

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.030

基于半物理仿真的协同作战与评估系统的设计与实现

武颜俊^{1,2}, 陈柏¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007)

摘要:随着军事技术的不断发展,新装备、新武器在现代战争中快速的迭代应用,其作战能力以及与其他相关装备、武器的协同性需要在设计及维修后进行试验验证。然而在真实环境中,众多的配试设备和战场环境存在执行难度大、经费成本高等限制因素,大规模、高频度的实装试验难以进行,对装备在特定条件下的系统交联功能难以进行综合评价。依托于两型飞机综合航电系统地面联试平台,采用仿真、可视化技术搭建协同作战与仿真评估系统,支持用户在系统框架下进行半物理仿真,模拟飞机在真实场景下的链路数据通信、协同作战以及对抗评估,实现用户对多型号装备间的功能测试验证、战术仿真等内容的研究。

关键词:综合航电;协同作战;仿真评估

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0157-05

Design and Implementation of Collaborative Operation and Evaluation System Based on Semi-physical Simulation

WU Yanjun^{1,2}, CHEN Bai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China)

Abstract: With the ongoing development of military technology, new equipment and weapons are iteratively applied in modern warfare rapidly, which requires their combat capabilities and synergy with other related equipment and weapons to be tested and verified after design and maintenance. In real environments, however, numerous test equipment and battlefield environments have limitations such as high execution difficulty and great funding costs, making it hard to conduct large-scale and high-frequency practical tests, and resulting in the difficulty in comprehensively evaluating the system cross-linking function of equipment under specific conditions. This article, based on the ground joint test platform of the integrated avionics system of two types of aircrafts, and with simulation and visualization technologies, builds a collaborative combat and simulation evaluation system, whose users are supported to conduct semi physical simulation within the system framework, and flight simulation of link data communication, collaborative combat and adversarial evaluation of aircraft in real scenarios, achieving the research on functional testing and verification, and tactical simulation for multiple types of equipment.

Keywords: integrated avionics; cooperative operation; simulation evaluation

0 引言

协同作战与仿真评估系统着眼于有人机、无人机协同作战^[1-2]中飞机机动、作战能力的仿真与分析,提供仿真场景编辑、综合态势可视化以及仿真结果的回放查看功能,支撑用户基于本系统和现有实物装备,通过纯数字仿真和半物理仿真^[3]的方式,进行有人机、无人机协同作战的态势感知和作战能力分析。

协同作战与仿真评估^[4]系统意义在于可以以较小成本验证有人机、无人机协同作战过程中战

术战法运用的流程以及武器装备的作战能力,从而降低现实中大数量飞机平台的制造成本、空域或海域使用成本以及参与试验的配试成本,是进行有人机、无人机协同作战研究^[5]的必由之路。

1 测试需求分析

协同作战与仿真评估系统从功能上采用模块化设计,从业务上采用层次化设计,这有助于提高整个系统的鲁棒性、可扩展性和实用性。系统总体业务功能分为作战想定^[6]制作、三维综合态势显示、数据记录与回放^[7]3个板块,基于

第一作者简介:武颜俊(1990—),男,安徽芜湖人,工程师,硕士研究生,研究方向为飞机飞行控制系统和航空电子系统仿真测试,wyj2107820@sina.com。

业务支撑层,直接面向用户提供图形化的人机交互界面;业务支撑层包含仿真平台、态势渲染引擎两个环境构建核心平台,并由仿真模型库和可视化资源库两个数据库作为支撑,提供平台控制代理,能够针对外部控制指令和数据交互完成响应。基础软件包括基础的系统库以及系统内部使用的网络通信库和数据库管理系统作为支撑。协同作战态势与传感器视景仿真系统的总体架构如图 1 所示。

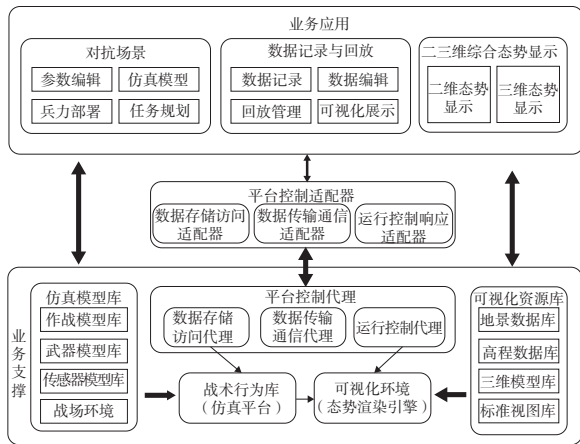


图 1 总体架构

协同作战与仿真评估系统通过构建半物理仿真模型,通过接收参试设备在仿真过程中的试验数据从而替代仿真计算,同时通过数字仿真的方法模拟配试设备,结合参试设备的试验数据进行兵力解算,生成激励数据,为参试设备提供所需的实时战场态势数据。

2 系统组成

协同作战与仿真评估系统为各分系统联试、功能性能验证、演示等提供环境和平台,尽可能真实地仿真训练对抗^[8]全过程,同时能够实时监控训练系统各节点的工作状况、网络的业务应用情况等内部信息。

协同作战与仿真评估系统的硬件架构组成框图如图 2 所示,主要构成包括目标仿真系统、机载单元、地面站、网管设备、地面实时评估系统^[9](包含数据管理系统、三维态势显示系统)、卫导授时设备、事后评估系统、目标机信息处理系统等。机载平台 1 和机载平台 2 以地面半物理仿真环境为平台,通过数据采集设备获取飞机飞行姿态信息、雷达探测等信息,经机载端机建立多平台间的射频通信。

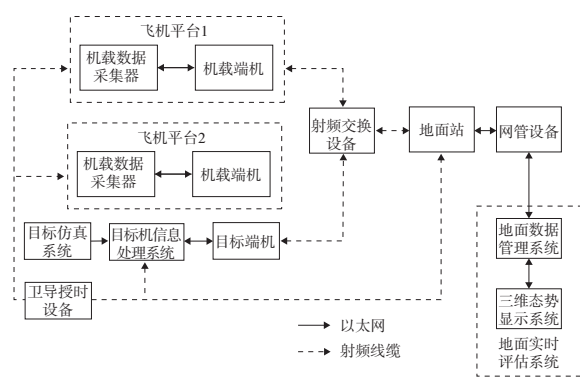


图 2 系统硬件结构图

2.1 目标信息处理系统

目标信息系统^[10]能够独立完成目标平台机动和角色任务规划功能。其中,平台机动规划功能主要用于对空中平台、水面平台、水下平台实体或编队的机动属性进行设置;角色任务规划用于设定推演实体或编队的角色属性及其作战任务,同时该系统还能够接收卫星信号完成与机载设备端的时间同步,保证整个系统工作在同一个时间标准下。

该系统的硬件主要包括工控计算机平台、存储器、嵌入式训练端机接口适配电路和授时信息接收电路等组成,如图 3 所示。

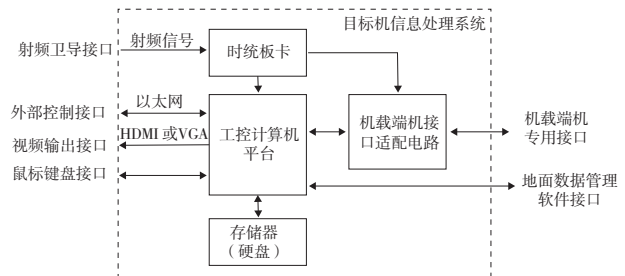


图 3 目标机信息处理系统组成框图

目标机信息处理软件主要包括 4 个功能模块,分别是时间校准功能、设备状态管理功能(对端机的状态管理)、网络参数规划功能、业务消息处理功能,组成框图如图 4 所示。

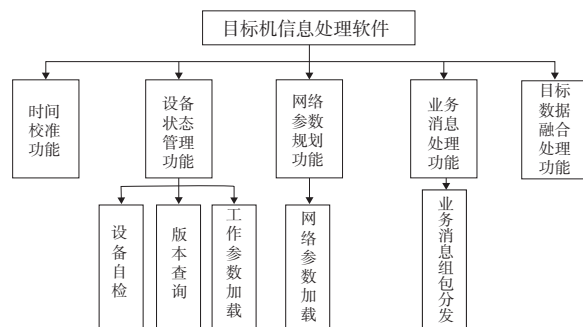


图 4 目标机信息处理系统软件组成框图

2.2 卫星授时系统

卫星导航信号^[11]经卫星导航接收天线接收放大后,首先送入卫导授时主机进行功分,其中1路由卫导授时主机自己使用,使用设备控制软件实现控制及显示功能,另外1路经射频接口送入卫导射频信号转发器,使用时间信息处理软件实现功能。

卫导授时主机内的卫星导航接收机接收卫星导航射频信号,设备控制软件进行下变频、模数转换和解调,得到当前时间信息、秒脉冲信号、当前可用卫星数量、卫星状态等信息。当前卫星数量、卫星状态等信息送入显示屏,在界面上进行显示,用于对当前可用卫星状态进行监控,时间信息和秒脉冲信号送入授时信息分发通道。

由于各卫星导航接收机的时间信息^[12]格式通常存在差异,所以需要由授时信息分发通道进行解码和重编码,生成符合要求的时间信息,与秒脉冲信号一起进行驱动,生成多路授时信息。时间信息处理软件对卫星导航射频信号进行功率放大、增益控制和多路功分,生成多路高功率卫星导航射频信号,输出给各个用户设备。每路均有单独的射频开关,可控制本路射频信号的通断,并具有独立的通道差分补偿能力,保证到达每个用户的信号功率均满足要求。

控制电路可接收外部控制接口发送的控制信息或本机按键输入的动作信号,生成内部控制信号,对卫星导航接收机的工作状态、授时信息格式选择、授时信息通道通断状态、射频信号转发增益、射频转发通道通断状态等进行控制,并可读取各模块的工作状态,在显示屏上显示或通过外部控制接口上报。信号执行流程如图5所示。

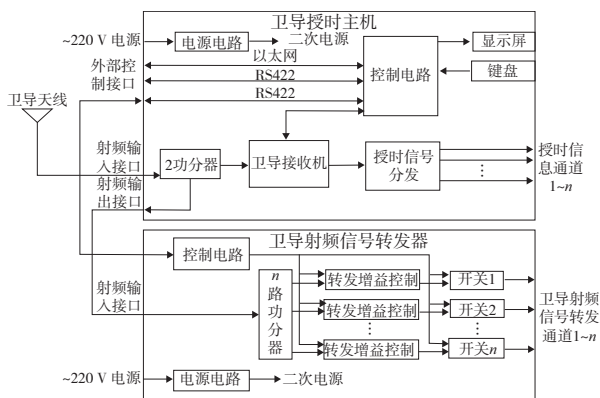


图5 信号执行流程图

2.3 地面实时评估系统

地面实时评估系统包含地面数据管理软件、

三维态势显示软件、目标信息融合处理软件,由高性能图形工作站完成数据的解析与三维图形的绘制与显示。

1) 地面数据管理软件

地面数据管理软件实时接收训练数据,可实现对相关训练数据与参数的配置和管理、接收并处理网管发送的链路数据信息、进行导调控制等功能。包括数据接收、数据记录、数据处理、数据回放、数据发送、导调控制模块,软件执行流程如图6所示。

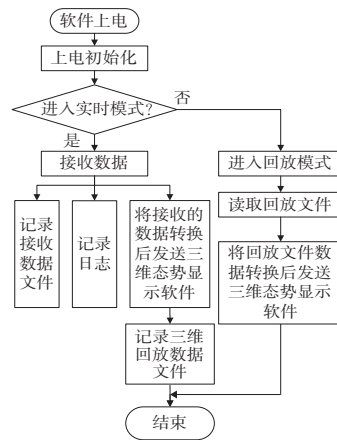


图6 软件执行流程图

2) 三维态势显示软件

三维态势显示^[13]提供以更接近于人的视觉态势显示场景,同时三维态势显示的维度更高,通过三维效果的渲染,能够表现出更为直观的空间关系,使仿真场景更为真实且更易被人所理解。因此,本系统设计上采用三维态势仿真替代传统的二维平面显示,供用户进行“真实”的三维战场态势感知。三维态势显示采用灵活的模块化设计,由模型装配管理模块、场景数据库、渲染控制管理、渲染引擎、接口管理及特效渲染6部分构成,其结构示意图如图7所示。

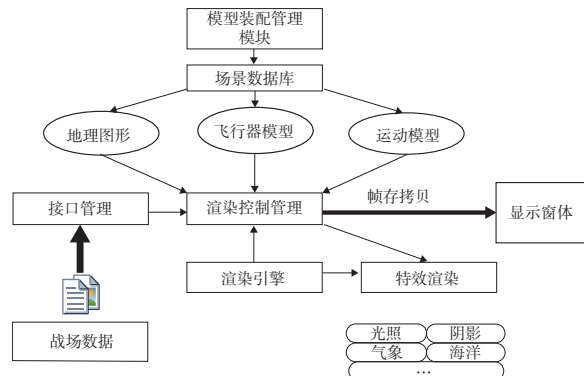


图7 三维态势显示系统结构图

a) 模型装配管理模块是视景仿真运行平台中使用的模型录入、编辑、装配的入口,用户可通过模型装配管理子模块进行模型的导入、组装和编辑,并将最终结果存入场景数据库中。同时,用户可通过模型装配管理子模块对场景数据库中的模型进行增、删、查、改等管理操作。模型装配管理模块提供图形化的操作界面,可以使熟悉装备、武器的业务人员忽略具体的建模过程,以简洁、易用的图形化界面完成实战化作战流程仿真所需模型的装配和管理工作。

b) 场景数据库主要分为地形数据库和实体数据库。由于真实场景下的战场地形种类多样,将地形数据库通过分页的树状结构进行构建,以便通过树状筛选获得当前需要的模拟场景;实体数据库主要通过对实地的卫星地图测绘或其他测绘方式构建,当需要模拟在该战场的对抗场景时,可直接完成场景的调用。

c) 渲染控制^[14]管理是三维战场态势显示的核心,该控制管理需要在渲染引擎的基础上构建,通过调用特效渲染的要求进行渲染计算,利用场景数据库提供的实时场景数据组织场景内容,并通过接收接口管理提供的实时战场数据将组合形成的实时图像画面经由系统配置的图形工作站输出至大屏等显示终端。

d) 渲染引擎是三维战场态势显示的底层支持,考虑到战场场景切换的实时性,渲染引擎采用动态链接库完成对应用层模块实景的调用。渲染引擎是一种基于延迟着色技术的先进图形渲染引擎,可以支持基于大气散射物理模型的光照等复杂环境的模拟,通过采用模块化的设计,能够支持海量场景的调度管理,支持场景开发人员快速便捷地完成场景的设计和开发。

e) 接口管理负责从外部其他仿真数据生成系统接收战场仿真数据,并接收数据同步命令确保三维战场态势显示在软件和数据的层面保持同步^[15]。接口采用网络通信接口,与现有的仿真数据生成系统接口对接,接收来自仿真数据生成系统的数据,根据设计目标,可以实现在 30 Hz 的场景调度频率情况下,保证作战场景渲染时延不大于 40 ms。接口管理还为用户提供视点切换接口、三维战场态势显示控制接口,能够满足用户对视点控制、显示控制,叠加显示关键信息的显示要求。

f) 特效渲染主要通过对光照信息、气象信息、阴影信息、海洋信息、云层信息等特效封装成一个

个独立的插件,通过对插件的直接调用可以在应用层完成对战场实景特效的提取,并完成相应的渲染显示。

3) 空面武器裁决软件

空面武器实时裁决软件由数据接收发送模块、评估配置模块、变量定义模块、评估裁决模块、目标匹配模块、高精度定时器模块、弹道仿真模块、日志及日志管理模块、仿真管理模块、界面模块、坐标转换模块等组成。该套系统可以根据预置目标位置信息完成武器弹道解算,实现对空面武器的裁决,如图 8 所示。

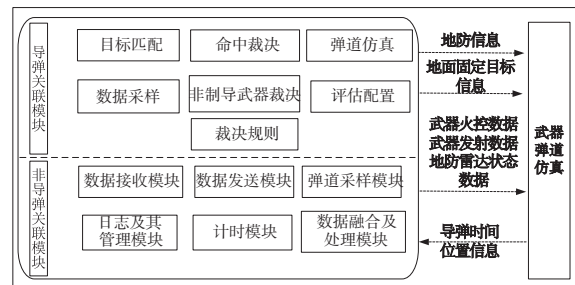


图 8 武器实时裁决软件

2.4 事后评估分析系统

事后评估系统可对各类记录设备进行数据卸载、数据解析、融合处理后保存到服务器数据库中,对音视频数据、评估结果数据、总线数据进行统一管理。该系统能够以训练过程中关键事件和对抗关系为索引,实现各型武器平台、武器仿真过程的主要相关数据以三维态势及音视频的同步回放。通过读取数据文件目录中的音视频文件、评估结果数据实现空战过程的回放显示。通过数据统计与分析,生成各种统计报表,包括电子对抗效果评估结果、违规和安全性评估结果表等。系统整体来说由 3 个大的软件部分构成,如图 9 所示。

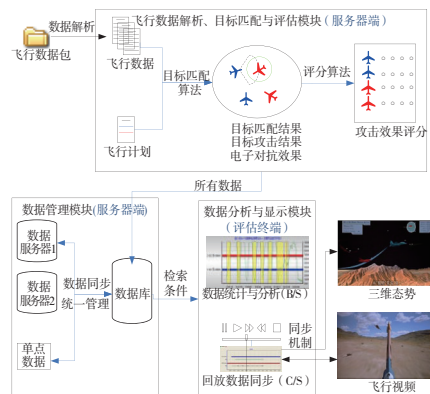


图 9 系统软件结构示意图

1) 飞行数据解析、目标匹配与评估

飞行数据解析、目标匹配与评估的主要任务是根据事后飞行数据和目标匹配^[16]算法,分析计算得到某次飞行过程中的攻击目标匹配结果、目标攻击结果^[17]以及电子对抗的效果,在此基础上,根据评分算法得到每名飞行员攻击效果评估结果。在该过程中,除了评估结果外,所有的数据均须及时保存至数据库中,便于后续其他功能的使用。

2) 数据分析与显示

该部分功能的主要任务是根据不同的检索条件,从数据库中获得数据来进行战斗数据的统计、分析与显示,并保证飞行数据与战场三维态势、视频同步控制。其中,飞行数据与战场三维态势、视频之间的同步需要依赖某种同步机制采用C/S方式呈现,以便直接运行在客户机上。

3) 数据管理模块

数据管理模块的主要任务是对训练管理系统中不同位置数据服务器的数据以及系统通过解析、解算、评估等得到的数据结果进行统一管理。数据管理包括为系统从数据接收到评估结果全过程的数据设计统一的数据存储方式、多地飞行数据的融合和同步、数据的统一维护和扩展等,便于用户随时随地访问数据、使用数据、上传数据等。

3 关键问题解决

3.1 多源异构数据解析处理

该系统采用半物理仿真设计,协同作战态势数据来源包括本系统仿真平台实时计算产生的态势数据和参试设备实时产生的试验数据,多源数据的问题将导致在仿真交互过程中的复杂度增加。本系统通过构建参试设备影子模型^[18],从仿真实体管理层面进行统一的管理,影子模型不具备仿真计算能力,仅通过从参试设备获取试验数据,维系影子模型的实时状态。

3.2 系统时间同步^[19]策略

由于要对三维目标的运动轨迹进行插值处理以使目标平滑运动,就需要延迟1s来缓存数据,但由于需计算导弹轨迹已延迟1s发送数据,故在接收数据插件时将飞机位置点、弹道点直接以消息的方式发送给逻辑插件,同时在显示插件中将飞机位置延迟2s,导弹位置延迟1s显示,而将杀伤通告等数据延迟1s以消息的方式发送给逻辑插件,将武器发射、雷达工作模式、目标数据、飞机

状态、光电数据、干扰等数据延迟2s以消息的方式发送给逻辑插件,这样保证在三维场景中显示的动目标、标牌、雷达等显示内容保持时间同步,如图10所示。

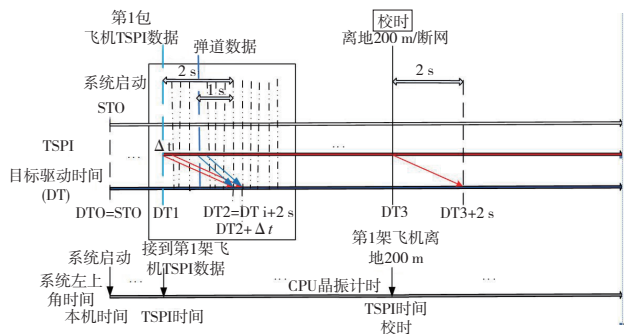


图10 时间同步策略

软件启动后,取本机时间作为目标驱动系统的时间,之后时间自行计时。飞机断网重连后,对该飞机目标驱动时间再校时一次。

4 结语

在地面半物理仿真平台下开展协同作战与仿真评估,可以在真实装备平台的基础上模拟装备在实战状态下的对抗场景,对于载机的飞行姿态、武器投射等功能进行全方位的综合验证,最大程度上减少试飞及模拟对抗场景带来的高额成本。目前该系统已在某两型飞机平台上进行了仿真试验,应用效果良好。同时,在该平台上配置的事后评估分析系统还可以对真实发生的数据在地面平台上进行复现,为飞行中难以复现的复杂疑难问题分析提供有效的分析平台。

参考文献:

- [1] 张宏宏,李文华,郑家毅,等. 有人/无人机协同作战:概念·技术与挑战[J]. 航空学报,2024,45(15):029653.
- [2] MEZHOU DI N, VANDERDONCKT J. Toward a task-driven intelligent GUI adaptation by mixed-initiative [J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2021,37(5):445-458.
- [3] HASSLER S C, BAYSAL-GUREL F. Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture [J]. Agronomy, 2019,9(10):618.
- [4] 张辉,王梦琦,任挺,等. 新型作战模式下的通信对抗及其效能评估发展探索 [J]. 通信技术, 2021, 54(10):2391-2397.
- [5] 张哲. 基于多平台协同对抗技术研究 [D]. 镇江:江苏科技大学,2016.

(下转第245页)

参考文献:

- [1] 唐思俊. 光电吊舱振动模态测量及隔振系统设计与研究[D]. 南京:南京理工大学,2023.
- [2] 马勉卓. 基于改进布谷鸟算法的最大功率点跟踪策略研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2022.
- [3] 胡雪妍. 多源干扰背景下光电稳定平台扰动抑制策略研究[D]. 长春:长春工业大学,2023.
- [4] 刘柏君. 两轴稳定平台控制算法研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- [5] 常燕. 火炮系统高精度控制和抗扰方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [6] 何栋炜,林杭彬,刘丽桑,等. 永磁同步电机改进非线性反步自抗扰位置控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(7):73-78.
- [7] 贾栋栋. 光电稳定平台自适应控制与扰动补偿方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学,2020.
- [8] 于亮. 输入受限非线性系统的自抗扰控制[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [9] 孙德源,王军义,徐志刚,等. 基于分数阶导纳与逆动力学鲁棒控制的并联机器人人机协作[J]. 机器人,2024,46(6):725-731.
- [10] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [11] 刘飞. 基于滑模控制的机电系统非线性补偿方法设计[J]. 消费电子,2025(2):17-19.
- [12] 朱华征,范大鹏,马东玺,等. 动载体光电成像系统视轴稳定精度研究[J]. 应用光学,2009,30(4):537-541.
- [13] 陈丹琪,金国栋,谭立宁,等. 无人机载光电平台目标定位方法综述[J]. 飞航导弹,2019(8):43-48.
- [14] 林飞,孙湖,郑琼林,等. 用于带有量测噪声系统的新型扩张状态观测器[J]. 控制理论与应用,2005,22(6):995-998.
- [15] XIE H, LI L Q, SONG X J, et al. Parameter self-learning feedforward compensation - based active disturbance rejection for path-following control of self-driving forklift trucks [J]. Asian Journal of Control, 2023,25(6):4435-4451.
- [16] LIN S, FANG X C, LI Z W, et al. Adhesion control strategy for trains with driven independently rotating wheels considering active guidance [J]. IET Electric Power Applications, 2023,17(10):1321-1333.
- [17] 薛文超. 自抗扰控制的理论分析[D]. 北京:中国科学院数学与系统科学研究院,2016.
- [18] VERONESI M, VISIOLI A. Optimized tuning rules for proportional - integral controllers with selected robustness[J]. Asian Journal of Control,2023,25(3):1731-1744.
- [19] YUANC H, GUO L, ZHANG X, et al. Novel active disturbance rejection - based sliding - mode control for permanent magnet linear synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2024,19(1):119-129.
- [20] BUCHMAN S, AL SAUD T M, ALFAUWAZ A, et al. Flight and ground demonstration of reproducibility and stability of photoelectric properties for passive charge management using LEDs [J]. Classical and Quantum Gravity,2023,40(2):025010.
- [21] 刘长杰. 机载光电稳瞄平台视轴稳定控制方法研究[D]. 西安:西安工业大学,2023.

收稿日期:2023-08-21

(上接第161页)

- [6] 张高峰,吉玉洁. 作战方案仿真推演中的雷达侦察设备建模[J]. 舰船电子工程,2019,39(9):70-76.
- [7] 齐兆龙,申军岭,贾宏进. 基于外场实测试验数据的动态仿真推演场景重构与应用[J]. 指挥控制与仿真,2020,42(1):101-107.
- [8] 郑都民. 集群空战中的群威胁评估及目标分配关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.
- [9] 侯国超,杨琳. 海战场仿真推演想定生成与应用技术研究[J]. 舰船电子工程,2019,39(7):7-9,78.
- [10] 郑帮涛,胡云. 国外武器装备建模与仿真可信度评估方法研究[J]. 质量与可靠性,2015(2):6-9.
- [11] 李格,段红. 军用建模与仿真标准技术研究[J]. 上海航天,2019,36(4):25-30.
- [12] 吴昊,王宇. 基于STK的MEO卫星通信系统的仿真与覆盖分析[J]. 电子设计工程,2017,25(22):120-123,127.
- [13] 王丽娜,王兵. 卫星通信系统[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2014.
- [14] 员建厦,刘伟强,李文静,等. 二三维联动态势系统的设计与实现[J]. 计算机与网络,2020,46(22):67-70.
- [15] 季梭宁. 虚拟仿真平台中的智能算法优化与场景渲染技术分析[J]. 电子技术,2025,54(1):398-400.
- [16] 李昌玺,王灿,徐颖,等. 联合作战条件下战场态势一张图功能模型构建[J]. 现代雷达,2022,44(2):35-40.
- [17] 王钧. 基于雷达数据的空中飞行目标识别和威胁度评估系统[D]. 南京:南京邮电大学,2022.
- [18] 陈斌. 面向空中战场的态势评估关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
- [19] 韩震. 基于影子模型的机器学习成员推理攻击的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2023.

收稿日期:2023-10-12