

面向自主运行的深空探测航天器体系结构设计 及自主任务规划方法

冯小恩¹, 李玉庆¹, 杨晨^{2†}, 何熊文³, 徐勇³, 朱立颖³

(1. 哈尔滨工业大学 深空探测基础研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 传统的航天器运行管控方式严重依赖地面指控、人力成本耗费大且对任务响应时间长, 难以满足深空探测远距离通信时延突出的任务特点, 航天器的智能化水平亟待进一步提高. 本文通过对航天器自主运行问题进行系统地分析, 提出一种基于多智能体的航天器自主运行的体系结构, 面向自主系统结构、运行流程等进行了设计. 重点针对小行星探测任务, 提出了一种包含平台和载荷任务管理的两阶段航天器自主任务规划算法设计方案, 能够实现平载一体的航天器自主任务管理, 根据高级任务目标输出完整的指令序列. 并通过自主任务规划仿真, 对相关算法和模型的正确性和可行性进行了可视化验证和分析, 为航天器自主运行技术研究提供了一种有益的思路和方法.

关键词: 深空探测; 航天器自主运行; 智能规划与调度; 体系结构设计; 小行星探测

引用格式: 冯小恩, 李玉庆, 杨晨, 等. 面向自主运行的深空探测航天器体系结构设计及自主任务规划方法. 控制理论与应用, 2019, 36(12): 2035–2041

DOI: 10.7641/CTA.2019.90587

Structural design and autonomous mission planning method of deep space exploration spacecraft for autonomous operation

FENG Xiao-en¹, LI Yu-qing¹, YANG Chen^{2†}, HE Xiong-wen³, XU Yong³, ZHU Li-ying³

(1. Exploration Basic Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2. School of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China;

3. General Design Department of Beijing Space Vehicle, Beijing 100094, China)

Abstract: The traditional spacecraft operation and control method relies heavily on ground accusation, the labor cost is large and the task response time is long, and it is difficult to meet the characteristics of the deep space exploration long-distance communication delay. The intelligent level of the spacecraft needs to be further improved. Based on the systematic analysis of the autonomous operation of spacecraft, an architecture based on multi-agent spacecraft autonomous operation are proposed, which is designed for the structure and operation flow of the autonomous system. Focusing on the asteroid detection mission, a two-stage spacecraft autonomous mission planning algorithm design scheme including platform and load task management is proposed, which can realize the autonomous mission management of spacecraft and load the complete instruction sequence according to the advanced mission objectives. Through the autonomous mission planning simulation, the correctness and feasibility of the relevant algorithms and models are visually verified and analyzed, which provides a useful idea and method for the research of spacecraft autonomous operation technology.

Key words: deep space exploration; autonomous operation of spacecraft; intelligent planning and scheduling; system architecture design; asteroid exploration

Citation: FENG Xiaoen, LI Yuqing, YANG Chen, et al. Structural design and autonomous mission planning method of deep space exploration spacecraft for autonomous operation. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(12): 2035–2041

收稿日期: 2019-07-19; 录用日期: 2019-12-25.

†通信作者: E-mail: shane_en@163.com.

本文责任编辑: 孟林智.

深空探测着陆与返回控制技术国防重点学科实验室开放基金项目(HIT.KLOF.2016.077, HIT.KLOF.2017.076)资助.

Supported by the Deep Space Exploration Landing and Return Control Technology National Defense Key Discipline Laboratory Open Fund (HIT.KLOF.2016.077, HIT.KLOF.2017.076).

1 引言

传统的航天器缺乏自主运行能力,其运行方式通常为地面系统管理。随着对航天信息获取能力要求的不断提高,传统的航天器运控方式所存在的对任务响应时间较长、智能化水平较低等弊端日益凸显,尤其针对深空探测任务,由于飞行距离远,通信时延突出,难以做到实时遥控。与传统的航天器运行方式不同,航天器自主运行是利用人工智能等现代控制技术,能够不依赖地面系统和指控人员介入,根据遥测数据自主确定航天器平台姿态、能源、通信等方面的运行控制,并能够感知异常状态,以及对不同异常状态进行响应,实现自我管理并完成相应的航天任务。因此,航天器的自主运行技术能够为深空探测任务的高效实施提供良好保证。

航天器自主运行主要包括航天器自主规划调度^[1]、自主健康管理^[2]和有效载荷数据自主处理^[3]等几个方面。自主运行的航天器具有智能决策、自主管理等诸多优点,是航天发展的大趋势^[4],国内外学者对此开展了大量的研究工作。从20世纪80年代开始,美国就开始制定了一系列发展航天器自主控制的政策,并开展了对航天器自主运行技术的研究,对自主运行的目的、总体需求及指导方针等进行了分析^[5-7]。此外,欧空局等也对航天器的自主控制和管理技术进行了研究,并在深空探测领域得到一定的应用^[8]。国内在航天器自主管理技术研究方面起步相对较晚,近年来逐步认识到这方面工作的重要性和迫切性,对国外相关技术进行了跟踪研究,哈尔滨工业大学^[9-10]、国防科技大学^[11]、中科院空间中心以及航天科技集团等单位的科技人员,在理论和应用方面进行了一些研究工作,并提出了一些自主规划调度算法、自主管理体系结构构建等研究成果^[12]。

但是,目前国内所开展的大部分研究离工程应用还有较大差距,缺少对航天器自主运行体系结构的研究,并且相关研究多以载荷任务的规划调度为主,较少考虑平台运行需求(例如姿轨控、导航、通信、热控等)。

基于上述分析,本文针对深空探测航天器自主运行体系结构设计及自主任务规划方法展开研究,提出了一种基于多智能体的航天器自主运行的体系结构,面向自主系统软件结构、自主管理运行流程等进行了设计,并针对深空探测航天器,以小行星探测自主绕飞为任务背景,提出一种包含平台和载荷任务管理的两阶段航天器自主任务规划算法方案,能够实现平载一体的航天器自主任务管理。最后通过仿真验证了该体系结构及自主任务规划方法的合理性和有效性,为实现航天器自主运行技术、降低航天任务的成本、增加任务的可靠性和实时性提供一种有益的思路。

2 基于多智能体的航天器自主运行软件体系架构设计

2.1 航天器自主管理系统总体框架设计

在航天器自主运行过程中,星载软件起着至关重要的作用,负责对星载资源和有效载荷进行管理,控制航天器完成预定目标,确保航天器安全等一系列任务。同时,由于自主运行与传统地面控制运行存在显著差异,因此需对星载软件的体系结构进行合理设计,既能充分发挥自主运行的优点,又能保证必要时由地面控制随时介入接管。

根据NASA的经验及前期研究基础,航天器自主运行管理系统应该由以下几个部分组成:自主任务规划与调度系统、执行系统、执行监测与故障诊断系统,如图1所示。

从整体上看,3个系统通过“状态参数管理器”联系在一起。其中,自主任务规划与调度系统使用状态参数管理器中的信息进行推理和搜索;执行系统负责指令的分发执行;执行监测与故障诊断系统负责收集各分系统状态信息并进行异常和故障监测。

自主任务规划与调度系统负责接收高级目标,根据航天器状态信息,生成指令序列输出,是自主运行管理系统的核心。高级目标一般主要有4个来源,分别是事先存储的任务、地面临时上传的任务、运行过程中产生的临时任务以及出现故障时要求重规划的任务。在正常情况下,该部分根据高级目标的要求和航天器状态,推理搜索出合理的指令序列;地面控制人员可随时上传临时决定的任务目标,交由自主控制系统处理;当在执行过程中,发现了高价值目标时,可以产生临时高级任务目标,用于对该情况的处理;当在执行过程中出现故障时,该部分可以进行重规划,调整指令序列。

针对其中的自主任务规划与调度系统,提出一种基于多智能体的自主任务管理体系结构,如图2所示。

2.2 自主任务规划与调度系统模块设计

自主任务规划与调度分系统的功能模块主要包括:自主导航与控制Agent、自主能源安全管理Agent、自主测控数传Agent、载荷自主运行Agent、指令管理Agent以及自主监控执行Agent,共计6个功能模块,完成姿轨信息预报、能源管理、通信管理、载荷管理、执行监控等功能和任务。

其中,自主导航与控制Agent提供一个自主管理分系统和航天器姿轨控分系统之间的接口,使得自主管理分系统能够获取航天器当前和未来一段时间的姿轨信息、姿轨任务执行的时间等必要信息,并对姿轨控分系统提出任务需求。具体的姿轨信息计算、姿轨任务执行由其他专业单位完成。

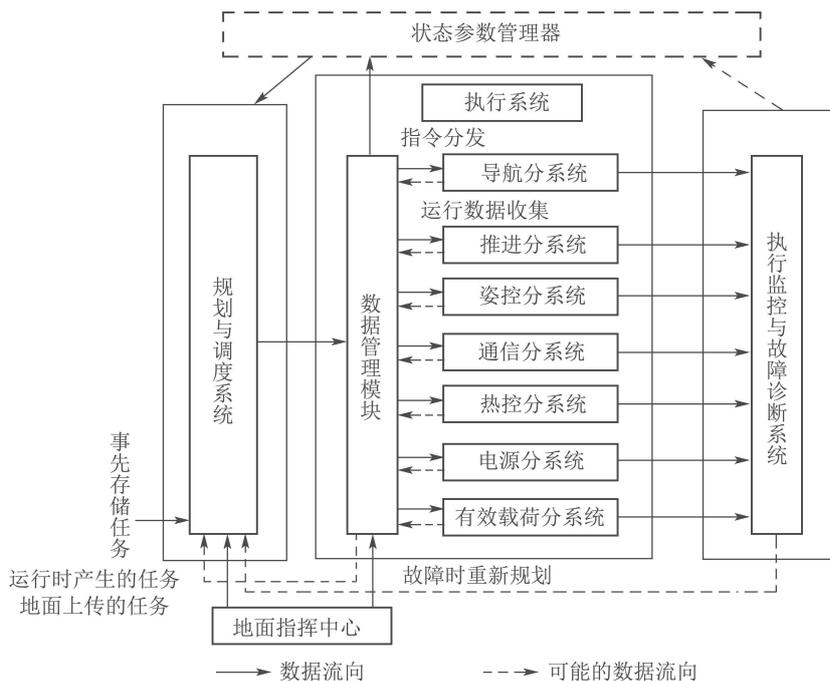


图 1 航天器自主运行体系架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spacecraft autonomous operation architecture

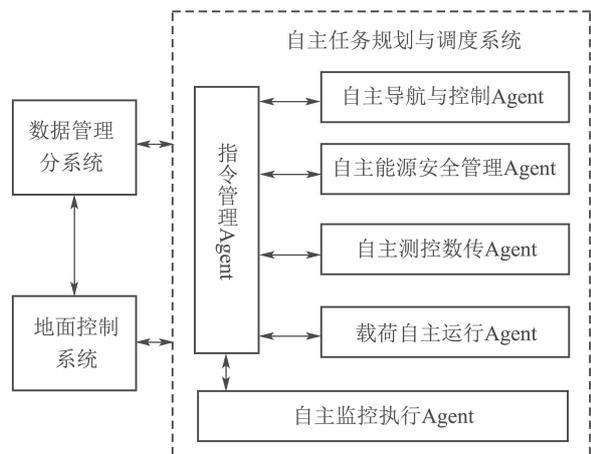


图 2 基于多智能体的自主任务规划与调度系统总体框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the overall framework of autonomous task planning and scheduling system

自主能源安全管理Agent所涉及的能源主要是指航天器在姿轨控、热控、通信、载荷工作等任务中消耗的电力能源。自主能源安全管理Agent其主要完成以下三方面的工作: 1) 根据当前任务计划, 预报未来一段时间内的能源使用情况; 2) 根据电源分系统遥测数据, 对蓄电池性能及衰退情况进行评估, 并适当调整电源使用的安全阈值; 3) 根据电源分系统遥测数据, 实现器上能源自主异常检测。

自主测控数传Agent主要负责保障航天器和地面指控中心之间的通信安全, 包括根据器地通信需求自主确定测控任务, 根据载荷数据量、通信条件、以及器上存储资源情况自主确定数传任务, 以及自主测控数

传异常检测和安全管理等任务。

载荷自主运行Agent根据完成姿轨控任务和通信任务后的能源剩余情况, 以及太阳能帆板的状态, 自主进行多载荷的协同任务规划, 以充分发挥不同载荷的能力和特点; 实现在轨自主遥感信息处理与特征提取, 能够识别低质量遥感数据, 并对该地区进行补充观测; 同时能够实时监控载荷分系统的状态, 实现载荷分系统安全管理和异常检测。

指令管理Agent主要负责将任务计划分解为航天器能够识别的具体指令, 并按照指令管理要求发送至数据管理分系统(或综合电子分系统)。

自主监控执行Agent用以确保每一条指令都被正确执行, 如果发生某指令未被正确执行的情况, 自主监控执行Agent视情况进行任务重规划, 或者按照安全管理策略进行航天器安全管控, 严重情况下, 将航天器转入安全模式, 等待地面修复。

2.3 自主任务规划与调度系统运行流程

自主任务规划与调度分系统中各功能模块按照一定的运行逻辑, 统一协调运行, 初步设计自主任务规划与调度分系统的运行流程示意图如图3所示。

3 航天器自主任务规划方法设计

本文以深空小行星探测任务为背景, 针对航天器自主任务规划方法进行设计, 以实现能够针对小行星绕飞探测过程进行自主任务规划, 根据高级任务目标输出动作指令序列、各分系统动作时间线、以及相应的资源状态时间线等功能。

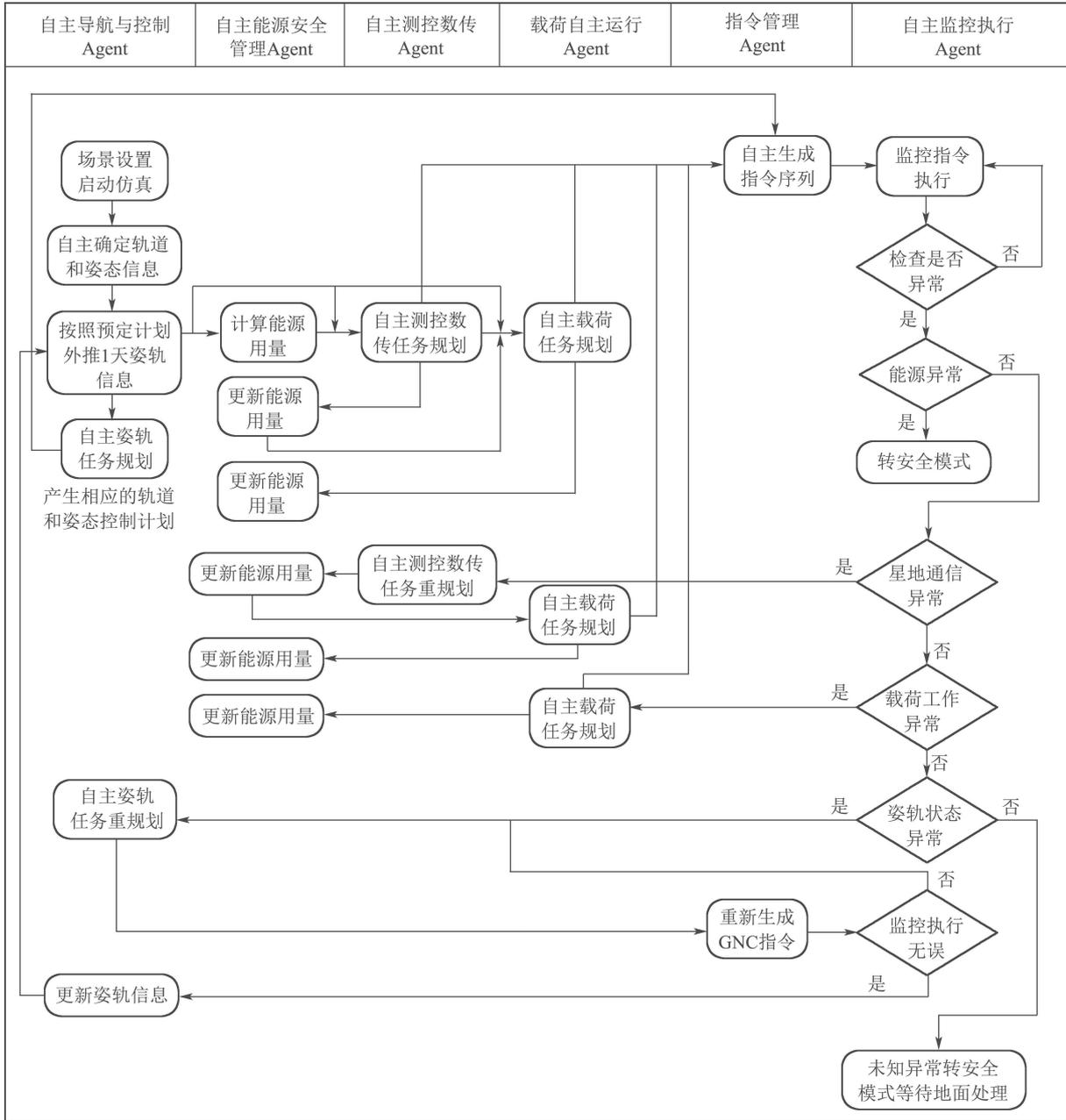


图3 自主任务规划与调度分系统运行流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of operation flow of autonomous management subsystem

3.1 航天器自主任务规划算法设计

自主任务规划算法是实现航天器自主运行的重要组成部分,需要完成从任务需求输入到自主建立观测计划输出的解算工作。

针对小行星探测任务,综合考虑卫星平台能力、载荷工作特点、任务需求、设备状态等因素,提出一种基于状态扩展的自主任务规划算法。在该算法机制下,首先对平台任务进行规划,在确保航天器安全运行的前提下,对载荷任务进行规划,实现探测器资源的高效利用。

3.2 平台任务规划算法设计

针对平台任务规划,采用状态、状态时间线的方

式对探测器的任务及其约束进行描述,则任务的规划可以由时间线内的和时间线间的扩展得到。

1) 时间线内的扩展。

规划的目标为时间线上的状态,而状态属性切换受到约束,即须按照一定的规则进行状态的扩展。时间线的扩展包括两类:前提条件扩展和切换约束扩展,前提条件的扩展为扩展以状态属性使其满足一定的前提条件,如相机拍照前需要处于打开状态,而必要时还需要加入校准状态;而切换约束扩展为两个状态不能够直接过渡,而需要在两者之间插入状态,如相机拍照状态不能立即关闭,而需要有一定的打开状态延续,从而中间需要插入打开的状态。

2) 时间线间的扩展.

为满足时间线间的约束, 还需要进行时间线间的扩展, 扩展的准则是以主动时间线为参考, 在被动时间线插入相应的状态属性.

在利用状态及状态时间线对探测器自主运行与任务规划问题的描述下, 算法根据给定的初始、中止状态和要实现的目标进行扩展, 通过时间线内和时间线间的不断扩展, 直至满足所有约束, 其算法基本流程框架如图4所示.

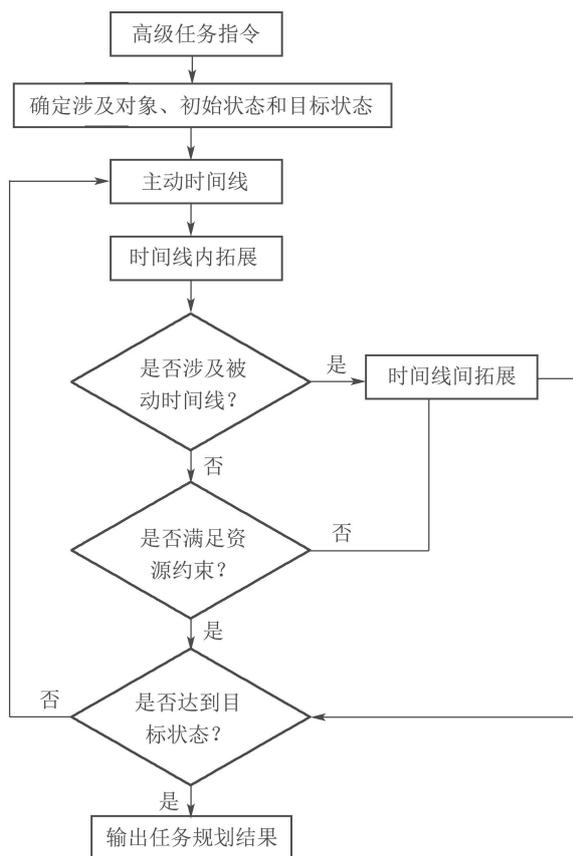


图 4 基于状态扩展的自主任务规划算法基本框架
Fig. 4 The basic framework of autonomous task planning algorithm based on state extension

3) 基于A*的搜索策略. A*算法是一种典型的启发式搜索策略, 本文将之应用于任务规划领域, 如表1所示为A*算法的简要描述.

Best-First策略搜索树, 其基本原理如表2所示. Best-First搜索策略结合了深度优先搜索和广度优先搜索的优点, 它根据一个评价函数, 在目前产生的所有节点中选择具有最小(或最大)评价函数值的结点进行扩展.

在A*算法中使用Best-First搜索策略, 则有定理:

定理 1 如果A*选择的节点是目标节点, 则该节点表示的解是优化解.

证 令 n 是任意扩展到的节点, t 是选中目标节点, 即证 $f(t) = g(t)$ 是优化解代价.

a) 由于A*算法使用Best-First策略, 所以有 $f(t) \leq f(n)$;

b) 由于A*算法使用 $h(n) \leq h^*(n)$ 估计规则, 所以 $f(t) \leq f(n) \leq f^*(n)$;

c) 由于 n 是任意扩展的节点, 故 $f^*(n)$ 中必有一个为优化解的代价, 令其为 $f^*(s)$, 故 $f(t) \leq f^*(s)$;

d) 由于 t 是目标节点, $h(t) = 0$, 因此 $f(t) = g(t) = g(t) + h(t)$ 就是经 t 的解的代价, 又因为 $f^*(s)$ 是优化解代价, 所以 $f(t) \leq f^*(s)$;

综合c)-d), 有 $f(t) = f^*(s)$. 证毕.

表 1 A*算法的基本描述

Table 1 Basic description of the A* algorithm

规定对于任意节点 n
$g(n)$ = 从根节点到 n 的代价(也称为耗散)
$h^*(n)$ = 从 n 到目标节点的优化路径的代价(但这个值是无法知道的)
$f^*(n)$ 为节点的真实代价, 有 $f^*(n) = g(n) + h^*(n)$,
$h(n)$ 为 $h^*(n)$ 的估计值, 且满足 $h(n) \leq h^*(n)$
$f(n)$ 为节点的估计代价, 有 $f(n) = g(n) + h(n) \leq g(n) + h^*(n)$

表 2 Best-First搜索策略的基本原理

Table 2 Basic principle of the Best-First search strategy

- 1) 使用评价函数构造堆 H , 首先构造由根组成的单元素堆;
- 2) if (H 的根 r 是目标节点)
then 解已经找到, 停止;
- 3) 从 H 中删除 r , 把 r 的子节点插入 H ;
- 4) if (H 为空)
then 失败;
- 5) else
goto 2;

因此, 使用Best-First搜索算法, 并用 $f(n)$ 作为评价函数, 当找到的节点是目标节点时, 算法停止, 此时返回的解一定是优化解.

3.3 载荷任务规划算法设计

针对载荷的任务规划问题, 采用遗传算法进行求解. 基于遗传策略的卫星自主任务规划算法流程如图5所示.

步骤 1 对每一个任务按照前述编码方式进行编码, 产生初始种群;

步骤 2 考虑各种约束条件, 对染色体每一位即每一任务进行冲突检查, 没有通过冲突检查的任务则放弃执行, 即令染色体该位的值为0;

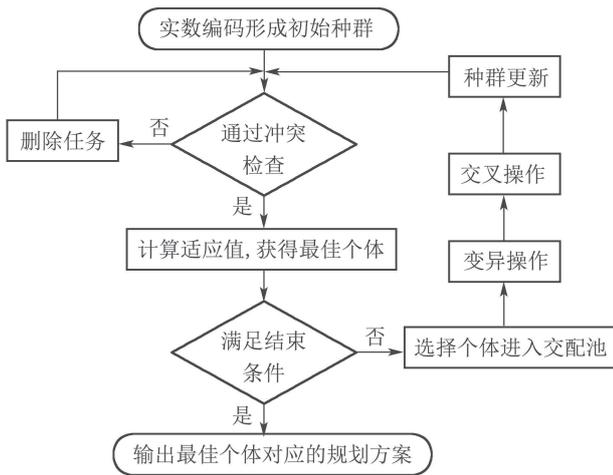


图5 基于遗传策略的自主任务规划算法流程

Fig. 5 Autonomous task planning algorithm flow based on genetic strategy

步骤3 完成检查后计算每一个体的适应值, 获得具有最高适应值的最佳个体;

步骤4 若满足结束条件, 则停止算法, 转步骤5; 否则按选择机制选择个体进入交配池, 完成变异、交叉操作产生新个体, 并进行种群更新得到下一代种群, 转步骤2;

步骤5 算法结束, 获得进化之后的最佳个体, 输出相应的规划方案.

4 仿真系统的实现与验证

基于上述功能分析与结构设计, 利用基于状态扩展的自主任务规划算法进行卫星平台规划, 利用基于遗传策略的自主任务规划算法进行卫星载荷规划, 具体面向小行星探测任务进行自主任务规划仿真实现与验证, 其主要任务需求及功能包括:

1) 小行星探测场景模型建立, 包括规划任务类型选择、探测器及目标轨道六根数输入等; 具备模型场景参数的默认设置、编辑、加载、修改和保存等功能;

2) 针对不同设置场景下进行小行星探测自主任务规划计算, 包括考虑平台及载荷的小行星探测自主任务规划算法, 具备针对不同设置场景的任务规划计算能力;

3) 小行星探测自主任务规划结果可视化显示, 包括载荷、姿轨、数传等任务规划甘特图, 以及存储、燃料等相应资源状态时间线的输出和显示.

如图6所示, 即为面向小行星自主探测任务的仿真系统演示结果示意图.

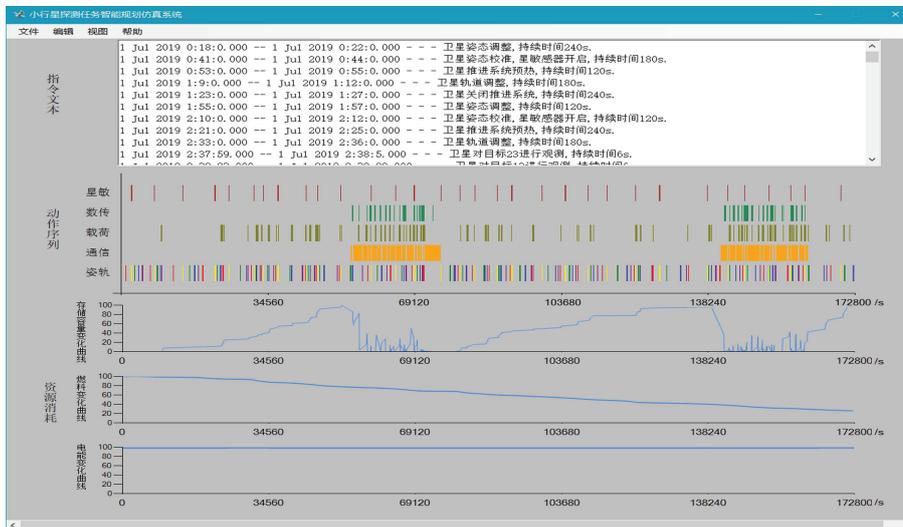


图6 航天器自主运行仿真系统规划结果示意图

Fig. 6 Schematic diagram of planning results of spacecraft autonomous operation simulation system

由图6可知, 仿真系统指令序列文本显示模块以文本形式给出了小行星探测器在规划周期内完整的指令序列, 包括指令起止时间、指令归属主体(分系统或部件)、指令名称等, 并提供了滚动条功能, 可对完整的指令序列进行查看; 指令序列图形化显示模块以图形化形式给出了小行星探测器在规划周期内完整的指令序列, 与指令序列文本显示结果相对应, 采用多条时间线对相关分系统或部件的指令进行图形化演

示, 能够分析各指令间的时间对应关系, 显示指令时间、名称等信息; 状态变化图形化显示模块以图形化形式, 给出了小行星探测器在规划周期内完整的状态变化情况, 包括星上能源变化、光照变化、存储容量变化等, 采用多条时间线对不同的资源进行状态变化描述, 能够标识是否超出许用状态, 并支持对指令序列引起状态变化的分析.

由上述仿真演示结果分析可知, 该仿真系统基本

实现了面向小行星探测任务的自主运行与任务规划过程,在一定程度上验证了航天器自主运行体系结构及自主管理分系统运行流程等设计的可行性和有效性。

与传统航天器控制系统相比,在本文提出的自主运行体系结构与任务规划方法下,主要具有以下几点优势: 1) 能够将传统地面管控系统执行的一些活动(例如任务规划、命令序列化、航天器行为监测、航天器故障诊断和恢复等)放在航天器上来执行,地面操作系统只需向航天器发送高级指令; 2) 一般情况下,数据先经由航天器预处理后再下传至地面,有效加强了任务执行效率; 3) 可以大大减少地面工作人员的劳动量,有效减少对测控通讯网络的需求,从而降低航天任务的成本,并增加任务的可靠性和实时性。

5 结论

本文针对传统航天器运控方式对地面指控依赖较严重、人力成本耗费较大、智能化水平较低等不足,考虑深空探测过程中的远距离通信时延等问题,对面向自主运行的深空探测航天器体系结构设计及自主任务规划方法进行了研究,主要可得到如下结论: 1) 通过对航天器自主运行问题进行系统分析,提出了一种基于多智能体的航天器自主运行的体系结构,面向自主系统结构、运行流程等进行了设计; 2) 重点针对小行星探测任务,提出了一种包含平台和载荷任务管理的两阶段航天器自主任务规划算法设计方案,能够实现平载一体的航天器自主任务管理,根据高级任务目标输出完整的指令序列; 3) 通过自主任务规划仿真,对相关算法和模型的正确性和可行性进行了可视化验证和分析,为航天器自主运行技术研究提供了一种有益的思路和方法。

随着航天事业的不断发展,对深空探测器自主运行技术的需求日益迫切,而空间环境及约束条件的复杂性、动态性等,对深空探测航天器自主运行问题的求解提出了严峻挑战,基于本文提出的深空探测航天器自主运行体系结构,需持续优化航天器自主运行模型及算法,在后续任务实施中需考虑的重点要素主要包括: 1) 优化模型,不断增强模型的表达能力,减小问题求解时的搜索空间; 2) 动态重规划技术,即考虑探测器的故障或其它一些突发情况因素下,探测器具动态重规划能力,在原始规划解的基础上进行一定迭代修复,产生新的规划解,以适应新任务需求。

参考文献:

- [1] XIANG Shang, CHEN Yingguo, LI Guoliang, et al. Review on satellite autonomous and collaborative task scheduling planning. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(2): 21 – 33. (向尚, 陈盈果, 李国梁, 等. 卫星自主与协同任务调度规划综述. *自动化学报*, 2019, 45(2): 21 – 33.)
- [2] WANG Wenping, WANG Xianghui, XU Hao, et al. Design and implementation of autonomous health management system for GF 3 satellite. *Spacecraft Engineering*, 2017, 26(6): 40 – 46. (王文平, 王向晖, 徐浩, 等. 高分三号卫星自主健康管理系统设计及实现. *航天器工程*, 2017, 26(6): 40 – 46.)
- [3] WANG Lianguo, ZHU Yan, ZHOU Changyi, et al. Integrated payload OBDH technology for deep space exploration. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(6): 960 – 970. (王连国, 朱岩, 周昌义, 等. 面向深空探测应用的集成一体化载荷数据管技术. *空间科学学报*, 2018, 38(6): 960 – 970.)
- [4] DAI Shuwu, SUN Huixian. Technical overview of autonomous control and on-board data processing for spacecrafts. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(1): 17 – 22. (代树武, 孙辉先. 航天器自主运行技术的进展. *宇航学报*, 2003, 24(1): 17 – 22.)
- [5] JOHN P E, RAYMOND J S, DAVID W M. High-fidelity simulation for spacecraft autonomy development. *Canadian Aeronautics & Space Journal*, 2002, 48(1): 51 – 59.
- [6] GOLDEN C J. AI applications for space support and satellite autonomy. *The 2nd Symposium on Automation, Robotics and Advanced Computing for the National Space Program*. Arlington, VA, U.S.A.: AIAA, 1987.
- [7] JOHN L A. Space station autonomy requirements. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA83 – 2353)*. Hartford, CT, USA: AIAA, 1983.
- [8] SORENSEN E M, FERRI P. Technology driver—the Rosetta mission. *New Technologies, New Standards (Ref. No. 1998/519), IEE 5th CCS-DS Workshop IET*. UK: IET Digital Library, 1998.
- [9] JIANG Yi. *Scheme design and simulation studies on command and data handling system of deep-space explorer*. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (姜毅. 深空探测器星务管理系统方案设计与仿真研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.)
- [10] LI Yuqing, FENG Xiao'en, ZHANG Chao, et al. A ground-onboard joint operation mechanism for the autonomous mission planning of imaging satellite cluster. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(4): 56 – 61. (李玉庆, 冯小恩, 张超, 等. 面向星群观测任务自主规划的星地联合运行方法. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(4): 56 – 61.)
- [11] GAO Li. *Research on earth observation task cooperation for distributed satellites system*. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (高黎. 对地观测分布式卫星系统任务协作问题研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.)
- [12] LI Zhibin. Current situation and prospective of intelligent autonomous control for spacecrafts. *Aerospace Control*, 2002, 20(4): 1 – 7. (李智斌. 航天器智能自主技术发展现状与展望. *航天控制*, 2002, 20(4): 1 – 7.)
- [13] LIAO Huixi, WANG Tong, JIA Xiaoyu. Analysis on the progress and technical characteristics of asteroid exploration. *Space International*, 2017, 7: 2 – 9. (廖慧兮, 王彤, 贾晓宇. 小行星探测进展及技术特点分析. *国际太空*, 2017, 7: 2 – 9.)

作者简介:

冯小恩 博士研究生, 目前研究方向为航天器智能任务规划与决策方法, E-mail: fengxiaoen0923@163.com;

李玉庆 博士, 副教授, 目前研究方向为航天器智能自主控制、规划与调度等, E-mail: bradley@hit.edu.cn;

杨晨 目前研究方向为系统工程, E-mail: shane_en@163.com;

何熊文 研究员, 目前研究方向为空间数据系统、星载综合电子系统, E-mail: hexw501@hotmail.com;

徐勇 博士, 高级工程师, 目前研究方向为航天器电子信息系统、航天器自主运行、深空探测图像编码技术, E-mail: andrexu@163.com;

朱立颖 博士, 高级工程师, 目前研究方向为航天器电总体设计, E-mail: 350909269@qq.com.