

引用格式:李素娟,戢凤.近地告警三维视景飞行仿真测试平台设计[J].电光与控制,2020,27(4):108-112. LI S J, JI F. Design of a test platform for GPWS based on 3D scene and flight simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):108-112.

近地告警三维视景飞行仿真测试平台设计

李素娟, 戢 凤

(上海航空电器有限公司, 上海 201101)

摘 要:为解决近地告警系统测试验证的逼真度和直观性问题,在对近地告警系统原理和测试需求分析的基础上,提出了近地告警三维视景飞行仿真测试平台的总体方案,考虑飞机特征和实时性因素建立逼真的飞行仿真模型,采用合成视景方式提供三维告警包线的可视化显示,提出了 GPWS 功能和性能测试评估方法,能够为 GPWS 设备和算法提供全面测试。

关键词: 近地告警; 飞行仿真; 三维视景; 测试评估

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.021

Design of a Test Platform for GPWS Based on 3D Scene and Flight Simulation

LI Sujuan, JI Feng

(AVIC Shanghai Aviation Electric Co., Ltd., Shanghai 201101, China)

Abstract: In order to improve the fidelity and intuitiveness of the test and verification of the Ground Proximity Warning System (GPWS), an overall technical solution of the test platform based on 3D scene and flight simulation for GPWS is proposed based on deep analysis of the principle and verification requirements of the GPWS. Considering the aircraft characteristics and real-time factors, a realistic flight simulation model is established, and the 3D alarm envelope is visualized by using the synthetic view. The GPWS function and performance test evaluation method is proposed, which can provide a comprehensive test for GPWS equipment and algorithms.

Key words: ground proximity warning; flight simulation; 3D scene; test evaluation

0 引言

近地告警系统(Ground Proximity Warning System, GPWS)是防止可控飞行撞地事故、保证飞行安全的重要航空电子设备^[1-2]。GPWS 的稳定性、准确性和有效性对飞机的安全至关重要,通常只有在危险的情况下发挥作用,因此在 GPWS 试飞验证时需要飞机偏离正常的飞行轨迹,操纵飞机与地形接近至告警边界,从而实现 GPWS 的告警功能验证。这种试飞验证方法一方面无法测试告警极限条件,另一方面一旦 GPWS 漏警或虚警,飞行员过于专注试验可能导致撞机事件的发生^[3]。试飞验证在真实性方面占有绝对优势,但其高成本、高危险性决定了不可能在近地告警测试与验证过程中大量使用,所以对于 GPWS 的测试更多需要通

过地面仿真测试的方式进行。目前,对 GPWS 的仿真测试主要有两类:一类是主要通过数值式飞行参数进行测试^[4],但这种测试方法不能反映真实的飞行状态,只能检查 GPWS 对数据的处理是否正确,而对逻辑判断、告警时机等方面是否合理还需在试飞中完成;另一类通常采用模型仿真方式对 GPWS 算法进行原理验证^[5-7],但是这种方式无法满足对 GPWS 产品的性能指标测试,同时对 GPWS 告警包线性能评估不够简单直观。

因此,为了全面地测试 GPWS 产品和算法的功能和性能指标,同时提高测试过程的逼真度,本文利用飞行仿真技术和视景仿真技术相结合的方式设计了近地告警三维视景飞行仿真测试平台。该测试平台能够模拟飞机飞行和告警时的逃逸过程,提供 GPWS 所需的实时飞行数据,具有 GPWS 三维告警合成视觉显示效果,基于 GPWS 测试评估方法可完成对 GPWS 产品及算法的全面测试,该平台还能够协助分析真实试飞数

收稿日期:2019-03-27

修回日期:2019-05-06

作者简介:李素娟(1986—),女,山东聊城人,硕士,工程师,研究方向为近地告警系统设计与开发。

据,同时具有演示、培训等功能。

1 GPWS 原理及测试需求分析

1.1 GPWS 原理

GPWS 接收机载传感器提供的即时位置、速度、气压高度、无线电高度、下滑偏差、航向、起落架、襟翼状态等信息,根据告警算法、内置的地形和障碍物数据库,判断飞机是否有撞山、坠地的危险,并提供语音、灯光、地形显示告警,提醒飞行员迅速调整飞机,避免可控撞地事故的发生。GPWS 的交联关系如图 1 所示。

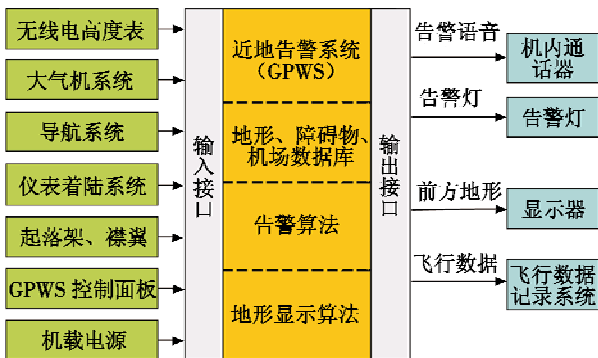


图 1 GPWS 交联关系

Fig. 1 Interface of the ground proximity warning system

告警算法包括下降速率过大、地形接近速率过大、起飞或复飞时掉高过多、不安全超障高度、下滑道偏离过大、侧倾角过大共 6 种告警模式。这 6 种模式作用于不同的飞行阶段,如起飞、巡航、进近、着陆、复飞等,且各模式之间具有优先级。在飞行过程中,GPWS 首先根据接收的飞行数据通过逻辑运算判断当前的飞行阶段,计算当前某些关键飞行参数是否进入当前作用的告警包线区域,以及参考内置的地形、障碍物和机场数据库,判断飞机的飞行轨迹与地形或障碍物之间是否存在撞地危险,如有危险则及时产生告警信息。

1.2 测试需求分析

GPWS 主要实现飞机飞行过程中回避危险地形发出告警的功能。基于 GPWS 的组成及工作原理,依据适航标准 TSO-C151b 中对主要功能(6 种告警模式)、性能指标(虚警率/漏警率)的具体要求和验证需求^[8],并考虑告警算法研究、设备测试与培训演示的具体使用要求,测试平台应具有以下主要功能:

- 1) 具有逼真的飞行仿真和飞机包线模型,能够模拟接近真实完整的飞行过程,驱动 GPWS 的 6 种告警模式;
- 2) 能够模拟 GPWS 相交联的机载航电设备,向 GPWS 实时发送满足接口要求的飞行数据;
- 3) 支持人在回路控制仿真,即支持手动驾驶功能,实现 GPWS 告警后逃逸过程;
- 4) 具有逼真的三维视景效果,支持可视化三维告警性能评估,同时便于 GPWS 功能培训及演示;
- 5) 具有测试管理和性能评估功能,支持对功能和性能进行全面的测试和评估;
- 6) 具有通用可扩展的测试接口,便于对 GPWS 进行数字仿真测试以及产品设备的半物理仿真测试。

2 平台总体设计

近地告警三维视景飞行仿真测试平台主要服务于 GPWS 的告警算法研究、产品测试与培训演示,为 GPWS 提供飞机机载仿真环境、模拟飞机外部环境,并对告警算法进行测试,该系统基于飞行仿真与视景仿真技术,能够对 GPWS 进行数字仿真测试、半物理仿真测试。根据仿真平台的总体需求,该仿真系统主要模块包括飞行仿真模块、视景仿真模块、地形/机场/障碍物数据库、GPWS 测试评估模块、数据记录与回放模块。系统总体设计框架如图 2 所示。

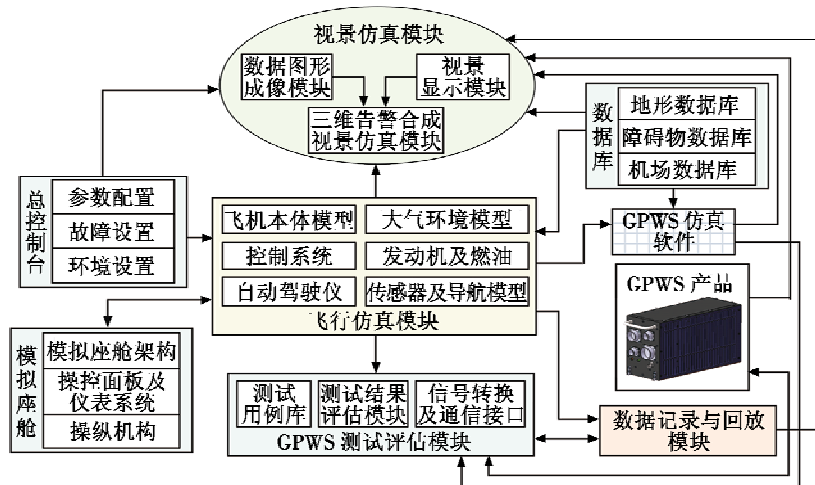


图 2 系统总体设计框架

Fig. 2 Block diagram of system overall design

在该系统中,飞行仿真模块用于模拟飞机的飞行过程(支持手动、自动驾驶),通过接收模拟座舱控制信号,基于飞机模型解算为其他系统提供飞行仿真数据;视景仿真模块用于渲染和显示地形地貌、机场、天气等飞行环境以及 GPWS 告警效果显示;GPWS 测试评估模块基于内置的测试用例库和测试工具,用于 GPWS 产品和告警算法的测试与验证,同时支持培训、演示;数据记录与回放模块用于仿真系统的数据记录及回放,包括仿真数据的记录与回放、真实试飞数据的回放;数据库提供地形数据、障碍物数据及机场数据,并能够将数据传送至视景仿真和 GPWS 仿真软件;总控制台实现整个系统参数、故障和环境的设置;模拟座舱实现飞机驾驶舱飞行仪表仿真和操纵控制。

该仿真平台采用了分布式的计算机网络结构,使飞行仿真模块、视景仿真模块、GPWS 测试评估模块等软件功能相对独立,交叉耦合少。系统提供一套以数据为中心的基于发布/订阅模式的消息中间件数据分发服务(DDS)作为主要通信手段,DDS 的引入是本系统灵活性与开放性的基础^[9]。根据仿真任务的不同,系统可灵活扩展或切断网络中的某个节点而不影响整个网络性能,最大限度提高软件设计的实时性和扩展性。

3 主要功能模块设计

3.1 飞行仿真模块设计

飞行仿真模块是系统主要数据的来源,仿真平台的实用性受飞行仿真精度和仿真实时性的直接影响,如果仿真精度不够或实时性不高,GPWS 的测试验证结果也无法满足合理性和可靠性的要求。为提高飞行仿真的精度和实时性,该仿真模块采用实时仿真技术的方案,其中,为保证飞行仿真数据的真实性,飞行建模数据选用 B738-800 飞机建模,其建模数据源于波音官方数据,建模结果精度与验模数据比对偏差在 0.5%;为确保系统的实时性,由 Matlab/Simulink 构建飞行器仿真模块,通过上位机开发环境编译生成目标代码下载到嵌入式仿真平台上实时运行。另外,考虑到 GPWS 测试军用运输机使用需要,该仿真平台还建立了某军用飞行仿真模型,同时建立开放的飞行仿真模型库,后期可根据需要修改和定制某特定飞机或扩展其他类型的飞机的模型数据。

飞行仿真模块用于模拟真实飞机空气动力学模型、控制及运动过程,提供飞行状态参数,该仿真模块组成如图 3 所示,主要包括飞机本体模型、大气环境模型、发动机模型、自动飞行控制模型、起落架模型及导航传感器模型。其中,飞机本体模型实现飞机空气动力学特性仿真和六自由度仿真,实现飞行状态参数解算;

大气环境模型包括标准大气模型和大气风场(含侧风、紊流、阵风、风切变等)模型;自动飞行控制模型主要由飞行控制、动力控制、自动油门和自动驾驶仪 4 个子模块构成;传感器模型模拟了 GPWS 运行时所交联的所有机载设备,包括无线电高度表、大气机系统、导航系统和仪表着陆系统等。

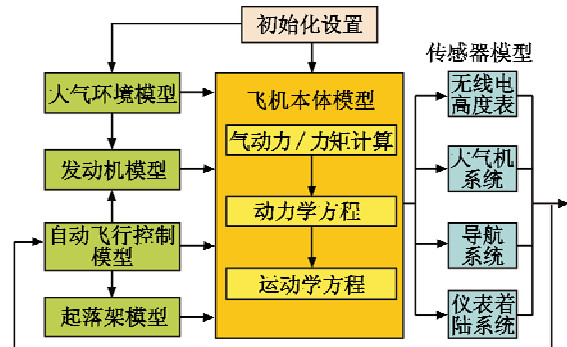


图3 飞行仿真模块组成框图

Fig. 3 Block diagram of flight simulation module

3.2 三维告警合成视景仿真设计

三维视景仿真虚拟了具有沉浸感的逼真飞行任务环境,是驾驶人员确定飞机姿态、位置的重要因素,并依此操纵飞机完成试验任务,也为测试人员提供了更直观的可视化测试环境^[10-11]。为了让设计人员对 GPWS 告警算法有更加直观的认识和感知,以及可以更好地对 GPWS 的工作原理和功能有效性进行展示,在视景中叠加半透明的 GPWS 三维告警包线。包线的具体参数可在 GPWS 测试系统的二维包线图中进行修改,并实时同步到三维视景中。该功能实时解算 GPWS 三维告警区域,并在 GPWS 告警时实时输出并绘制当前三维告警区域。图 4 为 6 种告警模式的三维包线示意图,具体设计如下。

1) 下降速率过大(模式 1):利用飞机当前升降速率和模式 1 的二维告警包线模型,计算出相应的无线电高度警戒阈值和告警阈值,在视景中飞机下方及前方一定区域用半透明状的黄色和红色区域标示出警戒和告警区,如图 4(a)所示。由于飞机下降速率不停变化,因此警戒和告警区高度范围也随之实时变化,并随飞机一起向前移动。

2) 地形接近速率过大(模式 2):根据当前飞机与地面接近速率和模式 2 的二维告警包线模型计算出告警无线电高度,然后在视景中用不同颜色标示出来(图 4(b)),表示飞机以当前接近速率接近地面,将在什么位置进入警戒和告警区。

3) 起飞或复飞时掉高过多(模式 3):根据飞机起飞后的高度损失和模式 3 的二维告警包线模型计算出告警无线电高度,然后在视景中用红色区域标示出来,

如图4(c)所示。

4) 不安全超障高度(模式4):根据当前飞机空速和模式4的二维告警包线模型计算出告警无线电高度,然后在视景中用红色、黄色区域标示出来,如图4(d)所示。

5) 下滑道偏离过大(模式5):依据机场 ILS 导航数据建立正常下滑通道,根据飞机当前与下滑道的偏离量和模式5的二维告警包线模型,计算出告警无线电高度,然后生成从告警高度到跑道着陆点的梯形包线区域,在视景中用黄色、红色分别表示警戒和告警区,如图4(e)所示。

6) 侧倾角过大(模式6):根据当前飞机侧倾角和模式6的二维告警包线模型,计算出告警无线电高度,然后在视景中用红色区域标示出来,如图4(f)所示。

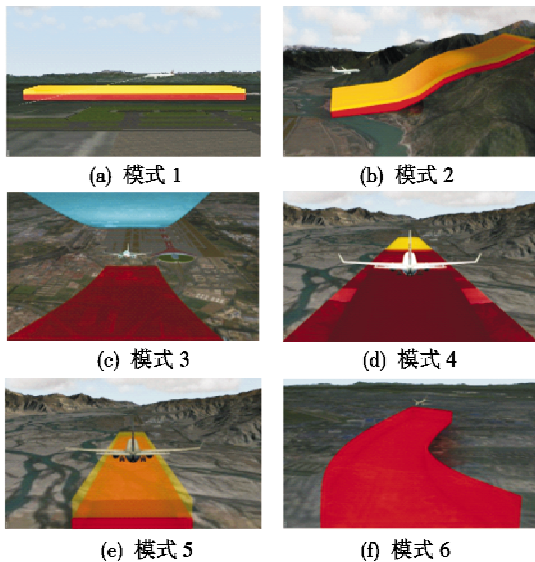


图4 三维告警合成视景示意图
Fig.4 3D alarm synthesis view

3.3 GPWS 测试评估模块设计

GPWS 测试评估模块为 GPWS 的测试与评估提供方便易用的工具,支持对 GPWS 产品及仿真软件的功能和性能进行全面测试。

1) 对于功能的测试验证,该系统主要提供测试用例编辑工具以及利用该工具生成的基本用例库,直接使用基本用例库进行 GPWS 基本功能的测试验证,也可以利用编辑工具生成特殊的测试用例。

2) 为了实现对 GPWS 性能的评估,首先需要建立性能评估的指标,对 GPWS 性能造成影响的主要因素是虚警和漏警,用虚警率和漏警率来描述 GPWS 的基本告警性能。

为了获得虚警率和漏警率两个性能指标,需要进行多次试验才能保证评估的准确性。在每一次测试中,如果没有发出报警,飞机以当前状态继续飞行;如果在预

计的时间(提前预警时间)内发生撞地,则发生漏警事件;如果 GPWS 发出告警,而飞机做出规避,但飞机在规避机动完成前发生撞地,则为发生漏警事件(未及时告警),否则为告警成功;如果飞机不做出规避,飞机在预计的时间内没有发生撞地,则发生虚警事件。记录发生告警的次数、告警成功次数、漏警次数、虚警次数,最后统计出漏警率和虚警率,测试流程如图5所示。

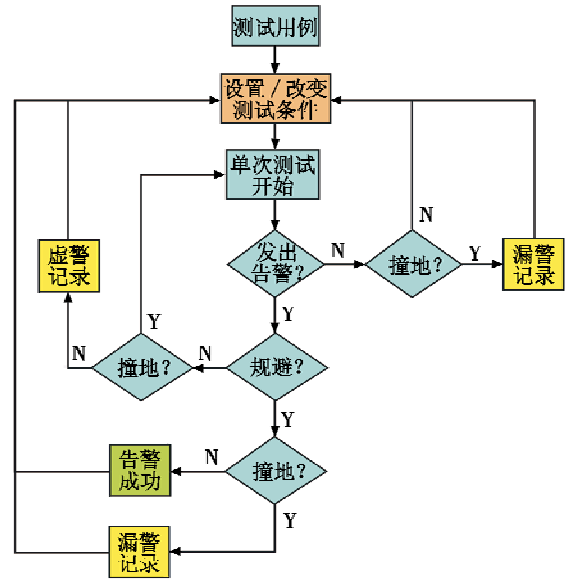


图5 GPWS 性能评估测试流程

Fig.5 The process of GPWS performance evaluation test

以上 GPWS 性能评估测试的条件主要根据 GPWS 相关标准建立,而真实的飞行条件与标准条件有较大差别,而且由于仿真环境与真实环境的误差(如地形误差),通过仿真环境评估的性能与真实性能有一定的误差。因此,需要对条件误差因素的影响程度进行统计分析和评估,获得性能指标随这些条件因素的分布,然后根据这些条件因素在现实中的分布,可以分析得出 GPWS 在真实飞行环境中的性能。

4 结束语

本文针对现有 GPWS 测试方法的不足,结合 GPWS 组成及原理分析了仿真平台的功能需求,对该测试平台进行了总体设计及主要模块设计。该测试平台为 GPWS 提供了一套逼真的可视化测试环境,能够模拟飞机飞行过程及飞行性能,向 GPWS 提供所需的激励数据完成 GPWS 的全面测试,融合飞行员的人为感官因素,满足 GPWS 全面功能和性能测试需求,具有较高的理论和工程实用价值。

参考文献

[1] Airlines Electronic Engineering Committee. ARINC 762-1, Terrain Awareness and Warning System (TAWS) [S].

Annapolis: Aeronautical Radio, Inc., 2000.

- [2] 何创新, 钟建坡, 侯学晖. 近地告警系统国内外现状与发展概述[C]//第五届中国航空学会青年科技论坛, 2012:217-221.
- [3] 杨剑, 曹红旗, 李靖. 近地告警系统飞行试验技术[J]. 航空电子技术, 2010, 41(3):41-45, 50.
- [4] 高志远, 冯金光. 近地告警系统测试设备研究与实现[J]. 测控技术, 2012, 31(s):48-51.
- [5] 张冉, 肖刚, 徐悦, 等. TAWS 低空风切变告警功能仿真验证平台设计[J]. 电光与控制, 2012, 19(7):51-56.
- [6] 刘以奋. 直升机近地告警仿真验证平台研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [7] 赵楠喆, 胡士强. TAWS 测试系统的飞行仿真激励技术

[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9):56-60, 115.

- [8] Federal Aviation Administration (FAA). Technical Standard Order (TSO)-C151c, Terrain Awareness and Warning System (TAWS) [S]. Washington, DC, USA: Department of Transportation, Federal Aviation Administration (FAA), Aircraft Certification Service, 2016.
- [9] 李培林, 彭美平. 基于 DDS 的分布式网络仿真系统[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(2):214-218.
- [10] 邓晴莺, 李国暉, 王宝奇, 等. 某飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8):75-79.
- [11] 董鸿鹏, 王春财, 张波. 飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2018, 38(s):228-231, 235.

(上接第 107 页)

同理可以测得接收天线 C 到 A 的距离 d_{AC} , 将天线 C 的地理坐标 $(x_c, y_c, z_c)^T$ 绕地理坐标系的 z 轴旋转 y 角度, 然后再绕 x 轴旋转角度 p 得到天线的新坐标 $(x'_c, y'_c, z'_c)^T$, 最后经过第 3 次旋转 R , 即可将 $(x'_c, y'_c, z'_c)^T$ 变换成甲板坐标系坐标, 即

$$\begin{bmatrix} 0 \\ d_{AC} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

可以得到航母的横摇角 r 为

$$r = -\arctan\left(\frac{z'_c}{y'_c}\right) = -\arctan\left(\frac{x_c \cos y \cos p + y_c \sin y + z_c \cos y \sin p}{-x_c \sin y \cos p + y_c \cos y - z_c \sin y \sin p}\right). \quad (10)$$

4 结束语

针对非涅尔透镜光学助降系统动态飞行检验的需求, 本文首先从标校系统的作用精度、测角角度以及光电平台成像性能的角度, 分析了无人机标校平台的总体需求, 然后介绍了标校系统的基本组成及标校流程, 最后分析了标校关键技术及其解决方案。与有人直升机标校方案相比, 多旋翼无人机平台可采用悬停拍摄的方案, 飞行速度小, 由视频时间戳同步误差带来的定位误差小, 且 GNSS 天线相位中心与成像镜头成像中心的偏心分量小, 在采用同样的 RTK 模块时, 无人机标校平台整体精度优于有人飞机标校平台。基于无人机平台的动态校飞具有任务时间灵活、组织实施方便、航路设计简单、保障工作简捷等优点, 为非涅尔透镜光

学助降系统的动态校飞开创了一种全新模式。

参 考 文 献

- [1] 杨一栋. 光学着舰助降系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [2] 杨卿, 王加亮. 舰载机光学助降装置校飞方法研究[J]. 硅谷, 2014, 7(5):61-62.
- [3] 杜亚杰, 刘爱东, 孙海文. 基于距离交汇法的海上动态定位误差分析[J]. 电光与控制, 2016, 23(4):81-84.
- [4] 刘爱东, 杜亚杰. 基于 TDOA 的舰载机空间定位算法研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(9):59-62.
- [5] 姬新阳, 高山, 陈庆良, 等. 基于无人机 GPS 的测量雷达标校方法研究[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(1):73-78.
- [6] 刘冬利, 张驿, 庞海滨, 等. 利用无人机标定雷达精度的新方法[J]. 电讯技术, 2015, 55(2):146-150.
- [7] 胡恩勇. 光波束着舰引导系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- [8] 江志东, 霍立平, 贾绍文, 等. 基于 SoC 的无人机航测视频信息叠加设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10):196-199.
- [9] 郑峰婴, 杨一栋. “艾科尔斯”改进型光学助降系统的纵向着舰精度研究[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(2):111-115, 120.
- [10] 方芬. 舰载机光学助降关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [11] 刘爱东, 贺林波, 季勤超, 等. 航母姿态对光电标校装置测量精度的影响分析[J]. 电光与控制, 2018, 25(2):98-102.