

9-17-2021

Research and Application on Space-launching Mission Simulated Rehearsal Technology

Xiuluo Liu

Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

Wang Jia

Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

Wu Feng

Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

Liu Yang

Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Research and Application on Space-launching Mission Simulated Rehearsal Technology

Abstract

Abstract: High-density space launching tasks need the new requirements for space-launching mission rehearsal. *The new concept of space-launching mission simulated rehearsal* is proposed, the definition and content are presented in detail, and the technology research objective and key works are analyzed. *The technology implementation architecture is established* on five dimensions of the domain resources, developing tools, simulation modeling, fundamental function design and domain application. On the basis of simulation, *the working process* is given, the simulation software architecture is designed, and the simulation application tool is developed. The simulation results are also given, which validate the method and technology.

Keywords

space-launching mission, simulated mission rehearsal, virtual simulation, training simulation, test and launching process

Authors

Xiuluo Liu, Wang Jia, Wu Feng, Liu Yang, Ailiang Zhang, and Wang Min

Recommended Citation

Liu Xiuluo, Wang Jia, Wu Feng, Liu Yang, Zhang Ailiang, Wang Min. Research and Application on Space-launching Mission Simulated Rehearsal Technology[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(9): 2227-2233.

航天发射数字化合练技术研究与应用

刘秀罗, 王佳, 吴枫, 刘阳, 张爱良, 王敏

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 针对航天发射场高密度发射任务条件下对合练工作的新需求, 提出航天发射数字化合练的概念, 系统阐述了其基本内涵, 分析了数字化合练的技术实现目标和主要合练内容, 在业务资源、开发工具、仿真建模、基础功能和具体应用 5 个维度建立了数字化合练的技术实现体系, 结合典型案例开展了软件实现和仿真分析工作, 提出了数字化合练工作流程, 设计了软件实现体系结构, 研制了仿真应用软件, 并针对该任务下的数字化合练内容给出了仿真结果, 验证了方法与技术的可行性。

关键词: 航天发射; 数字化合练; 虚拟仿真; 模拟训练; 测发流程

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 09-2227-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0444

Research and Application on Space-launching Mission Simulated Rehearsal Technology

Liu Xiuluo, Wang Jia, Wu Feng, Liu Yang, Zhang Ailiang, Wang Min

(Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: High-density space launching tasks need the new requirements for space-launching mission rehearsal. *The new concept of space-launching mission simulated rehearsal is proposed, the definition and content are presented in detail, and the technology research objective and key works are analyzed. The technology implementation architecture is established on five dimensions of the domain resources, developing tools, simulation modeling, fundamental function design and domain application. On the basis of simulation, the working process is given, the simulation software architecture is designed, and the simulation application tool is developed. The simulation results are also given, which validate the method and technology.*

Keywords: space-launching mission; simulated mission rehearsal; virtual simulation; training simulation; test and launching process

引言

《军事辞海》^[1]中对合练的定义, 即: “诸军种、兵种、专业兵的部队、分队或不同岗位的人员进行的协同训练。目的是提高整体战斗技能、组织指挥水平和协同作战能力”。

航天发射任务合练一词是从军事术语中的合练演化而来, 都是针对不同岗位的人员, 目的是为提高整体、协同和组织能力。其中, 航天发射任务合练中的人员是由发射场系统、火箭系统、航天器

系统以及相关部门的人员组成, 合练的内容是围绕火箭、航天器等在发射场的相关操作展开^[2]。

“航天发射数字化合练”作为一个全新的概念, 是对发射场传统合练模式的创新, 指基于仿真技术、虚拟现实技术、人工智能技术、数字孪生等技术构建面向发射场合练流程的虚拟演练环境、虚实结合系统等, 实现基于实装、实物的合练向基于仿真技术的合练转变, 满足合练任务多样化、灵活性的需求, 全面提升航天发射场数字化建设的内涵。

收稿日期: 2020-07-06

修回日期: 2020-08-23

第一作者: 刘秀罗(1974-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为系统仿真。E-mail: glenliu@263.com

数字化合练的基础首先是构建航天发射场三维数字模型, 依托三维建模手段实现发射场场区、相关厂房、塔架以及其他设施设备的三维化; 其次, 是围绕合练需求建立数字化火箭、数字化航天器(卫星、飞船等), 同时引入虚拟人的运动、操作和行为模型, 并实现合练任务中的各类物理模型, 如有毒气体扩散模型、意外爆炸碎片散布模型等; 最后, 根据合练的内容建立发射场、火箭、卫星(飞船)等的属性、特征数据库, 满足数字化合练实时访问的需求, 同时建立合练评估指标体系, 为数字化合练应用到实际任务中提供定量支撑依据。

数字化合练是数字化航天发射场建设工作重要内容, 其主要特点包括:

基于仿真技术。仿真技术的应用是数字化合练的核心支撑技术, 也是其本质特点;

虚拟化。数字化合练的目的是在虚拟的环境或虚实结合的环境下完成合练的演练、训练与评估工作, 因此构建逼真的虚拟环境是其基本特点;

多系统、多专业综合。数字化合练涉及火箭系统、卫星(飞船)系统、发射场系统等, 合练内容覆盖多种岗位, 包括多个专业, 因此重视多系统、多专业应用技术的综合是数字化合练的重要特点。

目前, 国内外航天发射场虽然在现有的应用案例尚未提到数字化合练的概念, 但一些典型的应用充分体现了数字化合练的内涵, 发射场与相关研究机构都开展了这方面的工作^[3-4]。

国外方面, 美国指挥与控制技术公司与 NASA 研制的智能发射与靶场活动虚拟试验床(Intelligent Launch and Range Operations Virtual Test Bed, ILRO-VTB)项目具有典型的代表意义, 该项目由 NASA 下的肯尼迪航天中心、艾默斯研究中心以及 CCT 公司一起完成, 主要目的是通过建立发射场地面操作、发射、指挥与控制等各类模型, 模拟航天发射任务的各个环节, 为指挥、操作人员提供训练环境, 同时也能够用来研究新的发射、操作与指挥模式, 有利于研究人员建立高效的发射流程^[5]。

此外, 肯尼迪航天中心为确保航天飞机发射任务的顺利实施, 在发射团队训练与评估领域开展了相关仿真技术的应用, 已经研制的航天飞机地面操作模拟器(Shuttle Ground Operations Simulator, SGOS)就是用来完成航天飞机发射处理系统的测试、校验以及航天飞机发射团队的训练, 其中训练的对象包括航天飞机飞行乘组、发射任务控制以及发射处理团队等^[6-9]。

国内方面, 经过几年的发展, 作者所在团队已经基于仿真技术陆续开展了“北斗二号”试验卫星组装仿真系统、“嫦娥三号”探测器发射任务数字化协调仿真系统、长征 7 号运载火箭发射货运飞船数字化合练系统等的研制和应用工作, 这些系统在相关任务中发挥了突出作用, 初步探索了一条数字化合练的建设与应用途径。酒泉卫星发射中心在实际任务的牵引下, 研制了航天发射一体化仿真系统, 实现了发射场全系统、多岗位的协同模拟训练^[2]。

1 技术目标和合练内容分析

1.1 技术目标

作为优化航天发射任务测发流程、提升模拟训练水平、提高发射效率的有效技术途径, 数字化合练有着广泛的应用前景, 清晰地界定数字化合练技术的实现目标是推动这一技术深入发展, 形成科学、实用、完善的技术体系的必然要求, 主要目标包括:

(1) 建立面向数字化合练的统一技术框架是首要目标。发射场合练工作涉及多家单位、多个系统、多种专业、多类岗位, 需求的多样性与复杂性势必要求在技术体制上采用统一的框架, 以确保系统建设的规范性、可持续性。统一的技术框架包括几个方面的内容: 首先, 需要建立满足数字化合练应用需求的体系结构, 从基础资源(数据、算法、指标体系等)、模型、服务、中间件、标准规范以及应用功能设计等领域定义指导系统研制工作的技术

体系;其次,依据数字化合练的功能需求,建立不同应用领域的模型体系和模型描述规范;第三,构建完备的、满足合练需求的权威数据标准体系,收录发射场、火箭、卫星(飞船)等各系统的详细信息,为将来建成的各类系统提供真实的数据来源。

(2) 准确地定义数字化合练应用牵引下的系统组成,并给出各组成部分的应用方向、主要功能以及相互间的关系,是数字化合练的重要建设目标。实现这一目标有利于规范数字化合练的研制工作,从应用系统的角度提炼数字化合练的内涵,也为下一步各航天发射任务数字化合练在应用层的统一和技术重用提供了重要保障。

(3) 建立权威的发射场测发任务、测发流程描述机制是建立各种合练仿真模型的基础,也是实现合练工作从实际任务执行空间向数字化试验空间转换的关键环节。在这一目标下,需要完成适应不同合练需求的任务梳理与分类,设计面向不同测发任务的具体功能,同时建立各种测发任务活动的描述机制,为流程建模、评估指标体系的确立奠定基础。

(4) 建立科学、权威的数字化合练基础设施,共享数字化合练的技术成果是数字化合练发展的最终目标。基础设施主要包括:面向发射任务的各种数字化协调系统、测发流程模拟推演系统、测发任务仿真分析与评估系统等;包含模型、算法、基础数据、支撑工具等的资源库;航天发射任务数字化合练的理论方法、支撑技术、标准规范等。数字化合练技术的应用推广可以提升航天发射任务发射场各级指挥、操作人员的组织、协同能力和操作技能,可以促进发射场试验保障能力生成模式向信息化手段的转变,可以在发射场系统、火箭系统和卫星(飞船)等系统间建立起有效沟通、科学协调的先进手段。

目前,航天发射场数字化建设已经成为当前各发射场信息化建设的热点领域,作为数字化发射场的重要组成部分,数字化合练是当前应用十分迫

切、技术上切实可行的建设方向,航天发射场在数字化合练领域的成功应用和推广在很大程度上影响数字化发射场的建设水平。

1.2 数字化合练内容

数字化合练在技术上是发射场传统合练模式的一种创新,其建设内容与传统合练的基本内容相一致,主要包括各参试系统间的接口数字化协调、产品(含火箭、卫星、飞船等)组装流程推演与关键任务操作可行性验证、岗位操作训练、应急处置演练等。

(1) 接口协调是数字化合练的基本内容。接口协调是为实现火箭系统、航天器系统以及发射场系统间技术状态的接口关系确认,确保火箭、航天器进场后能够顺利开展各项测试活动,包括箭地(火箭系统与发射场系统)协调、器地(航天器系统与发射场系统)协调、器-箭-地综合协调等。接口协调工作的重要性主要体现在当产品状态较以往发生了明显变化,需要重新评估发射场现有保障能力是否满足变化后的需求。通过采用基于仿真的数字化合练手段,完成塔架、厂房、火箭、航天器以及场区相关设施设备的数字化建模,并基于接口协调的各种需求,建立面向接口协调评估需求的各种仿真模型、评估模型和应用工具,在虚拟的任务仿真环境下完成不同合练需求的分析评估、多系统测试活动模拟与综合研讨,提前发现系统间接口不匹配、不合理的地方,为后续真实任务实施提供科学保障。

(2) 产品组装工作是发射任务流程中十分突出的环节,也是数字化合练研制工作中需要重点开展的内容。围绕所属系统的区别,产品组织可分为火箭组装和航天器组装;根据组装场所的不同,又可以分为技术区组装和发射区组装。航天发射任务产品组装过程考虑要素众多,如空间关系、有无干涉、先后次序、工装设备选择、操作可达性等,是一个复杂的动态过程,通过建立高度逼真的数字化仿真空间,在虚拟环境下实现组装过程的模拟与评估,

能够节省采用实物合练所带来的大量人力、物力需求, 尤为重要的是能够节省发射场宝贵的任务时间。目前, 基于仿真技术来建立产品组装的数字化合练环境从技术上已经证明是切实可行的。

(3) 航天发射测发任务涉及多专业不同岗位人员, 参试人员的素质高低往往在很大程度上决定了实际任务能否顺利达到预期目标, 因此针对测发专业岗位的模拟训练构成数字化合练建设内容的有机组成部分。由于发射场测发工作岗位众多, 而且在分系统测试、匹配测试、总检查过程各岗位相互间还需要进行协同, 因此完成岗位模拟训练, 需要建立分布式仿真环境, 并实现训练模拟和导调控制于一体的、面向施训和受训人员的模拟环境, 为保证受训人员交互环境的真实性, 可考虑在仿真系统中采用半实物仿真技术, 受训人员的交互方式采用与实际操作相一致的硬件环境。建立测发操作岗位模拟训练环境, 不仅转变了发射场合练工作的保障模式, 也为发射场实际任务的执行提供了新的、基于信息系统的保障模式。

(4) 航天发射任务使命重大, 随之带来的风险也巨大, 发射过程存在一些风险性很高的环节, 如产品组装、加注供气、点火等, 如何科学应对这些环节可能出现的突发情况, 如燃料泄漏、着火, 乃至爆炸等事故, 而这些危害性、灾难性的事故是难以进行实际演练的, 因此将其纳入数字化合练体系下, 在数字化环境下演练各种突发事件的应急处置能力是必然的选择。建立应急处置演练数字化合练环境, 需要充分分析各种突发场景, 建立应急事件如燃料泄漏、扩散模型, 爆炸碎片散布模型, 爆炸效果毁伤评估模型等; 同时, 根据发射场的应急处置工作模式, 建立应急处置流程模拟与评估模型, 实现突发任务应急处置模拟演练, 充分保证发射场应急处置方向的有效实现, 美国 NASA 在载人航天发射上升段逃逸、基于仿真的风险评估方面开展了相关工作^[10-12]。

以上总结了航天发射任务数字化合练需要开

展的几方面的工作内容, 随着技术的不断发展和应用的深入, 数字化合练的内容还将不断进行充实。

2 技术实现体系

基于航天发射任务数字化合练的业务需求、技术特点, 综合考虑软件实现技术途径的可行性, 提出数字化合练的技术实现体系, 如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 数字化合练技术实现体系主要包括业务资源、开发工具、仿真建模、数字化合练基础功能与典型应用等内容。其中, 业务资源是整个技术体系的基础资源支撑, 为仿真建模提供各类输入和条件; 开发工具是完成数字化合练系统研制工作所需的各类开发软件和工具, 包括仿真开发软件(如 Unreal 4.0)、三维建模软件(如 3DMax)、数据库管理软件(如 MySQL、达梦等)、软件开发工具(如 Visual Studio 开发套件、UML 建模工具等); 仿真建模是基于数字化合练的应用需求, 以基础资源输入为条件, 依托相关开发工具完成的仿真模型描述, 模型的形式包括数学模型、逻辑模型、三维数字化模型以及实体-活动模型等; 数字化合练基础功能是在仿真建模的基础上, 利用相关开发工具, 针对数字化合练需求开发的各种基础功能和服务, 主要为数字化合练领域应用提供功能支撑。

需要说明的是上述技术实现体系只是给出了实现数字化合练所需的资源、支撑手段、功能设计、典型应用及其相互关系, 具体到每一类应用的软件实现体系结构时还需要依据各自特点, 从独立应用、B/S 应用或者分布交互式应用等模式中进行选择。

3 典型应用案例

针对多个航天发射试验任务开展了数字化合练技术研究, 涉及北斗导航、探月工程以及新一代航天发射场首飞任务等。以某运载火箭首飞任务数字化合练工作进行说明。

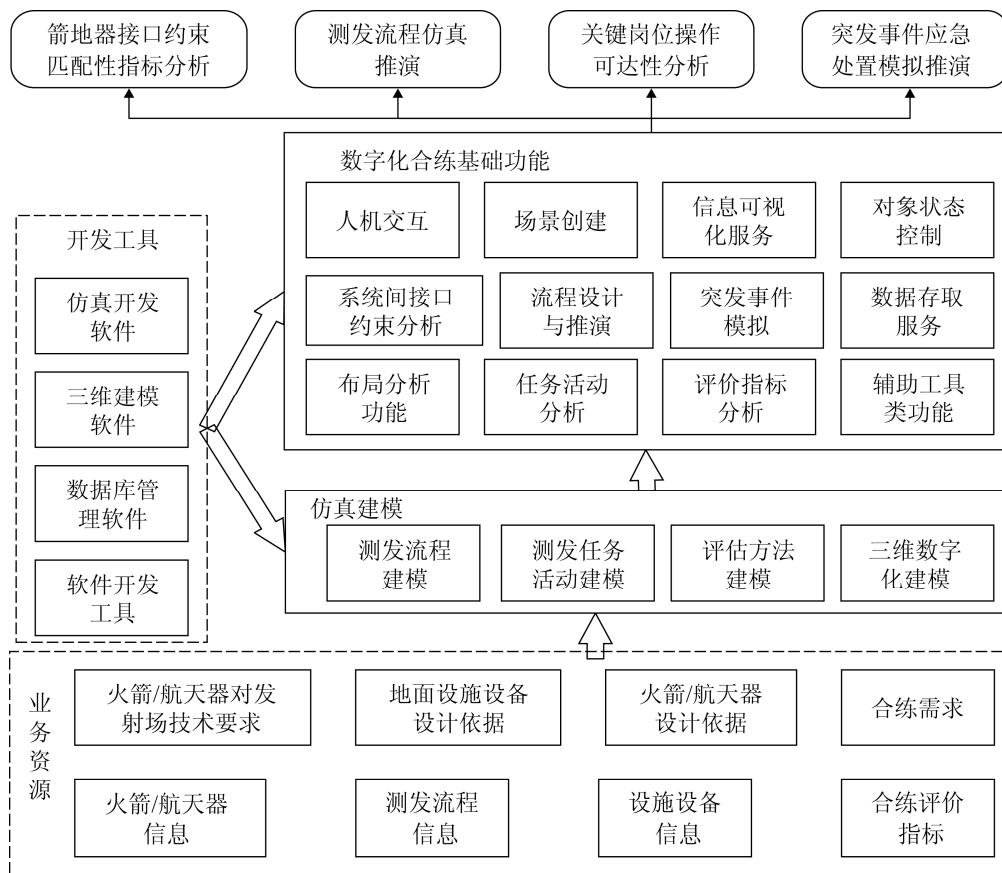


图 1 数字化合练技术实现体系

Fig. 1 Simulated space-launching mission simulated rehearsal technical implementation architecture

3.1 数字化合练工作流程

开展航天发射数字化合练工作,是在火箭、航天器尚处于研制过程、发射场地面设施尚处于设计阶段时,即通过建立数字化任务实施虚拟仿真环境,提前发现并验证任务实施过程中可能存在的不同步、不匹配的地方,工作流程:

(1) 数字化合练任务分析与合练项目确定

以某火箭首飞任务需求为牵引,结合发射场合练大纲编制工作,完成数字化合练工作的任务分析,确定主要合练项目和评价方法,数字化合练项目主要包括火箭垂直组装流程仿真推演、箭地接口数字化协调(含垂直总装测试厂房、发射塔架 2 个场所)。

(2) 开展仿真建模与三维数字化工作

主要完成火箭测发流程建模,地面操作活动建模,评估方法建模,以及完成发射场地面设施设备、

火箭系统及工装等的三维数字化建模,作为后续软件研制工作的模型基础。

(3) 研制数字化合练应用工具

基于合练需求、模型建设等工作,利用仿真开发平台,开发面向虚拟任务场景的火箭首飞任务数字化合练应用软件,实现合练场景创建、人机交互、接口协调、流程推演等功能,满足火箭数字化合练任务确定的各项合练内容分析与仿真评估。

(4) 开展数字化合练应用工作

基于火箭数字化合练应用软件,围绕箭地系统间接口匹配性分析、操作可达性分析以及测发流程推演等工作开展仿真应用,并给出合练评估结果,仿真结果分析见 3.3 节。

3.2 数字化合练应用软件实现

火箭数字化合练应用软件是以三维数字化仿真

场景为载体,以真实任务场景逼真再现为基础,主要组成要素包括任务场景三维数字化模型、合练任务仿真模型、合练评估模型以及人机交互等内容。

3.2.1 软件功能设计

针对数字化合练任务需求,研制数字化合练应用软件工具,主要实现人机交互、设备状态控制、信息可视化、工装添加控制、辅助分析、合练场景保存等功能。

3.2.2 软件体系结构设计

数字化合练应用软件主要依托三维虚拟任务

场景,通过提供任务场景设置、接口操作分析、各类信息服务以及辅助分析工具等手段为用户提供数字化合练业务支持,如图 2 所示。通过这种层次化体系设计,实现了软件功能、模型数据、开发工具间的松耦合,提升了数字化合练技术在不同层级的复用。

3.3 主要仿真成果

基于上述软件体系结构,结合该火箭首飞任务开展了数字化合练应用软件的开发和应用,软件运行效果见图 3 所示。

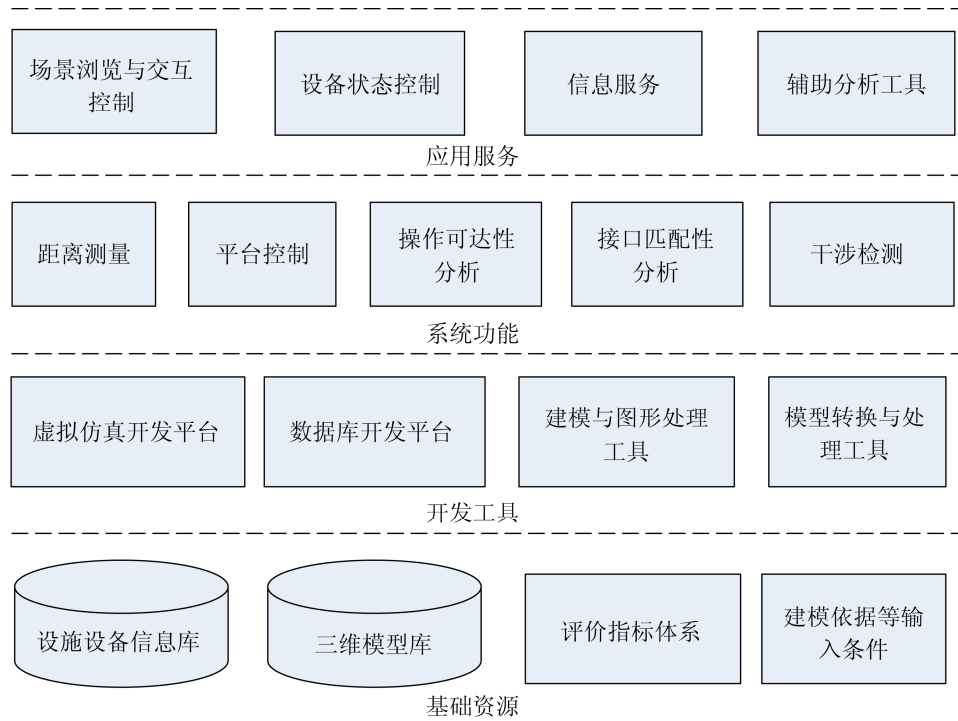
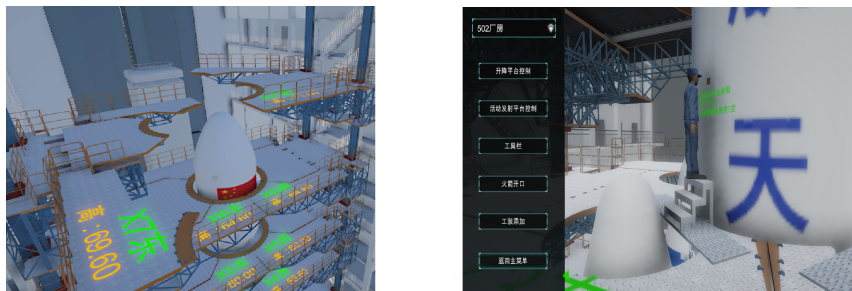


图 2 数字化合练应用软件体系结构设计

Fig. 2 Space-launching mission simulated rehearsal software architecture



(a) 仿真系统截图 1

(b) 仿真系统截图 2

图 3 某火箭数字化合练应用软件运行截图

Fig. 3 Space launching mission simulated rehearsal software run shot

针对该火箭的数字化合练项目主要包括技术区合练与发射区合练。技术区数字化合练主要在垂直总装测试厂房内完成, 包括各层平台人员操作可达性分析、摆杆合拢及打开状态与平台的协调性分析、摆杆小角度摆开状态与平台的协调性分析; 发射区数字化合练主要在发射塔架完成, 包括各层平台人员操作可达性分析、摆杆合拢及打开状态与平台的协调性分析、摆杆小角度摆开状态与平台的协调性分析、新增平台加注系统管路与摆杆管路高度协调性分析。

仿真工具重点完成针对该火箭二子级和三子级的 16 个开口和 10 个舱口的操作可达性进行评估, 给出了垂直总装厂房与塔架内工作平台高度、工装使用等建议; 针对活动发射平台摆杆合拢、打开状态, 验证了不同状态下与平台的干涉性, 并给出平台调整建议; 在发射区, 验证三级氢排管路、氢加管路、氧加、氧排管路以及二级煤油加注管路与对应摆杆高度的匹配性。

4 结论

航天发射数字化合练作为当前发射数字化场建设的重要内容, 同时也是推动航天发射任务试验能力生成模式转变的重要手段。本文基于仿真技术优化箭-地-器接口一体化设计工作, 提前发现问题、提前规避隐患; 建立了岗位操作模拟验证环境, 为任务参试人员提供了有效训练手段。

本文试图从概念的提出、需求和研究现状的阐述到研究目标和研究内容的确立等方面展开研究, 并结合具体型号火箭首飞任务开展应用研究, 力求在数字化合练领域摸索出一条满足科学指导、技术可行的发展道路。

接下来将继续深入开展数字化相关领域关键技术研究, 重点在我国发射场改扩建工作、执行新一代运载火箭、新型航天器发射任务等工作中, 结合实际工作逐步完善和丰富数字化合练的技术内涵、应用模式, 让数字化合练成为我国航天发射任务的有力助推器。

参考文献:

- [1] 郑文翰, 蒋顺学. 军事辞海[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2000.
Zheng Wenhan, Jiang Shunxue. Military Rhetoric[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Publishing House, 2000.
- [2] 崔吉俊. 航天发射试验工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
Cui Jijun. Space Launching Experimental Engineering [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2012.
- [3] 刘秀罗, 王佳, 尚国强, 等. 航天发射场数字孪生技术初探[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(增 1): 114-119.
Liu Xiuluo, Wang Jia, Shang Guoqiang, et al. The Primary Exploration to Digital Twin Technology of Launching Site[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(S1): 114-119.
- [4] 李澍, 郭金刚, 张立洲, 等. 运载火箭发射场数字合练技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2019(2): 22-26.
Li Shu, Guo Jingang, Zhang Lizhou, et al. Research of Launch Vehicle Digital Launch Process[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(2): 22-26.
- [5] Bardina J, Thirumalainambi R. Intelligent Launch and Range Operations Virtual Testbed (ILRO-VTB)[C]// 7th Conference on Enabling Technologies for Simulation Scien. Orlando: SPIE, 2003: 141-148.
- [6] Sepúlveda J, Rabelo L, Park J, et al. Implementing the High Level Architecture in the Virtual Test Bed[C]// 2004 Winter Simulation Conference. Washington, D.C.: IEEE CS, 2004: 1444-1451.
- [7] Cary J Peadar. Using Simulation for Launch Team Training and Evaluation[C]//2005 Winter Simulation Conference. Orlando: IEEE CS, 2005: 1281-1290.
- [8] Bardina J, Rajkumar T. Modeling and Simulation of Shuttle Launch and Range Operations[C]// 18th European Simulation Multiconference. Magdeburg: Society for Modelling and Simulation International, 2004: 243-249.
- [9] Bardina J, Rajkumar T. Distributed Web-based Expert System for Launch Operation[C]//2005 Winter Simulation Conference. Orlando: IEEE CS, 2005: 1291-1297.
- [10] Ken Gee, Lawrence S L. Launch Vehicle Debris Models and Crew Vehicle Ascent Abort Risk[C]//2013 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Orlando: IEEE, 2013: 1-5.
- [11] Lawrence S L, Mathias D. Blast Overpressure Modeling Enhancements for Application to Risk-Informed Design of Human Space Flight Launch Abort Systems[C]//2008 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Las Vegas: IEEE, 2008: 80-85.
- [12] Manning T A, Lawrence S L. Fragment Acceleration Modeling for Pressurized Tank Burst[J]. Journal of Spacecraft and Rockets (S1533-6794), 2017, 54(3): 755-768.