

文章编号:1001-5078(2023)11-1637-07

· 综述与评论 ·

美国激光武器发展建设研究

李 伟,余志锋,邓晓智

(国防科技大学电子对抗学院,安徽 合肥 230031)

摘 要:激光武器作为最先投入作战运用的定向能武器之一,具有光速射击、生效速度快、使用效益高、可控性强等优点,当前,美国以“多域作战”为牵引,不断加强激光武器在陆海空天等作战域的研发与部署。本文全面分析梳理了美国激光武器的顶层规划和发展建设机制,并结合近五年其激光武器技术发展和演示验证情况,对未来一段时间美国激光武器发展策略及发展方向进行了预测,以期对相关领域研究提供一定的参考。

关键词:激光武器;发展机制;技术实现;发展动态;战术应用;发展预测

中图分类号:E92;TJ95 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.003

Research on the development and construction of laser weapons in the United States

LI Wei, YU Zhi-feng, DENG Xiao-zhi

(College of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

Abstract: As one of the first directed-energy weapons to be put into operational use, laser weapons have the advantages of speed-of-light firing, fast entry into force, high efficiency in use and strong controllability. Currently, the United States with "multi-domain warfare" as its traction, and constantly strengthens the research and development and deployment of laser weapons in land, sea, air and space combat domains. This paper comprehensively analyzes and combs the top-level planning and development and construction mechanism of U. S. laser weapons, and combines the development of its laser weapons technology and demonstration and verification in the past five years, and predicts the development strategy and direction of U. S. laser weapons in the coming period of time, with a view to providing certain references for the research in related fields.

Keywords: laser weapon; mechanism of development; implementation of technology; application of tactics; progress; forecast of development

1 引 言

美国自 20 世纪 60 年代开始进行激光武器的研发,随着国际形势、科学技术以及作战目标的改变,美国激光武器先后经历了战略激光武器、机载弹道导弹防御武器阶段。进入新世纪,尤其是 2015 年后,材料科学、能量控制和微电子等技术不断取得突破,激光

武器的作战性能得到极大的提高,加之局部战争和武装冲突中无人机、火箭弹、小型船只等小型战术武器的频繁运用,美军迫切需要一种机动灵活的低功率战术激光武器取代大功率激光武器执行作战任务^[1]。

早在 2000 年,美国就成立了联合高能激光技术办公室,探索开发可供战士在战场上使用的激光武

基金项目:装备综合研究计划项目资助。

作者简介:李 伟,男,硕士研究生,主要从事信息作战指挥研究。E-mail:981511692@qq.com

收稿日期:2022-11-22; **修订日期:**2023-02-24

器系统,《2017 财年国防授权法案》中明确要求国防部改组成立联合定向能转化办公室(HEL-JTO),加快美军定向能能力的研发与部署,2019 年更是任命专责官员负责定向能武器发展与演示验证,陆军、海军和空军研究实验室相继成立专门的定向能技术研发与采办机构,民间智库也相继发布研究报告,对定向能武器开展研究。

目前,美国激光武器在技术研发、演示验证、实战部署中处于世界领先地位,车载、舰载、机载等多种激光武器设备试验相继获得成功、陆续装备部队,本文系统总结了美国激光武器的发展建设机制、技术实现进展和演示验证情况,并以此为基础,分析预测了未来一段时间美国激光武器的发展策略及发展趋势。

2 发展建设机制

2.1 国家层面的顶层战略规划

《国防战略》、《关键与新兴技术国家战略》等文件是美国高能激光武器发展的顶层战略规划,它明确高能激光武器在国防科技中的地位。例如,根据 2018 年《国防战略》,美国国防部将激光武器等定向能列为仅次于高超声速技术的高优先级研发项目之一,采取多种措施重点推进;2020 年 10 月 15 日,美国发布《关键与新兴技术国家战略》,明确国防科技工作重点技术领域,强化科技资源投入,加快技术创新应用。2022 年 2 月,美国国家科学技术委员会(NSTC)发布新版关键和新兴技术清单,新增定向能技术,将其作为核心技术大力发展。

2.2 组织层面的技术研发布局

2017 年 10 月,美国成立定向能转化办公室,重点推进激光武器等装备转化工作。国防部下设的空军部、海军部、陆军部、导弹防御局和高能激光武器联合技术办公室等^[2]都设有专门的基础理论研究、技术成果转化、武器试验验证机构,各机构彼此间相互配合,合作或各自开展激光武器研究项目。如反电子设备高功率微波先进导弹(CHAMP)项目,由美太平洋司令部提出需求,空军研究实验室(AFRL)牵头规划建设能力和评估,波音公司作为主承包商提供机载平台和系统集成,雷神公司负责研发高功率微波载荷。

2.3 军种层面的发展路线图

各军种制定的发展路线图是美国高能激光武器发展的详细规划,它明确一段时间内定向能武器和技术发展的具体路径,如《陆军定向能武器计划:背景和

呈国会问题》(2018)、《美国空军路线图—激光武器》(2018)、《定向能 2060—对美国国防部未来 40 年定向能技术展望》(2021)等。如在《定向能 2060》报告^[3]中,分析了当下定向能的技术发展现状,预测了未来 40 年定向能技术发展水平和定向能武器应用状态,并指出为了保障美未来的定向能能力,美需要制定短期、中期和长期的国家战略,同时应该在尺寸、重量和功率(SWAP)、自适应光学系统、激光器研发、与 C⁴ISR 系统集成等激光武器技术上加大研究力度,进而缩短定向能武器发现、锁定、跟踪、瞄准、交战和评估的目标周期,实现真正意义上的“光速交战”。

2.4 民间层面的智库研究报告

作为美国国家安全议题领域的高端智库“新美国安全中心”(CNAS)于 2015 年公布了《定向能武器前景与展望》报告,在其中为美国国防部发展高能激光等定向能武器提供了多项建议:①制定并发布国防部范围内的定向能武器发展战略计划;②在国防部成立监督机构;③提供充足的有效资源;④实战部署最容易成功的系统;⑤稳扎稳打,为长远成功投资;⑥开展净评估,并积极监测国外定向能武器发展;⑦将定向能武器纳入装备整体体系中;⑧为定向能武器的快速应用提供系统支撑。

3 技术实现

3.1 激光器开发方面

美军从化学激光武器的探索中得出结论,化学激光武器虽能实现高质量的兆瓦级功率输出,但体积质量大、转化效率低、机动能力差、使用成本高的劣势不适于车载、舰载和星载等小型平台,目前该类型激光武器正向小型化发展,呈现逐渐被固体激光器取代的趋势。固态激光器作为新一代激光武器光源,采用全电工作,具有输出功率大、能量高,体积小等优点^[4],尤其是光纤、板条激光器,性能尤为突出。美军相继展开的联合高功率固体激光器(JHPSSL)、耐用电子激光器(RELI)、高能激光技术演示器(HELTD)都是针对固体激光器的研发。

3.2 光束控制系统方面

光束控制系统能够在激光武器进行射击时修正主机平台晃动、大气运动效应(如云、雨、雾、空气密度的变化)、大气效应(如热晕、光束衍射、散射、大气吸收、大气湍流)对激光束稳定传输的影响。“目

前,美军已经解决了近海面稠密大气、超声速飞行激光等条件下的光束自适应控制问题^[5]”,正在攻克激光高超声速中的光束控制问题,相关项目包括先进的定位和交战光束控制(ABLE)、高能自适应定向能系统(HADES)、SHIELD 转塔气动效应研究(STRAFE)、光束控制和气动效应研究和开发(BARD)项目等。

3.3 试验及测试方面

试验及测试是美国激光器研发的重点一环,实验室测试能够提供大气补偿等技术问题的解决方案,现场测试能够对武器的战技术性能进行全面检验。一方面,美国在白沙导弹靶场、中国湖等武器试验基地设置高能激光系统测试设施,进行

全面的武器能量测试,另一方面,各军种也在各自的试验场进行激光武器的试验验证,如美空军在阿诺德空军基地开展定向能武器系统空气动力学测试,美陆军通过建设定向能系统集成实验室,在尤马试验场测试等手段,加速激光武器技术融入作战系统,美海军“波特兰”号在亚丁湾测试舰载高能激光武器等。

4 各军种研发进展情况

4.1 国防部下设机构研发情况

美国防部是定向能技术发展的主要的论证、研发和采办机构,其组织架构完整,各下设部门任务分工明确,针对各自领域开展了专门的研究,其主要机构开展的项目如表 1 所示。

表 1 美国国防部各机构激光武器研发情况

Tab. 1 Laser weapons development by DOD

部门	项目	开发目标	作战目标	演示验证情况
导弹防御局	定向能研究(DER)	应对高空无人机	弹道导弹	2016: 预计建设 50 kW 级激光器
	低功率激光演示器(LPLD)	研发高空无人机机载激光的支撑技术	助推阶段弹道导弹	2016(第一阶段): 开展验证机设计工作, 解决激光功率和孔径尺寸问题 2018(第二阶段): 开展生产设计和平台集成工作, 解决光束控制与稳定性 2019(第三阶段): 验证典型距离内捕获导弹及激光束稳定瞄准目标的能力 2020: 进行飞行试验 2021: 进行光束稳定试验、弹道导弹防御试验
高能激光武器联合技术办公室(HEL-JTO)	联合高功率固体激光器(JHPSSL)	示范 100 kW 级的二极管泵浦高能固态激光	/	2002: 取得 105 kW 高能光束 2020: 研制 100 kW 激光器 2022: 研制 100 kW 级的激光武器系统
	耐用电子激光器倡议(RELI)	开发出体积小、重量轻、输出效率高的 60 kW 级光纤激光武器, 满足多平台武器的集成	/	2013: 输出功率达到 30 kW 2017: 开发 60 kW 级的激光武器交付美国陆军使用
国防高级研究计划局(DARPA)	神剑与持久项目	为载人飞机和无人机开发吊舱激光器、及 ISR 等技术	导弹	2012: 在试验中精准地击中了 7 km 远的目标
	高能液体激光区域防御系统(HELLADS)与大型飞机电激光器(ELLA)	研制 50、75、150、150 kW 的激光武器系统用于地面、海上和机载平台	火箭弹、火炮迫击炮弹有人机与无人机巡航导弹	2002: 项目开始第一、二阶段, 验证液体激光系统的可行性 2011: 第三阶段开始, 开发 34 kW 单个激光模块, 为开发和互联 150 kW 激光输出提供基础 2011: 第四阶段开始, 完成了 150 kW 激光武器演示系统(DLWS)设计、演示验证 2012: 计划开始造 DLWS, 并将其集成到战术平台上 2015~2016: 完成实验室开发, 并在靶场进行低精确度射击试验 目前: 未见开展机载射击试验, 但在研 250 kW 分布式增益液体激光器
	高效超紧凑激光集成设备(EUCLID)	研发紧凑光纤激光二极管模块, 实现在各型有人/无人作战飞机和战术地面车辆上配装激光武器	/	2017: 第一阶段: 进行系统技术设计和验证, 完成初级设计评审和关键技术评审 2018: 生产测试 3.2 kW 二极管模块

4.2 陆军高能激光武器研发情况

陆军激光项目繁杂、研究主体多、面临的作战环境也更加复杂,截至目前以开发出多种输出功率的武器系统。2017~2021年,美陆军计划每年投入1700万~3000万美元分阶段进行机动高功率固体激光器技术演示,以满足高能激光武器的适应性和功能要求^[6]。根据美陆军战术激光武器相关演示项目,目前陆基车载激光武器已经能够实现现在数秒内对付10 km范围内的如火箭弹、炮弹、无人机等战术飞行目标,相关项目如表2所示。

表2 美国陆军激光武器研发情况

Tab. 2 Laser weapon development by United States Army

项目	功率/kW	作战目标	演示验证情况
先进测试型高能武器 (ATHENA)	30	无人机	2017:在白沙导弹靶场击落了5架无人机,命中率100% 2019:在俄克拉荷马州希尔堡进行演示,成功击落多架固定翼和旋翼无人机
高能激光移动测试车 (HEMTT)	10 ↓ 50/60	火箭 大炮 巡航导弹无人机	2016:被集成到重型增强机动性战术卡车(HEMTT)上,参与MFIK2016,击毁15架无人机 2017:升级至60 kW激光器 2018:在新墨西哥州白沙导弹靶场测试50 kW级激光器
多任务高能激光器 (MMHEL)	50	无人机 旋翼机 RAM	2017:演习中使用5 kW击落了小型旋翼和固定翼无人机 2020:两套原型已进行集成 2021:春季进行射击试验 2022:完成四套系统的作战部署
机动实验型高能激光器 (MEHEL)	10	固定翼 无人机	2017:参加MFIK2017,进行重点演示验证
紧凑型激光武器系统 (CLaWS/利爪)	2 5 10	小型无人机	2018:美国海军陆战队接收了5套5 kW级用于测试 2019:在SDPE和MFIK项目演示中,制伏了大约30个目标 2020:在空军基地实测中成功保护车队免受无人机攻击
高能激光战术车辆演示器 (HEL-TVD)	100 ↓ 250/300	RAM 巡航导弹 无人机	2019:完成项目的关键设计评估 2021:提供原型机 2022:在白沙导弹靶场开展全系统测试
非直射火力保护能力-高能激光 (IFPC-HEL)	300	巡航导弹	2020:完成样机研制并集成到样机上开展演示验证试验 2022:接收300 kW级激光器用于测试 2022财年:进行样机展示 2024:向排级单位提供4套原型机进行装备测试
定向能武器-机动短程防空 (DE-MSHORAD)	50	RAM 无人机	2021:7月下旬,独立完成了首次战斗射击,9月,在希尔堡陆军基地部署 2022:底前向美军提供四辆(一个排级)原型进行野外测试

4.4 空军高能激光武器研发情况

机载中程激光武器(ABL)和先进战术激光武器系统项目(ATL)项目使得美空军在固体激光器技术、大气补偿技术、抖动控制等方面获得了相当多的

4.3 海军高能激光武器研发情况

美海军2016年起逐步制定了激光发展规划,2021年启用新的定向能系统集成实验室等举措加强激光武器研发。美军舰载激光武器主要以固体激光器为主,用于舰艇近程防御。开展的重点项目有“海军激光武器系统族”(NFLoS)和拦截反舰导弹用高能激光器(HELICAP)项目^[7],二者共同为美军未来舰载激光武器发展提供支撑。目前,美军舰载激光武器已具备初始作战能力,可实现近程(约4海里)消灭空中和水面目标的能力,未来可消灭10海里内的威胁目标,相关情况如表3所示。

技术积累。目前,美军正在此基础上进行战术机载激光武器的研发工作^[8]。当前,围绕武装直升机、战斗机的机载激光武器关键部件,如高能激光吊舱、集成系统、束控炮塔等都取得了一定的研发成果,相

关项目如表 4 所示。

4.5 太空军高能激光武器研发情况

美国 DARPA 曾经开展了“阿尔法”“大型光学演示实验”“金爪”等计划,验证将天基激光武器系统搭载在大功率卫星平台上的可能。IFX 计划是 21 世纪美军主要研发项目,预计 2013 年完成,项目计划分为前中后

三期,计划将兆瓦级化学激光器卫星发射至 1300 千米高空,拦截中段弹道导弹。目前,前中期工作已完成,现在正集中精力攻克关键技术,准备在 2015 年后研制天基演示器。美国科研局设想未来天基激光武器要想在轨运行,需要达到激光波长 2.7 μm,功率 5~10 MW,轨道高度为 800~1000 km 且能连续发光 200~500 s。

表 3 美国海军激光武器研发情况

Tab.3 Laser weapon development by U. S. Navy

项目		功率/kW	作战目标	演示验证情况
固态 AN/SEQ-3 激光武器系统 (LaWS)→“技术成熟激光武器系统演示器”(LWSD)		33 ↓ 150	小艇 无人机 反舰巡 航导弹	2014:部署于“庞塞号”,并在波斯湾实战部署,标志着战术高能激光武器系统已经走入战场 2017:转移到“波特兰号”两栖舰上开展后续测试 2020:成功摧毁了一架无人机 2021:在亚丁湾进行了武器系统的演示
海军激光 系统族 (NLFoS)	固态激光技术成熟化项目(SSL-TM)	150		2019:10月安装于“波特兰号”,12月首次启动 2021:在印太和美中央司令部责任区部署
	高能激光与一体化光学致盲与监视项目(HELIOS)	60 ↓ 150		2014:在美海军“庞塞号”两栖运输舰上测试 2021:在弗吉尼亚州的瓦勒普斯岛完成多项测试 2022:7月初部署于“普雷布尔号 DDG-88”驱逐舰上
	海军光学眩目拦截器(ODIN)	/		2019“杜威号”上安装该系统,对抗各种带有光电/红外传感器的舰艇或飞行器、巡航导弹甚至弹道导弹
	增强型高能激光器系统(RHEL)	150		第二阶段为 HELCAP,研制 500 kW 级执行反导任务
自防御用高能激光武器实证系统(SH-ELD)		300		2021:在第四代战机 F-15 或 F-16 战斗机上 长远目标:在第五代机 F-35 战斗机机舱内安装 300 kW 的激光武器,用来摧毁敌方的飞行器和地面目标
分层激光防御(LLD)武器系统		/		2022:在白沙导弹靶场的测试中击落了一架无人机,标志着美海军首次使用全电力、高能激光武器来击落模拟“飞行中的亚音速巡航导弹”的目标,尚未部署进一步计划
增强型高能激光器系统(RHEL)		150		该项目的第二阶段为 HELCAP,需要达到 500 kW 才能有效反导
拦截反舰导弹用高能激光器(HELCAP)		300	2022 财年:开展试验验证 2023 财年:实现摧毁反舰巡航导弹的能力演示 2025 后:将功率提升至 1 兆瓦级,全面具备拦截反舰巡航导弹、反舰弹道导弹的能力	

表 4 美国空军激光武器研发情况

Tab.4 Laser weapon development by U. S. Air Force

项目	功率/kW	作战目标	演示验证情况
自防护高能激光演示样机(SHiELD/盾牌)	数十千瓦	地空/空空导弹	2021:组装、交付了激光系统,并在 AC-130J 上进行测试 2022:实现在 F-15 战机上搭载 100 kW 激光武器吊舱 2030:在 F-35 以及第六代战机上搭载功率 300 kW 的远程攻击性激光武器吊舱 2024:首次测试
机载高能激光计划(AHEL)	60	飞机自卫、精确攻击车辆、船舶和地面飞机等地面目标	2017:对运载平台提出规格要求 2019:在 AC-130J 上进行集成、测试和演示 2020:完成系统的工厂验收测试 2021:在 AC-130J 上成功进行了测试,并计划在年内向美空军交付 2022:进行 60 kW 级飞行演示
紧凑型高能激光光子系统工程评估(CHELSEA)	数十千瓦	地空/空空导弹	2024 财年:设计和构建一个技术准备 5 级原型
高能液冷固体激光器地域防空系统(HELLADS)	150	地空导弹	2016:在美国白沙导弹试验场进行射击试验

5 未来展望

5.1 通过架构设计实现高功率能量输出

当前,美国发展的激光光源中,化学激光器由于各种缺陷难以部署列装进行战术应用,自由电子激光器存在电光转化效率低、后勤保障要求高等缺点,板条和薄片激光器系统热管理、大功率输出难以保持高质量光束的问题还未得到彻底解决,光纤激光器热管理简单、电光效率高、单纤光束质量高,美国在以固体光纤交给我为发展重点的基础上,期望通过运用系统观念、体系架构设计,从光谱合成的角度提高激光武器输出功率^[9]。比如,2022年9月,洛克希德·马丁公司向美国防部交付300 kW级HEL-SI激光器,就采用“光谱光束组合架构”,将几个不同波长的激光发射器输出叠加在一起,形成一个单一光束,是当前输出功率最高的实战化强激光武器。

5.2 以舰载平台为重点平台实现防空反导能力突破

相比于空基和陆基平台,舰载平台具有良好的适装性,现役的大型水面舰艇能为激光武器提供足够的电源功率、安装空间和制冷能力,具有较好的信息保障能力,可根据任务需求灵活选择激光器类型。舰载平台良好的通视性也方便了激光武器的作战使用,海上环境特点为抑制激光的热晕效应起到了天然冷却剂用,海上相对较弱的大气湍流更有利于激光束的传输。海军激光武器系统(LaWs)是美国国防部首次部署并批准用于作战的激光武器,该型激光武器较好地弥补了舰艇防空反导体系的短板,为应对低价值、非对称目标提供低成本、软硬伤兼备、可持续作战的隐蔽攻击手段。美2023财年预算将划拨3550万美元作为激光武器系统族(NFLoS)专项资金,加快舰载激光武器发展。未来,在“弗吉尼亚”级攻击核潜艇和下一代主力驱逐舰DDG(x)上装备300~600 kW级的高能激光武器系统的计划也将取得突破。预计2025年后,美海军将实现装备1 MW级的高能激光武器,具有应对20 km范围内的光电传感器、小型船只、炮弹、无人机、反舰导弹、弹道导弹袭扰的能力。

5.3 以战术激光武器为阶段重点逐步实现战略突破

如果说冷战期间“星球争霸”中美国定向能武器的发展计划是为了拖垮战略对手苏联,那么当前

美定向能武器的发展则更加强调实战,注重夯实基础、稳扎稳打、不断升级,以战术激光武器应对灵活的战术目标为基础,逐步提升能力,直至实现战略突破^[10]。根据美陆军定向能武器发展路线图,美陆军激光武器阶段发展目标首先是降低武器系统重量,提高精度和功率,然后实现拦截无人机、炮弹等集群目标,最后实现摧毁来袭的巡航导弹、武装直升机和攻击机的能力。下一步计划是发展100~250 kW与“毒刺”导弹组合的防空反导激光武器。陆军计划在2021财年装备50~100 kW功率的大功率车载激光武器,2024年前实现300 kW样机演示,力争在2030年实现集成到综合性武器的计划,并适时发展旋翼机激光武器。

美机载激光武器采取先进行运输机试验后对体积质量缩减再装配至战斗机,先进行地面武器系统试验后再考虑进行空中试验的思路进行发展,最终的发展目标是实现战斗机、直升机、无人机、AC-130、B-1B、C-130等大型平台部署激光武器,执行反恐作战、拦截导弹、进行空战、对地攻击、无人机搭载空地精确打击等作战任务。根据美空军定向能武器发展路线图,到2025年,第四代和第五代飞机将会装备100 kW级高能激光器,具备可挫败中等程度齐射地空导弹的飞机自我防卫和空对空作战能力,在中等距离范围内,可击毁来袭导弹和飞机、空对地作战任务中精确攻击中等程度的硬目标。2029年以后,在F-35及第六代飞机上配备300 kW以上级别高能激光器,实现击毁超视距的飞机,击落远距离飞行中的硬目标,击毁地面硬目标的能力。

参考文献:

- [1] Gong Xingang, Ma Han, Huang Gen. Evolution of the US laser weapon development strategy[J]. *Laser & Infrarer*, 2012, 46(12): 1319-1323. (in Chinese)
龚新刚, 马寒, 黄岑. 浅析美国激光武器发展战略的演变[J]. *激光与红外*, 2012, 46(12): 1319-1323.
- [2] Chen Shanshan. U. S. Department of defense directed energy weapons technology major R & D and acquisition organization settings[N]. *China Aviation News*, 2021-4-13: 32(A10). (in Chinese)
陈珊珊. 美国国防部定向能武器技术主要研发及采办机构设置[N]. *中国航空报*, 2021-04-13: 32(A10).

- [3] Afrl. Directed energy futures visions for the next 40 years of U. S. [R]. Department of Defense Directed Energy Technologies 2060,2021.
- [4] Chen Junyan, Yang Chuncai, Ma Han, et al. Bottleneck of high-energy solid-state laser for practical application in the US army[J]. Laser & Infrarer, 2016, 46(4): 381 - 386. (in Chinese)
陈军燕, 杨春才, 马寒, 等. 美军高能固体激光器实战化的技术瓶颈[J]. 激光与红外, 2016, 46(4): 381 - 386.
- [5] Wang Haitao. Analysis on the technologies and typical battle mode of laser weapon[J]. Aero Weaponry, 2022, 27(2): 25 - 31.
王海涛. 激光武器关键技术及典型作战模式分析[J]. 航空兵器, 2022, 27(2): 25 - 31.
- [6] Yang Jianbo, Zong Siguang, Chen Lifei, et al. Developments and trends of laser weapons[J]. Laser & Infrarer, 2021, 51(6): 695 - 704. (in Chinese)
杨剑波, 宗思光, 陈利斐, 等. 高功率激光武器进展与启[J]. 激光与红外, 2021, 51(6): 695 - 704.
- [7] Luo Lei, Tan Bitao. Research on operational application of shipborne laser weapon [J]. Laser & Infrarer, 2022, 52(7): 1058 - 1063. (in Chinese)
罗磊, 谭碧涛. 舰载激光武器作战运用研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 1058 - 1063.
- [8] Yi Weiwei, Qu Changhong, Ren Guoguang. Tacticalairborne laser weapon [J]. Laser & Infrarer, 2018, 48(2): 131 - 139. (in Chinese)
伊炜伟, 屈长虹, 任国光. 战术机载激光武器[J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 131 - 139.
- [9] Guo Jizhou, Shen Xueshi. Development trend of directed energy weapons [J]. National Defense Science & Technology, 2014, 35(3): 32 - 35. (in Chinese)
郭继周, 沈雪石. 定向能武器技术的发展动向[J]. 国防科技, 2014, 35(3): 32 - 35.
- [10] Ding Yu, Jiang Jun, et al. Overview of high energy laser weapon development in USA [J]. Electro-Optic Technology Application, 2021, 36(6): 1 - 9. (in Chinese)
丁宇, 姜峰, 等. 美国高能激光武器发展概况[J]. 光电技术应用, 2021, 36(6): 1 - 9.