

航天发射一体化仿真训练系统

陆晋荣 樊忠泽 聂冲

(中国酒泉卫星发射中心)

摘要 为有效解决载人航天发射场测试发射缺乏飞行产品实装设备、测控跟踪无真实目标的训练难题,同时为测发工艺流程优化、各类方案验证等提供技术支持,研制了航天发射一体化仿真训练系统。从应用体系、系统体系、技术体系三方面论述了系统的体系框架,讨论了系统研制涉及的关键技术。仿真结果表明,该系统实现了试训一致的发射场全系统、全流程、全岗位综合训练。

关键词 航天发射 一体化仿真训练 高层体系结构 (HLA) 半实物仿真 虚拟现实
分类号 V553.2 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 03-0023-07

1 前言

在不执行航天发射任务时,发射场缺乏实装训练设备,这就造成:

(1)难以对发射场的试验组织指挥、试验保障进行训练,更难以对新的组织指挥理念、模式等进行探索和验证;

(2)测试发射操作无飞行产品,操作技能、故障判别与应急处置无法开展训练,一般只能通过下厂学习、原理钻研以及各次任务的经验积累来培训岗位人员,难以保证训练水平,也不利于人才梯队培养。

(3)测控系统缺乏跟踪目标,只能通过理论弹道来检验信道和系统接口,进行无目标的测控设备操作训练。这样就难以训练参试人员在异常情况下的跟踪水平和应急处置能力,直接影响训练效果和设备操作水平。

(4)试验总体人员无仿真工作平台,测发工艺流程、各类方案验证优化缺乏技术支持。

基于上述现实需求,通过综合集成多种仿真技术,研制了融测试发射、测量控制、指挥通信、地勤支持于一体的航天发射一体化仿真训练系统,解决了

航天发射场训练难题,实现了航天发射任务全系统、全流程、全岗位综合训练。通过故障推演、虚拟吊装、仿真飞行等,该系统能够辅助实际任务故障排除,进行机械接口协调,为试验总体人员提供技术支持。

国内外对仿真技术在航天发射、武器试验方面的应用进行了大量研究,实现了多种方式的应用系统^[1-7]。其中训练仿真主要用于装备的操作技能训练、参谋作业训练和各级指挥员在感知逼真的战场态势下进行分析、决策、指挥训练。

文献[3]指出基于虚拟现实技术的战略导弹部队仿真训练设备可以解决训练次数、训练环境的真实性、训练成本等问题,使官兵在计算机产生的“虚拟环境”中进行“真实”训练,从而大大提高训练效果。

文献[6]提出一个基于 HLA 的航天飞行任务联合仿真系统,航天员、飞行器、测控网等的仿真分别由各自所属分系统、部门采用各自适宜的实现方式,开发为独立的联邦成员,联邦成员通过 RTI 相互协同,构成联邦,完成综合的仿真和演练任务。

航天发射一体化仿真训练系统在综合集成、与实装设备结合、仿真粒度、故障推演等方面独具特色与创新。

来稿日期:2009-05-25

作者简介:陆晋荣:(1958.11-),男,总工程师,研究员,载人航天发射场系统总设计师。

2 系统总体设计

航天发射一体化仿真训练系统针对载人航天任务,以发射场测试发射、测量控制、指挥通信、地勤支持一体化训练为目标,充分结合发射场实装设备和首区测控设备,利用仿真技术为基本手段,突破实装设备实时无缝连接技术,支持发射场全系统、全流程、全岗位综合训练。

应用形式和用户层次的多样性,决定了系统总体设计必须满足系统性、实用性和先进性的要求;仿真对象的多层次和多粒度性,决定了系统总体设计必须满足先进性、可扩展性、可重用性的要求;系统的复杂性,决定了系统总体设计必须满足实时性要求。

2.1 应用体系

航天发射一体化仿真训练系统研制目标是实现试训一致的发射场全系统、全流程、全岗位综合训练。所谓全系统,即涵盖测试发射、测量控制、指挥通信、地勤支持等航天发射任务系统;所谓全流程,即基本涵盖工艺流程规定的项目;所谓全岗位,即涵盖航天发射任务参试各岗位。其应用体系简述如下:

(1) 测试发射

系统应提供虚拟火箭及其测试发射设备,实现虚拟火箭的虚拟吊装与装配、虚拟测试操作、故障推演、测试发射合练,应涵盖分系统测试、匹配测试、总检查测试、虚拟加注、模拟发射等测试项目,能够进

行应急处置训练。

(2) 测量控制

系统应为首区测控设备提供虚拟目标,跟踪特性与实际目标一致,设备运行与实际跟踪一致,信息处理与实际任务一致。

(3) 指挥通信

系统应涵盖发射场指挥调度体系,通过通信系统,将测试发射、测量控制、地勤支持等系统的信息汇集到各级指挥中心,包括航天发射指控中心、发射场 C3I 系统、各测控点指挥中心。

(4) 地勤支持

系统应涵盖推进剂加注、发射固定消防、电缆摆杆系统、供配电等地勤支持系统。

2.2 系统体系

由应用体系可知,开发数字化 CZ-2F 火箭和虚拟地面测试发射控制设备,研发展示飞行场景、为测控系统提供虚拟目标和信息源的火箭飞行仿真系统,研制地勤接口装置和测控设备半实物模拟器,适当扩展通信系统,与发射场 C3I 系统、推进剂加注系统、消防摆杆等地勤支持系统以及各级指控中心、测控实装设备相连,可构成航天发射一体化仿真训练系统。系统可分为火箭测试发射仿真系统、火箭飞行仿真系统、测控半实物仿真系统和发射地勤支持仿真系统四个分系统。系统体系结构如图 1 所示。

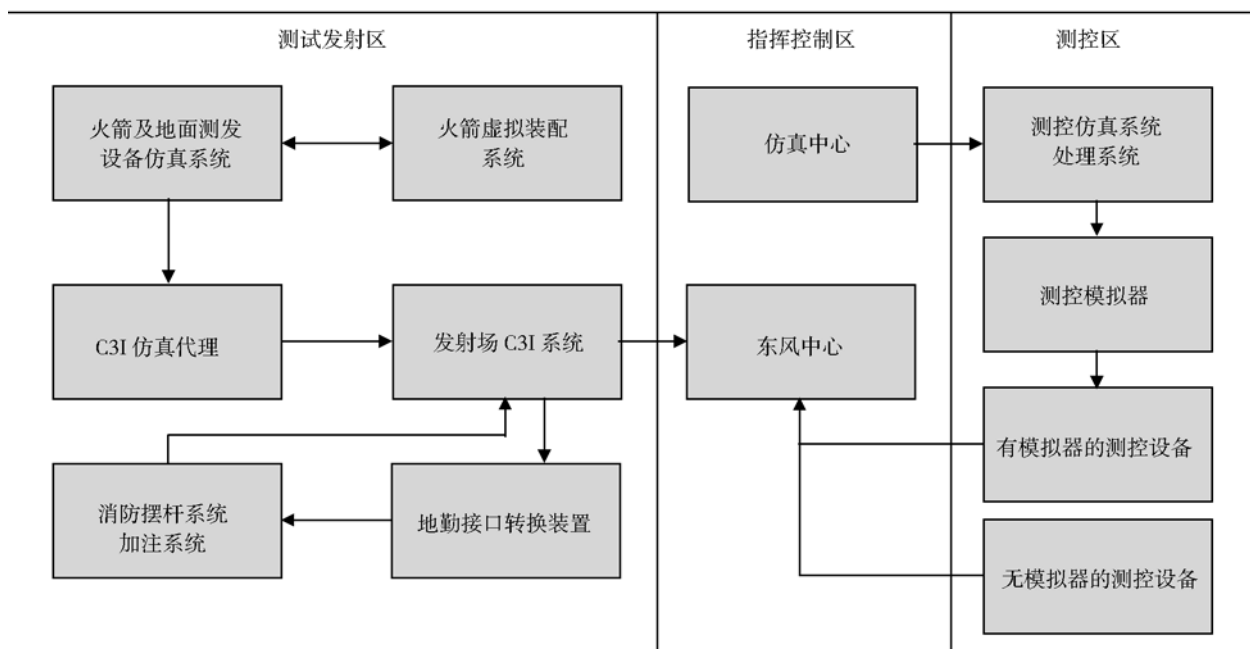


图 1 航天发射一体化仿真训练系统体系结构

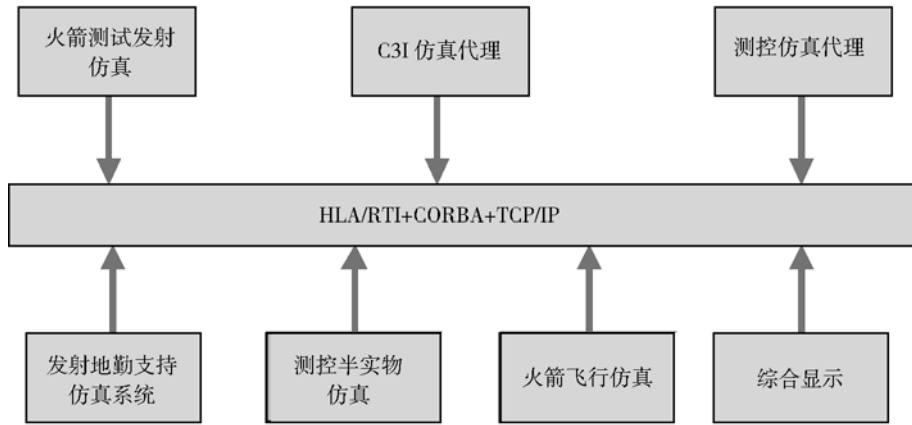


图 2 航天发射一体化仿真训练系统技术体系

2.3 技术体系

航天发射一体化仿真训练系统的仿真对象从火箭箭上单机设备到火箭分系统,从测发系统到测控系统,从虚拟单机到实装设备,系统性质异构,设备分布地域广,种类繁多,仿真粒度差异大,涉及众多技术领域,基于 HLA/RTI+CORBA+TCP/IP 构建分布式半实物仿真环境,实现系统总体设计,其技术体系结构如图 2 所示。

3 系统关键技术

3.1 基于 HLA/RTI+CORBA+TCP/IP 的分布式半实物仿真环境

HLA 是一个开放的、支持面向对象的分布式仿真体系结构。基于 HLA/RTI,构建单元/部件级数字火箭数学模型、元器件/模块级虚拟测试发射设备数学模型和火箭弹道与遥测数据数学模型,研发数字火箭成员组、测试发射设备成员组、火箭飞行成员组,构成一个开放的分布式数字仿真系统,整个系统具有可扩充性,成员之间关系如图 3 所示。

火箭测试发射仿真系统部分成员用 LabVIEW 开发,通过 ActiveX 控件与 RTI 连接;部分成员用 VC 开发,通过 DLL 动态库与 RTI 连接;实物/半实物系统通过仿真代理与整个系统连接,通过 TCP/IP+RTI 实现成员间交互;仿真代理通过 RTI 接收数据后采用 TCP/IP 与半实物仿真连接;大数据量的遥测系统采用 TCP/IP 直接传输,如图 4 所示。

为解决大规模计算任务与仿真实时性的矛盾,基于 CORBA+MPI+Oracle 的分布并行计算技术,利用高性能并行服务器和高速网络,使用 MPI 技术改造仿真计算应用,使用 Oracle 数据库存储大容量仿

真结果并提供大规模的并发访问能力,使用 CORBA 中间件技术为仿真应用程序提供获取仿真计算服务的能力,实现分布式仿真与计算密集型任务的高效结合。

3.2 基于图形集群的虚拟现实环境

基于图形集群,构建了如图 5 所示的虚拟现实环境。针对不同用户对虚拟现实系统的应用需求,设计实现了基于 STK/X 和 Vega Prime 的可扩展视景仿真框架,提供三维/立体模式下的仿真功能组件,包括实时网络数据驱动、数据文件驱动、仿真数据编解码转换、视点和路径实时控制等。用户只需要针对不同应用建立相应的实体模型和虚拟场景,即可容易地获得可视化仿真分析和虚拟场景展示能力。

在视景仿真框架下,实现了火箭虚拟吊装与装配,根据火箭飞行仿真系统的弹道数据,结合大地形模型和三维模型,实现了火箭飞行全过程立体视景,并为光学测控设备提供了实时、同步的分布式跟踪景象。图形集群为视景仿真软件的开发、运行提供必要的硬件支持,通过多窗口管理和中控系统实现视景仿真图像的输出管理。立体投影系统实现了三维立体输出,为操作人员提供接近真实的交互式操作环境,逼真地再现了火箭吊装与装配、火箭飞行全过程等立体场景。虚拟现实仿真信息流程如图 6 所示。

3.3 基于分布并行计算的火箭模飞/飞行弹道与遥测建模仿真

基于 CORBA+MPI+Oracle 的分布并行计算技术,实现了火箭模飞/飞行建模仿真。建立火箭主弹道及其分离体六自由度模型,实时仿真计算 CZ-2F 火箭模飞/飞行的主弹道及飞行分离体弹道(逃逸塔、四个助推、一子级、两片整流罩、二子

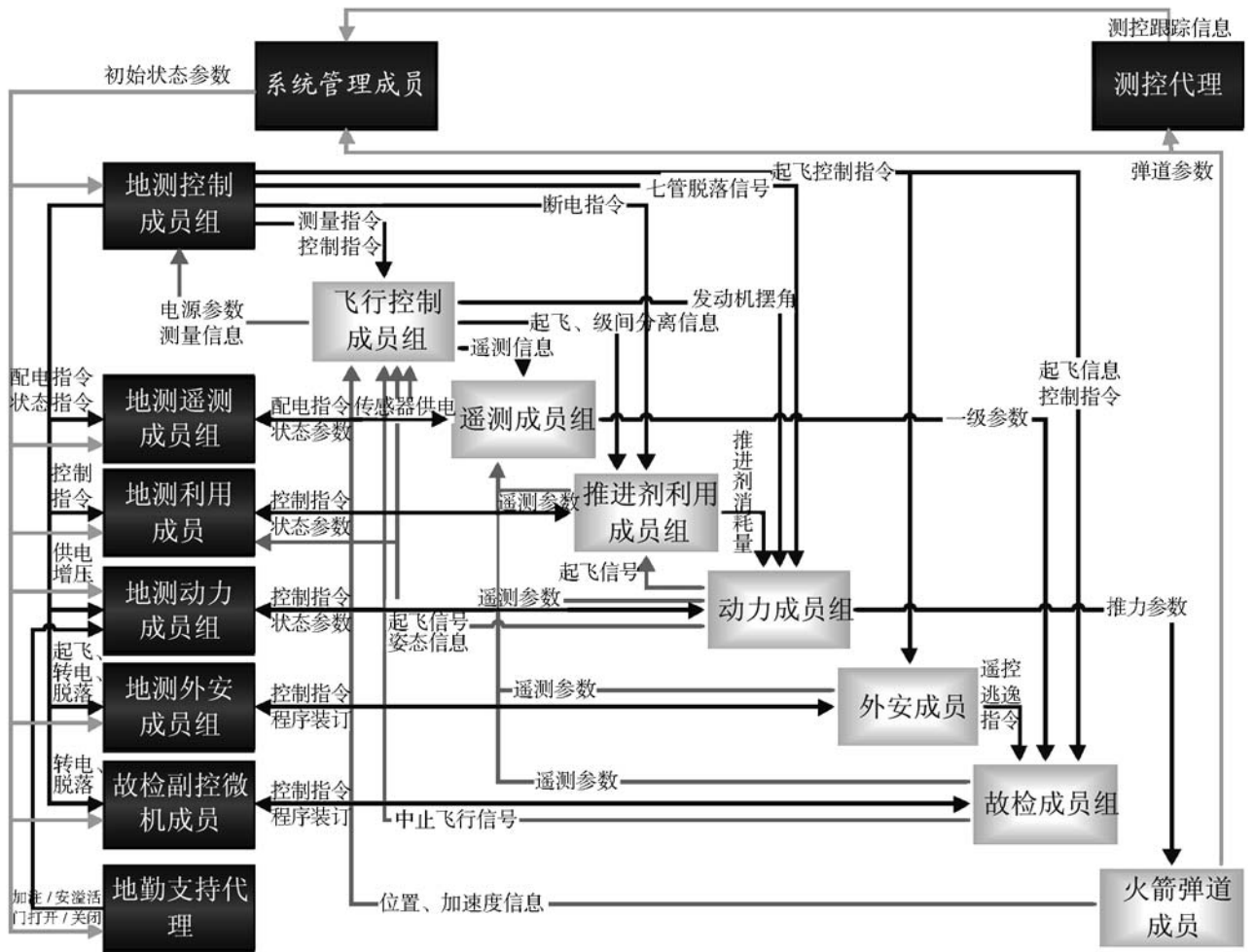


图 3 航天发射一体化仿真训练系统成员关系示意图

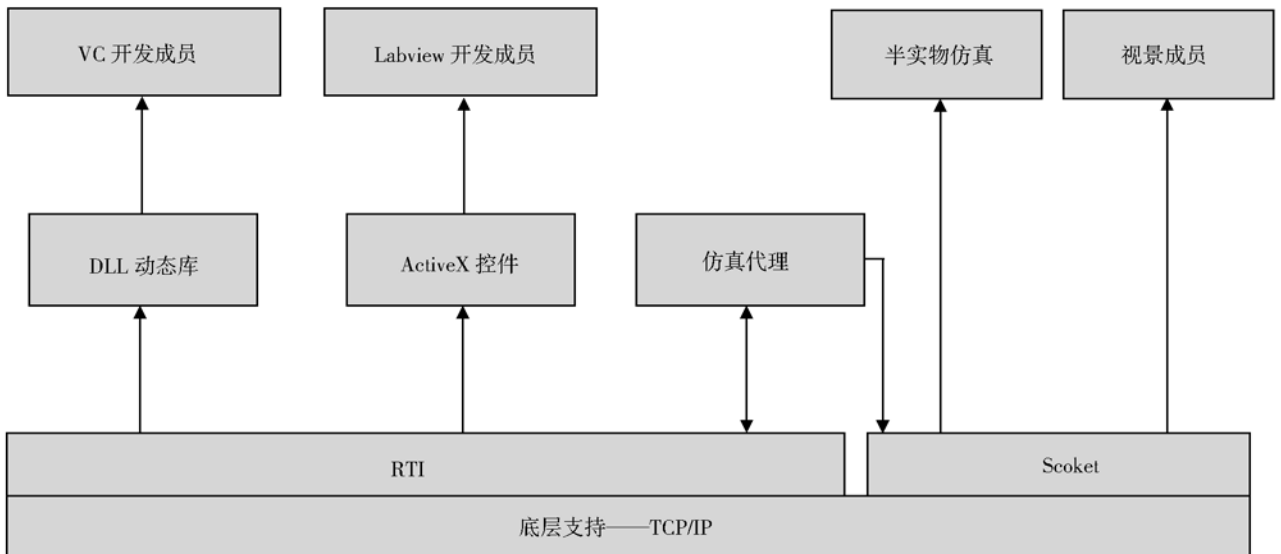


图 4 航天发射一体化仿真训练系统信息传输技术体系

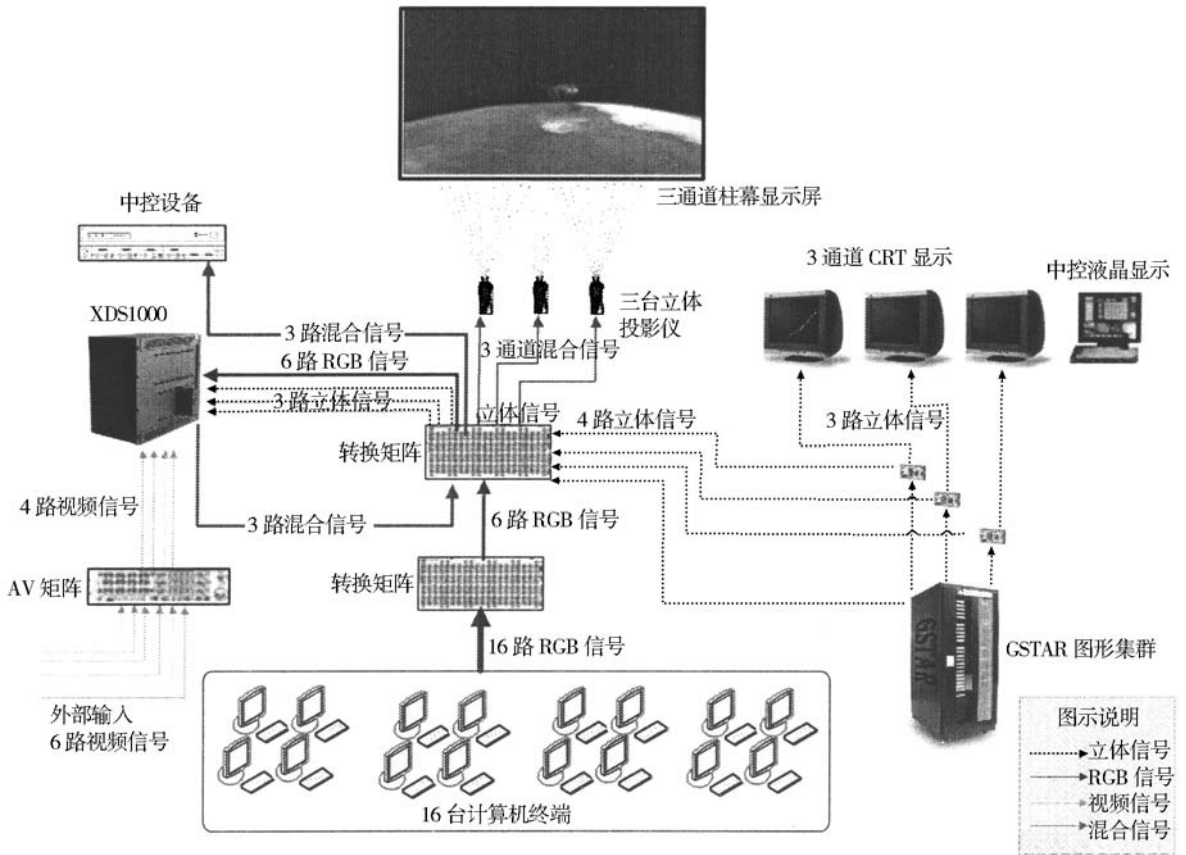


图 5 基于图形集群的虚拟现实环境

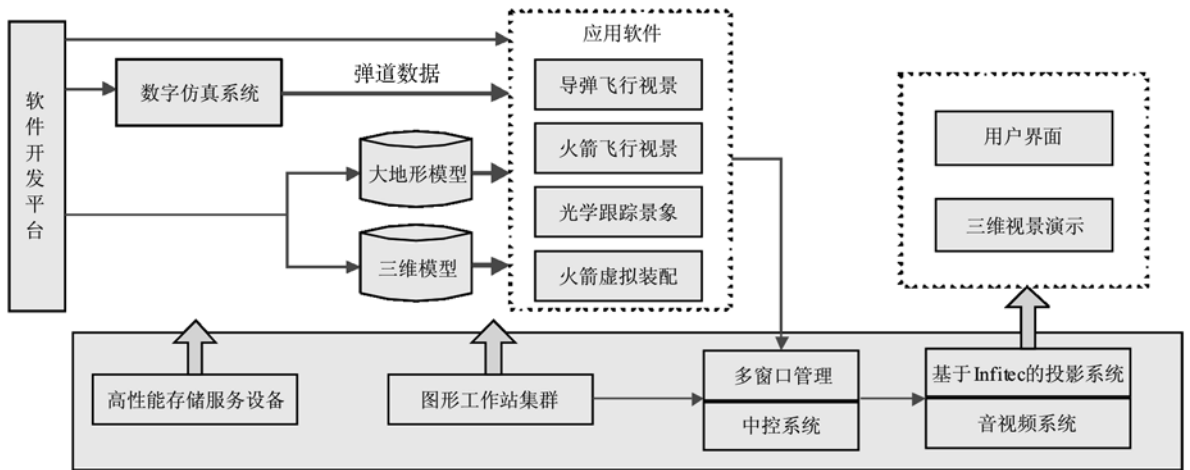


图 6 虚拟现实仿真信息流程

级、飞船共 10 条);建立与模飞/飞行相关的火箭遥测参数模型,实时计算缓变量、脉冲数、计算机字、时序指令等四大类 757 个火箭遥测参数,依据实际任务遥测大纲组帧,形成飞行或模飞遥测原码帧。

模飞/飞行仿真实时完成如下功能:

(1)仿真飞行时为测控系统提供仿真跟踪目标,为遥测设备提供信息源,通过所研制的测控模拟器,

与实际任务系统结合,构成测控闭合回路;

(2)仿真飞行时为虚拟现实系统、光学设备等可扩展视景仿真框架提供实时数据驱动;

(3)虚拟测试时为测试设备提供模飞数据。

3.4 基于仿真硬件接口的数字仿真系统与实装系统实时无缝连接

在不改变实装系统任务状态的前提下,采用“硬

件在回路”的接口设计,通过开发仿真代理和研制硬件接口设备,进行时间统一控制,屏蔽实装系统与数字仿真系统互连的复杂性,实现实装系统和数字仿真系统之间的双向信息交换。仿真代理采用 RTI 通信机制接入数字仿真系统,采用 TCP/IP 通信机制,通过地勤支持接口装置、测控模拟器与实装系统连接,如图 7 所示。

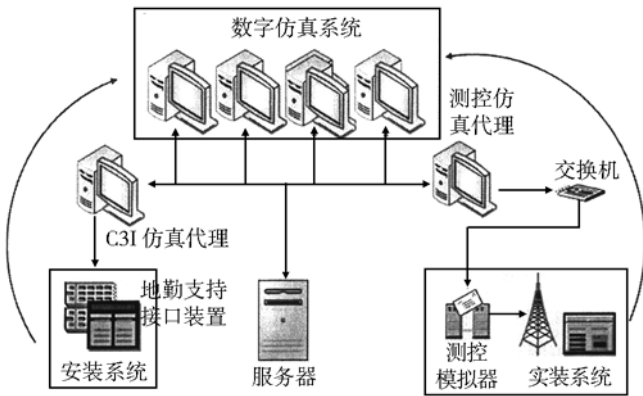


图 7 半实物连接设计

硬件接口实现的技术途径如下:

(1) 研制地勤支持接口装置,采用 PLC 直接控制发射固定消防、电缆摆杆系统、瞄准窗等地勤支持设备,将吊装设备速度、位置信息引入虚拟现实系统,实现了虚拟吊装与实际吊装设备的同步运行;

(2) 研制光学设备模拟器,接收仿真弹道数据,利用视景仿真框架获取实时、同步的瞄准镜视场和电视视场,采用单片机实现激光测距主波、回波仿真,从电视视场提取脱靶量,馈入伺服系统,实现光学设备的闭环跟踪;

(3) 研制单脉冲雷达模拟器,基于 Compact PCI 总线研制仿真信号板卡,由 DSP 实现板卡控制,由 FPGA 实现控制逻辑,依据接收的仿真弹道数据,由数字上变频器生成中频回波信号,送入接收机,实现雷达闭环控制;

(4) 研制遥测模拟器,基于 Compact PCI 总线研制信号处理调制板卡,依据接收的仿真遥测数据和弹道数据,生成 PCM 中频信号、跟踪误差信号,送入接收机和天控器,实现闭环跟踪和数据接收。

3.5 基于单元/部件模型的信号级仿真与故障推演

依据 CZ-2F 火箭及其测试发射设备的组成与工作机理,基于虚拟仪器技术,构建模块化部件或元器件数学模型,建立部件、元器件组件库,研究标准化

接口规范,设计标准软件接口,与设备、单机外形/面板模型相结合,组合成火箭及其测试发射设备成员组,并依据实际测试发射软件、飞行控制软件的流程编制相应仿真软件,实现测试发射系统信号级仿真。为降低系统研制成本,遥外测系统无线信号仅仿真数据特性,不产生高频信号。

针对重要要部件、元器件和电气接口进行失效机理分析,获取故障模式,并分析故障模式发生概率,建立故障机理数据库。研制部件/元器件组件时,预留故障模式接口。故障推演时,该组件可依据预设故障从数据库中读取故障信息,按时生成故障。整个系统由连接状态、逻辑关系推演出故障外在特征,从而实现故障推演。故障也可依据发生概率随机生成。

4 仿真结果分析

4.1 仿真度分析

航天发射一体化仿真训练系统仿真度分析结果如下:

(1) 仿真对象粒度: CZ-2F 火箭实现了电气/机械接口仿真、单机功能及性能仿真,实现了箭上所有信号的仿真,实现了飞行弹道和实时遥测仿真;地面测试发射设备实现了部件/元器件建模仿真,实现了所有信号、测试流程仿真,与火箭仿真结合,实现了故障推演;首区测控设备实现了与真实任务一致的设备运行与信号处理仿真;地勤支持系统实现了对实装设备的操控,实现了推进剂加注系统运行仿真与流量控制模拟。总之,系统仿真粒度差异极大,但实现了全系统信号级仿真。

(2) 仿真操作相似性: 仿真系统操作训练涉及实装操作与虚拟仪器操作,虚拟仪器与实装面板一致,由鼠标控制,操作手感不一致。但对于按键/按钮等操作,重要的是操作顺序和应急处置,因此本系统仿真操作训练可以满足要求。

(3) 场景沉浸感: 采用立体虚拟现实技术逼真再现了火箭飞行场景,数字仿真系统与实装设备充分结合,提供了与实际任务一致的操作环境,真正做到了试训一致。

4.2 仿真覆盖性分析

依据载人航天工程测发工艺流程,分析系统仿真覆盖性。共考虑发射场实际主要测试项目 30 项,实现仿真测试项目 27 项,其中,完全覆盖 22 项,基

本覆盖 5 项, 仿真覆盖性达到 90%, 从而可知, 仿真训练系统基本覆盖测发工艺流程规定项目。

5 系统特点

航天发射一体化仿真训练系统的特点可以归纳为:

一是“贴近任务, 试训融合; 综合集成, 三全一体”。系统贴近载人航天工程任务实际, 融合试验任务与仿真训练, 综合集成多种技术, 仿真测试项目基本覆盖测发工艺流程, 实现了试训一致的发射场全系统、全流程、全岗位一体化综合训练。

二是“虚实结合, 以虚求实; 人在回路, 合成训练”。在不改变任务状态的前提下, 完整实现了数字仿真系统与发射场实装设备、首区测控设备的实时无缝连接。仿真目标、半实物模拟器与测控设备构成测控跟踪闭环小回路, 仿真设备、接口装置与地勤实装设备构成发射控制闭环小回路, 并按真实任务状态通过发射场通信系统与指挥系统构成闭环大回路。发射场参试人员在回路中实现合成训练, 实现“练指挥、练操作、练处置、练协同”的训练目标。

三是“预设故障, 应急处置; 仿真推演, 任务支持”。通过设置故障训练模式, 系统依据故障数据库, 定时或随机生成某种故障, 实现应急处置训练。实际任务发生故障时, 可利用本系统进行故障仿真推演, 检验故障排除试验的科学性和可行性。

6 结束语

航天发射一体化仿真训练系统可以实现分业训练、合成训练和岗位技能考核。在载人航天工程发射场日常业务训练、921-04H 合练任务以及神舟七号

飞行任务中, 利用该系统检验和优化试验方案、预案、规程等文书体系, 进行大系统协同演练, 组织岗位操作与应急处置训练, 取得了明显的应用效果。

该系统可以部分代替测控设备发射场校飞试验, 用仿真手段考核设备全系统动态性能指标。通过仿真试验, 可以灵活再现各种实战环境和条件, 数据稳定可靠、重复性好, 跟踪过程可复现, 在发射场设备鉴定和设备检测中发挥了重要作用。

该系统的研制和实际应用表明, 利用仿真技术为信息化条件下航天测试发射操作和测控跟踪训练提供支持, 解决训练没有实装设备和目标源的难题, 有效降低训练的风险和费用, 提高训练效果, 是一种行之有效的思路和手段。同时, 仿真技术可在试验方案研究、测发工艺流程优化、装备维修体制策略研究、设备检修检测与鉴定等方面发挥重大作用。◇

参 考 文 献

- [1] 康志宇, 赵育善. 基于 STK 的导弹飞行数据快速可视化仿真实现. 弹箭与制导学报, 2004, 24(2): 1~4
- [2] 王斌, 孙翱, 王礼有. 智能检测技术在靶场测控设备中的应用及前景. 飞行器测控学报, 2003, 22(3): 84~88
- [3] 陈家照, 关正西, 夏志向. 虚拟现实技术在战略导弹部队中的应用探讨. 系统仿真学报, 2001, 13(增): 333~335
- [4] 赵铁山, 林小芬. HLA 仿真技术及其在航天器发射场的应用. 靶场试验与管理, 2006.4: 16~18
- [5] Curtis Blais, Don Brutzman, David Drake etc. Extensible Modeling and Simulation Framework (XMSF) 2004 Project Summary Report. Naval Postgraduate School. 2005
- [6] 崔晓峰. 基于 HLA 的航天飞行任务联合仿真系统设计. 飞行器测控学报, 2005, 24(3): 21~26

The Integrated Simulation and Training System for Space Launch

LU Jinrong FAN Zhongze NIE Chong
(China Jiuquan Satellite Launch Center)

Abstract: To resolve the difficulty that the manned space flight launch site lacks real flight product equipment for test-launch and actual target for tracking and telemetry, and provide technology support for test-launch technique routine optimization and plan validation, the integrated simulation and training system for space launch is developed. The architecture of application, system and technology are expounded, and the key technologies are discussed in detail. The simulation result shows that the system can implement synthesized training with all-system, all-routine and all-station, which are consistent with real test.

Key words: Space Launch, Integrated Simulation and Training, High Level Architecture (HLA), Hardware-In-the-Loop Simulation, Virtual Reality