

高功率激光武器进展与启示

杨剑波,宗思光,陈利斐

(海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:激光武器系统作为一种定向能武器系统,具有多样化作战任务剖面,与传统软硬毁伤武器相比,具有快速、灵活、精确、多重功能、作战范围广等优点。最近几年来,美、俄、德等国频频报道海军激光武器试验和进展情况。如何发展激光武器,既是技术问题也是思路问题,既要提高能力,又要考虑现实约束。论文梳理分析了近年来国外高能激光器、高能激光武器系统、国外高能激光武器集成演示论证的现状,探讨了其性能及特点,总结了外军高能激光武器发展对我们带来的启示。

关键词:定向能武器系统;高能激光器;激光武器系统;集成演示论证

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.002

Developments and trends of laser weapons

YANG Jian-bo, ZONG Si-guang, CHEN Li-fei

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As a kind of directional energy weapon system, laser weapon system has diversified operational mission profiles. Compared with traditional soft and hard damage weapons, it has the advantages of fast, flexible, accurate, multi-function, and wide operational range. In recent years, the United States, Russia, Germany and other countries frequently reported the navy laser weapon test and progress. How to develop laser weapons is not only a technical problem, but also a problem of thinking. We should not only improve the ability, but also consider the practical constraints. This paper analyzes the status quo of foreign high-energy laser, high-energy laser weapon system and foreign high-energy laser weapon integration demonstration in recent years, discusses its performance and characteristics, and puts forward the enlightenment of foreign high-energy laser weapon development.

Keywords: directed energy weapon system; high energy laser; laser weapon system; integration demonstration

1 引言

新世纪以来,强敌国家主要针对中俄为代表的新生势力,谋划“第三次抵消”装备战略,大力发展激光武器、微波武器、电磁炮等为代表的新概念高能武器。高能武器呈现出快速发展的趋势,颠覆了几百年来使用火药发射弹丸的作用机理,已成为先进国家抢占军事科技领域制高点的标志性

技术之一。其中,高能激光武器是利用激光束直接毁伤目标或使之失效的定向能武器,具有能量集中、传输速度快、作用距离远、命中精度高、转移火力快、抗电磁干扰、能多次重复使用和效费比高等优点。

随着高功率固态激光器技术突破和输出功率的提高,高能激光武器系统装备进程明显加快,美陆海

作者简介:杨剑波(1993-),男,硕士研究生,研究方向信息对抗指挥。E-mail:bonyyang2008@163.com

通讯作者:宗思光(1979-),男,副教授,研究方向信息对抗指挥。E-mail:41119749@qq.com

收稿日期:2021-03-05

空三军频繁针对各自的高能激光武器项目开展演示验证,突出体现在舰载 AN/SEQ-3 激光武器系统等开展了实战环境下的演示验证,以及陆、海、空等平台诸多激光武器系统计划的出台和推进,在不久可预计的将来,实战化武器装备将步入战场。本文梳理分析了近年来国外高能激光器、高能激光武器系统和集成演示论证的现状,总结和展望了高能激光武器未来发展的前景。

2 高能激光器研究现状

2.1 化学激光器

氟化氙(DF)和化学氧碘(COIL)是目前化学激光器的两种典型应用代表。美国研制的 DF 和 HF 化学激光武器,其输出功率分别达到 2.2 MW 和 5 MW,达到了迄今为止激光武器级别中的最高水平。化学激光器虽然能达到兆瓦级的高功率输出目标,但是由于其存在体积大、产生有毒气体和系统集成困难等一系列的问题,绝大多数飞机平台无法满足其负载要求,发展前景堪忧。美军的机载激光武器(ABL)项目就采用了 COIL 激光器,但最终于 2011 年因技术难题而终止了该项目^[1]。

2.2 固体激光器

美国在固体激光光源方面,先后开展了板条激光器、薄片激光器、光纤激光器等多种技术方向的探索研究,取得了突破性进展,在功率输出上冠绝群雄;德国以光纤激光为重点,取得了较好进展;中国起步较晚,重点主要放在板条和光纤两方面,加速追赶,进展显著。

2.2.1 板条激光器

板条激光器采用薄板状结构增益介质,激光激光射在增益介质长度方向,沿“Z”字型光路传输,由此实现高功率、高能量连续脉冲激光输出,光束质量优良。在联合高功率固体激光器计划(JHPSSL)支持下,美国诺格公司和达信公司分别采用“主振荡放大+7路相干合束”和“多介质串接+单谐振腔输出”技术方案,先后于 2009 年和 2010 年实现了 100 kW 激光输出,前者光束质量约 7 倍衍射极限,后者光束质量较差^[2-3]。国内方面,2018 年中国工程物理研究院应用电子学研究所采用分段掺杂板条获得 20 kW 激光输出^[4];2019 年中国科学院理化技术研究所采用常规大尺寸板条在低温深冷条件下获得 60 kW

激光输出^[5]。

2.2.2 薄片激光器

薄片激光器的增益介质为片状结构,散热和激光传输均在增益介质厚度方向,因散热路劲段、通光孔径达,可实现提高功率、高能量的连续或脉冲激光输出。在 RELI 计划支持下,2012 年美国波音公司采用“多片串接+单谐振腔输出”技术路线,实现了 30 kW 左右输出。美通用原子公司-航空系统公司采用浸入式液冷薄片技术(分布式增益激光技术,国内称浸入式液冷激光),2010 年实现了单模块 60 kW 功率输出,2015 年实现了两模块 150 kW 功率输出,但光束质量和电光效率不高^[6]。

2.2.3 光纤激光器

光纤激光器以可柔性操作的掺杂光纤作为增益介质,光束质量优良、电光效率高(约 40%),易于散热、可靠性高、适装性强。美国利弗莫尔实验室的 J. W. Dawson 在不同条件下做了模拟计算,得到结果:单光纤掺镱光纤激光器所能达到的极限输出功率为 36.6 kW^[7],这就意味着需要通过相干/偏振/光谱/色谱/空间等多种合成方式来实现更高功率输出。美国 IPG 公司基于同带泵浦技术和分布式侧面耦合技术,于 2009 年和 2012 年分别实现单纤单模 9.6 kW 和 20 kW(目前国际上单纤最高功率,远未达到 36.6 kW 上限)的光纤激光输出^[8-9]。表 1 为自 2015 年以来国内外(除美国外)全光纤结构激光振荡器和主振荡功率放大(MOPA)结构全光纤激光器的最新研究情况汇总表^[10-11]。美雷声公司和洛马公司分别采用“6路单纤宽谱激光空间合束”、“近百路单纤窄谱激光光谱合束”技术方案,分别于 2009 年和 2014 年实现 30 kW 左右功率输出。洛马公司于 2017 年实现了 60 kW 级光纤光谱合成光源样机;2019 年实现了 150 kW 级激光输出^[12]。

2.3 自由电子激光器

相比于传统的激光器,自由电子激光(FEL)的产生无需增益介质,仅与电子束的能量和波荡器有关,具有频谱范围广(厘米至软 X 射线波长范围)、频率可连续调谐、光束质量好等优点。FEL 技术因其远超于固态激光器的波长调谐能力,具有适应不同海上环境大气传播窗口的功能,成为美海军关注

的重点。在过去的十多年中,各个国家均加大了对X射线自由电子激光的投入和支持力度,使其短时间内得到迅猛发展,在物理、化学、生命科学、材料科学等领域发挥了重要的作用。表2为国际上具有代表性FEL装置汇总表^[13]。然而目前满足武器功率要求的自由电子激光器装置系统复杂,在体积、重量和功耗方面,对比固体激光器仍不具备优势,且存在对后勤保障要求高等劣势,加之美海军造舰计划的确定,使得美军高能激光器技术研发重点往固体激光器倾斜。

表1 2015年后高功率掺镱光纤激光器研究现状

Tab. 1 Research status of high power ytterbium doped fiber laser after 2015

光纤激光器类型	年份	单位	功率/kW
全光纤结构 激光振荡器	2016	藤仓,日本	2
	2016	国防科大,中国	2
	2016	国防科大,中国	2.5
	2017	国防科大,中国	1.969
	2017	国防科大,中国	3.05
	2017	藤仓,日本	3
	2018	国防科大,中国	3.96
	2018	藤仓,日本	5
	2018	耶拿大学,德国	5
	2018	国防科大,中国	5.2
	2020	藤仓,日本	8
MOPA结构 全光纤激光器	2015	国防科大,中国	2.14
	2015	国防科大,中国	3.15
	2016	华中科大,中国	3
	2016	西安光机所,中国	3.59
	2016	耶拿大学,德国	4.3
	2016	中国工程物理研究所,中国	5.07
	2017	西安光机所,中国	4.62
	2017	清华大学,中国	3.12
	2017	天津大学,中国	8.05
	2018	清华大学,中国	6.02
	2018	中国工程物理研究所,中国	11.23
2019	国防科大,中国	4.2	
2019	上海光机所,中国	10.14	

3 国外高能激光武器系统发展现状

3.1 美国空军

空基激光武器方面,美空军以机载激光反导系

统(ABL)项目为基础,先后牵引出先进战术激光器项目(ATL)、联合高能固体激光器项目(JHPSSL)等一系列项目研究与验证,在激光器技术、光束控制等方面取得的进展成果推动了新型机载激光武器的研发与应用。2019年10月,美空军首个高能激光武器系统(HELWS)被派遣到海外进行为期一年的战场测试,进入实地评估阶段。高功率、小体积、高光束质量、高光电转换率的板条或光纤固体激光器是机载激光武器领域重点关注的主要技术,但因机载环境固有特性限制,距离实战化应用还有一定距离。目前开展的项目包括自防御高能激光演示样机(SHIELD)、紧凑型高能激光光子系统工程评估(CHELSEA)计划等。SHIELD项目以战术喷气式战斗机为装载平台,采用光纤激光器吊舱式独立结构,但对于F-22这类第5代战机的隐身性能会造成一定影响。表3为2018年版美国空军研究实验室(AFRL)机载激光武器发展路线图^[14]。

3.2 美国陆军

美陆军发展的激光武器是一种移动式陆基防空和导弹防御系统,旨在完成反巡航导弹、无人机、火箭弹和炮弹等威胁的全方位防御任务。洛马公司已交付美陆军60 kW级激光器,正在演示验证100 kW级激光器武器样机;2019年6月,经美国防部批准第一台地面激光器紧凑型激光武器系统(CLAWS)投入海军陆战队使用,进入实战测试;2020年1月,美陆军修改已有合同,保证间接火力保护能力-高能激光(IFPC-HEL)计划顺利实施,着手研发250~300 kW的激光武器,发展反巡航导弹的激光防御能力。表4为美陆军目前正在开展的高能激光项目^[15]。

3.3 美国海军

海基激光武器方面,美海军充分利用国防部和工业界在固态激光技术的研究成果,积极推动高能固态激光武器上舰部署,取得了很大进展,完成了激光武器系统(LaWs)、海上激光演示(MLD)项目和战术激光系统(TLS)等样机的集成验证试验,为低功率致盲型激光武器(ODIN)正式列装部队打下了坚实基础。依据美海军激光武器研发路劲规划显示,美海军正在开展的项目包括:固态激光技术成熟化项目(SSL-TM)、增强型高能激光项目(RHEL)、海军光学眩目拦截器项目(ODIN)、集成光学眩晕与

监视的高能激光项目(HELIOS)、拦截反舰导弹的高能激光项目(HELCAP)等,其中前四项被称为“海军激光系统家族”(NFLOS)。HELIOS 也叫海军水面舰艇激光武器系统(SNLWS)增量 1, NFLOS 和 HELCAP 项目成果将用于支持 SNLWS 增量 2 和增量 3 的研发^[15]。

表 2 国际上代表性 FEL 装置

Tab. 2 Representative FEL devices in the world

国家(地区)	装置名称	辐射光波长	加速器类型	出光时间/年
美国	JLab IR	0.91 ~ 14 μm	超导(能量回收)	2005
荷兰	FELIX	3 ~ 1500 μm	常温	1992, 2011
俄罗斯	NovoFEL	5 ~ 240 μm	常温(能量回收)	2003, 2009, 2015
德国	FELBE	4 ~ 250 μm	超导	2004, 2006, 2017
美国	LCLS	0.08 ~ 1.24nm	常温	2009
美国	LCLS II	0.25 ~ 6.20nm	超导	2020.07 测试
德国	European XFEL	0.04 ~ 0.15nm	超导	2017
瑞士	SwissFEL	0.10 ~ 7.00nm	常温	2017
日本	SACLA	0.06 ~ 2.82nm	常温	2011
韩国	PAL - XFEL	0.10 ~ 10.00nm	常温	2016
中国(北京)	BFEL	5 ~ 50 μm	常温	退役
中国(合肥)	FELiChEM	2.5 ~ 200 μm	常温	在建
中国(成都)	CTFEL	71.4 ~ 428.5 μm	超导	2017
中国(成都)	WILL	2.4 ~ 3000 μm	超导	规划
中国(大连)	DCLS	50 ~ 150nm	常温	2016
中国(上海)	SDUV - FEL	150 ~ 350nm	常温	2009
中国(上海)	SXFEL	2 ~ 20nm	常温	2020
中国(上海)	SHINE	0.05 ~ 3.1nm	超导	在建

表 3 2018 年版 AFRL 机载激光武器发展路线图

Tab. 3 2018 AFRL airborne laser weapon development roadmap

阶段	时间范围	试验预期
第一阶段	2018—2021 年	基于数十千瓦级高能激光, 演示毁伤红外制导空空导弹和传感器。
第二阶段	2021—2025 年	基于 100 kW 级高能激光和第 4 代、第 5 代战机, 演示针对飞机平台自卫的中距离导弹和飞机毁伤及对地面硬目标的超精确打击。
第三阶段	2025—2029 年或之后	基于 300 kW 级高能激光和第 6 代战机, 演示对视距外飞机、射程内飞行硬目标和地面硬目标的毁伤。

表 4 美陆军目前正在开展的高能激光项目

Tab. 4 High energy laser project currently being carried out by US Army

名称	装载平台	功率要求/ kW
紧凑型激光武器系统(CLAWS)	小型通用任务车	2.5、10
先进高能测试系统(ATHENA)	集装箱	30
车载高能激光演示验证器(HEMTT/原名 HEL - MD)	重型增强机动性战术卡车(HEMTT)	50
高能激光战术车辆演示器(HEL - TVD)	中型战术车辆(FMTV)	100
机动实验型高能激光器(MEHLE)	Stryker 装甲车	5、10
多任务高能激光器(MMHLE)	Stryker 装甲车	50
间接火力防护能力 - 高能激光(IFPC - HEL)	Stryker 装甲车	250 ~ 300

3.4 德国

德国莱茵金属公司和欧洲导弹集团(MBDA)德国公司为德国激光武器研制的核心机构,得到了德国联邦国防军的大力支持,充分利用商用现成光纤激光器,研制各自的高能激光器验证机。2019年8月,两者宣布,将以德海军K130护卫舰为搭载平台,共同为德海军研制高能舰载激光武器样机。2014年1月,德国莱茵金属公司防务公司50 kW“空中卫士”防空高能激光武器系统成功通过了靶场测试;2016年,完成了10 kW级光纤激光武器的上舰测试^[16];2020年11月26日,宣布将对20 kW激光武器样机进行海试;该公司目前正在研发功率为100 kW的激光武器,有望在未来3到5年内推向市场。

3.5 俄罗斯

俄罗斯继承了前苏联在高能激光项目的技术和唯一遗产A-60飞机载兆瓦级CO₂激光器,2020年3月报道,俄罗斯别里耶夫设计局(Beriev)推出了基于伊尔-76MD-90A大型运输机改装的A-60激光武器载机并已申请专利。俄罗斯在控制激光束质

量和使激光束通过大气层传输等方面处于世界领先水平。2018年3月,俄罗斯总统普京披露了Peresvet移动式高能激光武器系统。2019年12月,首个配备Avangard导弹和Peresvet激光武器的俄罗斯军团执行了战斗任务,Peresvet激光武器就是用来执行陆基机动式战略导弹系统在阵地地域的战斗值班任务。2019年2月,俄罗斯电子控股公司研制的Filin 5P-42的激光视觉干扰武器装备,已成功交付到俄海军的“戈尔什科夫”号和“卡萨托诺夫”号导弹护卫舰,每艘护卫舰都装备了两套系统。

4 国外高能激光武器集成演示验证状况

20世纪60年代,世界上第一台激光器问世以来,美国、德国、以色列、俄罗斯等国积极开展二氧化碳、化学高能激光武器技术,并取得了积极进展。21世纪后,美、德等国将研究重点转向固体激光及其武器化技术,在固体激光光源、系统集成验证方面达到了世界领先水平。表5~表7分别汇总了国外目前正在实施的空基^[1,14,17]、陆基^[15,17-18]、海基^[15-17,19-20]高能激光武器项目集成演示论证状况。

表5 空基高能激光武器集成演示论证状况

Tab. 5 Integrated demonstration of space based high energy laser weapon

国家	项目	时间	集成演示论证
美国	亚瑟王神剑项目(Excalibur)	2014.03	DARPA宣布亚瑟王神剑项目(Excalibur)获得进展,已成功验证了由三组光纤激光器组成的21束光学相控阵低功率激光器精确命中7KM意外的目标
美国	DARPA持久项目(Project Endurance)	2013	该项目是亚瑟王神剑项目(Excalibur)的延续,旨在发展飞机适配的吊舱式激光武器
美国	DARPA航空自适应/航空光束控制(ABC)转塔项目	2014	根据DARPA和AFRL授予的合同,洛马公司在圣母大学和AFRL的协作下,完成了ABC转塔样机的8架次的飞行测试
		2014.12	洛马公司机载激光武器专家对ABC转塔上的激光器原型样机进行了适航试验,各部件均符合美空军和联邦航空局的适航要求
美国	自卫高能激光演示样机(SHIELD)	2015—2029	该项目由AFRL主导,计划2021年前实现毁伤红外制导空空导弹和传感器的能力,2025年具备打击中距离空空导弹和对地面硬目标进行超精确打击能力,2029年或之后具备能够打击视距外飞机的能力
		2019.04	AFRL在新墨西哥州白沙导弹靶场对SHIELD系统的地面测试替代品“示威者”(DLWS)进行了测试,在战斗中参与并击落了多枚空射导弹
		2021	原计划于2021年进行的首次战斗机SHIELD试验,因新冠疫情和其他技术因素,推迟到2023年进行
美国	下一代紧凑型环境先进激光(LANCE)	2017	作为SHIELD项目激光子系统,洛马公司Aculight部门开始研究最先进的激光技术,以评估可安装于喷气式战斗机战术飞机上的小型激光武器的操作实用性
美国	紧凑型高能激光器子系统工程评估计划(CHELSEA)	2019.01	该项目主要寻求能够显著增加SHIELD及其激光光子系统LANCE功率的技术,数据和结果可用于指导政府2024年后的技术投资决策”。
俄罗斯	A-60机载激光武器系统	2020.03	俄罗斯别里耶夫设计局(Beriev)推出了基于伊尔-76MD-90A大型运输机改装的A-60激光武器载机并已申请专利

表 6 陆基高能激光武器集成演示论证状况

Tab. 6 Integrated demonstration of land based high energy laser weapon

国家	项目	时间	集成演示论证
美国	紧凑型激光武器系统 (CLAWS)	2019. 06	国防部批准的第一台地面激光器 2kW 版本交付美海军陆战队使用
		2019. 10	在俄克拉荷马州希尔堡举行 SDPE 和 MFIX 项目演示活动中,首次使用配备在标准集装箱上 CLAWS 系统的操作人员成功制伏了大约 30 个目标,在演习过程中,向马里兰州安德鲁斯空军基地操作人员传输实时视频和威胁读数
		2020. 09	波音公司宣布,在内华达州内利斯空军基地进行的实地测试期间,成功保护了一支部队保护车辆免受无人机系统的攻击
美国	先进高能测试系统 (ATHENA)	2017. 03	洛马公司完成 60 kW 级激光器演示验证,打破世界同类型激光器的最高纪录
		2017. 09	美陆军与洛马公司在新墨西哥州白沙导弹靶场完成 30 kW 级试验,成功击落 5 架无人机(翼展 10.8 m),命中率为 100 %
		2019. 11	洛马公司在俄克拉荷马州希尔堡演示了 ATHENA 系统,成功击落多架固定翼和旋翼无人机
美国	车载高能激光演示验证器 (HEMTT/原名 HEL - MD)	2016	陆军将更紧凑的光源集成到重型增强机动性战术卡车 (HEMTT) 后,HEL - MD 更名为 HELMTT
		2016	参与 MFIX 2016,击毁 15 架无人机
		2018	在新墨西哥州白沙导弹靶场测试 50 kW 级激光器
美国	高能激光战术车辆演示器 (HEL - TVD)	2019. 05	美陆军与 Dynetics 公司签订了价值 1.3 亿美元的 100kW HEL - TVD 研发合同
		2019. 11	该项目完成关键设计评审
		2022 财年	该项目将演示目标获取、追踪、瞄准点选择和维护等功能,从而克制 RAM 威胁 (IFPC Inc II - 1)
美国	机动实验型高能激光器 (MEHEL)	2016	1.0 版 2 kW 激光系统在试验中成功击毁无人机
		2017	升级为 2.0 版,激光器功率从 2kW 升级到 5kW,可对 1 类无人机实施打击;在演习中,击败多架小型固定翼和旋翼无人机
		2018. 04	在欧洲联合作战评估有限实弹演习中,美国第二骑兵团的士兵成功进行了 MEHEL 实弹演练;正在升级到 3.0 版 10kW 激光系统
美国	多任务高能激光器 (MMHEL)	2018—2021	美陆军计划在 Stryker 装甲车上集成 50 kW 级激光器,为陆军的机动旅提供短程防空支援,作为机动近程防空 (M - SHORAD) 的解决方案
美国	间接火力防护能力 - 高能激光 (IFPC-HEL)	2019 年底	美国国防部长办公室与美陆军快速能力与关键技术办公室签订了高能激光武器定标计划 (HEL SI),推动 HEL - TVD 的计划顺利实施
		2020. 01	美陆军修改已有的合同以支持持续提高激光武器能力,着手研发 250 ~ 300 kW 的激光武器,标志着正式向 IFPC - HEL 过渡
		2022 财年	Dynetics 公司 (IFPC - HEL 主承包商) 将在 2022 财年展示一个 300 kW 级样机
		2024 财年	最终目标就是在 2024 财年组建一个由 4 套防御组成的排级单位实现“高能激光 - 间接火力防御能力” (HEL - IFPC)
美国	车载反无人机激光样机 - 高能激光武器系统 (HELWS)	2019. 10	美空军接受了一台 HELWS,该系统被派遣到海外进行为期一年的战场测试,进入实地评估阶段
美国	美陆军组织的机动与火力集成演示作战,进行了定向能反无人机测试	2019. 10— 2019. 11	有 5 种激光与高功率微波系统参加了此次测试,分别是“蝗虫” (LOCUST) 反无人机激光武器系统、CLAWS、ATHENA、MEHEL 和 AFRL 的“战术大功率作战响应器” (THOR) 微波武器,拦截试验共成功拦截 808 架无人机,单次最大同时拦截 20 架无人机,首次实现了多个反无人机系统联合作战,并成功联入了美陆军指挥与控制 (C2) 系统
德国	MBDA 德国分公司基于反射镜光学波束形成技术研制出了一种高能激光器	2016. 10	已对其进行了一系列陆上试验。MBDA 德国分公司成功在德国北海沿海的一个军事训练基地,对基于反射镜光学波束形成技术研制的一种高能激光器进行了真实环境条件下的试验。

续表 6 陆基高能激光武器集成演示论证状况

Tab. 6 Integrated demonstration of land based high energy laser weapon

国家	项目	时间	集成演示论证
德国	德国莱茵金属公司研制了“天空卫士”先进激光武器	2013.01	在莱茵金属公司位于瑞士的奥森博登试验基地测试了该型激光武器 50kW 的功效,成功切割 1 km 外 15 mm 厚钢梁,击落 2 mile 外的几架俯冲靶机
		2014.01	成功通过了靶场测试
德国	德国莱茵金属公司研发了功率可达 100kW 新型激光站	2018.12	在瑞士的奥森博登试验基地测试了新型激光器的运行,成功演示了较快的响应速度和高的精准度,可以装备 100 kW 输出功率内的激光;计划将该激光武器站与即将上市的 20 kW 激光源装配使用
		2019.12	在瑞士的奥森博登试验基地成功测试了集成在战车上的激光武器,展示了在相关作战距离打击无人机和迫击炮等作战能力运用
俄罗斯	Peresvet 移动式高能激光武器系统	2018.03	俄罗斯总统普京披露了 Peresvet 移动式高能激光武器系统
		2018.07	俄罗斯军方发布了 Peresvet 车载激光武器,由两个大型拖车装载一体化激光发射装置和多个指挥/支援车组成,主激光武器外形酷似大型货运集装箱
		2018.12	该系统开始试验战斗值班
		2019.12	首个配备 Avangard 导弹和 Peresvet 激光武器的俄罗斯军团执行了战斗任务
土耳其	ASELASN 公司研制了激光防御系统(LSS)	2018	ASELASN 公司开发的激光防御系统(LSS)成功通过测试,该系统是为反微型无人机而开发的,有效毁伤距离为 500 m
		2019.08	土耳其激光战车分队成功击落哈尔塔尔国民军的“翼龙 2”无人机,开启了激光武器实战运用的先河
以色列	Ironbeam 空防系统	2014.02	该系统首次亮相于新加坡航展,采用光纤激光器,在 100 测试中,成功瞄准迫击炮和火炮并且摧毁小型无人机
		2016	2016 年底正式服役,旨在摧毁近距离火箭火箭弹、火炮以及迫击炮弹,担任以色列空防系统的第五元素
以色列	Drone Dome-L 反无人机系统	2019.12	以色列拉斐尔先进防务公司(Rafael)研发的 Drone Dome-L 反无人机系统在以色列南部开展了首场现场演示,展示了多无人机端到端探测、追踪和激光拦截能力
韩国	基于激光的防空武器系统(LBAAW) block I	2019.09	LBAAW 是由韩华公司与韩国国防发展局(AAD)联合开发的,block I 发射功率为 20kW,采用固定式系统模式,主要用于要地防空,预计 2023 年前研制完成
	LBAAW block II	2020.12	block II 发射功率为 30kW,安装在卡车上,作为机动式野战防空使用

表 7 海基高能激光武器集成演示论证状况

Tab. 7 Integrated demonstration of sea based high energy laser weapon

国家	项目	时间	集成演示论证
美国	固态激光技术成熟化项目(SSL-TM)	2015.10	国防部宣布诺格公司在项目竞争中获胜
		2018.01	海军宣布将在“波特兰”号两栖登陆舰(LPL-27)上安装该系统
		2020.05	在“波特兰”号两栖登陆舰(LPL-27)上对 150 kW 的“激光武器系统演示器(LWSD) MK. 2. MOD. 0”进行海上测试,成功击毁一架无人机,这是高能级固态激光器首次在系统级别的应用
美国	增强型高能激光项目(RHEL)	2020 财年	据报道是一种采用不同激光架构的 150kW 激光系统,具备产生更大能量激光束的潜力。RHEL 项目由美通用公司负责,2020 财年计划开展在典型舰船振动/运动/冲击/环境下的测试
美国	海军光学眩目拦截器项目(ODIN)	2019.12	美海军在阿利·伯克级驱逐舰“杜威”号上安装了 ODIN 系统,据称该系统能够对抗各种带有光电/红外传感器的舰艇或飞行器,以及巡航导弹甚至弹道导弹
美国	集成光学眩目与监视的高能激光项目(HELIOS)	2019.01	美海军与洛马公司签订了价值 1.5 亿美元的采购合同,要求洛马公司交付两套 HELIOS 系统,一套系统将被安装在阿利·伯克级驱逐舰(DDG-51)上,另一套在新墨西哥州白沙靶场接受测试;该项目旨在快速研发和部署意向集成了 60 kW 级的激光(具备扩展到 150kW 的潜力)和眩目器的武器系统,用于对抗无人机、小艇、情报监视侦察传感器以及作战识别和战损评估

续表 7 海基高能激光武器集成演示论证状况

Tab. 7 Integrated demonstration of sea based high energy laser weapon

国家	项目	时间	集成演示论证
美国	拦截反舰导弹的高能激光项目 (HELICAP)	2019	启动高能激光武器技术研发项目,2019 财年申请经费 950 万美元,2020 财年申请经费超过 3800 万美元,计划 2022—2023 财年开展试验验证;项目最终提供一台 300kW 以上的高能激光武器演示样机,使舰载战术激光武器可用于截袭来袭的反舰导弹
德国	MLG27 轻型舰炮集成 10 kW 级光纤激光器	2015. 09	德国莱茵金属公司与联邦国防军队对安装在 MLG27 轻型舰炮上的一种 10 千瓦级的光纤激光器系统进行了协同海上试验,内容包括:跟踪无人机、小型水面艇等潜在目标
德国	基于反射镜光学波束形成技术研制的 10 kW 级光纤激光器	2016. 10	MBDA 德国分公司在德国北海沿海的一个军事训练基地,完成了该激光器的舰上测试,验证了在真实环境下、高海况情形下跟踪、捕获空中目标能力
德国	以德海军 K130 护卫舰为搭载平台的激光武器样机	2019. 8	德国莱茵金属公司和欧洲导弹集团(MBDA)德国公司宣布,将以德海军 K130 护卫舰为搭载平台,共同为德海军研制高能舰载激光武器样机
德国	20kW 级激光武器样机	2020. 11	莱茵金属公司宣布,将对 20 kW 激光武器样机进行海试试验,将搭载在德海军 F124 型护卫舰“萨克森”号上,进行预期 1 年的海上试验,以验证激光武器在真实海洋环境中的使用效果,获取相关关键数据
俄罗斯	Filin 5P - 42 “激光视觉干扰”武器	2019. 01	对俄海军的“戈尔什科夫”号装备的两套俄罗斯电子控股公司研制的 Filin 5P - 42 进行了最后的测试,测试发现,照射视图攻击视觉干扰站的测试者,测试者均无法正常瞄准目标,甚至出现幻觉和呕吐反应
		2019. 02	成功交付俄海军“戈尔什科夫”号和“卡萨托诺夫”号导弹护卫舰各两套系统 Filin 5P - 42 武器装备;俄计划在所有正在建造的轻型护卫舰和巡逻艇上安装该武器
英国	Dragonfire 激光定向能武器	2017. 01	英国国防部与国防、科学和技术实验室签订 3000 万英镑合同,用于研发 Dragonfire 激光定向能武器,计划 2019 年生产出演示样机

5 外军高能激光武器发展启示

结合高能激光器研究现状,从近几年国外空基、陆基、海基高能激光武器项目研发进展来看,呈现出以下几种趋势。

5.1 固体激光器是各国高能激光器重点发展倾斜对象

从美国机载激光武器项目试验论证过程中,化学激光器输出功率早已达到了战术兆瓦级的输出目标,但由于其体积、污染问题、机动性及相关技术难题,逐步让步于固态激光器。固态激光器因此得到了飞速发展,目前实现 100 kW 激光输出的激光器技术路线主要是板条、浸入式液冷薄片、和光纤激光器。梳理国内外固体激光器各种技术路线,结合相关技术特点,可以得出:光纤激光技术因其高效率、高可靠性及高光束质量特点,在 200 kW 以下功率输出等级内,更占优势;但因其材料强度及对光束质量要求,可能难以满足 300 kW 以上高功率激光输出的战术任务要求;而

以板条为代表的块状固体激光器的兆瓦级输出功率关键技术已获得突破,是目前实现兆瓦级功率输出的最佳选择^[6]。

5.2 舰载平台是激光武器系统重点发展平台

相比于空基(机载)和陆基(车载)平台,舰载平台具有良好的适装性,现役的大型水面舰艇(美海军“波特兰”号两栖登陆舰已搭载 150 kW 激光武器进行海上测试验证)能为激光武器提供足够的电源功率、安装空间和制冷能力,且具有较好的自防御能力和信息保障能力,可根据任务需求灵活选择激光器类型。较好的环境适用性是舰载平台另一大特点,良好的通视性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作用,海上相对较弱的大气湍流更有利于激光束的传输。自 2019 年美海军已开展电力“能量库”计划的相关研究,旨在解决制约舰艇发展的能量系统技术瓶颈问题,为定向能武器等高能任务系统的提供电力的同时,保护能量系统及平台其他系统不受任

务系统产生的脉冲的影响,舰艇综合电力系统正逐步走向实战舞台^[29]。舰载激光武器的成熟度相对较高,极有可能率先舰载实装,促进舰艇综合电力系统技术进步,两者的相互结合,将极大地促进舰载能量系统的利用效率,起到“倍增器”的作用。其次,舰载激光武器可以很好地弥补舰艇防空反导体系的短板,填补高超声速、大仰角俯冲目标拦截手段空白,为应对低价值、非对称目标提供低成本、软硬杀伤兼备、可持续作战的隐蔽攻击手段。

5.3 战术激光武器是激光武器系统应用研究方向的转变

随着美国引领的世界军事变革和装备技术的发展,使得美国在技术领域相比于其他国家虽优势依然显著,但在核心技术和杀手锏武器装备上不再一家垄断,百花齐放。纵观美国的发展历史,从美苏冷战到苏联解体,美军失去唯一军事抗衡敌手,成就世界军事霸主地位;从海湾战争到伊拉克战争,美军意识到用先进的武器装备来支撑打赢高技术条件下局部战争;从“空海一体战”到第三次“抵消战略”的提出,美国根据国际形势、安全环境和国家军事利益不断调整战略重心,把高能激光武器系统研发的重点由战略激光武器逐步向应对灵活的战术目标为主的战术激光武器转变。高能激光武器的主要战术目标就是精确制导武器,不妨大胆设想:如果光束能量足够大、光束质量足够好,那么来袭数量对于高能激光武器就不是问题,反导问题有望被解决,制导武器将会失去作战意义,对抗天平将会彻底失衡,影响战争走向。

5.4 跨领域深度合作是激光武器系统技术走向成熟的必经之路

从世界各国高能激光武器研究现状来看,存在各军工企业研究成果相对分散,优势领域不同的现象。以美国正在发展的 SHIELD 项目为例,其气动集成吊舱子系统由波音公司负责,光束控制子系统由诺格公司负责,高能激光光子系统由洛马公司负责研制,集大家之所长,美国走的是共同合作研发的模式^[14]。高能激光武器系统研究本就是一个复杂且庞大的系统工程,涉及到光学、热力学、图像处理等多个基础学科,同时还涉及了光束控制器、传感器和转塔等多个核心元器件,需要从国家层面,集结相关优势学科的科研院所和具备研发条件基础的军工企

业,进行跨领域深度合作来,来促进激光武器系统技术走向成熟,否则独木难支,很难迈向世界前沿技术。

5.5 创新驱动是促进激光武器系统走向实战化的推手

创新驱动的核心要素就是科技创新,而基础研究是整个科学体系的源头,是所有技术问题的“总开关”,是技术进步的先行官。习近平总书记指出:“我国面临的很多‘卡脖子’技术问题,根子是基础理论研究跟不上,源头和底层的東西没有搞清楚”。俄罗斯就十分注重基础理论研究,其在控制激光束质量和使激光束通过大气层传输等方面处于世界领先水平。同时推动科技成果转化也是重要一环,基础研究的重大突破,也需要转换,才能形成生产力,以激光器发展为例,从 20 世纪 60 年代第一台激光器诞生至今,经历了多种形式,固态激光器的出现,弥补了化学激光器在体积、重量和环保的缺点,自由电子激光器更是因其频率可连续调谐、光束质量好等优点在高科技领域发展的风生水起。其次,人才驱动是创新驱动的实质,只有创新人才队伍建设,加大创新项目研究和攻关力度,燃起基础理论研究主力军的高校院所对高精尖技术的研究热情和创新动力,才能稳步推进激光武器系统走向实战化。

参考文献:

- [1] Liu Lihui, Tan Bitao, Zhang Xueyang, et al. The airborne laser project in the United States[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 137-142. (in Chinese)
刘李辉, 谭碧涛, 张学阳, 等. 美国机载激光武器发展-ABL 计划[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 137-142.
- [2] Marmo J, Injeyan H, Komine H, et al. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, San Jose, 2009.
- [3] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [4] Tang Chun. Active beam quality control technology for high energy solid laser system[C]//The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, Chengdu, 2019. (in Chinese)
唐淳. 高能固体激光系统光束质量主动校正技术[C]//第四届大气光学及自适应光学研讨会, 成都, 2019.

- [5] Guo Yading. Beam quality control technology for high energy solid laser system [C]//The Fourth Symposium on the Development of Atmospheric Optics and Adaptive Optics, Chengdu, 2019. (in Chinese)
郭亚丁. 高能固体激光自适应光学光束质量控制 [C]//第四届大气光学及自适应光学研讨会, 成都, 2019.
- [6] Tang Xiaojun, Wang Gang, Liu Jiao, et al. Development of high brightness solid-state laser technology [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 49 - 55. (in Chinese)
唐晓军, 王钢, 刘娇, 等. 高亮度固体激光器技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 49 - 55.
- [7] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240 - 13266.
- [8] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10kW [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America, 2009; CThA3.
- [9] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C]//CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America, 2013; AF2J. 1.
- [10] Dang Wenjia, Li Zhe, Li Yuting, et al. Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers [J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 676 - 694. (in Chinese)
党文佳, 李哲, 李玉婷, 等. 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2020, 13(4): 676 - 694.
- [11] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. Fiber Lasers XVII: Technology and Systems [C]//San Francisco, California, United State, 2020; 1126022.
- [12] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-berthelemot A, et al. Power scaling of fiber lasers with all-fibre interferometric cavity [J]. Electronics Letters, 2002, 38(14): 692 - 693.
- [13] Li Peng, Li Ming, Wu Dai, et al. Development strategy of free electron laser technology in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 35 - 41. (in Chinese)
李鹏, 黎明, 吴岱, 等. 我国自由电子激光技术发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 35 - 41.
- [14] Cao Qiusheng, Lu Jing, Liu Jianguang, et al. From SHIELD to look into anti-missile capability and technical challenge of airborne laser weapon [J]. Journal of CAEIT, 2019, (5): 443 - 451. (in Chinese)
曹秋生, 路静, 柳建光, 等. 从 SHIELD 看机载激光武器的反导能力和技术挑战 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, (5): 443 - 451.
- [15] Wu Shang. The latest development status and trend of american high energy laser weapons [J]. Military Digest, 2020, (3): 40 - 44. (in Chinese)
伍尚慧. 美国高能激光武器最新发展现状及趋势 [J]. 军事文摘, 2020, (3): 40 - 44.
- [16] Wang Qian, Feng Hanliang. Development status of high energy laser in rhinmetal [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017, (7): 3 - 8. (in Chinese)
王茜, 冯寒亮. 德国莱茵金属公司高能激光的发展现状 [J]. 飞航导弹, 2017, (7): 3 - 8.
- [17] Cheng Li, Tong Zongcheng, Liu Wanji. Present status and tendency of foreign laser weapon [J]. Shipboard Electronic countermeasure, 2019, 42(2): 56 - 58. (in Chinese)
程立, 童忠诚, 柳旺季. 国外激光武器的发展现状与趋势 [J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(2): 56 - 58.
- [18] Yu Hualong, Wu Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles [J]. National Defense Technology, 2019, 40(6): 42 - 47. (in Chinese)
禹化龙, 伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展 [J]. 国防科技, 2019, 40(6): 42 - 47.
- [19] He Qiyi, Zong Siguang. Research progress and consideration of shipborne laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(12): 1455 - 1460. (in Chinese)
何奇毅, 宗思光. 舰载激光武器发展进展与思考 [J]. 激光与红外, 2017, 47(12): 1455 - 1460.
- [20] Zhang J J. Development of shipboard laser weapon system [J]. Ship Electronic Engineering, 2016, (6): 17 - 20.