

航天发射场建设技术革新研究

刘党辉, 蔡远文, 李岩, 段永胜

航天工程大学宇航科学与技术系, 北京

收稿日期: 2023年1月25日; 录用日期: 2023年2月24日; 发布日期: 2023年3月6日

摘要

随着可复用运载器的快速发展, 未来太空通信、太空遥感、太空试验、太空旅游、星际往返等太空应用业务将急剧增加, 现有航天发射场难以满足不断增长的发射需求。目前, 世界航天国家纷纷加强航天发射场建设, 大力提升航天发射效能。文章分析国外航天发射场建设经验, 结合我国航天发射场建设新需求, 主要探讨发射场通用设施设备、信息业务系统、自动操作、智能信息处理、数字工程、新型发射模式等相关技术革新措施, 为后续航天发射场的建设发展提供借鉴。

关键词

航天发射场, 通用技术, 智能技术, 数字工程, 新型发射模式

Research on Technological Innovation for the Construction of Space Launch Sites

Danghui Liu, Yuanwen Cai, Yan Li, Yongsheng Duan

Department of Aerospace Science and Technology, Space Technology University, Beijing

Received: Jan. 25th, 2023; accepted: Feb. 24th, 2023; published: Mar. 6th, 2023

Abstract

With the fast development of reusable launch vehicles, space application businesses, such as satellite communication, space remote sensing, space experiment, space travel, interstellar round trip, and other applications, will increase dramatically, and existing space launch sites will not meet the fast increasing launch demands in the future. Some space countries began to reform existing space launch sites or build novel space launch sites to improve launch efficiency. Based on abroad experiences and domestic requirements from the construction of space launch sites, this paper inquired into some technological innovation measures for the construction of space launch sites, such as gener-

al facility and equipment, information business system, automobile operation, intelligent information process, digital project, and novel launch mode. These can provide some references for the subsequent construction and development of space launch sites.

Keywords

Space Launch Sites, General Technology, Intelligent Technology, Digital Project, Novel Launch Mode

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着低成本、快速、灵活、可靠的可复用运载器的发展，太空通信、太空遥感、太空试验、太空旅游、星际往返等太空应用业务将急剧增长，现有发射场和发射能力将难以满足发射新需求，采用新技术推动航天发射场建设发展已成为当前发展趋势。近年来，美国为促进商业航天发射领域的发展，允许 SpaceX、Virgin Galactic、Blue Origin、Rocket Lab、Relativity Space、Astra 等公司建设私营发射场，或租赁已有发射场，并计划建设“清洁发射场”（仅含发射场基本设施设备，其他专用发射测控设施设备可移动、可替换，便于不同发射公司共享发射场），大力发展移动发射设施设备，全面构建包含小、中、大、重等型运载火箭发射、探空火箭发射、新型运载器关键技术试验验证等不同任务的发射场体系，满足未来多样化的军民商发射需求。俄罗斯也大力推进东方航天发射中心二期建设，正在计划恢复海上发射系统，英国、印度、印度尼西亚等国家也计划建设新发射场[1]。我国现有酒泉、太原、西昌、文昌四个发射场，以及山东海阳海上航天发射港，已具备一定的发射场规模和发射能力。2022年3月29日，太原卫星发射中心在新建的发射工位成功发射 CZ-6A 火箭，实现了我国“智慧发射场”的“首战”，对未来中国航天简化发射流程、提升发射效率、增强发射稳定性及安全性具有重大意义[2]。2022年7月6日，我国开工新建海南商业航天发射场，预期2024年实现常态化发射。即使如此，仍难以满足未来快速增长的发射需求[3]。

随着大数据、云计算、人工智能、边缘计算、物联网、先进传感、精密制造、新型材料等新技术的飞速发展和应用，为发射场建设提供了很好的支撑。接下来文章主要从航天发射场设施设备通用化、业务管理系统信息化、操作自动化、信息处理智能化、数字工程、新型发射等方面探讨相关技术革新措施。为满足未来大量发射需求，需要大力推动发射场技术革新，构建具有信息化、智能化特征的新型发射场，全面提升地面设施设备标准化、通用化、集成化水平，减少对地面人员和设备设施的依托，简化设施设备，确保具备廉价简洁、快捷高效、安全可靠的快速发射能力。

2. 设施设备通用化技术

随着新型航天运载器技术的快速发展，未来对发射场的保障需求进一步降低，将大幅减少测试发射操作、指挥和保障工作量。通过设施设备的通用化设计，进一步简化设施设备的特殊性和复杂性，减少设备类型和数量，提高操作、指挥和勤务保障的效率。

2.1. 设备通用化设计

为提高发射效率和发射任务适用性，要求设备具有通用化特点。在发射场建设论证和设计阶段，应

充分考虑设备的通用化要求,统一设计,统一定制生产,确保各设备的一致性。通过采用设备通用化设计技术,大幅减少非标设备数量,达到大幅简化原非标产品备品备件的采购、储备、维修、更换等保障需求。除特殊要求,一般要依据相关标准对设备进行通用化设计,并应尽可能采用国际标准或国内行业标准,特别是机械接口、电气接口、气液接口、网络协议、数据格式、操作接口、评判标准等,遵循统一的标准规范是通用化设计的前提条件。针对运载器与发射场设备的个性化接口,按照相关标准重新设计通用化的电气、机械等接口,采用具有 PXI 和 LXI 等通用接口的测发控设备、通用化的网络通信协议、统一的人机交互界面、统一的软硬件体系架构等,降低使用和维护保障难度。

以某系列运载火箭地面测试发射控制系统为例,按照测发控一体化设计规范,构建通用测试体系架构,加强前端信号采集和后端处理分析系统的通用化,通过灵活配置可以满足不同发射任务需求,如图 1 所示。

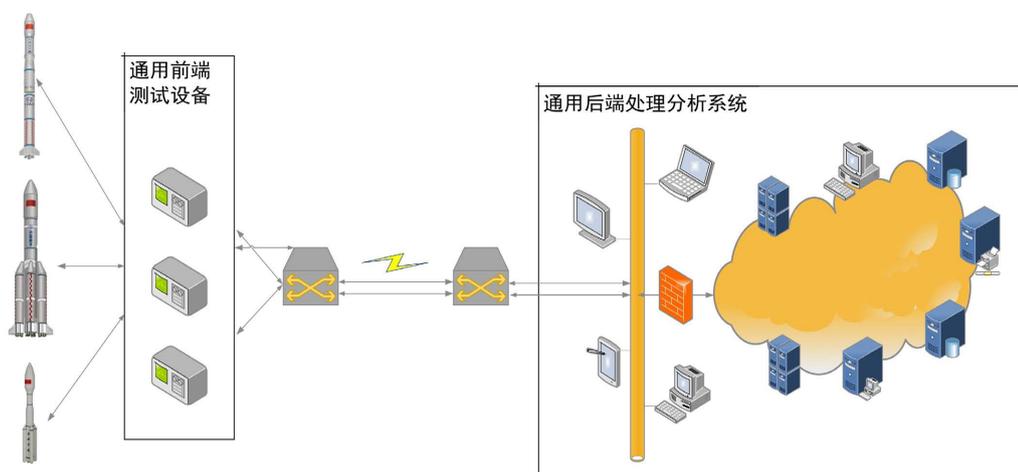


Figure 1. The general ground test launch control system architecture of a series of launch vehicles
图 1. 某系列运载火箭通用地面测试发射控制系统体系架构

2.2. 设施通用化设计

对发射场的设施也应加强通用化设计,使其可以满足多个不同型号火箭的储存、装配、发射、保障等操作。特别是未来运载火箭将大多采用“三垂”、“三平”发射模式,在技术厂房内进行组装、测试的时间较长,在发射工位快速完成加注发射。技术厂房作为主要设施,内部的运输、行吊、水、电等设计需要满足多发多型运载火箭的并行检查、装配和测试等工作。运载火箭转运平台可采用铁轨轮式、公路轮式、履带等通用化方式。发射塔架的设计也要适应不同运载火箭的测试、加注和发射控制等需求,提高发射工位的利用率,避免独占专用发射工位而造成资源浪费。

对于发射设施,采用模块化设计是确保通用化的一个主要方式。在综合需求分析基础上,在设施设计要求约束下,根据设施结构、功能等层次化特点,按照系统性、相似性、标准化等原理统一规划设计设施功能模块,通过模块化组合方式提高设施的通用化设计程度,是解决设施功能性能优化、更新换代、运行控制、管理保障等的主要方式。

3. 业务系统信息化技术

航天发射业务数据量大、系统复杂、部署分散,采用大数据、云计算、高速光通信等信息化新技术,实现发射场各类业务的一体化管理、实施和保障等,大幅提升航天发射效率,降低成本。

3.1. 航天发射场大数据应用技术

航天发射场是一个信息系统高度密集的试验场，每次发射任务的顺利实施都离不开信息系统对数据的采集、处理和利用，而这些数据越来越呈现出数据量大、种类多、产生速度快等特点。航天发射场数据类型包括：设备维护、产品测试数据；任务组织管理数据；测控设备的测量数据；场区地面保障数据；气象观测数据；数据处理中心的中间结果数据；指挥显示数据；网络运行监控数据。航天发射任务数据呈现出如下特点：数据种类多，数据量大，主要以文件归档方式存储；测量数据实时性强，数据采样频率高，采样点多；火箭测量参数之间关联性强，等。要可靠、快速地处理航天发射场各系统的海量数据，实现数据深度挖掘、智能应用，首先要建立起航天发射场大数据应用机制、应用标准和应用平台[4] [5]。

1) 建立发射场大数据应用机制。一是构建统一的发射场数据管理平台，通过规范化的数据采集、存储、访问与管理，简化各应用之间的数据迁移。二是构建统一的应用服务架构，以标准化的协议接口注册、发布、接收数据，支持跨网络跨系统的数据交互。三是提供统一的业务实施规范，包括采集数据、制作报表、绘制图形、关联分析、数据挖掘等业务的实施规范。四是建立完善的安全机制，包括数据的认证、授权、审计、映射等功能，以及应用业务、数据交换、数据处理、数据访问等服务的可靠性。

2) 建立发射场大数据服务标准。可采用面向服务的体系结构(SOA)来管理、提供数据服务。数据服务提供者向数据管理与服务平台注册能提供的数据服务；数据管理与服务平台发布系统的所有数据服务；数据应用系统查询数据管理与服务平台发布的数据服务，查找、发现满足其需求的数据服务；数据服务者根据服务描述，绑定、调用数据服务。通过粗粒度、松耦合屏蔽复杂业务逻辑，降低数据管理与服务平台的复杂度，从而提高系统可靠性。

3) 建立发射场大数据应用平台。数据管理与服务平台体系结构可采用“五横两纵”架构，“五横”分别为源数据层、数据获取层、数据存储层、分析服务层和访问控制层，“两纵”分别为安全管理和系统管理，为数据的采集、处理、存储、分析、访问，以及数据管理和数据安全提供统一的应用平台，如图2所示。

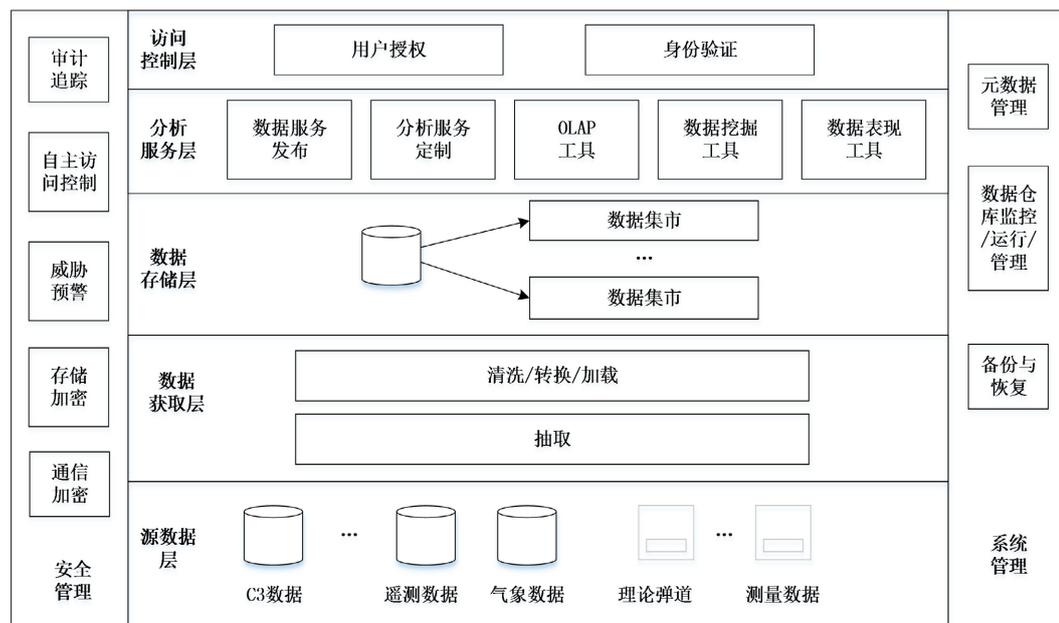


Figure 2. Data management and service platform of space launch sites

图2. 航天发射场数据管理与服务平台

3.2. 航天发射场云计算应用技术

云计算技术的不断推广与应用,将对航天发射场信息网络产生革命性影响。未来,航天发射场网络体系架构将向更安全可靠、更加融合以及更具弹性的方向发展,主要体现在网络体系高度融合,信息处理逐步云化、综合化,以及计算、存储等服务能力分散化几个方面。为解决长期以来发射场形成的信息系统条块分割明显,各系统间信息共享、交互能力弱等突出问题,可按照先实现数据处理能力云化,再逐步实现测发控终端云化的渐进策略,最终实现基于云计算和大数据的网络体系架构。这种架构采用统一的云架构部署方式,可避免信息系统重复性建设,有效防止信息烟囱和信息孤岛,提升数据共享与综合应用能力,为信息系统之间的互联、互通及互操作能力奠定基础[6]。

基于云计算和大数据的网络体系建设,需要从架构、运维和管理等方面综合考虑[6]。体系架构上遵循“开放架构,分层解耦”的设计理念,采用 OpenStack、KVM、Docker 和 Hadoop 等云计算、大数据的开放架构,提高平台异构能力;云平台相关组件提供开放标准 API,支持用户灵活调用;平台分层解耦,实现云服务能力的高扩展性。运维上采用多服务集成及统一运维的方式管理 IaaS、PaaS 及 SaaS 云平台服务,给予用户方便一致的服务体验;统一基础设施、云计算、大数据和应用服务等多平台的运营维护在提高运维效率的同时,降低管理成本。管理上遵循“物理分散,逻辑统一”的理念,建立与组织架构相匹配的云管理模型,采用全局管理和本地管理相配合,物理数据中心、虚拟数据中心相结合的方式,实现多数据中心统一管理,降低多数据中心管理的复杂性,提高资源使用的灵活性。

4. 自动化操作与智能化信息处理技术

面对常态化高密度的发射需求,发射场设施设备自动化、智能化程度较低已成为严重影响发射效率的主要因素。借鉴国外经验,在地面测发控系统中大量应用自动化、智能化技术,可显著提高发射效率和成功率[7]。

4.1. 运载火箭的自动装卸和组装

运载火箭及载荷产品运输到发射场后,在少量人员监控保障下,由自动化的设施设备进行进场装卸操作,然后自动转运到组装或存储设施,再利用自动化机械设备进行舱段、部件或载荷的快速高效组装,以及运载火箭和载荷的自动提升或举升、对接、组装和校准。采用自主搜星、对标和瞄准设备后,可取消瞄准设施。

4.2. 运载火箭的智能测发控

为适应多型运载火箭的发射,构建独立的一体化智能测发控系统,提供多模式的智能测发控接口。以智能故障诊断为基础,具备自主测试、自主诊断能力,通过数据包和阈值对运载火箭电气系统状态自动进行判断,对动态测试数据进行自动评估与预测,如图 3 所示。

通过在设施设备内大量布设智能传感器,实时采集测发控系统状态,结合研制生产过程的数据,基于测发控系统获取的大数据信息,通过数据挖掘和模型构建,利用知识库和专家系统对运载火箭、地面测发控设备、设施等状态进行智能监控。基于任务知识库,智能评测运载火箭地面测试与飞行数据、测发控和保障设备的相关数据;建立故障库和模型库,实现智能化的故障诊断与预测。利用大数据挖掘分析技术快速提炼总结任务规律,对后续任务的改进优化提出指导性意见。相关数据和评估结果,反馈给产品研制部门改进优化产品,提供鉴定部门作为产品鉴定或定型评定的依据。构建各级可接入的远程专家系统,实现后方多领域专业专家团队实时参与现场火箭、设备系统的技术保障工作。

对于运载火箭的测试发控,重点发展基于数据驱动的智能测试技术,需要重点加强智能传感器、机

内测试(BIT)、多源信息融合等技术的研发与应用, 满足未来的智能化一键测试、自主测试、并行测试等多种测试任务需求[8], 如图4所示。

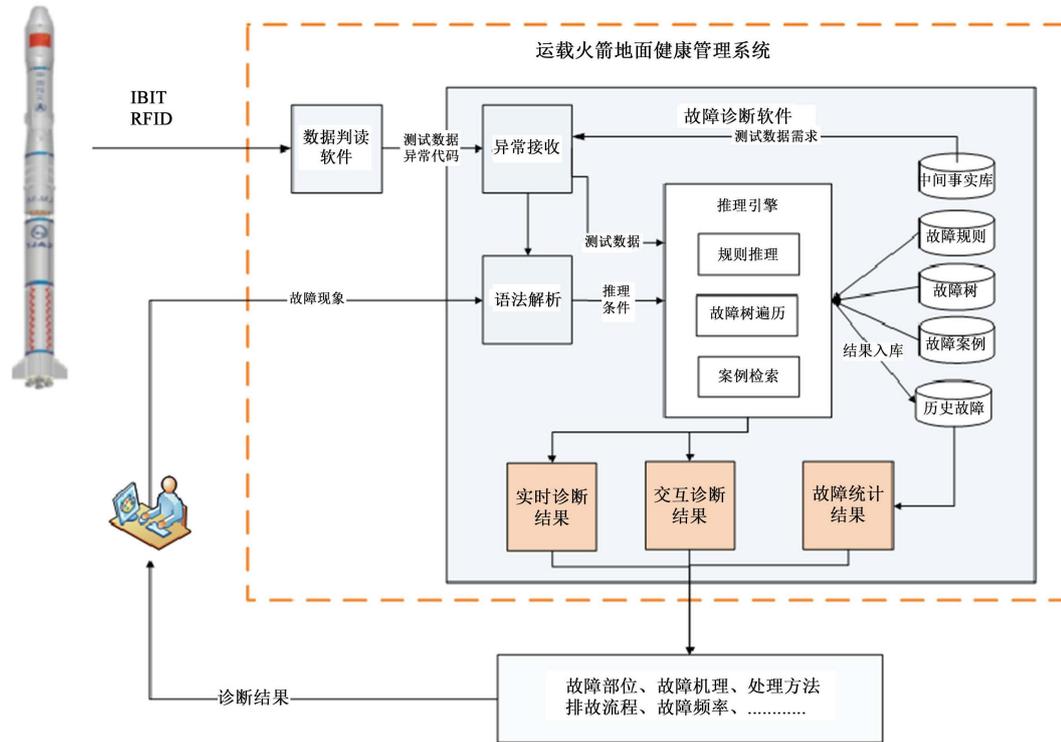


Figure 3. Launch vehicle ground health management system
图3. 运载火箭地面健康管理系统

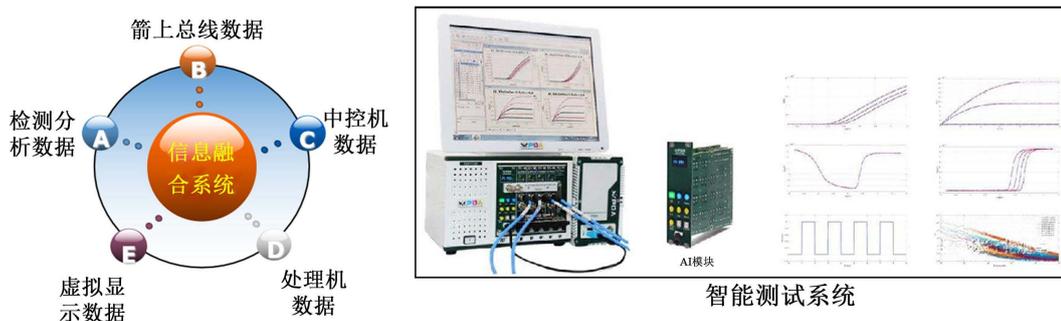


Figure 4. Intelligent test system
图4. 智能测试系统

4.3. 运载火箭的智能加注供气

通过智能控制策略和智能传感技术, 按照统一的机电接口标准, 智能加注供气由机电一体设备结合自动控制、智能决策技术自主与运载火箭对接和脱插, 在测试工位上对运载火箭上级或载荷按设定部位进行吹除、加注、供气, 具备自动加注、泄回, 实现紧急情况自动处置, 实现智能化控制。

以无人值守加注发射为例, 可采用机器人集群协同控制技术实现运载火箭加注自动对接、自动加注与自动脱离。其中, 加注对接机器人可搭载大负载机械臂和激光测量系统, 负责与运载火箭接口加注对

接；智能监测机器人可搭载高清、红外、立体视觉以及泄漏监测仪等多类传感器，负责抵近监测；应急处置机器人可搭载灵巧机械臂和操作末端，负责应急辅助脱落和泄漏应急处置。

4.4. 运载火箭发射的智能保障

航天发射保障是一项复杂、耗时的工作，智能化保障将会大大提高保障效率。采用智能设施技术对推进剂、特种气体的储存运输，以及供水、消防、供配电、空调等进行智能化管理，并加强智能化安防设计。设置智能传感器，收集并监控发射工位健康状况，确定地面测发设备检修周期、剩余寿命，定期更换或维修，提高维修保障效率。

对于发射工位的一些设备提供免维护、可拆运自动结构和可行走机构，解决发射工位许多设施设备露天存放、维护代价高的问题。同时，通过大数据和智能分析技术，可对重要设施设备的工作状态进行评价，对结构的损伤和危险状态，进行预警和可预见性维护，建立塔架、导流槽等重要设施状态的智能监控体系。

未来需要综合运用物联网、大数据、人工智能等新技术，建立智慧发射场系统，实现发射区无人值守，发射任务和设施设备的智能化管控与运维等。

4.5. 运载火箭发射的智能指挥

按照航天器入轨需求，基于可用航天发射场、运载火箭以及环境变化，自主对发射任务规划、航区规划、子级落区选择、运载火箭飞行安控等工作进行决策，形成优化的发射计划和发射方案，达到飞行任务最优。同时，可以支持地面和发射前后方指挥、操作和保障人员，能在同一或不同发射场实施多个不同类型的任务。

例如，可通过增加智能化的边缘计算设备，比如人脸识别探头，减轻中心节点压力；增加智能化的物联网接入设备，提高感知设备或者监控子系统的接入能力；提供协同控制机制和平台，使得多个子系统可以根据场景自动完成联动控制；提供数据挖掘分析平台及工具，提高辅助决策的能力；提供多种可视化互动展示的平台和工具，提高移动性、互动性、直观性；提供智能化的集中管理应用，提高各专业高效运转和精细化管理。

5. 数字工程技术

随着计算机技术的发展和应用，数字工程已成为研究、设计、制造、应用、保障等方面的一项核心技术。数字火箭、数字发射场、逻辑发射场、智慧化发射场、数字孪生发射场等都以数字工程技术为基本支撑。

5.1. 虚拟样机技术

虚拟样机技术是数字工程的核心技术之一，是在 CAD/CAM/CAE 和物理样机的基础上发展起来的，其基础为多体系统动力学、结构有限元理论、其他领域物理系统的建模与仿真实论等。它以计算机仿真和建模为依托，实现对产品的设计、使用性能等进行精确、量化分析与预测，从而达到设计和维护使用管理的最优化。

我国自 CZ-5 开始，在 CZ-6、CZ-7、CZ-8、CZ-11 等运载火箭技术研究、产品设计、生产制造中采取了虚拟样机技术，大大提升了产品的交付能力。在航天发射场的脐带塔等关键设备三维可视化建模、基于有限元法的回转平台结构静动特性分析、电缆摆杆等复杂电气控制设备虚拟仿真与训练系统、脐带塔封闭区温度场建模与评估等方面获得成功应用。如对于三维结构可采用 Pro/E 建模，并实现对大量的零部件模型和装配体模型的高效组织、管理、存储和使用，对脐带塔回转平台等结构的静动特性可采用

有限元软件平台 Nastran 进行分析建模,对脐带塔回转平台、电缆摆杆控制系统可采用 Visual Graph 图形插件构建虚拟电控仿真系统,对于脐带塔封闭区温度场可采用 Fluent 软件建立数值仿真模型[9]。虚拟样机技术未来需要解决的主要问题是:

- 1) 需要折中考虑模型的精确性和复杂性。考虑到建模工作量、模型仿真和显示等对计算机资源的需求等,在实际工程中往往需要对模型适当简化,但不影响运行和仿真结果的准确性和精确性。
- 2) 需要解决不同系统之间的信息交互问题。虚拟样机技术的应用涉及使用很多不同软件和技术构建的各种模型和仿真分析结果,只有这些模型和分析结果能够方便、快捷地实现信息交互,才能真正提高工作效率。

5.2. 数字孪生发射场

数字孪生发射场是指以数字化方式创建真实发射场的虚拟模型,借助数据、模型等模拟物理对象在现实环境中的行为,并通过虚实深度融合、交互实时反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理对象增加或扩展新的能力。数字孪生发射场已在发射场建设、任务实施、日常运维等阶段发挥了很好的效用[10][11]。数字孪生发射场需要解决的几个关键技术如下。

- 1) 信息采集技术。信息采集是构建数字孪生发射场的重要手段,主要包括发射场的静态数据和动态任务数据采集。信息可来源于各种文档、历史数据、传感器等,也可来自于发射场各业务网络,或者人工输入的信息等,采集方式必须高效、自动化。

- 2) 数据管理技术。数据管理是构建数字孪生发射场的关键基础,数据包括发射场设施、设备等设计、建设、使用、维护等全寿命信息,也包括海量数据的存储、访问和管理技术,确保数据的真实性、有效性、可用性、规范性是把控数据质量的关键。

- 3) 实体建模技术。发射场设施设备实体建模是构建数字孪生发射场的核心工作。为了确保真实设施设备与虚拟数字设施设备在结构、功能、性能等方面保持“互为镜像”,需要解决高逼真度几何建模和高准确性数学建模问题。一是采用多源模型处理技术,火箭、地面设备和设施采用的数字化设计软件与建模方法各不相同,有 Pro/E、UG、3DMAX、STP、CATIA、DELMIA 等多种格式,不同来源的三维模型间存在着较大差异,必须建立一种适用于多源异构模型的处理方法,确保设计模型转换为仿真系统的可用模型。二是采用模型轻量化技术,数字孪生发射流程涉及火箭、地面设备和多个系统,模型数据量巨大,即使在高性能计算机中,显示速度一般也较慢,直接操作难以实现,需要通过冗余模型清理、收缩包络简化处理以及建模精度分级控制等方法实现模型轻量化。三是基于三维环境的虚拟布局技术,运载火箭在活动发射平台上前端设备间内安装火箭多个系统地面设备,房间内产品多、空间紧张、接口复杂,依靠传统图纸协调的方式无法准确得到地面电缆敷设路径及长度信息,可基于三维环境提前对发射台进行虚拟布局预示与优化,实现精细化设计。四是需要建立高精度、高准确度的数学模型,根据不同用途,可以基于物理、化学等自然科学原理和定律进行建模,也可以基于历史实验数据进行建模,还可以基于工程经验建模,但要确保模型适用性强,模型准确性、精确性满足要求,数字模型与物理实体的结构和状态保持高度一致。

- 4) 应用服务技术。应用服务是构建数字孪生发射场的最终目标。在发射场信息采集、数据、模型的基础上,可根据需要开发一系列应用服务,包括管线综合分析、流程仿真推演、数字化合练、发射安全分析、岗位模拟训练、健康监测与预测、应急处置演练等,使得数字孪生发射场与真实发射场建立起紧密的关联,从而为发射场的设计优化、任务验证、状态监控、行为预测、平行试验、人员训练等提供支撑。

6. 新型航天发射技术

小卫星低成本快速发射和可复用运载器快速发射是未来发展趋势之一,研究人员正在探索、试验一

些新型发射技术，如磁悬浮电磁助推发射、地面旋转发射、核能发射等，当然也需要建设相应的新型发射场设施设备。

6.1. 磁悬浮电磁助推发射

磁悬浮电磁助推发射是利用磁悬浮技术使航天运载器与轨道脱离接触以消除摩擦阻力和振动，并利用电磁推进技术提供强大的加速能力，将航天运载器在地面加速至超声速以上。磁悬浮电磁助推发射系统，可看作是航天运载器可重复使用“零级”助推器，可以降低航天运载器起飞质量，降低发射成本，提高发射效率[12]。如图 5 所示，磁悬浮电磁助推发射采用“直线斜坡”(60°倾角)轨道形式的陆基发射方式，轨道总长度 1500 m，轨道垂直高差 1294 m；分离速度 1.2~1.5 Ma，运载器质量为 20 t，发射总时间 2 h。2023 年预计发射成本降到 7000 美元/kg 以下，2027 年前通过一箭多星方式进一步将发射成本降到 4000 美元/kg 以下。

可根据发射需求，设计相应的发射设施。运载器弹出后点火，不需要对系统进行维护维修，充满电后马上可以执行下一次发射。具备每天执行 10 次以上连续发射能力，累计实现每月数百次，每年数千次发射任务。

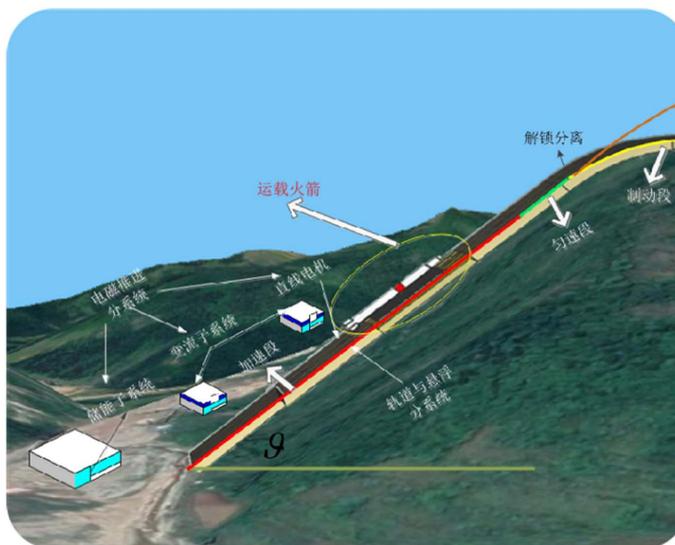


Figure 5. Concept map of magnetic levitation electromagnetic booster launch
图 5. 磁悬浮电磁助推发射概念图

6.2. 地面旋转发射

类似于美国 Spinlaunch 的旋转发射方案，地面旋转发射装置由旋转加速发射装置和运载器组成[13]。任务开始，首先将运载器可靠固定在发射装置中的离心机上，然后发射装置中的抽气机工作以实现真空环境，利用离心机旋转加速运动将运载火箭加速到预定发射速度，运载火箭迅速脱离离心机，由旋转运动转为切向直线运动，从发射装置出口发射，以一定速度和仰角发射，运载火箭到达一定高度后点火飞行，如图 6 所示。

在发射场建设直径 100 m 的大型真空结构作为发射装置，主要部件包括钢结构真空腔、主电机、旋转臂、发射通道和运载火箭释放装置。钢结构真空腔利用真空泵，能够在 1 h 内达到中等真空水平；离心机在 90 min 内加速到 450 r/min；旋转臂一端安装运载火箭，另一端安装有配重，在释放运载火箭的同

时释放配重；发射通道内采用高速机械气闸，配有声波阻尼板；运载火箭释放装置采用具有失效安全保护的机械分离系统，分离时间的精度能够控制在毫秒级；离心机(发射装置)和地面夹角为 30° 。

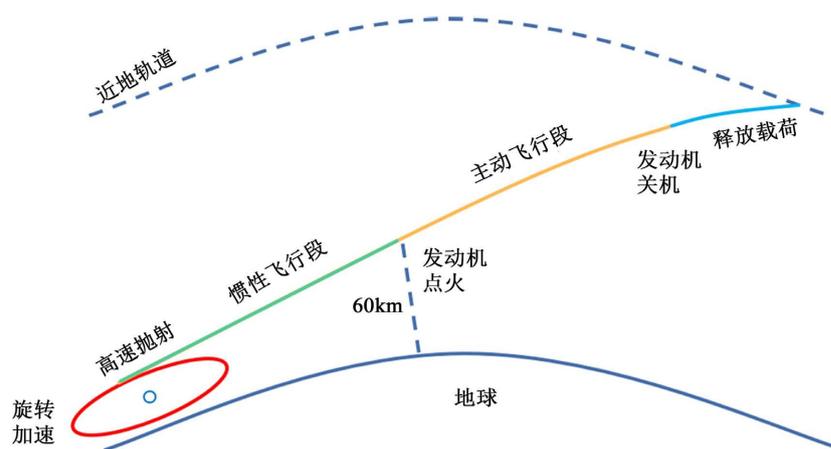


Figure 6. Schematic diagram of rotating launch
图 6. 旋转发射示意图

6.3. 核能推进发射

目前使用化学能的运载火箭发动机比冲不高，导致运载火箭体积大，运载能力有限，发射成本高。采用核动力运载火箭，无论在动力上还是续航能力上，都比传统运载火箭有着无可比拟的优势，具有很好的发展前景。核聚变运载火箭采用等离子体喷射流技术，将等离子体注入运载火箭发动机喷嘴，在各层金属环(锂金属)结构的压力室内被压缩，将能量突然释放出来，使得锂金属在磁场控制下的喷嘴区蒸发、电离，以此产生使运载火箭前进的动力。采用核聚变引擎，地球到火星的飞行时间将从通常的 250 天缩短到 30 天，并且能够解决燃料问题[14]。

新一代热核运载火箭的安全系数已大大提高，其反应堆结构比陆基核电站的规模要小很多，铀-235 的纯度要求更高，达到 90% 以上，在高比冲要求下，发动机核心温度将达到 3000 K 左右，需要耐高温性能极佳的材料。在发射场，则需要建设具备核燃料运输、储存、准备、测试、处理的一系列设施设备，满足核能运载火箭发射需求。

7. 小结

航天发射能力的提升源于运载技术和发射技术的共同进步，未来我国航天发射场建设应大力推动相关新技术的应用：一是逐步提高发射场地面设施设备通用化的整体设计水平，提高发射实施设备的共享性；二是加强发射场大数据和云计算技术的应用，提高发射场业务系统的信息化水平；三是提升运载火箭装配、测试发控、加注、保障和指挥的自动化、智能化水平，提高发射效率；四是大力推动数字工程技术的应用，利用数字化手段提高任务设计、实施、管理和维修保障的能力；五是围绕未来新型航天发射方式，探讨相关发射设施设备的建设需求和模式，针对关键技术开展技术攻关。随着这些新技术的应用，发射效率必将大幅提升，并将有力推动航天产业的快速发展。

参考文献

- [1] 王洪飞, 房立晶. 国外航天发射场建设动态概览[J]. 国际太空, 2021(6): 23-27.
- [2] 路俊, 刘桥明, 张继成, 等. 我国首个“智慧发射场”首战告捷——太原卫星发射中心执行长征六号改任务纪实[N].

- 解放军报, 2022-04-29(011).
- [3] 肖建军, 董二奎. 我国航天发射场面临的形势与未来发展探讨[J]. 中国航天, 2015(6): 11-17.
- [4] 程静, 张逢贵, 庄柯. 大数据与航天发射场[J]. 靶场试验与管理, 2013(6): 1-8.
- [5] Dong, W., Xiao, L.T., Niu, S.F., Niu, J.J. and Wang, F. (2019) Application Research of Big Data for Launch Support System at Space Launch Site. *CSAE'19: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Application Engineering*, Sanya, 22-24 October 2019, 1-6. <https://doi.org/10.1145/3331453.3360973>
- [6] 蔡红维, 谢福锋, 胡清忠. 基于云计算的航天发射场业务网络体系架构[J]. 国防科技, 2020, 41(4): 111-116.
- [7] Xiao, L.T., Li, M.Y., Wang, F. and Li, Y.L. (2019) System Architecture and Construction Approach for Intelligent Space Launch Site. In: Deng, K., Yu, Z., Patnaik, S. and Wang, J. (Eds.), *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 856, Springer, Cham, 397-404. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00214-5_51
- [8] 蔡远文, 程龙, 辛朝军, 等. 航天装备测试技术现状与发展[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 1-4.
- [9] 贾立德, 郑永煌, 李建忠, 等. 虚拟样机技术在载人航天发射场中的应用[J]. 载人航天, 2014(3): 223-227.
- [10] 李澎, 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.
- [11] 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(增刊), 2019(S1): 114-119.
- [12] 张亚东, 刘浴霜. 超导磁悬浮技术在太空发射中的研究与挑战[J]. 飞航导弹, 2015(10): 50-57.
- [13] 王铁兵, 朱雄峰, 刘阳, 等. 新型“旋转发射”方案技术分析与研判[J]. 中国航天, 2022(6): 58-61.
- [14] 洪刚, 娄振, 郑孟伟. 载人核热火箭登陆火星方案研究[J]. 载人航天, 2015, 21(6): 611-617.