

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407638

基于遗传算法的航天发射场多任务并行规划方法

张俊新^{1,2} 胡梅¹ 钟文安² 孙乐园² 胡鹏² 叶欣² 晏政²

(1. 国防科技大学智能科学学院 长沙 410073; 2. 西昌卫星发射中心 海口 571100)

摘要:当前,航天发射建设规模不断扩大,建设多个测试发射的设备设施后,发射场面临多枚运载火箭并行测试的任务规划问题。运载火箭进场、测试、总装、转运和加注发射分别在不同的测试区域完成,由于型号差异,某些测试区域可以共用,某些不能共用,且同一测试区域能够容纳的运载火箭有限(通常仅能容纳1枚),在这些约束条件下,如何在尽可能短的时间内完成多任务并行的计划安排是必须解决的重要问题。通过对国内外相关问题研究的分析,梳理了2000年以来国内航天发射场测试发射工艺流程设计和优化的方法,现行的“双代号网络计划图”难以适应多任务并行规划需要,关键路径法、价值链分析法等缺乏定量分析能力。结合国内航天发射场规划问题的难点,采用遗传算法,通过双层编码方式,根据并行任务数量确定种群规模和迭代次数,以航天发射场任务规划的目标函数作为算法适应度计算函数。经过算例验证,可以得到可供工程应用的多任务并行规划较为优化的方案,求解5枚火箭任务并行规划方案用时 <1 min,较传统手工绘制双代号网络计划图的方式效率大幅提升。方法具有一定的通用性和扩展性,可以根据不同火箭任务的流程对编码方法进行设置和细化,从而提高算法的实用性。

关键词:多任务并行规划;航天发射任务规划;航班化发射;高效发射;遗传算法

中图分类号: TN06;V551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6010

Multi task parallel planning method for space launch sites based on genetic algorithm

Zhang Junxin^{1,2} Hu Mei¹ Zhong Wenan² Sun Leyuan² Hu Peng² Ye Xin² Yan Zheng²

(1. School of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Xichang Satellite Launch Center, Haikou 571100, China)

Abstract: With the rapid expansion of space launch infrastructure, modern launch sites face the critical challenge of parallel task scheduling for multiple launch vehicles (LVs) undergoing concurrent testing. The process involves sequential phases—LV arrival, testing, final assembly, transfer, and propellant loading/launch—each requiring dedicated or shared test facilities. Due to variations in LV configurations, certain test areas are mutually exclusive, while others have limited capacity (typically accommodating only one LV at a time). Under these constraints, achieving efficient multi-mission parallel scheduling to minimize total completion time has become an urgent operational requirement. Analysis of domestic and international research since 2000 reveals that traditional methods, such as dual-code network diagrams, are inadequate for parallel mission planning. Conventional approaches like the critical path method (CPM) and value chain analysis lack robust quantitative capabilities for handling complex resource conflicts. To address these limitations in China's space launch scheduling, this study proposes a genetic algorithm (GA)-based framework with a dual-layer encoding scheme. The algorithm dynamically adjusts population size and iteration counts based on the number of parallel missions, while the fitness function directly corresponds to the scheduling objective: minimizing mission duration under facility constraints. Case studies demonstrate the method's efficacy. For a scenario involving five LVs, the algorithm generates optimized parallel schedules in under one minute, significantly outperforming manual dual-code network diagram construction. The proposed approach exhibits notable universality and extensibility; the encoding scheme can be customized to accommodate diverse LV workflows, enhancing practical applicability.

Keywords: multi task parallel planning; space launch mission planning; airline-flight-mode; efficient launch; genetic algorithm

0 引言

可靠、准时、高效的发射能力是航天发射场建设的核心指向。近年来,随着各国更大规模太空探索需求激增和商业航天的崛起,世界航天领域进入有史以来第 2 个快速发展时期,快速增长的航天发射任务需求对航天运输系统提出了更高的要求^[1]。当前,全球太空产业正经历从“国家主导”向“商业驱动”的范式转变,大规模星座和星群发射任务增多^[2-3]。形成可比拟航空业的航班化高效发射能力,是呼应这一要求提升航天发射场能力的重要途径,已成为世界范围内航天领域发展的一个重要趋势^[4-5]。测试发射流程是组织指挥运载器和航天器发射任务较为重要的总体技术方案之一,是工程各系统在发射场开展各项工作的基本依据。依据基本测试发射工艺流程,提升多任务并行规划能力,是提高发射场测试发射效率,形成航班化发射能力的关键。

近年来,航天发射任务次数快速增长,航天发射场拓展和能力增长建设加速,发射场工位和各类设施逐步增多,发射场逐步具备了执行多枚运载火箭并行测试发射任务的能力。如文昌发射场、酒泉发射场等均已开展过 2~3 枚运载火箭任务并行的工程实践,随着近期发射场设施扩建加速,未来更多运载火箭并行测试需求迫切。在这一背景下,开展同一发射场多航天发射任务并行规划问题的研究,对于提高现阶段航天发射综合能力具有重要意义。

当前,世界航天领域蓬勃发展,但运营航天发射场的国家仍然较少,其中,美国^[6]、俄罗斯^[7]、法国、日本、印度等建设大型航天发射场的国家,大多采用一个技术区对应 1~2 个发射工位的建设模式。此模式下由于单一型号运载火箭任务数量较少,多型号火箭则均在不同发射区执行任务,因此没有单一发射场多任务并行规划的需求。美国 SpaceX 公司的猎鹰 9 火箭在卡纳维拉尔角的 40 号发射场的测试厂房具备同时测试 5 枚以上运载火箭的能力,测试后近距离(小于 500 m)转运至发射工位^[8],星舰采用原位回收发射一体化的设施建设方式,二者发射场布局和建设模式均与国内的大型航天发射场不同,并行任务规划方法难以借鉴。

国内航天发射场流程任务规划问题的相关研究起步较晚。2000 年开始,相关研究注重对任务流程工作的设计规范化。容易等^[9]、孟庆丰等^[10]采用这一方法研究空间站任务流程的设计与优化,崔赢午等^[11]采用这一方法分析应急流程的设计。

熊占兵等^[12]将价值链分析法、重要性矩阵法、关键路径法、流程再造法(business process reengineering, BPR)、渐进式流程优化(business process improvement,

BPI)和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)等企业流程管理方法和分析方法引入航天发射任务流程设计,对成熟型号运载火箭开展了有效的流程设计和优化工作。钟文安等^[13]、唐青^[14]进一步采用 ECRS 方法(取消 Eliminate、合并 Combine、重排 Rearrange、简化 Simplify)对单一发射任务流程开展优化。以上研究和分析均为针对单一任务的流程设计、评估和优化方法,相关方法在以往发射场运载火箭流程设计过程中取得了良好的效果,但相关方法未涉及多任务并行规划。

2010 年以来,淳静等^[15]分析了多种航天发射任务需求下,采用粒子群算法解决如何在多个发射场中优选发射方案的问题。卢冲赢等^[16]提出了采用桌面推演系统的航天发射场任务仿真方法,指出桌面推演系统具有多任务并行推演能力。Yi 等^[17]采用遗传算法分析了有窗口约束的航天发射任务调度问题。

以上研究成果主要从系统层面识别了多个航天发射任务并行的制约因素,包括资源制约、窗口制约等,但缺乏定量分析能力。本文旨在引入基于数据建模的定量运筹规划算法,克服双节点网络计划图方法难以应对多任务规划和企业流程管理方法缺乏定量分析能力的问题,使得输出的任务并行规划方案具有良好的可读性。本文提出一种求解速度快,且具有定量分析能力,能够适应大数量测试项目(>250)的航天发射场并行任务规划方法,该方法能够适应不同发射场、不同火箭型号的并行任务规划需求,且可以拓展适应多目标规划,可以在多个不同航天发射场推广应用,为实现航班化发射模式下的任务规划提出一种有效的解决方案。

1 研究难点与求解思路

经分析,航天发射场多任务并行规划问题的难点与算法选择思路如下。

1) 航天发射出多任务并行规划涉及的任务测试项目数量多。运载火箭测试发射任务流程组织计划的基本单元,是测试项目。对于 1 发典型运载火箭测试发射任务,可以根据测试场地初步将测试项目分为 5~7 个,若进一步细分,则测试项目可多达数十个。若多任务并行,则测试项目可能多达数百甚至上千项。

经典的最优求解法,如分支定界算法等适用于解决中等规模以下(工序<250)的调度问题^[18-20],复杂系统,制约条件较多时,最优求解方法的系统建模难度增大,存在时间效率低下的问题,而且可能无法求得最终解。因此考虑采用现代近似求解法,如启发式算法、深度学习算法等,包括遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法、模拟退火算法等^[21-23]。

2) 航天发射场多任务并行规划问题的约束条件具有

较强的自身特点,如任务必须在窗口时间范围内执行;运载火箭在某一测试区域完成测试后,若下一区域不能使用,则使用占用当前区域;发射场的部分厂房之间可以通用,其他厂房则不可通用等等,因此算法必须可以灵活表达多种约束条件,如遗传算法,模拟退火算法等;

3) 航天发射场多任务并行规划在实践过程中存在多目标函数的问题,在具体的规划时,考虑到运载火箭测试发射任务对资源需求的依赖、对于发射窗口的制约等,使得具体的多任务规划可能存在多目标优化的问题。需要选择算法能够较为适用于多目标规划,如遗传算法,适应度函数的调整即可适应多目标优化的问题。

通过以上分析比较,应选择适应工序数量庞大、可以灵活表达多种约束条件,且能够适应多目标优化的算法,初步选择编码灵活、适应度函数可调的遗传算法来解决航天发射场多任务并行规划的问题。遗传算法大范围搜索能力强,便于后续应对更大规模的规划需求。

2 并行任务规划问题的遗传算法建模

遗传算法是模拟生物进化的自然选择和遗传学机制的一种优化算法,基本操作包括编码、初始化、解码、计算适应度、选择、交叉、变异等步骤,典型遗传算法过程如图 1 所示。通过交叉变异产生新的种群,从而筛选优化解。

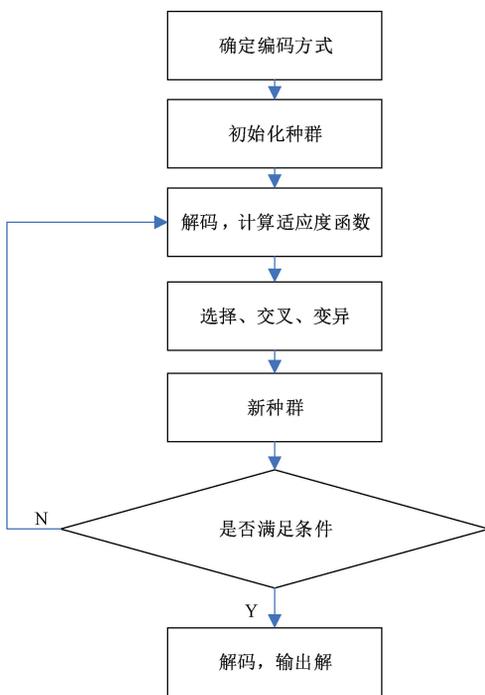


图 1 遗传算法典型求解过程

Fig. 1 Typical solving process of genetic algorithm

2.1 多任务并行规划的数学描述

运载火箭的测试发射过程以各系统性能测试为主线,产品自研制生产厂运输至发射场,进入各个测试厂房,完成产品的性能测试,然后转入加注发射工位,加注待命发射。测试工作从单机至分系统、总体逐层开展^[24]。典型的航天器在发射场测试发射过程如图 2 所示。

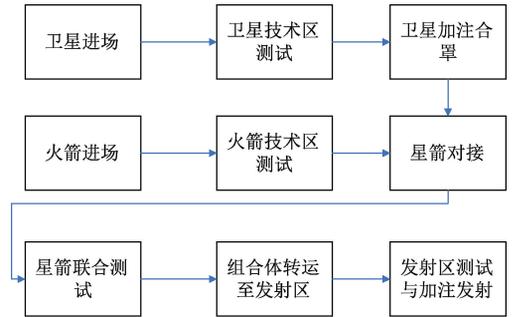


图 2 典型发射场测试发射过程

Fig. 2 Typical launch site testing launch process

随着航天发射场建设规模的扩大,各测试厂房的规模扩大、数量增多,如同一个测试厂房可以容纳多个运载火箭或航天器测试,或者有多个运载火箭的技术区测试厂房,因此发射场具备并行执行多个任务的能力。

按照如下方式将运载火箭测试发射过程进行建模。

1) 符号定义

N 为并行任务总数;

n 表示并行任务的索引, $1 \leq n \leq N$;

M 表示发射场测试区域总数;

m 表示火箭测试区域的索引, $1 \leq m \leq M$;

I 表示单枚火箭测试项目总数;

i 表示单枚火箭测试项目索引, $1 \leq i \leq I$;

t_n^{im} 表示第 n 枚运载火箭的第 i 项测试项目在第 m 个可测试区域进行测试时所需的测试时间;

t_n^{ia} 表示第 n 枚运载火箭的第 i 项测试项目的测试时间前沿;

t_n^{ib} 表示第 n 枚运载火箭的第 i 项测试项目的测试时间后沿;

Q_{nim} 表示第 n 枚运载火箭的第 i 项测试项目在第 m 个测试区域的测试标志,测试是置为 1, 否则置为 0。

2) 问题描述

对于 N 枚火箭任务则有测试时长统计如表 1 所示。

则 N 枚火箭并行任务则可描述为所有火箭按照自身的工艺流程测试项目的顺序安排,分别进入可以完成相应测试项目区域进行测试计划安排或调度安排问题。

表 1 测试区域 i 的测试时长统计

Table 1 Statistical table of test duration for test area i

火箭	$i1$	$i2$...	im
1	t_1^{i1}	t_1^{i2}	...	t_1^{im}
2	t_2^{i1}	t_2^{i2}	...	t_2^{im}
...
N	t_N^{i1}	t_N^{i2}	...	t_N^{im}

对于第 n 枚运载火箭的第 j 项,若其在第 i 项测试之后,则有 $t_n^{iA} + t_n^{jm} \leq t_n^{jA}$, 即:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_n^{iA} \\ t_n^{jm} \end{bmatrix} \leq -1 \begin{bmatrix} t_n^{jA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于所有的 I 个测试项,则有:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_n^{1A} \\ \vdots \\ t_n^{IA} \end{bmatrix} \leq -1 \begin{bmatrix} t_n^{1m} \\ \vdots \\ t_n^{Im} \end{bmatrix} \quad (2)$$

按照目前单个测试区域仅能容纳一枚运载火箭测试的限制,则所有并行测试任务只能有 1 个占用该场地,即:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{nim} \leq 1 \quad (3)$$

结合式(2)和(3)可得:

$$\min(t_1^{1B}, t_2^{1B}, \dots, t_n^{1B}) \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_n^{1A} \\ \vdots \\ t_n^{IA} \end{bmatrix} \leq -1 \begin{bmatrix} t_n^{1m} \\ \vdots \\ t_n^{Im} \end{bmatrix}$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I Q_{nim} \leq 1$$

对于其他优化目标、多优化目标、其他约束条件可通过相应的参数设置具体化为等式或不等式予以表达。

2.2 编码、解码与适应度函数

遗传算法的灵活性在于可以采用多种编码策略^[25],运载火箭测试发射流程是运载火箭选择不同的测试区域,按照既定的测试顺序开展测试的过程。考虑采用双层编码方法,如图 3 所示。

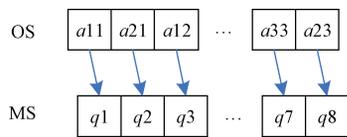


图 3 双层编码

Fig. 3 Double layer encoding

其中,OS 为测试顺序编码,例如染色体 $[a_{11}, a_{21}, a_{22}, a_{12}]$ 表示测试顺序为第 1 枚火箭的第 1 个测试项目,第 2 枚火箭的 1 个测试项目,第 2 枚火箭的第 2 个测试项目,第 1 枚火箭的第 2 个测试项目。MS 为每个测试

所对应的运载火箭测试区域的编号。

通过程序约束,确保同一枚火箭的测试顺序符合技术要求,并根据实际情况,限定每个测试可以选择的区域范围。

遗传算法的适应度函数计算,决定了种群遗传的“倾向”,即由算法所需的目标函数确定。对于航天发射场多任务并行规划问题而言,遗传算法的适应度函数应为发射场并行规划的目标,如典型的以最短任务执行时间为目标,即最短时间内完成 n 枚火箭并行任务,则适应度函数如式(5)所示。

$$fit(x) = 1/\max(t_1^{1B}, t_2^{1B}, \dots, t_N^{1B}) \quad (5)$$

式中: t_n^{iB} 表示第 n 枚运载火箭的第 i 项测试项目的测试时间后沿。适应度函数取所有火箭最后一项——第 I 项测试的时间后沿,即全部并行任务的完成时间的倒数。

2.3 初始化与选择

令种群规模为 N ,则按照双层编码的规则,随机生成 N 个个体。

父代选择时采用锦标赛选择法,即从种群中随机选择个体进行竞争,保留适应度更高,即 $fit(x)$ 值最小的个体。锦标赛选择法在一定程度上,可以起到优选个体的作用;母代则直接随机选择初始化种群中的 1 个个体。

2.4 交叉与变异

遗传算法的交叉和变异方法与其编码方式相关,本文采用“保工序交叉方法”,在保留工序约束的前提下进行两点交叉置换。

变异则仅针对可以选择多个场地区域的测试项目,更改其测试场地区域的编号,从而实现变异操作。因此在交叉和变异后,可以保证所得双层编码仍是可行解。

2.5 结果输出

在交叉、变异生成 N 个子代后,生成新的规模为 N 的种群,计算新种群的适应度函数,选择适应度函数值最小的个体进行保留。如此迭代,直至适应度函数值向最小值收敛。

3 算例验证与分析

3.1 算例验证

对于某一算例,将运载火箭的测试发射流程简化设为 4 个测试项目,即进场卸车、状态恢复、技术区测试和发射区测试发射(含转运)。

某发射场各类测试设施区域共计 10 个,其中区域 1、2 可用于执行运载火箭进场卸车,区域 3、4 用于执行火箭的状态恢复,区域 5~8 用于运载火箭技术区测试,区域 9、10 用于火箭发射区加注发射(工位)。选取某 5 枚运载火箭在各区域进行测试的时间如表 2 所示。

表2 5枚火箭并行任务算例1

Table 2 Example 1 of 5 rocket parallel missions

火箭	项目1		项目2		项目3			项目4		
	区域1	区域2	区域3	区域4	区域5	区域6	区域7	区域8	区域9	区域0
1	2	2	1	1	-	-	17	17	-	3
2	2	2	2	2	-	-	18	18	-	3
3	2	2	2	2	34	34	-	-	7	-
4	2	2	2	2	33	33	-	-	7	-
5	2	2	1	1	-	-	17	17	-	3

以火箭1为例,该火箭进场卸车可在区域1或2进行,时间均为2d;恢复交接可在区域3、4完成,时间均为1d,技术区测试可在区域7、8进行,时间为17d,区域5、6为其他类型火箭的技术区测试厂房,不适合开展火箭1的技术区测试,则该区域表示为“-”,程序中时间设置为较大数,如100,在求解最小测试时间时该测试区域不会被选择。其余火箭相关参数设置同理。

GA算法初始化种群规模 $n = 100$,交叉概率 pc 和变异概率 pm 在 50% ~ 100% 之间随机生成,进化代数 $maxgen = 100$,采用 MATLAB 编译环境,采用“双层编码+保序交叉”的 GA 算法进行仿真,结果如下:结果收敛至5发火箭并行执行需要 50 d。通过甘特图可以直观地看出,对于5枚火箭的并行任务规划方案,区域4的场地占用率较低,4个方案中有3个,场地4在50d的全任务周期中仅适用1~2d,场地占用率仅有2%~4%,如图4所示。

对于5枚火箭的任务,仿真10次,如表3所示,通过结果统计可知,各次仿真均在第1次迭代时就得到优胜个体,最优时间计划均为50d,所有仿真时间均小于11s,平均仿真时间10.01s。

考虑运载火箭发射完成后,发射工位受火箭尾焰等影响,需要恢复时间,则发射工位的占位时间增加,在原有基础上,将发射工位区域的时间加长,假设在原有发射工位占位时间的基础上各增加10d的射后恢复时间,算例工序如表4所示。

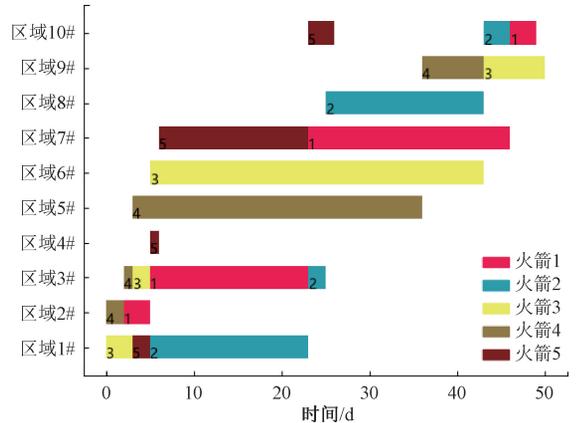


图4 5发火箭任务并行 GA 算法结果

Fig. 4 GA algorithm results 1 for 5 rocket missions

表3 5枚火箭仿真结果统计

Table 3 Statistics of simulation results for 5 rockets

序号	收敛代数	最优计划时间/d	算法计算时间/s
1	1	50	9.90
2	1	50	9.65
3	1	50	10.03
4	1	50	9.44
5	1	50	9.98
6	1	50	10.36
7	1	50	10.13
8	1	50	10.10
9	1	50	10.22
10	1	50	10.30

表4 5枚火箭并行任务算例2

Table 4 Example 2 of 5 rocket parallel missions

火箭	项目1		项目2		项目3			项目4		
	区域1	区域2	区域3	区域4	区域1	区域2	区域3	区域4		
1	2	2	1	1	-	-	17	17	-	13
2	2	2	2	2	-	-	18	18	-	13
3	2	2	2	2	34	34	-	-	17	-
4	2	2	2	2	33	33	-	-	17	-
5	2	2	1	1	-	-	17	17	-	13

通过同样的参数设置,得到优化的并行任务计划甘特图如图5所示,考虑射后恢复工作后,5枚火箭并行计

划安排需要70d。将任务并行数增加到10枚火箭并行,同时考虑射后

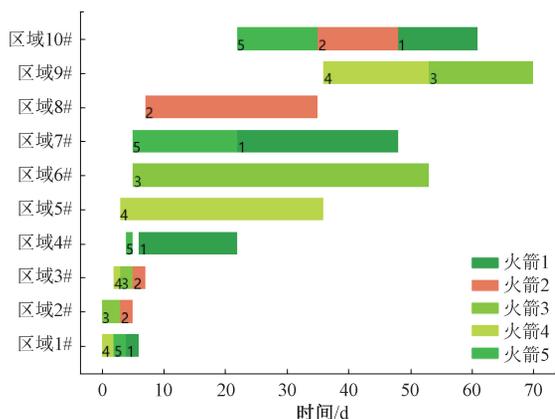


图 5 考虑射后恢复的 5 发火箭任务并行 GA 算法结果

Fig. 5 GA algorithm results for 5 rocket missions considering post launch recovery

的恢复时间,GA 算法初始化种群规模 $n=200$,进化代数 $maxgen=400$,仿真的其中两个最优排期结果如图 6 所示,最优排期 10 枚火箭的计划安排时间为 145 d。

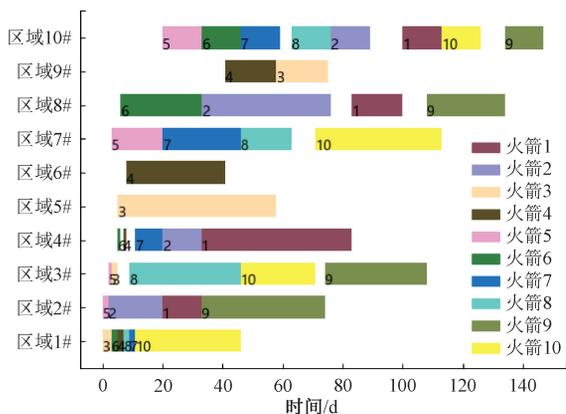


图 6 考虑射后恢复的 10 发火箭任务并行 GA 算法结果

Fig. 6 GA algorithm results for 10 rocket missions considering post launch recovery

可见,随着并行任务次数的增多,本文算法收敛所需的迭代次数增加,且并未收敛至同一最佳排期值,遗传算法等现代近似求解法所得解未必是最优解,但求解效率较高,可以在短时间内得到较为优化的可行解,即经过多次迭代计算,本文算法可以得到可供工程应用的多任务并行规划较为优化的方案。

3.2 任务并行规划方法对比分析

当前,在实际的航天发射任务执行过程中,工程人员仍采用 office 等工具手绘“双代号网络计划图”的方式编制任务的测试发射工艺流程。若多枚火箭任务并行,计划图线条交织,可读性下降,由于“双代号网络计划图”上不利于标注场地信息,所以对于分析场地资源冲突不利,同时不利于分析资源利用率,典型的工艺流程如图 7

所示。

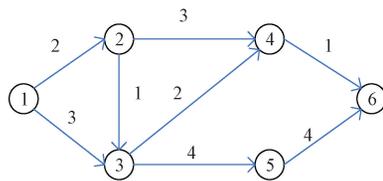


图 7 双节点网络计划图实例

Fig. 7 Example of a dual node network plan diagram

本文算法与目前工程实践中采用的“双代号网络计划图法”进行对比如表 5 所示。

表 5 双节点网络计划图法与本方法对比

Table 5 Comparison between the double node network planning diagram method and this method

对比项	双代号网络计划图法	本文算法
并行规模	≤ 3 (手工可处理)	≥ 10 (仿真验证)
5 次任务求解耗时	4~8 h (人工绘制)	<60 s (计算机求解)
优化判断	定性经验判断	定量优化迭代
约束处理	人工排错	自动满足 资源约束
可视化	复杂网络图	甘特图
可拓展性	固定模板	可更改的参数化模型

通过对比可见,本文提出的算法在多任务处理能力、求解效率和优化科学性方面具有如下优势。

1) 在规模扩展性方面,传统方法受限于人工处理能力,5 枚火箭任务需要经验丰富的工程师团队耗时 4~8 h 完成规划,而本算法通过自动化求解可在 1 min 内完成。

2) 在优化科学性层面,传统方法依赖工程师经验进行局部调整,缺乏全局优化机制,而遗传算法通过 200 次迭代的种群进化,确保获得近似最优解。

3) 结果呈现方面,甘特图可直观展示各火箭在不同测试区域的占用时段,相比传统网络图更便于工程人员理解任务时序关系和资源冲突情况。

这种改进使得规划方案的制定周期从“小时级”缩短到“分钟级”,同时能够通过量化评估指标确保方案的优越性。

3.3 算法拓展

本文提出的双层编码的遗传算法具有较好的可拓展性,未来可在应用中进一步改进。

1) 适应不同发射场不同型号运载火箭任务

在本文算法中,修改不同发射场的场地相关参数信息,以及不同运载火箭的工艺流程测试时间信息,即可适应不同发射场不同型号运载火箭任务。

2) 适应多目标优化问题

可以定义多种不同的目标函数,如对所有任务的发射时间窗口进行约束、对所需的资源保障条件进行约束等,同时也可以是多目标函数,即在不同权重条件下满足多个目标的需求。

3) 适应更多资源优化问题

本文算法目前仅针对测试场地这一特有资源进行规划问题求解,若考虑其他资源,如供电、供水、推进剂,甚至人力资源等,可以根据测试项目对相关资源的需求,增加相应需求矩阵,并将发射场相关资源的总量作为算法约束体现在算法当中,从而拓展遗传算法编码的维数,进而适应多资源约束下的多任务并行规划问题求解。

4 结论

通过分析国内航天发射场多任务并行规划的需求和痛点,需克服传统“双代号网络计划图”求解时间长、缺乏定量分析能力和结果可读性较差等问题,通过比较,选择大范围搜索优化能力强,且具备灵活编码能力的遗传算法解决多任务并行问题。提出了采用“双层编码+保工序交叉”的遗传算法,经过算例分析,可以有效地解决简化的航天发射场多任务并行规划问题,相比现行的双节点网络计划图方法,可在更短时间内完成规划方案,将原数小时的工作量缩短至1 min内完成,且输出结果更加直观。本文方法具有一定的通用性和拓展性,针对不同类型的运载火箭测试发射任务,可以通过修改不同区域的测试时长进行适应;可通过修改适应度函数,适应航天发射场多任务并行执行的多目标规划问题。

参考文献

- [1] BAO W M, WANG X W. Develop high reliable and low-cost technology of access to space, embrace new space economy era [J]. *Aerospace China*, 2019, 20 (4): 23-30.
- [2] 秦旭东,龙乐豪,容易.我国航天运输系统成就与展望[J].*深空探测学报*,2016,3(4):315-322.
QIN X D, LONG L H, RONG Y. The achievement and future of China space transportation system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*,2016,3(4):315-322.
- [3] 陈汉瑜,武俊峰,唐国华,等.基于激光灯塔的合作航天器位姿测量方法及其精度分析[J].*仪器仪表学报*,2023,12(44):101-110.
CHEN H Y, WU J F, TANG G H, et al. Pose measurement for cooperative spacecraft based on Lighthouse tracking system and the precision analysis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,2023,12(44):101-110.
- [4] 钟文安,吴纯治,陈少将.发射场航班化发射能力建设思考[J].*宇航总体技术*,2024,8(4):71-78.
ZHONG W A, WU CH ZH, CHEN SH J. Insight on capacity construction for airline-flight-mode launching of

spaceport [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*,2024,8(4):71-78.

- [5] 包为民,汪小卫.航班化航天运输系统发展展望[J].*宇航总体技术*,2021,5(3):1-6.
BAO W M, WANG X W. Prospect of airline-flight-mode aerospace transportation system [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2021, 5 (3): 1-6.
- [6] 刘阳,辛腾达,同江.下一代智慧发射场发展研究[J].*宇航总体技术*,2023,7(2):62-68.
LIU Y, XIN T D, TONG J. Research on the development of the next generation intelligent launch site[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*,2023,7(2):62-68.
- [7] 杨青格.俄罗斯航天发射场进化史——拜科努尔航天发射场和东方航天发射场对比研究[J].*国际太空*,2023(8):60-65.
YANG Q G. Evolution history of Russian space launch sites: A comparative study of Baikonur space launch site and Dongfang space launch site [J]. *International Space*, 2023 (8): 60-65.
- [8] 范瑞祥,张浩锐,魏威,等.猎鹰-9火箭高频次发射能力分析及启示[J].*宇航学报*,2024,45(9):1-6.
FAN R X, ZHANG H R, WEI W, et al. Analysis of the high-density launch capability of Falcon 9 and its implications [J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45 (9): 1-6.
- [9] 容易,宋晶,马建伟,等.空间站工程载人火箭测试发射流程优化分析与研究[J].*导弹与航天运载技术*,2022(1):6-10.
RONG Y, SONG J, MA J W, et al. Optimization analysis and research on test launch process of manned rocket in space station project [J]. *Missile and Space Vehicle*, 2022 (1): 6-10.
- [10] 孟庆丰,范婷霞,徐珊珊,等.空间站任务应急发射流程设计及优化[J].*导弹与航天运载技术*,2023(1):140-145.
MENG Q F, FAN T X, XU SH SH, et al. Design and optimization of process for space station mission emergency launch [J]. *Missile and Space Vehicle*, 2023 (1): 140-145.
- [11] 崔赢午,袁振,孟庆丰,等.空间站任务应急发射流程技术安全管理的设计与实施[J].*导弹与航天运载技术*,2022(1):143-147.
CUI Y W, YUAN ZH, MENG Q F, et al. Design and implementation of technical safety management for emergency launch process of space station mission [J]. *Missile and Space Vehicle*,2022(1):143-147.
- [12] 熊占兵,彭江涛,毕海娟,等.基于航天产品生产流程精细化再造体系的新一代运载火箭发射场总装工作实践[J].*管理与实践*,2022(3):5-11.
XIONG ZH B, PENG J T, BI H J, et al. Practice of final assembly work for the new generation launch vehicle

- launch site based on the refined reconstruction system of aerospace product production process [J]. Management and Practice, 2022(3):5-11.
- [13] 钟文安,张俊新,李智斌等.某大型运载火箭测试发射流程优化策略[J].导弹与航天运载技术,2021(5):85-88,116.
ZHONG W AN, ZHANG J X, LI ZH B, et al. Optimization strategy for test launching process of a large launch vehicle [J]. Missile and Space Vehicle, 2021(5):85-88,116.
- [14] 唐青.载人航天测试发射流程的设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
TANG Q. Design and implementation of manned space test launch process [D] Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [15] 淳静,李阳,杨俊.基于粒子群算法的航天发射任务规划技术[J].导弹与航天运载技术,2024(6):47-53.
CHUN J, LI Y, YANG J. Space launch mission planning technology based on particle swarm optimization [J]. Missile and Space Vehicle, 2024 (6) :47-53.
- [16] 卢冲赢,白奉天,吴琦,等.航天发射场测试发射任务桌面推演系统研究[J].兵器装备工程学报,2024,45(s1):12-18.
LU CH Y, BAI F T, WU Q, et al. Research on tabletop maneuver system for space launch mission[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(s1):12-18.
- [17] YI A, WANG M Y, XUE X G, et al. An efficient heuristic algorithm for flexible job-shop scheduling problem with due windows [C]. IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2022:142-147.
- [18] 王柏琳.等待时间受限的紧凑型流水车间调度模型与算法[M].北京:中国经济出版社,2021.
WANG B L. A Compact Flow Shop Scheduling Model and Algorithm with Limited Waiting Time [M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2021.
- [19] 卢超,李新宇,高亮等.加工时间可控的多目标车间调度[M].武汉:华中科技大学出版社,2021.
LU CH, LI X Y, GAO L, et al. Multi-Objective Workshop Scheduling with Controllable Processing Time [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2021.
- [20] 牟健慧,高亮,李新宇等.车间逆调度理论及智能算法[M].北京:电子工业出版社,2021.
MOU J H, GAN L, LI X Y et al. Workshop Inverse Scheduling Theory and Intelligent Algorithms [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021.
- [21] VIEIRA J, FERNANDO D, PABLO D V. Advanced planning and scheduling (APS) systems: S systematic literature review [C]. Trans-disciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions: Proceedings of the 28th ISTE International Conference on Trans-disciplinary Engineering. Amsterdam: IOS Press, 2021,16:385.
- [22] SAFARZADEH S, SHADROKH S, SALEHIAN A. A heuristic scheduling method for the pipe-spool fabrication process [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018, 9(1): 1901-1918.
- [23] CAI AN J, YU Y F, ZHAO M M. Deep reinforcement learning solves job-shop scheduling problems [J]. Instrumentation, 2024, 11(1):88-100.
- [24] 汪芊芊,苏哈,林臻,等.运载火箭电子设备测试性验证方法研究[J].电子测量与仪器学报,2024,38(2):241-248.
WANG Q Q, SU H, LIN ZH, et al. Research on testability verification of launch vehicle electronic equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(2):241-248.
- [25] 南敬昌,陈鑫,严洁.基于 DE-GA 算法的阵列天线故障检测方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(11):33-39.
NAN J CH, CHEN X, YAN J. Array antenna fault detection method based on DE-GA algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(11):33-39.

作者简介



张俊新,2008年于清华大学获得学士学位,现为国防科技大学硕士研究生,西昌卫星发射中心技术部高级工程师,主要研究方向为航天测试发射和航天发射场规划论证。

E-mail: zjx6. thaa@ vip. 163. com

Zhang Junxin received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2008. Now he is a M. Sc. candidate at National University of Defense Technology and a senior engineer in Xichang Satellite Launch Center. His main research interests include aerospace testing launch and launch site planning demonstration.



胡梅(通信作者),2004年于华中科技大学获得学士学位,2010年于清华大学获得博士学位,现为国防科技大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为测量和空间仪器工程。

E-mail: humei@ nudt. edu. cn

Hu Mei (Corresponding author), received her B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2004, and Ph. D. degree from Tsinghua University in 2010. Now she is an associate professor and M. Sc. supervisor in National University of Defense Technology. Her main research interests include measurement and space instrument engineering.