

GUAN Feng, GE Ping, ZHOU Guodong, KANG Yan, REN Junjie, JIE Degang. Development Trend of MBSE and Investigation of Concurrent Collaborative Demonstration for Chinese Lunar Exploration Program (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(2): 183–190. DOI: 10.11728/cjss2022.02.210804082

MBSE 发展趋势与中国探月工程 并行协同论证*

关 锋 葛 平 周国栋
康 焱 任俊杰 节德刚

(中国国家航天局 探月与航天工程中心 北京 100190)

摘 要 中国月球探测面临新发展态势, 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, 当前基于模型的系统工程、并行工程等新方法及新手段受到广泛关注。本文从 MBSE (基于模型的系统工程) 流程、方法、工具及应用层面对 MBSE 的现状进行研究, 分析其发展趋势。结合中国探月工程任务需求和面临的挑战, 设计中国探月工程基于模型的并行协同论证框架, 论述了基于依赖图的跨专业、层级、地域的模型一致性维护和基于 OSLC (面向生命周期协作的开放服务) 的一体化协同论证环境构建等技术方案。通过国际月球科研站的论证设计开展初步应用验证, 实现多岗位角色的协同论证, 为探月工程全面推进基于模型的系统工程实施提供参考。

关键词 探月工程, 数字化, 基于模型的系统工程, 并行工程

中图分类号 V476

Development Trend of MBSE and Investigation of Concurrent Collaborative Demonstration for Chinese Lunar Exploration Program

GUAN Feng GE Ping ZHOU Guodong
KANG Yan REN Junjie JIE Degang

(*Lunar Exploration and Space Engineering Center, China National Space Administration, Beijing 100190*)

Abstract Chinese lunar exploration program is facing a new development situation, which raises higher demands for many aspects of the Chinese lunar exploration mission, including demonstration of plans, overall design, system development and orbital detection. Currently, Model-Based System

* 国家重点研发计划项目 (SQ2019YFE20137), 民用航天技术预研项目 (D020101) 和国防基础科研计划 (JCKY2020903B001) 共同资助

2021-08-04 收到原稿, 2021-09-09 收到修定稿

E-mail: kangyan416@163.com

Engineering (MBSE), concurrent engineering and other new methods and new techniques have received growing attention, both domestically and internationally. In this paper, the research status of MBSE from the aspects of processes, methods, tools and applications, are summarized to analyze the development trends of it. Integrating the project characteristic and mission demands of the Chinese lunar exploration program, the model-based demonstration framework for concurrent and collaborative design is proposed, and then the analysis is conducted on two categories of key technology of the framework. Based on a dependency graph, the consistency maintenance technology across disciplines, levels and regions is proposed. And, the component service packaging integration technology based on OSLC is proposed. The initial application has been conducted on the demonstration and design for International Lunar Research Station, in which multi-roles cooperation is realized, the full synchronization time is less than 1 minute. The designing practice of ILRS provides the instructional framework and practical exploration to comprehensively promote MBSE for further lunar exploration program.

Key words Lunar exploration program, Digitization, MBSE, Concurrent engineering

0 引言

由于月球探测任务的长期性、合作模式的协同性、探测工程系统的复杂性,传统设计模式越来越难以适应型号研制的需要,迫切需要采用新方法、新手段进行研制模式转型。基于模型的系统工程(Model-Based System Engineering, MBSE)是解决这一问题的重要手段和方法^[1],通过需求驱动、架构主导、模型支撑、持续验证,完成复杂工程系统的建模、设计、仿真、论证和优化等工作,显著增强了对于月球探测复杂系统工程的设计能力。

本文面向中国探月工程未来任务挑战与数字化研制需求,从流程、方法、工具、应用等方面深入分析国内外航天领域 MBSE 技术发展现状和趋势,提出基于模型的并行协同技术与中国探月工程任务融合的建议,为后续开展月球探测数字化研制体系构建与研制模式转型升级提供参考。

1 探月工程数字化研制需求

进入 21 世纪以来,月球在人类开发利用太空和进军深空中的地位日益凸显,正在成为航天大国战略角逐的制高点。月球探测呈现以下趋势^[2]:探测重点从掌握技术逐步转向科学探测和资源探查与开发利用;探测模式从单次任务短期探测向建设月面基础设施开展长期探测转变;探测区域逐渐聚焦于资源富集的

月球南极,尤其是位于南极的富含水冰的永久阴影区;由于月球探测技术难度大、风险高、投入大,需要通过国际合作分担经费和风险,共享成果和发展。因此,国际合作将是月球探测的必然趋势。

中国探月工程“绕落回”三步走战略圆满完成。嫦娥一号实现绕月飞行探测;嫦娥二号实现多目标多天体探测;嫦娥三号实现月面软着陆和巡视探测;月地高速再入返回飞行试验实现第二宇宙速度半弹道跳跃式月地高速安全返回;嫦娥四号在国际上首次实现月球背面软着陆和巡视探测;嫦娥五号实现月面无人自主采样返回,开展月球样品分析研究。

在完成“绕落回”三步走之后,即将实施的探月工程四期计划在月球极区开展嫦娥六号采样返回、嫦娥七号极区综合勘查、嫦娥八号月球科研站关键技术验证等三次任务,形成长时段、复杂环境下的月球探测能力。月球探测正在从掌握技术向科学探测和资源探查与开发利用转变,更好地服务于空间科学和空间应用成为月球探测下一步主要目标,将面临以下主要挑战与需求。

探月工程任务整体复杂性强,迫切需要研究新一代基于模型的任务体系数字化研制模式与方法,显著提升研制效率与效益。由于月球探测的复杂性,难以人为构造开展实物验证,需要加强仿真验证在各层级的应用。采用新一代数字化研制模式,在方案论证阶段,开展深入的协同设计分析和仿真验证,系统识别环境影响因素及其不确定性,实现“设计即正确”,减

少研制阶段工作反复,利用虚拟验证减少实物验证,缩短研制周期并减低研制成本,具有重要科学意义和应用价值。

由于月球探测任务需求多样化,需要加强顶层需求分析与综合论证评估手段,从而提升工程总体的技术把控与科学决策能力。月球探测任务从任务能力型向科学牵引型发展,要求探月工程也要向体系化发展。探月工程体系设计需要满足多种目标和要求(可用性、可靠性、集成性),受多种因素制约(经费、进度、技术水平等),同时实现科学与工程交叉融合,因此对于科学决策、全局统筹提出了更高要求。解决上述问题的关键在于加强顶层需求分析与综合论证评估,确保工作目标与运载器、探测器、测控等系统需求和指标分析清晰、完整、准确,通过建立需求之间的追溯关系,实现需求变更影响域的快速分析,并建立目标与需求及测试验证项目的关联,实现测试覆盖性分析与早期的验证规划。

任务协同场景复杂,需要构建自主开放的一体化集成设计环境,支撑跨组织、跨层级及跨国别的协同。月球探测任务后续将进一步加强国际间的联合论证、技术合作,整合优势技术和数据资源,从而大幅提高投资效益,降低实施风险。传统集同开会的协作模式,其协调效率低,系统性及完备性差,因此亟需建立标准、开放、协同、自主的一体化集成设计环境,用于支持与国际机构协同开展论证、方案设计及验证,有助于中国牵头和主导国际化合作。

由于任务难度大、周期长,需要建立统一的知识模型体系,实现领域内知识的数字化积累。探月工程积累了丰富的型号研制经验和数据,为型号研制成功奠定了坚实基础。但是后续开展人机联合探测,对于型号间知识积累和重用的要求也越来越高。传统基于文档表达的知识经验缺乏结构化关联,难以被技术人员和应用工具有效重用,给跨型号沟通与协同、知识继承与创新等带来困难。因此,需要建立统一的知识模型体系,对已有型号成果与项目经验进行封装、固化,实现更高效的重用。

2 MBSE 发展趋势

作为解决工程复杂性的有效方法,自 MBSE 概念提出以来,美国、欧洲以及中国相关研究机构对其流程、方法、工具和应用等问题进行了深入的研究,

具体如下。

(1)流程上,从系统向体系拓展,以实现复杂工程系统的全流程建模。国际系统工程学会(INCOSE)在 2015 年发布了《系统工程手册 4.0》^[3]。与《系统工程手册 3.0》相比,其技术流程从之前的 11 个增加到 14 个,主要变化在概念定义和系统定义阶段。增加了业务/任务分析流程,使得系统工程的起点从利益相关方的需求定义向前推进一步,系统工程师需要在系统运行环境中分析运行概念(OpsCon)下需要的系统能力以及用户运行活动、场景等。这要求 MBSE 不仅要系统建模,还要对系统及运行环境中其他组成体系(SoS)进行建模。

(2)方法上,从通用到具体化转变,结合实际业务流程完成 MBSE 方法的“内化”。目前通用的 MBSE 方法有 INCOSE 的 OOSEM 方法、达索的 MagicGrid 方法、IBM 的 HarmonySE 方法等。国际先进宇航单位在 MBSE 落地实践中结合自身数据及研制流程特点,形成了自己的方法论。Arcadia 方法^[4]是 Thales 结合自身数据特点,融合了多套方法体系与框架形成的“架构中心、模型驱动”的方法论。与其他方法论相比,Arcadia 方法不仅能够开展复杂系统建模,还能完成 SoS 建模。NASA 在火星车 2030 任务中,针对复杂的多任务智能化需求,采用集成化 MBSE 方法(iMBSE)对任务进行全系统多结构多层次的持续定义和开发。

(3)工具上,从单点向协同发展,构建形成支持跨层级、学科、地域之间的协同建模与仿真平台。MBSE 工具通常针对系统工程活动中如需求分析、功能/行为分析、架构综合、设计确认和验证某一环节而开发,形成了相应的需求管理、功能分析与架构设计、系统建模与联合仿真、模型协同与管理等类型工具。目前国际上在单点工具的应用方面已经较为成熟,NASA 和 ESA 等机构结合前期的工程实践,提出在单点工具基础上,构建支持网络化协同的 MBSE 一体化集成环境,以解决目前各类工具间数据交换不畅通、上下游协同困难、模型一致性/完整性/有效性难以保障等问题。自 2017 年起,NASA JPL 开始打造 OpenCAE / OpenMBEE^[5]平台,旨在构建一个网络化的工程环境,实现以工具为中心向以模型为中心的设计转变。ESA 开展了虚拟航天器项目(Virtual Spacecraft Design, VSD),以改善系统级工程数据的

组织,并允许在不同工程领域之间更流畅地交换关键工程参数及其模型。Valispace 面向数据硬件系统支持多文档、动态数据的协同管理,已应用于 ESA、空客等机构的复杂工程系统研发。

(4)应用上,从局部到整体迈进,实现系统全生命周期完整 MBSE 应用。MBSE 自提出以来,引起了广泛的研究关注,NASA、ESA、美国国防工业协会(NDIA)、美国国防部先进研究项目局(DARPA)、洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin)、波音公司(Boeing)等均开展了 MBSE 技术的型号应用^[6-10]。NASA 从 2012 年开始 MBSE 试点应用,布局了 20 个涉及不同子系统不同阶段的点式开发任务。截至 2016 年已有 7 个项目实现了全生命周期应用^[11],在缩短研发周期、降低成本和提高质量等方面取得了很好的效果。NASA 已经过“能力建设”和“可演示 MBSE”阶段,正处于“完整 MBSE”应用阶段。ESA 在欧几里得等任务中,运用 MBSE 方法和工具,建立了需求、架构、验证、行为等模型,有效解决了欧几里得任务面临的问题。此外,ESA 应用 Modelica 开展卫星等航天数据建模,应用范围从体系结构模型覆盖详细系统模型,建设了多专业空间系统、可视化场景、空间环境等多组 Modelica 航天系统模型库。

3 探月工程基于模型的并行协同论证框架与技术

在广泛调研 MBSE 技术研究与工程应用的基础上,针对探月工程数字化协同研制中存在的航天任务体系 MBSE 方法缺乏、工程总体数字化论证手段缺乏、工程总体与系统总体数字化割裂以及缺少一体化集成平台等问题,结合中国深空探测领域已有的技术基础,开展了探月工程基于模型的并行协同设计技术研究与实践。

3.1 基于模型的探月工程并行协同论证框架

基于模型的探月工程并行协同设计框架如图 1 所示,其由协同团队、协同论证环境、系统模型体系以及标准规范四部分组成,支持探月工程论证阶段的使命任务定义与需求分析、概念架构定义与可行性论证、联合方案设计与综合评估三个阶段的论证活动。协同团队主要指探月工程任务中的科学、工程等团队,协同完成项目的论证、建设、运行维护等工作。

系统模型体系包括任务论证与协同方案设计中产生的各类需求、架构、仿真以及可视化模型,覆盖环境、任务、场景、功能、物理、成本、可靠性等多个维度。标准规范用于约束各流程阶段的业务行为、建模方式、接口以及验证等具体要求,用以保证团队协同条件下模型数据的规范性、一致性和可信性。协同论证环境指协同团队完成任务协同论证工作的软件环境,包含任务论证、系统架构设计、方案与技术路线验证等专业工具,以及面向多团队协同的模型管理与协同建模工具。

通过该框架,定义多专业国际化联合团队在不同流程的业务活动以及模型传递关系;基于多领域、多层次统一模型库,描述系统任务、需求、功能、架构等元素,支撑系统设计验证,实现数据积累;通过标准规范约束建模或论证过程的输入、输出、边界、颗粒度和方式,支持多岗位协同;通过开放的协同论证环境开展需求分析、架构设计、仿真验证等业务工作。

在使命任务定义与需求分析阶段,以月球科学探测和资源开发利用为主要目标,基于统一架构,在工程总体视角下构建工程总体层级的使命任务视图、概念视图及需求视图,包括战略使命、任务设想、外部环境、任务场景和体系能力需求等模型,综合描述利益攸关方、系统边界、运行场景、系统功能指标等多种要素,基于多视图对使命、需求、概念进行可视化表达与分析,实现探月工程使命任务、系统需求、技术指标以及顶层概念的初始设计与交互验证。

在概念架构定义与可行性论证阶段,以工程总体技术指标、系统与各模块需求为输入,以探月工程初始概念设计为目标,将探月工程总体架构分解为各系统结构设计要求,通过规范的需求、接口、参数、行为、约束建模过程,由各专业团队并行开展概念架构设计,并行定义探测器群集、测控通信系统、运载火箭系统、地面应用系统等技术方案,集成探月工程系统整体模型,从成本、可行性、可靠性、安全性等方面开展分析与验证,形成探月工程概念架构方案。

在联合方案设计与综合评估阶段,以探月工程架构方案设计为目标,完善探测器、科学探测、能源供给、指挥控制等模块的详细设计方案,结合已经建成的技术和平台基础,设计探月工程的发射以及阶段性运行方案,构建多阶段探测任务与系统模型,开展多任务、多层次的实施方案论证、综合评估和迭代优化。

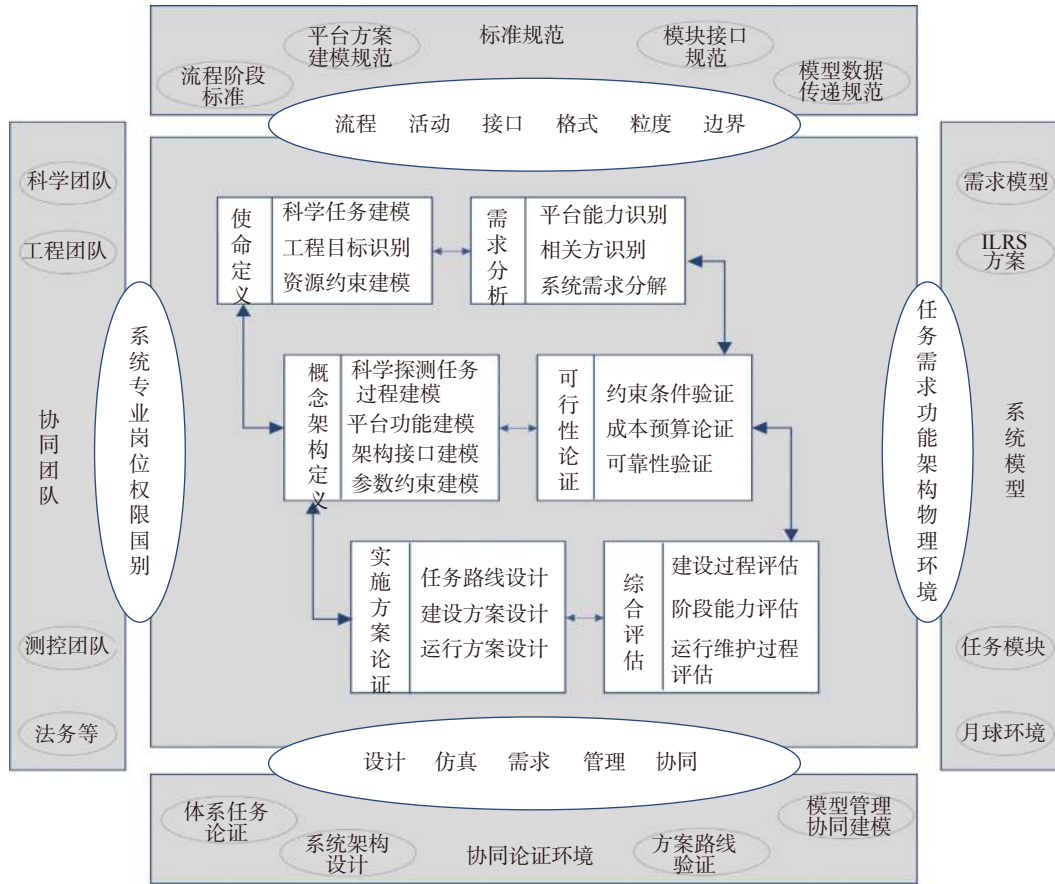


图 1 基于模型的探月工程并行协同论证框架

Fig. 1 Model-based demonstration framework for concurrent and collaborative design

在以上三个阶段的探月工程论证工作中,涉及的协同团队、系统模型、标准规范以及基本的需求分析、需求管理、系统设计与验证等专业工具,均已在现有的任务过程中完成或者基本完成相关建设工作,目前的核心难点在于如何通过网络化的模型管理、数据同步以及并行协同环境建设,支持跨专业、层级、地域的并行协同工作。

3.2 跨专业、层级、地域的模型一致性维护

探月工程系统各域设计模型间相互高度依赖,并且存在非设计要求的隐含耦合,任何一方的变化均极易引起多方冲突。多人协同设计过程中,由于设计需求可能不断变化,不同专业模型如机械、控制、电气等模型在设计过程中均可能发生变化,一个模型的变化必然引起其他模型变化,以确保系统设计模型的一致性。不同于已有的 CAD 协同建模,多领域模型中约束异常复杂,因此,如何关联、协调各域设计从而达到系统设计结果的性能最优是必须解决的问题。

本文提出基于依赖图的模型变动识别、传播与同步更新技术,首先构造跨地域跨专业关联的模型依赖图,基于有向图比较和路径查询等算法自动识别和传播设计变更,通过版本一致性维护算法实现同步更新。

为了维护模型多域表示之间的关联,引入多域无关的标识符(ID)对模型进行标识。模型初始化后,该模型 ID 属性将保持不变。在设计过程中,该 ID 值不随模型属性的改变而改变,从而维持模型之间稳定的映射关系。在此基础上,采用如图 2 所示层级式模型结构树。其中,模型结构层以系统结构模型 M 为根节点,维护多域模型的层级结构;关系模型层用于维护多域模型间的关系,包含了 n 种不同类型的关系模型,每种类型的关系模型可有若干关系实例。图中 $r_{11}, \dots, r_{1i}$ 表示系统结构模型 M 定义的 i 个类型 1 的关系实例。

该层级式模型结构树中的节点数据结构定义如图 3 所示。图 3 中 ModelProp 类型的 ID 属性为前

述的模型关联标识符。对于设计时的模型实例,存在相应的模型类型定义。这两种不同类型的属性分别由 TypeParamList 和 InstanceParamList 表示。此外,模型还应包括父节点和子节点指针。模型状态类型 StateMode 定义了四种状态,用于表示自上一次设计同步以来该模型可能出现的状态。ModelProp 是表示所有设计模型属性结构的抽象类。特定领域的设计模型应继承 ModelProp 类,并定义相应的模型类型参数和模型实例参数列表。

3.3 面向服务的开放式协同论证环境构建

针对目前各类工具间的信息流、数据流互联互通问题,研究抽象 MBSE 工具各模块级可提供的功能,

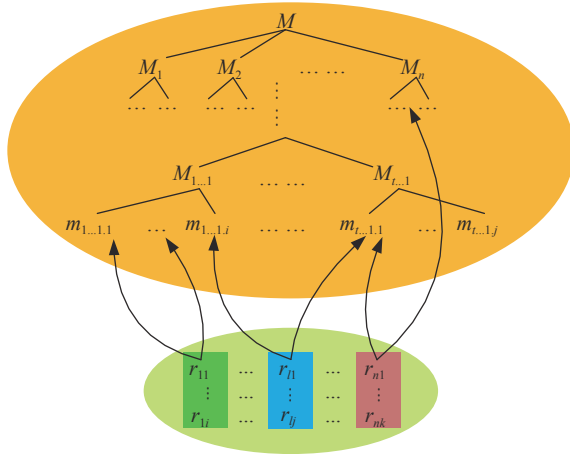


图2 层级模型结构树

Fig. 2 Tree-structured Hierarchical model

形成微服务组件库(包括建模服务、异构模型集成服务、模型管理服务、编译器服务、求解器服务等服务组件),进行组织和管理,对外提供服务调用。计划采用面向生命周期协作的开放服务 OSLC(Open Service for Lifecycle Collaboration)^[11]实现组件的服务化,形成云端建模仿真微服务组件体系。OSLC API 与传统的 Web 服务 RESTful API 相比,具有基于标准、结构健全、应用高效等特点,其核心服务包括发现、查询、存储、协同、数据入库、附加服务等。

根据 OSLC 规范要求,需要同时有服务提供者和服务消费者才能实现数据的共享。为了集成实现 OSLC 规范的所有软件开发管理工具,服务提供者须向服务消费者注册才能完成数据的交换。

基于 OSLC 规范,对 MBSE 工具中的各模块进行服务化封装,形成组件资源。一个组件可以包含若干个服务,通过服务接口调用的形式,快速为用户提供 ILRS 任务建模、可行性分析、可视化模拟、多角色协同等功能,支持多种形式的单机或网络化调用。具体可分为协同即服务、建模即服务、分析即服务、可视化即服务和模型管理服务等几大类,同时提供如下服务管理功能。

更新提示服务用于管理更新提示资源。当工具中已被连接的数据发生变更时,更新提示资源被发送至异构数据关联框架,框架再将其发送至所有已订阅该服务的工具。

用户提示服务用于管理用户提示资源。当用户

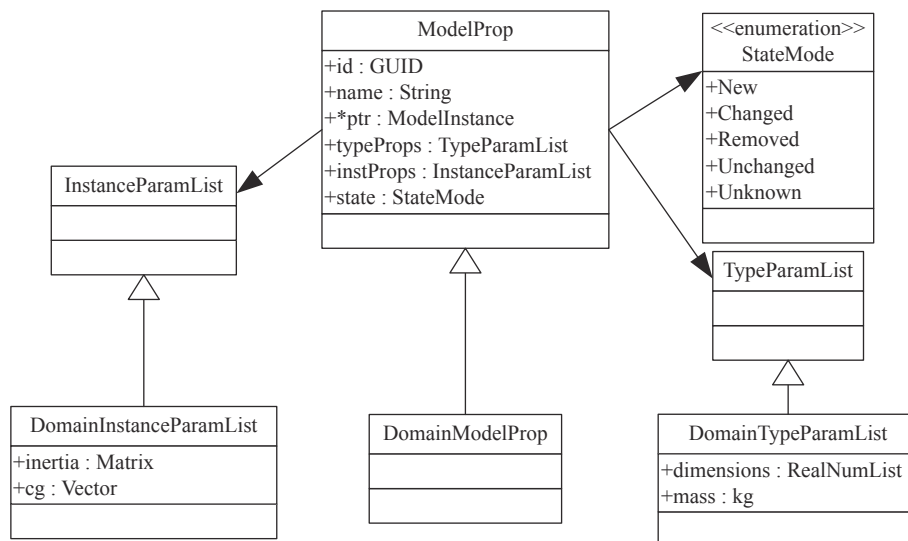


图3 层级式模型结构树中节点的数据结构

Fig. 3 Data structure of classifier in tree-structured hierarchical model

想发送提示到其他工具时,先要将用户提示资源格式化并发送至异构数据关联框架。其包含一个名为“目的地”的属性,框架根据该属性将消息发往相关的工具。工具接收消息并在工具端做相应处理。一个提示资源中通常包括属性、描述、标识等信息。

服务注册用于管理服务注册资源。工具端的服务注册服务使得异构数据关联框架能将服务目录发送到工具中。服务目录是一个服务注册资源列表。异构数据关联框架采用 HTTP POST 方法发送这些资源到工具。

3.4 应用实践

面向国际月球科研站(ILRS)方案论证需求,对本文提出的并行协同论证框架及关键技术进行了初步

的演示验证,建立国际月球科研站并行协同论证环境,形成网络化、分布式的协同建模、设计、论证与仿真能力。其功能架构由基础设施层、数据层、服务层、协同层和应用层组成,如图4所示。

针对科学试验任务的系统工程大总体和探测器、运载火箭、地面测控等系统架构组成,综合各领域专业知识与模型积累,面向使命任务定义与需求分析、概念架构定义与可行性论证、联合方案设计与综合评估等不同阶段流程,开展国际月球科研站系统方案论证,形成一套 ILRS 协同论证的多要素模型。

面向国际月球科研站论证阶段任务,基于本文论述建设的软件环境,实现多专业系统设计、多领域系统仿真的同步进行。相比传统的各专业独立工作模

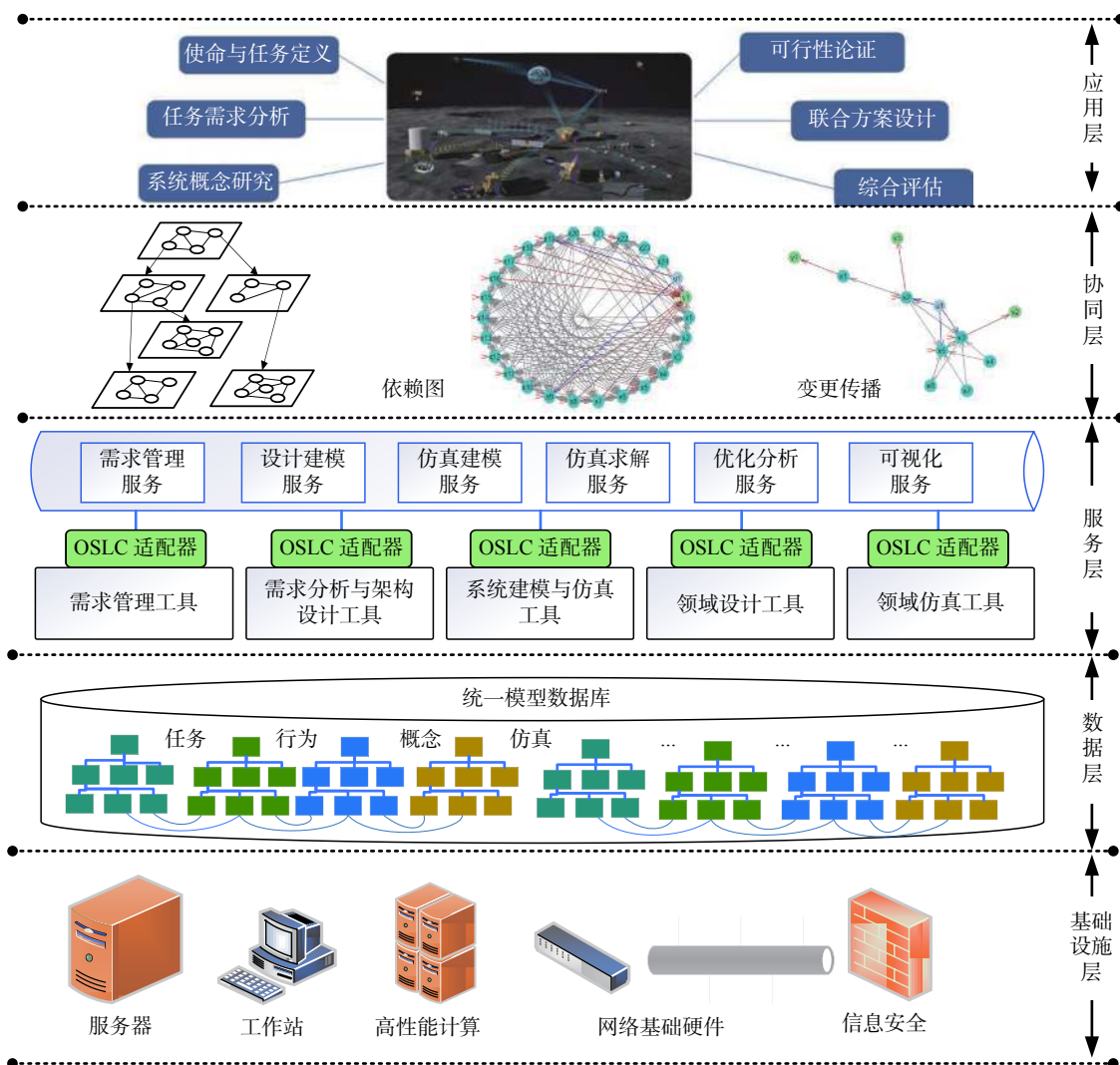


图4 ILRS并行协同论证环境的功能架构

Fig. 4 Functional Architecture of the ILRS demonstration process for concurrent and collaborative design

式,协同论证环境能够明显提高设计效率,保证模型、数据的一致性,目前已实现系统级模型的构建。通过国际月球科研站并行协同环境集成系统架构设计、多领域仿真等工具,能够支持不低于20个岗位角色的协同论证,支持模型数据版本管理、用户权限管理、任务流程建模、多工具集成、冲突检查与差异合并等功能,满足工程总体、探测器、运载火箭、测控系统、地面应用等系统总体的协同建模要求,在主频2.60 GHz 双核 CPU、16 Gbit 内存的计算机上运行流畅,模型完全同步时间小于1 min, Web 界面响应时间小于0.5 s。

4 结论与展望

针对探月工程数字化研制需求,从流程、方法、工具及应用层面归纳分析了MBSE国内外发展趋势。提出了基于模型的探月工程并行协同设计框架,分析了该框架中的并行协同关键技术,包括:针对跨专业、层级、地域的模型一致性维护技术,提出基于依赖图的模型变动识别、传播与同步更新技术,实现并行协同的高响应性和高并发性;针对一体化协同论证环境的构建技术,提出基于OSLC的组件服务化封装集成技术,实现工具链的细粒度互联互通。

研究成果为探月工程协同论证的并行协同环境建设提供了可行的解决方案。面向未来探月以及深空探测等重大型号工程研制过程中跨层级、领域、工具以及团队的协作,将继续在MBSE方法本土化、设计一体化、验证协同化、工具集成化和应用体系化等方面继续开展深入研究与实践,具体如下。

构建基于模型的月球探测任务跨层级协同研制方法体系,实现MBSE方法本土化。结合探月领域的系统工程过程进行分析,形成本地化的深空探测任务MBSE方法论。

打通总体与系统间的模型传递和集成链路,实现设计一体化、验证协同化。重点研究基于模型的工程总体设计与验证技术,提升上下游需求模型协同、系统架构与专业模型协同、设计与仿真模型协同。

打造自主可控的并行协同环境,实现MBSE工具集成化。在方法与技术研究的基础上,充分发挥中

国在MBSE软件方面的技术能力,构建自主可控的月球探测任务体系设计及验证集成环境。

由重大型号任务牵引,工程总体推动,实现应用体系化。通过在工程总体以及探测器、运载器系统开展MBSE数字样机构建,对其流程、方法、技术、平台进行充分验证,将基于模型的并行协同设计技术推广应用于其他深空探测领域。

参考文献

- [1] INCOSE. INCOSE systems engineering vision 2020[R]. Seattle, WA: International Council on Systems Engineering, 2007
- [2] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al.* Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (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): 2577-2586)
- [3] INCOSE. Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities[M]. ZHANG Xinguo, trans. 4 th ed. Beijing: China Machine Press, 2017
- [4] ROQUES P. MBSE with the ARCADIA method and the Capella tool[C]//8 th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems. Toulouse: The French Aerospace Society, 2016
- [5] ERIC W B. OpenCAE case study: Europa lander concept[C]//2019 Annual INCOSE International Workshop. Torrance: International Council on Systems Engineering, 2019
- [6] NICHOLS D, LIN C. Integrated model-centric engineering: the application of MBSE at JPL through the life cycle[R]. Los Angeles: International Council on Systems Engineering, 2014
- [7] BINDSCHADLER D L, SMITH R R, VALERIO C P, *et al.* A Structured, model-based systems engineering methodology for operations system design[C]//International Conference on Space Operations. Deajeon: Korea Aerospace Research Institute, 2016
- [8] SHEELEY B, MALONE R, PALMER J, *et al.* MBSE implementation across diverse domains at the Boeing company[R]. Los Angeles: International Council on Systems Engineering, 2014
- [9] ZHANG Bainan, QI Faren, XING Tao, *et al.* Model based development method of manned spacecraft: Research and Practice[J]. *Acta Aeronautica et astronautica Sinica*, 2020, **41**(7): 023967
- [10] PARROTT E, TRASE K, GREEN R, *et al.* NASA GRC MBSE Implementation Status[R]. Washington: Goddard Space Flight Center, 2016
- [11] BERGER O, LABBENE S, DHAR M, *et al.* Introducing OSLC, an open standard for interoperability of open source development tools[C]//ICSSEA 2011. Paris: ICSSEA, 2011

(责任编辑: 宋雅娜)