

国外高能激光系统试验与评价技术发展及启示

魏昊波, 胡黎明, 宋磊

(湖北航天技术研究院 总体设计所, 武汉 430040)

摘要: 随着高能激光系统研究进入实战化部署阶段, 试验与评价技术的重要性不断提升; 针对高能激光系统的试验与评价问题, 美国建成了一系列高能激光系统测试试验平台, 能够支持开展海、陆、空多种平台激光装备的集成测试与演示验证试验, 试验与评价目标已从技术验证测试转变为试验鉴定测试, 以实战需求为出发点设计试验内容, 通过将试验鉴定贯穿整个装备研制过程的方法, 保障高能激光系统的作战效能和平台适应性; 为更好地推动国内高能激光装备应用, 需要充分分析和借鉴国外发展经验, 结合自身发展特点, 加速推进高能激光系统集成、测试、试验方法研究和能力条件构建, 为我国高能激光系统研制与应用部署提供有力支撑。

关键词: 高能激光系统; 试验验证; 作战效能评价

Development and Enlightenment of Foreign High Power Laser System Test and Evaluation Technology

Wei Haobo, Hu Liming, Song Lei

(System Design Institute, Hubei Aerospace Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: With the development of high power laser system into the combat deployment phase, test and evaluation technology is becoming more and more important. For test and evaluation problem of high power laser system, U. S. A build a series of high power laser system test platforms which can support the integration test and demonstration verification of laser equipment on sea, land and air platforms. The test and evaluation purpose have also changed from technical verification to test identification, and the experimental contents are designed based on actual needs. By the way of the test through the entire equipment development process, the operational effectiveness and platform adaptability of high power laser system is guaranteed. In order to promote application of Chinese high power laser equipment, it is necessary to learn from foreign development experience and combine the development characteristics of China, including accelerate high power laser system integration, test, experiment method research and capacity building. This will provide strong support for the development and application deployment of high power laser system in China.

Keywords: high power laser system; test verification; adaptive; operational effectiveness evaluation

0 引言

高能激光系统作为一种采用光能代替传统化学能和机械能实现对目标有效毁伤的新型军事装备, 具有速度快、精度高、抗电磁干扰、可重复使用、单发效费比高等优点, 在光电对抗、主动照明和末端防御等领域具有广泛的应用价值。近年来, 各国高能激光系统研究的主攻方向已由化学激光体制转变为固体激光体制, 并围绕陆、海、空、天各平台应用需求开展研制部署^[1-4]。

伴随着高能激光系统逐渐从技术攻关阶段发展至实战化部署阶段, 试验与评价技术的重要性也日益提升。目前, 国际上高能激光系统试验与评价技术研究主要围绕系统集成性、使用性和综合效能验证等方面展开。

本文首先介绍了美国高能激光系统发展历程, 针对当

前高能激光系统试验与评价需求及发展现状进行了分析综述, 得出了美国高能激光系统试验技术的发展趋势, 并从中给出了我国高能激光系统试验与评价技术发展的启示。

1 高能激光系统发展现状

自1960年激光问世时起, 美国就一直致力于推动高能激光系统武器化应用。在经历了几十年发展后, 美国高能激光系统研究处于领先地位, 并已在海、陆、空各平台上开展了性能验证^[5-8], 如图1所示。

舰载激光系统方面, 美国海军已完成了海军激光武器系统(Laser Weapon System, LaWS)等系统的综合集成验证, 在海上环境下实现了无人机、武装小艇等目标摧毁^[9-11]。2014年, 美军将30 kW功率等级的LaWS系统部署在“庞塞”号船坞登陆舰, 充分验证了激光系统在强风、高温、潮湿等恶劣海洋环境下的作战性能。2015年, 美军围绕舰船自防御需求, 启动了激光武器系统验证机(Laser Weapon System Demonstrator, LWSD)项目, 在LaWS系统基础上解决包括激光功率、光束质量、激光导光结构以及激光系统其他相关的物理结构和光学设计等问题, 使激光功率达到150 kW。2018年, 美国海军授予洛·马公司一

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-06-25。

作者简介: 魏昊波(1988-), 男, 河南洛阳人, 博士, 工程师, 主要从事高能激光系统光束控制技术方向的研究。

胡黎明(1984-), 男, 江西永新人, 博士, 高级工程师, 主要从事高能激光系统总体技术方向的研究。



图 1 美国海陆空各平台高能激光系统

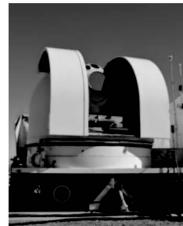


图 2 SHiELD 系统地面测试演示器

致盲和末端防御需求, 在 2017 年前后完成 60~100 kW 功率等级高能激光系统研制与验证; 针对未来舰船的互防反舰导弹需求, 在 2022 年完成 300~500 kW 功率等级的高能激光系统研究; 针对综合电力系统舰船平台、航空母舰等舰船的自防反舰导弹、反弹道导弹需求, 在 2025 年完成大于 1 MW 功率等级的高能激光系统研制与演示验证。

表 1 美海军高能激光系统发展规划

时间	功率等级	作战任务	装备平台
2017 年	60~100 kW	反无人机、光电制导反舰导弹、水面船只、侦查致盲	现役舰船、未来舰船
2022 年	300~500 kW	舰船互防反舰导弹	未来舰船
2025 年	大于 1 MW	自防反舰导弹、反弹道导弹	综合电力系统舰船、航空母舰

份价值 1.5 亿美元的合同, 计划在 2020 年前研制两套太阳神 (HELIOS) 舰载激光系统 (60~100 kW 等级), 其中一套将装备于阿利伯克级驱逐舰、另一套交付新墨西哥州白沙靶场。2019 年, 针对船坞急需反制无人机的作战需求, 美国海军启动具备干扰和致盲功能的海军光学致盲干扰 (Optical Dazzling Interdictor, Navy, ODIN) 项目, 计划安装到 1 艘水面舰船上进行测试。

车载激光系统方面, 美国陆军基于车载平台开展了多轮系统集成、演示验证以及光源升级工作。2013 年, (High Energy Laser Mobile Demonstrator, HEL-MD) 激光系统用 10 kW 光纤激光器在测试过程中成功摧毁了数架无人机以及多达 90 枚迫击炮弹。同年在白沙靶场完成了 70 多次迫击炮弹和无人机的打靶试验。2017 年, 美军将洛·马公司研制的 6 万瓦级光谱合成激光器集成到重型战术卡车上, 并于 2018 年在白沙靶场进行演示验证, 成功击毁火箭弹和迫击炮弹。2018 年, 美国陆军启动了基于中型卡车的 10 万瓦高能激光战术车辆演示器 (High Energy Laser Tactical Vehicle Demonstrator, HEL-TVD) 计划, 预计 2022 年在白沙靶场进行测试。

机载激光系统方面, 美国空军已完成了机载激光系统 (Airborne Laser, ABL)、先进战术激光系统 (Airborne Tactical Laser, ATL) 等项目的系统集成与演示验证试验。2009 年至 2010 年, 美国空军 ABL 系统以波音 747-400F 为平台进行了 3 次反导拦截试验, 包括固体和液体燃料弹道导弹, 有效拦截距离 40 千米。2017 年, 美国空军研究实验室授予了洛马公司 150 kW 级的自保护激光演示系统 (Self-Protect High Energy Laser Demonstrator, SHiELD) 项目, 用于提升战斗机对地空和空空导弹的自卫能力。2019 年 4 月, 美国空军和洛马公司在白沙导弹靶场利用 SHiELD 系统地面测试替代品的激光系统演示器成功击落了多枚飞行中的空射导弹, 并预计在 2021 年具备机载吊舱式激光系统样机飞行测试条件。

目前, 美国战术应用高能激光系统研究已实现了由技术验证向实战化部署的转变。美国海军研究室发展规划显示, 美海军高能激光系统实战化部署可分为 3 个阶段, 如表 1 所示。针对现役舰船的反无人机、反水面船只、侦查

2 高能激光系统试验与评价技术发展现状

2.1 美军装备试验管理规划与试验评价思路

为保证高能激光装备能够满足实战需求, 美国国防部试验资源管理中心从军事需求、技术水平和经济等角度综合考虑, 依托三项主要计划来推动试验与评价技术的发展, 如表 2 所示^[12]: 1991 年设立的试验与评价核心投资计划 (Central Test and Evaluation Investment Program, CTEIP), 以发展或提升多平台通用测试能力为目标, 年度预算 1.4 亿美元/年, 对应技术成熟度为 6~9 级; 2002 年设立的试验与评价/科学与技术计划 (Test and Evaluation/Science and Technology, T&E/S&T), 以发展高能激光系统测试技术为目标, 年度预算 0.95 亿美元/年, 对应技术成熟度为 3~6 级; 2007 年设立的联合任务环境试验能力计划 (Joint Mission Environment Test Capability, JMETC), 以提供联合测试基础设施为目标, 年度预算 0.19 亿美元/年。

表 2 美国高能激光试验验证计划

名称	目的	设立时间	支持额度
试验与评价核心投资计划	发展或提升多平台通用测试能力	1991 年	1.4 亿美元/年
试验与评价/科学与技术计划	发展未来武器测试技术	2002 年	0.95 亿美元/年
联合任务环境试验能力计划	提供联合测试基础设施	2007 年	0.19 亿美元/年

经过多年发展, 美军装备试验评价方式已从传统的“分阶段”试验和“分类型”试验变为基于能力需求的一体化试验评价, 不再单纯考核装备的技术指标, 而是转向考核装备的作战效能是否能够满足作战任务的需要, 在研发设计之初就考虑试验因素, 实现研制试验评价到作战试验评价的无缝集成^[13]。具体到高能激光系统试验评价技术方面, 美军已经形成了“核心技术攻关+系统验证+平台试用”并行推进的发展思路, 在以实战应用为目标对核心技术持续攻关的同时, 依托已建成的系统试验平台对高能激光系统能力进行充分验证, 再将通过验证的系统装载到海、陆、空平台上, 检验实际使用效能, 从而不断促进高能激光系统实用化。

2.2 美国高能激光系统试验评价能力现状

美国军方及武器生产商的多机构长期致力于高能激光系统试验与评价技术研究, 主要研究内容涵盖先进高功率激光源验证技术、超高精度光束控制与测试技术、激光系统建模与仿真技术、激光效能测试技术和激光系统集成验证技术等多个方面, 并建设了一系列高能激光系统测试试验平台, 能够支持开展海、陆、空多种平台激光装备的集成测试与演示验证试验。其中, 以位于新墨西哥州的白沙导弹靶场最为著名, 如图 3 所示。

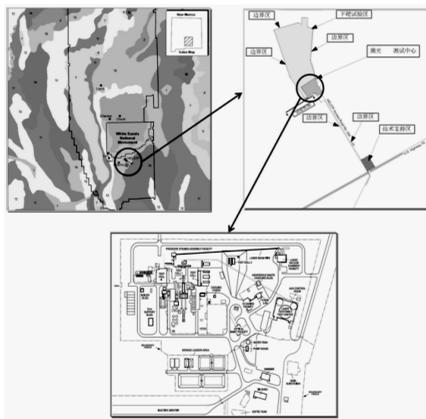


图 3 白沙导弹靶场高能激光系统试验场及其测试中心

白沙靶场内的高能激光系统试验场是美国国家级高能激光研究、开发、试验与评价组织, 是美国陆军空间与导弹防御司令部定向能武器的主要试验场, 同时也是海陆空三军高能激光方向的研究、开发、试验与评价中心。高能激光系统试验场的核心区域为测试中心, 主要由激光测试及演示平台、脉冲激光易损性测试系统、目标反射率测量系统、目标辐照度测量系统、真空试验系统、效能试验区 and 危险测试区等七部分组成, 具备满足多层次、多类型试验需求的能力, 包括高能激光性能参数测试试验、静态目标易损性试验、大气传输试验、材料效能评估试验、军事破坏性试验、爆炸目标安全性试验和模拟环境下的激光杀伤力试验等, 如表 3 所示。

表 3 高能激光试验场测试中心各部分功能

系统名称	系统主要组成	支持开展的试验
激光测试及演示平台	100 kW 功率水平的固体激光测试平台; 15 kW 功率水平的中红外演示设备	高功率激光传输试验, 性能参数测试试验, 中红外激光演示试验, 高能激光技术验证试验等
激光易损性测试系统	12 kW 功率水平、10.6 μm 波长的 CO_2 激光器	多类型静态、动态目标易损性试验, 探测器敏感性评估试验, 材料破坏评估试验等
目标反射率测量系统	高能激光反射率测量设备	静态目标激光反射率测试试验
目标辐照度测量系统	高能激光辐照度测量设备	静态目标表面激光辐照度测试试验
真空试验系统	50 英尺直径的真空室	真空环境激光效应试验
效能试验区	室内激光毁伤效能实验室	军事破坏性试验, 目标诊断仪器试验等
危险测试区	距离测试中心 975 m 处的下靶区	战术级爆炸目标安全性试验, 大气传输试验, 模拟环境激光毁伤试验, 硬点防御试验, 大型助推器破坏试验等

综合至今公开的报道, 白沙靶场已完成过包括 ABL 系统在内的化学体制高能激光系统集成测试, 和基于光纤激光体的舰载、车载和直升机平台系统集成与试验, 具备了兆瓦功率等级、1.5 m 发射口径系统试验评价能力, 光谱合成、空间功率合成光纤激光系统测试试验能力, 并且能够支持开展针对车辆、无人机、迫击炮弹、火箭弹和弹道导弹等目标的全系统级动态打击试验。此外, 美军在白沙靶场正逐步建成针对光纤体制机载激光系统的集成测试与试验评价能力, 以确保在 2021 前完成 SHIELD 系统的集成与演示验证工作。

3 高能激光系统试验评价技术发展趋势

随着美军各类高能激光系统研究的不断推进, 相关试验与评价技术也越来越成熟, 并体现出三大发展趋势: 1) 以实战化为出发点, 面向激光武器实际应用需求设计试验测试项目, 考核平台适用性; 2) 试验鉴定与工程研制逐渐一体化, 在设计之初就考虑测试试验因素; 3) 激光系统测试目标逐步由技术验证测试转变为试验鉴定测试。

3.1 面向实战设计试验内容

面向实战应用需求设计试验内容已逐步成为美军高能激光装备鉴定评价过程中的常态。以 LaWS 舰载激光系统为例, 如图 4 所示, 系统集成完成后, 美军首先于 2009 年在加州中国湖海军空战中心开展了陆基试验, 验证了 LaWS

在静止平台上的全系统动态打击能力；2010年，LaWS在加州圣尼古拉斯岛开展了岸基打靶试验，首次验证了高能激光系统在海风、大气吸收、大气散射、大气湍流等海洋环境因素影响下对无人机、小艇等目标的毁伤效果；2011年，LaWS在波托马克河试验场的海洋环境中开展了动平台弱光跟踪试验，验证了系统在海洋移动平台上的动态跟踪能力；2012年，LaWS系统被安装在“杜威”号（阿利伯克级）驱逐舰前方甲板上，进行了一年多的海试，充分验证了系统在舰船环境下的使用性能；2013年，LaWS在庞塞号两栖战舰上正式服役，编号为AN/SEQ-3；2014年，AN/SEQ-3在中东海域（波斯湾）对舰载激光器的作战性能进行了多轮实战射击试验，完成了实际作战环境下的全系统性能考核。在一系列的测试和认证步骤之后，LaWS成为了美国所有军事部门部署的第一个完全批准的高能激光系统。

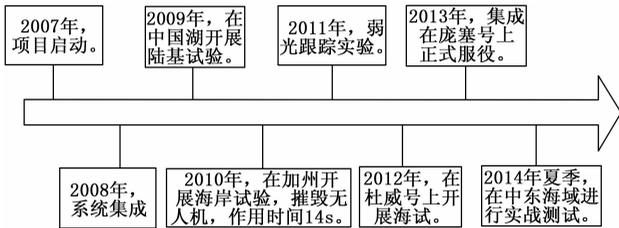


图4 LaWS系统研制部署过程

3.2 试验评价与工程研制一体化

试验评价与工程研制一体化的核心是在进行高能激光系统方案设计之初，就综合考虑测试试验因素，将试验评价贯穿高能激光装备研制的全过程^[14-15]。美军将装备试验评价分为研制试验评价和作战试验评价两大类，如图5所示：研制试验评价通过“试验—分析—改进—试验”的过程全面收集产品数据，建立产品性能数据库，改进仿真模型，并通过仿真分析方法进一步指导技术方案优化；作战试验评价从方案分析和技术攻关阶段开始，基于研制模型及模型参数来进行早期作战仿真评估；在系统研制与演示验证阶段，根据现有性能数据库对装备潜在效能进行评价，以详细规划和设计作战试验评价计划；在生产与部署阶段的全速率生产之前，模拟近实战环境条件，通过现场试验对评估武器装备的作战效能和作战适用性；在使用保障阶段进行的后续作战试验评价，主要是改进评价方法、纠正装备缺陷，并对装备作战效能、作战适用性及质量稳定性等进行全面评价。

3.3 技术验证测试向试验鉴定测试的转变

随着高能激光系统研究从关键技术攻关阶段发展为实战化部署阶段，试验测试目标也开始由技术验证测试转变为试验鉴定测试。早期研究阶段，美军开展技术验证测试的目标是获取高能激光系统综合性能指标，用来验证技术攻关的完成情况，并为建模仿真、方案设计和系统研制的

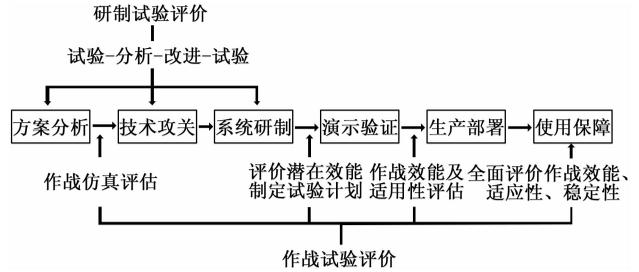


图5 美军高能激光系统各研制阶段的试验鉴定

优化迭代提供数据支撑，主要包括系统闭环性测试、出光能力测试、捕获跟踪瞄准能力测试和毁伤能力测试等。进入试验鉴定测试阶段后，高能激光系统试验目标不再是单纯的性能指标测试，而是针对高能激光装备在预期战场环境下的全系统作战效能和作战适用性进行试验与评价，并以此作为鉴定高能激光装备合格与否的标准。其中，作战效能评价重点考核激光装备在预期战场环境下完成预期作战任务的能力，例如高能激光系统与目标指示雷达等外部探测设备的信息对接匹配能力，不同湍流强度、天光背景条件下对各种类型机动目标的动态跟踪打击能力等，作战适用性评价重点考核激光装备在作战使用过程中的可靠性、适应性、性能稳定性等，如图6所示。

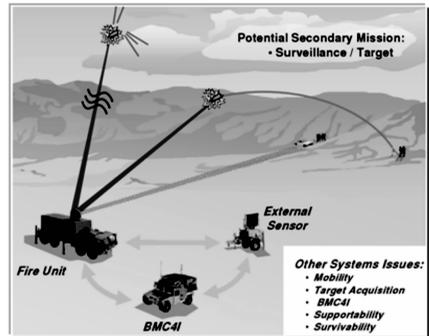


图6 高能激光系统作战效能验证

4 发展启示

综合分析美军试验评价技术的发展现状与发展趋势可知，美国高能激光系统试验的目的已从技术验证测试转变为试验鉴定测试，以实战需求为出发点设计试验内容，通过将试验鉴定贯穿整个装备研制过程的方法，保障高能激光系统的作战效能和平台适应性。相对而言，近些年国内高能激光技术发展迅速，为更好推动我国高能激光装备应用，抢占先机，可以充分借鉴国外先进发展经验，结合自身特点，重点开展3个方面的能力建设：

- 1) 加速推进高能激光系统集成验证与测试方法研究，并构建出一套完整的试验验证与测试方法体系；
- 2) 加快推进高能激光系统效能评价与验证方法研究，

(下转第19页)

- O process based on parameter estimation and expert System [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 263: 1647-1651.
- [4] Qu H C, Ding X B. Civil aero-engine fault diagnosis based on fuzzy least square support vector machine [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 130: 2047-2050.
- [5] Tang Y, Eliasmith C. Deep networks for robust visual recognition [A]. *International Conference on Machine Learning [C]*. 2010: 1055-1062.
- [6] Sze V, Chen Y H, Yang T J, et al. Efficient processing of deep neural networks: a tutorial and survey [A]. *Proceedings of the IEEE [C]*. 2017, 105 (12): 2295-2329.
- [7] Lee H, Pham P T, Yan L, et al. Unsupervised feature learning for audio classification using convolutional deep belief networks [A]. *Advances in Neural Information Processing Systems 22: , Conference on Neural Information Processing Systems 2009 [C]*. Vancouver, British Columbia, Canada, 2009: 1096-1104.
- [8] Hamel P, Eck D. Learning features from music audio with deep belief networks [A]. *International Society for Music Information Retrieval Conference [C]*. Netherlands, 2010: 339-344.
- [9] Li H R, Gu S S. A fast parallel algorithm for a recurrent neural network [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30 (4): 516-522.
- [10] Glorot X, Bordes A, Bengio Y. Domain adaptation for large scale sentiment classification: a deep learning approach [A]. *Proc of the 28th International Conference on Machine Learning [C]*. 2011: 513-520.
- [11] Mesnil G, Dauphin Y, Glorot X, et al. Unsupervised and transfer learning challenge: a deep learning Approach [A]. *Workshop on Unsupervised & Transfer Learning [C]*. 2011, 7: 1-15.
- [12] 吴瑀倩, 李 静, 吴晓舟. 基于深度信念网络的民航发动机状态监测 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (7): 28-31.
- [13] Fang H Z, Shi H, Dong Y F, et al. Spacecraft power system fault diagnosis based on DNN [A]. *2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin) [C]*. 2017: 1-5.
- [14] 车畅畅, 王华伟, 倪晓梅, 等. 基于深度学习的航空发动机故障融合诊断 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44 (3): 621-628.
- [15] Jiang Z D, Fang H Z, Shi H, et al. The prognostic method of engine gas path based on Convolutional Neural Network [A]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Technology and Industrial Automation (ICITIA2018) [C]*. 2018.
- [16] Ertam F, Ardin G. Data classification with deep learning using Tensorflow [A]. *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK) [C]*. Antalya, Turkey. 2017: 5-8.
- [17] Abhinav S, Kai G, Don S, et al. Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation [A]. *International Conference on Prognostics and Health Management [C]*. USA: IEEE, 2008: 1-9.

(上接第 4 页)

建设激光装备的数字化验证能力, 构建激光系统效能数据库;

3) 加速推动试验鉴定能力建设, 在满足高能激光系统技术攻关要求的同时, 着眼于激光装备应用部署需要, 建成能够满足全系统研制和试验评价需求的集成、测试和效能验证平台, 为我国高能激光系统的实战化应用提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 刘 铭. 国外激光系统技术的发展 [J]. *舰船电子工程*, 2011, 31 (4): 18-23.
- [2] 刘晓明, 葛悦涛. 高能激光系统的发展分析 [J]. *战术导弹技术*, 2014, 1: 5-9.
- [3] 李怡勇, 王建华, 李 智. 高能激光系统发展态势 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38 (6): 1-6.
- [4] 程 勇, 郭延龙, 唐 璜, 等. 战术激光系统的发展动向 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016 (11).
- [5] Glen P, Salvatore J, Robert L, et al. 激光系统系统导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [6] 冯寒亮, 韩 锋, 张 平. 美国海军舰载高能激光系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43 (7): 41-45.
- [7] 刘 毅. 机载战术激光系统关键技术探讨 [J]. *航空兵器*, 2011, 5: 43-46.
- [8] 辜 璐. 机载激光系统回顾与发展 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35: 48-51.
- [9] 何奇毅, 宗思光. 舰载激光系统发展进展与思考 [J]. *激光与红外*, 2017, 47 (12): 1455-1460.
- [10] 李 旻. 激光系统的发展动向与分析 [J]. *舰船电子工程*, 2017, 37 (11): 16-20.
- [11] 张晶晶. 舰载激光系统的发展 [J]. *舰船电子工程*, 2016, 36 (6): 17-20.
- [12] 薄 中, 冯 策, 孙 超, 等. 美军联合任务环境下的能力试验方法分析 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2018, 13 (4): 471-475.
- [13] 王国盛, 洛 刚. 美军一体化试验鉴定分析及启示 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2010, 21 (2): 95-98.
- [14] 杨 磊, 武小悦. 美军装备一体化试验与评价技术发展 [J]. *国防科技*, 2010, 31 (2): 8-14.
- [15] 张 睿, 郝桂友, 方 博, 等. 美军武器装备试验鉴定中可靠性工作分析及启示 [J]. *质量与可靠性*, 2018, 195 (3): 19-22.