{m.v.l}^i, \Delta T_{m.v.d}^i$ 分别为第 i 艘载人飞船的发射时间和停靠时长; X_{ei} 为第 i 个事件所被分配至的任务周期编号; $n_{e\max}$ 为待规划事件总数量; $T_{c.v.l}^i$ 为第 i 艘货运飞船的发射时间; X_{ci} 为第 i 件物资所被装载至的货运飞船班次; $n_{c\max}$ 为物资总件数。

2.4 约束条件

约束条件为发射间隔约束、发射窗口约束、人时供给上限约束、货船运载能力约束、重要事件执行率约束和重要物资上行率约束:

(1) 为预留发射准备时间,相邻两次飞船发射的时间间隔须大于等于30天。

$$T_{r.l}^{i+1} - T_{r.l}^i \geq 30, i = 1, 2, \dots, n_{m.v.} + n_{c.v.} - 1,$$

与事件规划相关的参数			与物资规划相关的参数			与飞船规划相关的参数		
事件			物资			载人飞船		
基本属性	N_{id}^e	编号	基本属性	N_{id}^s	编号	驻留属性	N_c	乘员人数
	P	优先级		I	重要性		$D_{m.v.\min}$	最短停靠时长
需求资源	E	电能需求	装载属性	M	质量		$D_{m.v.\max}$	最长停靠时长
总量	C	通信资源需求		V	体积	载人飞船	$\Delta T_{c.r.\max}$	乘员轮换时间上限
	H	人时需求	上行时间	$T_{e.s.}$	最早上行时间	发射约束	$\Delta T_{u.m.\max}$	无人驻留时间上限
需求物资	$M_{r.c.}$	需求物资质量	窗口约束	$T_{l.s.}$	最晚上行时间	成本属性	$N_{m.v.\max}$	载人飞船额定数量
总量	$V_{r.c.}$	需求物资体积					$C_{m.v.}$	单艘使用成本
执行时间	$T_{e.e.}$	最早执行时间						
窗口约束	$T_{l.e.}$	最晚执行时间						
						货运飞船		
						$D_{c.v.\min}$	最短停靠时长	在轨停靠
						$D_{c.v.\max}$	最长停靠时长	时长约束
						$I_{c.v.\min}$	货船最短发射间隔	货运飞船
						$I_{c.v.\max}$	货船最长发射间隔	发射约束
						$M_{\max}$	运载物资质量上限	物资运载
						$V_{\max}$	运载物资体积上限	能力属性
						$N_{c.v.\max}$	货船额定数量	
						$C_{c.v.}$	单艘使用成本	成本属性

图3 (网络版彩图)规划实体要素概念模型示意图

Figure 3 (Color online) Illustration of concept models of entities in planning.

式中, $T_{r,l}^i$ 为以时间先后排序的第 i 次飞船发射时间, 包括所有载人飞船和货运飞船; $n_{m,v}$, $n_{c,v}$ 分别为载人飞船和货运飞船的实际总数量。

(2) 飞船的发射时间须处于规划周期内的某一发射窗口内。

$$\begin{aligned} T_{r,l}^i &\in \Delta T_w, i = 1, 2, \dots, n_{m,v} + n_{c,v}, \\ \exists w &= 1, 2, \dots, n_{l,w}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ΔT_w 是规划周期内的第 w 个发射窗口; $n_{l,w}$ 是规划周期内的发射窗口总数量。

(3) 单任务周期的人时需求总量须不超过航天员可提供人时总量上限。

$$\sum_{j=1}^{n_e^i} h_e^{ij} \leq h_{\max}^i, i = 1, 2, \dots, n_{m,v}, \quad (5)$$

式中, n_e^i 为第 i 个任务周期的事件总数; h_e^{ij} 为第 i 个任务周期的第 j 个事件的人时需求; $h_{\max}^i$ 为第 i 个任务周期的人时总量上限。

(4) 重要事件执行率须达到 100%。

$$\sum_{p=1 \text{ or } 2} Y_e = n_e^{p=1 \text{ or } 2}, \quad (6)$$

式中, $n_e^{p=1 \text{ or } 2}$ 为优先级为 1 或 2 的事件总数量; $Y_e = \{0, 1\}$ 代表事件是否执行, 1 代表执行, 0 代表裁剪。

(5) 每艘货运飞船实际装载物资总质量、体积须分别不超过其可运载物资总质量、体积的上限。

$$\sum_{j=1}^{n_c^i} M_c^{ij} \leq M_{c,v,\max}^i, i = 1, 2, \dots, n_{c,v}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{n_c^i} V_c^{ij} \leq V_{c,v,\max}^i, i = 1, 2, \dots, n_{c,v}, \quad (8)$$

式中, n_c^i 为第 i 艘货运飞船装载物资总数量; M_c^{ij} , V_c^{ij} 分别为第 i 艘货运飞船装载的第 j 件物资的质量和体积; $M_{c,v,\max}^i$, $V_{c,v,\max}^i$ 分别为第 i 艘货运飞船可运载物资总质量和体积上限。

(6) 重要物资上行率须达到 100%。

$$\sum_{m=1 \text{ or } 2} Y_c = n_{c,\max}^{m=1 \text{ or } 2}, \quad (9)$$

式中, $n_{c,\max}^{m=1 \text{ or } 2}$ 为重要性为 1 或 2 的物资总数量;

$Y_c = \{0, 1\}$ 代表物资是否上行, 1 代表上行, 0 代表裁剪。

2.5 目标函数

目标函数包括飞船总成本、事件物资裁剪率、人时利用率、需求物资总量分布均衡性和发射独立性:

(1) 飞船成本。

$$\min(f_1) = \sum_{i=1}^{n_{m,v}} C_{m,v}^i + \sum_{i=1}^{n_{c,v}} C_{c,v}^i, \quad (10)$$

式中, $C_{m,v}^i$ 为第 i 艘载人飞船的成本; $C_{c,v}^i$ 为第 i 艘货运飞船的成本。

(2) 事件物资裁剪率。

$$\min(f_2) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{n_{e,\max}} \sum_{i=1}^{n_{e,\max}} Y_{ei} + 1 - \frac{1}{n_{c,\max}} \sum_{i=1}^{n_{c,\max}} Y_{ci} \right). \quad (11)$$

(3) 人时利用率。

$$\min(f_3) = \sqrt{\frac{1}{n_{m,v}} \sum_{i=1}^{n_{m,v}} \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n_e^i} h_e^{ij}}{h_{\max}^i} \right)^2}. \quad (12)$$

(4) 各个任务周期物资需求均衡性。

$$\begin{aligned} \min(f_4) = \frac{1}{2} &\left(\sqrt{\frac{1}{n_{m,v}} \sum_{i=1}^{n_{m,v}} \left(\frac{M_{r,c}^i}{C_{t,r,m} \cdot \Delta T_{m,v,d}^i} - \bar{\delta}_{t,r,m} \right)^2} \right. \\ &\left. + \sqrt{\frac{1}{n_{m,v}} \sum_{i=1}^{n_{m,v}} \left(\frac{V_{r,c}^i}{C_{t,r,v} \cdot \Delta T_{m,v,d}^i} - \bar{\delta}_{t,r,v} \right)^2} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

式中,

$$\bar{\delta}_{t,r,m} = \frac{1}{n_{m,v}} \sum_{i=1}^{n_{m,v}} \left(\frac{M_{r,c}^i}{C_{t,r,m} \cdot \Delta T_{m,v,d}^i} \right), \quad (14)$$

$$\bar{\delta}_{t,r,v} = \frac{1}{n_{m,v}} \sum_{i=1}^{n_{m,v}} \left(\frac{V_{r,c}^i}{C_{t,r,v} \cdot \Delta T_{m,v,d}^i} \right), \quad (15)$$

式中, $M_{r,c}^i$, $V_{r,c}^i$ 分别为第 i 个任务周期需求物资总质量和总体积; $C_{t,r,m}$, $C_{t,r,v}$ 分别为单个任务周期内的需求物资总质量、总体积的归一化系数。

(5) 飞船发射独立性.

$$\min(f_5) = \frac{1}{T} \left[T_{m.v.l.}^1, 2 + \sum_{i=1}^{n_{m.v.}^1-1} (T_{m.v.l.}^{i+1} - T_{m.v.l.}^i)^2 + (T - T_{m.v.l.}^{n_{m.v.}^1})^2 \right. \\ \left. + T_{c.v.l.}^1, 2 + \sum_{i=1}^{n_{c.v.}^1-1} (T_{c.v.l.}^{i+1} - T_{c.v.l.}^i)^2 + (T - T_{c.v.l.}^{n_{c.v.}^1})^2 \right] \quad (16)$$

式中, $T_{m.v.l.}^i$, $T_{c.v.l.}^i$ 分别代表第 i 艘载人飞船、货运飞船的发射时间, 以天描述; T 为规划周期的总天数.

3 基于分解的统筹规划优化方法

3.1 优化流程

采用进化算法优化求解统筹规划方案, 流程如图4所示. 在进化算法框架下统一对飞船事件物资规划方案进行优化.

将整个问题分解为若干子问题, 采用解构造方式由设计变量逐步计算单个个体对应的综合规划方案可行解. 各规划实体要素间存在如下制约关系: (1) 事件规划前需确定乘员驻留方案; (2) 货船发射序列受载人飞船规划方案制约; (3) 确定物资装载方案的前提是货

船上行时间已确定. 因此, 解构造的逻辑顺序为: 首先, 确定载人飞船发射序列, 获得乘员驻留方案; 其次, 将事件分配至各个任务周期; 然后, 在载人飞船发射方案基础上安排货运补给任务, 确定货运飞船发射序列; 最后, 将物资装载至各艘货船.

获得单个个体对应的综合规划方案后, 判断其是否存在约束冲突并计算目标函数的值. 认为存在约束冲突的个体劣于满足约束条件的个体. 进行选择、交叉、变异, 产生下一代种群, 不断进化迭代. 若达到迭代终止条件, 取当前种群为Pareto最优前沿. 若解 A 存在至少一个目标函数优于解 B 且解 A 的所有目标函数不劣于解 B , 则称解 A 支配解 B , 记为 $A \prec B$. 若不存在一个解 A^* 使 $A^* \prec A$, 则称解 A 为Pareto最优解. Pareto前沿定义为Pareto解的集合. 在工程实际中, 最终仅需要单个解作为决策方案, 而非整个Pareto前沿. 本文利用传统的多属性决策方法从通过进化算法优化得到的Pareto前沿中选择最终决策解, 决策过程中对各目标函数的偏好权重相同.

3.2 载人飞船发射序列规划

载人飞船发射序列规划的设计变量代表每艘载人飞船的发射时间和停靠时间, 即式(1)中

$$\mathbf{X}_1 = [T_{m.v.l.}^1, \dots, T_{m.v.l.}^i, \dots, T_{m.v.l.}^{N_{m.v.}^{\max}}, \\ \Delta T_{m.v.d.}^1, \dots, \Delta T_{m.v.d.}^i, \dots, \Delta T_{m.v.d.}^{N_{m.v.}^{\max}}],$$

式中, $T_{m.v.l.}^i \in [1, T]$ 为第 i 艘载人飞船的发射时间, 以天描述; 规划周期的第1天为基准时间, T 为规划周期的总天数; $\Delta T_{m.v.d.}^i \in [D_{m.v.\min}, D_{m.v.\max}]$ 为第 i 艘载人飞船的停靠时长, 即第 i 个任务周期的跨度, 以天度量. $\mathbf{X}_1$ 的编码改写形式:

$$\mathbf{X}_1 = [X_{m.v.l.}^1, \dots, X_{m.v.l.}^i, \dots, X_{m.v.l.}^{N_{m.v.}^{\max}}, \\ \Delta T_{m.v.d.}^1, \dots, \Delta T_{m.v.d.}^i, \dots, \Delta T_{m.v.d.}^{N_{m.v.}^{\max}}], \quad (17)$$

式中, 将 $T_{m.v.l.}^i$ 改写为 $X_{m.v.l.}^i$; $X_{m.v.l.}^i \in [0, 1]$ 为0~1之间的实数, 用以确定第 i 艘载人飞船的发射时间.

在规划中, 以上一艘载人飞船的返回时间 $T_{m.v.r.}^i$ 约束下一艘载人飞船的发射时间 $T_{m.v.l.}^{i+1}$, 如图5所示. $T_{m.v.r.}^i = T_{m.v.l.}^i + \Delta T_{m.v.d.}^i$ 为第 i 艘载人飞船的返回时间, 以天描述. 在此约束下, 难以直接通过随机变量来表示每艘

图4 (网络版彩图)优化流程示意图

Figure 4 (Color online) Illustration of the optimization process.

图 5 (网络版彩图)载人飞船发射时间规划的示意图

Figure 5 (Color online) Illustration of planning manned vehicles' launches.

载人飞船的发射时间, 故在编码时通过取值范围为0~1之间的随机实数 $X_{m.v.l}^{i+1}$ 表示 $T_{m.v.l}^{i+1}$:

$$T_{m.v.l}^{i+1} = T_{m.v.r}^i - \Delta T_{c,r,max} + X_{m.v.l}^i \cdot (\Delta T_{c,r,max} + \Delta T_{u,m,max}), \quad (18)$$

式中, $\Delta T_{c,r,max}$ 为乘员轮换时间上限, 以天度量; $\Delta T_{u,m,max}$ 为在轨无人驻留时间上限, 以天度量.

当 $T_{m.v.l}^i > T$, ($i = N_{m.v.}, \dots, N_{m.v,max}$)时, 即载人飞船的发射时间 $T_{m.v.l}^i$ 大于规划周期总天数 T 时, 将这些载人飞船从方案中裁剪掉. 其中, $N_{m.v.}$ 为发射时间超出规划周期的最早的一班载人飞船的序号, 则载人飞船的需求总数量取为 $n_{m.v.} = N_{m.v.} - 1$.

3.3 事件总体分配方案规划

事件总体分配规划的设计变量代表各个事件所被分配至的任务周期编号, 即式(1)中

$$\mathbf{X}_2 = [X_{e1}, \dots, X_{ep}, \dots, X_{en_{emax}}],$$

式中, $X_{ei} \in [1, n_{m.v.}]$ 为第 i 个事件所被分配至的任务周期编号; n_{emax} 为待规划事件总数量. $\mathbf{X}_2$ 的编码改写形式:

$$\mathbf{X}_2 = [X_{e1}^*, \dots, X_{ep}^*, \dots, X_{en_{emax}}^*], \quad (19)$$

式中, $X_{ei}^* \in [0, 1]$ 为0~1之间的实数, 用以确定第 i 个事件所被分配至的任务周期.

定义第 i 个事件的可被分配至的任务周期集合 $[m_1, \dots, m_j, \dots, m_{n_{af}^i}]$; 其中, m_j 为第 i 个事件的第 j 个可被分配至的任务周期(即第 i 个事件可在第 m_j 个任务周期内执行)的编号; n_{af}^i 为第 i 个事件的备选任务周期总个数; 若 $n_{af}^i = 0$, 则第 i 个事件无法执行; 须满足事件执行时间窗口与备选任务周期存在交集:

$$[T_{m.v.l}^{m_j}, T_{m.v.r}^{m_j}] \cap [T_{e.s}^i, T_{l.s}^i] \neq \emptyset, \exists j = 1, \dots, n_{m.v.}, \quad (20)$$

式中, $T_{e.s}^i, T_{l.s}^i$ 分别为第 i 个事件的最早、最晚执行时间. 若

$$[T_{m.v.l}^{m_j}, T_{m.v.r}^{m_j}] \cap [T_{e.s}^i, T_{l.s}^i] = \emptyset, \forall j = 1, 2, \dots, n_{m.v.}, \quad (21)$$

则第 i 个事件无法执行, 即 $Y_{ei} = 0$. 第 i 个事件所被分配至的任务周期通过下式求解:

$$F_i = \{m_j | j = \lceil X_i^* \cdot n_{af}^i \rceil\}, \quad (22)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算符. 在确定了每一个事件所被分配至的任务周期后, 即获得了每一个任务周期要执行的事件清单.

3.4 货运飞船发射序列规划

货船发射序列规划的设计变量代表每艘货船的发射时间, 即式(1)中

$$\mathbf{X}_3 = [T_{c.v.l}^1, \dots, T_{c.v.l}^i, \dots, T_{c.v.l}^{N_{c.v,max}}],$$

式中, $T_{c.v.l}^i \in [1, T]$ 为第 i 艘货船的发射时间, 以天描述. $\mathbf{X}_3$ 的编码改写形式:

$$\mathbf{X}_3 = [X_{c.v.l}^1, \dots, X_{c.v.l}^i, \dots, X_{c.v.l}^{N_{c.v,max}}], \quad (23)$$

式中, 将 $T_{c.v.l}^i$ 改写为 $X_{c.v.l}^i$, $X_{c.v.l}^i \in [0, 1]$ 为0~1之间的实数, 用以确定第 i 艘货船的发射时间. 第 i 艘货船的返回时间 $T_{c.v.r}^i = T_{c.v.l}^i + \Delta T_{c.v.d}^i$.

“天宫”共设有三个对接口: 径向对接口、前向对接口、后向对接口. 径向对接口仅可供载人飞船对接. 前向对接口与后向对接口既可供载人飞船对接, 也可供货运飞船对接.

货运飞船发射序列规划流程如图6所示. 其中, $N_{c.v.} \in [1, n_{c.v,max}]$ 为规划中货船的编号; $N_{r.i.} \in \{0, 1\}$ 表示径向对接口是否被占用, 1表示占用, 0表示不占用; $x \in \{1, 2\}$ 代表当前可供货船对接的对接口总数量. 当载人飞船对接在径向口时, $x=2$, 而当其对接在轴端口时, $x=1$; I_{min} 为相邻两次飞船发射最短时间间隔. 另外, 假设规划边界值:

$$\begin{aligned} T_{m.v.r}^i &= \{0 | i < 1\}, \\ T_{m.v.l}^i &= \{T | i > n_{m.v.}\}, \\ T_{c.v.r}^i &= \{0 | i < 1\}. \end{aligned}$$

图 6 货运飞船发射时间规划流程图

Figure 6 Illustration of planning cargo vehicles' launches.

确定一艘货船的可选发射区间的过程如图7所示。

其中, 下限 a 通过比较货船最小发射间隔约束、货船对接接口约束和与载人飞船发射的最小间隔约束限定的临界值获得, 上限 b 通过比较货船最大发射间隔约束和与载人飞船发射的最小间隔约束限定的临界值获得。通过设计变量 $X_{c.v.l}^{N_{c.v.}}$ 从可选发射区间中确定第 $N_{c.v.}$ 艘货船的发射时间。

当货船的发射时间 $T_{c.v.l}^i$ 大于规划周期总天数 T 时, 即 $T_{c.v.l}^i > T, (i = N_{c.v.}, \dots, n_{c.v. \max})$, 将这些货船从方案中裁剪掉。其中, $N_{c.v.}$ 为发射时间超出规划周期的最早的一班货船的序号, 则货运飞船的需求总数量取为 $n_{c.v.} = N_{c.v.} - 1$ 。

3.5 物资补给装载方案规划

物资补给规划的设计变量代表各件物资所被装载至的货运飞船班次, 即式(1)中

$$\mathbf{X}_4 = [X_{c_1}, \dots, X_{c_i}, \dots, X_{c_{n_{c.v. \max}}}],$$

式中, $X_{c_i} \in [1, n_{c.v.}]$ 为第 i 件物资所被装载至的货运飞船班次; $N_{c.v.}$ 为规划周期内的货运飞船需求总数量; $n_{c.v. \max}$ 为物资总件数。 $\mathbf{X}_4$ 的编码改写形式为

$$\mathbf{X}_4 = [X_{c_1}^*, \dots, X_{c_i}^*, \dots, X_{c_{n_{c.v. \max}}}^*], \quad (24)$$

图 7 (网络版彩图)确定货运飞船可选发射区间示意图

Figure 7 (Color online) Illustration of finding the available range of the launch time of cargo vehicles.

式中, $X_{c_i}^* \in [0, 1]$ 为 0~1 之间的实数, 用以确定第 i 件物资所装载至的货运飞船班次.

定义第 i 件物资的可被装载至的货运飞船集合 $[c_1, \dots, c_j, \dots, c_{n_{a,i}^i}]$, 其中 c_j 为第 i 件物资可被装载至的第 j 艘飞船(即第 i 件物资可由第 c_j 艘飞船上行)的编号; $n_{a,i}^i$ 为可上行第 i 件物资的备选货运飞船总数量; 若 $n_{a,i}^i = 0$, 则第 i 件物资无法上行, 即 $Y_{ci} = 0$; 须满足在物资的上行时间窗口内存在货运飞船发射:

$$T_{c.v.l}^{c_j} \in [T_{e,u}^i, T_{l,u}^i], \exists j = 1, 2, \dots, n_{c,v}, \quad (25)$$

式中, $T_{e,u}^i$, $T_{l,u}^i$ 分别为第 i 件物资的最早补给时间和最晚补给时间. 若

$$T_{c.v.l}^{c_j} \notin [T_{e,u}^i, T_{l,u}^i], \forall j = 1, 2, \dots, n_{c,v}, \quad (26)$$

则第 i 件物资无法上行. 第 i 件物资所装载至的货运飞船通过下式求解:

$$N_i = \{c_j | j = \lceil Y_i^* \cdot n_{a,i}^i \rceil\}, \quad (27)$$

式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整运算符. 在确定了每一件物资所装载至的货运飞船后, 即获得了每一艘货运飞船的装载物资清单.

3.6 冗余事件、物资裁剪

当某一任务周期的事件对人时的需求总量超过该任务周期的可供给人时总量上限时, 需裁剪事件直至人时约束满足; 同样地, 当某一货运飞船装载的物资总量超出了该船的运载能力上限时, 裁剪物资直至装载约束满足.

当人时资源紧缺, 事件需要裁剪时, 仅考虑非重要事件. 根据某个非重要事件的优先级、资源需求、物资补给需求, 对该事件进行评分:

$$s_e^i = \frac{1}{\gamma_e \cdot p_e^i \cdot (\alpha_e^1 \cdot p_{e,c}^i + \alpha_e^2 \cdot c_e^i + \alpha_e^3 \cdot h_e^i + \beta_e^1 \cdot M_{r,c}^i + \beta_e^2 \cdot V_{r,c}^i)}, \quad (28)$$

式中, p_e^i , $p_{e,c}^i$, c_e^i , h_e^i , $M_{r,c}^i$, $V_{r,c}^i$ 分别为第 i 个非重要事件的优先级、电能消耗、通信资源需求、人时需求、物资需求质量与体积; α_e^1 , α_e^2 , α_e^3 , β_e^1 , β_e^2 , γ_e 为各项事件属性的归一化系数.

当货运飞船可提供的运载能力不足, 物资需要裁剪时, 仅考虑非重要物资. 根据某件非重要物资的重要性、质量和体积, 对该物资进行评分:

$$s_c^i = \frac{1}{\gamma_c \cdot m_c^i \cdot (\alpha_c \cdot M_c^i + \beta_c \cdot V_c^i)}, \quad (29)$$

式中, m_c^i 为第 i 件非重要物资的重要性; α_c , β_c , γ_c 为各项物资属性的归一化系数.

在获得每个任务周期的事件列表和每艘货运飞船装载的物资列表后, 若存在约束冲突, 则按照评分由低到高裁剪事件、物资, 直至约束满足.

3.2~3.6 节所述规划逻辑的主要优势是通过逐步构造解的方式将问题中的复杂约束冲突逐个化解. 例如, 在载人飞船和货运飞船发射序列规划过程中, 根据已规划船的发射及返回方案并考虑相关约束所限定的范围, 逐个计算下一艘船的发射及返回时间, 使与飞船发射规划相关的约束得到满足; 在事件分配和物资装载规划过程中, 同样首先计算每个事件执行和每件物资补给在当前解中的可行区间, 再根据设计变量计算确切值, 从而使事件分配及物资装载相关的区间约束得到满足; 最后, 基于评分裁剪冗余事件和物资, 化解与事件分配及物资装载相关的总量上限约束冲突. 因此, 通过该方式对于任意设计变量取值皆可获得满足约束的可行解. 进而在进化算法框架下优化方案, 反复迭代搜索近最优解. 由于优化算法的收敛性会随着设计变量规模和目标函数数量的增多而降低, 对于本问题难以收敛到最优解. 然而, 一定程度的近最优解足以满足工程需求.

3.7 应用于多变量规模复合问题的进化策略

需要注意的是, 本优化问题包括载人飞船发射序列规划、事件分配与裁剪方案规划、货运飞船发射序列规划和物资装载与裁剪方案规划四个部分.

其中与事件、物资规划相关的设计变量规模较大, 而与飞船发射序列规划相关的设计变量规模较小. 由于本优化问题属于一种由多个具有不同规模设计变量的子问题组成的复合优化问题, 在进行进化操作时, 若同时对整个复合问题中所有设计变量实施操作, 将大大降低具有小规模设计变量的子问题的优化效率. 因此, 需要独立地对各子问题所涉及设计变量分别实施进化操作. 如图 8 所示, 其中, $n_{e \max} n_{c \max} \gg$

图 8 应用于多变量规模复合问题的进化策略示意图
Figure 8 Illustration of the evolutionary strategy applied to the integrated problem composed of several sub-problems with different design variable scales.

$N_{m,v,max} \times N_{c,v,max}$ 事件物资规划的基因片段远长于飞船规划. 由于基因序列上的每一个基因位的进化概率相同, 事件物资规划会占据大部分优化资源, 导致飞船规划方案的优化难以推进. 因此, 将不同问题对应的基因片段分割开, 然后分别对各子问题对应的设计变量做进化(交叉、变异)操作, 使各子问题对应变量在优化过程中互不干涉.

4 算例分析

4.1 算例配置

测试算例的规划开始时间为2023年1月1日, 结束

时间为2025年12月31日. 在此期间计划执行3000项在轨事件, 计划上行5000件物资. 待规划在轨事件清单和待上行物资清单分别如表1和表2所示. 载人飞船和货运飞船的参数分别如表3和表4所示. 规划周期内的发射时间窗口由表5给出. 规划中用到的归一化系数由表6给出.

本例中, 载人飞船发射序列规划包含14个设计变量, 事件分配规划包含3000个设计变量, 货运飞船发射序列规划包含10个设计变量, 物资装载规划包含5000个设计变量.

利用第三代非支配排序遗传算法(third-generation non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-III)^[16]搜索问题的Pareto前沿. 相较于其他多目标优化算法, NSGA-III在解的收敛性和多样性方面更具优势. 本例中优化算法的种群规模取为8000, 最大进化代数取为3000. 利用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[17]从Pareto前沿中选择最终决策解, 选择过程中对各目标函数的偏好权重相同.

4.2 结果分析

载人飞船发射序列及事件分配规划结果统计如表7

表 1 待规划在轨事件清单

Table 1 List of on-orbit events needed to be planned

ID编号	优先级	能源需求 (kW h)	通信资源 需求 (GB)	人时需求 (h)	需求物资 质量 (kg)	需求物资 体积 (m ³)	最早开始时间 (年-月-日)	最晚开始时间 (年-月-日)
0001	1	14	11	9	11.2	0.086	2023-01-01	2023-12-31
0002	1	15	12	2	9.1	0.091	2024-01-01	2024-12-31
0003	1	18	30	6	4.8	0.093	2025-01-01	2025-12-31
0004	1	20	15	8	6.9	0.060	2023-01-01	2023-12-31
.....								
1001	2	16	13	7	5.6	0.063	2023-01-01	2023-06-31
1002	2	7	11	8	2.7	0.056	2024-01-01	2024-06-31
1003	2	12	19	2	12.6	0.067	2023-07-01	2023-12-31
1004	2	9	27	6	3.1	0.010	2025-07-01	2025-12-31
.....								
2001	3	13	29	3	3.5	0.026	2023-01-01	2023-04-31
2002	3	8	13	2	2.5	0.027	2025-09-01	2025-12-31
2003	3	18	17	4	3.6	0.040	2024-01-01	2024-04-31
2004	3	16	20	1	1.9	0.028	2023-05-01	2023-08-31
.....								

表 2 待上行物资清单

Table 2 List of cargoes needed to be supplied

ID编号	重要性	质量 (kg)	体积 (m ³)	最早补给时间 (年-月-日)	最晚补给时间 (年-月-日)
0001	1	13.1	0.097	2023-01-01	2023-12-31
0002	1	12.6	0.089	2024-01-01	2024-12-31
0003	1	8.4	0.062	2025-01-01	2025-12-31
.....					
1001	2	11.6	0.079	2023-01-01	2023-06-31
1002	2	6.5	0.058	2024-01-01	2024-06-31
1003	2	10.1	0.081	2025-01-01	2025-06-31
.....					
2001	3	9.1	0.073	2023-07-01	2023-12-31
2002	3	12.8	0.096	2024-06-01	2024-10-31
2003	3	8.8	0.069	2025-04-01	2025-11-31
.....					
3001	3	9.6	0.076	2023-01-01	2023-09-31
3002	3	7.9	0.069	2024-01-01	2024-05-31
3003	3	11.6	0.090	2025-05-01	2025-07-31
.....					
4001	4	15.9	0.111	2023-05-01	2023-12-31
4002	4	8.3	0.075	2024-03-01	2024-12-31
4003	4	11.6	0.098	2025-04-01	2025-12-31
.....					

表 3 载人飞船参数

Table 3 Parameters of manned vehicles

参数名称	参数值
搭载乘员人数 (人)	3
最短停靠时间 (天)	150
最长停靠时间 (天)	180
最长乘员轮换时间 (天)	10
最长无人驻留时间 (天)	30
额定数量 (艘)	7
单艘成本 (亿元)	8.5
规划周期前最后一艘载人飞船的 发射日期 (年-月-日)	2022-08-01

表 4 货运飞船参数

Table 4 Parameters of cargo vehicles

参数名称	参数值
最短停靠时间 (天)	150
最长停靠时间 (天)	180
相邻两艘货船最短发射间隔 (天)	60
相邻两艘货船最长发射间隔 (天)	180
物资补给质量上限 (kg)	6000
物资补给体积上限 (m ³)	45
额定数量 (艘)	10
单艘成本 (亿元)	3.5
规划周期前最后两艘货运飞船的 发射日期(年-月-日)	2022-08-01 2022-11-01

所示. 其中, 每班乘组驻留周期皆近为6个月且每个任务周期的人时利用率皆近为100%; 相比于文献[5]中单独规划事件, 统筹规划将事件和各任务周期跨度同时

作为规划对象, 使人时资源得到最大化利用. 另外, 结果中各任务周期的物资需求总量具有较好的均衡性, 避免了物资补给需求随时间产生过大的波动; 由于物

表 5 2023~2025年的发射时间窗口

Table 5 Launch time windows from 2023 to 2025

编号	开始日期	结束日期	持续时间 (天)
1	9th	46th	38
2	58th	74th	17
3	82nd	119th	38
4	146th	182nd	37
5	199th	238th	40
6	244th	268th	24
7	275th	314th	40
8	336th	364th	29
9	376th	416th	41
10	429th	451st	23
11	459th	494th	36
12	522nd	556th	35
13	564th	599th	36
14	603rd	625th	23
15	636th	674th	39
16	695th	726th	32
17	734th	775th	42
18	794th	815th	22
19	822nd	849th	28
20	868th	904th	37
21	917th	965th	49
22	986th	1014th	29
23	1028th	1047th	20
24	1059th	1096th	38

表 6 归一化系数

Table 6 Normalization parameters

类别	属性名称	归一化系数	值
事件	能耗	α_e^1	0.05
	通信	α_e^2	0.03
	人时	α_e^3	0.1
	需求物资质量	β_e^1	0.1
	需求物资体积	β_e^2	10
	优先级	γ_e	2.5
物资	质量	α_c	0.1
	体积	β_c	10
	重要性	γ_c	2.5
每日需求总量	人时	h	15
	物资质量	$C_{t,r,m}$	55
	物资体积	$C_{t,r,v}$	0.4

资需求总量是后勤补给规划中的一项主要约束，相比于文献[6~8]单独规划物资，统筹规划具有可简化约束的优势。

货运飞船发射序列及物资装载规划结果统计如表8所示。方案中各货运飞船的质量装载率和体积装载率皆在98%以上，运载能力得到了显著利用。结果中各飞船发射时间和返回时间与规划周期内可用发射窗口之间的关系如图9所示，各项发射约束皆满足。相比于文献[9,10]仅考虑物资补给和人时资源的耦合，本文方法

表 7 载人飞船发射序列及事件分配规划结果统计

Table 7 Results statistics of planning manned vehicles' launch sequence and event allocation schemes

序号	发射时间 (年-月-日)	返回时间 (年-月-日)	停靠时间 (天)	人时需求 总量 (h)	人时供给 上限 (h)	需求物资 总质量 (kg)	需求物资 总体积 (m ³)
1	2023-01-23	2023-07-16	174	2607	2610	8878.2	68.762
2	2023-07-22	2024-01-11	173	2592	2595	8818.2	67.758
3	2024-01-17	2024-07-03	168	2517	2520	8835.5	67.648
4	2024-07-06	2024-12-28	175	2624	2625	8902.6	67.652
5	2025-01-07	2025-06-23	167	2501	2505	8805.1	68.367
6	2025-07-05	2025-12-20	168	2516	2520	8799.4	67.695

表 8 货运飞船发射序列及物资装载规划结果统计

Table 8 Results statistics of planning cargo vehicles' launch sequence and cargo loading schemes

序号	发射时间 (年-月-日)	返回时间 (年-月-日)	停靠时间 (天)	装载物资总质量		装载物资总体积	
				总质量 (kg)	装载率	总体积 (m ³)	装载率
1	2023-02-27	2023-08-26	180	5989.6	99.83%	44.912	98.80%
2	2023-06-22	2023-12-19	180	5991.2	99.85%	44.636	99.19%
3	2023-10-15	2024-04-12	180	5996.1	99.93%	44.372	98.60%
4	2024-02-18	2024-08-16	180	5917.2	98.62%	44.989	99.98%
5	2024-06-05	2024-12-02	180	5997.6	99.96%	44.921	99.82%
6	2024-10-13	2025-04-11	180	5998.1	99.97%	44.211	98.25%
7	2025-02-11	2025-08-10	180	5883.2	98.05%	44.996	99.99%
8	2025-06-01	2025-11-28	180	5997.2	99.95%	44.925	99.83%
9	2025-10-06	—	—	5989.6	99.83%	44.899	99.78%

可在最大化货船利用效益同时出具满足发射约束的飞船发射序列规划方案。

事件、物资裁剪结果统计数据如表9所示。其中,被裁剪事件的人时总需求是跨度为180天的任务周期可提供人时总量的17.4%;被裁剪事件需求物资总质量、总体积分别是规划结果中各任务周期物资需求总量平均值的13.7%和17.0%。因此,若增加一艘载人飞船(即增加一个任务周期),不仅会产生额外成本,还将会显著降低人时利用率。所裁剪物资的总质量、总体积分别是单艘货运飞船运载能力上限的44.7%和35.8%。同样,若增加一艘货船,虽使更多物资得以上行,但增加了成本且应用效益不高。

相比于文献[11]仅规划飞船发射与后勤补给,且将飞船发射、事件执行以及物资上行的数量作为一项固定值,本文统筹规划方法可同时考虑事件执行需求和物资补给需求,对飞船事件物资进行需求分析与裁剪,在满足多项复杂约束的基础上求解综合规划方案可行解。基于性能强大的进化算法优化方案,可获得统筹经济成本、人力成本、飞船利用效益、事件需求和物资需求的综合折中方案。图10为本文进化策略与常规进化策略的收敛性对比,显然通过本文方法收敛速度得到显著改善和提高。

5 结论

本文构建了空间站长期运营在轨事件与飞船访问

表 9 事件、物资裁剪结果统计数据

Table 9 Statistics of cutting redundant events and cargoes

事件裁剪结果 统计数据	优先级为3的数量	23
	优先级为4的数量	65
	平均能源需求 (kW h)	23.311
	平均通信资源需求 (GB)	32.652
	平均人时需求 (h)	5.3
	平均需求物资质量 (kg)	13.8
	平均需求物资体积 (m ³)	0.086
	平均裁剪评分	0.009559
	总数量	88
	人时需求总量 (h)	470
物资裁剪结果 统计数据	需求物资总质量 (kg)	1215.1
	需求物资总体积 (m ³)	7.579
	重要性为3的数量	47
	重要性为4的数量	109
	平均质量 (kg)	17.2
	平均体积 (m ³)	0.103
	平均裁剪评分	0.03731
	总数量	156
	总质量 (kg)	2683.1
	总体积 (m ³)	16.112

统筹规划问题的概念模型和多目标优化模型,提出了一种飞船、事件、物资统筹规划方法框架,提出了基于评分的事件、物资裁剪策略,以及多变量规模复合问题进化策略。算例仿真表明所提出的数学模型可有

图 9 (网络版彩图)飞船发射、返回时间与可用发射窗口之间的关系
Figure 9 (Color online) Relationship between launch time and return time of transports, and available launch windows.

图 10 (网络版彩图)本文的进化策略与常规进化策略的收敛性对比
Figure 10 (Color online) Convergence comparison between the proposed evolutionary strategy and the conventional method.

效地描述飞船、事件、物资之间的耦合关系, 所提出的优化策略可基于规划模型有效地产生空间站长期运营顶层规划方案, 所提出的裁剪策略可优先将不重要

且需求大的冗余事件与物资裁剪, 从而化解约束冲突, 所提出的规划方法框架为更复杂的拓展性研究提供基本流程参考.

参考文献

- 1 Luo Y Z, Zhang J, Zhu Y H. Space Station Operation Mission Planning (in Chinese). Beijing: National Defense Industrial Press, 2020 [罗亚中, 张进, 朱阅詠. 空间站运营任务规划. 北京: 国防工业出版社, 2020]
- 2 Popov A. Mission planning on the International Space Station program concepts and system. In: IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2003. 3427–3434
- 3 Jing H P, Xin J M, Hu W, et al. Space station: Human exploration in space (in Chinese). Acta Automat Sinica, 2019, 45: 1799–1812. [景海鹏, 辛景民, 胡伟, 等. 空间站: 迈向太空的人类探索. 自动化学报, 2019, 45: 1799–1812]

- 4 Luo Y Z, Lin K P, Tang G J. Review on space station operation mission planning technology (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2012, 18: 7–13
[罗亚中, 林鲲鹏, 唐国金. 空间站运营任务规划技术评述. *载人航天*, 2012, 18: 7–13]
- 5 Zhang J, Zhu Y, Luo Y. Many-objective optimization and decision-making for overall allocation of space station on-orbit activities. *Acta Astronaut*, 2020, 177: 202–216
- 6 Kallay N. Approach to space station logistics optimization. *J Spacecraft Rockets*, 1964, 1: 209–212
- 7 Siddiqi A, de Weck O L, Lee G Y, et al. Matrix modeling methods for spaceflight campaign logistics analysis. *J Spacecraft Rockets*, 2009, 46: 1037–1048
- 8 Grogan P T, Siddiqi A, de Weck O L. Matrix methods for optimal manifesting of multinode space exploration systems. *J Spacecraft Rockets*, 2011, 48: 679–690
- 9 Ho K, Green J, Weck O L D. Improved concurrent optimization formulation of crewed space habitats and their supporting logistics systems. In: *AIAA Space 2013 Conference and Exposition*. San Diego, 2013
- 10 Ho K, Green J, de Weck O. Concurrent design of scientific crewed space habitats and their supporting logistics system. *J Spacecraft Rockets*, 2014, 51: 76–85
- 11 Lin K P, Luo Y Z, Tang G J. Optimization of logistics strategies for long-duration space-station operation. *J Spacecraft Rockets*, 2014, 51: 1709–1720
- 12 Zheng Z, Guo J, Gill E. Onboard mission allocation for multi-satellite system in limited communication environment. *Aerospace Sci Tech*, 2018, 79: 174–186
- 13 Du B, Li S. A new multi-satellite autonomous mission allocation and planning method. *Acta Astronaut*, 2019, 163: 287–298
- 14 Yu Y, Hou Q, Zhang J, et al. Mission scheduling optimization of multi-optical satellites for multi-aerial targets staring surveillance. *J Franklin Institute*, 2020, 357: 8657–8677
- 15 Bu H J, Zhang J, Luo Y Z. Space station short-term mission planning using ontology modelling and time iteration. *J Syst Eng Electron*, 2016, 27: 407–421
- 16 Deb K, Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints. *IEEE Trans Evol Computat*, 2014, 18: 577–601
- 17 Yoon K S, Hwang C L. Multiple attribute decision making. *Eur J Oper Res*, 1995, 4: 287–288

Integrated planning of on-orbit events and transport visits for long-term space station operation

ZHANG JiaCheng, ZHU YueHe & LUO YaZhong

College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Space station overall operation planning is a problem with large-scale variables and complex constraints, including transport launch scheduling, on-orbit event allocation, and logistics planning. Previous studies have only focused on one of these sub-problems. Thus, in this paper, an integrated planning method is proposed to obtain a comprehensive scheme by considering the coupling between all sub-problems. First, the conceptual model is constructed to mathematically describe the attributes of the planning objects and their internal relations. Second, a decomposition-based method is proposed to link sub-problems to obtain a single feasible solution. Finally, the problem is optimized based on the evolutionary algorithm, and an improvement strategy for evolutionary operators is proposed to overcome the efficiency limitation when optimizing the problem comprising several sub-problems with different design variable scales. A case study demonstrates that the mathematical model can resolve the complex constraints among multiple sub-problems effectively. In addition, applying the evolutionary strategy to the compound problem can improve optimization efficiency significantly.

space-station, operation mission, top-level planning, evolutionary algorithm

doi: [10.1360/SST-2021-0057](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0057)