

智慧发射场指挥监控系统设计

刘梓琰 徐文晓 范浩鑫 王冠 刘巧珍

(北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

摘要 中国航天事业的快速发展, 空间科学、空间技术、空间应用的全面突破, 航天发射频率的不断提高, 对航天发射场的服务能力提出了更高的要求。随着云计算和大数据等技术的飞速发展, 中国航天发射场陆续开展了信息化和数字化转型, 以打造智慧发射场为目标进行升级改造。在这一背景下, 本文提出智慧发射场指挥监控系统的总体设计思路与技术选型策略, 从系统的可靠性、拓展性与智慧性三个维度进行补充分析并提出后续建设思路, 从发射场信息系统优化设计角度提升发射服务能力, 丰富航天任务、空间科学探测任务的发射资源。研究成果可为后续发射场建设与升级改造提供参考, 为中国未来的航天任务和空间探测任务提供有力的发射服务保障。

关键词 智慧发射场, 信息系统, 指挥监控系统, 总体设计

中图分类号 TP311, V47

Design of C3I System for Intelligent Space Launch Sites

LIU Ziyang XU Wenxiao FAN Haoxin

WANG Guan LIU Qiaozhen

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract China's aerospace industry has been experiencing a swift advancement, pushing the envelope in the realms of space science, technology, and applications. This innovation wave has created a significant influence further bolstering the long-term strategic vision towards the construction of advanced space stations, and has breathed life into ambitious scientific and technological satellite launch missions. Consequently, China is witnessing a surge in the frequency of space launches translating into a substantially heightened demand on the functional capabilities of space launch sites. Aligning closely with the rapidly developing digital technologies, such as cloud computing and big data, the transformation of China's space launch sites into a modern and dynamic digital and information-based infrastructure has gained momentum. The end-goal fuelling this transformation is the establishment of the so-called "intelligent launch sites", a vision sought to be achieved through widespread upgrading and renovation efforts. Amid this digital metamorphosis, the launch site information system emerges as a critical pillar, indispensable for catalysing the integration of "intelligence" into the launch site operations, with a key focus on the C3I system, the cornerstone of the entire information infrastructure. In terms of the design ap-

2024-01-18 收到原稿, 2024-02-01 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

proach for intelligent launch site's C3I systems, this article presents the overall design concept, a three-layer information system architecture consisting of foundation support layer, data resource layer and business application layer and propose a technical selection strategy from the perspectives of software and hardware environment, database selection, data structure design, and the functional and logical design of business applications. It also provides supplementary analyses from the perspectives of system reliability, scalability, and intelligence, and proposes subsequent construction approaches. By optimizing the design of the launch site information system, the launch service capability can be enhanced, and the launch resources for space missions and scientific explorations can be enriched. The research findings can serve as a reference for future launch site construction and upgrade projects, and provide robust launch service guarantees for China's future aerospace missions and space exploration tasks.

Key words Intelligent launch sites, Information system, C3I system, System design

0 引言

2016年以来,中国航天运输能力与空间基础设施的不断升级,天宫空间站^[1]、嫦娥系列探测器^[2]、天问一号探测器^[3]等空间实验平台等空间设施以及空间引力波探测卫星^[4]和爱因斯坦探针^[5]等科学技术试验卫星的成功发射推动了空间科学、空间技术、空间应用的全面发展,标志着中国航天事业进入高速发展时期。为满足越来越多的深空探索、空间科学探索与空间环境下的科学试验等项目的规划要求,火箭发射频率不断提高,年发射次数已位居世界前列^[6],但在可以预见的未来,目前航天发射场的发射服务能力仍难以充分满足发射需求^[7-9]。国务院新闻办公室发布的《2021中国的航天》白皮书提出,开展发射场通用化、集约化、智能化建设,完善现有发射场系统,提升高密度、多样化发射任务支撑能力^[10]。

在此背景下,结合大数据、云计算、人工智能等新兴技术的飞速发展,智慧发射场概念应运而生,即通过大数据、物联网等技术,实现发射场各系统、各设备的信息化、智能化与可视化管理,减少人力消耗,简化发射流程,提升发射效率,增强发射稳定性^[11-13]。

发射场信息系统是承载发射场“智慧”的核心所在。发射场指挥监控系统,又称C3I系统,是发射场的信息中枢,连通了卫星系统、火箭系统、加注供气系统、通信系统与测控系统,是发射场信息系统中最重要的重要组成部分^[14,15]。本文结合多任务并行高密度发射的需求背景,遵循通用化、智能化的发展方向,分析探讨智慧发射场指挥监控系统的总体设计思路与技术选型策略,旨在从发射场信息系统构建的角度提升发射服务能力,进而为航天任务和空间科学探测任

务提供基础支撑与保障。

1 发射场指挥监控系统

指挥监控系统是航天发射任务指挥的支撑技术平台,隶属于指挥自动化系统^[16]。指挥监控系统是用来实现发射任务的信息汇集、态势监视、辅助决策与指挥调度的信息应用系统,其承载硬件包括工作站、服务器、磁盘阵列、瘦客户端、显控大屏等计算、存储与显示设备^[17]。

随着通信和计算机等信息技术的逐步发展,发射场信息系统设计沿着信息化、数字化、智慧化的方向逐步前进。在“智慧发射场”理念构想下,发射场信息系统形成一个整体,物理环境、数智环境、运行平台、组织管理交互融合,从而实现物理发射场与数智发射场的高效联动^[18]。在这一演变过程中,指挥监控系统与勤务信息系统、后勤信息系统等其他信息系统的交互逐步深入,使得指挥监控系统融合了发射场任务管控和发射场资源管理等功能,形成覆盖发射场业务域的复杂巨系统^[19,20]。

2 智慧发射场指挥监控系统 总体设计

为实现“智慧发射场”,需要构建一体化的发射场信息系统,实现发射场全系统的信息互联互通与数据融合应用。指挥监控系统作为发射场信息系统的神经中枢,在发射场信息系统建设中拥有最高的优先级。因此,在总体设计时应将指挥监控系统定位为发射场的数据交互中心与应用服务中心,其他系统作为

指挥监控系统的数据源, 由指挥监控系统向外辐射扩张形成一体化的发射场信息系统.

2.1 系统架构设计

指挥监控系统作为智慧发射场信息系统的核心与枢纽, 其设计的主要难点在于, 如何在满足业务功能的基础上使系统具备可靠性、拓展性与智慧性, 以优化发射服务能力. 可靠性方面, 实现一个复杂系统的整体可靠且不能过度采用冗余而导致资源浪费, 需充分分析系统内部各节点的故障影响以采取合适的可靠性措施, 确保指挥监控系统具备承担发射场信息系统神经中枢的能力; 拓展性方面, 发射场信息系统通常由多家单位分阶段逐步建成, 指挥监控系统在设计上必须能够支持后续的拓展升级, 这需要考虑系统承载资源的可拓展性与系统对外接口的可拓展性; 智慧性方面, 需要实现发射场数据的充分利用, 从发射场全要素数据中分析提炼核心的态势信息, 升级革新软件服务功能与人机交互模式, 有效赋能发射场信息化、数字化水平提升.

与传统发射场“烟囱式”信息系统不同, 智慧发射场信息系统是一个整体, 其核心指挥监控系统的设计不能简单基于各业务功能需求并行规划, 而是应该

由下至上全链路规划系统的设备资源、系统数据与业务应用, 因此系统总体架构应分为基础支撑层、数据资源层与业务应用层三个层级, 其中基础支撑层为数据资源层与业务应用层提供软硬件运行环境, 数据资源层为业务应用层提供数据支撑, 业务应用层作为发射场“智慧”的载体, 为用户提供高效的发射场指挥监控能力. 系统架构如图 1 所示.

2.1.1 基础支撑层

智慧发射场指挥监控系统基础支撑层由云平台、操作系统与计算存储设备构成.

传统发射场信息系统使用独立的工作站和服务器的承载软件应用, 当系统愈发庞大时, 其运行维护管理与拓展升级将愈发不便. 为解决这一问题, 智慧发射场指挥监控系统采用云技术实现计算资源的纳管与调度.

云平台主要包括基于 Openstack, KVMc, Vmware 等虚拟化技术构建的虚拟云平台与基于 Kubernetes 及 Docker 的容器技术构建的容器云平台, 混合云平台属于虚拟云平台与容器云平台混合使用的一种部署模式.

通过云技术, 一方面能够实现发射场计算资源的

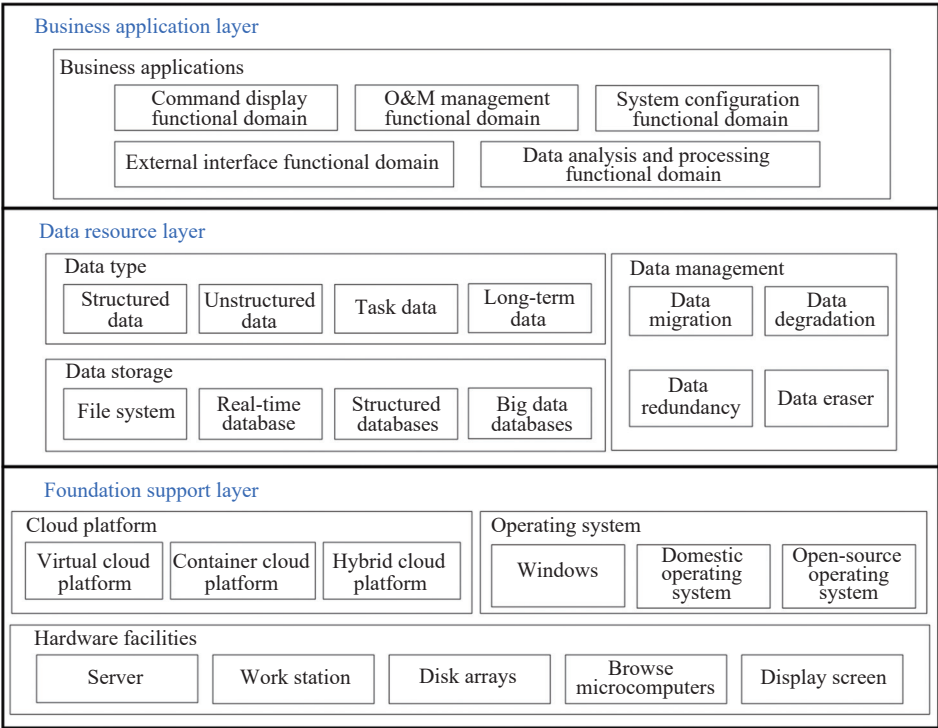


图 1 智慧发射场指挥监控系统架构

Fig. 1 Architecture of C3I system for intelligent launch site

池化统合与调度管理, 有效提高计算资源利用效率并降低系统运行维护管理难度; 另一方面能够为软件和进程提供彼此隔离的环境与硬件节点间迁移的功能, 提升系统运行稳定性与故障恢复的能力。

虚拟云平台与容器云平台的组成均包括管理节点与计算节点, 功能上均可以实现计算资源的统一管理与应用负载的动态均衡。二者的核心区别在于虚拟化的层级不同。

虚拟云平台提供硬件层级虚拟化, 实现操作系统级隔离, 其划分的每一个虚拟机都包含完整的操作系统, 可以被视为一台独立的计算设备, 用户操作与使用实体计算机一致。容器云平台提供 Linux 操作系统内核层级虚拟化和进程级别的隔离, 其划分的每一个容器均共用计算节点服务器的操作系统内核, 并在此基础上为容器中的进程提供所需运行环境。虚拟云平台与容器云平台优劣势列于表 1。

操作系统方面, Windows 系列操作系统稳定且具有完善的软件生态, 特别是对于视频处理、图像渲染等业务具有较为明显的优势; 国产化操作系统主要包括中标麒麟、银河麒麟与鸿蒙等, 均是基于 Linux 内核的操作系统, 其优势在于厂家能够提供完善的售后保障, 但软件生态仍需继续发展, 部分软件的应用存在兼容性问题; 开源操作系统主要指 CentOS 等 Linux 内核操作系统, 由开源社区进行维护, 通常作为国产操作系统的备选项, 其软件生态一定程度上优于国产操作系统, 但无售后服务, 需要自行运行维护。

综上所述, 智慧发射场指挥监控系统基础支撑层采用以云平台为主的部署模式。对于使用支持 Linux 操作系统的前后端分离架构的软件多采用容器云部署模式; 对于数据库、单体软件或需求 Windows 系统的软件通过虚拟云平台划分虚拟机部署; 对于需要配备诸如时统卡等特定设备的少数软件, 提供独立计

算设备进行部署。

2.1.2 数据资源层

数据资源层由汇总至指挥监控系统的数据要素和实现数据资源存储管理的数据库与文件系统构成, 即指挥监控系统的数据管理方案。传统发射场的“烟囱式”信息系统容易导致出现数据孤岛现象, 使发射场数据无法充分应用, 是智慧发射场信息系统需要解决的核心痛点。因此, 作为智慧发射场信息系统的“天元”, 指挥监控系统需要承载发射场数据中心的功能, 要求其不仅需要管理本系统的参数配置信息, 还需要承载发射场全要素的多源异构数据, 因此在数据存储方案的设计上, 需要考虑数据存储的容灾备份与数据结构的合理性以及长期存储的维护性, 确保数据的可靠、数据操作的效率与后续新系统数据接入的易拓展。

数据的容灾备份需从硬件存储设备层面和系统层面两个维度考虑。在硬件存储设备层面, 可应用 RAID 技术实现服务器磁盘、磁盘阵列的冗余存储并提升读写性能, 通常采用 RAID5 方案兼顾存储性能、数据安全与存储成本。在系统层面, 通常采用分布式存储方案, 可通过构建数据库集群或分布式文件系统, 由数据库类产品提供的多备份、纠删码等技术实现数据的多点甚至多地的冗余存储。

开展数据结构的优化设计需要对发射场数据要素的类型和特点进行分析。发射场数据类型主要包括与测试发射任务相关的参数信息, 与发射场运行维护相关的设备设施参数信息, 任务摄像头、安防摄像头的音视频信息, 预案文档、设备图纸等资料, 设备、人员履历信息以及系统运行所需的配置信息。按照数据结构类型与数据来源对发射场数据进行分类, 结果见表 2。

发射场数据从数据类型上可分为结构化数据与非结构化数据, 由于发射场测试发射、运行维护相关

表 1 云平台选型优劣势分析
Table 1 Analysis of the advantages and disadvantages of cloud platform selection

优势		劣势
虚拟云平台	虚拟机具备图形化界面 虚拟机支持任意操作系统	计算资源消耗大, 虚拟机重启速度慢(操作系统重启时间), 虚拟机需预先划分计算资源, 难以实现动态负载均衡或迁移
容器云平台	轻量、计算资源消耗小, 容器重启速度快(秒级), 能够监视容器内进程状态, 能够动态实现负载均衡与节点间容器迁移	容器不提供图形化界面, 容器均使用同一套Linux内核操作系统

表 2 发射场数据类型清单
Table 2 Data types of space launch site

数据类型		任务阶段采集数据	长期采集数据
结构化数据	参数类数据	火箭测试数据 卫星测试数据 加注供气数据 飞行测控数据 本场气象数据	空调系统数据 供电系统数据 网络监控数据
	二维表格类数据	工作调度单	人员履历数据 设备履历数据 系统配置数据
非结构化数据	音视频	任务摄像头视频 预案文档	安防摄像头视频

参数是发射场数据要素的主要组成成分,因此将结构化数据进一步划分为参数类数据与普通的二维表格类结构化数据.对于结构化数据通常使用数据库进行存储,通过规划数据表的结构实现数据管理,涉及的数据库主要包括以 Redis 为代表的供信息实时显示的用于缓存参数类数据的内存数据库,以 Mysql 为代表的用于存储二维表格类数据的关系型数据库,以及以 Hbase 为代表的用来存储参数类数据的大数据数据库.对于文档和视频等非结构化数据,采用文件系统存储方式,通过规划存储路径实现数据管理.

参数类数据是发射场的核心数据,通常需要在任务结束后或运行维护过程中对其历史数据进行比对分析.因此对于历史数据的存储,需根据数据检索方式对数据表结构进行合理优化,以提升数据读写效率.任务阶段采集的数据通常按照任务信息进行查询,以 Hbase 为例,在设计结构时可以按照任务信息划分数据表,将数据表的大小与数据表的数量维持在合理范围.在数据表内,由于 Hbase 基于行键检索数据^[21],可采用宽表存储模式存储周期数据,即每行为一个参数,列为参数不同时刻的信息,并在行键中标识参数名称,从而实现特定任务参数的快速检索.而发射场长期采集的数据通常按照时间段进行检索,此时可采用高表存储模式,每列代表一个参数的时序信息,并在行键中标识时间戳,在优化检索效率的前提下避免了列数过多导致的数据读取崩溃.

另外,系统应具备历史数据运行维护管理能力,从而实现系统存储资源的高效利用与核心历史数据的长期存储.对于参数类数据,可根据数据重要性建立索引,为数据设置分级分类退化机制;对于音视频类数据,可结合任务流程对多路音视频进行剪裁、拼

接等融合处理,仅保留与任务流程高度耦合的要素.

2.1.3 业务应用层

业务应用层由软件构成,是指挥监控系统实现指挥控制、信息显示、信息交换、辅助决策与数据管理等核心功能的直接载体.因此相较于传统发射场,智慧发射场指挥监控系统对软件设计提出了更高要求.

为实现发射场的通用化与集约化,指挥监控系统软件应具备快速部署展开与高度兼容拓展的能力,以满足多类型技术状态火箭的高密度发射需求,从而服务于各类发射需求客户.

在传统发射场中人员席位是固定的,发射场指挥人员使用指挥监控系统软件监控任务状态,火箭系统人员使用火箭总体网软件监控任务状态,二者数据要素高度重叠.因此,在智慧发射场中,指挥监控系统软件在设计上应具备灵活部署能力,实现软件定义席位,使其信息显示与辅助决策功能可作为一项服务提供给火箭系统,火箭系统自己的软件仅需实现分系统控制功能即可,这样可以有效减少火箭系统软件、硬件与人力资源开销,提升发射服务体验.

作为一套面向各类岗位和用户,适配各类测试任务与火箭卫星型号的一体化信息系统,指挥监控系统应具有良好的权限管理能力,并且能够提供丰富的信息展现形式与灵活的信息浏览模板,兼具信息要素的全面性与因岗制宜的针对性.

基于上述需求,分别从功能架构与软件架构两个层面设计智慧发射场指挥监控系统软件.

在功能架构层面,首先需要实现各发射任务的数据接收,由发射场定制标准通信协议对外系统进行约束,构建外部接口功能域实现外系统数据的接收、解析与入库存储,供其他应用服务调用.完成数据接收

后, 构建数据处理分析功能域, 实时处理测试数据, 提供阈值判读和包络分析等通用数据分析方法, 同时以动态链接库等形式封装诸如弹道计算和落区预示等复杂模型, 支撑异常告警与辅助决策。

指挥显示功能域、运行维护管理功能域与系统配置功能域面向用户, 通过应用门户控制登录与访问。指挥显示功能域实现面向任务的综合态势感知与控制, 具备表格、图像、多媒体、三维孪生等信息显示方式, 提供用户可定制的信息显示模板以及面向特定账户的指令下发功能, 打造岗位定制化的席位驾驶舱。运行维护管理功能域负责监控发射场内各系统工作状态、网络拓扑状态与计算存储设备运行状态, 服务发射场运行维护人员快速了解发射场运行状态。系统配置功能域作为指挥监控系统软件的元数据管理入口, 实现指挥监控系统软件全部功能域的集中配置, 能够为不同任务、型号快速配置任务信息、参数定义、判读逻辑、用户权限等信息, 保障系统软件的任务适配能力。

在上述功能基础上, 应用语言大模型打造发射场软件应用与数据资源的调度枢纽, 孵化面向智慧发射场的不同场景的应用, 革新传统的人机交互方式, 实现问答式的信息检索、应用调用、观光向导等功能, 打造发射场虚拟向导。发射场指挥监控系统功能架构如图2所示。

在软件架构层面, 目前主流架构包括浏览器/服

务器 (Browser/Server, B/S) 架构与客户端/服务器 (Client/Server, C/S) 架构。

B/S 架构软件由服务端实现主要事务逻辑, 前端由浏览器处理数据渲染等少量逻辑, 在应用层面上, 具有浏览灵活性高、运行维护难度低等优势, 并且由于其通常使用 Java 语言基于 SpringBoot/Spring-Cloud 框架开发, 软件生态丰富, 一定程度上降低了开发成本。C/S 架构由服务端与客户端共同完成事务逻辑, 其优势在于能够充分利用客户端与服务端的硬件资源, 并且其客户端软件相比浏览器具有更丰富的图形表现能力, 同时由于其通常基于 C++ 语言开发, 在数据处理的性能方面具有优势。但由于每一台客户机都需要部署客户端, 当用户数量较多时将会带来较高的部署与运行维护成本。

智慧发射场指挥监控系统软件以 B/S 架构为主体, 其中涉及的大量数据处理功能, 诸如数据解析与实时数据处理分析等, 通过 C++ 语言编写软件模块嵌入 B/S 框架的方式实现以保证软件性能。对于发射场三维数字镜像等高精度三维视景软件采用 C/S 架构, 满足指显大屏投屏等或特定席位浏览等需求, 同时基于 WebGL 和 WebGPU 技术构建精简显示的 B/S 版本。尽管存在灵活性高和成本低等好处, 但 B/S 架构软件极度依赖服务器性能, 对客户机性能利用率较低, 因此需要硬件选型平衡客户机与服务器配置, 解决这一问题。

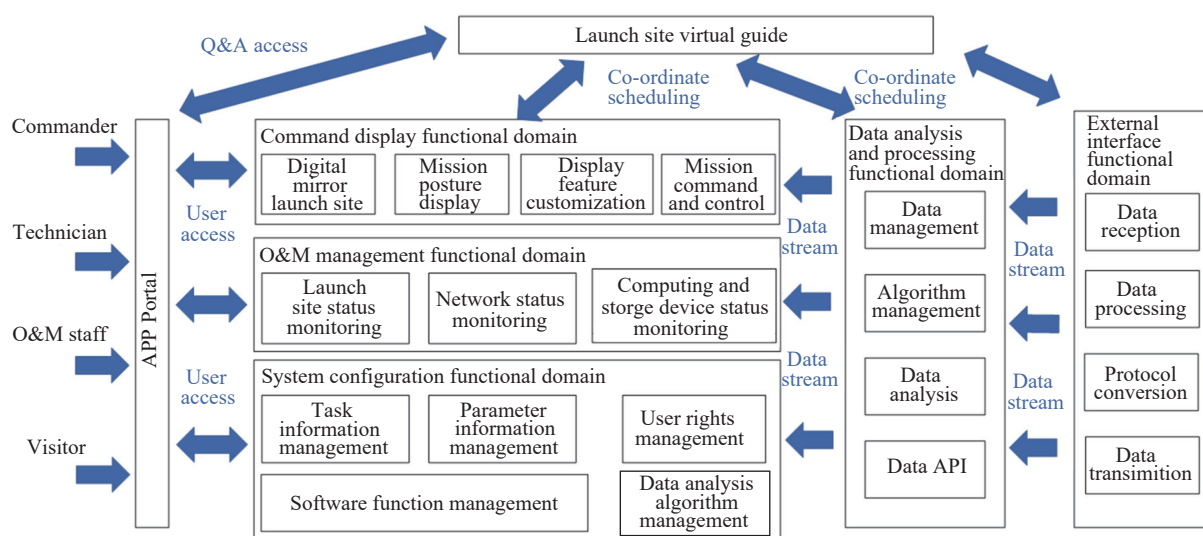


图2 业务应用层功能架构

Fig. 2 Functional architecture of the business application layer

这种设计主要有以下三点优势. 第一, B/S 架构软件使用浏览器输入域名即可进行浏览, 通过应用门户管理各软件的域名与用户权限, 各类用户可以根据自身需求, 使用包括手机、平板电脑在内的任意入网计算设备访问对应的软件, 大大提升了软件使用的灵活性; 第二, 在软件升级与更新维护方面, 由于当前智慧发射场是一个新兴概念, 软件功能升级与版本更新的频率会比较高, B/S 架构在运行维护成本上优势巨大; 第三, 发射场信息系统应形成一个整体, 指挥监控系统与其他系统软件繁多, 采用 B/S 架构, 仅需在用户权限、接口标准与页面风格三方面进行约束, 通过网址链接或页面嵌入的方式即可使众多软件合为一体, 有利于实现一体化设计.

2.2 可靠性设计

指挥监控系统的可靠性设计在基础支撑层、数据资源层与业务应用层的设计中均有体现.

在基础支撑层中, 通过云平台实现复数计算节点的管理, 当单一计算节点出现故障时, 云平台可自动迁移故障计算节点上的容器或虚拟机至其他节点以实现故障恢复, 这一过程消耗的时间取决于容器/虚拟机的重启时间与容器/虚拟机内部进程、软件的重启时间之和. 对于容器云而言, 其容器与服务器操作系统共用内核, 重启速度较快, 在 1 min 以内即可实现指挥监控系统业务软件故障恢复. 除此以外, 云平台为其内部的进程、软件提供了独立的运行环境和负载均衡的能力, 避免了不同进程、软件间的干扰, 平衡了资源负载, 提升了软件运行的稳定性. 对于云平台本身而言, 通常具备 2 个以上的管理节点实现主从热备份从而避免因引入容器云平台而对系统可靠性带来风险.

在数据资源层中, 数据库的设计均采用集群模式或主从热备份模式, 避免了单点数据库服务异常影响业务软件功能. 此外, 结合业务数据特点与用户数据使用模式优化数据库表设计, 降低数据检索的资源消耗, 减少多用户检索导致数据库服务崩溃的可能性.

在业务应用层的系统设计上, 涉及指挥控制与发射条件监测的重要软件通常具备无间断运行需求, 在云平台提供故障恢复能力的基础上仍需采用多副本等方式进行冗余设计, 保证单点故障情况下的无感切换. 对于非关键软件, 例如运行维护管理类软件, 由云平台的故障恢复能力保证其可靠性即可. 软件功能模

块设计上遵循“高内聚, 低耦合”原则, 精简模块间交互关系, 避免故障牵一发而动全身. 在权限管理方面, 严格划分控制类权限与浏览类权限, 对于重要操作均设置二次确认机制, 减少用户误操作带来的风险.

2.3 拓展性设计

指挥监控系统的拓展性设计同样包含基础支撑层、数据资源层与业务应用层三个维度.

在基础支撑层中, 由云平台实现计算资源与软件服务的灵活拓展. 计算资源方面, 新服务器只需按照要求安装操作系统并接入网络即可加入云计算资源池. 软件服务方面, 云平台为软件服务提供的独立运行环境能够满足各类新软件的运行环境要求, 减少软件的设计约束.

在数据资源层中, 设计合理的数据层级结构并通过关系型表格进行管理, 通过新增字段内容即可实现新任务、新系统数据的管理.

在业务应用层的数据接口协议设计上, 参考《火箭、航天器与航天发射场信息传输规程》^[22] 中的协议格式, 在兼容当下主要发射场与火箭型号的基础上, 根据发射场数据特效完善协议格式中信息头的编码规则与备份字节, 并视情况添加新信息字格式, 以满足各外系统以及后续拓展系统的数据传输需求; 软件功能设计遵从“先开放后收敛”的原则, 初期尽可能多地放开配置功能, 在测试和使用过程中根据用户反馈意见将配置接口收敛合并, 达到拓展性与易用性的平衡. 在软件架构设计上, 基于 B/S 的设计使软件具备更新维护快速部署与新软件页面灵活嵌入特性.

2.4 智慧性设计

基于发射场信息系统一体化的设计思路, 将指挥监控系统构建成为发射场数据中心, 实现发射场各系统数据的汇集与管理, 为实现发射场数字化与智慧化打下基础. 在发射场全要素数据之上, 软件应用即是发射场智慧性的直观体现, 指挥监控系统软件需要分别从数据应用、软件使用、信息显示与交互模式方面进行改善以实现“智慧性”. 数据应用方面, 基于大数据技术, 通过构建参数判读算法、物理模型、机器学习模型准确分析设备数据和视频图像特征, 实现发射场各系统与发射任务的健康管理, 实时评估场区内各系统健康状态与发射任务进行状态, 将发射场内各类状态数据转化为用户可以直观理解的信息, 辅助技术人员全面跟踪感知场区运行维护、地面测试与飞行状

态,支撑用户快速决策;软件使用方面,一套软件实现多型号、多工位、多厂房的测试发射任务管理,并具备灵活的用户访问模式,用户可通过场区内任意一台入网计算机或入网移动设备对发射场与发射任务进行浏览与管理,有效提升发射场灵活性;信息呈现方面,提供数据、视频、二维模型、三维模型等丰富的显示形式,结合空间信息系统技术,向用户呈现虚实交互的数字镜像发射场,发射场内系统的运行状态、进行的工作项目、发生的异常情况,均可在数字镜像发射场中对应呈现,提高发射场运行维护管理效率;交互模式方面,充分应用语言大模型等先进技术,使发射场信息系统能够“理解”用户所想,减少用户使用软件的操作步骤,改善用户软件交互体验,打造深度人机交互模式. 综上,通过基础设施与软件应用设计,支撑发射场向智能化方向前进.

3 结论与展望

中国新一代智慧化发射场的建设,对下一步简化发射流程、提升发射效率、增强发射稳定性安全性意义重大. 智慧发射场旨在采用信息化、数字化、智能化手段提升发射服务能力,突出了作为发射场“智慧”重要载体的发射场信息系统的重要性. 指挥监控系统是发射场信息系统的中枢,在发射场信息系统建设中拥有最高的优先级. 本文基于智慧发射场通用化、集约化、智能化的建设目标,提出将指挥监控系统建成发射场的数据交互中心与应用服务中心、以指挥监控系统为核心向外辐射最终形成一体化的发射场信息系统的设计思路,在此基础上论述了指挥监控系统架构设计与技术选型,并从可靠性、拓展性、智慧性三个维度对系统架构进行了分析.

在后续的拓展建设中,可通过发射场资源统筹规划和任务节点管控缩短发射任务周期与间隔,使其能够借助数字化手段优化顶层管理进而实现发射服务能力升级,从而更有力地支撑未来航天任务和空间科学探测任务的发射需求.

参考文献

- [1] WANG Xiang, WANG Wei. Development and construction progress of the Tiangong space station in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(34): 4017-4028 (王翔, 王为. 我国天宫空间站研制及建造进展 [J]. *科学通报*, 2022, **67**(34): 4017-4028)
- [2] YIN Huaqin. Lunar exploration program and “Chang'E” Series Probe[J]. *Encyclopedia Exploration: Aerospace*, 2017(Z1): 19 (尹怀勤. 探月计划和“嫦娥”系列探测器 [J]. 百科探秘: 航空航天, 2017(Z1): 19)
- [3] CHEN Li, ZHAO Cong. China Successfully Launched Its First Mars Mission, Tianwen 1[J]. *Aerospace China*, 2020(2): 51-51 (陈丽, 赵聪. 中国首次火星探测任务“天问一号”探测器成功发射 [J]. 中国航天: 英文版, 2020, **21**(2): 1)
- [4] WANG Xiaoyu, QI Shoubing, ZHAO Hanqing. Tianqin plays, good news comes from the verification of space gravitational wave detection technology——Zhang Lihua, chief designer of Tianqin-1 technical test satellite[J]. *Space International*, 2020(7): 5 (王晓宇, 祁首冰, 赵汉卿. 天琴奏响, 空间引力波探测技术验证传来佳音——访天琴一号技术试验卫星总设计师张立华 [J]. 国际太空, 2020(7): 5)
- [5] DENG Jinsong. Einstein Probe Satellite——Unveiling the turbulent X-ray universe[J]. *Modern Physical Knowledge*, 2020, **32**(5): 7 (邓劲松. 爱因斯坦探针卫星——揭秘激荡的X射线宇宙 [J]. 现代物理知识, 2020, **32**(5): 7)
- [6] CHEN Haipeng, ZHANG Bing, XU Wenbin. Some thoughts on the countermeasures for high-density launch of China's carrier rockets[J]. *China Aerospace*, 2015(12): 3 (陈海鹏, 张兵, 徐文彬. 对我国运载火箭高密度发射应对措施的几点思考 [J]. 中国航天, 2015(12): 3)
- [7] JING Cong. China's space launch number occupies the first place in the world for the first time[J]. *Space Exploration*, 2019(2): 1 (景聪. 中国航天发射次数首次独占世界第一 [J]. 太空探索, 2019(2): 1)
- [8] XIAO Jianjun, DONG Erkui. Discussion on the situation and future development of China's space launch site[J]. *China Aerospace*, 2015(6): 11-17 (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)
- [9] HUI Xingchen, CHENG Bo, CHEN Changxu, et al. Exploration and prospect of high density launch development and management mode for Long March 2C Launch Vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2023(3): 138-140 (惠兴晨, 程博, 陈昌旭, 等. 长征二号丙运载火箭高密度发射研制管理模式探索与展望 [J]. 导弹与航天运载技术 (中英文), 2023(3): 138-140)
- [10] CHENG Kong. In the next five years, China will embark on a new journey of building a space power in an all-round way——The white paper “China's Aerospace in 2021” was released[J]. *Space International*, 2022(2): 4-7 (澄空. 未来五年, 中国将开启全面建设航天强国新征程——《2021 中国的航天》白皮书发布 [J]. 国际太空, 2022(2): 4-7)

- [11] LIU Danghui, CAI Yuanwen, LI Yan, *et al.* Research on Technological Innovation for the Construction of Space Launch Sites[J]. *Instrumentation and Equipments*, 2023, **11**(1): 11 (刘党辉, 蔡远文, 李岩, 等. 航天发射场建设技术革新研究 [J]. 仪器与设备, 2023, **11**(1): 11)
- [12] LIU Yang, XIN Tengda, TONG Jiang. Research on the Development of the Next Generation Intelligent Launch Site[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2023, **7**(2): 61-68 (刘阳, 辛腾达, 同江. 下一代智慧发射场发展研究 [J]. 宇航总体技术, 2023, **7**(2): 61-68)
- [13] XIAO Litian. Research on the construction and technology development of smart rocket launch site system[C]//The 1st Aerospace Engineering Forum. Shanghai: Chinese Society of Astronautics, 2018 (肖力田. 智慧火箭发射场系统构建与技术发展研究 [C]//第一届航天工程论坛. 上海: 中国宇航学会, 2018)
- [14] TOLK D A , PULLEN D J M. Ideas for a common Framework for Military M&S and C3I Systems[R]. Stockholm: 2023 Euro Simulation Interoperability Workshop, 2003
- [15] LUO Aimin, LUO Xueshan, HUANG Li. Study on the Architecture Framework of C3I System[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2003, **23**(6): 86-90 (罗爱民, 罗雪山, 黄力. C3I 系统体系结构框架研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2003, **23**(6): 86-90)
- [16] WANG Jiawu, SHEN Huairong, TANG Liwen. Discussion on the C3I system of modern space launch sites[J]. *Journal of the Academy of Equipment Comm and & Technology*, 2001 (王家伍, 沈怀荣, 唐立文. 现代航天发射场 C3I 系统探讨 [J]. 指挥技术学院学报, 2001)
- [17] WAN Quan, WANG Dongfeng, LIU Zhanqing, *et al.* Overall Design of Space Launch[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015 (万全, 王东锋, 刘占卿, 等. 航天发射场总体设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.)
- [18] CHENG Jing, ZHANG Fenggui, ZHUANG Ke. Big data and space launch sites[J]. *Space Launch Sites Test & Management*, 2013(6): 1-8 (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)
- [19] CAI Hongwei, XIE Fufeng, HU Qingzhong. Cloud computing-based business network architecture for space launch sites[J]. *National Defense Technology*, 2020, **41**(4): 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): 6)
- [20] BAI Yongqiang, SHEN Jianping, XU Han. Integrated design of C3I system for space launch site[J]. *Missile test technology*, 2010, **000**(1): 12-14 (白永强, 申建平, 许寒. 航天发射场测发 C3I 系统一体化设计 [J]. 导弹试验技术, 2010, **000**(1): 12-14)
- [21] GEORGE L. HBase: The definitive guide[J]. *Andre*, 2011, **12**(1): 1-4
- [22] 中国人民解放军总装备部. GJB 7337-2011 火箭、航天器与航天发射场信息传输规程 [S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2011

作者简介



刘梓琰 男, 1994 年 12 月出生于北京市, 现为北京宇航系统工程研究所工程师, 主要研究方向为宇航总体技术、指挥信息系统设计等。
E-mail: l2z1y2@126.com



范浩鑫 (通信作者) 女, 1995 年 7 月出生于黑龙江省哈尔滨市, 现为北京宇航系统工程研究所工程师, 主要研究方向为宇航总体技术、指挥信息系统设计、软件系统设计等。
E-mail: 15046114109@139.com