

1-20-2024

Overall Scheme Design and Integration Testing of Hardware-in-the-loop Simulation of Guidance and Control System

Xiaofei Chang

Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, changfei@nwpu.edu.cn

Jiayue Jiao

Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Kang Chen

Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Wenxing Fu

Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Overall Scheme Design and Integration Testing of Hardware-in-the-loop Simulation of Guidance and Control System

Abstract

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation system is a complex distributed simulation system, and its design and integration directly affect the system performance and construction goals. Based on years of experience, this paper first summarizes the design of the overall scheme and analyzes the performance requirements of real-time, compatibility, scalability, and security. Then, the paper describes the overall scheme of a typical hardware-in-the-loop simulation system, including the functional hierarchy, operation mechanism, and structural composition. Finally, it summarizes the contents and steps of the system integration testing, acceptance testing, and credibility evaluation method.

Keywords

hardware-in-the-loop simulation, overall scheme, integration testing, operation mechanism

Authors

Xiaofei Chang, Jiayue Jiao, Kang Chen, Wenxing Fu, and Jie Yan

Recommended Citation

Chang Xiaofei, Jiao Jiayue, Chen Kang, et al. Overall Scheme Design and Integration Testing of Hardware-in-the-loop Simulation of Guidance and Control System[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 83-96.

制导控制系统半实物仿真总体方案设计及集成联试

常晓飞, 焦佳玥, 陈康, 符文星, 闫杰

(西北工业大学 无人系统技术研究院, 陕西 西安 710072)

摘要: 半实物仿真作为一个大型分布式仿真系统, 其总体方案的设计优劣和集成联试的是否顺利, 直接影响了系统性能指标的表现和建设目标的实现。归纳总结了总体方案设计的工作内容, 分析了实时性、兼容性、扩展性和安全性的性能要求; 给出了包括功能层次、运行机制和结构组成在内的典型半实物仿真系统总体方案; 概括了仿真系统的集成联试内容, 总结了典型系统的集成联试步骤, 给出了系统验收测试的内容和系统可信度评估方法。

关键词: 半实物仿真; 总体方案; 集成联试; 运行机制

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)01-0083-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0911

引用格式: 常晓飞, 焦佳玥, 陈康, 等. 制导控制系统半实物仿真总体方案设计及集成联试[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(1): 83-96.

Reference format: Chang Xiaofei, Jiao Jiayue, Chen Kang, et al. Overall Scheme Design and Integration Testing of Hardware-in-the-loop Simulation of Guidance and Control System[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(1): 83-96.

Overall Scheme Design and Integration Testing of Hardware-in-the-loop Simulation of Guidance and Control System

Chang Xiaofei, Jiao Jiayue, Chen Kang, Fu Wenxing, Yan Jie

(Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation system is a complex distributed simulation system, and its design and integration directly affect the system performance and construction goals. Based on years of experience, this paper first summarizes the design of the overall scheme and analyzes the performance requirements of real-time, compatibility, scalability, and security. Then, the paper describes the overall scheme of a typical hardware-in-the-loop simulation system, including the functional hierarchy, operation mechanism, and structural composition. Finally, it summarizes the contents and steps of the system integration testing, acceptance testing, and credibility evaluation method.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation; overall scheme; integration testing; operation mechanism

0 引言

随着作战场景的日趋复杂和军事任务的日趋多样, 飞行器制导控制系统逐渐呈现出结构组成复杂、光机电高度融合、非线性因素增加等特点, 使得系统数学模型难以准确描述其工作特性, 无法满足性能评判和技术验证的任务需求^[1]。

半实物仿真是将某些关键的实物部件接入到仿真回路, 取代相应部分数学模型的一种仿真形式, 具有无破坏性、可重复、安全、经济、可控等优点^[2], 已成为制导控制系统研制过程中的重要评估手段, 贯穿于系统研制的全寿命周期, 在装备研制、航空航天、试验鉴定等领域得到广泛

收稿日期: 2022-08-05 修回日期: 2022-12-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61503301); 陕西省自然科学基金(2019ZY-CXPT-03-02)

第一作者: 常晓飞(1983-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为飞行器仿真与效能评估。E-mail: changfei@nwpu.edu.cn

应用^[3-4]。

半实物仿真系统涉及系统工程、数学、计算机、光学、射频、机械、电气等诸多专业，其设计难度大、任务需求多、调试难度高^[5]。因此，半实物仿真系统的总体方案设计和系统集成联试就显得尤为重要。结合团队多年工作经验，深入分析总体方案的相似性需求、设计内容和设计要求，开展系统功能层次、组成架构方案和运行调度机制的设计；归纳总结了系统集成联试的内容、基本步骤和验收测试方法，为半实物仿真系统的建设提供理论支持。

1 半实物仿真系统总体方案分析

半实物仿真系统总体方案设计是基于制导控制系统专业知识和系统仿真实论方法，根据参试对象的工作原理和信号流向，结合试验目的和试验内容，考虑研制经费和试验场地等限制，提出仿真系统总体组成方案和仿真设备需求，完成仿真节点框架设计和仿真流程设计，明确节点调度机制和网络通讯协议。总体方案的优劣，直接关系到任务目的能否实现、研制过程是否顺利、建设成本是否可控。

半实物仿真系统的总体方案，面临着对象组成复杂、任务目标多样、涉及专业众多、性能要求先进、设计约束繁多等问题^[6]。建设人员必须高度重视总体方案的设计难度，相关工作应围绕项目建设需求和参试对象特点进行展开，规划系统的使用方式和预期效果，切勿在不了解对象特点的情况下匆匆上马，这样会导致后期集成联试阶段徒增大量工作，延长研制周期，增加建设经费，严重时会导致系统无法完成试验任务。

1.1 总体方案的相似性需求分析

半实物仿真之所以能够取代昂贵、危险、过慢的实物试验，就是以相似性原理为理论基础。在半实物仿真总体方案的设计中，数学模型的选择和推导，仿真系统的组成和设计，试验结果的

处理和分析等一系列工作都是基于相似理论进行展开的。所谓相似性原理^[7]，是按照某种相似方法或规则对各种事物进行分类，获得多个类的集合，在每一个集合中选取一个具体事物并对它进行综合性研究，获得事物的相关信息、结论和规律，这些信息、结论和规律可以方便地推广到该类集合中的其他事物。

半实物仿真系统总体方案的设计目标，就是在实验室环境下，复现飞行器的工作环境和工作状态，构造与真实环境“一致”的虚拟仿真试验环境。因此，要求半实物仿真系统在如下方面做到仿真场景与真实对象的相似。

(1) 对象运动特性相似

对象运动特性相似是指仿真系统中，构建的数学模型必须能够准确地反映所研究的飞行器运动轨迹特征和控制响应特性。

(2) 时间流逝关系相似

整个系统的仿真时间必须和真实世界时间一致，要求系统定时时钟、模型解算周期、数据传输延迟等方面与物理世界和现实情况保持一致。

(3) 部件安装关系相似

参试产品在仿真系统中的安装方式和连接关系，必须和实物部件的安装连接关系保持一致，特别是惯组和导引头的安装方向、舵机的安装顺序等内容。

(4) 信号连接关系相似

仿真系统与参试设备之间的信号连接方式，以及信号流向关系，必须和参试部件的连接关系相同，在电气特征、接口形式、发送间隔、通讯协议等方面保持一致。

(5) 姿态运动关系相似

在半实物仿真系统中，需要模拟飞行器在空间的姿态变化或弹目之间的相对角度关系，保证姿态运动关系相似。

(6) 力学环境关系相似

飞行器部分器件(如舵机、阀门等)在受力情况下，其工作特性会发生显著变化。因此，需要仿

真系统模拟参试部件的受力情况, 复现参试部件在飞行过程中的工作状态。

(7) 光学环境关系相似

为了保证光学探测器件的闭环仿真, 需要在实验室环境下, 构造特定的光学场景, 在场景态势、几何形状、像素尺寸、能量波段等方面, 实现与真实光学探测部件测量结果的一致。

(8) 电磁环境关系相似

针对参试部件中的电磁辐射敏感器件, 要求系统在辐射波段、幅值特性、相位特性和传播特性等方面, 复现飞行器所处的电磁传播环境, 保持与真实场景的一致。

在构建半实物仿真系统时, 要在相似性原理的基础上, 根据仿真对象的连接关系和工作原理, 利用多种分析方法构造相似环境和相似设备。

1.2 总体方案的设计内容分析

半实物仿真系统总体方案设计包含如下工作:

(1) 明晰建设目的

在进行总体方案设计时, 一定要结合总体情况和任务需求, 明晰仿真系统的研制目的。在确定系统建设目标时, 一定要围绕科研主线, 聚焦主营业务, 切勿人云亦云、照猫画虎。

(2) 设计组成方案

根据建设任务和目的, 明确引入到仿真回路的参试部件, 继而确定半实物仿真系统中的相似关系要求。相似关系的数量和方式就决定了仿真系统物理效应环境设备的类型和数目, 以及设备与部件之间信号接口关系, 从而完成系统组成方案设计。

(3) 确定设备指标

在组成方案的基础上, 开展系统的指标确定, 包括总体指标确定和设备指标分配。在指标确定及分配过程中, 要充分考虑仿真系统的应用范围和试验任务, 在系统方案复杂程度、关键技术可实现性、项目总体建设成本、系统后期维护使用

难度等方面进行综合比较, 选取最优的方案。

(4) 规划网络架构

各个仿真设备基于通讯网络来完成数据交互。在规划系统网络架构时, 根据系统组成方案和任务要求, 选择合适的网络连接形式; 结合仿真试验任务和参试对象的工作流程, 确定网络组织架构和网络消息调度机制; 根据仿真对象和试验分析内容, 规划仿真数据通讯交互方式和通讯协议。

(5) 布局设备安装

为了保证仿真系统的正常运行和使用维护方便、发挥设备最佳性能, 必须基于系统组成方案, 考虑场地限制, 对设备安装布局提出详细要求。在试验场地布局设计时, 根据仿真设备的环境需求, 并考虑系统的安全性、维护性和扩展性, 对试验室的基建、动力、电气、照明、通风、供水、温度、节能与环保等内容开展详细设计。

(6) 策划使用方案

半实物仿真系统除了能满足系统全局闭环仿真要求外, 还应当满足系统局部和部件单独闭环仿真及动态性能测试的要求, 这对于系统关键技术验证、系统故障的分析、隔离和复现, 保证产品研制质量方面具有重要的意义。因此, 总体方案应根据系统建设目的来完成系统使用方案的规划, 明确试验运行模式, 归纳试验操作流程, 制订数据处理方法, 给出仿真系统建设完成后的预期效果。

1.3 总体方案的设计要求分析

在开展半实物仿真系统总体方案设计时, 必须从工程建设的角度出发, 针对对象特点和任务需求, 在满足试验任务功能需求的基础上, 保证系统的实时性、兼容性、扩展性、安全性要求^[8]。

(1) 运行实时性要求

由于半实物仿真回路需要和产品实物进行闭环数据交互, 因此对系统实时性提出了极高的要求。实时性是仿真任务实现和仿真结果可信的基

础^[7]，其要求主要体现在如下方面：

1) 高精度的定时时钟：系统应具备高精度的定时时钟，要求模型解算和专用物理效应模拟设备功能均为实时运行。由于飞行器的飞行速度高、控制周期小、动态响应快，因此，制导控制系统的仿真步长通常在毫秒级。为了保证仿真精度，要求系统的定时时钟精度在微秒级。

2) 小且确定的传输延迟：分布式仿真系统中包含大量的数据传输、信号转换等工作，为了减小数据传输延迟对于仿真结果的影响，必须采用高速实时网络和高速信号采集接口；并且要求传输网络具有明确的传输延迟，防止由于传输延迟的随机不确定性导致的仿真异常。

3) 全系统的同步一致：整个仿真系统中的运行节拍必须统一，即所有参与试验的闭环节点需要一致有序地完成每一拍真计算和数据交互，避免由于数据交互错拍导致试验结果的不一致，从而降低仿真系统的精度和置信度。

(2) 系统兼容性要求

半实物仿真系统的投资金额和建设规模相对较大，这就要求系统能够在一定范围内适应同一类型的多个型号的仿真试验需求。在总体设计时，针对一系列型号的工作特点和仿真需求，总结型号之间的共性特点，归纳型号之间的系统差异，围绕数学模型、工作流程、电气通讯、机械接口等差异内容开展针对性设计，考虑通过标准化模型接口、电气接口通用适配器、更换机械安装连接件等措施，来满足不同仿真任务的使用要求。

(3) 规模扩展性要求

受批复经费和场地环境等限制，半实物仿真系统多采用分阶段建设，这就要求总体方案必须考虑扩展性要求。扩展性是指仿真系统和设备通过一定的经费投入和技术改造，能够在原有的基础上将系统和设备的性能、规模和适用范围进行扩展的能力。在进行总体设计时，系统应充分规划预留的相应升级、扩展接口，以便在制约因素消除后继续进一步完善系统建设，从而尽力避免

重复建设。

(4) 安全可靠要求

半实物仿真系统中的大型机电液一体化设备，在使用时存在一定的危险性，这就要求系统具备较好的安全性和可靠性。

在安全性方面，除了设备自身设计和系统使用规范之外，总体方案还应从网络调度和布局规划等方面进行考虑，通过对节点协议和消息类型进行规划，使得系统能够实时监控各个节点的运行状态，当某个节点出现故障异常时，系统能够第一时间做出响应，并通知各个节点进入异常处理模式，中止本次仿真试验，从而保证试验人员、参试部件和仿真设备的安全。另一方面，对于一些大型机电设备，通过布局调整或增加安全防护措施，来保证系统故障情况下的人员安全。

在可靠性方面，系统研制过程中应该严格按照质量工程的概念开展相关研制工作。通过联席会议的方式对研制里程碑节点进行评审，严格进行质量控制。对于系统软件代码编写、硬件电路设计制造、机械结构设计加工等环节，必须严格遵循相应的国家标准和行业规范，保质保量地完成研制工作。

2 半实物仿真系统总体方案设计

系统方案设计是一个由目标需求出发，求解实现功能、满足各项指标要求、给出多解方案并最终确定综合最优方案的过程。

正如任何复杂系统设计一样，半实物仿真系统方案设计也是由抽象到具体、自上至下、不断迭代的过程。复杂系统方案设计的主要工作内容是综合和决策，要求设计人员根据目标需求定义设计问题，在大量专业知识和丰富的实践经验基础上对系统任务和系统设计内容进行分析^[9]，划分系统的功能层次，形成了半实物仿真系统的初步原型；根据参试对象需求，确定关键的设计问题，定义节点功能、关键技术指标，设计运行机制。至此，方案设计基本完成，可以进行系统性能分析，

根据分析结果, 从试验任务目的、技术性能、经费以及研制周期等多方面综合评价方案的工程可实现能力, 最终进行决策选择最优方案^[10]。

系统设计流程主要用于定义利益相关者期望、生成技术需求并将需求转变为设计方案, 使其满足期望^[11]。方案设计过程如图 1 所示。

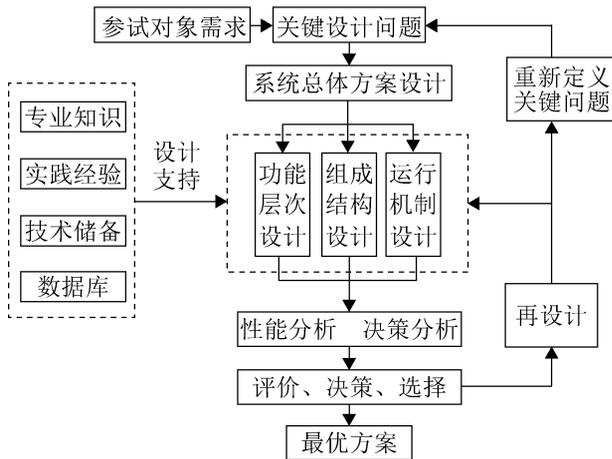


图 1 半实物仿真系统方案设计过程
Fig. 1 Design process of hardware-in-the-loop simulation system

下面结合工程经验, 给出典型半实物仿真系统的总体设计方案, 包括功能层次设计、组成结构设计和运行机制设计等内容。

2.1 功能层次设计

半实物仿真的建设涉及多个学科专业和职能部门。为了更好地开展总体方案设计, 对系统任务和设计内容进行分析, 开展系统功能的层次划分。

从图 2 可以看出, 制导控制系统半实物仿真系统, 主要由模型资源层、通讯链路层、核心功能层和任务应用层组成, 在试验数据中心的支撑下, 完成相关试验任务。

(1) 仿真系统模型资源层设计

模型资源层是整个半实物仿真系统的基础, 主要完成各类仿真模型的搭建, 包括动力学运动学、飞行环境、弹上部件等模型内容。模型的准确程度和完备程度直接关系到仿真的置信度水平, 模型的接口关系和构建形式直接影响了仿真系统的组织架构, 模型的描述方式和搭建环境直接决定了仿真机的类型规格。

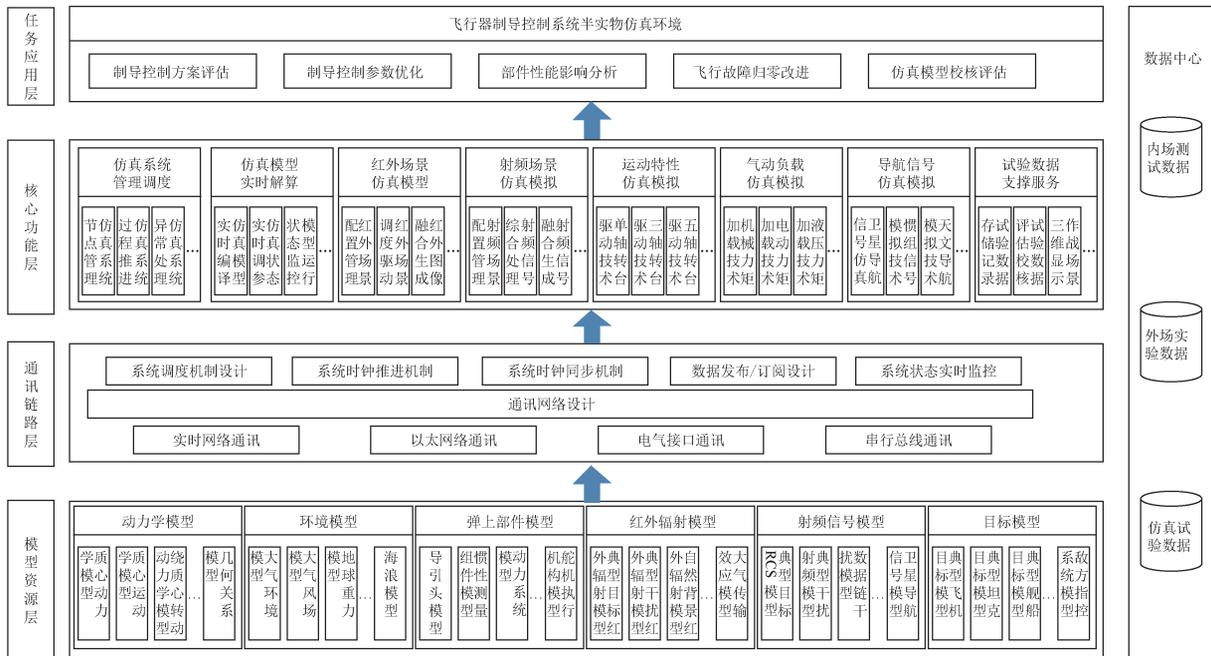


图 2 制导控制系统半实物仿真环境的功能层次设计
Fig. 2 Functional hierarchical design of hardware-in-the-loop simulation environment for guidance and control system

(2) 仿真系统通讯链路层设计

通讯链路层是整个系统的信号传输基础，以面向服务模式向核心功能层提供标准访问接口，实现可互操作的、实时的、面向对象的分布式系统应用的建立，支持应用层软件快速高效集成及系统运行，在保证安全的条件下完成信息传输的任务。在半实物仿真系统运行过程中，各个参试单元资源和仿真模型之间基于发布/订阅方式实现数据交换。通讯链路层通过调用实时通讯网络驱动、电气通讯接口驱动等，与各种仿真模型和实物部件完成数据交互和信号通讯；并通过运行机制设计，实现仿真系统调度管理、仿真时钟推进机制、系统时钟同步机制、数据交互机制及地址分配、设备状态实时监控、安全管理服务以及其他支持服务等。

(3) 仿真系统核心功能层设计

功能层是仿真系统的核心，通过各种专用仿真设备，完成仿真系统管理、仿真模型解算和物理环境效应模拟等任务，从而将产品实物引入半实物仿真回路。

仿真系统管理调度作为系统的管理核心，主要由仿真主控管理设备来实现，完成包括节点管理、过程推进、时钟同步、状态监控、异常处理等功能。

仿真模型实时解算主要完成飞行器动力学运动学、环境和目标等数学模型的实时解算任务，通常由实时仿真机来实现，完成模型搭建、代码编译、实时调参、运行控制、数据交互等任务。

红外场景仿真模拟主要完成半实物仿真系统的红外相似性模拟，为参试的红外导引头提供虚拟的红外场景，包括红外场景配置管理、红外模型调度计算、红外图像融合生成等功能。射频场景仿真模拟主要完成半实物仿真系统的射频信号计算，为参试的雷达导引头、数据链装置以及其他电子战装置提供射频信号，包括射频场景配置管理、射频信号综合处理、射频信号融合生成等功能。运动特性仿真模拟主要用于完成飞行器环

境中的运动特性的相似性模拟。气动负载仿真模拟主要完成飞行器仿真过程中的力矩特性模拟。导航信号仿真模拟主要完成仿真系统中的导航信号模拟，包括卫星导航信号模拟、惯组信号仿真模拟、天文导航仿真模拟、高度表导航仿真模拟等。试验数据支撑服务主要完成仿真系统的数据记录存储、过程曲线显示、作战过程二维态势/三维场景显示等功能。

(4) 仿真系统任务应用层设计

基于制导控制半实物仿真系统，结合用户任务需求，通过界面设置和人机交互优化，制定仿真试验大纲和使用操作说明，完成相应的仿真应用任务，如制导控制方案评估、制导控制参数优化、弹上部件性能影响分析、飞行试验故障归零改进、仿真模型校核评估等仿真应用任务。其功能应用与仿真系统的建设目的及任务要求密切相关。

(5) 仿真系统数据资源中心设计

数据资源运维的数据主要包括内场测试数据、外场测试数据和仿真试验数据，根据数据类型的不同按照一定的格式进行分类存储管理，建立运行稳定、执行效率高的数据存储处理和服务中心，为后续开展数据挖掘分析服务、模型置信度评估服务提供支撑。

2.2 运行机制设计

与其他分布式仿真网络相比，半实物仿真系统具有系统规模相对较小、节点耦合关系紧密、节点功能任务单一、系统仿真步长极小、实时性能要求较高、安全性能要求苛刻等特点。倘若采用一般的模块组合、功能捆绑方式实现仿真过程，势必导致仿真系统结构、时序和功能混乱，效率、速度和精度降低，难以完成复杂的仿真任务。

因此，针对半实物仿真系统特点，在事件驱动机制原理的基础上，结合参试对象需求和仿真试验装置，设计合理可行的运行调度机制，给出了节点功能划分、系统调度机制、仿真消息定义

等内容,从而高效、有序和准确地驱动仿真系统顺利运行。目前,该运行机制已在多个半实物仿真实验室中得到运用,有力地支撑了相关型号的科研任务,具有结构简单、实时性好、安全性高、扩展方便等特点。

(1) 仿真节点功能划分

借鉴1553总线的架构体系,对不同节点进行功能划分,从而完成仿真系统的节点任务规划和调度管理工作。各个节点的功能和任务如下^[12]:

1) 主控管理节点:作为整个系统的控制中枢,在仿真过程中发送仿真进程控制消息、控制系统仿真步长、推动仿真时钟前进和全系统的同步、监测各仿真节点的设备状态,确保整个仿真过程协调、有序进行。

2) 同步计算节点:作为整个系统的任务执行节点,要求其时钟推进必须严格准时,任务执行必须严格同步;并且在整个运行过程中,同步计算节点必须在线,不能出现故障、超时、丢帧等情况。在制导控制半实物仿真系统中,各类物理效应模拟设备和模型解算设备均为同步计算节点。

3) 监听客户节点:节点从实时网络读取仿真进程控制消息和仿真数据,而不向网络发布任何数据和仿真设备状态消息,相关数据也不进入到闭环仿真回路。对于整个闭环仿真系统,该节点是否在线、是否正常均不会影响到仿真试验的顺利进行,主控管理节点也不需要关心该节点的运行状态。视景仿真节点就是该类节点。

(2) 仿真系统调度机制

为了保证整个系统的统一调度,基于反射内存实时网络的中断消息模式和内存地址交互模式,设计出一套简单便捷的交互运行机制。

主控管理节点通过中断消息模式,向各个同步计算节点发送多种事件控制消息,完成仿真系统的任务调度和同步推进;各个同步计算节点,则通过内存地址的模式,上报自身的心跳信息和状态信息;主控管理节点在发送时间控制消息后,启动查询线程,定时读取规划好的节点状态地址,

查询各个节点的运行状态;主控管理节点的消息循环管理机制,按照设定的任务时序和仿真步长,提示用户按照操作顺序,完成不同事件消息的推进。

(3) 仿真消息类型设计

制导控制半实物仿真系统中,所有用户命令和节点产生的内部命令都被转化为事件消息,并以事件消息的形式在系统中流动,进而对各组件的行为产生控制。

在此,将仿真消息分为节点注册消息、系统控制消息和节点反馈消息,其中,系统控制消息又分为离散事件消息和连续推进消息^[13]。

1) 节点注册信息:为保证试验的顺利进行和信号的闭环传递,要求在仿真试验前确保本次参与试验节点均已就绪。因此,在正式进入仿真准备流程之前,定义一系列节点注册消息,主要包括试验节点参与消息、参与完成消息等,用于主控管理检查各个同步节点是否就位。

2) 离散事件消息:主要包括仿真准备阶段的一系列事件消息,这些事件消息均具有离散性、顺序性和单次性的特点。其中,离散性特点是指一些操作事件是突发性的,并不是连续产生的,并且每次发生之后,后续操作的时间未知;顺序性特点是指一些事件操作的执行前后有先后逻辑顺序,后一操作必须在前一操作完成的基础上执行,不能提前执行,否则会出现异常情况导致试验失败;单次性特点是指部分事件操作是单一事件,并不是重复多次发送。在离散事件之后,通常需要主控管理系统检查各个节点的完成情况,确保任务事件完成后才能向下执行。典型半实物仿真系统中的离散事件消息,主要包括:仿真准备、参数装订、系统初始化、初始对准、仿真开始、仿真结束、仿真应急终止等。需要说明的是,上述相关离散事件信息只是作为参考,需要根据具体的参试产品流程和仿真设备工作模式进行选择,有目的的进行增加或删减。

3) 连续推进消息:主要用于仿真开始后的时

钟同步任务。仿真开始后，仿真主控管理子系统按照设定的仿真步长向网络中各个节点连续广播发送时钟同步事件消息，整个系统在收到该消息后，完成当前拍的数据收发、模型解算和数据处理。通过时钟同步消息，能够确保整个系统时钟的唯一性和整个数据交互的同步性，大大提高了仿真系统的精度和一致性。需要说明的是，半实物仿真系统与数学仿真系统的一个主要差异就是半实物仿真无法在仿真过程中完成暂停状态，其原因是在于产品实物的时钟无法控制以及部分仿真设备的运行状态无法保存并恢复。例如，参试的飞控计算机，其飞控软件时钟由自身晶振来推进，无法由仿真系统进行控制；仿真转台在暂停后，不能保证暂停时刻的角度、角速度、角加速度的同时复现。因此，本方案中没有设计仿真暂停和仿真重启等消息。

4) 节点反馈消息：主要由各仿真设备发送，用于表征自身当前状态。仿真主控管理子系统根据各个节点的反馈状态信息，控制整个仿真系统的进程推进。常见的仿真设备状态消息包括：仿真设备正常、仿真设备故障、仿真设备繁忙以及仿真节点心跳等内容。

2.3 组成方案设计

典型半实物仿真系统主要包括仿真主控管理设备、仿真模型实时解算设备、各类物理效应环境模拟设备、信号通讯电气接口设备，以及支撑服务设备^[14]。但在具体实现过程中，仿真系统的组成与参试对象的制导体制、仿真试验任务目的、研制经费与场地等因素密切相关。特别是由于不同的探测制导体制工作原理存在显著不同，导致其所需的物理效应设备存在很大差异，制导控制系统半实物仿真实验室的组成差异主要由探测装置所决定。

图 3 给出典型的红外和雷达两种体制的半实物仿真系统组成方案^[15-16]。

3 半实物仿真系统集成联试

制导控制半实物仿真系统的各种专用仿真设备，通常会由多家制造商提供，并且运行过程中与参试产品进行深度交联。因此，在各分系统研制完毕后，必须进行集中联调联试，保证仿真系统的顺利交付和后续试验的顺利进行。

总体集成联调联试是以系统功能测试为主、基于需求规范的测试，必须满足充分性原则，确保系统相关功能属性和设计属性在试验过程中得到完全验证^[17]。通过全系统的总体集成联调联试，考核仿真系统性能指标，验证仿真系统研制任务。集成联试的相关结果是仿真系统验收的重要依据。

3.1 集成联试内容

集成联试是指在系统工程科学方法指导下，根据用户需求和总体设计方案，优选各种技术和方法，将相互关联的各个子系统连接成为一个完整可靠、经济有效的整体，使之能彼此协调工作，相互配合，共同完成一个整体目标^[18]。通过集成联试，实现检验系统通讯调度、考核产品接入能力、检测系统功能指标和完善系统操作细则等目标。

典型制导控制半实物仿真系统的总体集成联调联试任务主要包括如下内容：

(1) 系统网络通讯

制导控制半实物仿真中的各个节点通过实时网络进行通讯连接，因此，集成联试的首要任务，就是检查各个节点的网络通讯是否正常，确保板卡节点没有冲突、光纤收发端口连接正确。

(2) 系统调度推进

基于网络通讯测试后的结果，开展网络架构调试，按照系统推进机制和同步策略，检查仿真主控管理系统与各个仿真节点的调度控制。通过测试时钟推进机制和控制消息响应，检测系统全局推进机制是否正确，评估系统时钟同步误差的大小及影响，考核异常情况处理策略是否完备。

结果的正确性。

(4) 电气接口通讯

参试的产品部件和仿真设备之间，通过各种电气接口进行数据交互。在集成联试时，必须严格检查相关电缆的接线正确，特别是供电接口，防止由于电缆接线错误导致产品部件损伤。对于数字信号通讯的连接方式，检查其通讯协议和解码程序，保证仿真系统与产品部件的通讯正常。

(5) 产品部件安装

陀螺、舵机、导引头等实物部件在进行半实物仿真试验时，需要安装在转台和负载模拟台等设备上。集成联试时，检查相关部件与工装的正确可靠，避免出现安装干涉。在安装陀螺和导引头时，注意产品部件的安装方向，保证产品坐标系与转台旋转方向一致。在安装舵机时，注意舵机通道的安装顺序和旋转极性与真实情况保持一致。

(6) 试验数据存储

在仿真系统中，需要根据仿真试验目的，对试验数据的存储及显示进行测试优化，检查试验数据的存储格式和存储内容是否满足需求，过程显示数据是否直观。

(7) 三维视景效果

根据仿真对象的典型作战任务场景，基于标准弹道的仿真数据，对三维视景的显示效果进行测试，检查三维场景驱动引擎的显示效果，调整视景观察者的角度和位置，评判其显示帧频是否流畅，从而保证较好的视景演示效果。

(8) 系统仿真模式

在各项内容基本调试完成后，需要根据试验目的，完成参试部件的闭环仿真试验，设计不同部件组合的试验模式。通过联调联试，完成试验模式的测试，并形成详细的操作细则。

3.2 集成联试步骤

在开展半实物仿真系统的集成联试时，需要根据试验目的、设备特点、被试设备状态和仿真系统组成，在确保人员和设备安全的基础上，以循序渐进的方式，由简到难，由静态到动态，由

开环到闭环，先分系统后全系统的顺序进行集成。制导控制半实物仿真系统的典型集成联试步骤^[19]如图 4 所示。整个集成联试过程如下：

(1) 系统静态联试

该阶段主要完成仿真系统各设备之间的集成联试以及参试部件和仿真系统之间的集成联试，其中，仿真系统联试工作包括网络通讯联试和调度推进机制联试，主要用于检验系统通讯和网络调度方案，测试系统的实时性和同步性；参试部件和仿真系统的集成工作主要包括检查系统机械、电气和通信接口的正确性，测试参试部件和数学模型与仿真系统的接口匹配性和兼容性。

(2) 模型闭环联试

在完成仿真模型的适应性修改后，开展实时模型的闭环仿真。一方面，检验数学模型修改前后的解算一致性；另一方面，通过数学仿真，考核数据记录的完备性，调整仿真曲线的显示内容，优化三维视景的显示效果。

(3) 部件开环随动

在部件引入过程中，先进行开环的随动试验，即依然使用数学模型进行闭环解算，但相关数据会输出给相应的物理效应设备，从而激励各参试部件，使其进行随动运行。通过开环随动试验，对比相关部件的输出状态与对应的数学模型输出状态的变化趋势，检查相关部件在物理效应设备的安装极性，验证数据通讯和信息解码的正确性，初步评估导航算法和控制律计算的正确性。

(4) 部件闭环联试

待开环随动结果无误后，逐一开展部件的闭环接入工作，对比不同部件引入前后的仿真结果，分析部件性能对系统的影响。

(5) 系统闭环联试

在系统闭环联试时，依然要按照由简到难的原则，逐一引入产品部件。在每次增加参试产品的前后，对仿真结果进行深入分析，评估部件引入的影响大小。对于引入后出现的异常情况，需要分析其产生原因，排除仿真试验设备引起的弹道异常。

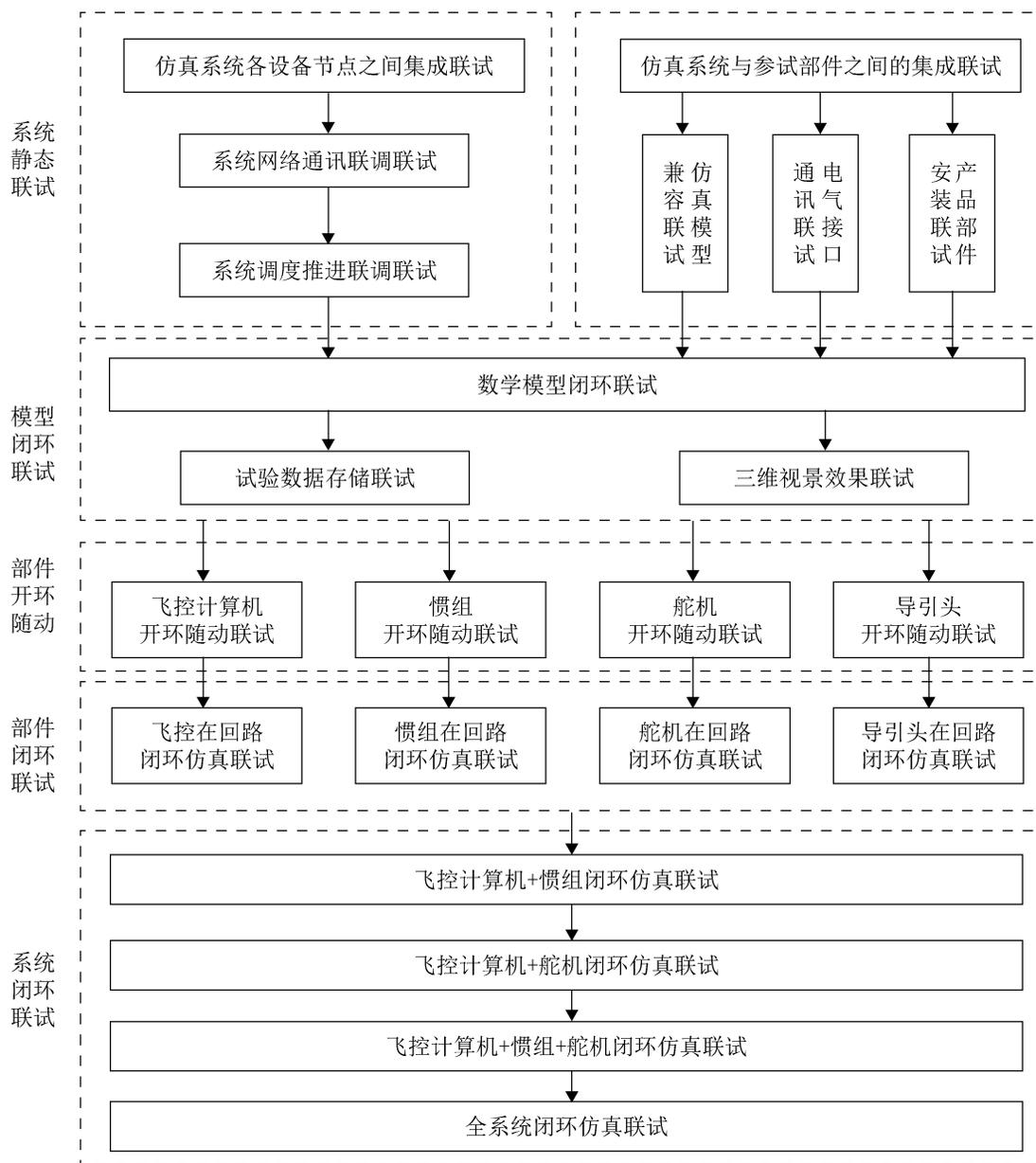


图 4 制导控制半实物仿真系统集成联试步骤

Fig. 4 Integrated joint test steps of guidance and control hardware-in-the-loop simulation system

3.3 验收测试评估

半实物仿真系统作为一个大型分布式系统, 涉及多个设备和多家厂商, 对其进行全面细致的验收测试与综合评估, 是系统投入使用前的必备环节。用户和研制方应根据合同、技术附件及相关标准, 制订合理可行的验收大纲, 开展深入细致的性能测试, 进行全面可信的统计评估, 从而保证系统顺利验收, 确保系统置信水平, 降低系统应用风险。

(1) 系统验收测试内容

参考相关案例和标准, 给出典型验收测试内容, 主要包括部件齐备检查、文档资料审查、性能单元测试、集成功能联试、故障处理测试等内容^[20]。

- 1) 部件齐备检查: 根据合同内容, 对交付的设备、附件、备件、软件、随机文件等内容进行数目统计和外观检查, 确保内容完整和外观无损。
- 2) 文档资料审查: 检查资料是否齐套, 格式

是否规范、内容是否全面以及存储介质内容的可读性和完好性。

3) 性能单元测试: 根据合同规定要求, 参考相关标准规范, 对系统的性能指标进行测试, 特别是转台、负载模拟台、卫星导航模拟器、目标模拟器等大型专用设备, 检查其性能指标和可靠性指标; 部分指标需要专业计量部门出具的计量检测报告。

4) 集成功能测试: 按照系统预期使用模式, 基于典型的数学模型和参试设备, 开展不同模式的试验验证, 检查全系统的连接关系、软件功能和调度情况; 并通过与飞行试验、数字仿真等数据进行校核分析, 评价系统的可信度水平。

5) 故障处理测试: 通过分析可能出现的故障场景, 将故障引入仿真回路, 检查系统的故障应急处理预案是否合理, 电气故障隔离模块和软件故障处理代码是否工作正常。

(2) 系统可信度评估

由于制导控制系统的复杂性、开发人员对仿真对象认知的不完整性、仿真设备和方法自身的局限性, 使得半实物仿真系统本质上只是仿真对象的一个近似系统, 必然存在一个可信度问题, 即仿真系统在特定的试验目的下能否有效反映仿真对象。因此, 必须基于相关试验数据, 开展半实物仿真系统的可信度评估工作。在此, 给出一种基于相似度法的半实物仿真系统可信度评估方法。

根据相似理论, 仿真系统可信度评估就是考察仿真模型的输出与实际系统的输出之间的相似程度。系统的相似度是刻画系统间相似程度的度量, 是相似单元的相似性对系统总体相似程度的总体反映。

下面给出仿真系统相似度的定义, 它是相似单元的数量、数值以及每个相似单元对系统相似程度影响权重系数等因素的函数。设系统 A 由 K 个要素组成的, 系统 B 由 L 个要素组成, 系统 A 、 B 间存在 n 个相似要素, 构成 n 个相似单元, 每个相

似单元的值记为 $q(u_i)$ 。每一相似单元对相似系统相似程度的影响权重为 β_i , 则系统 A 与 B 的相似度可以定义为^[21]

$$Q(A, B) = \frac{n}{K+L-n} \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i) \quad (1)$$

下面利用层次分析法来确定权重。把相似单元作为评价因素, 建立评价因素 U , $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $u_i \in U$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。 u_{ij} 表示 u_j 对 u_i 的相对重要性的数值, $j = 1, 2, \dots, n$ 。根据数值标度方法, 得到以下判断矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1j} & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & \cdots & u_{ij} & \cdots & u_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & u_{nj} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在 P 中, 有 $u_{ii} = 1$, $u_{ij} = u_{ji}^{-1}$, $u_{ij} = u_{ik}/u_{kj}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

权重系数大小, 反映每一相似单元对系统相似程度影响的重要程度大小, 根据上述判断矩阵, 权重数值大小确定方法的步骤如下:

将判断矩阵 P 每一列进行归一化, 得到:

$$\bar{u}_{ij} = u_{ij} / \sum_{k=1}^n u_{ik}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将列归一化后的矩阵按行相加:

$$\beta_i = \sum_{j=1}^n \bar{u}_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

将列向量 $\beta = (\beta_1 \ \beta_2 \ \cdots \ \beta_n)^T$ 归一化:

$$\beta'_i = \beta_i / \sum_{k=1}^n \beta_k, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

由上述分析得到特征向量 $\beta' = (\beta'_1 \ \beta'_2 \ \cdots \ \beta'_n)^T$, 即为权值。

最后计算相似单元的值。设仿真数值为 y_s , 实际值为 y_r , 则相似单元的值为

$$q(u_i) = \frac{y_r - |y_r - y_s|}{y_r} \quad (6)$$

将(5)和(6)式代入(1)即可得到系统的相似程度。

4 结论

总体方案规划和系统集成联试, 作为半实物仿真系统建设过程中的重要工作, 涉及专业众多、考虑因素复杂, 其方案优劣直接影响到系统性能和建设目标。本文总结了总体方案的相似性需求、设计内容和设计要求, 给出了包含功能层次、组成方案和运行机制的典型制导控制系统半实物仿真总体方案; 详细归纳了集成联试的内容和步骤, 给出了系统验收测试的内容和系统可信度评估方法。

参考文献:

- [1] 闫杰, 符文星, 张凯, 等. 武器系统仿真技术发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1775-1789.
Yan Jie, Fu Wenxing, Zhang Kai, et al. Review of the Weapon System Simulation Technology[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1775-1789.
- [2] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 黄建强, 鞠建波. 半实物仿真技术研究现状及发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(7): 5-7, 25.
Huang Jianqiang, Ju Jianbo. Development Introduction of Hardware-in-the-loop Simulation[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(7): 5-7, 25.
- [4] 中国仿真学会. 2018-2019仿真科学技术学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
China Simulation Society. 2018-2019 Report on Advances in Simulation Science and Technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2020.
- [5] 张励, 田义, 洪泽华, 等. 战术导弹仿真技术发展分析与思考[J]. 上海航天, 2019, 36(4): 9-18.
Zhang Li, Tian Yi, Hong Zehua, et al. Analysis and Consideration on the Development of Tactical Missile Simulation Technology[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(4): 9-18.
- [6] 柴娟芳, 高文, 郝恩义, 等. 复杂系统实时仿真平台关键技术探讨[J]. 上海航天, 2019, 36(4): 56-64.
Chai Juanfang, Gao Wen, Hao Enyi, et al. Discussion on Key Technologies of Real-time Simulation Platform for Complex Systems[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(4): 56-64.
- [7] 李铁才, 李西峙. 相似性和相似原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
Li Tiecai, Li Xizhi. Resemblance and Principles of Similarity[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014.
- [8] 董国才, 张翔, 唐同斌. 导弹半实物仿真系统通用设计规范研究[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(4): 87-92.
Dong Guocai, Zhang Xiang, Tang Tongbin. Study on General Design Specifications on Missile Hardware-in-the-loop Simulation System[J]. Fire Control Radar Technology, 2013, 42(4): 87-92.
- [9] 符文星, 于云峰, 黄勇, 等. 精确制导弹制导控制系统仿真[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [10] 王群, 周济, 杨一岳, 等. 轮式装载机总体方案设计专家系统[J]. 工程机械, 1991, 22(3): 9-13, 53.
Wang Qun, Zhou Ji, Yang Yiyue, et al. Expert System for Overall Conception of Wheel Loader[J]. Construction Machinery and Equipment, 1991, 22(3): 9-13, 53.
- [11] 齐润东, 王励, 毛权, 等. 基于框架的面向对象的雷达系统方案设计知识表示[J]. 系统工程与电子技术, 1993, 15(6): 76-81.
Qi Rundong, Wang Li, Mao Quan, et al. Object-oriented Knowledge Representation Based on Frames for Radar System Design[J]. Systems Engineering and Electronics, 1993, 15(6): 76-81.
- [12] 朱一凡, 李群, 杨峰, 等. NASA系统工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
Zhu Yifan, Li Qun, Yang Feng, et al. NASA Systems Engineering Handbook[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [13] 符文星, 彭勤素. 程控试飞器半实物仿真系统研究[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(2): 127-130.
Fu Wenxing, Peng Qinsu. Hardware in Loop Simulation System for Program-controlled Flight-test Vehicle[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(2): 127-130.
- [14] 符文星, 孙力, 于云峰, 等. 导弹武器系统分布式半实物仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 6073-6076.
Fu Wenxing, Sun Li, Yu Yunfeng, et al. Distributed Hardware in Loop Simulation System for Missile Weapon System[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 6073-6076.
- [15] 黄瑞松, 李海凤, 刘金, 等. 飞行器半实物仿真技术现状与发展趋势分析[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1763-1774.
Huang Ruisong, Li Haifeng, Liu Jin, et al. Status and Development Analysis of Hardware-in-loop Simulation Technologies for the Aircraft[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1763-1774.
- [16] 常晓飞, 李萌萌, 符文星, 等. 某型导弹飞控计算机半实物仿真系统的设计[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 318-322.

- Chang Xiaofei, Li Mengmeng, Fu Wenxing, et al. Design of Small-sized Hardware-in-the-loop Simulation System for a Certain Missile's Flight Control System[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2010, 28(3): 318-322.
- [17] 刘晓斌, 赵锋, 艾小锋, 等. 雷达半实物仿真及其关键技术研究进展[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(7): 1471-1477.
- Liu Xiaobin, Zhao Feng, Ai Xiaofeng, et al. Research Progress of Radar Hardware-in-the-loop Simulation and Its Key Technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(7): 1471-1477.
- [18] 王万齐, 沈海燕, 王志华, 等. 高铁联调联试车载集成综合显示平台关键技术研究及应用[J]. 中国铁路, 2019(7): 7-14.
- Wang Wanqi, Shen Haiyan, Wang Zhihua, et al. Research and Application of Key Technologies of Comprehensive Onboard Display Platform for HSR Testing and Commissioning[J]. China Railway, 2019(7): 7-14.
- [19] 张清东. CTCS-3级列车运行控制系统联调联试及典型案例分析[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- Zhang Qingdong. Testing and Commissioning of CTCS-3 Level Train Control System and Analysis of Typical Case[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.
- [20] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 自动测试系统验收通用要求: GB/T 37974-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, China National Standardization Administration. General Requirements for Automatic Test System Acceptance: GB/T 37974-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [21] 张忠. 仿真系统可信度评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Zhang Zhong. Research on Evaluation Method for Credibility of Simulation System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.