

面向液体运载火箭的测发训练系统设计

李波¹, 张海波¹, 张鑫², 罗大雷², 张志良¹, 徐昕¹

(1. 上海航天计算机技术研究所, 上海 201109;

2. 太原卫星发射中心, 山西 岢岚 036304)

摘要: 针对运载火箭测发训练手段落后、单一的现状和运载火箭测发控系统装备化使用需求, 突破火箭全真等效技术、交互式电子手册技术 (IETM)、测发控故障注入技术等关键技术, 基于某型号液体运载火箭构建实战化、实物化测发训练系统, 通过岗位人员快速高效的培训考核, 达到测发控岗位技术要求, 具备运载火箭测发控参试能力, 使参试人员由操作型向试验工程型转变, 加快人才培养, 提高发射场综合试验能力和发射成功率。

关键词: 液体运载火箭; 测发训练; 交互式电子技术手册; 故障注入; 全真等效技术

Design of Test-Launch Training System for Liquid Launch Vehicle

LI Bo¹, ZHANG Haibo¹, ZHANG Xin², LUO Dalei², ZHANG Zhiliang¹, XU Xin¹

(1. Shanghai Aerospace Computer Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Taiyuan Satellite Launch Center, Kelan 036304, China)

Abstract: Aimed at the current requirements of outdated and single testing and launch training methods for launch vehicle, as well as the demand for equipping the launch vehicle testing and control system, it has broken through key technologies such as rocket full-truth equivalence technology, interactive electronic technical manual (IETM) and testing and control fault injection technology. Based on a certain type of liquid carrier rocket, a practical and physical testing and launch training system is constructed. Position personnel are trained rapidly and efficiently to meet the technical requirements for testing and control positions, having the ability to test and control launch vehicles, enabling test personnel to transition from operational to experimental engineering, accelerating the talent cultivation, and improving the comprehensive testing ability and success rate of launching site.

Keywords: liquid launch vehicle; test-launch training; interactive electronic technique manual; fault injection; full simulation equivalent technique

0 引言

运载火箭测试发射控制系统^[1]是对运载火箭进行射前测试并实施火箭发射控制的系统总称。其主要功能是对火箭各系统进行分系统测试和全系统总检查测试流程控制, 对箭上仪器进行功能测试和发射过程中进行供配电、射前方位瞄准、火箭点火与发射控制。针对运载火箭的实际测试和发射中的应急控制, 测发控系统发挥着重要作用。在发射场进行测试试验工作是运载火箭离地飞向太空的最后一个步也是最重要的环节, 如何使飞行器不带隐患顺利发射, 提高训练和应用能力则成为提高测试发射可靠性的关键因素, 也是快速进入空间的重要保障。

我国航天事业的迅猛发展, 靶场航天发射任务日益繁重, 呈现任务高密度常态化、任务并行多、技术状态新、试验风险高、安全要求严和组织指挥难度大等新特点。随着航天任务的进一步深入, 要求火箭测发控岗位人员由操作型向技能型转变, 满足运载火箭测发控系统装备化使用要求, 加快人才培养, 快速提高运载火箭装备模式下的综

合试验能力。

目前航天发射的训练技术和训练水平都存在明显不足, 主要体现在实物设备少, 仿真软件多, 技术状态变化适应性差, 训练实战化不强, 多数训练只能进行单岗位训练, 训练效果十分有限。现有训练系统主要通过规程文件学习、口令合练和单兵操作训练, 缺少系统级全箭状态下全系统测发控流程模式下协同演练, 同时学习方式较单一, 记忆不深刻, 无真实感, 岗位人员培训效果不好, 培训周期较长。

针对测发训练手段落后、单一的现状和运载火箭测发控系统装备化使用需求, 突破火箭全真等效技术、交互式电子手册技术 (IETM, interactive electronic technique manual)、测发控故障注入技术等关键技术, 基于某型号液体运载火箭构建实战化、实物化测发训练系统, 通过岗位人员快速高效的培训考核, 达到测发控岗位技术要求, 具备运载火箭测发控参试能力, 使参试人员由操作型向试验工程型转变, 加快人才培养, 提高发射场综合试验能力和发射成功率。

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-05-19。

作者简介: 李波 (1981-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭测发控系统设计方向的研究。

引用格式: 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.

1 系统总体方案设计

1.1 设计原则

测发训练系统以某型号液体运载火箭测试发射方案为蓝本进行设计, 根据测发训练使用需求, 在继承现有成熟技术的基础上, 充分借鉴国内外先进测试与控制技术, 保持现有系统接口, 以实物训练系统打造实战化指挥操作训练水准, 突出智能化、小型化设计, 优化人机界面, 提供良好的用户体验。测发训练系统设计原则如下。

1) 全流程训练原则:

测发训练系统能够对运载火箭电气系统操作岗位开展基本的设备操作和专业技能训练, 能对系统指挥员开展故障排查、数据判读、应急处置和指挥岗位训练, 能对高级指挥员开展测发方案筹划和测发流程推演的训练, 既可以作为上岗考核的方法手段, 也可以开展专项指挥演练和全要素的指挥训练, 提高岗位人员执行航天发射任务的能力。

2) 继承性原则:

测发训练系统在技术方案上充分借鉴现役运载型号地面测发控设备的成熟经验, 继续秉承“一体化”^[2-4]的设计理念, 优化设备形式和布局, 沿用 PLC、PXI、PCI、422、以太网等成熟测试通讯技术和总线技术, 箭地接口保持现有状态, 外系统接口按照发射场需求设置。

3) 创新性原则:

测发训练系统充分借鉴国内外先进测试与控制技术, 突破火箭全真等效技术、IETM 交互式电子手册技术、测发故障注入技术等关键技术, 实现运载火箭实物测发训练系统。

4) 智能化原则:

测发训练系统具备手动测试和自动测试的功能, 具备特殊条件下应急操作的能力; 对测试数据可进行自动判读分析, 并输出判读结果; 测试系统具备自诊断能力, 可智能判别自身健康状况。

5) 集成化原则:

测发训练系统在保证可靠性和可维护性的前提下, 进一步采用小型化、简易化的设计方案, 采用集成度较高的商业化产品, 方便设备的部署和移动。

6) 界面优化原则:

测发训练系统突出人机交互、操作逻辑和界面美观的整体设计, 硬件操作面板和软件操作界面简单、舒适和自由。以文字、视频、三维动画和游戏等多种形式开发教学培训系统, 使教学培训不再枯燥乏味, 提高受训人员的积极性, 降低受训人员的技术门槛。

7) 安全可靠原则:

按照航天“六性”原则(可靠性、安全性、维修性、测试性、保障性、环境适应性)开展测发训练系统设计。箭地接口安全隔离; 供电信号与测试信号分离, 避免干扰; 地面电源具有过压、过流和限流等保护措施; 采用系列化、模块化设计, 便于维修维护, 建立一定数量的备品备件, 方便维护、更换与返修。

8) 扩展性原则:

测发训练系统按照某型号液体运载火箭作为基线开展设计工作, 研究成果可直接应用于其他型号液体运载火箭的测发训练; 训练系统以火箭电气系统接口模拟和数据模拟为主, 具备功能拓展能力。

1.2 系统功能

测发训练系统按照一体化的设计理念, 根据训练使用需求完成设备布局, 模拟运载火箭箭上控制系统、遥测系统、外安系统和动力系统的电气接口和信号传输特征, 模拟火箭测试发射过程中箭上状态反馈和负载状态, 在运载火箭模拟系统的等效状态下, 完成对火箭性能的自动测试与控制, 实施地面点火, 同时具有紧急情况下的应急控制功能。教学培训系统拥有一套交互式多媒体电子技术手册, 对参训人员进行理论学习和培训; 故障注入系统具备对测试系统硬件电路和软件状态进行故障注入的功能, 通过模拟故障案例, 训练参试人员故障排查、应急处置的能力; 考核评估系统具备对参训人员理论水平、实际操作、故障处置能力的考核评估功能, 并建立参训人员训练情况数据库。测发训练系统具备以下功能:

- 1) 实现箭上电气系统接口与信号特性的模拟;
- 2) 实现箭上电气系统的配电控制;
- 3) 实现箭上电气系统工作状态的控制、查询和显示;
- 4) 实现等效状态下自动或手动发射控制、地面点火和紧急关机;
- 5) 实现测试数据自动判读和比对;
- 6) 实现岗位受训人员理论学习、培训和考核;
- 7) 通过模拟故障案例, 实现故障注入功能;
- 8) 建立参训人员数据库;

1.3 系统组成

测发训练系统以某型号液体运载火箭测试发射方案为蓝本进行设计, 主要包括三个系统, 即运载火箭模拟系统、测发控测试系统和训练管理系统。三个系统相互结合, 实现运载火箭测发模拟训练, 系统框架如图 1 所示。

1.3.1 运载火箭模拟系统

运载火箭模拟系统是箭上控制、遥测、外安和动力电气设备的模拟系统, 根据箭上电气设备种类、接口和信号传输特征, 模拟火箭测试发射过程中箭上状态反馈和负载状态, 为测发控测试系统提供信号输入。运载火箭模拟系统根据某型号液体运载火箭构型和接口方式, 主要由火箭舱、接口适配器和火箭模拟装置组成。

火箭舱采用类似火箭的舱体, 用于装载接口适配器和火箭模拟装置, 配备液晶显示屏显示系统工作状态。

接口适配器按照某型号液体运载火箭构型, 分为一级适配器、二级适配器、三级适配器和仪器舱适配器, 这些适配器主要用于模拟箭地接口接插件和电缆连接关系, 用于接插件接插训练和脱插脱落训练, 并提供仿真信号通路。

火箭模拟装置主要用于模拟火箭箭上电气单机产品的电气性能, 包括配电器模拟装置、箭机模拟装置、电子程

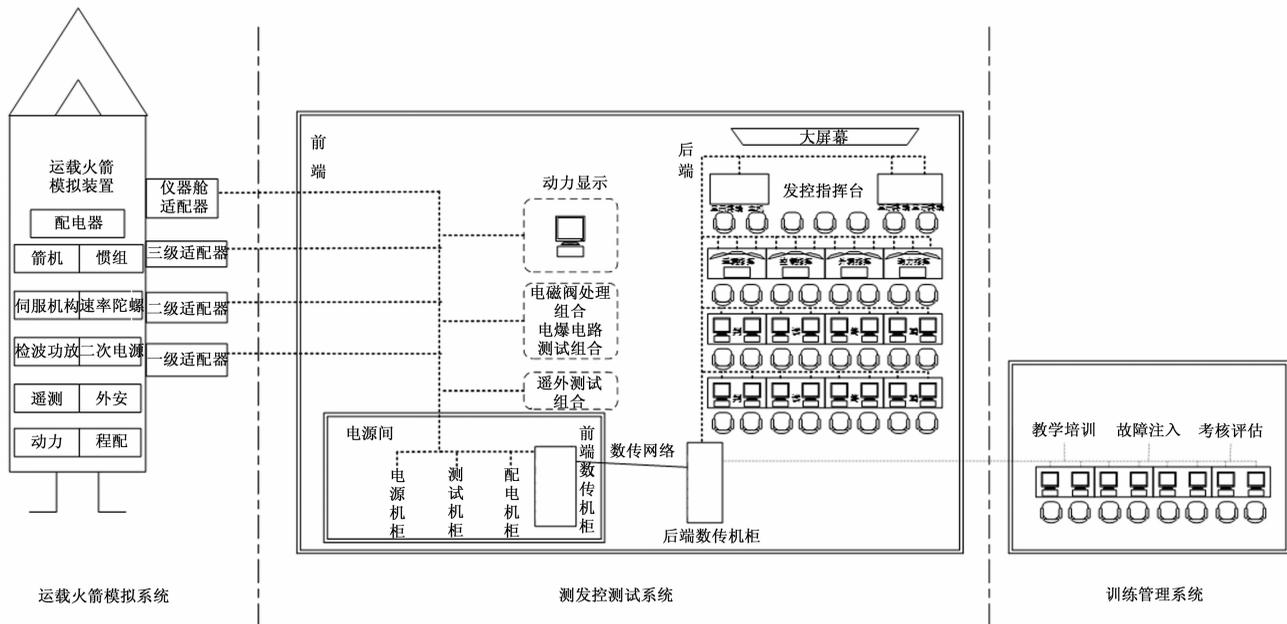


图 1 系统架构图

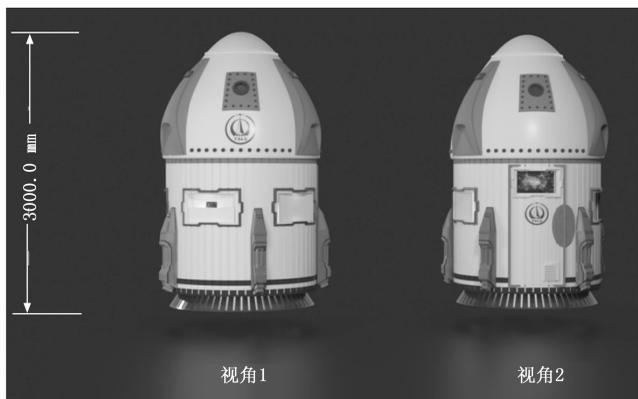


图 2 火箭舱

配模拟装置、惯组模拟装置、伺服机构模拟装置、速率陀螺模拟装置、检波功放模拟装置、二次电源模拟装置、遥测模拟装置、外安模拟装置和动力模拟装置。

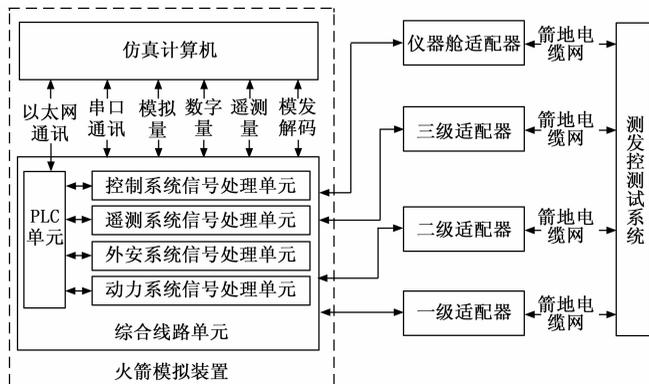


图 3 火箭模拟装置信息流

火箭模拟装置采用 IPC+PLC 的设计模式, 充分利用两种技术的特点, 实现模拟装置的高度集成。以基于 PCI 总线的工业控制计算机为仿真计算机, 并配置不同功能的 PCI 总线板卡, 实现火箭全系统电气信号的模拟^[5]; 采用综合线路单元综合火箭各系统电气信号, 使用 PLC 可编程逻辑控制器进行控制与运算, 通过各级适配器和电缆网将信号传输至测发控测试系统, 作为测发控测试系统的信号输入来源; 同时通过 PLC 模拟供配电逻辑, 通过 PLC 检测开关量信号, PLC 程序逻辑运算, 输出测发控测试系统需要的反馈信号。

1.3.2 测发控测试系统

测发控测试系统按照一体化的设计理念, 根据发射场需求, 使用前后端设备布局方案, 具备发射场塔勤、动力、时统和 C3I 等外系统接口, 能够在运载火箭模拟系统等状态下, 完成对火箭性能的自动测试与控制, 实施地面点火, 同时具有紧急情况下的应急控制功能。

测发控测试系统在某型号液体运载火箭一体化测发控系统设计方案基础上进行简化设计, 并结合新一代测发控系统通用化、集成化进行改进设计。该系统采用前后端设备配置模式, 前端设备包括电源机柜、配电机柜、测试机柜、前端数传机柜、遥外测试设备、动力系统测试设备、电爆电路电磁阀测试组合和电缆网; 后端设备包括发控台、后端数传机柜和计算机终端。

测发控测试系统由主控微机实现测发控流程的调度控制, 在测试和模拟发射过程中对测发流程有影响的测试数据需进行判别, 以确保测试和发射状态的正确性。

1) 供配电:

配电机柜中的发控组合通过以太网接收服务器配电指令, 并通过硬线电路将指令发送给电源输出控制组合。接

通组合内部接触器，来控制箭上供电、模拟供电以及电池加温的通断。同时，对程控电源总的输出母线电压和消耗电流进行采集，和程控电源本体的电源数据形成备份。

2) 发控状态控制：

配电柜中的发控 PLC 通过网络直接接收经过服务器转发的主机指令，通过外部继电器隔离或转接硬线指令，完成对箭上配电、转电、断电等功能，并查询 PLC 端口，检测指令操作后的箭上返回结果；实现动力系统增压和七管脱落的控制功能。

3) 测控：

主控微机^[6]通过服务器和数传网络将测试指令传递到测试机柜，测试机柜中的多种 PXI 总线功能模块完成火箭模拟量测试，继电器控制和激励输出，测试数据在显示终端中处理和显示。

主控微机通过服务器和数传网络将指令传递给遥外测试组合，实现外安地面综测仪加/断电和开关发射控制，并实时显示测试数据。遥外测试组合具备遥测系统数据传输功能，实现数据远程传输。

电爆电路测试组合和电磁阀测试组合采用分布式的测试方式，通过以太网接口设备完成对火箭火工品时串测试和电磁阀波形测试。

4) 点火控制：

当满足点火条件时，可通过主控计算机或发控台点火按钮向发控 PLC 发出“点火”信号，发控 PLC 控制点火 PLC 向箭上发点火信号。

5) 网络转发：

采用网络转发终端完成主控计算机与配电柜、测试机柜及测试设备之间指令、测试结果传输；通过网络向各显示终端传送。

测发控测试系统信息流见图 4 所示。

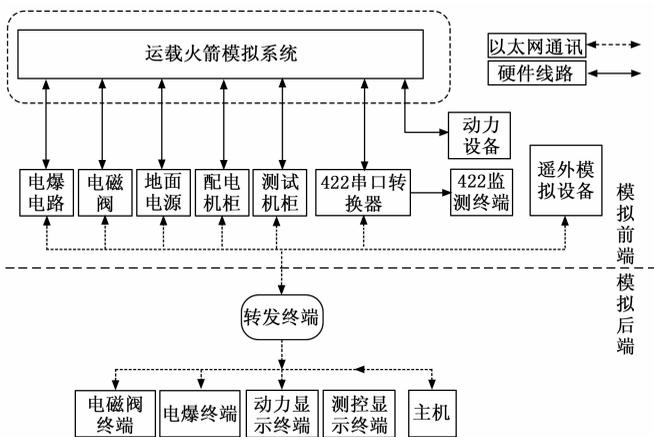


图 4 测发控测试系统信息流

1.3.3 训练管理系统

训练管理系统^[7]包括教学培训子系统、故障注入子系统和考核评估子系统。教学培训子系统通过一套基于网络的拥有文字、视频和三维动画等多种形式的交互式电子手

册^[8]实现参训人员理论学习和培训；教学培训子系统通过单机训练和测发流程训练，培养参训人员的实际操作能力；故障注入子系统具备对测发控测试系统进行故障注入的功能，通过模拟故障案例，训练参训人员故障排查、应急处置的能力。考核评估子系统，具备对参训人员理论水平、实际操作、故障处置能力的考核评估功能，并建立参训人员训练情况数据库。

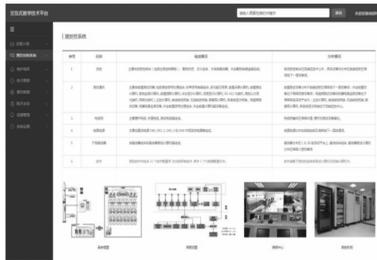
教学培训子系统以多媒体技术为基础，开发用于测试发射系统理论教学的交互式电子技术手册，作为训练系统的辅助设备。多媒体电子技术手册 (IETM)^[9]内容制作满足 GJB6600^[10-11]对数据内容模式的要求，资料模式应包括描述类、操作类、程序类、图解零部件类等，各模式下的信息主要由文字、技术插图、表格、视频及动画等数据格式内容组成。电子技术手册展示内容包括系统原理、接口原理、系统电路、综合测试、历次测试发射数据、故障案



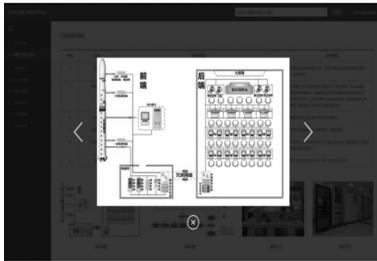
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 多媒体电子技术手册

例和航天史话等内容, 可以用来原理学习和资料查询。

故障注入系统^[12-13]通过模拟历次任务中出现的典型故障案例和应急预案作为模拟故障设定在系统中, 从故障分类、排故方法、故障树建立和定位、处理措施、验证方法来培养受训者分析问题和解决问题的能力。故障分类主要包括运载火箭在发射场测试过程中产生故障的一般原因和故障类型; 建立故障案例数据库, 为受训者排除测试中出现的故障提供技术支持、指导典型故障的排除并提供排除故障的途径和方法。

故障注入系统功能包括软件模拟故障注入和通过测发控测试系统预设硬件开关状态实现故障注入功能。故障模式和训练方法如下:

1) 状态连接和状态设置错误:

模拟关键的系统连接状态错误和设备状态开关设置错误, 通过岗位人员查找分析过程, 使其掌握系统的接口关系和连接方法, 以及地面设备的初始状态设置要求。

2) 关键节点连锁条件缺失:

模拟关键节点连锁条件的缺失, 通过岗位人员查找分析的过程, 使其掌握基本的发控逻辑条件。

3) 手动操作练习:

训练基本的脱插电缆、摆杆电缆和模拟电缆的连接操作, 通过常见的错误方法展示, 提醒操作人员正确的操作方法。

4) 设备单项试验操作方法:

模拟设置关键设备(如箭机、惯组、伺服机构等)初始加电后的参数异常情况, 培养岗位人员在试验中观察电器参数的习惯以及应急断电操作的方法。

5) 分系统测试故障:

模拟分系统测试过程中各类出错, 训练岗位人员根据试验现象和测试数据逐步分析故障定位的方法, 通过查找分析的过程, 使其掌握基本的测试原理、信号走向和输入输出关系。

6) 总检查测试故障:

模拟总检查测试过程中各类出错, 通过训练和排故的过程, 帮助岗位人员掌握全系统测试过程中的系统接口关系、测试原理和发射流程等内容。

7) 通讯故障:

模拟网络通讯故障和箭地串口通讯故障, 通过实物系统演练基本的应急处置方法。

8) 应急预案演练:

模拟关键流程节点出现各类故障, 通过实物系统演练基本的应急处置方法。

考核评估子系统考核部分可分为实操考核和理论考核。实操考核通过

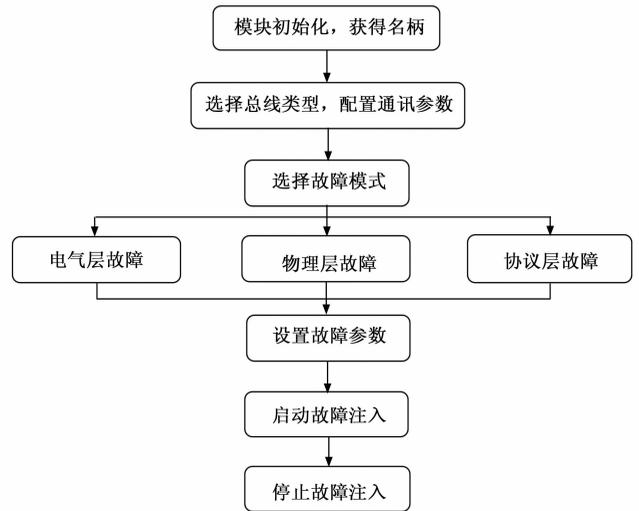


图 6 故障注入软件流程

建立服务器数据库与测发控测试系统连通, 将参训人员在测发控测试系统中的操作结果体现在考核评估系统。理论考核主要为试题库考核。

考核评估子系统主要具备以下功能:

1) 针对运载火箭各系统基本原理与系统内软、硬件操作, 进行相应考核;

2) 能对受训者训练成效进行检查, 评估其业务能力;

3) 可及时统计受训者考试成绩并存档, 受训者可查阅历次考试试题及正确答案;

4) 能组队实战模拟测试发射流程并进行团队任务考核;

5) 建立训练数据库上传受训者的学习记录和考核成绩, 结合个人档案(如性别、年龄、专业、项目经验、入职年限等)和考核成绩, 分析受训者训练偏向, 根据相关项目对应关系和其中规律, 针对个人制定一对一教学模式和考核方法。

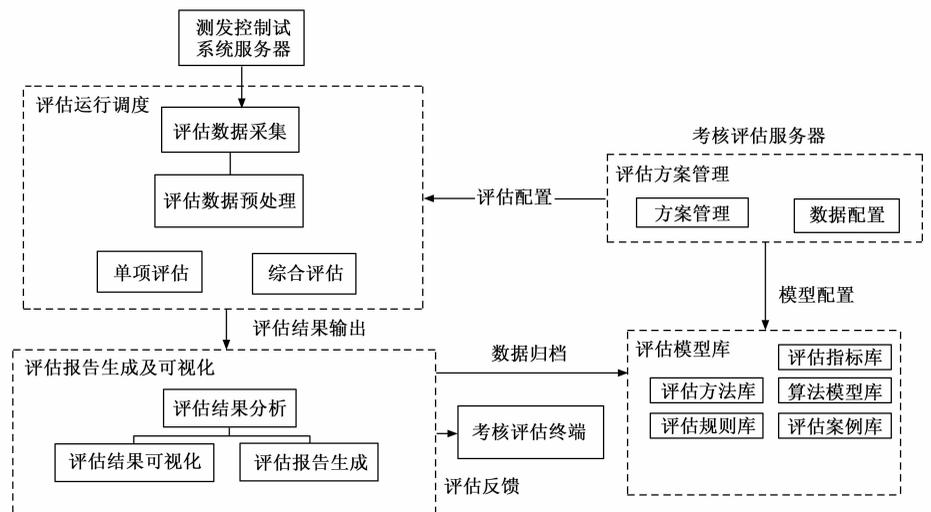


图 7 考核评估系统组成框图

考核评估子系统通过建立训练数据库,针对测发控设备的操作流程和操控特点,完成任务、设备、人员三个层面构建训练评估任务。本系统利用实时训练数据和离线训练数据,分别从操作时间符合度、操作步骤符合度和操作顺序符合度三个方面量化训练评估指标,最终形成评估报告和评估结果可视化展现。

评估模块在实施模拟训练时,可为不同专业、不同训练对象的模拟训练质量与效果进行定量与定性分析评估,从而对训练活动进行精确调控,大大提高训练效益。评估模块由方案管理、模型管理、运行调度和报告可视化生成三部分组成。评估方案管理主要用于管理评估方案,根据评估目的、内容及对象等,从评估资源库中选择合适的评估方法、评估模型等基础评估资源;评估模型定制主要根据评估管理选择的评估模型,针对本次评估方案,自主编辑或定制分层评估指标体系、评估算子,设置评估标准,形成针对本次的评估模型。同时还可根据不同专业评估需求,加载专业评估模型;综合评估主要包括评估数据采集、评估数据预处理、单项评估及综合评估等功能模块,还可根据不同专业评估需求,加载专业评估构件;评估结果分析与展示主要包括训练结果分析、训练结果展示、评估报告生成等功能模块;评估资源管理主要对评估方法、评估模型、评估规则、评估案例等各类评估资源进行综合管理。

1.3.4 辅助器材

为方便学员操作演练,测发训练系统还配套一些辅助器材,包括万用表、示波器、兆欧表、稳压电源、五金工具、电缆转接盒、网络耗材、光纤耗材等,方便学员开展全方位的状态准备操作和测发演练。

2 系统验证与结果分析

测发训练系统建成后,能够对运载火箭各系统操作岗位开展基本的设备操作和专业技能训练,能对系统指挥员开展故障排查、数据判读、应急处置和指挥岗位训练,能对高级指挥员开展测发流程筹划和推演的训练。既可以作为上岗考核的方法手段,也可以开展专项指挥演练和全要素的指挥训练,提高岗位人员执行航天发射任务的能力。

测发训练系统按照某型号液体运载火箭作为基线开展设计研制工作,研究成果可直接应用于其他型号液体运载火箭的测发训练;训练系统以火箭控制系统、测量系统和动力系统接口模拟和数据模拟为主,具备功能拓展能力。

测发训练系统设置超过 30 个训练岗位,通过训练,可让相关参训人员深入掌握设备原理、测试原理,熟悉操作方法,按岗位、系统级开展训练,并在实物条件下锻炼应急处置、故障排查能力,为快速上岗提供培训手段、为提高岗位人员专业技能、知识水平提供途径。

测发训练系统为测发流程^[14-15]优化研究提供测试环境。基于实物的训练系统包含真实测发控设备及火箭模拟系统,具备真实的测试发射环境,通过各类演练,促进测发流程的不断优化。

测发训练系统为开展全系统全要素的测发演练提供仿真平台。训练系统建成之后,可基于各类任务想定,构建模拟测发环境,为开展向全系统、全流程、全要素的任务演练提供条件支撑,为进一步促进测发人员能力提升奠定训练基础。

3 结束语

测发训练系统在充分借鉴某型号液体运载火箭测发控系统的设计经验基础上,经过调研国内外先进航天测发控技术和商业应用技术,提出了系统设计思路和方案。在满足某型号液体运载火箭测发控需求的基础上,结合发射场使用要求,通过运载火箭全真等效、测发控测试系统和训练管理系统的建立,构建实战化、实物化的液体运载火箭测发训练系统,实现了运载火箭全真模拟训练的突破。

参考文献:

- [1] 宋征宇. 新一代航天运输系统测发控技术发展的方向 [J]. 航天控制, 2013, 31 (4): 3-9.
- [2] 韩亮, 张宏德, 彭越. 运载火箭地面一体化测发控系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 5-8.
- [3] 任月慧, 张宏德, 彭越, 等. 运载火箭测发控技术未来发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 1-4.
- [4] 向军, 蔡珂, 魏永国. 运载火箭一体化测发系统的并行测试研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (6): 1-4.
- [5] 庄玮, 蔡珂, 马玉璘, 等. 运载仿真系统中高效测试方案的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 18-25.
- [6] 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.
- [7] 郑琛瑶, 董真杰, 肖勇兵. 一种训练管理系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (10): 218-220.
- [8] 王凌, 徐文胜, 等. 型号交互式电子技术手册第 1 部分: 制作要求 [S]. 中国航天科技集团公司第八研究院, Q/RJ/Z 124.1-2018, 2018.
- [9] 王丹, 黄皓, 陈策, 等. 基于 IETM 的运载火箭电气试验信息管理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 159-167.
- [10] 程跃兵, 张林梅, 陈本军. 基于 GJB6600 的武器装备 IETM 标准裁剪研究 [J]. 数字技术应用, 2016, 36 (4): 116-118.
- [11] 顾艺, 廖亚军, 车兵辉, 等. 基于 GJB6600 的风洞 IETM 系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (7): 57-61.
- [12] 公丕平, 姜海宝, 申金星, 等. 基于故障注入模式的装备检测与维修训练系统 [J]. 机械管理开发, 2021 (5): 95-97.
- [13] 荆广, 徐宏伟, 黎玉刚, 等. 一种多类型总线故障注入系统设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2020, 38 (2): 123-127.
- [14] 史会涛, 古艳峰, 王玉平, 等. 长征四号乙系列运载火箭去任务化模式的探索与实践 [J]. 上海航天, 2020, 37 (S2): 44-48.
- [15] 钟文安, 张俊新, 李智斌, 等. 某大型运载火箭测试发射流程优化策略 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021 (5): 85-88.