

2-15-2024

Design and application of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Guide Missile Test and Evaluation

Jianbin Dou

PLA 63871 Troops, Huayin 714200, China, jianbindou11@163.com

Xiaobing Wang

PLA 63871 Troops, Huayin 714200, China

Hongjian Yang

PLA 63871 Troops, Huayin 714200, China, 31623476@qq.com

Yulong Gao

PLA 63871 Troops, Huayin 714200, China

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.

Design and application of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Guide Missile Test and Evaluation

Abstract

Abstract: The characteristics of the army's conventional infrared imaging guide missile hardware-in-the-loop simulation system used for test and evaluation is analyzed, and a system that can meet the test and evaluation requirement of infrared imaging guide missile is designed. The key technologies such as universal system design, rapid iterative development design of heterogeneous communication data, high radiation infrared interference dual channel coupling simulation, high-precision timing and synchronization, generation of complex battlefield environment are solved. The application of the system is verified on the typical anti-tank missile and helicopter borne missile tests. The system can be used for infrared imaging guide missile test identification and simulation tests, which can provide strong support for the actual combat assessment, limit boundary performance and anti-jamming performance test of weapon system.

Keywords

image guidance, missile, hardware-in-the-loop simulation, test and evaluation, system design

Recommended Citation

Dou Jianbin, Wang Xiaobing, Yang Hongjian, et al. Design and application of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Guide Missile Test and Evaluation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 522-532.

成像制导导弹试验鉴定半实物仿真系统设计与应用

豆建斌, 王小兵, 杨红坚*, 高玉龙

(中国人民解放军 63871 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 围绕陆军常规红外成像制导导弹试验鉴定仿真实验需求, 对仿真系统进行了特点分析, 设计了红外成像制导导弹试验鉴定半实物仿真实验系统。解决了系统通用化设计、异构通讯数据快速迭代开发、高辐射红外干扰双通道耦合仿真、高精度定时与时间同步、复杂战场环境生成等关键技术。通过典型反坦克和直升机机载导弹等试验, 进行了应用验证。系统可用于红外成像制导导弹鉴定仿真实验, 为武器系统实战化考核、极限边界性能和抗干扰性能试验等提供有力支撑。

关键词: 成像制导; 导弹; 半实物仿真; 试验鉴定; 系统设计

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)02-0522-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1094

引用格式: 豆建斌, 王小兵, 杨红坚, 等. 成像制导导弹试验鉴定半实物仿真系统设计与应用[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 522-532.

Reference format: Dou Jianbin, Wang Xiaobing, Yang Hongjian, et al. Design and application of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Guide Missile Test and Evaluation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 522-532.

Design and application of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Guide Missile Test and Evaluation

Dou Jianbin, Wang Xiaobing, Yang Hongjian*, Gao Yulong

(PLA 63871 Troops, Huayin 714200, China)

Abstract: The characteristics of the army's conventional infrared imaging guide missile hardware-in-the-loop simulation system used for test and evaluation is analyzed, and a system that can meet the test and evaluation requirement of infrared imaging guide missile is designed. The key technologies such as universal system design, rapid iterative development design of heterogeneous communication data, high radiation infrared interference dual channel coupling simulation, high-precision timing and synchronization, generation of complex battlefield environment are solved. The application of the system is verified on the typical anti-tank missile and helicopter borne missile tests. The system can be used for infrared imaging guide missile test identification and simulation tests, which can provide strong support for the actual combat assessment, limit boundary performance and anti-jamming performance test of weapon system.

Keywords: image guidance; missile; hardware-in-the-loop simulation; test and evaluation; system design

0 引言

半实物仿真又称物理-数学仿真, 可实现人和硬件在回路的仿真, 可在不进行动态飞行试验的

条件下对导弹进行全系统综合测试验证, 且模拟的逼真度和可信度较高^[1-2]。导弹半实物仿真系统的主要用途是完成制导控制部件工作性能考核, 优化制导控制系统和武器系统设计, 验证武器系

收稿日期: 2022-09-17

修回日期: 2022-12-26

第一作者: 豆建斌(1986-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为制导武器仿真。E-mail: jianbindou11@163.com

通讯作者: 杨红坚(1979-), 男, 高工, 硕士, 研究方向为制导武器仿真。E-mail: 31623476@qq.com

统整体战技指标和工作性能。随着仿真技术及武器系统的发展,以及试验鉴定需求发展,半实物仿真技术已成为制导武器试验鉴定的重要手段^[3-4]。但因试验鉴定工作的特殊性质与需求,对仿真系统的功能、通用性和适用性等提出了特殊的要求。因此,围绕陆军常规红外成像制导导弹试验鉴定仿真试验需求与要求,以陆军典型红外成像反坦克导弹、直升机机载红外成像导弹为对象,研究解决相关关键技术,设计了红外成像制导导弹半实物仿真实验鉴定系统。系统在红外反坦克导弹、直升机机载红外成像导弹等典型武器系统中进行了应用,为武器系统实战化考核、极限边界性能和抗干扰性能实验等提供了有力支撑,有效拓展了红外成像制导导弹试验鉴定能力。

1 红外成像制导导弹试验鉴定半实物仿真特点分析

1.1 任务对象类型多

对于武器系统研制部门而言,仿真系统一般承担相关系列武器仿真验证任务,任务相对固定,且系统设计针对性比较专一。与其不同,试验鉴定单位需承担地面反坦克导弹、直升机机载空地导弹和空空导弹,以及无人机机载导弹等多种类型的精确制导导弹试验鉴定任务。因此,仿真系统将承担不同研制单位不同类型的导弹仿真任务,无法为每一类型建立一套仿真系统,这就要求仿真系统有较强的通用性,能够满足多种类型导弹试验鉴定任务的需要。

1.2 通讯接口复杂

不同单位研制的不同类型导弹,其弹上通讯接口与协议均不相同。如单兵精确制导导弹、车载反坦克导弹和直升机机载导弹,由于武器载体不同,其通讯接口具有很大差异。为了满足不同导弹仿真实验需求,实现仿真系统与不同导弹之间的实时通讯与控制,就要求仿真系统能够实现

不同导弹异构通讯接口的快速开发与迭代。

1.3 战场环境要素构建复杂

鉴定试验中复杂环境适应性考核要求不断增加,仿真实验又是复杂环境适应性考核的重要手段,为满足考核要求,仿真系统必须能够模拟复杂的空中和地面作战场景,包括地面建筑、车辆、装甲、工事等重要军事目标,直升机、无人机等空中目标;丘陵、山地、戈壁、城镇、岛屿和空中等多种典型背景;雨、雪、雾、霾、太阳、云,烟幕、强光、地面和空中红外诱饵等典型干扰,并要能够按照实验要求快速构建生成实验所需的复杂战场环境。

1.4 突出极限边界性能仿真

极限边界性能仿真是制导武器性能鉴定仿真的重要目的之一。主要开展导弹高海拔、强风、大离轴角、高机动性、最大射程和最近射程等极限边界性能考核。要求仿真系统设计突出极限边界性能仿真需求,如五轴转台的高机动性、大角度范围等,对系统安全性与可靠性等都提出了更高的要求。

2 红外成像制导导弹试验鉴定半实物仿真系统设计

2.1 仿真系统组成

红外成像制导导弹半实物仿真系统主要由总控、仿真计算机、信息接口、五轴转台、视景仿真系统、实时网络、舵机负载模拟器等分系统组成。对于试验鉴定仿真实验,导弹数学模型及参试部件为被试品,因此,系统组成中不考虑导弹数学模型和导弹部件,如图1所示。

2.2 仿真系统工作原理

仿真系统工作原理及仿真流程如图2所示。红外导引头和惯性导航组件安装在五轴仿真转台的内三轴上,导引头光学入瞳处置于内三轴的

回转中心，其纵轴指向五轴转台的目标安装中心。转台内三轴实时接收仿真计算机指令，模拟导弹姿态运动，给导引头一个真实的飞行运动环境；视景仿真计算机根据目标特征(光学图像特征、几何变化特征等)实时地生成目标背景图像，并将其投射到安装在五轴转台外两轴上的红外目标模拟器上，实现目标与场景红外图像模拟；五轴转台内三轴与外两轴共同实现弹目相对运动模拟；舵机安装在负载模拟器上，模拟导弹飞行状态下舵机受到的铰链力矩，最终，完成整个导弹飞行过程的仿真模拟。

3 红外成像制导导弹试验鉴定半实物仿真关键技术

3.1 通用化系列化系统总体设计

为满足陆军常规地面反坦克导弹、直升机机

载空地和空空红外导弹半实物仿真实验需求，系统按照标准化、系列化、模块化和通用化等设计思想与要求，通过分析各类红外成像导弹特点，充分结合其共同特点，对系统进行了通用化、系列化总体设计。

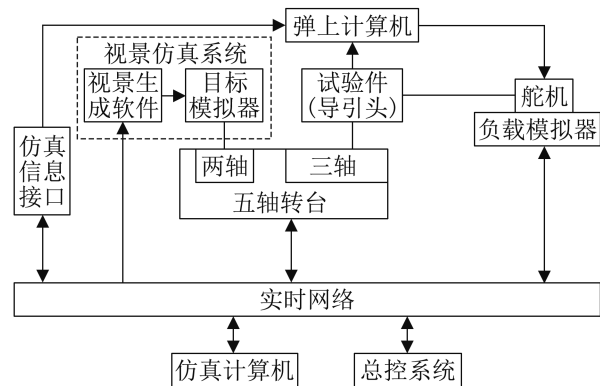


图 1 半实物仿真系统组成结构图

Fig. 1 Composition of hardware-in-the-loop simulation system

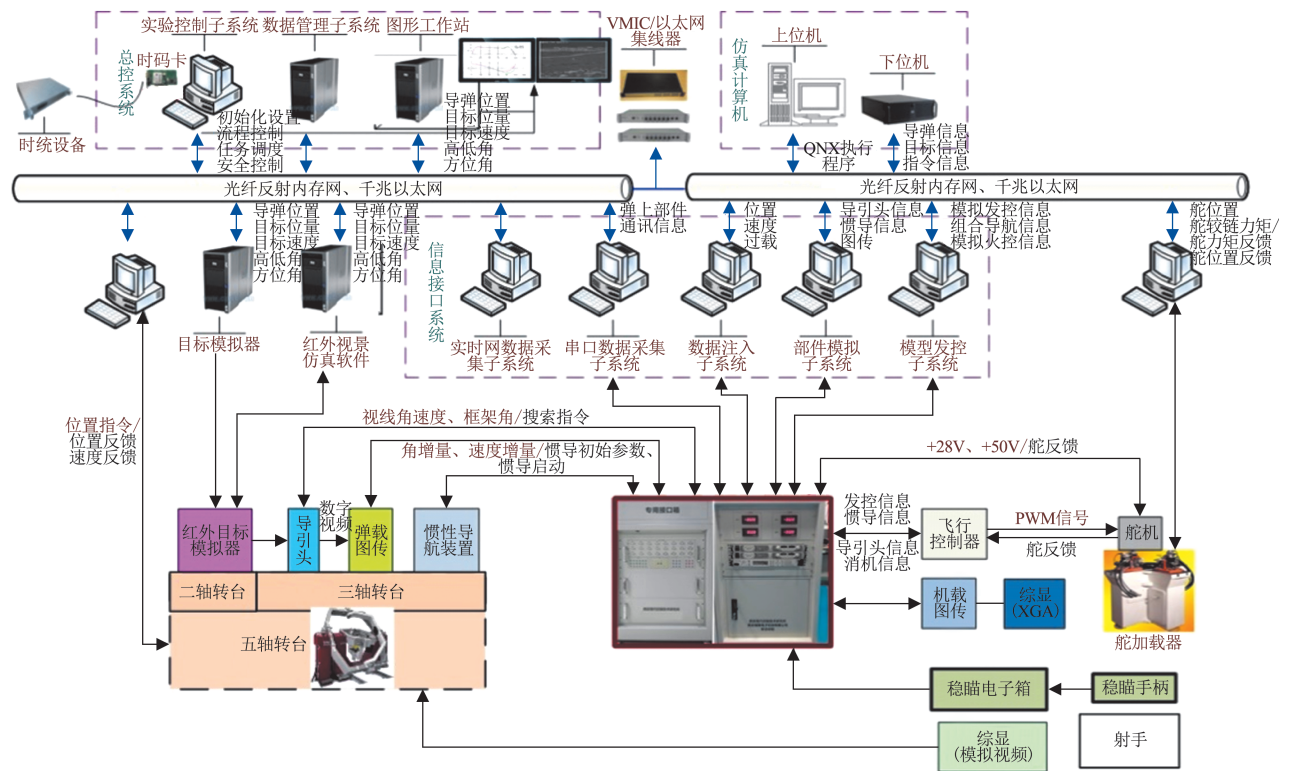


图 2 红外成像制导武器半实物仿真原理

Fig. 2 Principle of infrared imaging guide missile hardware-in-the-loop simulation

直升机机载红外成像空空导弹既不同于地面武器的试验与鉴定方法, 也不同于高空固定翼飞机机载武器的试验与鉴定方法^[5]。相比地面常规红外制导导弹, 具有机动能力强、攻击范围广、引战配合好、抗干扰能力强、可以采用打了不管也可人在回路等特点, 工作原理如图3所示。其制导控制系统具有响应快、控制周期短、各部件通讯周期不一致等特点; 攻击的目标具有机动性强、温度高、温度范围宽、对比度大等特点。要求仿真系统满足控制周期短、弹体及弹目视线运动模拟动态性能高、运动范围大、导引头安装后视角大、目标模拟器输出动态范围高、温差大等^[6]。

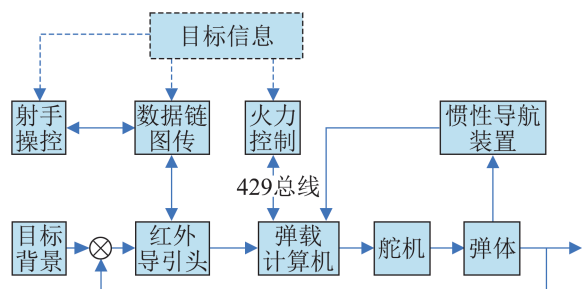


图3 直升机载红外制导导弹制导控制系统原理

Fig. 3 Control system principle of helicopter borne infrared guide missile

直升机机载红外成像空地导弹, 具有飞行平稳、制导精度高、可离轴发射、人在回路、适应复杂目标背景等特点, 工作原理如图3所示。制导控制部件具有控制周期较长、跟踪角速度平稳等特点, 目标对比度低、空间分辨率和温度分辨率要求高。要求仿真系统目标模拟温度分辨率和空间分辨率高, 目标背景特性复杂, 视线角速度模拟精度高、稳定性好。

这几类导弹共同特点是导弹发射前通过火控等装订目标位置及类型参数, 发射后及中段飞行依靠惯性导航控制导弹到合适位置, 便于末端成像导引头对目标捕获和跟踪; 都有离轴发射的要求; 采用比例导引控制导弹飞行。基于对各类导弹的共性和特性分析, 系统按照共性总体设计、特性针对性设计的原则, 在系统总体结构设计的

基础上, 通过对目标模拟器、五轴转台、信息接口系统和时钟同步系统等的总体设计, 来满足各类导弹的仿真要求。

(1) 通过不同目标模拟器设计来满足不同战场红外辐射特性需求。空空导弹攻击目标机动性强、温度对比度高、环境单一, 红外导引头空间分辨率低、温度适应性好; 空地和地面反坦克导弹攻击目标主要为地面低速运动装甲车辆和高价值建筑物, 温度对比度低、环境复杂, 采用的红外导引头温度分辨率和空间分辨率都较高。空空导弹需配备基于电阻阵列红外成像目标模拟器, 该类目标模拟器具有帧频高、动态范围大、均匀性好等优点, 但高温干扰源模拟是该目标模拟器需解决的关键技术之一; 空地和地面反坦克导弹需配备DMD(digital micro-mirror device)微镜阵列红外目标模拟器, 该类模拟器温度分辨率高、可模拟温度范围小、空间分辨率高, 适合对地目标背景模拟^[7-9]。

(2) 通过对五轴转台特殊结构设计、动态性能设计和驱动设计, 来满足不同仿真对象对于结构、动态性能等的特殊要求。同时, 设计一体化导引头/惯导仿真方案, 实现导引头/惯导在同一台五轴转台上的半实物仿真, 提高仿真置信度和实验系统集成水平, 节省仿真资源。

(3) 通过高精度定时、守时系统设计, 实现高精度高实时性仿真, 以及与飞行实验系统同步和时统的统一, 满足不同武器系统不同周期定时的要求。

(4) 通过对信息接口系统的“通用接口+专用接口”复合设计, 来满足不同型号不同制导控制部件仿真对信息交互和数据记录的要求, 以及同系列导弹通讯接口的快速迭代开发需求, 提高仿真效率, 实现异构通讯接口的快速开发与迭代。

3.2 高辐射红外干扰双通道耦合仿真

直升机机载空空导弹不仅对低空地物背景抗干扰能力大幅提高, 而且为适应复杂战场环境的作战要求, 对间隔投放或同时多枚投放的红外诱

饵弹也具有很强的抗干扰能力^[10-11]，要求仿真系统必须能够实现高辐射红外干扰模拟。系统设计的高辐射干扰红外模拟器，基于高辐射红外干扰双通道耦合仿真技术，来实现红外目标特性和高温点源辐射的耦合模拟。该模拟器主要通过计算机仿真产生动态目标/背景场景和干扰运动轨迹，以电阻阵列模拟器为主体，模拟中波红外目标辐射

及多干扰源，以红外点源干扰模拟器为辅助，模拟近红外高温干扰辐射，通过红外合束镜将双通道红外目标/干扰/背景合成平行光场，使模拟器产生与真实环境相类似的红外效果，为导引头提供目标/干扰环境，完成红外制导系统仿真测试。该模拟器由电阻阵列模拟器、红外点源干扰模拟器和耦合光路等组成，其工作原理如图 4 所示^[12]。

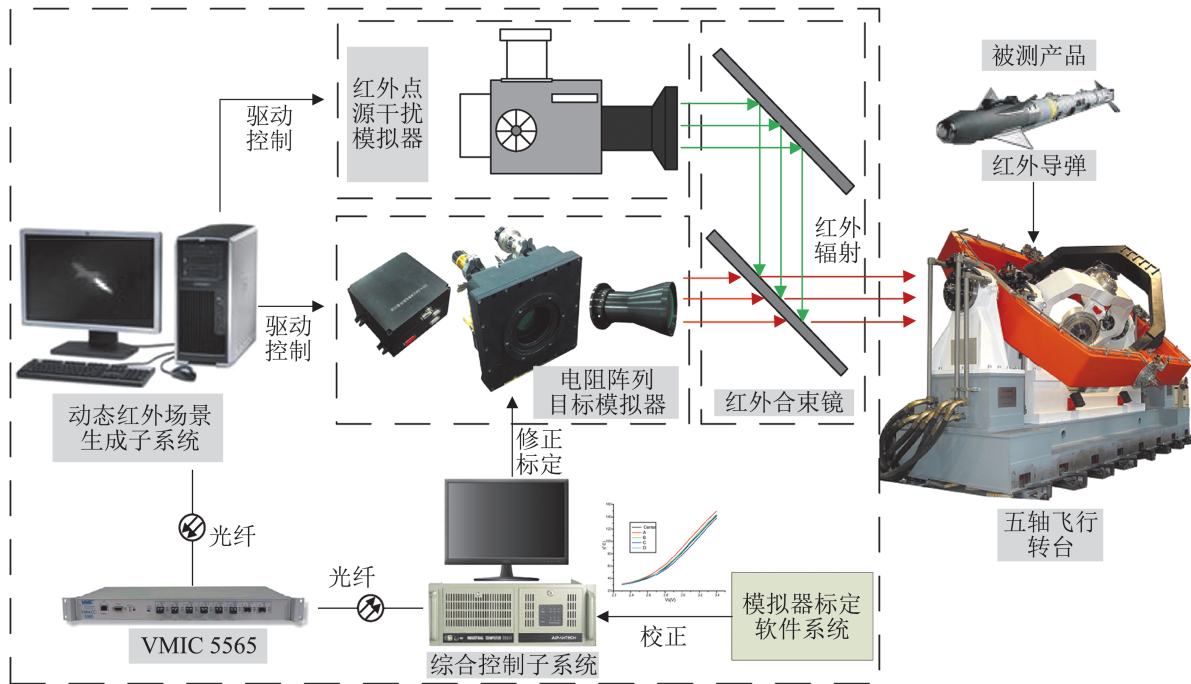


图 4 红外干扰双通道耦合仿真技术原理

Fig. 4 Technology principles of infrared interference double channel coupling simulation

(1) 电阻阵列模拟器设计

电阻阵列模拟器硬件系统由电阻阵列芯片、驱动控制系统、动态红外场景生成计算机等三部分组成，如图 5 所示，主要功能是实现从数字化红外图像信息到真实红外辐射的实时转换与投射。

(2) 红外点源干扰模拟器设计

工作中光源辐射源发出一定温度的红外辐射，控制光阑孔径大小以调节进入光学系统的能量，通过该光学系统将大小不断变化的携带一定能量的方形目标投射到无穷远处，模拟无穷远处运动的目标，供接收系统接收。过程中通过可变光阑和二维摆镜，控制干扰源的尺寸和方向，干扰源

的表观辐射温度可达到 600℃。干扰源模拟系统结构如图 6 所示。

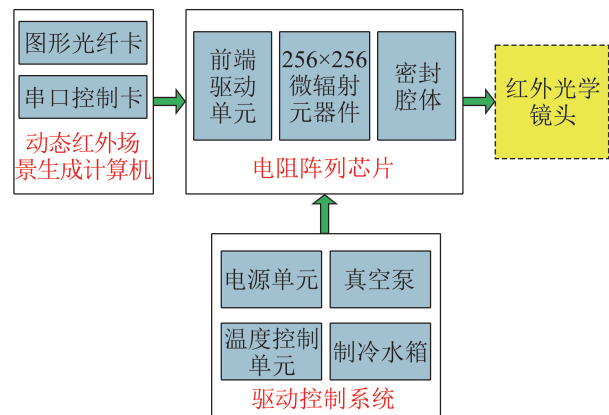
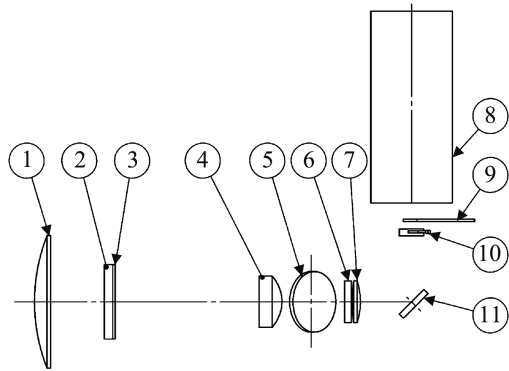


图 5 电阻阵列模拟器系统框图

Fig. 5 System block diagram of resistance array simulator



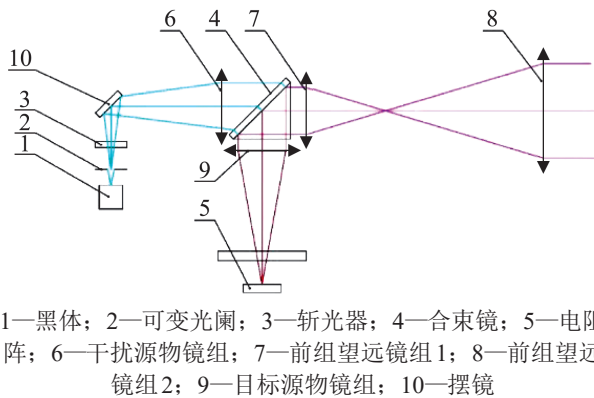
1—准直1; 2、3—准直2; 4—准直3; 5—半透半反镜;
6、7—干扰物镜组; 8—点源干扰; 9—斩光器;
10—可变光阑; 11—二维摆镜

图6 干扰源模拟系统结构框图

Fig. 6 System block diagram of interference source simulation

(3) 耦合光路设计

为了实现电阻阵列目标模拟和高辐射点源干扰的耦合, 采用由前组望远镜加上后聚焦物镜组的复合系统, 并在平行光路中加上与光轴成 45° 角放置的平面耦合镜引入干扰光路, 构成目标/干扰双通道系统, 结构形成和原理如图7所示。



1—黑体; 2—可变光阑; 3—斩光器; 4—合束镜; 5—电阻阵;
6—干扰源物镜组; 7—前组望远镜组1; 8—前组望远镜组2;
9—目标源物镜组; 10—摆镜

图7 耦合光路图

Fig. 7 Coupling optical path

强辐射干扰红外目标模拟器生成的典型空中红外目标与干扰如图8所示, 图像为热像仪观察到的红外目标模拟器生成的飞机高温尾焰及诱饵红外图像。

3.3 异构通讯接口快速迭代开发设计

开展精确制导武器半实物仿真的各仿真设备

之间需要通过接口设备和相应的电缆进行连接, 信息接口技术是实现仿真系统的必要环节^[13]。信息接口系统具有多种总线通讯方式和各种电源, 负责仿真系统与参试部件的电气连接, 实现武器系统的I/O接口特性。不同的武器发射平台对系统的要求重点体现在火控系统、发控系统的模拟设计上。机载发射平台的火控系统数据总线以1553B、ARINC429为主, 地面车载发射平台的火控系统数据总线以CAN、RS422为主^[14]。如何快速、有效、可靠、经济地与不同参试武器系统的异构通讯接口连接, 是试验鉴定仿真系统必须解决的关键技术之一。系统采用了“通用接口+专用接口”的复合设计方法, 快速实现了不同武器系统1553B、ARINC429、CAN、RS422、AD/DA、DI/DO等通用接口通讯, 如图9~10所示。

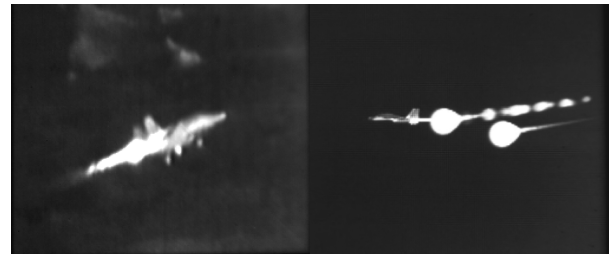


图8 飞机高温尾焰及诱饵红外图像

Fig. 8 Infrared picture of airplane high temperature tail and decoy

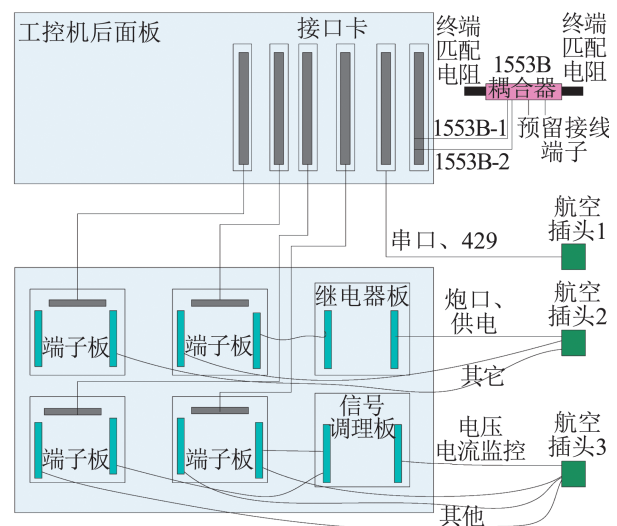


图9 通用接口设计

Fig. 9 General interface design

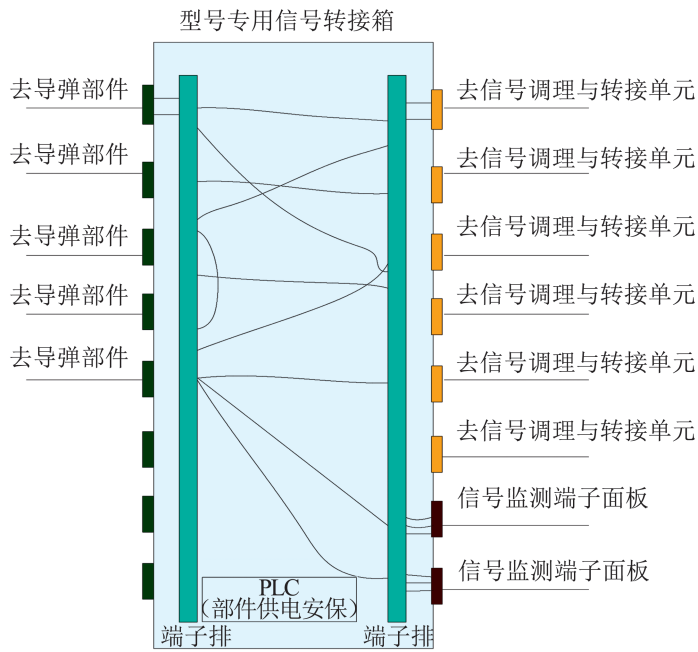


图 10 型号专用信号转接箱
Fig. 10 Transfer box for model special signal

“通用接口+专用接口”的复合设计方法成功实现了复杂仿真信息交互，根据不同实验目的能够快速更改接线方式和相应软件，在不同实验模式中快速切换，实现地面车载、直升机机载成像制导武器制导控制部件单独、组合及全系统半实物仿真实验。系统兼容性和扩展性体现在 4 个方面：

(1) 功能模块化设计。将系统按功能进行模块化设计，每个功能单元独立工作，通过光纤实时网络组成分布式仿真系统。采用 Windows+RTX (real time extended)^[15]开发了模拟发控、部件模拟、串口数据采集、实时网数据采集等通用化软件模块，配置项目相应的通讯接口文件即可完成程序设计，方便系统开发和扩展，可兼容多弹种多模式仿真。

(2) 仿真信息柔性交互技术。设计了基于反射式内存的实时网络和基于千兆网交互机的千兆网络，既能够对实时仿真和仿真前后非实时任务进行很好的兼容，又可根据仿真需要，灵活扩展网络系统。

(3) “通用接口+专用接口”复合设计技术。与参试产品直接相连的接口箱进行专门化设计(跳线等)，而接口箱与板卡之间则进行通用接口设计，采用“通用接口+专用接口”复合设计技术具备良好的兼容性和扩展性，可以实现同一型号不同仿真模式的快速切换和不同型号仿真的快速转换。

(4) 软件模块的通用化设计。系统软件采用模块化设计方法，软件功能模块结合硬件功能单元进行合理规划，当仿真对象或仿真任务改变时，只需对前端硬件单元做局部调整，软件单元做相应升级修改，大大提高了硬件单元的通用性。

3.4 高精度定时与时间同步技术

在半实物仿真中，各节点的时钟都由本地的晶振产生，其稳定度不高。在仿真时间较长的情况下，稳定度的差异会导致各个节点的步调不一致。此外，在没有时间同步的情况下，半实物仿真中的各个节点是异步工作的，定时器的起始时间是随机分布的。节点之间最大的时间偏差为一个仿真周期，当被仿真的系统/部件的状态变化非

常快时, 一个仿真周期带来的时间偏差会给整个仿真链路带来较大的误差, 从而影响半实物仿真的性能。

系统采用B码时统设备接收GPS/北斗、IRIG (inter range instrumentation group)、NTP(network time protocol)信号, 完成高精度的守时和授时功能^[16-17]。在实验控制系统中安装校时卡, 接收守时设备的IRIG-B信号, 对系统时间进行校正, 并通过设置的系统中断时间产生需要的定时周期, 每个周期写入实时网中断命令, 并将当前时间一并写入。采用“守时设备+时码卡”的方式, 系统中的一个时统桥接节点负责外部时间到内部时间的转换。系统内部采用反射内存卡的中断来实现系统内部所有相关节点的时间同步, 实现系统内部与外部的时间同步。系统时间同步精度可达100 ns, 定时精度可达0.5 μ s/30 min。

3.5 复杂战场环境生成技术

传统战场环境生成技术, 大都采用Vega、OpenGL等软件进行系统开发或采用混合模式开发, 但都存在“建立仿真应用时间太长、费用太高”等问题^[18]。如何快速构建生成复杂的空中和地面战场环境, 是试验鉴定仿真系统设计的关键。目前, 仿真环境构建应用需主要解决两方面问题: ①构建逼真全面的目标、背景及环境等模型; ②如何能够快速便捷地实现战场环境构建与编辑。系统主要根据试验鉴定仿真实验需求及经验, 在较为成熟的JRM视景仿真软件的基础上, 进行建模与开发。

按照实验需求, 建立了较为完备的战斗机、直升机、坦克、装甲车、舰船、航母等涉及海陆空多地域的可见光/红外目标模型, 丘陵、平原、山地、戈壁、城镇、岛屿和空中等多种典型背景模型, 以及雨、雪、雾、霾、太阳、云、烟幕、强光、地面和空中红外诱饵等典型干扰模型, 并结合挂飞、测试和外场试验等, 对模型进行校核验证, 不断提高模型逼真度。同时, 通过材质划

分、大气传输特性计算、环境特性仿真、传感器效应仿真等建模, 可以实现复杂战场环境的仿真反演、计算与生成。

为了提高仿真场景编辑生成效率, 实现场景想定快速编辑, 实时生成动态的视频图像, 并且满足发射点位及目标点位的灵活配置需求, 设计了战场环境想定设计模块、场景编辑模块和轨迹编辑及加载模块。

想定设计模块: 该模块可完成场景的可视化配置, 包括场景地形的加载、目标模型和干扰模型的选择, 也可以完成仿真环境的设定, 如时间、经纬度、地理高度、大气环境(云雨雾、能见度、气溶胶模式等设定), 同时可支持对想定的保存。

场景编辑模块: 该模块设计支持对仿真场景的变更, 支持在实时仿真过程中的场景环境的配置编辑, 包括对目标模型的添加、位置姿态调整、删除等, 仿真背景云雨雾的变化加载, 以及干扰模型的添加和删除等功能。

轨迹编辑及加载模块: 该模块支持目标及传感器轨迹的编辑和加载, 支持在仿真成像过程中, 加载编辑好的轨迹文件, 也可以通过以太网、反射内存卡和FC光纤板卡等硬件接口, 实时传输目标及传感器的轨迹数据驱动传感器仿真成像, 按帧频要求和传感器工作模式要求持续输出视频仿真图像。

4 仿真系统应用验证

利用该仿真系统, 分别完成了车载红外制导导弹、直升机机载红外制导空地和直升机机载红外制导空空导弹仿真实验, 对各类武器系统综合命中精度、极限边界性能, 以及抗干扰能力等进行了仿真实验。

选取部分典型红外成像制导导弹仿真数据进行说明, 仿真条件及结果如表1所示, 涉及到了导弹抗横风、高低温、高海拔、机动性、高低射界等典型极限边界条件。图11为抽取的表1中横

风的导弹飞行过程中，导弹 1、2、3、4 号舵机指令与反馈曲线图，可以看出半实物仿真舵控指令与数字仿真舵控指令一致性较好。同时，实验时对各导弹弹道数据，飞控装置、舵机、惯导和导

引头等弹上部件数据，总控、接口信息系统、舵机负载模拟器和五轴转台等仿真主要设备数据进行了全面的分析，系统运行良好稳定，可以满足试验鉴定仿真实验需求。

表 1 车载导弹仿真条件及结果
Table 1 Simulation conditions and results of vehicle mounted missile

导弹序号	射程/km	温度/°C	海拔/m	横风/(m/s)	目标速度/(m/s)	高低射界/(°)	脱靶量/m
1	0.5	-40	4 500	0	0	0	0.35
2	1.0	50	340	5	5	-10	0.37
3	2.0	-40	1 500	0	0	-10	0.65
4	4.0	50	1 500	8	15	-10	0.76
5	5.0	50	1 500	0	0	-10	0.79
6	6.0	20	1 500	0	30	0	0.32
7	2.0	20	340	15	30	10	0.56
8	4.0	20	340	15	0	0	0.83
9	5.0	20	340	0	22	0	1.12
10	6.0	50	1 500	0	0	0	1.06

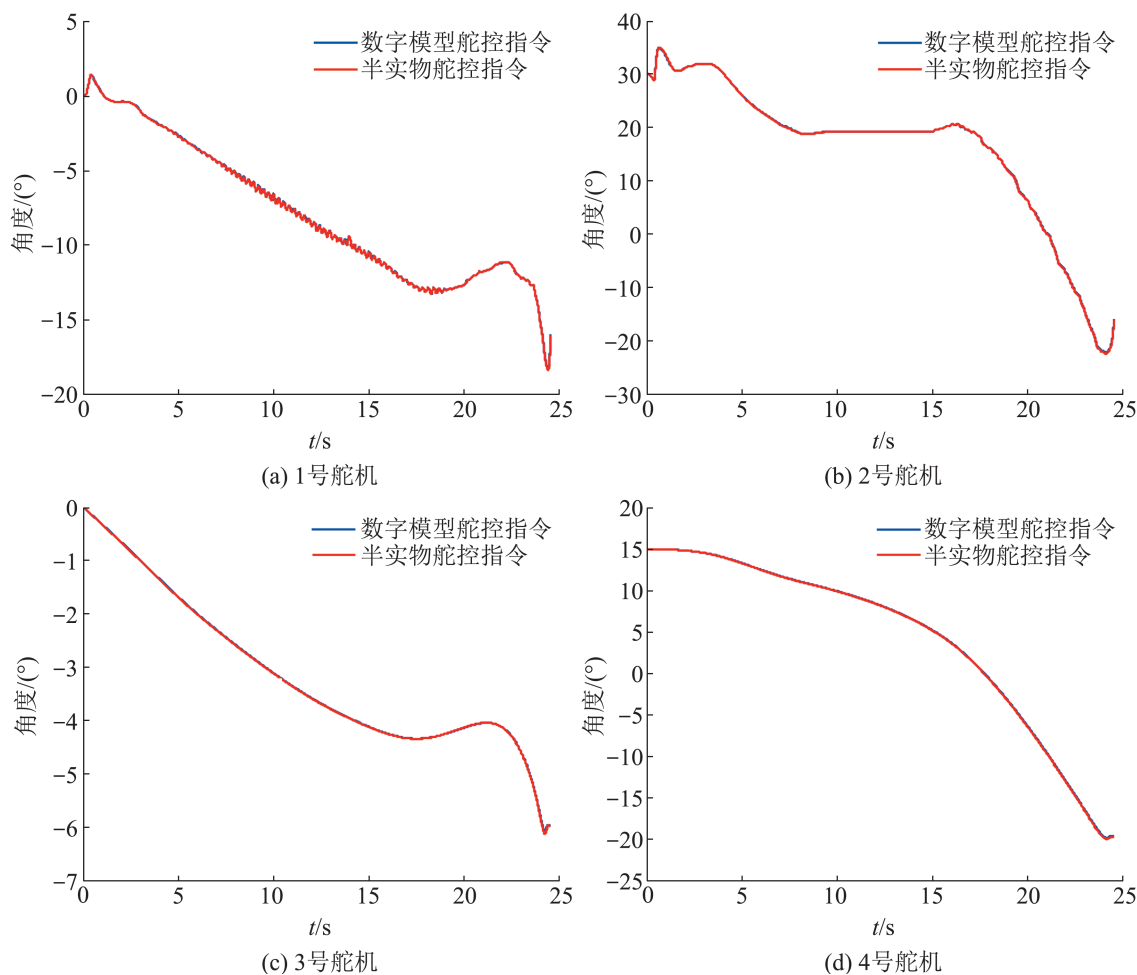


图 11 导弹舵机指令与反馈曲线
Fig. 11 Command and feedback curve of missile actuator

5 结论

以陆军常规红外成像制导导弹为对象,通过对导弹特点和实验鉴定仿真实验需求分析,紧紧围绕仿真系统通用性和适用性要求,解决了目前常规红外成像制导导弹试验鉴定仿真系统建设面临的关键技术难题,设计了红外成像制导导弹试验鉴定半实物仿真系统。通过典型反坦克导弹、直升机机载导弹等试验,对系统进行了应用验证。该系统设计可为其他类似半实物仿真系统建设提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吕隽,孔文华,李景.国外战术导弹半实物仿真试验验证能力发展分析[J].战术导弹技术,2020(2):99-104.
Lü Juan, Kong Wenhua, Li Jing. Development Analysis of Foreign Tactical Missile Hardware-in-the-loop Simulation Capability[J]. Tactical Missile Technology, 2020(2): 99-104.
- [3] 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.
- [4] 谢燕武.红外成像寻的导弹半实物仿真系统设计[J].计算机测量与控制,2013,21(2):394-395,420.
Xie Yanwu. Design of Hardware-in-the-loop Simulation System for Infrared Imaging Homing Missile[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(2): 394-395, 420.
- [5] 孙毓凯,孙斐,任宏光,等.直升机载空空导弹工程验证试验与鉴定技术研究[J].弹箭与制导学报,2020,40(3):60-64.
Sun Yukai, Sun Fei, Ren Hongguang, et al. Research on Engineering Verification Test and Evaluation Technology of Air-to-air Missile for Helicopter[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(3): 60-64.
- [6] 王琳,王小强,付雅芳,等.直升机载空空导弹作战使用仿真试验方法[J].弹箭与制导学报,2016,36(1):15-18.
Wang Lin, Wang Xiaoqiang, Fu Yafang, et al. The Simulation Experiment Method of Helicopter-borne Air-to-air Missile Combat Application[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(1): 15-18.
- [7] 唐善军,宋敏敏,王碧云,等.基于MOS电阻阵半实物仿真的红外场景生成技术[J].系统仿真学报,2018,30(4):1319-1327.
Tang Shanjun, Song Minmin, Wang Biyun, et al. Infrared Scene Generation Technology Based on Hardware-in-the-loop Simulation of MOS Resistance Arrays[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1319-1327.
- [8] 张宁,汤心溢,张昊.基于DMD的高帧频红外场景仿真系统设计[J].红外,2016,37(5):10-16.
Zhang Ning, Tang Xinyi, Zhang Hao. Design of High Frame Frequency Infrared Scene Simulation System Based on DMD[J]. Infrared, 2016, 37(5): 10-16.
- [9] 张颖新,王云萍,侯军燕.高帧频DMD红外景象仿真设备电路与光学系统设计[J].红外与激光工程,2017,46(4):89-95.
Zhang Yingxin, Wang Yunping, Hou Junyan. Circuit and Optical System Design for High Frame Rate DMD Infrared Scene Simulation Equipment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 89-95.
- [10] 孙毓凯,孙斐,任宏光,等.直升机载空空导弹关键技术研究[J].航空兵器,2020,27(1):17-25.
Sun Yukai, Sun Fei, Ren Hongguang, et al. Study on Key Technologies of Helicopter-Borne Air-to-air Missiles[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(1): 17-25.
- [11] 韩国庆,刘会通,刘玉伟.飞航导弹光电对抗技术现状与展望[J].航天电子对抗,2011,27(5):1-3,49.
Han Guoqing, Liu Huitong, Liu Yuwei. Present and Perspectives of Electro-optical Countermeasures Technologies of Cruise Missile[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2011, 27(5): 1-3, 49.
- [12] 王云萍,赵长明.基于DMD的动态红外景象仿真系统[J].红外与激光工程,2009,38(6):966-970.
Wang Yunping, Zhao Changming. Dynamic Infrared Scene Simulation System Based on the Digital Micro-mirror Device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6): 966-970.
- [13] 马继峰.基于RTX的导弹半实物仿真系统接口技术研究[J].航天控制,2010,28(2):56-62.
Ma Jifeng. Research on Interface Technology of Missile HIL Simulation System Based on RTX[J]. Aerospace Control, 2010, 28(2): 56-62.
- [14] 山清,吴根水,王艳奎,等.空空导弹一体化仿真系统总体架构及关键技术研究[J].战术导弹技术,2021(5):1-10.
Shan Qing, Wu Genshui, Wang Yankui, et al. Research

- on the Overall Architecture and Key Technologies of Airborne Missile Integrated Simulation System[J]. Tactical Missile Technology, 2021(5): 1-10.
- [15] 刘士勋, 刘满国, 唐同斌, 等. RTX系统下Moxa多串口卡驱动程序的开发[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(3): 5-8. Liu Shixun, Liu Manguo, Tang Tongbin, et al. Moxa Multi Serial Ports Card Driver Development Based on RTX System[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(3): 5-8.
- [16] 刘洪源. IRIG-B码编码与时间解析显示机制分析与研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 86-90. Liu Hongyuan. Analysis and Research on IRIG-B Coding and Time Resolution Display Mechanism[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4): 86-90.
- [17] 张宇, 付欣艳, 王菊凤, 等. 基于NTP的网络时间服务器校准方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(4): 62-65. Zhang Yu, Fu Xinyan, Wang Jufeng, et al. Discussion on Calibration Method of Network Time Server Based on NTP[J]. Metrology & Measurement Technique, 2021, 48(4): 62-65.
- [18] 金龙. 制导炸弹视景仿真系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2015. Jin Long. Research on Visual Simulation System of Guided Bomb[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.