

高能激光武器的战场应用与未来展望

林亦水 徐东昕 吴启 曲轶 刘国军

Battlefield application and future prospect of high energy laser weapon

LIN Yishui, XU Dongxin, WU Qi, QU Yi, LIU Guojun

引用本文:

林亦水, 徐东昕, 吴启, 等. 高能激光武器的战场应用与未来展望[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 945–957. DOI: 10.5768/JAO202546.0509001

LIN Yishui, XU Dongxin, WU Qi, et al. Battlefield application and future prospect of high energy laser weapon[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 945–957. DOI: 10.5768/JAO202546.0509001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0509001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

美国高能激光定标放大计划进展分析

Development analysis of American high energy laser scaling initiative

应用光学. 2023, 44(6): 1167–1176 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610002>

高能激光远场辐照度分布测量技术及其进展

High energy laser far-field irradiance distribution measurement technology and its developments

应用光学. 2020, 41(4): 675–680 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409004>

无人旋翼机载激光武器反蜂群作战概念研究

Research on concept of anti-swarm combat of unmanned rotorcraft airborne laser weapon

应用光学. 2024, 45(3): 495–506 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310002>

高能激光对小型无人机塑料蒙皮材料的毁伤效果研究

Research on damage effects of high-energy lasers on plastic skin materials of small UAVs

应用光学. 2025, 46(3): 515–521 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311005>

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>

机载激光武器试验评估技术研究

Research on test and evaluation technology of airborne laser weapon

应用光学. 2024, 45(3): 507–513 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-0945-13

引用格式: 林亦水, 徐东昕, 吴启, 等. 高能激光武器的战场应用与未来展望 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 945-957.

LIN Yishui, XU Dongxin, WU Qi, et al. Battlefield application and future prospect of high energy laser weapon[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 945-957.



在线阅读

高能激光武器的战场应用与未来展望

林亦水^{1,2,3}, 徐东昕^{1,2,3}, 吴 启^{1,2,3}, 曲 轶^{1,2,3}, 刘国军^{1,2,3}

(1. 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室 海南省院士团队创新中心, 海南海口 571158; 2. 海南师范大学 物理与电子工程学院, 海南海口 571158; 3. 半导体激光海南省国际联合研究中心, 海南海口 571158)

摘 要: 高能激光武器 (high energy laser weapon system, HELWS) 依托光速打击、无惯性毁伤及无限弹药等特性, 正颠覆传统动能防御模式, 跃升为大国军事博弈焦点。结合全球技术进展与实战案例, 梳理 HELWS 从技术验证到实战运用的演进脉络。重点聚焦高能激光技术发展, 系统梳理了中国“神光”聚变装置实现的兆瓦级技术突破及 LW-30/60 战术激光武器列装进展, 通过横向对比美、俄、德、以等国的技术路线, 揭示差异化发展格局。进一步探讨了 HELWS 在近程防御、反导拦截、无人机压制及城市战中的效能优势, 并展望其在太空攻防、生化消杀等领域的颠覆性潜力, 为定向能武器的体系化部署与战略博弈提供了多维理论框架。

关键词: 高能激光武器; 激光技术; 高效率; 高能量

中图分类号: TN2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0509001

Battlefield application and future prospect of high energy laser weapon

LIN Yishui^{1,2,3}, XU Dongxin^{1,2,3}, WU Qi^{1,2,3}, QU Yi^{1,2,3}, LIU Guojun^{1,2,3}

(1. Innovation Center of Hainan Academician Group, Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials, Haikou 571158, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, China; 3. Hainan International Joint Research Center for Semiconductor Lasers, Haikou 571158, China)

Abstract: High energy laser weapon system (HELWS) leverage light-speed strikes, recoil-free damage, and unlimited ammunition capabilities. These attributes are revolutionizing traditional kinetic defense systems and positioning HELWS as a pivotal element in global military competition. This study synthesized global technological advancements and practical combat cases to trace the evolution of HELWS from technical validation to battlefield application. Key advancements in high-energy laser technology were analyzed, including China's megawatt-level breakthroughs achieved through the “Shenguang” fusion device and the deployment progress of LW-30/60 tactical laser systems. A comparative analysis of the technology roadmaps of major military powers, such as the U.S., Russia, Germany and Israel, revealed divergent developmental pathways. The operational superiority of HELWS was highlighted in scenarios like short-range defense, anti-missile interception, unmanned aerial vehicle (UAV) suppression, and urban warfare. Furthermore, the disruptive potential of HELWS in space warfare and countering biochemical threats was explored. This work

收稿日期: 2025-03-18; 修回日期: 2025-05-29

基金项目: 海南省科技专项资助 (ZDYF2025GXJS007); 国家自然科学基金 (62464006, 62274048, 62174046)

第一作者: 林亦水, E-mail: 1144816700@qq.com

通信作者: 曲轶, E-mail: quyihainan@126.com

provides a multidimensional theoretical framework for guiding the system development of directed energy weapons and strategic competition in modern warfare.

Key words: high energy laser weapons; laser technology; high efficiency; high energy

引言

自 1960 年梅曼发明红宝石激光器以来^[1], 激光技术历经三次技术范式跃迁, 逐步从实验室走向战场前沿。特别是 21 世纪固态激光器的突破性进展(功率密度大于 100 kW/cm^2 , 光束定向精度达 μrad 量级), 推动高能激光武器(high energy laser weapons system, HELWS)从概念验证(1983 年美国“机载激光实验室”首次击落导弹)演进至实战部署阶段。2014 年, 美军 AN/SEQ-3 激光武器系统在波斯湾成功拦截无人机, 标志着 HELWS 正式进入作战序列^[2]。2022 年, 中国“寂静狩猎者”系统于沙特完成全球首次激光反无人机实战击杀^[3], HELWS 自此进入实战部署期。

HELWS 的军事价值源于其颠覆性的物理特性: 精准毁伤(面目标精度 $\leq 0.5 \text{ m/10 km}$)、光速拦截($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$)与高能定向输出(能量密度大于 10 kJ/cm^2)。这些特性使其在应对超音速导弹、无人机蜂群等新型威胁时展现出传统动能武器无法比拟的效费比优势。美国国防部定向能武器发展计划揭示, 战术级 HELWS ($50 \text{ kW} \sim 300 \text{ kW}$) 的单次拦截成本已降至传统防空导弹的千分之一(小于 50 美元/次), 战略级系统(大于 1 MW)的射程突破 100 km 门槛, 推动作战范式从“概率拦截”向“必然摧毁”转型^[4]。

目前, HELWS 已成为大国军事竞争的技术制高点。美国通过《防御入门: 定向能武器》(2023 财年预算 11.7 亿美元, 同比增幅 38%)加速部署 300 kW 级 IFPC-HEL 陆基系统与 150 kW 级 HELIOS 舰载系统^[5]。俄罗斯“佩列斯韦特”激光武器实现低轨卫星致盲能力^[6]。技术竞争背后是作战规则的重新定义: HELWS 的无限弹药特性瓦解传统后勤限制, 光速打击能力重构 OODA(observation, orientation, decision, action)杀伤链时序, 而多任务集成则催生新型作战概念。

在现代战争形态不断演变的当下, HELWS 凭借其独特的优势, 逐渐成为各国军事科技竞争的焦点, 其发展不仅关乎军事战略的制衡, 也对国防科技的进步产生深远影响。本文将综合国内外研究现状、作战应用需求及未来发展趋势, 对高能激光武器系统进行全面综述, 以期对相关领域的研

究与实践提供参考。

1 高能激光武器原理

HELWS 通过发射高能量密度的激光束, 聚焦于目标表面, 使其吸收激光能量后产生高温、高压等效应^[7], 从而引发目标材料的熔化、汽化、结构破坏或功能失效, 达到毁伤目标的目的。为了更好地了解 HELWS, 需要基本了解其毁伤目标的火力水平以及发射原理。

HELWS 在设计过程中, 其毁伤目标的火力水平是核心考量因素之一。通常, 设计目标是使到达目标的激光功率密度或能量密度超过目标材料的破坏阈值, 以此来确定激光武器的毁伤能力、有效射程和系统指标等关键参数。对于常用的平面聚焦束和高斯聚焦束, 其在目标上的远场功率密度 W 的计算公式如下:

$$W = \frac{P}{\pi r^2} \propto \frac{\eta P D^2}{L^2 \lambda^2 \beta^2} \quad (1)$$

式中: P 为激光器输出功率; D 为发射口径; L 为射程; λ 为激光波长; β 为光束质量因子; r 为光斑半径; η 为大气透过率, 不同大气环境下取值不同^[8]。在 HELWS 的运用过程中, 能量密度的分析至关重要, 特别是在动态作战环境中, 有效射击时间窗口的限制和射击点稳定瞄准的挑战都可能对能量密度产生影响, 进而影响武器的作战效能。

HELWS 使用激光束形式的定向能量来损坏或摧毁目标, 由如图 1 所示的能量生成、光束调控、目标跟踪三大部分构成。该系统利用集中电磁能来提供精确、高功率的波束, 消除无人机、导弹、炮弹甚至小船等敌对威胁。其基本技术涉及激光的产生与放大, 以及激光束的聚焦与能量传输等。这些技术的发展和运用, 为 HELWS 的战略应用提供了坚实的基础, 使其成为一种具有战略意义的现代化武器系统。

激光的产生与放大技术是实现武器系统威力的核心。激光武器通过外部能量激励物质产生受激辐射, 原子或分子被激发至高能级, 随后返回至低能级时释放光子, 形成具有高度方向性和单色性的光束辐射能量, 以影响目标^[9]。在这一过程中, 高能激光器和光束定向器的设计至关重要。

从激光输出脉冲能量上看, HELWS 反导拦截时需要单脉冲能量不小于 100 kJ, 太空攻防则需 MJ 级能量输出。而峰值功率方面, 大部分应用的 HELWS 均处在 kW 级, 已经能对目标产生一定摧毁效果, 未来会朝应用方向更多的 MW 级发展。

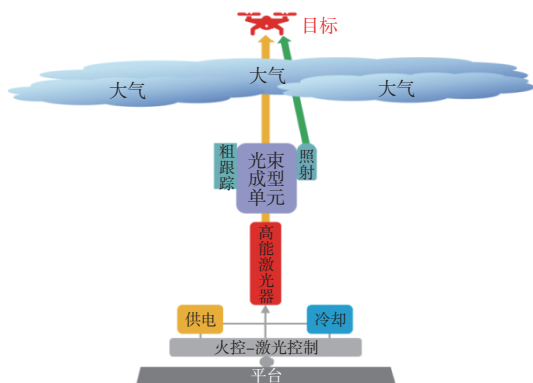


图1 高能激光武器系统工作模式

Fig. 1 High energy laser weapon system working mode

激光束的聚焦与能量传输是 HELWS 的另一核心技术。HELWS 具有能量集中、传输速度快、作用距离远和命中精度高的特点^[10]。激光束的聚焦通常通过光学系统, 如透镜或反射镜实现, 用以提高激光束的功率密度和方向性。在能量传输方面, 需要解决大气折射、湍流和热晕效应等大气传播问题。自适应光学系统被开发用于校正波前畸变, 提高激光传输效率和质量。此外, 激光束合成技术, 如光谱合束和几何合束, 也可用于增强 HELWS 的作战效能。

2 高能激光武器系统

2.1 国内研究进展

中国 HELWS 的发展遵循“基础研究→工程验证→实战部署”的技术路径, 其核心突破体现在战略级聚变驱动器与战术级定向能武器两大领域。

1) 战略级激光技术: 神光系列聚变装置

自 1964 年启动激光技术研究以来, 中国通过“863 计划”系统性布局高能激光领域。1990 年代建成的“神光 I”与“神光 II”装置(输出能量 10 kJ~30 kJ)奠定了激光惯性约束聚变研究的基础。2015 年竣工的“神光 III”主机装置实现了 3 倍频激光输出能量 180 kJ、峰值功率 60 TW, 其综合性能仅次于美国国家点火装置, 标志着中国在超高功率激光驱动器领域跻身世界前列, 装置总体布置

如图 2 所示。该装置通过自适应光学技术将光束质量提升至 $\beta < 1.5$ (ISO 11146 标准), 为 MW 级战略激光武器的光束合成提供了关键技术储备。

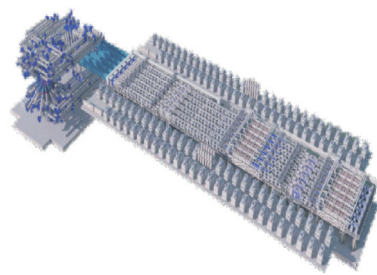


图2 “神光-III”主机装置总体布置图^[11]

Fig. 2 General layout diagram of "SG III" laser facility

2) 战术级武器系统: 陆海空平台部署

图 3 所示为 LW-30 车载激光防空系统^[12], 于 2021 年在珠海航展首次公开。LW-30 采用 30 kW 光纤激光器, 有效作用距离为 25 km (LaWS 系统为 10 km), 可拦截无人机、火箭弹及低空巡航导弹。其创新性在于集成自主储能单元, 具有机动性强、杀伤精度高、附带损伤小的特点。



图3 LW-30 车载激光武器系统^[12]

Fig. 3 LW-30 vehicle mounted laser weapon system

图 4 所示为 2024 年珠海航展上展出的 LW-60 车载防御系统^[13]。升级型号 LW-60 的功率达到 60 kW, 硬杀伤距离不小于 6 km, 软杀伤(光电干扰)范围不小于 10 km。该系统采用双波段激光(1.06 μm /3.8 μm), 通过大气传输模型动态切换波长, 雨雾天气效能衰减率从 70% (LW-30) 降至 35%。从 LW-30 到 LW-60, 两代系统的核心差异体现在波长适应性、散热效率与多任务集成能力等方面, 反映了中国在战术激光武器领域从“单一功能”向“全环境作战”的技术跨越。

OW5-A50A 机动平台是 2024 年于珠海航展亮相的模块化系统, 功率为 50 kW^[14], 配备自主指挥控制单元与分布式孔径雷达(DAR), 拥有 4 个通道, 全天候探测能力大幅提升。

图4 LW-60 车载激光武器系统^[13]

Fig. 4 LW-60 vehicle mounted laser weapon system

国内 HELWS 的发展呈现“战略-战术协同演进”的特征^[15]。战略层面,“神光”系列装置通过 MJ 级输出与光束质量优化($\beta < 1.5$),为天基反导奠定能量基础;战术层面,LW-30/60 系统以双波段动态切换、自主储能及多光谱感知技术,实现复杂气象条件下的全环境作战能力;而 OW5-A50A 模块化平台通过 DAR 雷达与多通道协同,精准适配城市战快速响应需求。目前,技术突破深度融入作战流程,自适应光学提升拦截精度,智能算法优化蜂群目标打击效能。未来则需强化技术-战术闭环,加速 MW 级激光器研发以支撑战略威慑,同时依托智能化指挥控制与多任务集成架构,推动车载/舰载平台向“攻防一体、软硬协同”方向升级,构建全域联合作战体系。

2.2 国外研究现状

长久以来,美国在 HELWS 领域一直处于领先地位,且进展飞速,已具有 100 kW 级成熟技术,且研发出 300 kW 系统。美国的中期目标是 500 kW~600 kW 系统,远期则瞄准 MW 级系统^[16]。俄罗斯、德国等其他国家在 HELWS 领域也不落后。随着技术进步,对 HELWS 的作战应用需求分析变得尤为重要。HELWS 在防空反导、信息对抗、精确打击等方面具有革命性的应用潜力,目前正处于由技术突破向作战应用蜕变的转折期。通过分析研究国外激光武器的实战化应用趋势,有助于中国把握激光武器技术发展的方向,加快技术验证与应用研究,缩短技术武器化的生成周期^[17]。

1) 海上作战应用

美国海军作为全球高能激光武器研发的引领者,其技术路径已从实验室验证转为实战化部署,形成以功率跃升与多任务集成为核心的发展框架。目前,美国海军的高能激光项目主要有:“固体激光技术成熟项目”(SSL-TM)、“高能激光与一体化光学致盲与监视系统”(HELIOS)和“高能激

光武器对抗反舰巡航导弹”(HELCAP)等。

2011 年,诺斯罗普·格鲁曼公司在海军研究办公室的支持下,通过“海上激光演示”(MLD)项目开发的固态高能激光原型机,在自卫测试船上成功测试,展示了其消灭小型船只威胁的能力^[17]。MLD 结合了“战术高能激光”和“联合高功率固态激光”项目的技术,使用 15 kW 钕钇铝石榴石激光器^[18],在测试中成功跟踪并点燃多个无人船目标,是 HELWS 设备首次实际安装,并由海军舰艇提供动力支持。此后,2014 年,“激光武器系统”(LaWS)的原型部署于“庞赛”号舰上,30 kW 级的 LaWS 成功摧毁“扫描鹰”无人机和海上移动目标,展示了固态激光武器的实际作战价值,最终在 2014 年 12 月被宣布投入使用。安装在“庞赛”号上的 LaWS 原型机如图 5 所示,标志着固态激光武器已经成熟到海军可以将其真正投入军事使用的程度。

图5 “庞赛”号上的 LaWS 原型机^[19]

Fig. 5 LaWS prototype on USS Ponce

作为固态激光技术成熟化的标杆,SSL-TM 项目自 2015 年启动以来,逐步突破功率瓶颈。2020 年,搭载于“波特兰”号两栖舰(LPD-27)上的 150 kW 级系统成功拦截无人机,验证了其在复杂海洋环境下的作战可靠性。2023 年,其衍生技术“光学炫目拦截器”部署于“阿利·伯克”级驱逐舰,通过 30 kW 级激光干扰敌方光电传感器,显著提升了舰队的软杀伤能力^[20]。根据 2025 年预算规划,SSL-TM 项目计划将激光功率提升至 600 kW,并集成至 DDG(X) 驱逐舰及“福特”级航母上,以应对高超音速武器威胁。

洛克希德·马丁公司研发的 HELIOS 系统是舰载激光武器多任务集成方向的代表系统。2021 年,60 kW 级 HELIOS 系统完成了“宙斯盾”系统的

兼容性测试, 成功拦截亚音速巡航导弹; 2022 年 3 月, 系统完成陆基测试并集成至“普雷布尔”号驱逐舰 (DDG 88)^[21]。2024 年, HELIOS 系统功率升级至 150 kW, 射程扩展至 10 km, 并计划适配航母平台。其模块化的设计支持动态功率调整 (30 kW~150 kW), 兼具硬杀伤 (摧毁目标)、软杀伤 (致盲传感器) 与情报监视侦察 (ISR) 功能, 形成“攻-防-侦”一体化能力。

HELIOS 系统采用固态激光技术和模块化设计, 可实现动态功率调整, 但其电力需求与舰载平台的兼容性是制约其发展的关键问题^[22]。此外, 自适应光学补偿技术虽能校正海洋盐雾引发的光束畸变, 但在大雾或雨雪天气下效能显著下降, 需依赖“窗口效应”选择特定波长以降低衰减率。未来, DDG(X) 驱逐舰将预留更大的电力冗余, 支持 600 kW 级激光武器, 拦截目标覆盖高超音速武器,

体现了技术迭代对舰船设计的反向驱动。

HELCAP 是美国海军 2019 年启动的高能激光武器技术研发项目, 旨在开发更强大的激光器, 实现“硬杀伤”反舰巡航导弹, 亦被称为“增强型高能激光”项目的第二阶段, 2023 年末已完成最终集成及演示验证。HELCAP 系统通过高能激光技术拦截多种威胁, 包括反舰巡航导弹、无人机和小型水面目标。该系统在 2022 年完成陆基测试后, 逐步集成至多型战舰并进行海上试验, 将功率提升至 300 kW 以上^[20]。2024 年, HELCAP 进入海军预算优先项目, 计划 2025 年部署至“福特”级航母 (CVN-78) 及 DDG(X) 驱逐舰, 目标功率提升至 600 kW, 以应对高超音速武器威胁, 并实现多目标分层防御, 更有效地满足海上作战应用需求。

美国海军海上作战高能激光项目对比如表 1 所示。

表 1 美国海军海上作战高能激光项目对比

Table 1 Comparison of high energy laser projects for naval operations of the US Navy

系统	SSL-TM ^[20]	HELIOS ^[21]	HELCAP ^[20]
时间线	2015年~2025年	2018年~2025年	2020年~2025年
功率/kW	150→600(计划)	60→150	300→600(计划)
射程(硬杀伤)/km	10	10	20
部署平台	LPD-27、DDG(X)	DDG(X)	CVN-78、DDG(X)(计划)
海上作战功能	反无人机、软杀伤	攻、防、侦多任务集成	反导、高超音速拦截

2) 陆地作战应用

2012 年 10 月, 美国陆军将高能激光技术演示 (HEL TD) 项目更名为 HEL MD, 该项目在一辆 Oshkosh 重型卡车上安装了 10 kW 固体激光器^[23]。至 2014 年, 该系统已成功拦截 150 多个目标, 包括迫击炮弹和无人机, 能够在多种环境下持续捕获、跟踪和打击各种目标^[24]。2017 年, HEL MD 成功进行了 50 kW 级激光器的测试, 进一步验证了其在更高功率下的作战能力。随着技术的成熟, 2018 年 7 月, 美国陆军在 HEL MD 的基础上启动了 HEL-TVD 项目, 目标是研制车载式 100 kW 激光武器系统, 并将其集成到中型战术卡车 (FMTV) 平台^[25]。最终, 洛克希德·马丁公司于 2022 年完成交付, 实际测试功率为 50 kW 级。随后, 美国陆军宣布向 IFPC-HEL 项目过渡, 目标功率提升至 300 kW 级。2022 年 9 月, 洛克希德·马丁公司通过 HELSI 计划交付了如图 6 所示的 300 kW 级 HEL TVD 样机, 标志着功率技术突破^[26]。2024 年, 该样机完成原型测试并部署至 M983A4 式 10×10 军用

高机动卡车, 采用的光束导向器直径为 50 cm, 可发射波长为 1 μm 连续波的高能激光束, 最大射程为 20 km, 在目标上可形成一个直径为 12 cm 的光斑, 烧穿 1 cm 厚铝板的实际耗时约为 2.5 s 左右^[27]。如今, 美国陆军计划在 2030 年前实现 MW 级激光武器研发, 拦截范围可覆盖弹道导弹助推段。



图 6 洛克希德·马丁公司设计的 300 kW 级 HEL TVD 样机^[26]
Fig. 6 A 300 kW HEL TVD prototype designed by Lockheed Martin

2019 年 8 月, 美国陆军启动 DE M-SHORAD 项目, 由雷神公司开发的 50 kW 级战术防空系统

集成在斯特瑞克装甲车上,通过集成多光谱仪和光电/红外传感器,取消传统火力武器以节省空间,其反无人机最大射程为 4.8 km,2023 年在亚利桑那州尤马靶场实弹测试中成功击落多架无人机,为地面部队提供可靠的近程防空保障^[28]。

俄罗斯在陆地作战应用方面的 HELWS 也不落下风。2019 年部署的移动式激光武器“佩列斯韦特”车载激光武器系统如图 7 所示,为地面机动导弹系统提供保护。该系统是全球首款实战部署的激光武器,其车载机动设计支持快速转移和隐蔽作战,采用二氧化碳气体激光技术,有效射程 5 km(反无人机)至 1 500 km(卫星致盲),其核能供电单元支持 72 h 连续作战。2022 年乌克兰冲突中,改进型激光武器“Zadira”实现了 5 s 内摧毁 5 架次无人机蜂群^[17]。

德国莱茵金属公司和欧洲导弹集团公司是德国激光武器研制的核心机构。2018 年 12 月,德国莱茵金属公司研发了功率可达 100 kW 的新型激光站,在瑞士奥森博登试验基地进行运行测试,次年 12 月,又成功测试了集成在战车上的高能激光武器,展示了其打击无人机和迫击炮等作战能力

运用^[10]。2023 年,依靠前期研发经验,德国莱茵金属公司开发出 50 kW 级系统 Skyranger 30 HEL,该系统采用光束叠加技术,融合 30 kW 和 20 kW 激光束实现 50 kW 输出,光子晶体光纤技术使电光效率达到 38%,在 2023 年的测试中烧穿 40 mm 均质钢甲(照射时间 8 s)^[17],其机载有源相控阵侦察雷达支持 360°威胁感知,探测范围约为 20 km,能在不暴露系统存在的情况下进行天空监视^[29],专为城市和野战环境设计。



图 7 俄罗斯“佩列斯韦特”车载激光武器系统^[6]

Fig. 7 Russian peresvet vehicle-mounted laser weapon system

国外陆地作战高能激光项目对比如表 2 所示。

表 2 国外陆地作战高能激光项目对比

Table 2 Comparison of high energy laser projects in foreign land operations

系统	IFPC-HEL ^[26-27] (美国)	DE M-SHORAD ^[28] (美国)	Skyranger 30 HEL ^[17] (德国)	佩列斯韦特 ^[17] (俄罗斯)
时间线	2022年至今	2019年至今	2023年至今	2018年~2022年
功率/kW	300→600(计划)	50	50→60(计划)	未公布
射程/km	10	4.8(反无)	2	5(反无)→1 500(卫星致盲)
部署平台	M983A4式10×10 军用高机动卡车	斯特瑞克装甲车	Boxer 8×8轮式装甲车	多个战略导弹阵地
陆地作战需求	反导、反无、高超音速拦截	反无、拦截密集威胁、 保护前沿阵地与机动部队	城市密集区域 防护、反无	干扰敌方卫星侦察、 反无、保护战略设施

3) 空中作战应用

近年来,防空反导局势日趋严峻,传统的动能拦截手段难以有效应对,定向能武器凭借光速交战等优势在反导防御中崭露头角^[20]。

前期,美军激光反导计划主要依托由“机载激光器”(ABL)和“先进战术激光器”(ATL)为代表的机载激光武器项目^[17]。虽然因技术原因两个项目终止,但为后续 HELWS 发展奠定了技术基础。2016 年,美国空军研究实验室启动 SHIELD 项目,继承 ATL 的战术打击理念,开发机载自卫激光武器,保护战斗机免受红外制导导弹威胁,于 2019 年在白沙导弹靶场完成了试射任务,击落了飞行中的多枚导弹^[30]。近年来,美国加大空中作战 HELWS 的

研究力度,主导光纤/固态激光小型化,聚焦战术平台。AHEL 作为美国空军首个实战化机载激光武器,继承 ABL 的技术积累,实现空对地精确打击,2019 年测试功率为 60 kW,未来将升级至 150 kW,并部署于 AC-130J“空中炮艇”,进行空对地打击^[31]。基于 AHEL 技术改进的 B-21“突袭者”战略轰炸机激光自卫系统首次实现了战术飞机平台的激光武器集成^[32]。继承冷战时期“天基激光武器”项目,“战略空基激光武器”(SBL)应用于弹道导弹助推段拦截及天基目标硬摧毁,未来计划与卫星星座协同构建“空天一体化”防御体系^[33]。美军防空反导的发展不仅是技术上的创新,更是战术思维的飞跃,将防空反导战术从传统的地面与空中平台,

拓展至太空轨道, 为美国的国防战略提供了更为广阔的发展空间。

为了避开欧美光纤激光的专利壁垒, 俄罗斯采用气体动力激光技术路线。2025 年俄罗斯启动空基“佩列斯韦特-A”开发, 改进陆基“佩列斯韦特”激光武器技术, 计划将“佩列斯韦特-A”集成于伊尔-76 战略运输机, 其射程约 250 km~300 km, 可致盲低轨侦察卫星或拦截高超音速武器^[34]。表明俄罗斯在防空战术上不仅注重国土防御, 还着眼于对太空侦察与高超音速武器等前沿威胁的应对, 通过发展具有远距离作战能力的激光武器系统, 增强其在现代战争中的战略威慑力与战术灵活性。

相比于美国、俄罗斯对于 HELWS 在空中作战应用上的迅速发展, 以色列作为第三个开展机载激光武器全系统飞行试验的国家^[35], 发展同样不容小觑。2014 年, 以色列拉斐尔公司首次推出“铁束”(Iron Beam)概念。2020 年, 拉斐尔公司完成“铁穹”原型系统开发, 采用光纤激光技术, 初始功

率为 30 kW~50 kW, 有效射程约 7 km, 主要用于拦截低速无人机和迫击炮弹。2022 年 4 月, 以色列宣布完成升级版“铁束”测试, 其功率提升至 100 kW, 射程维持 7 km, 单次拦截成本从早期的 2 美元(测试阶段)调整为 3.5 美元(实际部署成本)。2023 年 10 月, 以色列在巴以冲突中首次实战部署“铁束”, 拦截哈马斯发射的火箭弹和无人机, 验证了其实战性能。2024 年 10 月, 以色列国防部签署了价值 5.35 亿美元的订单, 计划将“铁束”功率提升至 150 kW, 目标射程扩展至 10 km, 以应对巡航导弹和高速无人机^[36]。这一技术发展路线清晰地体现了以色列基于自身战术需求, 不断推动激光武器技术升级的思路: 从应对低速小型无人机与迫击炮弹, 逐步扩展至更高价值、更具威胁的目标, 其防空战术体系也从单纯的防御转向了多层次、全方位的主动拦截与威慑^[37]。

美、俄、以各国空中作战高能激光项目对比如表 3 所示。

表 3 国外空中作战高能激光项目对比

Table 3 Comparison of high energy laser projects in foreign air operations

系统	AHEL ^[31] (美国)	佩列斯韦特-A ^[34] (俄罗斯)	铁束 ^[36] (以色列)
时间线	2019年至今	2025年	2014年~2024年
功率/kW	60→150(计划)	未公布	30→150(计划)
射程/km	未公布	250~300(计划)	7
部署平台	AC-130J“空中炮艇”	伊尔-76战略运输机(计划)	“赫尔墨斯”900无人机(计划)
空中作战需求	空对地打击、低空防御	反卫星、区域拒止	巡航导弹、无人机防御

通过横向对比可见, 各国高能激光武器的发展路径与其战略需求紧密关联。美国依托技术成熟度与多任务集成能力, 持续扩大功率优势; 俄罗斯聚焦战略威慑, 通过卫星致盲技术拓展作战域; 中

国则通过“基础研究→工程验证→实战部署”的渐进模式, 实现战略与战术能力均衡发展。表 4 进一步量化对比了三国的关键技术指标, 为差异化技术路线分析提供实证支撑。

表 4 中、美、俄高能激光武器系统技术指标对比

Table 4 Comparison of HELWS technical indicators among China, the US, and Russia

国家	系统名称	功率	射程	多任务能力
中国	神光-III(战略级)	60 TW(峰值)	实验装置(非实战射程)	惯性约束聚变研究, 为天基反导提供能量储备
	LW-30(车载)	30 kW	25 km(硬杀伤)	反无人机、火箭弹、低空巡航导弹, 集成自主储能单元
	LW-60(车载)	60 kW	6 km(硬杀伤)/10 km(软杀伤)	双波段激光(1.06 μm/3.8 μm), 雨雾适应性提升
美国	HELIOS(舰载)	60 kW→150 kW(模块化)	10 km(硬杀伤)	硬杀伤、软杀伤、ISR一体化
	IFPC-HEL(陆基)	300 kW→600 kW(计划)	10 km(硬杀伤)	反导、高超音速拦截, 适配M983A4高机动卡车
	AHEL(空基)	60 kW→150 kW(计划)	空对地打击(未公布射程)	空对地精确打击、低空防御, 集成于AC-130J平台
俄罗斯	佩列斯韦特(陆基)	未公布(气体激光技术)	5 km(反无)→1 500 km(卫星)	卫星致盲、反无人机, 核能供电支持72 h作战
	佩列斯韦特-A(空基)	未公布	250 km-300 km(计划)	低轨卫星干扰、高超音速武器拦截, 计划集成于伊尔-76运输机

3 高能激光武器作战应用需求分析

3.1 海上作战应用需求分析

1) 反导革命: 破解饱和攻击的新质战力

现代海战环境下,反舰导弹与无人机蜂群的饱和打击已成为水面舰艇的核心威胁^[38]。HELWS 通过光速拦截与无限弹药特性,颠覆传统近防系统的“弹药耗尽”困境,为舰队构建多层主动防御体系。以美国海军 HELIOS 系统为例,其 150 kW 级激光器可在 10 km 内拦截 2.5 马赫级超音速目标,单次成本较“海麻雀”导弹降低三个数量级(小于 100 美元),大幅提升航母战斗群在拒止环境中的持续作战能力。该系统集成自适应光学补偿技术,实时校正海洋盐雾与湿度引发的光束畸变,显著优化复杂气象条件下的拦截效能。此类技术突破不仅重构了海上防御经济性逻辑,更通过降低舰艇战损风险强化了远洋力量投射的战略可信度。

2) 非对称防御: 低成本对抗无人化威胁

中小型无人机与自杀式无人艇的扩散,迫使海军发展高效费比的近程拦截手段。HELWS 凭借能量投射的精准可控性,可对低空/超低空目标实施分层筛选打击^[39]: 低功率模式(<30 kW)致盲光电导引头,高功率模式(>50 kW)物理摧毁目标结构。美国海军“波特兰”号两栖舰的实战测试显示,其搭载的 150 kW 激光系统在波斯湾成功拦截数十架伊朗无人机,单次成本仅 1 美元,且无传统火炮的弹药补给限制。此类能力尤其适用于海峡封锁与海上交通线护航场景,通过降低防御成本打破“消耗战”困境,重塑海上非对称对抗规则。

3) 全域控制: 从海上拒止到天基制衡

HELWS 的海上部署正从战术防御向战略威慑延伸。MW 级舰载系统可借助海面稳定平台与低湿度环境优势,扩展至反卫星与反高超音速武器领域。美国 HELCAP 项目规划 600 kW 级激光器,射程覆盖 20 km,可拦截高超音速滑翔体,其相控阵光束合成技术大幅提升能量密度与跟踪精度。同时,平流层部署的舰载激光模块可对低轨侦察卫星(轨道高度 300 km~500 km)实施软杀伤,瘫痪敌方天基 ISR 网络。此类能力将海上作战域与太空域深度耦合,推动制海权向“制天-制海”复合控制范式演进。尽管舰载电力供应(瞬时需求 ≥ 5 MW)与盐雾腐蚀仍是技术瓶颈,但其对海上战略平衡的颠覆性影响已引发主要海军强国的技术竞速。

3.2 空中作战应用需求分析

1) 生存性跃升: 颠覆性应对超音速威胁

第四代防空导弹与高超音速武器的扩散迫使空基平台寻求革命性的防护手段^[40]。HELWS 的光速拦截与无限弹药特性,突破传统动能防御的物理限制^[41],为空基平台构建可持续的主动防护体系。以美国 AHSL 系统为例,其 60 kW 级激光器可在 5 km 内瞬时毁伤 4 马赫级目标,单次成本较传统拦截弹降低两个数量级,直接提升高价值战机在拒止环境中的任务存活率。此类技术不仅优化了防御效费比,更通过降低平台损失风险重构空中力量投送的战略威慑逻辑。

2) 战术革新: 隐蔽与灵活的双重突破

HELWS 凭借无弹道轨迹与低可探测特性,为空中打击赋予“静默毁伤”能力。通过动态调节输出功率(10 kW~50 kW),系统可无缝切换传感器致盲与目标摧毁模式,适配复杂战场环境下的多任务需求。美军 AC-130J“空中炮艇”的实战测试表明,激光打击无传统火力的声光特征^[42],显著降低战场暴露概率。这种能力革新不仅强化了反恐与城市作战的战术灵活性,更催生了“非对称毁伤”新范式,推动制空权争夺向技术代差主导转型。

3) 战略制衡: 天基攻防与区域拒止

空基高能激光武器的战略价值体现为对弹道导弹与天基资产的攻防制衡能力。平流层低衰减环境^[43]使 MW 级系统可拦截 300 km 外的助推段导弹,成本较陆基中段反导降低 90%,同时,其定向能投射可致盲或摧毁低轨卫星,瓦解敌方天基 ISR 网络。美国 SBL 项目依托 C-5M 平台构建模块化 MW 级系统,旨在形成全球快速响应反导链。尽管大气湍流补偿与高能散热仍是瓶颈^[44],但其对战略稳定的颠覆性影响已驱动大国竞争进入定向能军备新纪元。

3.3 陆地作战应用需求分析

1) 反无人机革命: 颠覆低空防御经济性逻辑

无人机蜂群与巡飞弹的扩散,彻底改变了陆地战场的威胁景观,传统防空系统因弹药成本与拦截效率失衡而难以应对^[45]。HELWS 通过“无限弹药”与瞬时拦截特性,重塑低空防御的效费比范式。以色列“铁束”(Iron Beam)系统以 100 kW 级功率实现 7 km 内火箭弹与无人机的精准拦截,单次成本仅 3.5 美元,较“铁穹”导弹(5 万美元/发)降低四个数量级^[46],在加沙冲突中验证了其对于低成本饱和攻击的压制能力。此类系统通过 AI 驱动的目

标识别算法,可同时追踪数百个目标并动态分配打击优先级,为陆军旅级单位构建区域性防空穹顶。其核心价值不仅在于战术防御效能,更在于打破“弹药消耗”对持续作战能力的桎梏,重塑陆地战场资源分配逻辑。

2) 野战机动防御: 复杂环境下的生存性重构

现代陆战强调快速部署与机动伴随防护^[47],传统固定式防空系统难以适应高动态战场。HELWS的模块化设计使其可集成于轻型战术车辆,例如美国“守护者”系统搭载于“斯特瑞克”装甲车,50 kW级激光器可在5 s内击落3 km外迫击炮弹,单次拦截成本30美元,显著提升机动部队在野战环境中的生存能力。此类系统需突破沙尘、雨雪导致的光束衰减难题,当前解决方案包括中红外波段(3.8 μm)激光器与自适应波长调节技术,降低恶劣天气下的能量损耗^[48]。

3) 城市战革新: 精准毁伤与附带损伤控制

城市化战场的复杂性要求防御系统兼具高精度打击能力与平民伤亡最小化特性。HELWS通过能量聚焦与作用时间可控,实现“外科手术式”目标清除。例如,美军IFPC-HEL系统(300 kW)可在10 km内烧毁建筑物内的通信节点或武器藏匿点,避免传统火炮的爆破波及效应,同时,其低功率模式(<20 kW)可瘫痪敌方监控摄像头与单兵夜视设备,为城市攻坚提供非对称信息优势。此类能力正在重构城市作战规则,激光武器的无声、无痕特性使防御方难以快速定位攻击源^[49],而精确能量投送可降低关键基础设施的附带损伤,契合国际武装冲突法对比例性原则的要求。未来,激光武器将与微波武器、电磁脉冲装置协同,形成“软-硬杀伤”复合的城市作战体系,推动陆地作战向技术密集型范式转型。

3.4 未来作战需求展望

1) 天基攻防与轨道清理: 重构太空战略平衡

HELWS的天基化部署将彻底改变太空安全格局。MW级天基激光系统可对低轨卫星实施软杀伤(致盲光学传感器)或硬摧毁(烧毁太阳能板),瘫痪敌方通信、导航与侦察网络^[50]。美国“星盾”计划已开展相关测试,2025年,实验性激光卫星成功干扰俄“老人星-V”遥感卫星,验证轨道对抗的可行性。同时,激光技术为太空碎片清理提供了新思路,特定激光器可清理厘米级太空碎片^[51],降低碰撞风险。欧洲航天局的“清洁空间”项目正

在研发50 kW级激光阵列,目标是于2030年前清除近地轨道关键区域的碎片。该能力将推动太空规则从“被动避撞”向“主动管控”转型,但可能加剧大国间的轨道资源争夺。

2) 生化威胁反制: 非接触式消杀与防护

高能激光在生化战剂中和领域展现出了独特潜力。紫外波段激光(如266 nm)可通过光解作用分解各类神经毒剂及其他生化物质^[52]。例如,美国国防部“战术生化消杀系统”项目用于战场上的生物威胁检测,提供早期预警,减少暴露和伤亡。战场应用中,车载激光系统可对污染区域实施快速消毒,避免人员接触风险;城市反恐场景下,无人机搭载的微型激光模块可精准摧毁生化武器储存设施,最小化附带损伤。此类技术将生化防御从被动防护升级为主动拦截,但需解决气溶胶扩散监测与能量剂量控制难题。

4 结束语

文章通过技术演进、作战适配性与战略影响三维视角,全面评估了HELWS的战场应用潜力与未来挑战,以期对相关研究和实践提供有效参考,为当今国际局势和未来态势的发展趋势提供有益启示。

随着激光技术的不断突破,激光器性能的提升直接推动了激光武器水平的整体提高,从kW级到MW级,乃至未来GW、PW级激光武器的应用,将为军事战略制衡提供新的选项,为作战人员带来前所未有的新能力。展望未来,HELWS正逐渐成为现代战争的关键技术,尤其在近程防御、反导拦截、无人机压制及城市战中展现出巨大潜力。这些武器系统能够快速、精确地拦截低空目标,同时对敌方舰艇、装甲车辆和固定目标实施有效打击。随着技术进步,HELWS在未来战场的应用将更加广泛,包括太空作战和网络化作战,显著提升国防和军事安全能力。

在全球化背景下,激光武器技术的国际合作变得尤为关键。各国应积极响应,通过共享经验、联合研发,共同应对技术挑战,以促进该领域的全球进步与繁荣。国际合作机制和共享平台的建立,将加速激光技术的创新,推动其持续良性发展,为人类社会、全球安全乃至宇宙探索做出积极贡献。先进的HELWS,将以其隐形而强大的保护能力,成为维护人类幸福和世界安全的“隐形光盾”。

参考文献:

- [1] 陈敬全. 梅曼和世界上第一台激光器[J]. 科学技术与辩证法, 1992(2): 14-17.
CHEN Jingquan. T. H. Maiman and the first laser in the world[J]. Science Technology and Dialectics, 1992(2): 14-17.
- [2] 魏昊波, 胡黎明, 宋磊. 国外高能激光系统试验与评价技术发展及启示[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(12): 1-4.
WEI Haobo, HU Liming, SONG Lei. Development and enlightenment of foreign high power laser system test and evaluation technology[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(12): 1-4.
- [3] 刘青, 曾德贤, 周尚辉, 等. 弹炮结合武器系统现状与发展[J]. 中国设备工程, 2024(1): 239-241.
LIU Qing, ZENG Dexian, ZHOU Shanghui, et al. Current status and development of gun-missile combined weapon systems[J]. China Plant Engineering, 2024(1): 239-241.
- [4] 陈军燕, 杨春才, 张夏彬. 美军高能激光武器发展前景综述[J]. 飞航导弹, 2016(9): 16-20.
CHEN Junyan, YANG Chuncai, ZHANG Xiabin. An overview of the development prospects for U. S. military high-energy laser weapons[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(9): 16-20.
- [5] 伍尚慧, 李晓东. 2021 年新概念武器装备技术发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(4): 362-367.
WU Shanghui, LI Xiaodong. Overview of the field of new concept weapons in 2021[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(4): 362-367.
- [6] 丁宇, 杨军, 郑荣山, 等. 俄罗斯“佩列斯韦特”激光武器系统深度解析[J]. 光电技术应用, 2020, 35(5): 6-12.
DING Yu, YANG Jun, ZHENG Rongshan, et al. Analysis of peresvet laser weapon system in Russian in-depth[J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(5): 6-12.
- [7] 徐翔, 任建伟, 何超, 等. 高能激光热防护材料应用进展[J]. 应用力学学报, 2025, 42(4): 752-763.
XU Xiang, REN Jianwei, HE Chao, et al. Progress in the application of high energy laser thermal protection materials[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2025, 42(4): 752-763.
- [8] 李怡勇, 王建华, 李智. 高能激光武器发展态势[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 1-6.
LI Yiyong, WANG Jianhua, LI Zhi. Development situation of high-energy laser weapons[J]. Journal of Equipment Engineering, 2017, 38(6): 1-6.
- [9] 张恒军, 曾照凯, 孟学平, 等. 激光非致命武器应用及发展浅析[J]. 中国设备工程, 2024(7): 259-261.
ZHANG Hengjun, ZENG Zhaokai, MENG Xueping, et al. An brief analysis of the application and development of laser non-lethal weapons[J]. China Plant Engineering, 2024(7): 259-261.
- [10] 杨剑波, 宗思光, 陈利斐. 高功率激光武器进展与启示[J]. 激光与红外, 2021, 51(6): 695-704.
YANG Jianbo, ZONG Siguang, CHEN Lifei. Developments and trends of laser weapons[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6): 695-704.
- [11] 郑万国, 魏晓峰, 朱启华, 等. 神光-III 主机装置成功实现 60 TW/180 kJ 三倍频激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1): 019901.
ZHENG Wanguo, WEI Xiaofeng, ZHU Qihua, et al. SG-III laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser (351 nm) output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1): 019901.
- [12] 刘文学, 王涛, 李赵健伟, 等. 反无人机装备发展现状及趋势[C]//2022 年无人系统高峰论坛. 西安: 北京海鹰科技情报研究所, 2022: 37-44.
LIU Wenxue, WANG Tao, LI Zhaojianwei, et al. Development status and trend of anti-UAV equipment[C]//2022 Unmanned Systems Summit Forum. Xian, China: Beijing Sea Eagle Science and Technology Information Institute, 2022: 37-44.
- [13] 王庚. 2024 珠海航展外贸型地面反无人机体系[J]. 坦克装甲车辆, 2024(23): 28-34. ,
WANG Geng. Export-oriented ground anti-UAV system at the 2024 Zhuhai airshow[J]. Tank & Armoured Vehicle, 2024(23): 28-34.
- [14] 袁道任, 谢全威, 王端. 激光武器融入末端防空作战运用研究[EB/OL]. (2025-03-12)[2025-05-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3019.TJ.20250312.1241.017>.
YUAN Daoren, XIE Quanwei, WANG Duan. Study on the application of laser weapons in terminal air defense[EB/OL]. (2025-03-12)[2025-05-29]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3019.TJ.20250312.1241.017>.
- [15] 张佳雨, 刘蕊心, 傅子轩, 等. 激光武器反无人机系统研究现状与发展趋势[J]. 工程与试验, 2025, 65(1): 20-24.
ZHANG Jiayu, LIU Ruixin, FU Zixuan, et al. Research

- status and development trend of laser weapon anti-UAV system[J]. *Engineering & Test*, 2025, 65(1): 20-24.
- [16] 王毅, 王海兰. 激光武器初露头角[J]. *科学 24 小时*, 2021(3): 8-11.
- WANG Yi, WANG Hailan. Laser weapons are emerging[J]. *Science in 24 Hours*, 2021(3): 8-11.
- [17] 陈京生, 李清, 吴红, 等. 国外激光武器及其标准化的研究进展[J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(10): 165-172.
- CHEN Jingsheng, LI Qing, WU Hong, et al. Research progress of laser weapons and its standardization abroad[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(10): 165-172.
- [18] 李洪兴. 美三军全面推进激光武器计划[J]. *现代军事*, 2016(2): 14.
- LI Hongxing. The U.S. military services accelerate laser weapon programs[J]. *Conmilit*, 2016(2): 14.
- [19] 杨晨, 王润荣. 舰载高能激光武器系统进展[EB/OL]. (2022-09-02)[2025-03-03]. <https://mp.weixin.qq.com/s/iALPk9w8IyMZJP5uEuhTQA>.
- YANG Chen, WANG Runrong. Developments in naval high-energy laser weapon systems[EB/OL]. (2022-09-02)[2025-03-03]. <https://mp.weixin.qq.com/s/iALPk9w8IyMZJP5uEuhTQA>.
- [20] 伍尚慧. 美军定向能武器典型装备运用研究[J]. *军事文摘*, 2024(3): 42-46.
- WU Shanghui. Research on the application of typical equipment of American directed energy weapons[J]. *Military Digest*, 2024(3): 42-46.
- [21] 孙苗苗, 孟祥慈, 白奕. 高能激光武器协同作战运用关键技术分析[J]. *战术导弹技术*, 2023(4): 126-133.
- SUN Miaomiao, MENG Xiangci, BAI Yi. Key technology analysis of high-energy laser weapon incooperative combat[J]. *Tactical Missile Technology*, 2023(4): 126-133.
- [22] 伍赛特. 航空母舰动力装置选型及应用可行性研究[J]. *上海节能*, 2024(3): 447-451.
- WU Saite. Study on the feasibility of type selection and application of aircraft carrier power plant[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2024(3): 447-451.
- [23] 周伟. 美国导弹防御拦截系统的发展趋势分析[J]. *现代军事*, 2015(10): 60-66.
- ZHOU Wei. Analysis on the development trend of American missile defense interception system[J]. *Conmilit*, 2015(10): 60-66.
- [24] 徐大伟. 激光干扰技术的发展动向与分析[J]. *舰船电子工程*, 2014, 34(9): 16-18.
- XU Dawei. Development trend and analysis of the laser interference technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(9): 16-18.
- [25] 禹化龙, 伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术发展[J]. *国防科技*, 2019, 40(6): 42-47.
- YU Hualong, WU Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. *National Defense Science & Technology*, 2019, 40(6): 42-47.
- [26] 易亨瑜, 齐予, 锁兴文, 等. 美国高能激光定标放大计划进展分析[J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1167-1176.
- YI Hengyu, QI Yu, SUO Xingwen, et al. Development analysis of American high energy laser scaling initiative[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1167-1176.
- [27] LI X F, LI F, SONG J Q, et al. Developments and trends of directed energy technology in the United States[C]// 2023 IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Hangzhou, China: IEEE, 2023: 1-6.
- [28] 易亨瑜, 锁兴文, 易欣仪, 等. 美国定向能机动近程防空计划进展分析[J]. *应用光学*, 2024, 45(3): 485-494.
- YI Hengyu, SUO Xingwen, YI Xinyi, et al. Development analysis of American directed energy maneuver short-range air defense program[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 485-494.
- [29] 启航无人机科技(辽宁)有限公司. 德国莱茵金属公司开发 Skyranger 30 新型移动反无人机武器系统[EB/OL]. (2023-09-05)[2025-03-03]. <http://www.uavpk.com/html/news/1508.html>.
- Liaoning Qihang UAV Technology Co., Ltd. German Rheinmetall develops new mobile counter-UAV weapon system Skyranger 30[EB/OL]. (2023-09-05)[2025-03-03]. <http://www.uavpk.com/html/news/1508.html>.
- [30] 严毅, 穆学桢, 张宁华, 等. 机载激光武器自卫防御应用研究与前景分析[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(5): 107-113.
- YAN Yi, MU Xuezheng, ZHANG Ninghua, et al. Application research and prospect analysis of airborne self-defense laser weapon[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(5): 107-113.
- [31] 郭士慧, 慈明儒, 刘昆, 等. 高能激光对典型空中目标的毁伤能力研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(15): 265-271.
- GUO Shihui, CI Mingru, LIU Kun, et al. Ability of high-

- energy laser in combating typical air targets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(15): 265-271.
- [32] 周雨柔, 赵子骏, 邹明. 美军 B-21 隐身轰炸机性能分析及启示[J]. *国防科技*, 2024, 45(6): 85-91.
ZHOU Yurou, ZHAO Zijun, ZOU Ming. Performance analysis and inspirations of U. S. B-21 stealth bomber[J]. *National Defense Science & Technology*, 2024, 45(6): 85-91.
- [33] 权晓伟, 杨晖. 美军高能激光武器毁伤试验研究[J]. *军民两用技术与产品*, 2024(4): 53-59.
QUAN Xiaowei, YANG Hui. Damage testing research on U.S. military high-energy laser weapons[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2024(4): 53-59.
- [34] THORNTON R, MIRON M. Russian military space-related capabilities: the vital deterrence role of counter-space weapons (part I)[R]. UK: Freeman Air and Space Institute, 2024.
- [35] 杜梓冰, 汤恒仁, 刘琨, 等. 以色列机载激光武器发展及试飞特点研究[J]. *激光与红外*, 2021, 51(12): 1547-1553.
DU Zibing, TANG Hengren, LIU Kun, et al. Development and flight test characteristics of Israeli's airborne laser weapon[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(12): 1547-1553.
- [36] UPADHAYAY H K. The Israeli iron beam: a new chapter in the era of combat lasers[J]. *Society for the Study of Peace and Conflict*, 2022, 5: 1-6
- [37] 陈雅萍, 宋晓阳, 刘杰. 2024 年国外防空反导领域发展综述[J]. *战术导弹技术*, 2025(3): 64-71.
CHEN Yaping, SONG Xiaoyang, LIU Jie. Overview of foreign air defense and anti-missile development in 2024[J]. *Tactical Missile Technology*, 2025(3): 64-71.
- [38] 马力. 基于群体智能的无人机集群分布式协同方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
MA Li. Research on the distributed cooperation method of UAV swarm based on swarm intelligence[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021.
- [39] 韩加庆. 未来战场定向能武器会取代动能武器吗[J]. *坦克装甲车辆*, 2023(4): 33-37.
HAN Jiaqing. Will directed energy weapons replace kinetic weapons in future battlefields[J]. *Tank & Armoured Vehicle*, 2023(4): 33-37.
- [40] 高璞, 刘瑞, 顾灏冰, 等. 基于体系推演的作战概念建模与验证方法[J]. *火力与指挥控制*, 2023, 48(10): 49-54.
GAO Pu, LIU Rui, GU Haobing, et al. Modeling and verification method of operational concepts based on system deduction[J]. *Fire Control & Command Control*, 2023, 48(10): 49-54.
- [41] 李文奎, 许国彩. 颠覆性技术发展及影响分析[J]. *国际太空*, 2016(12): 53-60.
LI Wenkui, XU Guocai. Analysis on the development and impact of disruptive technologies[J]. *Space International*, 2016(12): 53-60.
- [42] 杜梓冰, 汤恒仁, 李洪, 等. 机载定向能武器发展趋势及关键技术研究[J]. *激光与红外*, 2024, 54(9): 1346-1351.
DU Zibing, TANG Hengren, LI Yang, et al. Research on the development trend and key technology of airborne directed energy weapons[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(9): 1346-1351.
- [43] 原玥. 外层空间军备控制研究: 跨域威慑与战略稳定[D]. 北京: 外交学院, 2023.
YUAN Yue. Research on outer space arms control: cross-domain deterrence and strategic stability[D]. Beijing: China Foreign Affairs University, 2023.
- [44] 刁雯惠. 深圳技术大学、南方科技大学提出耗散操控量子新机制[N]. *中国科学报*, 2024-07-08(3).
DIAO Wenhui. Shenzhen Technology University and Southern University of Science and Technology propose novel mechanism for dissipation-controlled quantum manipulation[N]. *China Science Daily*, 2024-07-08(3).
- [45] 包勇, 程帅. 反无人机蜂群杀伤链动态构建策略研究[J]. *现代防御技术*, 2025, 53(4): 1-9.
BAO Yong, CHENG Shuai. Research on the dynamic construction strategy of anti-UAV swarm kill chain[J]. *Modern Defence Technology*, 2025, 53(4): 1-9.
- [46] 樊巍, 刘明. 装备“白菜化”, 低成本战争时代来临?[N]. *环球时报*, 2024-01-23(7).
FAN Wei, LIU Ming. "Commoditization" of equipment: is the era of low-cost warfare approaching?[N]. *Global Times*, 2024-01-23(7).
- [47] 任武能. 世界武器装备发展评点之二: 陆军武器装备[J]. *环球军事*, 2006(4): 27-29.
REN Wuneng. Comments on the development of world weapons and equipment (II): army weapons and equipment[J]. *Global Military*, 2006(4): 27-29.
- [48] 沈永行, 吴波, 胡澄之, 等. 激光差频技术实现高平均功率 3.8 μm 纳秒中波红外激光输出实验研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101017
SHEN Yonghang, WU Bo, HU Chengzhi, et al. Experimental investigation on the high average power ns mid-in-

- frared laser output at 3.8 μm through difference frequency generation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(1): 0101017
- [49] 王二斌, 朱江, 孙野, 等. 单兵激光武器的创新与性能提升策略探讨[J]. *中国军转民*, 2024(2): 61-62.
WANG Erbin, ZHU Jiang, SUN Ye, et al. Discussion on innovation and performance improvement strategy of portable laser weapon[J]. *Defence Industry Conversion in China*, 2024(2): 61-62.
- [50] 徐能武, 龙坤. 太空军备控制的现实争辩、理论逻辑和参与策略[J]. *国际展望*, 2021, 13(6): 56-79.
XU Nengwu, LONG Kun. Space arms control: realistic debates, theoretical logic, and engagement strategies[J]. *Global Review*, 2021, 13(6): 56-79.
- [51] 王希. 真空及近地磁场环境下带电粒子束团长程传输特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
WANG Xi. Research on characteristics of charged particle beam long-range propagation in vacuum and near-earth environment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [52] 闫珑, 谢剑炜. 梭曼抗毒剂及其生物标志物检测方法的研究进展[J]. *灾害医学与救援 (电子版)*, 2012(4): 262-267.
YAN Long, XIE Jianwei. Research progress of soman antitoxin and its biomarker detection methods[J]. *Disaster Medicine and Rescue (Electronic Edition)*, 2012(4): 262-267.