

文章编号: 2097-1974(2025)04-0098-09

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20250413

低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统设计

张远东¹, 范稀木², 胥新宇¹, 代意坤³, 李岳桓⁴

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京, 100076; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076;
3. 湖南高至科技有限公司, 长沙, 410017; 4. 北京航天测控技术有限公司, 北京, 100041)

摘要: 当前低温液体运载火箭已成为航天任务主力, 其岗位人员能力急需提升, 针对各发射场对即将投入使用的通用化地面测发控制系统的训练需要, 充分考虑正常测发流程的训练、异常状态下的排故训练、应急处置操作训练等场景, 开展低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统研究、设计及建设工作。通过深入分析产品通用化特点, 研发与真实产品一致的硬件设备、测试软件, 覆盖发射场各系统各阶段测试操作, 支持全系统、全岗位的全流程操作训练。该系统可充分满足低温运载火箭测发岗位人员训练的需求, 具备支撑构建技术更强测发队伍的能力, 全面保障航天强国基础能力建设。

关键词: 低温液体运载火箭; 通用化地面测发控制系统; 测发流程模拟演练; 排故训练; 应急处置

中图分类号: V42

文献标识码: A

Design of Simulation and Exercise System for Cryogenic Rocket Testing and Launch

ZHANG Yuandong¹, FAN Ximu², XU Xinyu¹, DAI Yikun³, LI Yuehuan⁴

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing, 100076; 2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076; 3. Hunan Gaozhi Science and Technology Co., Ltd, Changsha, 410017;
4. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd, Beijing, 100041)

Abstract: In response to the current reality that cryogenic liquid launch vehicles have become the mainstay of space missions and the urgent need to enhance personnel competency, this study proactively addresses the training requirements of launch sites for the upcoming universal ground-based testing, launch, and control systems. By fully considering scenarios such as normal testing and launch procedures, troubleshooting under abnormal conditions, and emergency response operations, research, design, and development of a simulation and training system for cryogenic liquid launch vehicle testing and launch procedures are conducted. This system thoroughly analyzes the universal characteristics of the product and aligns with the training needs of launch sites for the soon-to-be-deployed universal ground-based testing, launch, and control systems. It develops hardware equipment and testing software consistent with actual products, covering all phases of testing operations across launch site systems. It supports comprehensive, full-process operational training for all systems and positions, fully meeting the training needs of personnel involved in cryogenic launch vehicle testing and launch operations. The system is capable of fostering a more technically proficient testing and launch team, thereby comprehensively supporting the foundational capacity building of a leading spacefaring nation.

Keywords: cryogenic carrier rockets; generalization test and launch control system; simulation and exercise of testing and launch; troubleshooting training; emergency response

0 引言

随着中国航天事业的飞速发展, 航天发射任务量迅猛增长, 任务周期缩短、任务流程优化, 若测发过程中出现问题不能正确进行应急处置不仅影响当发任务进度, 甚至对后续任务进度造成重大影响; 任务并行多、技术状态复杂, 导致测发岗位人员需快速识别

并深入理解相应状态对岗位操作的影响, 对人员素质提出较高要求; 低温构型越来越多、逆流程操作复杂度高, 但正式任务中不具备相应操作训练条件, 测发岗位人员仅能通过设计文件、操作文书进行“纸上谈兵”式操作训练, 与实操差异大、难以达到实用效果。因此, 航天技术的发展对测发岗位人员提出了更

高的要求,亟需培养出专业基础知识扎实、应急处置能力出色的技能型人才,人员能力提升迫在眉睫。

目前,测发岗位人员主要训练方式为“以赛代练”,即通过在实际执行任务的过程中进行学习。这种训练方式存在操作错误的风险,难以与当前高密度、短周期、精细化的发射任务相匹配。为解决该问题,各航天工业部门已经面向测试发射的人员培养需求开展了模拟训练设备的研发^[1]。文献[2~6]的工作有效提升了测发岗位人员对设备操作的熟练度,提高了岗位人员的实战能力。但是运载火箭测试发射属于大规模的配合协同工作,仅满足单机设备级的操作训练不能够从根本上从全箭测发任务的视角出发,从本质上提升了测发人员协同操作能力。文献[7~10]在单机设备级训练基础上,逐步提出将模拟训练扩展为系统级联合训练的思路,更加全面地提升测发岗位人员综合业务能力。由于低温运载火箭射前操作流程更复杂、对操作时机要求更高,上述研究成果不能够满足低温运载火箭对测试发射岗位人员的能力要求,亟需开展面向低温液体运载火箭全流程周期的模拟演练子系统研究。

因此,针对当前测发岗位人员能力提升的迫切需要,本文开展了低温液体运载火箭测发流程模拟演练子系统研究,面向各发射场对即将投入使用的通用化地面测发控系统^[11-13]的训练需要,提出了系统的设计架构与思路,构建了操作及响应与真实产品保持一致的模拟演练系统,支持发射场各系统单元测试、分系统测试、总检查测试及模拟发射多岗位协同的低温液体运载火箭测发流程模拟演练,促进了低温运载火箭测试发射岗位人员的能力提升。

1 需求分析

1.1 应用需求

低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统的建设目的是建设现役及在研低温液体运载火箭测发控系统地面设备、实物单机等基础硬件环境,通过外观识别、拆装、手阀操作、机电连接、软件控制等模拟,实现对低温火箭系统组成、原理认知、关键测试操作等方面的学习练习。主要需求如下:

a) 为控制、测量、动力及动力测控等系统提供火箭测发控模拟环境支持,培养和锻炼测试发射人员的操作能力和应急处置能力;

b) 为火箭测试发射全流程演练提供训练环境支持,培养和锻炼高级测试发射人员的组织指挥、应急

处置等能力;

c) 为测试发射人员提供故障定位、排查的训练推演平台,提高人员的故障排查处置能力;

d) 为新流程模拟仿真等提供环境支持,促进任务流程改进优化和创新型人才培养。

1.2 通用化要求

1.2.1 仿真性要求

a) 外观(外形、结构、机械接口,面板上的表头、开关、指示灯等)与真实产品一致;

b) 操作动作与真实产品一致;

c) 显示现象与真实产品基本一致;

d) 测试操作规程(流程)与真实产品基本一致;

e) 模拟训练系统上各类连接件与真实产品一致;

f) 连接件各接口与真实产品基本匹配;

g) 等效模拟出的电信号参数、通信接口参数与真实产品基本一致。

1.2.2 可靠性、维修性及寿命要求

a) 维修工作涉及的安装和拆卸要简便省时,尽量采用可快速装卸结构,并要保证操作人员的安全。

b) 可维修设备中故障率高的仪器或部件要安装在易更换的位置。用于操作、检查、测试、拆装的部位要具有良好的可达性,需安排在便于人员操作的位置。

c) 使用寿命不低于5年(根据用户需求制定)。

1.2.3 软件工程化要求

软件的开发、管理、评审、验收应参照有关的标准规范,开展工程化管理,实行关键节点和阶段评审工作。

1.2.4 保障性要求

a) 提供使用、维修所需备件,应统一并压缩备件的品种、规格和数量;

b) 提供满足客户使用和维修所需的配套技术资料,资料的种类、数量、格式和内容应符合有关标准化的要求;

c) 计算机的硬件、软件设计应便于维护,提供维护所需的保障资源;

d) 训练系统留有可扩展接口,具备随低温运载火箭升级的能力。

1.2.5 安全性要求

a) 在使用中不应由于任何操作而危及人员和设备的安全;

b) 对于在使用中可能产生危险的训练系统,应当制定相应的安全使用规程;

c) 训练系统正常工作和故障时,不能对其他设备造成危害。

1.3 设计原则

a) 整体性原则。

在系统的规划上坚持整体规划、重点突出的原则,兼顾不同部分之间的一致性和可协调性。

b) 先进性与发展性原则。

系统建设全面遵循各类标准规范要求,为了保证系统能够在较长的一段时间之内满足使用需求,系统的开发和设计在技术上都应具有较强的前瞻性,符合技术发展的主流方向,可适应多种运行环境,具备应变能力,以适应未来环境和需求的变化。

c) 实用性原则。

保持系统的界面友好、操作简便,采用简单、直观的图形化界面,最大程度地方便非计算机专业人员的使用,确保不同应用水平的用户均能够熟练地、快速地操作本系统。

d) 安全性原则。

建立网络级、系统级、应用级等不同层次的、灵活的安全措施保障信息安全。系统用具有身份认证、

权限分配机制、数据库安全性、表单安全性、文档安全性、域安全性等多层次的安全设计确保系统的安全运行。

2 系统方案设计

2.1 总体设计

测发控流程模拟演练系统的地面电气设备需包括控制系统设备、测量系统设备、动力测控系统设备、动力配气设备及总控网系统设备等,并通过箭体等效器等箭上电气系统设备功能及接口,实现与地面设备之间的交互。

测发控流程模拟演练系统具体由控制系统前端等效器、控制系统后端发控台、动力系统前端等效器、测量系统前端等效器、测量系统后端等效器、总控网网络等效器、总控网云平台等效器、动力配气设备、箭上等效器等硬件设备组成,并配置有控制系统测试软件、测量系统测试软件、动力系统测试软件及总控网软件,各项功能分析如表1所示。通过测发控流程模拟演练系统,可实现分系统测试、总检查测试及模拟发射,覆盖液体运载火箭靶场测试项目和操作细则。

表1 各项功能分析

Tab.1 Function analysis table

设备	模拟功能
控制系统前端等效器	1. 模拟为控制系统箭上地面设备供电; 2. 能够接收后端指令,并完成对箭上设备的控制、测试等; 3. 支持应急测发功能。
控制系统后端发控台	1. 等效模拟控制系统发控台操作; 2. 全部按键自带指示灯表征按键通断; 3. 关键按键具备防误触保护。
动力系统前端等效器	1. 模拟为箭上地面设备供电; 2. 接收后端指控软件配电、控制指令,并反馈指令执行状态; 3. 向后端发送压力、温度、当班状态等信号采集数据。
测量系统前端等效器	1. 模拟箭地信息交互及通信; 2. 支持遥测系统、外安系统视频光传输设备数据接收、外观及响应,模拟液位数据发送。
测量系统后端等效器	1. 支持与前端遥测系统、外安系统信息交互功能; 2. 等效模拟遥测检测站、外安检测站数据收发、外观及响应; 3. 等效模拟箭上遥测图像数据接收、外观及响应。
控制系统后端软件	1. 支持主从冗余切换功能,软件界面与真实产品一致; 2. 能够选择测试项目,并能够在测试过程中完成自动判读; 3. 支持显示测试过程中各指标参数值,支持测试数据判读; 4. 具备数据处理功能等。
动力测控系统后端软件	1. 支持主从冗余切换功能,软件界面与真实产品一致; 2. 具备控制动力电磁阀打开关闭的功能; 3. 具备接收压力、温度等地测模拟量数据并显示的功能。
测量系统后端软件	1. 支持主从冗余切换功能,软件界面与真实产品一致; 2. 具备指控功能,具备数据处理功能,具备液位处理功能。
总控网云平台等效器	采用虚拟化技术实现后端服务器集成化设计,将各系统的部分业务整合到一体化的服务器中,模拟云平台的“核心运算—终端访问”模式。

续表 1

设备	模拟功能
总控网 后端软件	1. 支持主从冗余切换功能,软件界面与真实产品一致; 2. 向各系统发送射前流程指令; 3. 向各系统发送对时数据包。
动力配气设备	动力配气台自检,七管连接器对接、手动脱落、电动脱落,安溢活门性能测试等。
箭上 等效器	1. 模拟发出箭上信息,模拟各测试阶段箭上数据; 2. 包含起飞触点,支持模拟火箭起飞后发出“起飞”信号; 3. 支持模拟运载火箭测发过程中典型故障工况。

测发控流程模拟演练系统支持单人、多人协同和全流程的训练要求,支持模拟日常训练操作和实战发射流程训练,分为控制系统、测量系统、动力及动力测控系统、总控网系统等4个分系统训练部分,覆盖真实产品全部操作流程。箭上等效器模拟箭上各设备的功能、箭地接口等,关键接插件及接插操作与真实产品一致、关键状态指示与真实产品一致,能够模拟各测试阶段、发射流程以及飞行阶段地面前端测发控设备、运载火箭箭上的状态,模拟运载火箭测发过程中各种故障工况,并通过总体网系统实现测发前端与测发后端的网络连接。测发前端中各系统间可通过总体网进行数据传输,并且箭上等效器通过模拟脱拔电缆与控制系统测发前端、测量系统测发前端相连,可以实际训练脱拔电缆的脱落、对接操作。

动力配气设备由气瓶组、模拟贮箱、动力系统配气台、七管连接器及插座、单向阀、安溢活门等关键连接器组成,可进行动力配气台自检,七管连接器对接、手动脱落、电动脱落,贮箱充气、空气置换,贮箱手动增压,贮箱气密性检查,安溢活门性能测试,安溢活门气动开启、关闭,溢出连接器对接,加注连接器对接,加注阀气动顶开、关闭,清泄阀气动打开、关闭,清泄路排气等训练项目。

指挥控制大厅为模拟真实指挥控制大厅的计算机组,各系统、各岗位分别通过本系统的模拟计算机进行测试流程程序选择、测发流程控制、测试数据实时

判读及应急预案演练等操作训练。控制系统、测量系统、动力及动力测控系统、总体网系统分别根据实际需求,设置多台计算机以供不同操作岗位进行测发指挥控制。指挥大厅中各系统间可通过总体网线路进行数据传输。

训练中,测发岗位人员与真实岗位设置一致,包括各系统指挥、各系统岗位操作人员等,按照真实测发流程,由指挥根据操作规程下达口令,各岗位操作手按照规程进行测试操作。例如,进行动力系统分系统测试时,动力系统指挥向各岗位下达口令,岗位操作人员通过真实操作加排连接器、真实通过手阀调节各管路气压,完成对动力分系统的操作训练。在进行模拟发射流程训练中,全系统、各岗位全部参与,从状态准备、地面设备加电、漏电检查、模拟加注到射前流程、点火起飞,均能够依据真实产品测试规程,在指挥口令协同调度下对测发流程进行全覆盖训练。

除此之外,为了能够根据训练规划开展各阶段、各系统、各岗位对正常测试流程、故障排故流程、应急处置流程等的训练,以总控网软件作为数据中心,新增流程模拟软件、故障注入软件、逻辑控制软件(软件功能如表2所示),通过在流程模拟软件上选择训练项目、制定训练状态,故障注入软件向各系统注入故障现象、流程模拟软件判断训练项目的逻辑正确性,各硬件设备与软件均按照真实产品应产生的正常或异常现象进行显示,推动各岗位进行测发训练。

表2 软件功能需求

Tab.2 Software functional requirements

设备	软件功能
流程模拟软件	1. 支持显示各训练设备状态及参训人员就位状态; 2. 支持流程想定功能,可按需选择训练项目; 3. 支持对全部操作的正确性进行判断,支持训练考核; 4. 支持对流程、操作进行统一化管理。
故障注入软件	1. 根据流程模拟软件设定的训练项目,按需将故障注入到相应系统中进行训练; 2. 支持在线绘制故障树及排故流程,支持按需进行故障编排训练。
逻辑控制软件	1. 支持根据流程模拟软件设定的训练项目,对正常逻辑、故障逻辑、应急逻辑的判断,驱动训练进行; 2. 支持对箭上等效器产生的箭上数据进行各系统驱动与分发。

图1所示为测发控系统（真实产品）软件信息流的交互。各系统软件数据均以总控网为基础，进行指令、

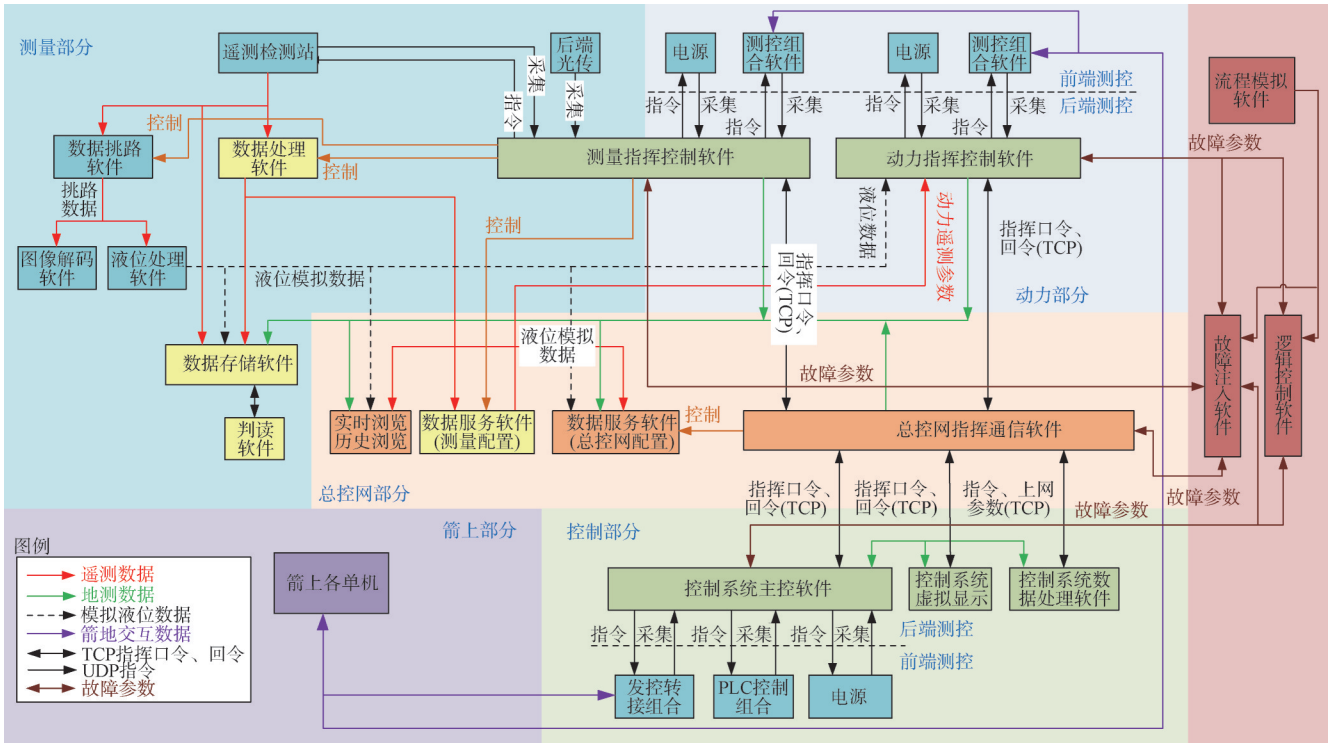


图1 测发流程模拟演练系统软件信息流

Fig.1 Software information flow of test-launch process simulation and exercise system

各系统内前后端指令、数据通过总控网传输，并由前端设备中软件与箭上设备交互；系统内后端与后端设备间指令、信息交互主要以网络信号为主，前端与前端间指令、信息交互主要以设备间电缆网传输为主。

为保持测发控流程模拟演练系统的软件界面、使用、信息流与真实产品一致，各系统后端计算机均采用真实产品软件；考虑到前后端各机柜等效器仅保证外观及显示等与真实产品一致，内部尽量简化，因此将各等效器的业务功能以软件模拟的形式实现，通过逻辑控制软件模拟全部等效器的逻辑、控制、数据传输功能，并与各系统软件进行交互。箭上等效器部分软件逻辑与各系统外部等效器软件逻辑一致，但需在

现有基础上进行新研。

2.2 硬件组成

测发流程模拟演练系统的硬件主要分为控制系统前端、测量系统前端、动力系统前端、控制系统后端、测量系统后端、动力系统后端、总控网以及其他硬件组成，如表3所示。表中设备均通过通用化核心板卡及功能拓展板卡实现。通用化核心板卡功能主要为接收、发送信息及指令，拓展板卡分别包括供电控制、信号采集、数显、模拟量变换等功能，通过核心板及拓展板的不同组合形式，可满足不同设备对信息传输、供电、发送接收指令、显示数据、采集仪器面板旋钮、采集开关状态等功能需求，进而确保与真实产品功能性能一致。

表3 硬件功能一览表

Tab.3 Hardware function overview table

设备	硬件功能
直流稳压电源	包括控制、测量、动力系统箭上及地面电源,为箭上单机、电磁阀、传感器供电,为地面设备供电
中频电源	为箭上伺服机构提供交流供电
控制系统前端测试计算机	接收后端发控台、计算机等发送的控制指令,并完成对箭上设备的控制、测试
控制系统PLC控制组合	完成系统间指令、信息的交互
控制系统发控组合	控制箭上供配电、调压、电池加温、点火、关机、断电等控制及接受状态反馈

续表3

设备	硬件功能
光端机	作为应急通信链路,传输应急控制、应急断电、应急点火等信号
光传输设备	包括视频光传及射频光传,分别通过有线链路、无线链路传输箭上遥测信号
图像解码机	解析箭上图像信息
外安综合检测设备	负责箭上外测、安控信号模拟与控制
有线测控组合 I	实现一级动力系统电磁阀的配电控制,并采集传感器模拟量参数,反馈给后端指控软件显示。I-1~I-4为按上述功能划分的具体执行单机设备。接口适配器提供接口转接
有线测控组合 II	实现二级动力系统电磁阀的配电控制,并采集传感器模拟量参数,反馈给后端指控软件显示。II-1、II-2为按上述功能划分的具体执行单机设备。接口适配器提供接口转接
有线测控组合 IV	实现测量系统箭上设备、地面无线测控设备的配电控制,并采集地面无线测控设备模拟量参数,反馈给后端指控软件显示。IV-1、IV-2为按上述功能划分的具体执行单机设备

2.3 软件组成

测发流程模拟演练系统软件实现对真实产品流程的动态仿真及其故障处置、评估等相关功能,包括箭上等效器软件、控制系统软件、测量系统软件、动力

系统软件、总控网络软件、逻辑控制软件、故障注入软件及流程模拟软件。软件功能如表4所示。

表4 软件功能一览表

Tab.4 Software function overview table

设备	软件功能
控制系统软件	完成控制系统对箭上、地面各设备的控制、测试及数据分析,支持与外系统进行指令、信息的交互
测量系统软件	完成测量系统对箭上、地面各设备的控制、测试及数据分析,支持与外系统进行指令、信息的交互
动力系统软件	完成动力测控系统对箭上、地面各设备的控制、测试及数据分析,支持与外系统进行指令、信息的交互
总控网络软件	完成系统间指令、信息的交互
箭上等效器软件	模拟控制系统、测量系统、动力系统箭上各单机设备参数、各被控对象状态的设备,并且等效器上有起飞触点、脱拔电缆等模拟测发流程操作,箭地接口与真实产品一致
流程模拟软件	作为测发控系统的上层应用,负责与外系统进行交互,包括训练科目、故障状态灯
故障注入软件	将故障注入到相应系统中进行训练
逻辑控制软件	模拟除箭上等效器外各系统等效器的业务功能,包括逻辑、控制、数据传输功能,将数据状态与各系统软件交互,并将状态反馈至等效器进行状态显示

2.4 交互关系设计

测发流程模拟演练系统的设计方案的要求为外形、结构、连接关系、机械接口等与真实产品一致,操作动作、流程、现象与真实产品基本一致。因此,基于总体方案的设计思路,对测发流程模拟演练系统的各等效器单机及软硬件的交互关系进行设计。

2.4.1 硬件接口设计

测发流程模拟演练系统的硬件接口方案,主要包括供电线路、数据通路、控制通路、网络信号及光纤通路。前端总控网交换机与后端总控网交换机通过光纤连接,后端控制系统、测量系统、动力测控系统设备全部通过网线与后端总控网交换机相连。前端设备中,控制系统设备均通过网线与前端总控网交换机相连;测量系统通过测量系统测控组合(IV-2)、测量电源与前端总控网交换机相连,其余测量系统前端设备通过系统内部的控制通路连接;动力测控系统通过动力有线测控组合(I-1)、二级测控组合(II-1)与前

端总控网交换机相连,其余动力测控系统设备通过系统内部的控制通路连接。前后端应急控制通路通过光纤连接。控制系统发控转接组合、控制系统箭地通信计算机、控制系统测试计算机、一二级动力接口适配器、测量系统测控组合(VI-2)、射频前端光传输设备通过脱拔电缆通信通路与箭上等效器相连;控制系统箭上电源、中频电源、测量电源通过脱拔电缆通过供电线路与箭上等效器连接。

电缆网中供电线路均为模拟电缆,设备实际供电采用市电接插的方式进行;数据链路、控制通路、光纤通信电缆为模拟电缆,实际数据通信通过设备间网络进行传输;其余网络通信线路均为真实以太网线路,实际传递设备间数据、指令等信息。

测发流程模拟演练系统与练习管理子系统、故障排查子系统间外部接口通过以太网进行数据交互传输。

2.4.2 软件接口设计

测发流程模拟演练系统的信息交互如图2所示。

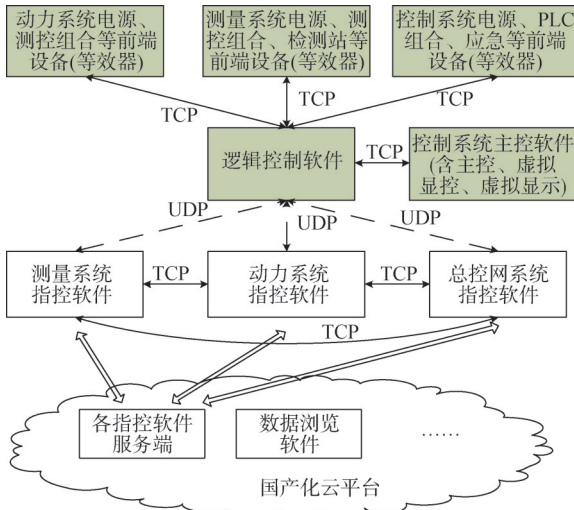


图2 数据交互关系

Fig.2 Data interaction relationship

a) 逻辑控制软件与等效器交互。

逻辑控制软件与等效器交互使用自定义的UDP协议，采用点对点或广播的形式，将等效器指令操作分发给各个等效器进行硬件指示显示（如灯光的亮灭、仪表的数值等），并且收集各个等效器的状态数据进行存储。

b) 逻辑控制软件与箭上等效器软件。

逻辑控制软件与箭上等效器软件使用自定义的UDP协议，采用点对点的方式，箭上等效器软件将操作控制信息发送给逻辑控制软件，逻辑控制软件将与箭上等效器相关的状态数据上报给箭上等效器软件进

行显示。

c) 逻辑控制软件与各系统软件。

逻辑控制软件与真实产品软件使用真实产品的协议，真实产品软件将操作控制信息发送给逻辑控制软件，逻辑控制软件将与真实产品软件相关的状态数据上报给箭上等效器软件进行显示，使真实产品软件业务进行闭环。

d) 逻辑控制软件与流程模拟软件。

逻辑控制软件与流程模拟软件使用自定义的UDP协议，逻辑控制软件将人员在前端设备（主要为机柜等效器）上的操作信息发送给流程模拟软件，流程模拟软件将故障设置信息发送给逻辑控制软件进行故障模拟等现象显示。

e) 各系统软件与箭上等效器软件。

真实产品软件与箭上等效器软件使用真实产品的协议，采用点对点的方式，箭上等效器软件与真实产品软件进行控制、动力、测量信息的交互，使各系统软件业务进行闭环。

f) 各系统软件与流程模拟软件。

真实产品软件与流程模拟软件使用真实产品或自定义的协议，采用点对点的方式，真实产品软件将真实产品软件上的流程信息、人员操作信息发送给流程模拟软件，进行训练的评判。

g) 各系统软件间信息交互。

测发流程模拟演练系统内部真实产品软件采用与真实产品一致的接口协议，如图3所示。

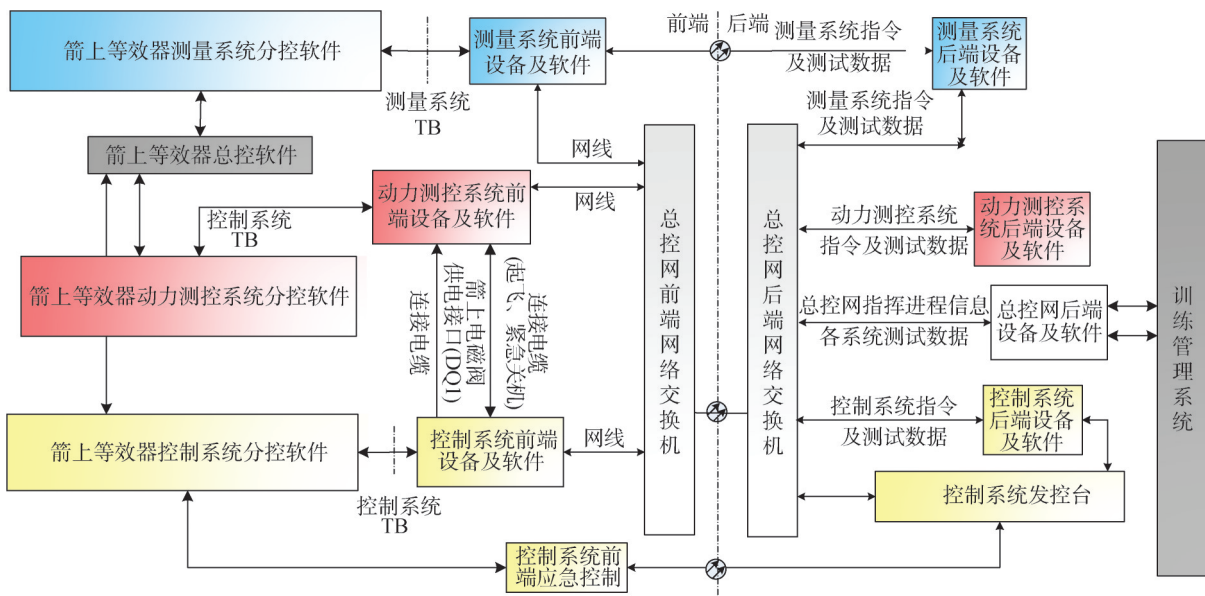


图3 内部软件协议

Fig.3 Internal software protocols

3 系统建设效果与验证

除正常训练流程^[14-17]外,按照表5故障响应设计进行排故训练及应急响应功能验证。经验证,在流程模拟软件中选择相应的故障训练项目后,故障注入软

件将故障注入至相应系统中,相应硬件设备及软件界面均按照故障模式显示相应状态,逻辑控制软件根据操作步骤进行逻辑判断,并最终完成故障处置的逻辑判断,显示正常现象。

表5 排故训练

Tab.5 Troubleshooting training table

序号	故障名称	故障现象	训练处置操作	处置操作后系统状态
1	主控计算机连接前端PLC异常	主控计算机提示“连接地面设备异常”	步骤1 步骤2 步骤3	第三次重试连接PLC后主控计算机正常连接前端PLC
2	紧急关机失败	紧急关机失败	步骤1 步骤2 步骤3	关机断电正常
.....

因此,经上述测试项目验证,低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统设计满足训练需求。

4 结论

本文开展了低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统研究,提出了满足正常测发流程训练、异常状态下的排故训练、应急处置操作训练的系统设计方案,构建了操作及响应与真实产品保持一致的模拟演练系统,实现了全系统级低温液体运载火箭测发模拟演练设备设计与建设,促进了低温运载火箭测试发射岗位人员的能力提升。

按照发射场测试操作规程、应急预案等操作流程对低温液体运载火箭测发流程模拟演练系统进行验证,证明本系统充分满足低温运载火箭测发岗位人员训练的需求,具备支撑构建技术更强测发队伍的能力,全面保障航天强国基础能力建设。

参 考 文 献

[1] 张桂洪. 面向航天发射的仿真训练系统研究与总体设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
ZHANG Guihong. Research and general design of simulation and training system for space launch[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[2] 张永敬. 战略导弹液体火箭发动机操作系统仿真模拟系统[J]. 推进技术, 1989, 6(3): 49-53.
ZHANG Yongjing. Analog simulation system for the operation and training of strategic missile liquid propellant rocket engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1989, 6(3): 49-53.

[3] 陈占海, 张永敬. 仿真模拟技术在固体火箭发动机操作训练中的应用[J]. 固体火箭技术, 1993(2): 16-20.
CHEN Zhanhai, ZHANG Yongjing. Application of emulation technology in operational training of solid rocket motors[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1993(2): 16-20.

[4] 马昕晖, 蔡远文, 盖江南. 运载火箭外测安全系统地面测试设备仿真训练系统[J]. 指挥技术学院学报, 2001, 12(4): 62-65.

MA Xinhui, CAI Yuanwen, GAI Jiangnan. Ground test equipment training simulation system based on off-ballistic trajectory measure and wireless security system of launch vehicle[J]. Journal of Institute of Command and Technology, 2001, 12(4): 62-65.

[5] 杨洋, 邢成欢, 蓝盈, 等. 火箭运输船协同吊装模拟训练系统的研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2258-2262.
YANG Yang, XING Chenghuan, LAN Ying, et al. Research and implementation of cooperative crane simulation for rocket transport [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(9): 2258-2262.

[6] 张平, 孙晨, 荆晓荣, 等. 运载火箭推进剂加注演示训练系统设计与实现[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(4): 148-154.
ZHANG Ping, SUN Chen, JING Jiaorong, et al. Design and implementation of a demonstration training system of propellant loading for launch vehicles[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(4): 148-154.

[7] 于小红, 庄锦山, 黄文清. 运载火箭发射综合训练系统的设计与实现[J]. 导弹与航天运载技术, 2003(5): 54-58.
YU Xiaohong, ZHUANG Jinshan, HUANG Wenqing, et al. Design and implementation of the synthetic simulation system for carrier rocket launch training[J]. Missiles and Space Vehicles, 2003(5): 54-58.

[8] 于大海, 袁杰, 白亮, 等. 主机控制软件在测发控系统中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4): 102-105.
YU Dahai, YUAN Jie, BAI Liang, et al. Application research of host control software in integrated measurement and control system[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(4): 102-105.

[9] 王军, 王金安, 李里洋. CZ-2F 运载火箭测试发射模拟训练系统研制总体方案[J]. 载人航天, 2004(2): 51-56.
WANG Jun, WANG Jinan, LI Liyang. Overall plan for the development of CZ-2F launch vehicle test launch simulation training system[J]. Manned Spaceflight, 2004(2): 51-56.

[10] 李波, 张海波, 张鑫, 等. 面向液体运载火箭的测发训练系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 85-90.
LI Bo, ZHANG Haibo, ZHANG Xin, et al. Design of test-launch training system for liquid launch vehicle[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(7): 85-90.

[11] 王子瑜, 范瑞祥, 程堂明, 等. 中国新一代中型运载火箭地面测发控系统架构及发展方向[J]. 导弹与航天运载技术, 2022(2): 91-97.
WANG Ziyu, FAN Ruixiang, CHENG Tangming, et al. The

- architecture of test and launch control system in chinese new generation launch vehicle and development directions[J]. Missiles and Space Vehicles, 2022(2): 91-97.
- [12] 任月慧, 马小龙, 马宗瑞, 等. 统型测发控系统一体化发射指挥模式研究[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023(3): 122-126.
REN Yuehui, MA Xiaolong, MA Zongrui, et al. Research on the launch command mode of the unified model launch vehicle test and launch control system[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(3): 122-126.
- [13] 王子瑜, 胡钰, 彭越, 等. 运载火箭地面测发控系统架构研究[J]. 测试技术学报, 2023, 37(3): 185-193.
WANG Ziyu, HU Yu, PENG Yue, et al. Research on architecture of test and launch control system in chinese launch vehicle[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(3): 185-193.
- [14] 钟文安, 叶欣, 朱晓乐, 等. 某大型低温运载火箭无人值守加注发射技术研究[J]. 宇航学报, 2022, 43(2): 241-250.
ZHONG Wenan, YE Xin, ZHU Xiaole, et al. Study on large cryogenic launch vehicle unmanned fueling and launching[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(2): 241-250.
- [15] 钟文安, 张俊新, 李智斌, 等. 某大型低温运载火箭发射流程优化策略[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(5): 85-88.
ZHONG Wenan, ZHANG Junxin, LI Zhibin, et al. Optimization strategy for test launching process of a large launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(5): 85-88.
- [16] 钟文安, 余秀伟, 叶欣, 等. 大型低温火箭准时发射技术与空间站应用[J]. 宇航学报, 2025, 46(2): 378-388.
ZHONG Wenan, YU Xiuwei, YE Xin, et al. Research on punctual launch technology for large cryogenic rockets and its application in space stations[J]. Journal of Astronautics, 2025, 46(2): 378-388.
- [17] 钟文安, 李智斌, 廖国瑞, 等. 大型低温液体火箭“零窗口”发射技术[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(4): 9-14.
ZHONG Wenan, LI Zhibin, LIAO Guorui, et al. Zero window launch technology of large cryogenic liquid rockets[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(4): 9-14.

作者简介

- 张远东 (1993—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为运载火箭电气总体设计。
- 范稀木 (1992—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭总体设计。
- 胥新宇 (1997—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭电气总体设计。
- 代意坤 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为嵌入式设计与开发。
- 李岳桓 (2002—), 男, 工程师, 主要研究方向为测控系统设计。

(上接第73页)

- [7] COLLET A, SRINIVASA S S. Efficient multi-view object recognition and full pose estimation[C]. Anchorage: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010.
- [8] 苏杰, 张云洲, 房立金, 等. 基于多重几何约束的未知物体抓取姿态估计[J]. 机器人, 2020, 42(2): 129-138.
SU Jie, ZHANG Yunzhou, FANG Lijin, et al. Grasping pose estimation for unknown objects based on multiple geometric constraints[J]. Robot, 2020, 42(2): 129-138.
- [9] PAS A T, PLATT R. Using geometry to detect grasp poses in 3D point clouds[M]. Cham: Springer, 2018.
- [10] JABALAMELI A, ETTEHADI N, BEHAL A. Edge-based recognition of novel objects for robotic grasping[EB/OL]. (2018-02-23) [2024-10-18]. <https://arxiv.org/abs/1703.09312v1>.
- [11] MAHLER J, LIANG J, NIYAZ S, et al. Dex-Net 2.0: deep learning to plan robust grasps with synthetic point clouds and analytic grasp metrics[EB/OL]. (2017-03-27) [2024-10-18]. <https://arxiv.org/pdf/1703.0-9312>.
- [12] HE Y, SUN W, HUANG H, et al. PVN3D: a deep point-wise 3d keypoints voting network for 6dof pose estimation[C]. Seattle: Computer Vision and Pattern Recognition, 2020.
- [13] TAEYEOP L, JONATHAN T, VALTS B, et al. TTA-COPE: test-time adaptation for category-level object pose estimation[C]. Vancouver: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023.
- [14] MENG Tian, MARCELO H A, GIM H L. Shape prior deformation for categorical 6D object pose and size estimation[C]. Glasgow: the European Conference on Computer Vision, 2020.
- [15] NAIR V, GEOFFREY E H. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines[C]. Haifa: International Conference on Machine Learning, 2010.
- [16] MARTIN B R, RADWAN N, SAJJADI M S M, et al. NeRF in the wild: neural radiance fields for unconstrained photo collections[C]. Nashville: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021.
- [17] PUMAROLA A, CORONA E, PONS-MOLL F, et al. D-NeRF: neural radiance fields for dynamic scenes[C]. Nashville: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021.
- [18] TANCIK M, CASSER V, YAN X, et al. Block-NeRF: scalable large scene neural view synthesis[C]. New Orleans: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2022.
- [19] BOWEN W, JONATHAN T, VALTS B, et al. BundleSDF: neural 6-DoF tracking and 3D reconstruction of unknown objects[C]. Vancouver: the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023.
- [20] AMOS G, LIOR Y, NIV H, et al. Implicit geometric regularization for learning shapes[C]. Vienna: the International Conference on Machine Learning, 2020.
- [21] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017 (30): 5998-6008.
- [22] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[C]. Venice: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017.

作者简介

- 陈彦江 (1995—), 男, 工程师, 主要研究方向为机器人视觉和智能控制。
- 王燕波 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间机械臂和智能机器人。
- 梁斌焱 (1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为机器人智能感知。
- 林俊钦 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为多机器人协同、机器人智能感知。