

文章编号: 1674-8190(2023)03-084-16

基于MBSE的月球科研站任务分析

关锋^{1,2}, 葛平^{1,2}, 邵艳利^{1,2}, 袁文强³, 徐帅⁴, 康焱^{1,2}, 裴照宇^{1,2}

(1. 深空探测实验室 系统院, 北京 100194)

(2. 探月与航天工程中心 综合处, 北京 100190)

(3. 杭州电子科技大学 计算机学院, 杭州 310018)

(4. 杭州华望系统科技有限公司 实施部, 杭州 311100)

摘要: 月球探测完成“绕落回”三步走后, 从单点短期探测向建设月面基础设施的月球科研站长期探测转变, 给月球探测任务的规划论证、总体设计、系统研制和在轨探测等提出了更高要求。采用基于模型的系统工程(MBSE)思想, 提出基于模型的月球科研站系统分析正向流程, 以系统模型为载体深入剖析任务总体、任务使命需求和任务应用场景。通过开展基于模型的月球科研站任务分析, 初步实现了月球科研站任务分析过程正向化、设计要素定义全量化、设计要素之间的关联表达显性化、月球科研站工程总体单位下发的研制要求有源化。

关键词: 基于模型的系统工程; SysML; 月球科研站; 任务分析

中图分类号: V476.3; V323

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.03.09

Mission analysis of lunar scientific research station based on MBSE

GUAN Feng^{1,2}, GE Ping^{1,2}, SHAO Yanli^{1,2}, YUAN Wenqiang³, XU Shuai⁴,

KANG Yan^{1,2}, PEI Zhaoyu^{1,2}

(1. System Institute, Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100194, China)

(2. General Department, Lunar and Space Engineering Center, Beijing 100190, China)

(3. College of Computer, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(4. Implementation Department, Hope System Technology, Hangzhou 311100, China)

Abstract: After the completion of the three steps of "circling back", the lunar exploration has changed from the short-term single point exploration to the long-term exploration of lunar scientific research stations with the construction of lunar surface infrastructure, the higher requirements for the planning and demonstration, overall design, system development and in-orbit exploration of lunar exploration missions are put forward. The thought of model based system engineering (MBSE) is adopted, a model-based forward process for the system analysis of the lunar scientific research station proposal is proposed, and the system model is taken as a carrier to analyze the mission overall, mission requirements and task application scenario. By carrying out the model-based mission analysis of the lunar scientific research station, the process of the mission of the lunar scientific research station has been preliminarily realized.

Key words: model based system engineering; SysML; lunar scientific research station; mission analysis

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2023-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(SQ2019YFE20137); 民用航天技术预研项目(D020101); 国防基础科研计划(JCKY2020903B001)
浙江省自然科学基金(LY21F020016)

通信作者: 裴照宇, peizy_137@163.com

引用格式: 关锋, 葛平, 邵艳利, 等. 基于MBSE的月球科研站任务分析[J]. 航空工程进展, 2023, 14(3): 84-99.

GUAN Feng, GE Ping, SHAO Yanli, et al. Mission analysis of lunar scientific research station based on MBSE[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3): 84-99. (in Chinese)

0 引言

2021年,中国天问一号、美国毅力号火星车、阿联酋希望号等火星探测器陆续发射成功,标志着以月球、火星为代表的深空探测已成为人类未来相当长时间内的热门研究领域,也是各国在高科技领域的博弈战场^[1]。加强各类探测器顶层设计、强化系统工程思想、缩短产品研制周期已成为当前面临的重要挑战,鉴于此,采用系统工程思维和数字化技术积极开展月球探索成为我国深空探测领域重要的指导思想和探测器研制技术路线^[2],我国探测器由传统的研制模式朝着数字化和智能化转变。

国外在此领域近年来陆续有少量的偏前沿探索工作,主要聚焦在数字孪生技术与深空探测领域的结合。J. T. Grundmanna等^[3]针对探测器超高速撞击场景阐述了其挑战和数字化技术研制路线;A. G. Garriga等^[4]针对飞行器的供配电系统架构设计提出了一个模型框架,考虑供电、配电、耗电等关键环节通过借助于系统建模语言(System Modeling Language,简称SysML)模型快速评估方案;L. Petnga等^[5]引入了本体框架,通过构建知识模型使能探测器设计过程和决策过程。这些工作核心都采用了基于模型的系统工程(MBSE)理念和数字孪生思想,通过在设计阶段创建数字孪生的SysML系统模型支持探测器设计与决策过程。然而,其针对的应用领域不是月球科研探测领域,同时,其作用的阶段偏重于探测器设计阶段,而非任务分析阶段。

伴随着我国以嫦娥系列为代表的深空探测工程持续开展,数字化技术得到快速发展并且在该工程研制中逐步应用,如近年来已将MBSE应用于航天器的总体设计^[6-9]、MBSE在载人航天工程研制中初步探索^[10]、结合敏捷系统工程思想融合MBSE和小卫星研制^[11]、基于模型的数字孪生技术^[12]、航天器模型成熟度评估技术^[13]等,并且我国深空探测全局负责单位早期已经初步论证了MBSE技术与深空探测任务^[14],深入剖析了其发展趋势^[15]。然而,当前这些基于工程型号形成的研究工作主要聚焦于单个探测器、单个任务,且强调的是设计与权衡过程。针对月球科研站这样一个全

新的对象,迫切需要研究新一代基于模型的数字化模式与方法,用于提升研制效率与效益。

本文以月球科研站工程研制任务为研究对象,以MBSE思想作为方法指导,采用遵循SysML^[16]的模型作为载体,聚焦于任务分析阶段提出完整的任务分析流程,主要包括三个阶段:基于模型的月球科研站任务总体分析、任务使命需求分析、任务应用场景分析,针对每个环节详细论述其建模步骤、建模方法、建模目的和模型解释,自上而下、渐进式剖析基于模型的月球科研站任务的具体内涵;采用统一规范的MBSE模型详细表征月球科研站的设计要素,并构建模型要素之间的显性关联。

1 基于模型的月球科研站任务分析流程

月球科研站研制属于体系层级,站在工程全局负责单位的角度,月球科研站研制过程任务分析阶段顶层输入为顶层使命,决定了待研制的月球科研站体系的服务对象、目标、核心应用场景、架构等要素信息,其输出为一套成熟可用的任务分析流程和向各系统单位下发的研制总要求。

本文提出的基于模型的月球科研站任务分析流程如图1所示,流程中清晰定义了具体工作环节和内容。

1) 基于模型的月球科研站任务总体分析。站在任务总体的角度开展体系服务定义、体系目标定义、体系场景分析、体系能力架构分析、体系初步逻辑架构分析、体系核心指标分析、体系约束分析、任务总体使命定义。

2) 基于模型的月球科研站任务使命需求分析。围绕任务使命需要开展分析,涵盖生命周期深度分析、利益相关方广度分析、系统上下文分析、利益相关方需要分析和体系使命分析。

3) 基于模型的月球科研站任务应用场景分析。从业务需求中提炼出应用场景,涵盖业务场景分析、系统功能架构分析、关键性能参数分析和功能需求分析,需求模型向下游各系统单位下发研制要求,并以接口模型作为载体定义各系统接口。

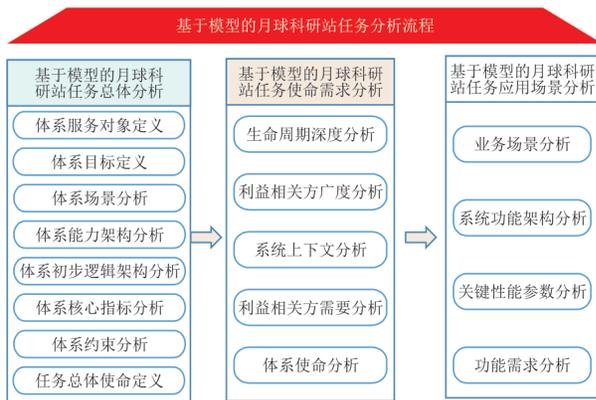


图 1 基于模型的月球科研站任务分析流程

Fig. 1 Mission analysis flowchart of model-based lunar research station

2 基于模型的月球科研站任务总体分析

2.1 体系服务对象定义

不同于传统的系统工程设计方法,设计者在基于 MBSE 进行月球科研站任务分析时对于体系服务对象的定义方式也有所不同。在任务设计的最初阶段,明确设计服务的目标对象及该对象的核心诉求,为整个设计流程定下主要纲领,确保后续设计不会产生偏移,也便于将后续产生的目标、使命、需求等内容进行分类。本文针对月球科研站建立过程,分析工程任务,将体系服务对象归纳为一个中心(探月中心)、四个团队(科学团队、工程团队、经济团队、国际合作团队)的核心参与者。采用 SysML 语言中的模块定义图创建体系服务对象结构图如图 2 所示。

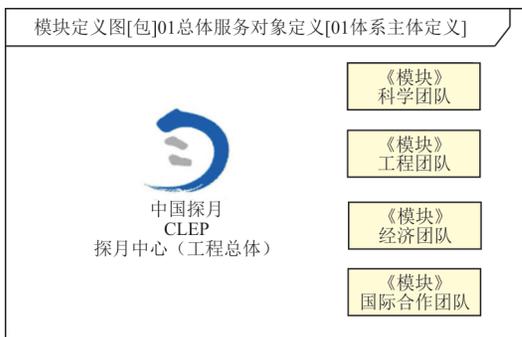


图 2 体系服务对象模块定义图

Fig. 2 Block definition diagram of architecture service object

2.2 体系目标定义

基于定义的体系服务对象模型,首先调研主要体系任务参与者,然后获取各方想要通过月球

科研站建设任务达成的目标。从正向设计的分析角度以体系服务对象的愿景为主体,完成从人员到系统的创建过程,解决月球科研站“是什么,要达成什么样的目标”这一问题。月球科研站设计目标需求图如图 3 所示。

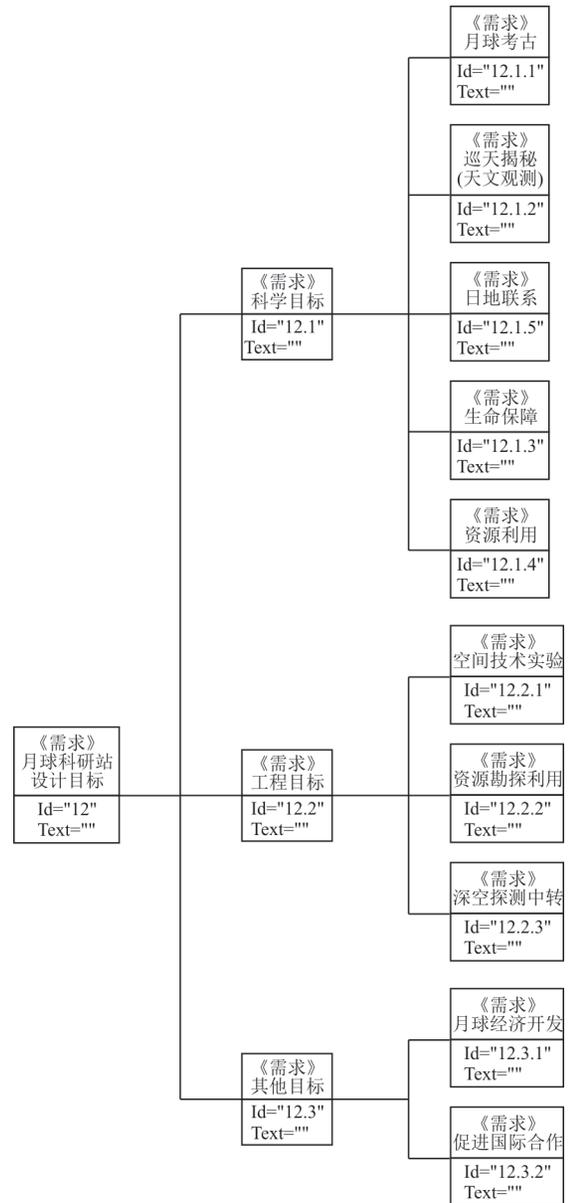


图 3 月球科研站设计目标需求图

Fig. 3 Design goal requirement diagram of lunar research station

需求模型中将月球科研站的总体需求分为科学目标、工程目标以及其他目标,然后将这些目标进行细化分解产生更加具体的需求。实例中的需求来自月球科研站某项目的相关内容,通过需求表实现需求的条目化表达,月球科研站设计目标需求如图 4 所示。需求表的表达形式层次化更加

分明,有利于设计者及时查找和设计。

| 序号 | 名称 |
|--------|----------------|
| ☐ 12 | 《R》月球科研站设计目标 |
| ☐ 12.1 | 《R》科学目标 |
| 12.1.1 | 《R》月球考古 |
| 12.1.2 | 《R》巡天揭秘 (天文观测) |
| 12.1.3 | 《R》生命保障 |
| 12.1.4 | 《R》资源利用 |
| 12.1.5 | 《R》日地联系 |
| ☐ 12.2 | 《R》工程目标 |
| 12.2.1 | 《R》空间技术实验 |
| 12.2.2 | 《R》资源勘探利用 |
| 12.2.3 | 《R》深空探测中转 |
| ☐ 12.3 | 《R》其他目标 |
| 12.3.1 | 《R》月球经济开发 |
| 12.3.2 | 《R》促进国际合作 |
| 12.3.3 | 《R》长期稳定运行运行 |

图 4 月球科研站设计目标需求
Fig. 4 Design goal requirement of lunar research station

2.3 体系场景分析

标准建模语言 SysML 中的用例图可以从面向对象的角度完成文本化设计目标到系统用例场景的转换。用例场景描述的是系统的交互动作,对多种场景进行综合将设计目标进行承载,形成预期的使用场景,将抽象的功能性目标转化为相对具体的行为,便于进行后续的分解,形成结构性或流程性元素,实现进一步的设计。

利用 SysML 用例图的上述特性,针对月球科研站的功能性设计需求采用用例图定义月球科研站总体场景,如图 5 所示。

对月球科研站的科学目标、工程目标以及其他目标 3 大需求进行分析,并且派生出更加具体的任务场景,任务与子任务之间使用 include 关系表示顶层任务的分解过程。例如,实现“科学目标”需求时,除需考虑基本的资源利用、生命保障用例之外,还需考虑月球考古、巡天揭秘等用例过程。对产生的用例进行细化迭代形成子用例,例如,对

月球考古用例迭代处理产生了深部物质探测、月球重大地质事件时空分布、水和挥发份在月球演化历程中的作用。

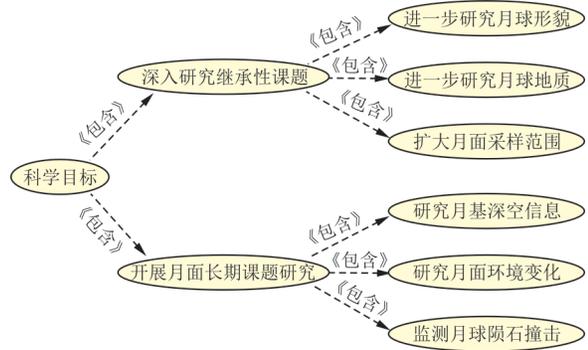


图 5 月球科研站总体场景定义
Fig. 5 Overall scenario definition of lunar research station

2.4 体系能力架构分析

在明确任务场景后,应对其进一步分析,明确体系为实现这些场景的运行需要具备什么样的能力。以体系场景作为输入,采用 SysML 的模块定义图表征体系初步逻辑架构,如图 6 所示。体系分为地月往返运输系统、科研设施系统、月面运输与操作系统、月面长期工作支持系统,均使用模块元素表示,月球科研站大系统与各个系统之间使用 Directed Composition 关系表示体系逻辑架构的分解。

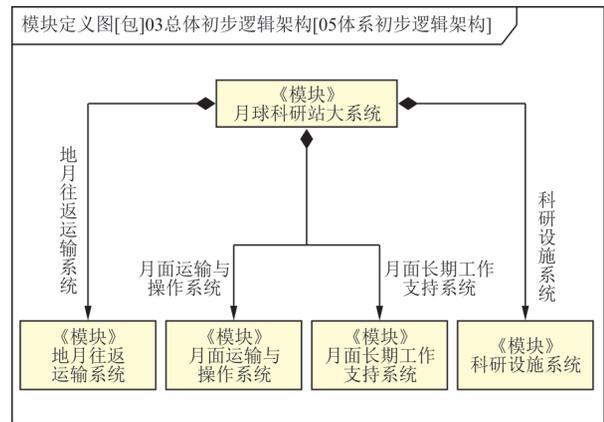


图 6 体系初步逻辑架构
Fig. 6 Early logical architecture

根据构建的体系模块重新梳理体系能力,依据类型及实现方式重新聚类并分配给对应系统形成初步的体系架构,体系能力梳理如图 7 所示,用例模型放置在所属的系统模块中。



图 7 体系能力梳理

Fig. 7 Analysis of architecture capability

2.5 体系核心指标分析

针对体系及系统模块在任务总体分析阶段对其部分指标提出要求,其内容主要来源于体系目标实现所需要的效果及体系能力中提取出的指标要求。通过分析体系目标,明确达成目标需要的指标,在总体核心指标采用 SysML 中的约束模块 (Constraint Block) 对总体核心指标进行建模,如图 8 所示,包含初次发射时间、建设时间、总成本、单

次无故障时长。

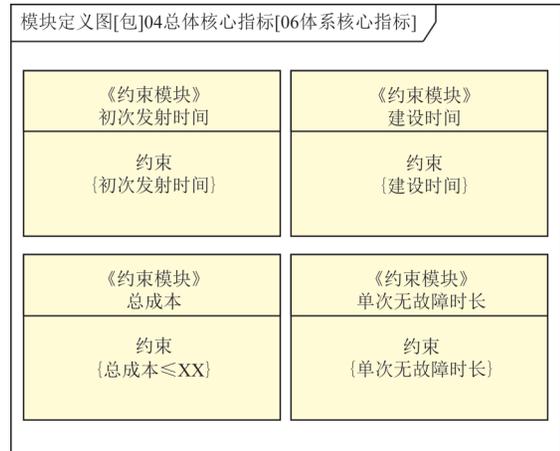


图 8 总体核心指标

Fig. 8 Overall key indicator

2.6 体系约束分析

体系设计完成后,需要考虑“能不能实现”的问题。为此,需要研究客观存在的约束情况,包括但不限于国内外的规则、约定,当前科技发展影响的工程实施能力以及难以在短时间之内变化的固定资源影响,对其分析可以明确设计依据。

2.6.1 能力限制分析

在任务实现过程中,需要受限于实际工程实现能力,明确现有能力能否支持任务实现以及任务执行时预期具备的能力能否支持。工程能力示例(备选火箭型号)如图 9 所示,使用模块元素表示当前工程实际能力。

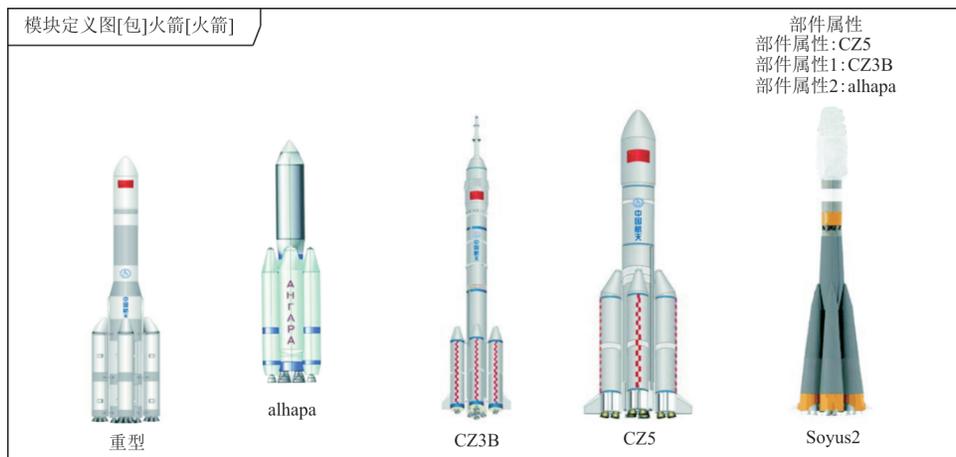


图 9 工程能力示例(备选火箭型号)

Fig. 9 Example of engineering capability (candidate rocket)

2.6.2 资源限制分析

为实现部分任务设计中的阶段,需要利用现

有的固定资源,因其相对难以调整,需要提前进行统筹和规划,确保其可以满足任务需要,可利用资

源通过模块定义图创建,如图 10 所示,使用模块表 示现有的固定资源。



图 10 可利用资源示例(现有发射场)

Fig. 10 Example of workable resource (launching site)

2.7 任务总体使命定义

结合系统总体设计,对内容进行收敛和整理,逐个梳理模型元素、提取对应内容、形成需求元素、构建需求追溯关系。月球科研站任务总体使

命定义如图 11 所示。任务使命定义是将前期系统总体设计阶段的内容进行总结,形成需求元素描述清晰、关联准确、任务总体使命覆盖所有的设计结果,为后续设计提供支持。

| # | 序号 | 名称 | 内容 |
|----|-------|----------------|---|
| 1 | □ 7 | □ 月球科研站任务使命 | |
| 2 | 7.1 | □ 科学使命 | 月球科研站需要成为解决月球关键问题、实现重大原创性科学发现的有力工具 |
| 3 | 7.2 | □ 工程使命 | 月球科研站需要成为带动航天技术跨越式提升、推动多学科融合创新发展的重要引擎 |
| 4 | □ 7.3 | □ 经济使命 | 月球科研站需要成为开发利用月球资源、发展地月经济圈的重要平台 |
| 7 | □ 7.4 | □ 政治使命 | 月球科研站需要成为聚集全球优势科学资源、构建新型太空治理体系的重要支撑 |
| 9 | □ 8 | □ 月球科研站任务阶段... | 月球科研站任务划分为勘探阶段、建设阶段及应用阶段 |
| 10 | 8.1 | □ 勘探阶段任务划分 | 勘探阶段预期包含嫦娥四号、Luna-25、嫦娥六号、Luna-26、嫦娥七号、Luna27任务 |
| 11 | 8.2 | □ 建设阶段任务划分 | 建设阶段预期包含嫦娥八号、Luna-28、ILRS-1、ILRS-2、ILRS-3、ILRS-4、ILRS-5任务 |
| 12 | 8.3 | □ 应用阶段任务划分 | 应用阶段预期包含代号为ILRS-X的多次任务用以扩展维护模块 |
| 13 | 10 | □ 月球科研站总体架构 | 月球科研站包含地月运输往返系统、月面长期工作支持系统、月面运输与操作系统、科研设施系统这四个主要系统 |
| 14 | 13 | □ 月球科研站约束 | |

图 11 月球科研站任务总体使命定义

Fig. 11 Overall mission definition of lunar research station

3 基于模型的月球科研站任务使命需求分析

对于月球科研站的复杂设计而言,仅存在体系服务对象提出的总体任务核心使命无法支撑后续的设计内容,需要由任务涉及的其他利益相关方予以补充,捕获更加完善的需求和约束,形成以

总体任务为核心、使命为支撑、生命周期场景为框架、利益相关方为网格、诉求为填充的任务使命边界。解决月球科研站“是什么,能够完成什么任务”的问题。

3.1 生命周期深度分析

为完善任务边界定义,需要确保实现利益相

关方的全量分析,挖掘生命周期深度。生命周期深度分析如图 12 所示,模型从时间维度入手,基于体系使命分析过程,创建月球科研站的研制阶段、使用阶段以及退役阶段;在分析用例的基础上对每个阶段进行适当分解,便于明确后续设计各阶段中的主要任务,研制阶段用例分解如图 13 所示。

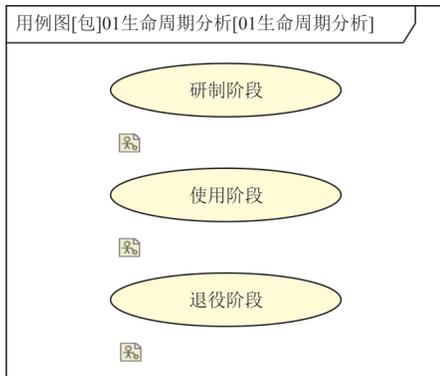


图 12 生命周期深度分析
Fig. 12 Deep analysis of life cycle

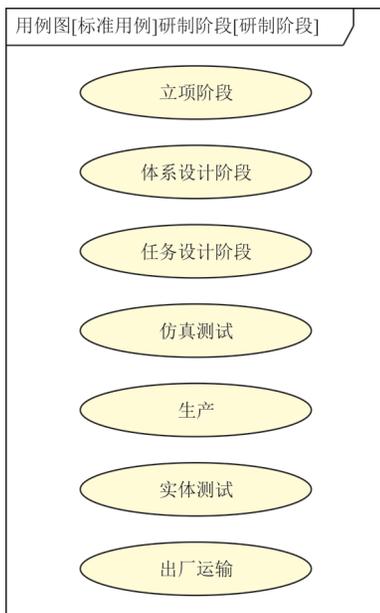


图 13 研制阶段用例分解
Fig. 13 Use case decomposition at research stage

研制阶段用例根据需要分解为立项阶段、体系设计阶段、任务设计阶段、仿真测试、生产、实体测试、出厂运输 8 个子用例。使用阶段用例分析如图 14 所示,根据需要分解为发射准备、发射、入轨、变轨、绕月、落月、月面操作 7 个子用例。

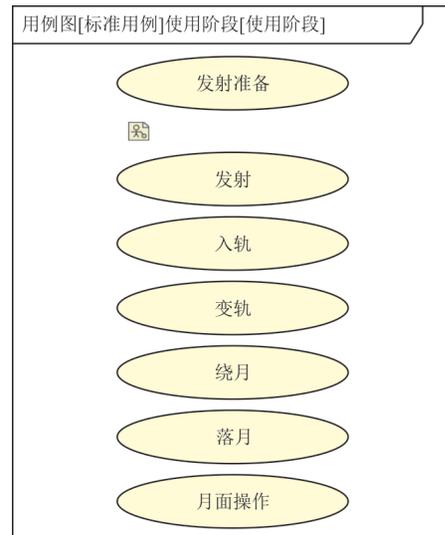


图 14 使用阶段用例分解
Fig. 14 Use case decomposition at operational stage

3.2 利益相关方广度分析

生命周期阶段分析复杂多变,为防止出现遗漏,在进行时间维度的任务阶段分析之后,还需要在逻辑层面进行广度的分析,利益相关方梳理示例如图 15 所示。

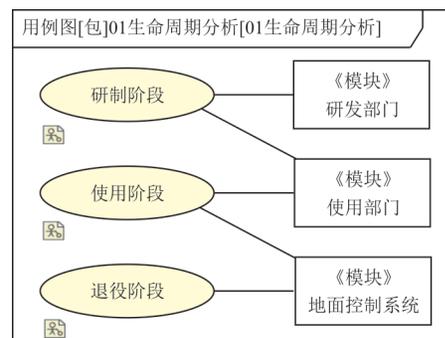


图 15 利益相关方梳理示例
Fig. 15 Example of stakeholder analysis

研制阶段的利益相关方包括研发部门和使用部门,使用阶段的利益相关方包括使用部门以及地面控制系统,退役阶段的利益相关方包括使用部门和地面控制系统。

3.3 运行环境分析

系统运行环境使用模块定义图表示,如图 16 所示。模型分析包括:任务背景分析、任务组织体及大系统模块(SOI),任务背景包含任务组织体,

任务组织体包含大系统模块。梳理经过裁减的利益相关方,分析其是否与业务场景直接相关,将不参与业务执行的业务场景归类到任务背景,其余

部分归类到任务组织体,在模型中构建关联关系。系统运行环境具体分析使用内部模块图表示,如图 17 所示。

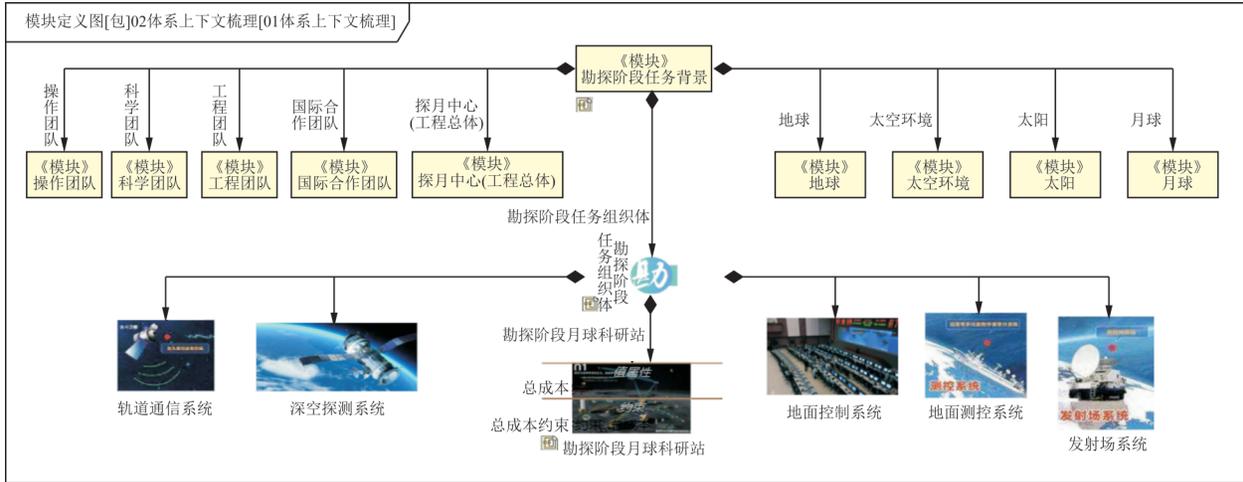


图 16 系统运行环境

Fig. 16 System operational environment

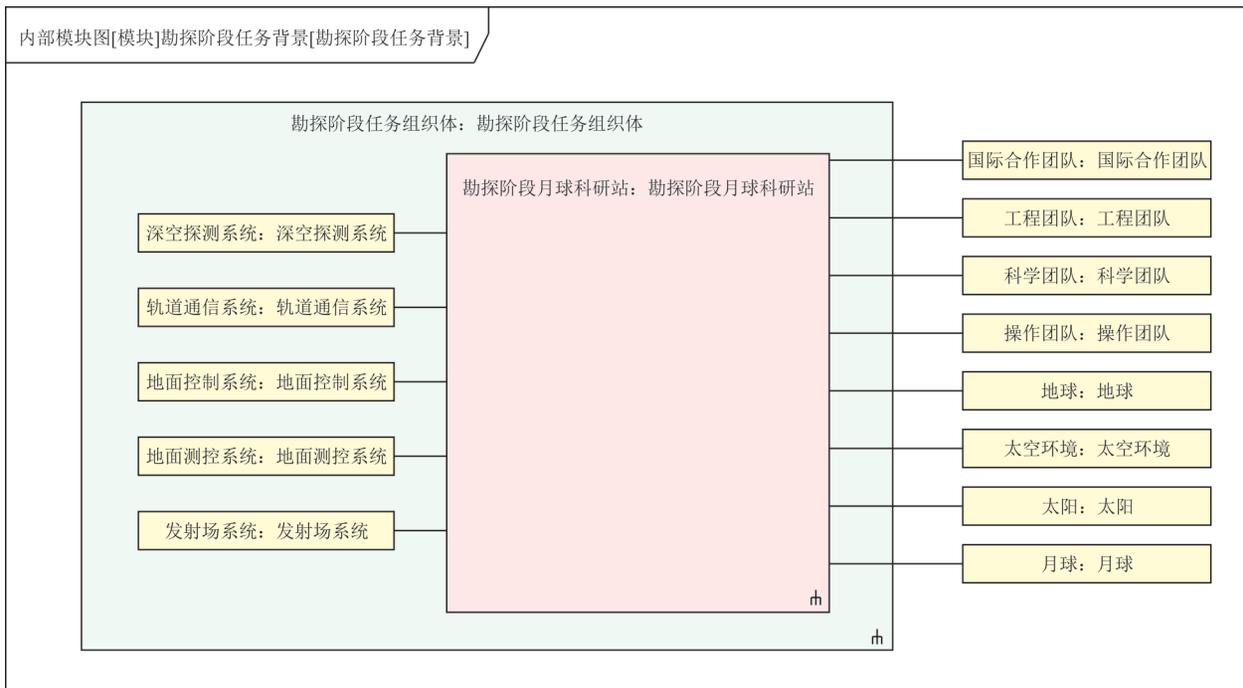


图 17 系统上下文体具体析示例

Fig. 17 Example of system context analysis

在明确与任务设计紧密相关的利益相关方之后,应逐个从利益相关方的视角描述对任务的诉求,即想要通过这个任务达到什么目的,这就是系统的边界,通过这个边界的定义,可以初步形成系统的整体概念。通过调研对应单位,分析并了解该利益相关方对系统黑盒的诉求;创建用例图,利用用例元素的承载诉求,通过关联连接诉求及利

益相关方;务必完成系统上下文中的利益相关方的全部覆盖,针对各利益相关方分析相对完整,可覆盖预期的业务场景;以体系服务对象为利益相关者,抽象出的体系场景为依据描述利益相关者的具体诉求。利益相关方诉求如图 18 所示,模型中对每个列举出的体系场景都提出了具体的诉求内容。

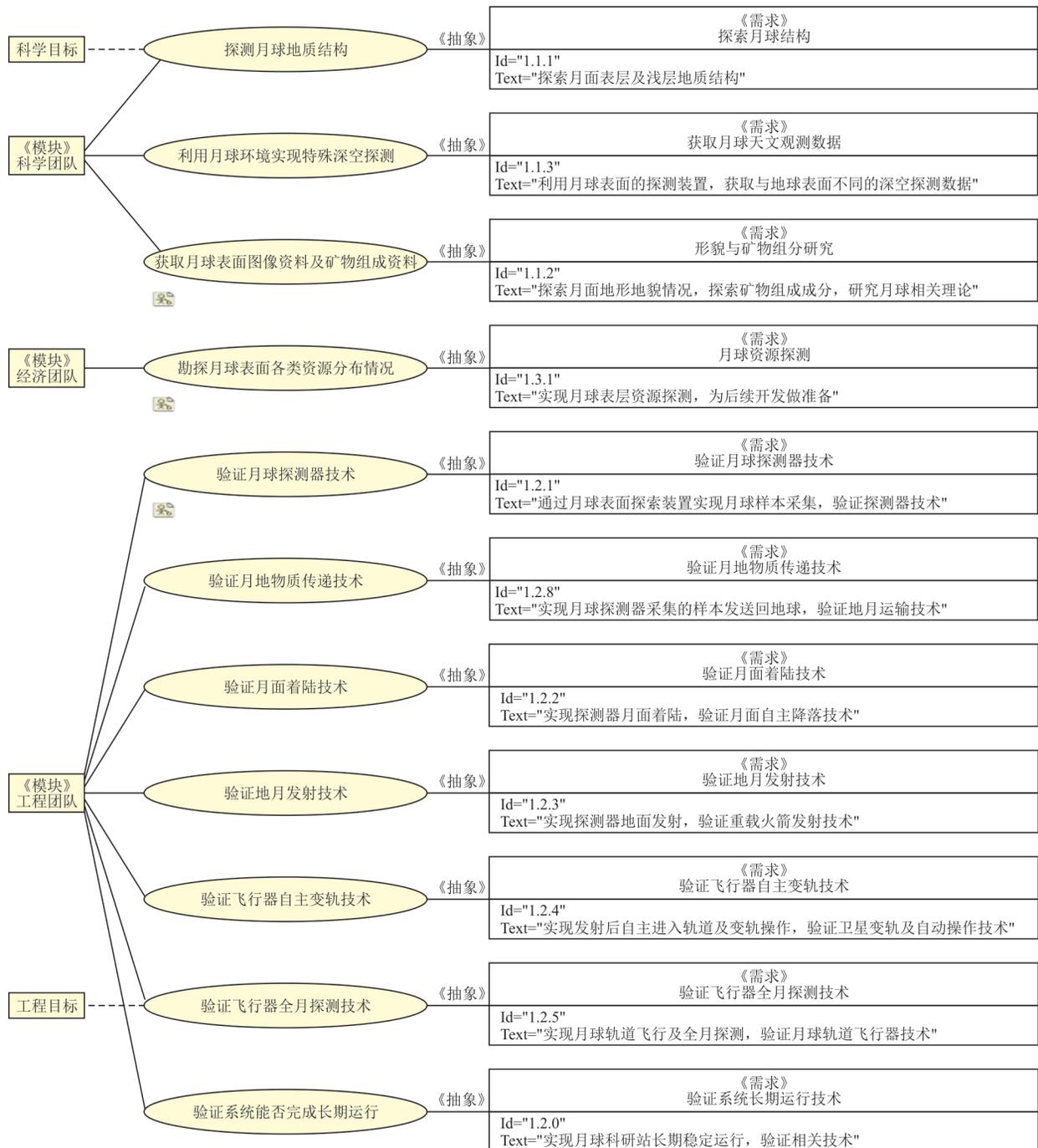


图 18 利益相关方诉求
Fig. 18 Stakeholder needs

3.4 体系使命分析

基于各利益相关方的诉求分析之后, 需要进行整体的梳理与分析, 形成体系使命, 作为后续设计的输入, 产生一个需求基线。体系使命主要偏重定性的要求, 定性到定量的过程将在后续完成, 此部分主要作为设计的输入即最终要达到的效果。体系使命追溯关系如图 19 所示, 使用需求模

型用于承载体系使命。模型中根据勘测阶段的使命体系形成初步任务场景概念; 派生出月球科研站任务划分、月球科研站总体架构、月球科研站任务使命; 针对形成的体系使命需求进行评审, 由于其作为后续设计的依据, 需求的修改会影响很多内容, 综合考虑其必要性, 最终形成科学使命、技术使命、经济使命、政治使命以及设计约束 5 大使命需求。

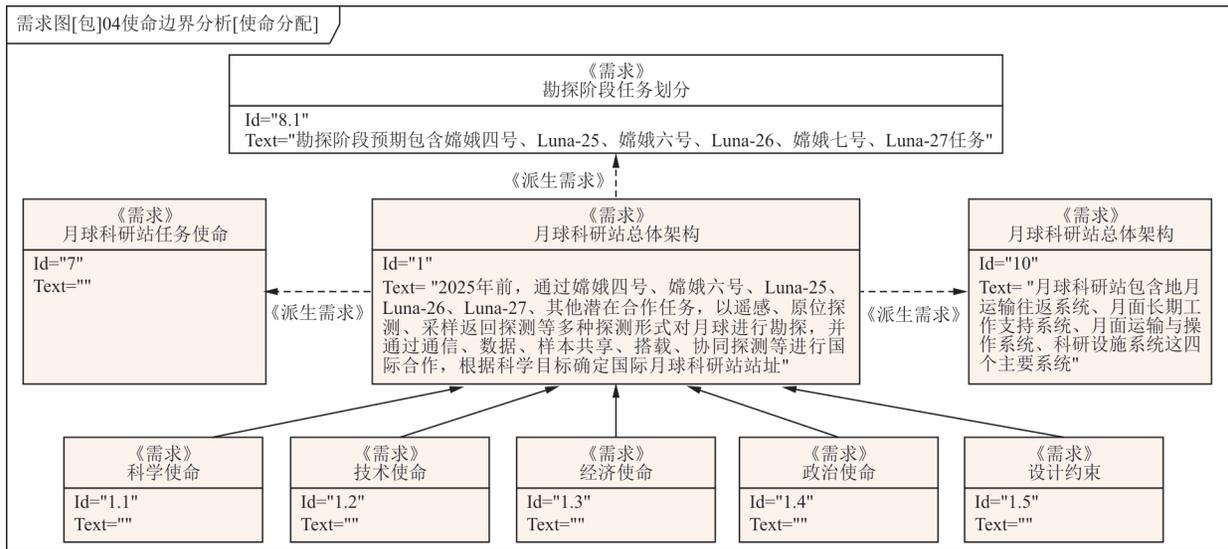


图 19 体系使命追溯关系

Fig. 19 Trace relationship of architecture mission

梳理利益相关方诉求,按照需求元素规范进行条目化,确保符合需求元素的相关标准,可以作为后续设计依据;对利益相关方诉求进行权衡分析,针对矛盾或难以达到的目标进行调整与权衡,

形成具有可执行性的体系使命;基于需求类型进行分类,确定任务的功能性需求和性能性需求,对相关内容进行初步聚类,完成体系使命需求,体系使命条目化需求如图 20 所示。

| # | 序号 | 名称 | 内容 |
|----|---------|----------------|--|
| 1 | □ 1 | ☑ 体系使命 | 2025年前,通过嫦娥四号、嫦娥六号、Luna-25、Luna-26、Luna-27、其他潜在合作任务,以遥感、原位探测、采样返回探测等多种探测形式对月球进行勘探,并通过通信、数据、样本共享、搭载、协同探测等进行国际合作,根据科学目标确定国际月球科研站站址 |
| 2 | □ 1.1 | ☑ 科学使命 | |
| 3 | 1.1.1 | ☑ 探索月球结构 | 探索月面表层及浅层地质结构 |
| 4 | □ 1.1.2 | ☑ 形貌与矿物组分研究 | 探索月面地形地貌情况,探索矿物组成成分,研究月球相关理论 |
| 5 | 1.1.2.1 | ☑ 获取月球表面形貌数据 | 获取月球表面地形地貌影像资料 |
| 6 | 1.1.2.2 | ☑ 获取月壤特性及成分... | 获取月球表面月壤特性及成分资料 |
| 7 | 1.1.3 | ☑ 获取月球天文观测数据 | 利用月球表面的探测装置,获取与地球表面不同的深空探测数据 |
| 8 | □ 1.2 | ☑ 技术使命 | |
| 9 | □ 1.2.1 | ☑ 验证月球探测器技术 | 通过月球表面探索装置实现月球样本采集,验证探测器技术 |
| 14 | 1.2.2 | ☑ 验证月面着陆技术 | 实现探测器月面着陆,验证月面自主降落技术 |
| 15 | 1.2.3 | ☑ 验证地月发射技术 | 实现探测器地面发射,验证重载火箭发射技术 |
| 16 | 1.2.4 | ☑ 验证飞行器自主变轨... | 实现发射后自主进入轨道及变轨操作,验证卫星变轨及自动操作技术 |
| 17 | 1.2.5 | ☑ 验证飞行器全月探测... | 实现月球轨道飞行及全月探测,验证月球轨道飞行器技术 |
| 18 | 1.2.6 | ☑ 验证数据传输技术 | 实现地面接收月球探测器发送的数据,验证数据传输技术 |
| 19 | 1.2.7 | ☑ 验证遥控技术 | 实现地面到月球探测器的指令发送,验证信号发送及中继技术 |
| 20 | 1.2.8 | ☑ 验证月地物质传递技术 | 实现月球探测器采集的样本发送回地球,验证地月运输技术 |
| 21 | 1.2.9 | ☑ 验证系统长期运行技术 | 实现月球科研站长期稳定运行,验证相关技术 |
| 22 | □ 1.3 | ☑ 经济使命 | |
| 25 | □ 1.4 | ☑ 政治使命 | |
| 30 | □ 1.5 | ☑ 设计约束 | |

图 20 体系使命条目化需求

Fig. 20 Itemized requirements of architecture mission

4 基于模型的月球科研站任务应用场景分析

为解决“怎么用”的问题,设计人员需要对月球科研站的应用场景进行分析与设计,明确系统运行中可能出现的场景、确认实现场景运行需要系统具备的能力以及相对应的系统可执行功能,以达到覆盖任务边界中的功能性需求的目的。

4.1 业务场景分析

以体系使命为依据开展业务场景分析,首先分析任务边界,整理业务场景需求内容,如图 21 所示。构建场景用例,结合功能性需求构建月球结构探测、样本发送、地形地貌成像、数据传输发送、月壤特性及结构分析、地面控制、月基天文观测、地月发射的场景用例。

| | | | |
|----|-----|-------------|--|
| 1 | ☐ 4 | ☑ 业务场景需求 | 完成任务过程中体系涉及的任务场景 |
| 2 | 4.1 | ☑ 月球结构探索 | 通过月球探测车在遥控下或自动探索月球结构,并将所得数据发送回地球,或通过月球轨道卫星进行遥感 |
| 3 | 4.2 | ☑ 月球表面形貌成像 | 通过月球探测装置或月轨卫星进行月球表面地形地貌的成像并将其发送回地球 |
| 4 | 4.3 | ☑ 月壤特性及成分研究 | 通过月球探测装置进行月壤的采集和分析,包括浅层月壤及深层低温月壤,或将采集到的样本通过月地中转轨道发送回地球 |
| 5 | 4.4 | ☑ 月基天文观测 | 利用月球探测装置在月面进行天文观测 |
| 6 | 4.5 | ☑ 地面遥控 | 操作人员在地面控制中心通过发送的信号遥控月球科研站工作 |
| 7 | 4.6 | ☑ 地面物质投送 | 地球通过火箭发射、卫星变轨等方式向月球科研站发送物质 |
| 8 | 4.7 | ☑ 月球科研站数据发送 | 月球科研站通过信号向地球发送月球科研所得数据 |
| 9 | 4.8 | ☑ 月球科研站样本发送 | 月球科研站将月球表面的物质样本发送回地球 |
| 10 | 4.9 | ☑ 长期运行能力 | 系统需要具备长期运行能力 |

图 21 业务场景需求

Fig. 21 Requirement of business scenario

利用 SysML 语言中的精华关系覆盖所有功能性需求,进一步明确研究对象与外部系统的交互,

顶层任务场景与使命需求之间的关系,如图 22 所示。

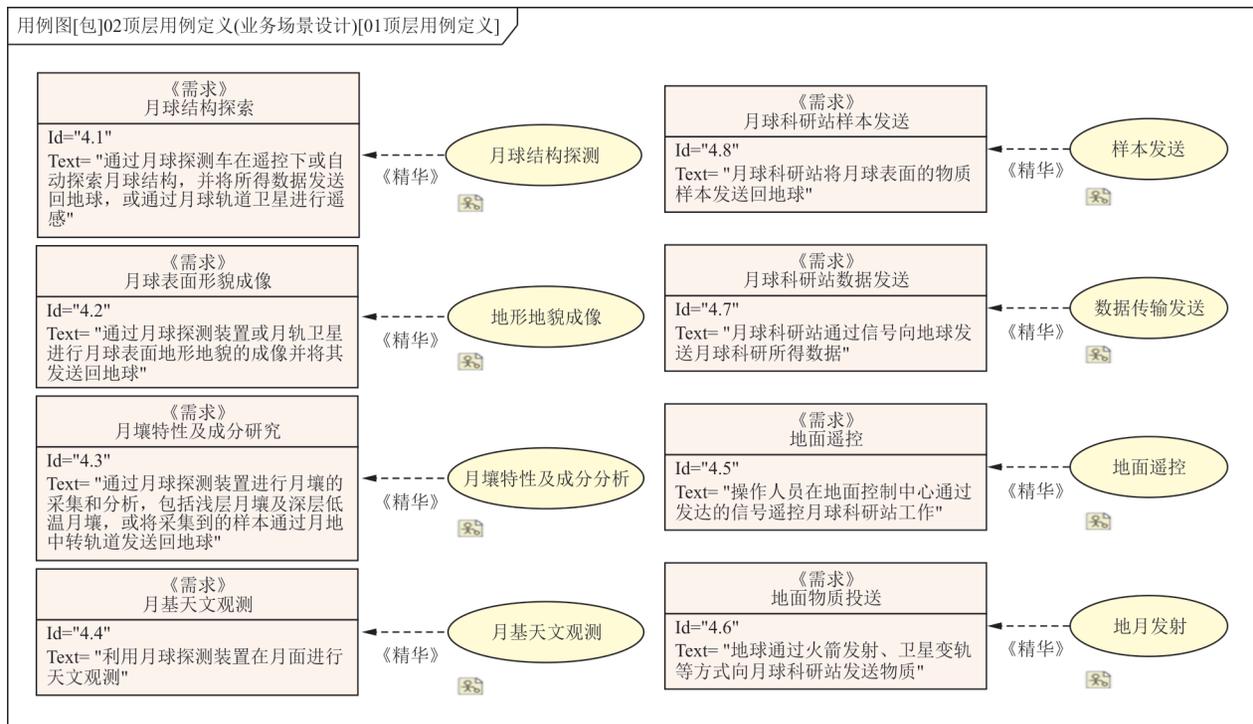


图 22 任务场景与体系使命的关系

Fig. 22 Relationship between mission scenario and architecture mission

4.2 系统功能架构分析

在完成任务场景之后,根据各系统情况及设计目的分解任务场景,完成任务级方案设计,梳理各系统需要具备的能力,输出系统能力用例。例如月球结构探测用例,分解为月球软着陆、指令接受、数据发送、月面移动、原位探测、遥感探测 6 个系统用例。在明确体系主要的系统组成之后,将系统级用例进行分配形成初步的逻辑架构。系统级用例分配如图 23 所示。模型中创建系统架构需求,构建地月往返运输系统、月面长期工作支持系统、月面运输与操作系统、科研设施系统。基于系统架构需求对系统能力进行分类,将预期归属于同一个系统的能力进行标注;对能力进行梳理,将同样的能力进行替换,对相似度高的能力进行抽象,减少总体数量;提取针对各系统的能力需求。

系统能力架构如图 24 所示,根据能力内容进行梳理,用部分能力替换同类或近似度较高的元素,提高涉及准确度,明确边界;根据各任务场景中对系统能力的分解和分配进行整理,提取相关

需求,构建系统能力需求与用例之间的追溯关系。将构建的系统能力需求进行整理,产生的系统能力需求情况如图 25 所示。

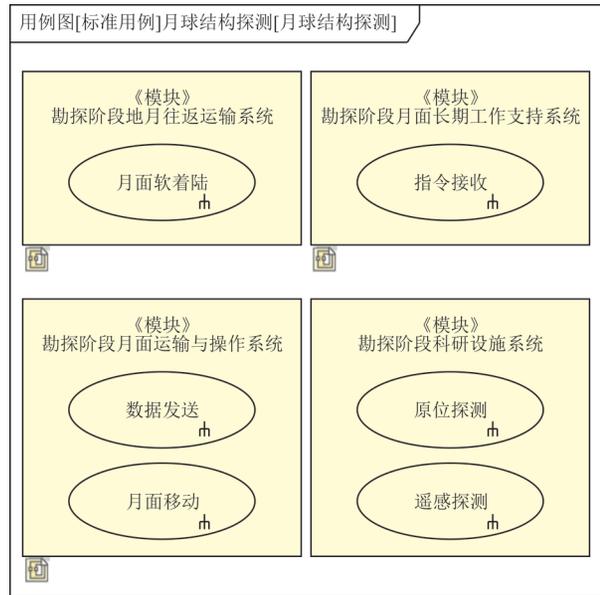


图 23 系统级用例分配(部分)
Fig. 23 System-level use case allocation

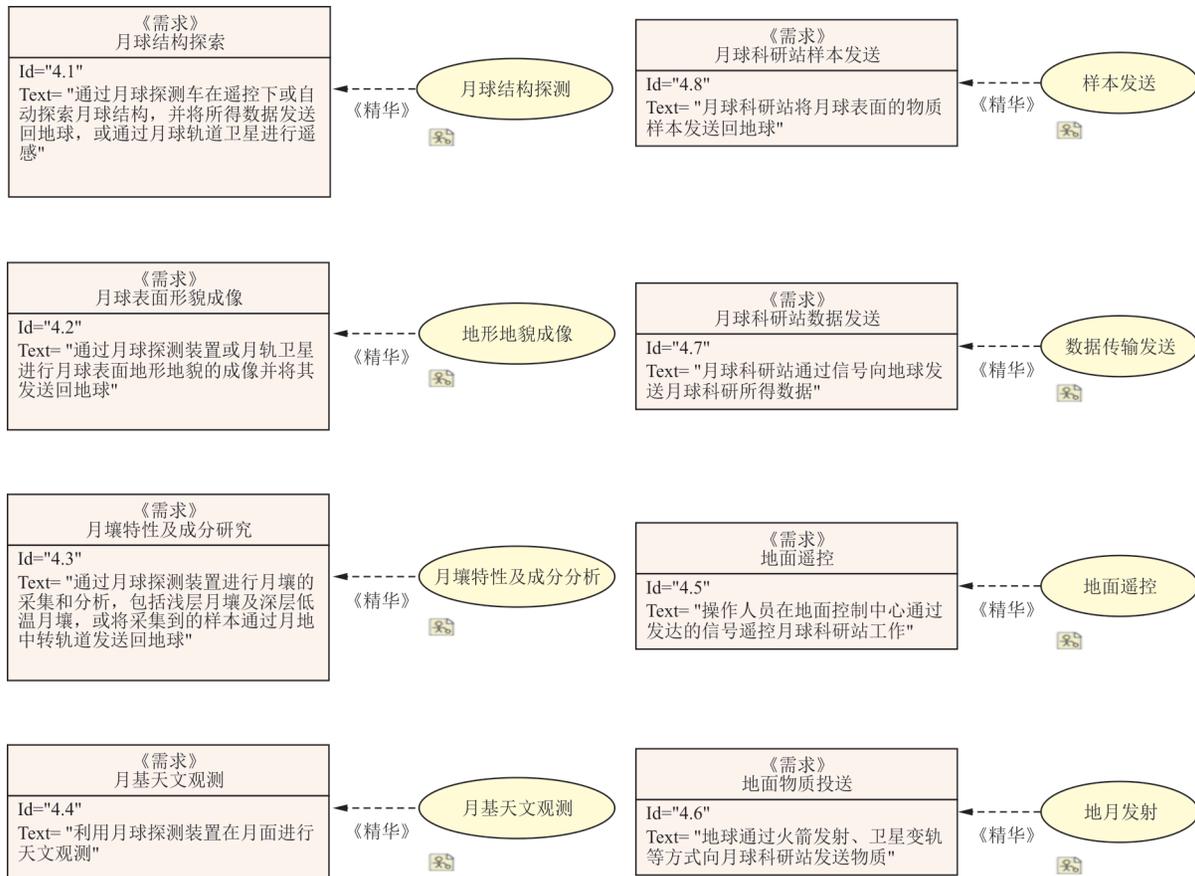


图 24 系统能力架构
Fig. 24 Architecture of system capability

| | | | |
|----|-------|-----------------|---------------------------------|
| 1 | □ 5 | ☑ 系统能力需求 | |
| 2 | □ 5.1 | ☑ 地月往返运输系统能力... | 为实现月球科研站场景需求, 地月往返运输系统需要具备的能力 |
| 11 | □ 5.2 | ☑ 月面长期工作支持系统... | 为实现月球科研站场景需求, 月面长期工作支持系统需要具备的能力 |
| 15 | □ 5.3 | ☑ 月面运输与操作系统能... | 为实现月球科研站场景需求, 月面运输与操作系统需要具备的能力 |
| 21 | □ 5.4 | ☑ 科研设施系统能力需求 | 为实现月球科研站场景需求, 科研设施系统需要具备的能力 |
| 22 | 5.4.1 | ☑ 地形地貌成像能力 | 科研设施系统需要具备将环境数据转化为图像的能力 |
| 23 | 5.4.2 | ☑ 天文观测能力 | 科研设施系统需要具备天文观测能力 |
| 24 | 5.4.3 | ☑ 遥感探测能力 | 科研设施系统需要具备利用遥感技术探测周围环境的能力 |
| 25 | 5.4.4 | ☑ 原位探测能力 | 科研设施系统需要具备在原位对样本进行分析的能力 |
| 26 | 5.4.5 | ☑ 月球轨道探测能力 | 科研设施系统需要具备在环月轨道对全月表面进行探测的能力 |
| 27 | 5.5 | ☑ 其他系统能力需求 | 其他月面科研站稳定运行所需要具备的能力 |

图 25 系统能力需求

Fig. 25 Requirement of system capability

模型中将系统能力分为地月往返运输系统能力、月面长期工作系统能力、月面运输与操作系统能力、科研设施系统能力需求、其他系统能力需求。在各种能力需求的基础上进一步细化产生更加具体的需求。

4.3 关键性能参数分析

针对业务场景、系统能力、关键功能等设计元素, 对其指标和关键参数进行设计(如图 26 所示), 实现从功能设计到非功能设计的转化, 完善系统模型内容。利用专业工具对各部分功能设计进行

仿真计算, 明确需要满足的性能指标或参数约束, 为后续设计提供非功能需求。梳理功能性设计成果, 明确其中需要进行参数分析设计的部分。利用专业任务分析工具对相关场景、能力或功能进行仿真计算, 获取所需的参数和指标。将计算结果提取为针对任务大系统和各系统的非功能需求。应用设计中的关键内容经过计算或验证, 获取的参数或约束可以支持任务的实现, 提取的需求覆盖所有相关计算结果系统应用设计中的关键内容, 经过计算或验证, 获取的参数或约束可以支持任务实现, 提取的需求覆盖所有相关计算结果。

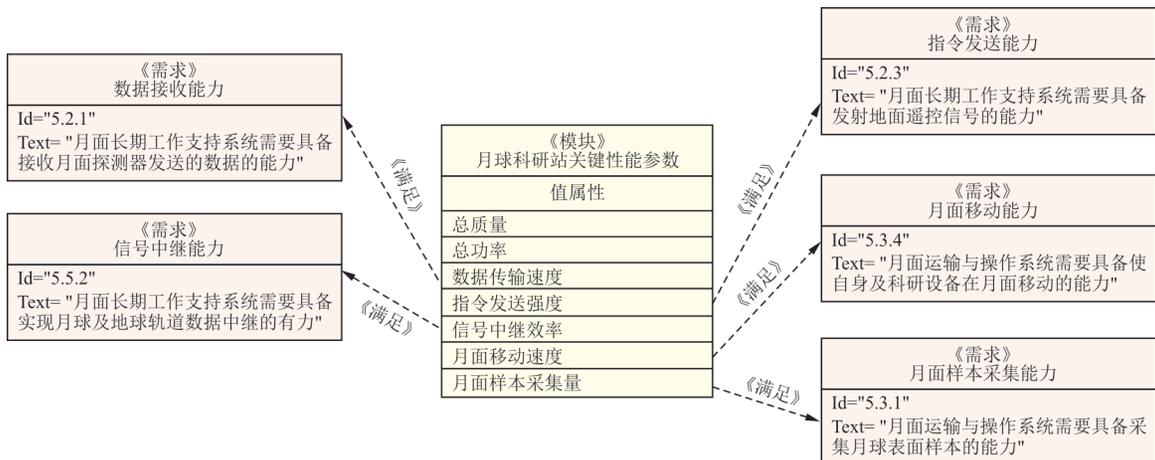


图 26 关键性能参数

Fig. 26 Parameters of key performance

4.4 功能需求分析

完成任务应用设计后, 形成的主要成果为模型的行为元素及相关需求, 为便于后续设计进行,

对模型进行一次收敛, 梳理得到的需求模型。在业务场景需求和系统能力需求之间建立派生关系, 如图 27 所示, 确保系统能力需求能够和业务场景需求对应。通过月球科研站需求关联性分析,

捕获到月球结构探索业务场景需求需要探测器具 备月面着陆能力和移动能力,指导探测器的架构 权衡分析和方案论证过程。同时捕获到地面物质

投送业务场景需求需要探测器具备自主变轨能 力,指导探测器主任设计师开展更加精准、合理的 轨道分析过程。

| 图例 | | 4 业务场景需求 | | | | | | | |
|----------|------------------|------------------|-------------|-------------|------------|----------|------------|-------------|-------------|
| 派生需求 | | R | R | R | R | R | R | R | R |
| | | 4.1 月球结构探索 | 4.2 月球地形地貌成 | 4.3 月球特性及成分 | 4.4 月球天文观测 | 4.5 月球测绘 | 4.6 地面物质投送 | 4.7 月球科研站数据 | 4.8 月球科研站样本 |
| 5 系统能力需求 | 5 系统能力需求 | | | | | | | | |
| | 5.1 地月往返运输系统能力需求 | | | | | | | | |
| | | 5.1.1 运载器发射能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.2 地面降落能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.3 再入返回能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.4 自主变轨能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.5 月面着陆能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.6 样本发送能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.7 样本接收能力 | | | | | | | |
| | | 5.1.8 星箭分离能力 | | | | | | | |
| | | 5.2 月球工作 | | | | | | | |
| | | 5.2.1 数据接收能力 | | | | | | | |
| | | 5.2.2 信号中继能力 | | | | | | | |
| | | 5.2.3 指令发送能力 | | | | | | | |
| | | 5.3 月球运输与操作系统能力 | | | | | | | |
| | | 5.3.1 月面样本采集能力 | | | | | | | |
| | | 5.3.2 深层低温月壤采集能力 | | | | | | | |
| | | 5.3.3 数据发送能力 | | | | | | | |
| | | 5.3.4 月面移动能力 | | | | | | | |
| | | 5.3.5 指令接收能力 | | | | | | | |
| | | 5.4 科研设施系统能力需求 | | | | | | | |
| | | 5.4.1 地形地貌成像能力 | | | | | | | |
| | | 5.4.2 天文观测能力 | | | | | | | |
| | | 5.4.3 遥感探测能力 | | | | | | | |
| | | 5.4.4 原位探测能力 | | | | | | | |
| | 5.4.5 月球轨道探测能力 | | | | | | | | |

图 27 业务场景-能力需求派生矩阵

Fig. 27 Derivation matrix of business scenario and capability requirement

针对系统能力实现,在月球科研站任务设计 时进行关键流程的设计以满足业务场景相关需 要;分析任务场景及系统能力,明确对任务实现特 别重要的月球软着陆过程;结合任务设计,利用活 动图进行展开,设计关键流程;对流程步骤进行梳 理,形成系统的部分功能设计,具体活动过程如图 28 所示。分析过程涉及主发动机、姿态发动机、测

速测距制导模块、成像模块、外壳及缓冲支架;着 陆过程依次为进入着陆准备轨道、主发动机减速、 调整姿态、粗避障、减速下降、精避障、自由落体。

通过细化活动的方式产生系统的功能需求, 将系统能力需求进行活动处理产生系统功能,如 图 29 所示,形成月球科研站功能模型库,实现基于 模型的设计知识沉淀。

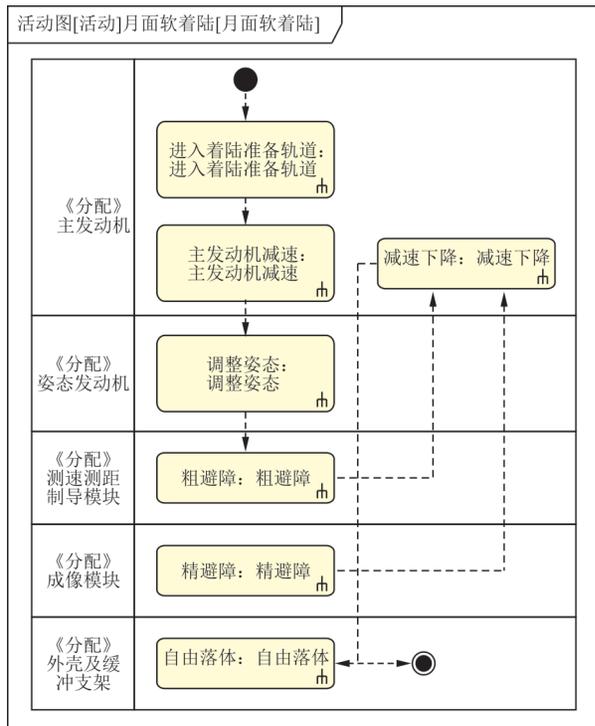


图 28 月球软着陆活动过程

Fig. 28 Lunar soft landing process



图 29 系统功能

Fig. 29 System functions

将系统功能进行提炼细化得出系统的功能需求如图 30 所示。

| 序号 | 名称 |
|--------|----------------|
| □ 6 | 系统功能需求 |
| ▣ 6.1 | 地月往返运输系统功能需求 |
| ▣ 6.2 | 月面长期工作支持系统功能需求 |
| □ 6.3 | 月面运输与操作系统功能需求 |
| 6.3.1 | 处理信号功能 |
| 6.3.2 | 接收信号功能 |
| 6.3.3 | 数据编码功能 |
| 6.3.4 | 探测器固定功能 |
| 6.3.5 | 探测样本位置功能 |
| 6.3.6 | 信号传输功能 |
| 6.3.9 | 月面导航功能 |
| 6.3.10 | 月面定位功能 |
| 6.3.11 | 月面推进功能 |
| ▣ 6.4 | 科研设施系统功能需求 |

图 30 部分功能需求

Fig. 30 Some of functional requirements

5 结论

1) 本文提出一套可行的基于模型的月球科研站任务分析流程,此流程总体上包含基于模型的月球科研站任务总体分析、任务使命需求分析和任务应用场景分析。

2) 详细分析每个环节,重点阐述了工作步骤组成,经过探讨验证了该流程能够覆盖月球科研站任务分析整体过程。

3) 采用模型的方法从使命、场景、能力、架构、参数、需求等多个维度分析月球科研站,考虑了从生命周期深度和利益相关方广度分析使命需求,保证了任务场景分析的全面性和输出需求的完备性。

下一步拟在本文工作基础上以输出的月球科研站需求模型为指导,开展基于模型的月球科研站设计过程,如基于模型的整体系统方案设计、行为设计、接口设计和指标响应等。

参考文献

[1] 关峰,葛平,周国栋,等. MBSE 发展趋势与中国探月工程并行协同论证[J]. 空间科学学报, 2022, 42(2): 183-190.

GUAN Feng, GE Ping, ZHOU Guodong, et al. Parallel demonstration of MBSE development trend and China's lu-

- nar exploration project[J]. Journal of Space Science, 2022, 42(2): 183-190. (in Chinese)
- [2] 张扬眉. 2020年国外深空探测领域发展综述[J]. 国际太空, 2021(2): 31-35.
ZHANG Yangmei. A review of the development of deep space exploration abroad in 2020[J]. International Space, 2021(2): 31-35. (in Chinese)
- [3] GRUNDMANNA J T, DACHWALDB B, GRIMMA C D, et al. Spacecraft for hypervelocity impact research: an overview of capabilities, constraints and the challenges of getting there[J]. Procedia Engineering, 2015, 103: 151-158.
- [4] GARRIGA A G, PARITHI G, SANGEETH S P, et al. A modelling framework to support power architecture trade-off studies for more-electric aircraft[J]. Transportation Research Procedia, 2018, 29: 146-156.
- [5] PETNGA L, AUSTIN M. An ontological framework for knowledge modeling and decision support in cyber-physical systems[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30(1): 77-94.
- [6] 韩凤宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践[J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 119-125.
HAN Fengyu, LIN Yiming, FAN Haitao. Research and practice of model-based systems engineering in spacecraft development[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3): 119-125. (in Chinese)
- [7] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 72-80.
ZHANG Bainan, QI Faren, XING Tao, et al. Research and practice on the development method of manned spacecraft based on model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 72-80. (in Chinese)
- [8] 霍光, 王耀东, 吴延龙, 等. 航天器数字化研制技术应用[J]. 管理与实践, 2017, 31(9): 24-28.
HUO Guang, WANG Yaodong, WU Yanlong, et al. Application of spacecraft digital development technology[J]. Management and Practice, 2017, 31(9): 24-28. (in Chinese)
- [9] 卢志昂, 刘霞, 毛寅轩, 等. 基于模型的系统工程方法在卫星总体设计中的应用实践[J]. 航天器工程, 2017, 27(3): 7-16.
LU Zhiang, LIU Xia, MAO Yinxuan, et al. Application of model-based systems engineering method in satellite overall design[J]. Aircraft Engineering, 2017, 27(3): 7-16. (in Chinese)
- [10] 张有山, 杨雷, 王平, 等. 基于模型的系统工程方法在载人航天任务中的应用探讨[J]. 航天器工程, 2014, 23(5): 121-128.
ZHANG Youshan, YANG Lei, WANG Ping, et al. Discussion on the application of model-based systems engineering method in manned space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(5): 121-128. (in Chinese)
- [11] 葛宇, 周传君, 丁勤, 等. 面向敏捷研制的小卫星全过程产品保证管理[J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 177-121.
GE Yu, ZHOU Chuanjun, DING Qin, et al. The whole process product assurance management of small satellite for agile development[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(6): 177-121. (in Chinese)
- [12] 蒋丹鼎, 周竞涛, 赵颖, 等. 用于产品方案设计阶段的系统工程模型成熟度评估方法[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(11): 1776-1783.
JIANG Danding, ZHOU Jingtao, ZHAO Ying, et al. System engineering model maturity evaluation method for product scheme design stage[J]. Mechanical Science and Technology, 2018, 37(11): 1776-1783. (in Chinese)
- [13] 葛立敏, 刘远恒, 王扬. 基于模型的系统工程在航电系统设计中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2015(8): 60-63.
GE Limin, LIU Yuanheng, WANG Yang. Application of model-based systems engineering in avionics system design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(8): 60-63. (in Chinese)
- [14] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. 科学通报, 2020, 65(24): 49-58.
PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, et al. Lunar exploration progress and International Lunar Scientific Research Station[J]. Science Bulletin, 2020, 65(24): 49-58. (in Chinese)
- [15] 于国斌. 深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势[J]. 深空探测学报, 2021, 8(4): 407-416.
YU Guobin. Application and trend of systems engineering methods for deep space exploration mission collaboration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 407-416. (in Chinese)
- [16] FRIEDENTHAL S, MOORE A, STEINER R. A practical guide to SysML: the systems modeling language[M]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Press, 2014.

作者简介:

关锋(1972—),男,硕士。主要研究方向:深空探测工程,MBSE等。

葛平(1978—),男,硕士。主要研究方向:深空探测工程,MBSE等。

邵艳利(1989—),女,博士,副教授。主要研究方向:CAD,深空探测工程,数据挖掘,MBSE。

袁文强(1988—),男,博士,讲师。主要研究方向:CAD,MBSE,多学科优化理论。

徐帅(1995—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:机械设计,MBSE等。

康焱(1981—),男,博士,研究员。主要研究方向:深空探测工程,MBSE,航天器设计等。

裴照宇(1965—),男,博士。主要研究方向:深空探测工程,MBSE等。

(编辑:丛艳娟)