

文章编号: 2097-1974(2024)06-0047-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240608

基于粒子群算法的航天发射任务规划技术

淳静¹, 李阳², 杨俊²

(1. 太原卫星发射中心技术部, 太原, 030027; 2. 国防科技大学智能科学学院, 长沙, 410073)

摘要: 随着科技的不断发展, 航天发射进入了新的发展阶段, 对于航天发射的任务规划技术研究不断深入。探讨了航天发射任务规划的当前进展与前沿技术, 包括任务规划阶段、流程、意义, 重点剖析了当前面临的难点问题, 提出了对应的意见建议, 并对未来的发展趋势进行了展望, 最后采用改进粒子群算法对发射选择进行仿真分析, 试验结果表明, 所采取的算法有效解决了问题, 能够提供发射成功率高且成本低廉的方案。

关键词: 航天发射; 任务规划; 粒子群算法; 应急发射; 卫星

中图分类号: V19

文献标识码: A

Space Launch Mission Planning Technology Based on Particle Swarm Optimization

CHUN Jing¹, LI Yang², YANG Jun²

(1. Technical Department of Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan, 030027; 2. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: With the continuous development of science and technology, space launch has entered a new stage of development, and the research of space launch mission planning technology has been deepened. The current progress and advanced technology of space launch mission planning are mainly discussed, including the mission planning stage, process and significance, and the analysis of the current difficult problems is focused. The relevant opinions and suggestions are put forward. The future development trend is looked forward to, and finally the improved particle swarm algorithm is adopted to simulate and analyze the launch selection, and the experimental results show that the adopted algorithm effectively solves the problem, and is able to provide a plan with low launch cost and high launch success rate at the same time.

Keywords: space launch; task planning; particle swarm optimization algorithm; emergency launch; satellite

0 引言

随着信息化时代的到来, 航天发射任务规划在经济、科技、军事等领域中的作用越来越重要。航天发射任务规划涉及到将各类航天器送入预定轨道的一系列计划安排, 在天基信息系统组成中, 航天发射起着基石的作用, 确定航天器的发射点位、发射窗口、任务编组及机动路径, 将航天器安全高效送入太空并完成后续的一系列任务。

航天发射任务主要包括两大类, 一类是常规发射任务, 各个国家航天部门每年都会制定发射计划, 然后按照计划从卫星发射中心将各类航天器发射升空, 发射平台主要是中心的塔架, 这类航天发射任务对于可靠性要求高, 但是对于发射时间没有特殊要求; 另

一类是应急航天发射, 这类任务是当前研究的热点和难点, 其主要面向的是抢险救灾及卫星补网等军事及民用急难险重场景中的任务, 对于任务完成的时效性要求较高, 发射平台也多种多样, 可以从陆基阵地、海基阵地、空基阵地发射。近年来, 以美国为代表的军事及航天强国将快速空间响应技术作为一个重点发展的对象, 提高应对突发事件的能力, 缩短反应时间, 并且已经通过战术星项目进行了前期的探索和技术验证^[1-3], 对全球性突发事件的响应时间缩短到了24小时。此外, 因为中国周边地缘环境的复杂性, 航天发射在联合作战中也是重要一环, 担负着空间系统快速修复重构、热点地区应急太空支援等重要使命。

成熟的航天发射任务规划系统可以有效提高任务

效率, 当前中国的航天发射任务规划系统研究基础较为薄弱, 此外新型发射任务的出现也进一步提升了发射的难度, 因此这是一个亟待解决的问题。本文围绕航天发射任务规划技术与能力建设重难点及热点前沿问题, 首先介绍了领域的背景和意义, 然后对之前的学者在这个领域的研究成果进行梳理, 接着重点研究航天发射任务规划的流程, 并设计了一种基于改进粒子群算法的航天发射任务规划方法, 为航天发射任务规划问题提供一种解决方案。

1 航天发射任务规划技术

1.1 任务规划阶段划分

1957年, 苏联发射第一颗人造地球卫星

斯普特尼号, 是人类使用航天器探索太空的开始。而航天发射任务规划技术也不断迭代更新, 经历了从传统的以设计人员为决策主体的任务规划和调度模式到结合人工智能的航天发射任务规划模式, 如表1所示。传统的航天器发射任务规划与调度方式需要大量的人力、物力、财力和长时间的设计过程, 但是所设计的资源分配计划和任务调度序列却往往不是最优的, 随着航天器数量和任务规模的进一步增加, 以设计人员和经验为决策主体的方式求解时间和求解效率逐渐难以满足任务需求, 而将人工智能和航天器规划调度结合的方式为大规模调度需求和新型航天器发射任务设计提供了新的解决思路, 效率和可靠性也进一步提高。

表1 航天发射任务规划技术阶段

Tab.1 Technical stage of space launch planning

时间	技术	备注
20世纪50年代后期	逻辑理论家程序及问题求解程序 ^[4]	Newell和Simon提出
20世纪70年代至90年代中期	STRIPS规划系统 ^[5]	Fikes和Nilsson提出
20世纪90年代后期至今	自主任务规划技术	深空1号上的远程智能体; 地球观测1号中的连续规划软件; 美国国家航空与航天局开发的可扩展通用远程做规划框架 ^[6] ; 美国喷气推进实验室开发自主调度与规划环境 ^[7] ; 火星快车任务长期规划器 ^[8] ; 国际伽玛射线天体物理实验室卫星规划器 ^[9]

1.2 总体结构流程

当前国内外对航天发射任务规划进行了较为广泛的研究, 包括对于常规导弹^[10]、深空探测器^[11]、固体火箭^[12-13]等航天器的任务规划。对于应急任务的规划^[12]和常规发射任务的规划^[13], 所规划的内容主要包括星箭选型、机动路径、发射波次、发射窗口等。其总体流程如图1所示。

当接收到发射任务以后, 先对其进行需求分析与研判, 明确任务窗口、覆盖重数, 得出时间、空间、卫星资源能力等约束条件, 根据当前所具备的承载能力参数在火箭数据库中选择适用的运载火箭执行任务; 再根据所选择出的火箭型号, 计算其发射倾角, 估算发射的弹道, 计算发射时间窗口和发射的波次, 选取合适的发射点位; 然后根据发射点位及贮存发射火箭的位置综合考虑路网信息进行路径规划, 将以上因素综合考虑, 得到一个总体火箭发射任务规划流程。

1.2.1 星箭选型

运载火箭是在导弹的基础上发展起来的, 到目前为止, 火箭研制已经取得了众多成果, 依据所使用的推进剂可以分为固体火箭、液体火箭、固液混合火箭, 依据火箭的级数来分, 有单级火箭、多级火箭。中国当前运载火箭类型如表2所示。

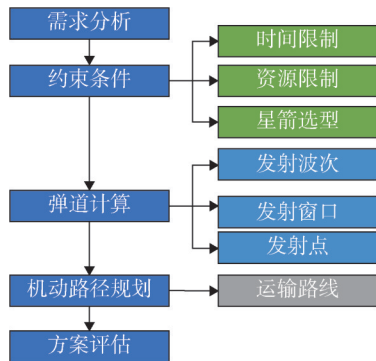


图1 航天发射任务规划基本流程

Fig.1 Basic process of space launch mission planning

表2 中国当前运载火箭类型

Tab.2 Current types of launch vehicles in China

运载火箭类型	推进剂组合形式	典型火箭型号
传统运载火箭	四氧化二氮/偏二甲肼 液氢/液氧	CZ-2C/D/F、CZ-3A/B、 CZ-4B/C等
新一代无毒无污染液体火箭	液氢/液氧 液氧/煤油	CZ-5B、CZ-6、CZ-7A
新一代固体火箭	—	CZ-11、KZ-1A

当确定了所要发射的航天器以后，要根据航天器的入轨要求，进行运载火箭与航天器类型匹配的工作。此时需要考虑以下技术指标：运载能力、入轨精度、火箭对不同质量的有效载荷的适应能力和可靠性。

运载能力指火箭能够送入预定轨道的有效载荷质量。有效载荷的轨道种类较多，所需的能量也不同，因此在标明运载能力时要区别低轨道、太阳同步轨道、地球同步卫星过渡轨道、行星探测器轨道等几种情况。表示运载能力的另一种方法是给出火箭达到某一特征速度时的有效载荷质量。各种轨道与特征速度之间有一定的对应关系。例如把卫星送入185 km高度圆轨道所需要的特征速度为7.8 km/s，送入1 000 km高度圆轨道需8.3 km/s，送入地球同步卫星过渡轨道需10.25 km/s，送入探测太阳系需12~20 km/s。

1.2.2 发射窗口确定

发射窗口^[14-15]是允许火箭发射的时间范围，需要综合考虑航天器及目标对于太阳光照条件的需求、航天器对于地影的要求、航天器对于观测站的要求及对于交会对接、空间组网等方面的要求。详细类型要求见表3。发射窗口的计算过程涉及到以下几个方面：太阳、月球、航天器位置的计算，航天器的星下点位置、星下点太阳高度角计算和地影信息计算，如果航天器还需要进行交会对接和组网，则还要将这种情况考虑进去。发射窗口的大小不一，可以是几天、几个小时、几分钟甚至为零窗口，所对应的每一秒都要严格按照计划执行，不能存在一丝一毫的差距。

在进行航天器发射窗口的确定时，采用系统建模的方法，通过分析各类约束条件，为其建立科学合理的数学模型，消解冲突，通过一些算法如启发式算法、智能优化算法、精确求解算法进行求解，获取航天器发射的时间窗口。

在航天发射任务规划领域，研究者们主要关注火箭推力、推进剂消耗、飞行参数分析等方面。此外，对于目标轨道的分析，有效载荷的性质和质量以及环境因素也是重要的研究内容。

表3 发射窗口确定需要考虑的约束条件

Tab.3 The constraints that need to be considered when determining the launch window

约束类型	具体条件
光照约束	地面目标对于太阳光照条件的要求； 航天器电池阵供电充电要求； 航天器姿态控制、热控系统对于航天器方向要求； 航天器特殊部件对太阳光和各类反射光照射方向要求
地影约束	航天器处于地球阴影时间限制； 进出地影轨道位置约束
交会对接	对于空间交会对接的要求
其他类型	航天器与太阳观测站几何关系要求； 返回式航天器回收时间要求； 空间组网要求

1.2.3 发射波次

发射波次的确定主要依据当前要执行的任务中航天器和火箭的贮存情况，要执行任务的队伍发射能力，任务总体需求，开展卫星入轨能力可行性检查，尽量减小空间碎片碰撞的概率，确定航天器组网及对应的轨道方案及火箭发射阵地，设计火箭发射波次，在规定时间内将航天器送入太空完成组网等工作。

1.2.4 机动路径

机动路径的选择是依据航天器贮存位置和发射点位，综合考虑两者之间的道路网络，通过路径规划算法得到机动路径方案。其中，路径规划算法是进行机动路径设计的核心，当前主要采用的算法有：基于Geohash的空间搜索算法^[16]、Dijkstra算法^[17]、Bellman-Ford算法^[18]、动态规划算法^[19]、A*算法^[20]等。对航天发射中的机动路径规划问题解决过程主要有以下几个方面：道路网图层预处理、问题建模与分析、算法设计与优化、方案生成。

1.3 重难点问题及建议

航天发射任务规划技术发展与能力建设重难点主要表现在以下几个方面：

a) 复杂环境下的决策支持：在复杂的环境下，如战场、太空等，航天发射和联合作战任务规划的决策支持系统需要进一步提高，包括实时数据处理、预测模型构建以及决策方案的自动化生成等。

b) 多目标优化问题：在航天发射和任务规划中，往往存在多目标优化问题，如最大化作战效果、最小化损失等，如何找到权衡这些目标的最优解是当前研究的难点之一。

c) 人机协同决策：随着人工智能技术的发展，将人工智能应用于航天发射任务规划已成为研究热点，如何实现人机协同决策，充分发挥人工智能在决

策中的作用仍需进一步研究。

针对以上问题, 本文提出以下解决方案和建议:

a) 加强实时数据处理和预测模型构建: 通过改进算法和引入新的技术, 提高对实时数据和预测模型的处理能力, 为决策提供更准确、更及时的支持。

b) 引入多目标优化算法: 通过引入先进的多目标优化算法, 寻找权衡不同目标的最优解, 提高任务规划的效果。

c) 实现人机协同决策: 通过深入研究人机协同决策的理论和方法, 实现人工智能与人类专家的有效协同, 提高决策的效率和准确性。

2 仿真分析

在整个航天发射任务规划流程中, 对于发射场的选择和发射窗口的确定是至关重要的一环, 关系到火箭发射的成功和航天器能否顺利入轨开展后续工作。本文针对这一关键问题设计了一种基于改进粒子群算法的时间窗口编排算法, 着力解决航天发射任务规划中的发射窗口确定问题。算法流程如图2所示, 首先初始化粒子群算法的参数, 设置初代粒子的位置、速度, 并对位置信息进行检查, 处理异常信息; 然后根据粒子位置信息计算适应度函数; 接下来判断是否满足结束条件, 如果满足则结束并输出最优结果, 如果不满足, 则更新位置和速度进行新一轮迭代。

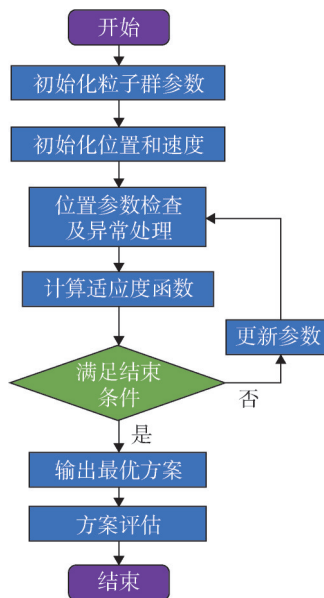


图2 粒子群求解航天发射任务规划算法流程

Fig.2 Particle swarm optimization algorithm flowchart for space launch mission planning

求解卫星发射任务规划问题是一种最优化问题, 粒子群算法是一种能有效解决这类问题的算法。本文针对卫星发射任务的特点进行了针对性算法设计。

2.1 仿真条件设置

仿真条件设置如下: 存在4个卫星发射场 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$, 对20个任务 $\{T_1, T_2, \dots, T_{20}\}$ (其中包含3种类型 $\{I_1, I_2, I_3\}$) 进行发射。其中每个发射中心对每一类卫星均存在着发射成本和发射成功率以及可以利用的发射时间窗口。通过算法得到发射成本低廉、发射成功率高的发射时间安排。

发射任务与发射中心的成本对应关系见表4, 任务类型关系对应见表5, 卫星发射场发射3类卫星成功率见表6。

表4 卫星发射成本

Tab.4 Satellite launch cost

发射任务	发射成本/万元			
	C_1	C_2	C_3	C_4
T_1	2400	2000	2750	2150
T_2	3450	2900	3700	2800
T_3	3300	3350	2450	2500
T_4	2400	2000	2750	2150
...
T_{20}	3350	3650	2100	1800

表5 任务类型

Tab.5 Task type

任务类型	任务
I_1	$T_1, T_5, T_7, T_{10}, T_{11}, T_{16}, T_{19}$
I_2	$T_2, T_3, T_8, T_{12}, T_{14}, T_{17}, T_{20}$
I_3	$T_4, T_6, T_9, T_{13}, T_{15}, T_{18}$

表6 不同发射场卫星发射成功率

Tab.6 Table of satellite launch success rates for different bases

任务类型	不同发射场发射成功率			
	C_1	C_2	C_3	C_4
I_1	0.940	0.942	0.977	0.962
I_2	0.927	0.885	0.932	0.932
I_3	0.962	0.862	0.965	0.883

2.2 算法设计

2.2.1 粒子表示方式

粒子群算法中每个粒子均有位置信息 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_N\}$ 和速度信息 $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_N\}$, 通过

位置信息表示对应解的方式，速度代表着位置更新优化的方向。根据航天发射任务规划特点设计了一种自然数编码规则表示方式，如图3所示，位置信息共有N维，每一维对应一个任务的发射场地。

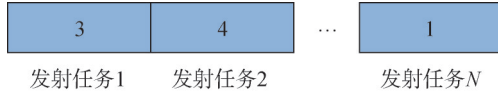


图3 粒子位置信息表示方式

Fig.3 Representation of particle position information

2.2.2 速度位置更新方式

速度信息更新方式如式（1）所示，其中 ω 为惯性因子， $P_{best,i}$ 为当前粒子搜索到的最好位置， P_{best} 为当前粒子群体搜索到的最好的位置。

$$V_i' = \omega V_i + c_1 r_1 (P_{best,i} - P_i) + c_2 r_2 (P_{best} - P_i) \quad (1)$$

位置更新方式即为原位置与速度的加和，如式（2）所示：

$$P_i' \leftarrow P_i + V_i \quad (2)$$

2.2.3 位置信息检查及异常处理方式

当粒子的位置进行更新以后可能会存在超出分配范围的情况，这时候需要对更新后的位置信息进行检查，并对异常值进行处理。若粒子位置信息中出现超出卫星发射中心数量的数字，低于最小值的改为最小值，高于最大值的改为最大值。

2.2.4 适应度函数设计

考虑到卫星发射任务规划旨在找到一种成本低廉而成功率高的方法。通过将两种目标归一化后加权平均的方式进行设计，其表达式如下：任务发射成本的归一化方式是任务发射成本除以该任务在每个发射场成本的平均值，适应度函数如式（3）所示：

$$F = \left(\sum_{i=1}^N \text{Cost}_i \right) / \text{Ave Cost}_i - \sum_{i=1}^N S_i \quad (3)$$

式中 Cost_i 为任务*i*的发射成本； S_i 为任务*i*的成功率； AveCost_i 为任务*i*在4个发射场的平均成本。

2.3 实验结果

为了验证算法的有效性，我们结合卫星发射场景对算法运行进行了测试，其中一种发射规划的结果如表7所示，此时加权平均值为-2.774 6，任务发射的总成本为48 050 万元，任务平均发射成功率为0.935 4。此次训练过程如图4所示，在大约第70次迭代中算法就收敛至最优解，运行速度快，能够较快给出合理的解。

表7 发射任务规划结果

Tab.7 Launch mission planning results

任务	发射场	任务	发射场	任务	发射场
T_1	C_4	T_8	C_1	T_{15}	C_1
T_2	C_1	T_9	C_4	T_{16}	C_2
T_3	C_3	T_{10}	C_1	T_{17}	C_4
T_4	C_1	T_{11}	C_4	T_{18}	C_1
T_5	C_3	T_{12}	C_4	T_{19}	C_2
T_6	C_1	T_{13}	C_2	T_{20}	C_4
T_7	C_1	T_{14}	C_1	—	—

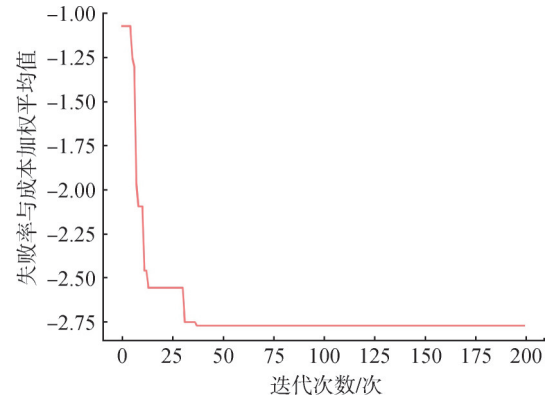


图4 发射失败率与成本加权平均值随迭代次数变化曲线

Fig.4 Curve of the average weighted value of launch success rate and cost with the number of iterations

为了验证算法的稳定性，控制场景中其他条件不变，对算法进行了100次重复性试验，每次试验算法的最终收敛值如图5所示，总体的波动较小，算法稳定性较好。

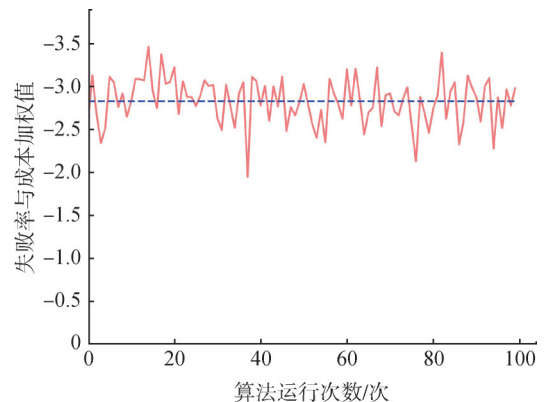


图5 规划算法运行100次适应度函数最终收敛值

Fig.5 The final convergence value of the fitness function after running the planning algorithm 100 times

此外，为了进一步验证算法有效性，我们选取蚁群算法和一种面向发射成功率的启发式算法在算法运行时间、最终规划方案成本与发射成功率方面进行对比，结果如表8所示，蚁群算法所用时间更长，粒子

群算法的成本更低,成功率更高,启发式算法所生成方案的成功率高但是成本相较于其他两种方法更高。蚁群算法数量设置为50,迭代次数设置为1000,蚁群算法和粒子群算法收敛曲线对比如图6所示,两种算法展示的均为每代蚂蚁中的最优值和每代粒子中的最优值。结果显示,所提出的粒子群算法相比于蚁群算法收敛效果更好,达到收敛所需的迭代次数相近。

表8 粒子群算法与蚁群算法指标对比

Tab.8 Comparison table of indicators between particle swarm optimization algorithm and ant colony algorithm

算法	算法运行时间/s	加权值	任务总成本/万元	发射成功率
粒子群算法	2.9464	-2.7747	44750	0.93835
蚁群算法	5.6907	-1.6281	48050	0.93540
启发式算法	—	-3.5621	42050	0.92785

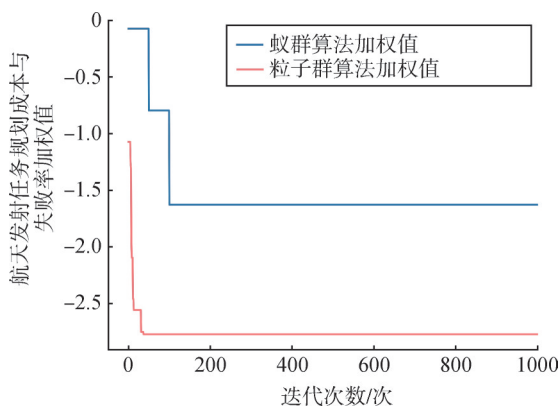


图6 蚁群算法与粒子群算法收敛曲线对比结果

Fig.6 Comparison of convergence curves between ant colony algorithm and particle swarm algorithm

2.4 复杂度分析

2.4.1 时间复杂度

对于算法迭代次数为 N_i 、粒子种群数量为 N_p 、发射场为 N_b 、发射任务数量为 N_t 的卫星发射任务规划问题,包含迭代次数和粒子种群两个循环,内层循环的复杂度为 $O(N_i \times N_b)$,则算法的时间复杂度计算方式如式4所示,其复杂度为 $O(N^2)$ 。

$$O_t(\text{IPSO}) = N_p \times N_i \times O(N_i \times N_b) \approx O(N^2) \quad (4)$$

2.4.2 空间复杂度

算法IPSO的实现部分主要由卫星发射成功率矩阵、卫星发射成本矩阵、粒子位置信息向量、粒子速度信息向量构成。对于 N_t 个任务, N_b 个发射场的场景,各部分占用资源所对应的空间复杂度如表9所示。

表9 粒子群算法与蚁群算法指标对比

Tab.9 Comparison table of indicators between particle swarm optimization algorithm and ant colony algorithm

组成部分	复杂度
卫星发射成功率矩阵	$O(1)$
卫星发射成本矩阵	$O(1)$
粒子位置信息向量	$O(N_T)$
粒子速度信息向量	$O(N_T)$

任务数量大于发射场数量,则算法的空间复杂度如式5所示,其空间复杂度约为 $O(N)$ 。

$$O_{\text{space}}(\text{IPSO}) = O(1) + O(1) + O(N_T) + O(N_T) \approx O(N_T) \approx O(N) \quad (5)$$

3 结束语

本文通过对航天发射任务规划技术发展与能力建设的研究,分析了当前航天发射任务规划技术所处的发展阶段,对航天发射任务规划技术的总体流程进行了梳理,针对重点过程进行了详细阐述,从军事、科技、经济3个方面对航天发射所占据的重大战略研究意义进行说明,指出了当前存在的重难点和热点前沿问题,并提出了相应的解决方案和建议。针对发射场地确定问题,提出了一种基于粒子群算法的解决方法,并设计了相应的仿真试验,验证其有效性。然而,本研究仍存在一定的局限性,如未涵盖所有相关领域的问题,未来可进一步拓展研究范围。对于提出的解决方案和建议,需要在实践中进一步检验有效性。

参考文献

- [1] 廖育荣,王斌,蔡洪亮.美国快速响应空间试验分析[J].装备指挥技术学院学报,2010,21(3):54-57.
LIAO Yurong, WANG Bin, CAI Hongliang. Analysis of rapid response space experiments in the United States[J]. Journal of Equipment Command and Technology College, 2010, 21(3): 54-57.
- [2] 黄欣.快速响应卫星载荷体系化建设思路[J].电讯技术,2014,54(10):1321-1325.
HUANG Xin. Construction ideas for a rapid response satellite payload system[J]. Telecommunications Technology, 2014, 54(10): 1321-1325.
- [3] 孔林.快速响应空间小卫星热控系统设计及关键技术[J].红外与激光工程,2014,43(B12):130-138.
KONG Lin. Design and key technologies of rapid response space small satellite thermal control system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(B12): 130-138.
- [4] HUNT E. GPS: A case study in generality and problem solving[J].

- American Mathematical Monthly, 1969, 78(8): 923.
- [5] BASSEDA R, KIFER M. State space planning using transaction logic [C]. Portland: The 17th International Symposium on Practical Aspects of Declarative Languages, 2015.
- [6] BARREIRO J, BOYCE M, FRANK J, et al. EUROPA: A platform for timeline-based AI planning, scheduling, constraint programming, and optimization[C]. Atibaia: 12 International Competition on Knowledge Engineering for Planning and Scheduling, 2012.
- [7] CHOUINARD C, KNIGHT R, JONES G, et al. Automated and adaptive mission planning for orbital express[C]. Heidelberg: Space Operations, 2008.
- [8] CESTA A, CORTELLESA G, FRATINI S, et al. MrSPOCK-Steps in developing an end-to-end space application[J]. Computational Intelligence, 2011, 27(1): 83-102.
- [9] PRALET C, VERFAILLIE G. AIMS: A tool for long-term planning of the EAS integral mission[C]. Pasadena: Proceedings of the 6th International Workshop on Planning and Scheduling for Space, 2009.
- [10] 杨萍, 刘卫东, 李德龙, 等. 常规导弹作战任务规划系统设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(3): 151-154+158.
YANG Ping, LIU Weidong, LI Delong, et al. Design and implementation of conventional missile combat task planning system[J]. Fire and Command Control, 2014, 39(3): 151-154+158.
- [11] 王晓晖, 李爽. 深空探测器约束简化与任务规划方法研究[J]. 宇航学报, 2016(7): 768-774.
WANG Xiaohui, LI Shuang. Research on constraint simplification and mission planning methods for deep space detectors[J]. Journal of Astronautics, 2016(7): 768-774.
- [12] 张道昶, 樊忠泽. 固体火箭应急发射任务规划及发射流程研究[J]. 现代防御技术, 2018, 46(6): 122-128.
ZHANG Daochang, FAN Zhongze. Research on emergency launch mission planning and launch process of solid rocket[J]. Modern Defense Technology, 2018, 46(6): 122-128.
- [13] 宋永生, 周非, 魏凯, 等. 新型固体运载火箭发射流程及计划管理[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(6): 36-39.
SONG Yongsheng, ZHOU Fei, WEI Kai, et al. Launch process and plan management of new solid launch vehicles[J]. Missile and Space Launch Technology, 2016(6): 36-39.
- [14] 李海阳, 彭祺攀, 周英, 等. 航天器交会对接发射窗口分析[J]. 宇航学报, 2009(5): 1861-1865.
LI Haiyang, PENG Qibo, ZHOU Ying, et al. Analysis of launch window for spacecraft rendezvous and docking[J]. Journal of Astronautics, 2009(5): 1861-1865.
- [15] 唐明亮, 王颖, 张学功, 等. 一种探月任务多窗口发射轨道设计方法[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 118-121.
TANG Mingliang, WANG Ying, ZHANG Xuegong, et al. A multi window launch orbit design method for lunar exploration missions [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 118-121.
- [16] 陈建宏, 黄晓明. 复杂环境下特种车辆应急机动路径规划研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(7): 159-162.
CHEN Jianhong, HUANG Xiaoming. Research on emergency maneuvering path planning for special vehicles in complex environments[J]. Computer Simulation, 2020, 37(7): 159-162.
- [17] YEFIM D, ROTEM I. Hybrid Bellman-Ford Dijkstra algorithm[J]. Journal of Discrete Algorithms, 2017(42): 35-34.
- [18] LIKHODED N A, SIPEIKO D S. A generalized block Floyd-Warshall algorithm[J]. Journal of Belarusian State University, 2019(3): 84-92.
- [19] ACHACHE M. A polynomial-time weighted path-following interior-point algorithm for linear optimization[J]. Asian-European Journal of Mathematics, 2020, 13(2): 2050038.
- [20] 钟瑛, 陈凌峰. 改进A*算法在游戏地图路径搜索中的应用研究[J]. 网络安全技术与应用, 2013, 8(2): 54-56.
ZHONG Ying, CHEN Lingfeng. Research on the application of improved A* algorithm in game map path search[J]. Network Security Technology and Application, 2013, 8(2): 54-56.

作者简介

淳 静 (1972—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天测试发射。

李 阳 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为天基智能。

杨 俊 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为空间仪器工程。