

文章编号: 1001-3806(2022)06-0817-06

美国陆军车载战术激光武器发展分析

黄沛¹, 曹国辉¹, 张海晶¹, 张钧杰²

(1. 中国人民解放军 93221 部队, 北京 100085; 2. 中国人民解放军 93128 部队, 北京 100080)

摘要: 车载战术激光武器是利用高能激光能量毁伤目标的定向能武器, 可有效提升防空体系综合作战效能, 在防空领域具有广阔应用前景。美国在研制激光武器方面一直处于世界前列, 尤其是美国陆军正大力发展车载战术激光武器并取得了重要成果。归纳总结了美国陆军车载战术激光武器发展现状, 分析讨论了其关键技术, 并对发展特点和趋势进行了总结。

关键词: 激光技术; 车载战术激光武器; 高能激光; 防空

中图分类号: TJ951 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2022.06.017

Development analysis of US Army vehicle tactical laser weapons

HUANG Pei¹, CAO Guohui¹, ZHANG Haijing¹, ZHANG Junjie²

(1. 93221 Unit, People's Liberation Army of China, Beijing 100085, China; 2. 93128 Unit, People's Liberation Army of China, Beijing 100080, China)

Abstract: Vehicle tactical laser weapons are kinds of direct energy weapons that use high energy laser to destroy targets. The operational effectiveness of air defense system can be improved effectively with the vehicle tactical laser weapons, which have broad application prospects in field of air defense. The United States (US) has been leading the world in the development of laser weapons, especially in the field of vehicle tactical laser weapons, and many important progresses has been achieved. The development status and key technology of US Army vehicle tactical laser weapons were analyzed, and the characteristics and trends were summarized, which can provide reference for practical application of our laser weapons.

Key words: laser technique; vehicle tactical laser weapons; high energy laser; air defense

引言

激光武器是利用高能激光束能量摧毁或损伤目标的定向能武器, 与防空导弹和火炮等传统动能武器相比, 具有光速交战、攻击灵活、毁伤精准可控、作战成本低、持续作战能力强等独特优势^[1-2], 在军事领域具有巨大应用价值。根据装载平台不同, 激光武器可分为机载激光武器、车载激光武器和舰载激光武器等^[3]。近年来, 美国、俄罗斯、德国等均投入大量资金用于发展激光武器, 其中美国在技术水平与研制应用方面处于领先地位。目前, 国内对美国机载激光武器、舰载激光武器的发展已有较为系统的报道^[4-7], 而针对美国陆军车载激光武器发展分析研究的文献相对较少。目前, 美国陆军正开展多项车载激光武器项目研究, 加速

推进车载战术激光武器实战化应用, 计划通过发展车载激光武器提升前沿要地防空能力, 应对火箭弹、火炮、迫击炮以及无人机等威胁。本文中系统归纳了车载激光武器防空领域的应用方向, 概述了当前美国陆军车载激光武器的研究现状, 分析了关键技术发展情况, 探讨了其发展特点及发展思路, 总结了车载战术激光武器未来发展趋势。

1 概述

车载战术激光武器是将高能激光集成于车载平台上, 可充分利用车载平台载重能力强及机动性能好等优势, 遂行要地防空、伴随防空、野战防空以及城市安防等多样化任务, 是对传统防空体系的有效补充。分析车载激光武器作战特点, 其承担的作战任务包括以下几点。

(1) 末端防御。发挥激光武器光速交战、作战费用比高等优势, 与传统防空武器系统的导弹和火炮衔接配合, 实现对精确制导弹药、火炮、无人机等实施低成本、高效拦截, 形成分层拦截、火力衔接、体制互补的

作者简介: 黄沛(1988-), 男, 工程师, 现主要从事光学相关研究。

E-mail: huangp123456@sina.com

收稿日期: 2021-09-29; 收到修改稿日期: 2021-10-16

综合防御体系。

(2) 光电对抗。对精确制导武器导引头、无人机侦察载荷等光电传感器进行“软杀伤”^[8-9],降低光学制导武器命中精度,削弱其精确打击能力,致盲毁伤无人侦察机光电系统使其丧失侦察监视功能,丰富防空体系拦截手段,提升体系综合作战效能。

(3) 信息支援。利用激光武器大口径光学系统跟瞄精度高优势,将车载激光武器作为“传感器”对来袭目标进行探测、跟踪、识别,为防空导弹提供高精度目标指示信息和引导信息,协同地空导弹武器系统作战,提高防空体系抗复杂电磁干扰能力。

(4) 安防安保。利用车载激光武器攻击隐蔽、附带损伤小特点,对“低慢小”目标、轻小型无人机等低价值、非对称目标进行杀伤,既可用于和平时期对重大活动、重要目标安保,又可应用于机场、导弹阵地等反小型无人机侦查袭扰,提高应对非对称威胁的能力。

2 发展现状

美国陆军高度重视车载战术激光武器发展。自20世纪90年代就开启了陆基激光武器研制计划——战术高能激光武器(tactical high energy laser, THEL),采用氟化氙激光器安装在地面机动平台,成功进行了多次拦截火箭弹的打靶验证。但由于氟化氙等化学激光武器存在系统复杂笨重、维护保障困难等问题,不适用于与小型机动平台集成和战术应用。近年来,随着高能固体激光光源技术不断发展,美国陆军将发展重点逐步转向基于固体激光光源的战术激光系统,充分利用联合高功率固体激光器(joint high power solid-state laser, JHPSSL)、高能液体激光区域防御系统(high energy liquid laser area defense system, HELLADS)、坚固型电激光器倡议(robust electric laser initiative, RELI)等项目研究成果^[10],开展多项车载战术激光武器样机集成验证项目,预计在2025年前完成实战部署。总体来看,根据装备形态、功率等级、作战任务等不同,美国陆军开展的车载激光武器研制项目可分为两类。

2.1 基于重型卡车的激光武器

以重型卡车为平台完成了高能激光机动演示系统(high energy laser mobile demonstrator, HEL MD),并通过高能激光战术车辆演示(high energy laser tactical vehicle demonstrator, HEL TVD)进一步拓展作战能力。

美国陆军联合波音公司开发了HEL MD系统,如图1a所示,激光器输出功率10kW,集成于8轮奥什科什重型机动卡车,用于反火箭弹、炮弹和迫击炮弹等目

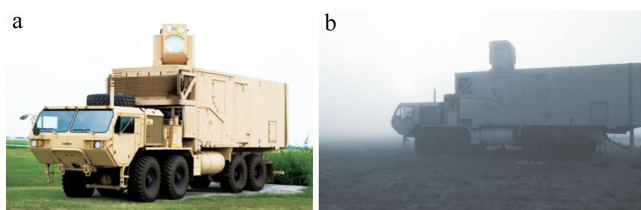


图1 a—HEL MD 激光武器^[11] b—HEL MD 在恶劣条件下开展试验^[11]

标^[11]。在白沙导弹靶场验证了系统在风、雨、雾天气条件下对各种空中目标实施瞄准和打击能力(见图1b),击落60mm迫击炮弹和无人机等150多个目标。

2017年,洛·马公司基于美国国防部RELI项目支持,为美陆军研制了60kW级光纤激光光谱合成激光源,将该光源以及HEL MD系统中的光束控制系统集成到重型战术卡车,完成高能激光器移动试验车(high energy laser mobile test truck, HELMTT)研制^[12],并于2018年在白沙靶场进行了演示验证,成功击毁火箭弹和迫击炮弹。

2018年,美国陆军启动HEL TVD项目,计划在10吨量级的中型战术卡车上集成100kW激光武器系统(见图2),用于拦截火箭弹、炮弹、迫击炮弹、巡航导弹和无人机等目标,预计2022年完成对多类目标的毁伤验证^[13]。美国陆军将该项目合同授予Dynetics-洛·马公司团队,洛·马公司提供激光源子系统,Dynetics公司负责系统集成和测试,Rolls-Royce公司负责研制电源和热管理系统^[14]。为应对巡航导弹威胁,美国陆军决定提高激光功率等级,直接研制250kW~300kW激光武器^[15]。



图2 HEL TVD 激光武器概念图

2.2 基于轻型战车的激光武器

以轻型机动战车为平台,完成机动远征高能激光炮(mobile high-energy laser, MEHEL)研制,正开展多任务高能激光(multi-mission high energy laser, MM-HEL)项目提升部队近程机动防空能力。

MEHEL项目由波音公司为美国陆军研发,将输出功率2kW~5kW的光纤激光集成于“斯特赖克”轮式战车(见图3),具备较强机动能力^[16]。美国陆军在2016年开展的一次试验中击落多架四旋翼无人机、固定翼无人机,初步验证了系统的作战能力。

图3 MEHEL 激光武器^[16]

为进一步提高机动式战车作战能力,2018年,美国陆军启动了MMHEL项目,该项目为机动短程防空系统(mobile short-range air defence, M-SHORAD)的部分计划,将50kW高能激光器集成到机动式斯特赖克机动平台上用于近程机动防空(见图4a),拦截火箭弹、火炮、迫击炮以及无人机,为前线作战部队提供防护。项目由美国Kord技术公司作为主承包商,雷神公司负责激光器模块研制。2021年8月,美陆军完成了对M-SHORAD定向能样机的试验验证(见图4b),计划2022年组建1个由4辆战车组成的作战排^[17]。

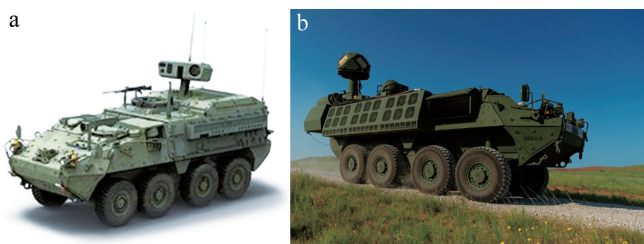


图4 a—MMHEL 激光武器概念图 b—M-SHORAD 定向能样机

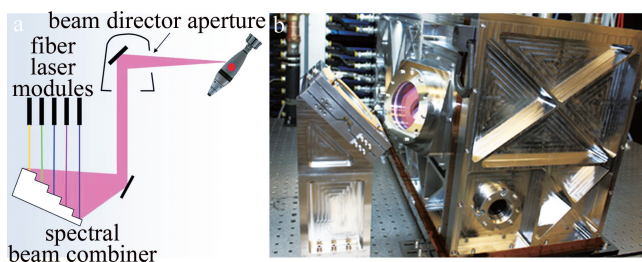
3 关键技术分析

3.1 高能激光器技术

目前,战术激光武器光源发展重点已由化学激光器转向固态激光器,根据增益介质形状不同可分为光纤激光器、板条激光器、薄片激光器、平面波导激光器等。其中光纤激光器采用全光纤结构,具有结构紧凑、可靠性高、光束质量好的优点。但受非线性效应、热效应等因素的影响,单根单模光纤激光的输出功率存在极限,最高可产生约20kW的连续功率^[18],要实现更高功率的输出,必须通过光束合成技术,包括相干合成和非相干合成,非相干合成又可分为空间合成、光谱合成等。相干合成技术最为复杂、不易实现,空间合成的光束质量较差,而光谱合成技术因系统相对简单、光束质量较好而得到广泛应用。根据美国陆军网站报道以及对相关技术发展现状分析,美国陆军正开展的HEL TVD和MMHEL均采用目前为成熟的光纤激光器,通

过光谱合成技术实现高功率高光束质量激光输出。

HEL TVD项目光源研制单位洛·马公司长期致力于光纤激光光谱合成技术的发展与应用,如图5a所示。通过光栅等色散元件使波长差异的激光同轴叠加,形成一束同轴激光输出。2014年,洛·马公司采用96路单纤窄谱激光光谱合成实现了30kW功率输出^[19];2017年,研制出了60kW光谱合成的光纤激光器(见图5b),电光效率达到43%,重量功率比为10kg/kW^[7]。

图5 a—光谱合成示意图^[13] b—洛·马公司60kW光源^[7]

MMHEL项目光源研制单位雷神公司为美国海军研制的舰载激光武器系统(laser weapon system, LaWS),采用IPG公司的成熟工业光纤激光器模块,通过6路5.5kW的IPG单模光纤激光器模块空间合成实现了33kW激光输出,但光束质量较差^[20]。2019年,雷神公司为美空军研制的高能激光武器系统(high energy laser weapon system, HELWS)已采用光谱合成,实现了10kW激光输出。

3.2 高效毁伤技术

激光毁伤效应研究是车载战术激光武器实战应用的基础。车载激光武器要拦截应对的目标种类多样。因此,要通过毁伤效应研究确定不同目标易毁部位、毁伤阈值、毁伤后效,建立毁伤效应数据库,完善激光破坏效应标准与判据,以支撑实际作战中的目标分配和指挥决策。美军非常重视激光武器毁伤效能研究,在白沙靶场建立了高能激光测试试验平台,形成了完备的激光破坏效应试验能力,能够支持开展系统级动态拦截试验,支撑激光毁伤效应试验研究。HEL MD和HELMTT系统均在白沙导弹靶场开展了针对火箭弹、迫击炮弹、无人机等目标的毁伤验证。为应对大国竞争对手的巡航导弹威胁,美国陆军将HEL TVD激光功率从100kW提高至300kW。美国相关研究机构认为300kW左右的激光武器才具备对巡航导弹毁伤能力^[21]。

本文中也对激光武器拦截巡航导弹能力进行了估算。连续激光主要依靠能量累积烧蚀对目标进行毁

伤,需同时满足最低激光功率密度和辐照时间两方面的要求。

$$\begin{cases} I \geq I_0 \\ E = I \cdot t \geq E_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, I 为到靶功率密度, I_0 为毁伤功率阈值, t 为作用时间, E 为能量密度, E_0 为毁伤能量阈值。

到靶功率密度与发射光束质量、湍流强度和跟瞄精度等因素有关,可用下式表示^[22]:

$$\begin{cases} I = \frac{0.84\tau P}{\pi R^2} \\ R = \sqrt{\left(\frac{1.22\lambda L\beta}{D}\right)^2 + \left(\frac{1.22L\lambda}{r_0}\right)^2 + (\mu L)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L 为激光传输距离, τ 为大气传输效率, P 为激光功率, D 为发射口径, R 为到靶光束半径, β 为发射光束质量, μ 为跟踪精度, r_0 为大气相干长度, λ 为激光波长。 τ 和 r_0 分别与大气能见度和大气湍流强度有关。

假定车载激光武器打击超低空突防的巡航导弹,速率为 300m/s,取巡航导弹功率阈值为 1000W/cm²,能量阈值为 3000W/cm²;激光武器出光口径为 30cm,光束质量为 3 倍衍射极限,大气湍流强度取为 10⁻¹⁵m^{-2/3},跟瞄精度、大气能见度分别取为 10μrad 和 15km。经估算,100kW 激光武器毁伤距离约为 1.5km,恶劣条件下毁伤能力会进一步下降,在实战条件下毁伤能力非常有限甚至不具备拦截能力;而 300kW 激光武器对巡航导弹毁伤距离不小于 3km。

3.3 自适应光学校正技术

激光在大气传输过程中受大气吸收、散射、湍流影响,产生能量衰减、光束扩展、光斑抖动畸变等现象,导致激光到靶功率密度下降,尤其是车载激光武器部署于地面作战,受稠密大气影响严重。通过自适应光学技术可有效补偿大气造成的激光波前畸变。在美国空军机载激光武器(airborne laser, ABL)研制过程中,波音公司就计划采用自适应光学技术改善光束质量^[23],但受限于当时技术水平,提升效果不明显,制约了武器作战能力。

洛·马公司为美国空军研制了航空自适应光波束控制台(aero-adaptive aero-optic beam control, ABC),发展自适应光学技术对炮塔周围的大气湍流等引起的畸变进行校正与补偿使之能精确聚焦到目标。美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)开展了“圣剑”项目(Excafibur),并于2014年验证了3个光学相控阵模块组成的光学相控阵列,如图6所示,每个模块由7个光纤激光器组成。Excafibur样机采用“超快优化算法”,通过目标在回路的全程像差优化控制,实现了对大气湍流亚毫秒量级的快速校正^[24]。图中, MOPA 为主振荡功率放大(master oscillator power amplifier)。美国陆军在 HEL TVD 项目中也计划采用自适应光学技术保证恶劣天气条件下的作战能力,其所采用技术途径、后续研究进展以及大气校正效果值得大家持续关注。

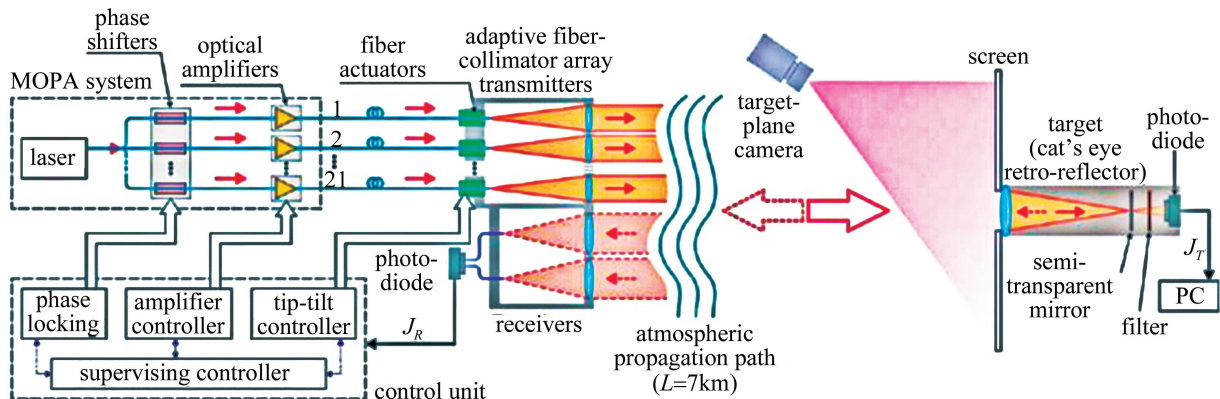


图6 “圣剑”光学相控阵原理图^[24]

4 发展特点与趋势

4.1 发展特点

美国陆军十分重视车载激光武器发展,根据美国《国防战略》提出的分层防御体系和美国陆军的现代化战略,其末端防御由远及近-由近及远规划为“6层防空反导保护圈”,由低成本导弹、高能激光、机枪等

手段组成^[25]。其中,多任务高能激光(MMHEL)、高能激光战术车辆演示(HEL TVD)分别承担第2层与第5层防空任务。分析美国陆军车载战术激光武器发展具有以下特点:

(1)在使命定位方面,将激光武器作为地空导弹武器有效补充,纳入防空体系形成梯次防护能力,提升体系作战效能。激光武器不具备全天候作战能力,难

以完全代替地空导弹、高炮等传统防空装备。在美军规划的“6层防空反导保护圈”中,仍依靠低成本导弹承担最外层防空任务。

(2)在作战使用方面,主要用于海外基地、作战部队等前沿阵地防御火箭弹、炮弹、迫击炮及无人机等非对称威胁,并逐渐扩展对巡航导弹拦截能力。美国拥有制空优势,其国土防空反导主要依托航空力量以及全球导弹防御体系。近年来,美军海外基地受到日益严峻的无人机、火箭弹、炮弹等威胁,美军重新重视发展近程防空装备,并计划通过发展车载激光武器快速提升部队应对火箭弹、火炮、迫击炮能力。

(3)在装备形态方面,发展轻型、中型两类车载激光武器,兼顾机动性和毁伤能力。50kW 激光武器采用轻型装甲底盘,机动能力强,可为作战部队提供伴随防空,有效拦截小型无人机,兼顾拦截部分薄壳体、中近程火箭弹、炮弹。100kW 以上激光武器毁伤能力强,能够拦截火箭弹、炮弹甚至巡航导弹,但受限于激光器体积、重量,目前仅能集成于中型或重型车辆,具备一定机动能力,可用于固定阵地防空。

(4)在激光光源方面,采用相对成熟的光纤技术体制确保尽快形成实战能力。相比于薄片、板条固体激光器等,光纤激光器更为成熟,可靠性和环境适应性较好,对灰尘、震荡、冲击等容忍度较高,且通过光纤激光光束合成可实现100kW 以上激光武器集成,并未一味追求功率提升。相比于美国海军提出的发展兆瓦级激光武器拦截超音速反舰导弹,美国陆军更注重利用成熟技术发展高机动激光武器满足火箭弹、炮弹拦截任务急需。但美国相关研制单位也并未放弃其它技术体制发展,美国通用原子公司计划通过发展“分布式增益”激光技术,研制100kW~250kW 激光武器^[26-27]。2015年,该公司研制的激光器模块实现75kW 高质量光束输出,重量功率比为4kg/kW,在输出功率相同的情况下,激光器重量小于光纤激光器,适合安装在各种小型战术平台上。该种技术体制也值得关注。

4.2 发展趋势

(1)关键技术逐渐成熟并走向工程化、实战化。随着HEL TVD、MEHEL 等项目的开展,美国在高能激光器、高精度跟瞄以及系统集成技术等方面取得重要突破,车载激光武器即将装备部队实战部署。在研制过程中注重提升装备作战适应性,充分考虑环境条件并尽可能克服环境影响,例如验证HEL MD 车载激光武器样机在云雾、刮风、下雨等多种不同条件下作战能力。

(2)作战能力不断提升向高功率、高集成度发展。提高激光光源功率,增强激光武器综合性能与毁伤能力,拓展车载激光武器多样化作战能力,将毁伤目标从无人机等非对称目标扩展到巡航导弹等常规空袭目标,提升防空体系作战效能。同时,重视装备轻量化、紧凑化设计,以支撑更高功率水平激光武器发展,拓展对巡航导弹的毁伤能力。

(3)注重同传统火力以及高功率微波武器的协同运用。激光武器有全天候作战能力弱的天然劣势,在实战中要灵活运用导弹、高炮等传统火力与激光武器和高功率微波武器等新质力量,构建“弹、炮、光、波”多手段综合、火力衔接、体制互补的防御体系。例如,2017年,美国陆军在“机动火力综合试验”(maneuver fires integrated experiment, MFI)的演习中,利用高功率微波和高能激光武器击落了45架无人机^[28]。

5 结束语

车载战术激光武器的独特优势使其在未来战术防空领域具有较强发展潜力,是世界军事强国发展的重点。美国在激光武器的研究领域处于领先地位,并基于作战使用需求逐步推进装备实战化。

参 考 文 献

- [1] LI Ch L, CUI X T, ZHAO H, *et al.* Research on the use of tactical laser weapons in the field[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(11): 1298-1302(in Chinese).
- [2] WANG H T. Analysis on the key technologies and typical battle mode of laser weapon[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 50(11): 1298-1302(in Chinese).
- [3] MA Zh, LIU H J, CHEN W. Thinking about development of tactical anti-aircraft laser weapons[J]. *Modern Defense Technology*, 2011, 39(6): 1-6(in Chinese).
- [4] CHENG L, TONG Zh Ch. Battle application and countermeasures of sea-based laser weapon[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2019, 39(2): 8-10(in Chinese).
- [5] ZHANG Y Zh. Progress in airborne lasers weapon research [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(7): 91-94(in Chinese).
- [6] CAI Y M, ZHAO Sh. Development status of US Navy's electromagnetic rail guns and trend of shipboard directed energy weapons[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2015, 31(3): 59-61(in Chinese).
- [7] YI H Y, SUO X Y, YI X Y, *et al.* Development of AC-130J AHEL system[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(2): 174-180(in Chinese).
- [8] ZHANG Y X, WANG B, LEI P. Development situation and trend of high energy laser countermeasure system[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(6): 24-28(in Chinese).
- [9] LU F B, CUI D H, LIN L X, *et al.* Capability analysis of electro-optical sensor of laser blinding weapon[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2020, 35(5): 34-37(in Chinese).

- [10] CHEN J Y, YANG Ch C, MA H, *et al.* Bottleneck of high-energy solid-state laser for practical application in the US Army[J]. *Laser & Infrared*, 2016,46(4):381-386(in Chinese).
- [11] LI Y Y, WANG J H, LI Zh. Development situation of high-energy laser weapons[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2017,38(6):1-6 (in Chinese).
- [12] WEI H B, HU L M, SONG L. Development and enlightenment of foreign high power laser system test and evaluation technology[J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(12):1-4 (in Chinese).
- [13] KENDRICK K R. Army looks to optimize lethality with high-energy lasers[EB/OL]. (2018-02-08) [2019-10-11]. https://www.army.mil/article/200308/army_looks_to_optimize_lethality_with_high_energy_lasers.
- [14] JUDSON J. Rolls-Royce unveils hybrid power system for laser weapons[EB/OL]. (2019-05-10) [2021-07-10]. <https://www.defensenews.com/industry/2019/05/10/rolls-royce-unveils-hybrid-power-system-for-laser-weapons/>.
- [15] HEININGER C. Army awards laser weapon system contract [EB/OL]. (2019-08-02) [2019-10-11]. https://www.army.mil/article/225276/army_awards_laser_weapon_system_contract.
- [16] CUTSHAW J B. Army demonstrates integration of laser weapon on combat vehicle [EB/OL]. (2017-03-17) [2019-10-11]. https://www.army.mil/article/184353/army_demonstrates_integration_of_laser_weapon_on_combat_vehicle.
- [17] BONBREST N J. Army preps Strykers for laser combat shoot-off [EB/OL]. (2020-12-20) [2021-05-11]. https://www.army.mil/article/241982/army_preps_strykers_for_laser_combat_shoot_off.
- [18] CHENG X, WANG J L, LIU Ch H. Beam combining of high energy fibre lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1):0103011(in Chinese).
- [19] BAI G, YANG Y F, JIN Y X, *et al.* Research progress on laser beam characteristics in spectral beam combining system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019,56(4):040004(in Chinese).
- [20] YI H Y, QI Y, HUANG J J. Development of ship-based laser weapons system[J]. *Laser Technology*, 2015,39(6):834-939(in Chinese).
- [21] FREEDBERG S J. New army laser could kill cruise missiles[EB/OL]. (2019-08-05) [2020-07-10]. <https://www.breakingdefense.com/2019/08/newest-army-laser-could-kill-cruise-missiles/>.
- [22] WANG H H. Index design and analysis of solid state laser weapon systems[J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2016, 31(5):573-578(in Chinese).
- [23] LIU L H, TAN B T, ZHANG X Y, *et al.* The airborne laser project in the United States[J]. *Laser & Infrared*, 49(2):137-142(in Chinese).
- [24] WEYRAUCH T, VORONTSOV M, MANGANO J, *et al.* Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4):840-843.
- [25] WINS C T. CCDC'S road map to modernizing the army: Air and missile defense[EB/OL]. (2019-09-10) [2020-10-11]. https://www.army.mil/article/226920/ccdc_road_map_to_modernizing_the_army_air_and_missile_defense.
- [26] GENERAL ATOMICS. General Atomics, Boeing partner on high energy laser weapon system[EB/OL]. (2020-11-03) [2021-07-11]. <https://www.ga.com/general-atomics-boeing-partner-on-high-energy-laser-weapon-system>.
- [27] YI H Y, QI Y, YI X Y, *et al.* Development of GA-ASI's high energy laser[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2):213-220(in Chinese).
- [28] YU H L, WU Sh H. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. *National Defense Science & Technology*, 2019, 40(6):42-47(in Chinese).