

文章编号: 1001-3806(2015)06-0834-06

舰载激光武器的研制进展

易亨瑜, 齐 予, 黄吉金

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 美国海军激光武器系统(LaWS)作为第 1 套海军的固体激光武器样机,已经安装在现役军舰庞塞号上。介绍了 LaWS 系统的应用需求、研制团队及系统结构,分析了激光器、发射装置及控制系统的构成,并由系统参量评估了 LaWS 系统的作战性能。回顾了 LaWS 系统已进行的系列演示试验,总结了每次试验暴露的技术问题及采取解决途径。由分析可知,LaWS 系统的发射装置采用了天文望远镜的共孔径设计方式;作战光源采用了光纤激光器的非相干合成;在系统集成中,除了少量的定制部件外,广泛采用了工业激光器、惯性测量装置、传感器、视频跟踪器等大量商用器件;LaWS 系统在研制中采用了逐步改进的方式,这些都在一定程度上减少了系统风险和研制成本。最后分析了其下一步的技术发展方向。

关键词: 激光技术;激光武器系统;分析;高能激光;商业现货;海军

中图分类号: TJ953

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.022

Development of ship-based laser weapons system

YI Hengyu, QI Yu, HUANG Jijin

(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: As the first navy demonstrator of high energy solid-state laser weapon, the laser weapons system (LaWS) of US Navy was deployed on US Ponce warship. Firstly, application goal, development team and system configuration of LaWS were introduced. Laser, transmitting telescope and control system were analyzed in detail. Fighting capability of LaWS was deduced from its system parameters. A series of demonstration tests of LaWS were reviewed. Technical issues exposed in tests and the corresponding solutions were summarized. The analyses show that common aperture design was used in the transmitting telescope of LaWS system; incoherent synthesis of fiber laser was used as light source of combat. In system integration, apart from a small amount of custom parts, a large number of commercial off-the-shelf (COTS) were used widely, such as industrial lasers, inertial measurement unit, sensor and video trackers. LaWS system used the progressive improvement in the development to reduce systemic risk and development costs to some extent. Technical development trends of LaWS in the future were analyzed in the end.

Key words: laser technique; laser weapons system; analysis; high energy laser; commercial off-the-shelf; navy

引 言

自二战伊始,航母战斗群、大型战舰已成为世界强国争夺海洋利益的主要利器,具有强大的攻击能力,但其自身也容易遭受敌方飞机、反舰导弹的攻击。1967 年第 3 次中东战争,以色列的“埃拉特”号驱逐舰被小型快艇发射的“冥河”导弹击沉;1982 年马岛海战,英方“谢菲尔德”号驱逐舰和“大西洋运输者”运输舰被

阿根廷飞鱼导弹击沉……。20 世纪 90 年代以来,随着新一代超音速、高机动反舰导弹的问世,舰船面临的威胁越来越大。为应对威胁、提高舰艇的生命力和作战力,需要装备新型反导武器。激光武器就是其重要的选择之一。

2013 年 4 月有报道称美海军将于 2014 年在“庞塞”号军舰上部署固体激光武器样机,加入中东巡逻的第五舰队序列中^[1-2]。五角大楼计划是用此样机来打击伊朗部署在波斯湾的小型侦察机和装甲快艇,起到保护舰队的作用。对报道照片进行分析,判断该激光器极有可能就是美国海军的舰载激光武器系统(laser weapons system, LaWS)样机。

参考文献[3]~参考文献[5]中分别报道了 LaWS 系统 2009 年、2010 年的两次试验情况。作者在多年跟踪和全面收集资料的基础上,对其进行了深入研究,

基金项目:中国工程物理研究院规划发展研究课题基金资助项目(GH14-Z-12);中国工程物理研究院应用电子学研究所自研课题基金资助项目(2014XXZY01)

作者简介:易亨瑜(1969-),男,博士,高级工程师,从事激光技术的研究。

E-mail: yihengyu1@sina.com

收稿日期:2014-10-11;收到修改稿日期:2015-03-17

剖析了 LaWS 的系统结构和作战性能,评述了该系统的系列演示试验的目标及技术进步,探讨了其未来技术发展方向。

1 立项背景

高能激光武器很早就受到美军的高度关注,近年来为了实施“空海一体战”概念,海军高级将领将激光武器项目作为最优先计划,以解决“反介入/局域拒止”关键能力上的不足。1971 年成立了海军高能激光计划管理办公室,2002 年 1 月建立了海军定向能武器项目办公室,2004 年 7 月特许成立了定向能和电能武器项目办公室^[6]。LaWS 系统是美国海军第 1 套成功研制的舰载高能固体激光样机。

在 2007 年系统研制启动时,LaWS 最初的作战目标是火箭弹、炮弹、迫击炮弹(rockets, artillery and mortars, RAM)及无人机(unmanned aerial vehicles, UAV);之后随着无人机威胁的日益增大,该系统的主要作战任务转变为反无人机。其次在交战中,高能激光还能有效地干扰敌方飞机、汽车或潜艇等的传感器,并指引热寻的导弹打击快速运动目标。随着激光器输出功率技术上可行的上限功率的定标放大,LaWS 系统还可用来防御其它威胁,如小船、便携式防空系统和浮动水雷等。另外在交战前,也可利用其光学传感器来提高对潜在威胁目标的识别能力和监控距离,以确定目标意图,从而为舰队指挥官的作战决策提供重要依据;同时还可作为非致命武器,警告对方。

2 系统结构及特性

LaWS 样机可以独立运行或作为现役密集阵武器的附件。不过到目前为止,LaWS 样机都是独立运行的。

2.1 系统总体结构

LaWS 系统主要由发射平台(机动跟踪平台、发射望远镜)、作战光源、测距仪、目标跟踪传感器和控制

系统五部分组成。在 LaWS 系统的主要研制单位中,海军定向能武器办公室是系统集成的行政领导和技术负责人;雷声公司是系统集成的合同承包商和密集阵装置的生产商;IPG 公司提供成熟的工业光纤激光器模块;宾夕法尼亚州光电中心负责研制发射望远镜装置,其底座采用 L-3 通讯公司生产的机动跟踪平台;海军水面作战中心达尔格伦分部提供系统硬件研制场地;另外还有多家单位给予技术支持。

如图 1 所示,6 束 IPG 光纤激光器输出的高能激光通过光纤导入望远镜再进行光束发射;在望远镜左臂上,安装了一台商用的激光照明器和雪崩光电二极管测距仪;在望远镜右臂上,安装了一个宽视场的中波红外粗跟踪传感器。它们的视场轴与激光光束一致。

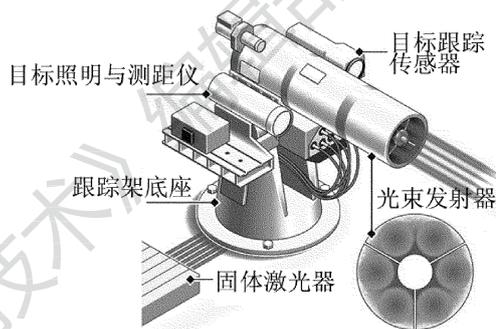


图 1 LaWS 系统结构示意图

作战中,激光武器需要输出一个高亮度光斑,并使其能持续打击在目标上的固定部位。在海洋环境中,不仅需要高分辨率的精密跟踪传感器,提高跟踪和指向部件的系统性能指标,而且需要一个稳定的集成平台,以及合适的光学和惯性传感部件来减轻集成平台的振动。这些部件及控制系统在集成后位于军舰甲板下方。

图 2 为 LaWS 控制系统的功能连接框图,其核心部件是 L-3 公司定制的数字化控制器软件,软件固化在一个嵌入式的单片英特尔电脑中。作战时,外部雷达获取目标信息,进入 LaWS 系统的预测逆控制部件,转化为武器系统的本地坐标系;然后经过数字化控制

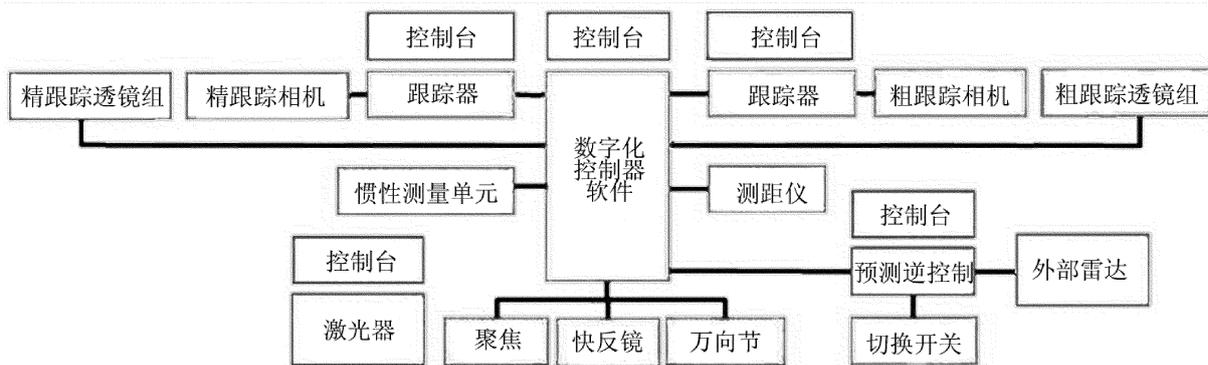


图 2 LaWS 控制系统功能框图

器软件,发送目标在望远镜俯仰和水平上的位置信号,指导万向节对准目标;其次根据宽视场粗跟踪相机采集的目标数据,切换到跟踪模式,通过粗跟踪视频跟踪器执行跟踪任务。

在模式转换后,通过粗追踪器和惯性测量单元得到的惯性率测量值,用于目标视线误差的计算,来引导系统控制万向节和快速倾斜镜。在这个运行过程中视差得到了校正,之后系统能够指向目标,并通过可见光传感器过渡到精跟踪模式。在精跟踪模式中,启动精跟踪视频跟踪器计算得到视线误差,并由雪崩二极管测距仪器测量目标距离,指导望远镜对目标进行聚焦,最后发出激光开火指令。

2.2 系统性能分析

LaWS 概念是通过商用光纤激光器简单的非相干途径来实现军用激光器。2004年由宾夕法尼亚州光电中心提出,2006年通过了海军研究实验室的详细论证。LaWS的核心部件广泛使用了激光器、传感器、控制技术商业现货供应产品,来构建激光武器系统,一定程度上减少技术风险和系统成本。大量采用商品化的工业产品,有助于提高系统的稳定性及器件的可维护性。另外,由于现有的舰船甲板上缺乏激光系统的安装空间,因此激光系统的小型化因素是至关重要的。采用光纤激光器作为作战光源,由于其输出光纤可以弯曲,可以节省昂贵的折轴光学系统,从而大大降低了系统体积和集成成本,并最终实现在现有武器系统上的集成和系统改造。

LaWS 光学发射器提供了光束稳定装置,通过对多路激光器输出光束的准直和远场聚焦,来实现光束发散度的降低、精密的高功率光束指向精度、多个传感器的精确指向和稳定跟踪,以及目标照明。直径为几米、高光学质量的反射式望远镜,主要应用于天文学;而用作高能激光的光束发射器,望远镜的直径不应大于1m,这样才能控制系统尺寸、并保持敏捷性。光束发射器的角加速度和速度的最大值必须在 1rad/s^2 和 1rad/s 左右,以便实现激光束的快速转向。因此 LaWS 系统的发射口径选择为 $66\text{cm}^{[7]}$ 或 $50\text{cm}^{[8]}$ 。

作战光源是激光武器的核心部件。IPG 公司的光纤激光器在 2009 年 6 月才达到单模 10kW 的连续波输出 30%^[9]。LaWS 系统研制启动于 2007 年,为了使光纤激光达到战术级数十千瓦级的杀伤力,必须采用光束合成装置。

在 LaWS 高功率激光器上,为减少研制和采购成本,海军采用现货供应的、商用焊接激光器进行两级合成,如图 3 所示。先由 7 台 800W 的 Nd:YAG 光纤激光器^[10]组束为 5.5kW、光束质量 $M^2=6$ 的激光器模块

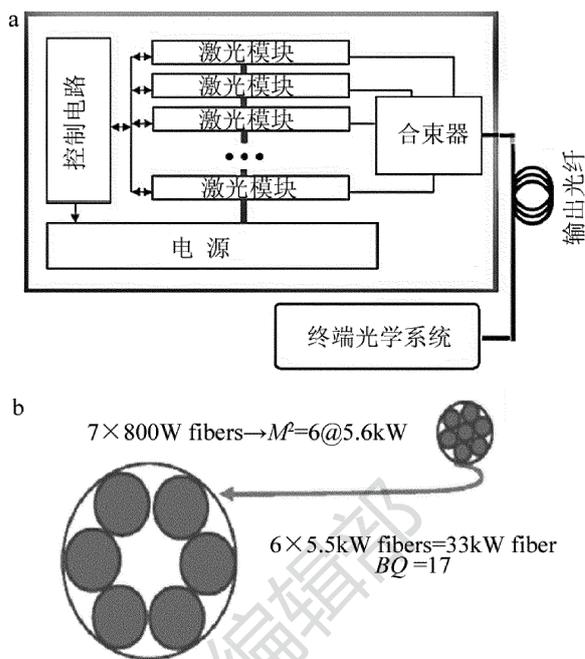


图 3 LaWS 系统的光束合成

a—第 1 级 b—第 2 级

(等效于光束参量积 (beam parameter product, BPP) 是 $1.95\text{mm} \times \text{mrad}$, 优于 IPG 公司目前的产品参量 $2.2\text{mm} \times \text{mrad}$);再由 6 路激光器模块通过非相干合成,合成一束总功率为 33kW、光束质量 BQ 值为 17、波长为 $1.064\mu\text{m}$ 、电光效率为 25% 的高功率激光^[11]。

第 1 级合成装置图如图 4 所示,多个光纤激光器模块作为抽屉,插入一个机柜中,合成为一束大功率激光输出。运行中通过 IPG 公司的 LaserNet 软件,选择性地使用其中一个或几个,而其它预留为备用模块。当其中的某个模块损坏,备用模块会自动开启。它有内控模式、模拟量控制、外控模式和强制控制等 4 种运行模式。

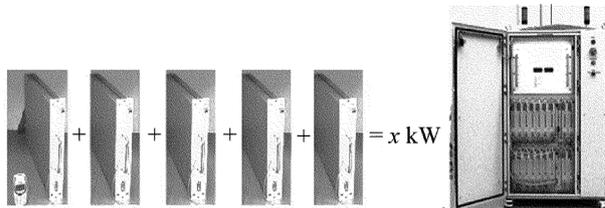


图 4 IPG 光纤激光模块组束装置图

在第 2 级合成中,为了减少研制风险,未采用相干合成的自适应光学相控阵 (adaptive photonic phase locked elements, APPLE) 结构,而是直接将 6 路光纤激光器的输出端捆绑在一起,进行非相干光束合成。这种方式设计简单、无需精密的相位控制技术,增强了作战光源的可靠性;其次这种合成方式对于束带宽没有限制,可以利用目前成熟的工业激光器模块;另外节省了折轴光学系统和甲板空间,这样在武器性能尚未明确前,海军更容易接受;缺点是合成光束质量变差,大

约与通道束的平方根成正比,而且需要较大的发射孔径。

作战中,高能激光对目标的破坏,主要是激光束产生的热使目标加热、烧蚀、熔化、诱导爆炸、燃烧或致盲。目标材料的破坏阈值常用功率密度作为判定指标。对于激光器输出功率为 P 、发射口径为 D 、射程为 L 、激光波长为 λ 、光束质量为 β 的平面聚焦束和高斯聚焦束,激光在目标上的远场功率密度 W 为:

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

式中, r 表示光斑半径。不同大气环境的大气透过率 η 取值不同。可以看到,激光器输出功率越大,沉淀在目标上的功率密度也大;另外激光波长越短、光束质量越好,则激光的打击能力越强。

2010 年试验中,LaWS 的毁伤目标为无人机,而无人机的蒙皮材料大都为复合材料。参考文献[12]~参考文献[13]中的研究结论是:静止状态下复合材料的损伤功率密度阈值是 $14\text{W}/\text{cm}^2 \sim 18.7\text{W}/\text{cm}^2$,其质量烧蚀率随着激光辐射功率的提高而增大。针对 2010 年公布的 LaWS 试验参量,取发射口径 $D = 66\text{cm}$,射程 $L = 3.2\text{km}$,光束质量 BQ 值为 17。根据参考文献[14]和实验经验,光束质量等效于 $\beta = 28.3$ 。当忽略大气影响时,目标上的激光功率密度为 $33.2\text{W}/\text{cm}^2$ 。其差值可能是高速运动导致的风洞效应所致。

3 技术进展

政府/工业研制团队开发 LaWS 系统时采用螺旋式上升的改进方式。在 LaWS 系统开发过程中,大量开创性的研制工作应用于激光器和光束发射器的设计中。后续改进工作主要针对光束控制和预测逆控制单元(predictive avoidance and safety system, PASS)单元领域。

3.1 2008 年系统集成

2007 年,LaWS 系统研制启动,进行任务分析:在理论上预计了威胁目标所需的杀伤力;执行关键零部件和子系统的工业调查;进行广泛的商业权衡分析;设计了一套系统样机;构建了舰载激光系统的定向发射器和装配底座。2008 年完成了系统集成,在实验室环境下对子系统和整体样机进行了多次测试。

3.2 2009 年陆基试验

2009 年,在加州中国湖海军空战中心飞机分部开展了陆基试验,试验目的是验证 LaWS 概念的可行性。根据原定的反 RAM 和反无人机任务,系统被集成在一个静止不动的平台上、而非动态平台上运行。

在一系列重要的打击试验中,该系统成功地实现

了 5 次反无人机试验。每个子系统实现了预定的功能,并为后续技术升级工作提供了重要的试验数据。这些试验成功地验证了交互式工作模式、商业现货想法、非相干组束及共孔径设计方式、武器运行概念。2009 年美国的舰载激光武器 LaWS 系统如图 5 所示。

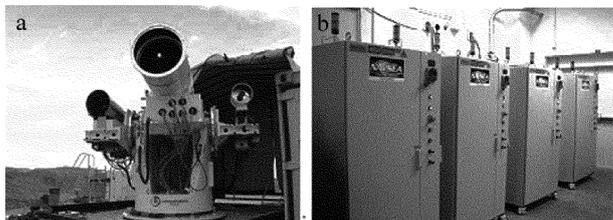


图 5 a—独立平台上的 LaWS b—IPC 激光模块

3.3 2010 年海岸试验

2010 年的试验目的是:证明在海洋环境中系统是有效的;验证“从目标捕获到击落”整个作战概念的可行性。

海洋环境中的盐雾对镀膜光学元件十分有害,因此在光束发射器上集成一个窗口和空气干燥系统。中国湖试验的一个重要发现是,通过伺服控制的光学元件的调节,可以提高系统远场光束质量。该系统由宾夕法尼亚州立大学光电所研制,纳入本次试验。本次试验的另一个改进是,添加三孔径闪烁计数器系统来定量描述海洋环境,它是联合技术办公室资助的一项工作。

2010 年,在美国海军水面作战中心达尔格伦分部的支持下,美国海军海上系统司令部于 2010-05-24 在加州圣尼古拉斯岛的一处海岸陆地上进行的 LaWS 演示试验中,在距离 3.2km 处摧毁了 2 架时速 482km 的无人机。这是在海洋环境下舰载激光武器系统首次对无人机的摧毁演示^[15],如图 6 所示。



图 6 无人机摧毁试验结果

本次试验的亮点是击落 4 架无人机、击毁 1 条小船目标和高能激光武器独有的反侦察能力的可行性验证。几次作战都实现了对来自密集阵武器系统(close-in weapon system, CIWS)雷达的目标捕获数据的使用,验证了系统运行的整体概念。LaWS 系统克服了试验环境中大风、吸收、散射、湍流等困难,这次试验是一个非常重要的发展里程碑,表明以光纤激光器为作战光

源的舰载激光武器关键技术取得重要突破。

3.4 2011年弱光跟踪试验

本次试验目的是验证海洋移动平台上系统对目标的跟踪性能。

在移动平台上进行射击,需要添加一个惯性测量装置,用来辅助实现系统的战斗识别和监视;此外,惯性测量装置提供了平台运动的高带宽传感信号,来驱动快速倾斜镜,能有效地解决风力载荷的影响问题上。后者是加州圣尼克拉斯岛试验暴露的 LaWS 系统升级系统的需求,即望远镜的风力荷载可能激发窗口镜的共振。另外从一个移动平台进行射击,还需要增加一个惯性导航单元并入 PASS 系统,用来实现其它舰载传感器到高能激光器的精确对接,以及满足舰船上 6 个自由度运动所需的预测逆控制功能。

2011 年在波托马克河试验场的海洋环境中,美国海军水面作战中心达尔格伦分部主持了动态平台上的跟踪试验。由于上面功能演示不需要高能激光的参与,因此此次试验系统只进行了目标的弱光跟踪试验。采集了能够让 PASS 单元在移动平台上运行的实验数据,成功地实现了小船目标的捕获和信号数据的交接。

3.5 2012年试验

2012 年试验目的是在动态平台上进行战斗识别和反无人机。

2011 年的试验暴露了商用跟踪器对抖动抑制的不足。这个新发现了导致“高带宽瞄准-保持处理器成熟化”。这项工作由联合技术办公室资助,Equinox 公司研制,并将纳入 LaWS 系统中。该处理器具有更高的跟踪环路带宽,从而减少相应的目标视线的抖动误差。其次为了进行战斗识别,在系统中增加辅助传感器,提供了比共孔径可见光相机的更高分辨率。另外一种改进的准直器装配工艺也被加入到系统,减少了舰载系统的准直需求,并能解决系统在战场上部署后可维护性的重要问题。

系统的其它部分也得到了升级改造,其中部分与系统安全相关。后者与图纸、测试流程等大量的文档工作一样,已成为系统上舰工作的一个重要部分。

3.6 2013年及此后的舰上实战测试

2012 年起,系统安装在杜威号驱逐舰前方甲板上,并进行了一年多的海试,在 2012 年 7 月~9 月的试验中,LaWS 系统成功击落 3 架典型威胁的无人机目标。杜威号舰上测试结果给予了美国海军加快部署激光武器计划的信心,2013 年 4 月集成在庞塞号两栖战舰上正式服役,编号为 AN/SEQ-3^[16]。LaWS 系统安装在庞塞号舰桥的甲板顶部,位于舰载雷达前方,如

图 7 所示。光束发射器安装在一间关闭的甲板室内,该甲板室在作战前打开房门,并整体后缩。目前在海军研究办公室“快速响应能力计划”的支持下,LaWS 系统正在升级,以验证接受密集阵武器的目标信号的可行性,从而实现激光武器的单人操作。据最新报道,LaWS 系统已在波斯湾进行了多轮实战射击试验^[17]。



图 7 庞塞号上的 LaWS

4 结论

LaWS 系统是美国海军的第 1 套演示的舰载高能固体激光样机,它可以作为现役密集阵武器的附件或独立运行。典型作战目标是:无人机、迫击炮弹、快艇、电光探测器,以及用于情报、监视和侦察的传感器和探测器。

从本文中的分析可以看到,LaWS 系统采取的是渐进式发展道路:(1)先通过商用现货途径,大致实现样机的初步功能;(2)然后通过多次试验,发现问题,逐一解决。这条道路非常灵活,不仅减少了技术风险、系统成本和研制时间,而且有助于提高系统的稳定性及器件的可维护性。LaWS 系统的系列外场试验,验证了商业现货供应产品集成的可行性,这对于考察增加哪些部件性能可以获得最大的效益,以及哪些部件修改是必要的,以实现与舰船系统更好的集成,都非常有用。

在 2010 年 6 月成功击落 4 架无人机后,LaWS 系统的技术等级接近 6 级^[11],原计划再投资 15 亿美元发展到 7 级,并于 2017 财年装备军舰。目前看来,由于 IPG 光纤激光技术的进步和海湾形势的发展,LaWS 系统提前实现了样机部署,并在实战中通过士兵的实际需求完成技术升级。因此 LaWS 系统的下一步发展有 5 个主要方向:

(1)系统控制的进一步集成化。从图 2 上可见,该系统需要 5 名操作人员。在下列每个岗位各需要一名操作人员:激光器、传感器、预测逆控制单元、跟踪器和万向节/数字控制器软件。一次作战过程至少需要 3 名人员(跟踪器、激光器、数字控制器软件的运行员)同时参与。未来根据实战需要,可能重新进行控制系统架构开发,来减少运行人员数量。

(2) 提高作战光源的输出功率。在作战光源上, 目前 LaWS 系统采用了 6 台光纤激光器进行非相干合成; 下一步计划是采用 10 台功率更大的光纤激光器进行非相干合成, 提高输出激光总功率。有消息报道, 美国海军已研制了 150kW 的 LaWS⁺ 系统, 光束质量未见报道^[7]。

(3) 改变作战光源的光束合成方式。目前 LaWS 系统作战光源采用的是光束的非相干合成。这种方式实现的作战光源结构简单, 在技术成熟度和可靠性上优于相干合成方式。但相干合成方式可以提高光束的远场光束质量, 从而提高武器系统的毁伤能力。因此随着相干合成技术的成熟, 有可能在作战光源的第 2 级合成上, 采用 APPLE 结构^[18] 来提高最终光束质量; 缺点是破坏了作战光源的全光纤结构, 需要引入折轴光学系统, 增大了系统体积和成本。

(4) 激光器的轻量化, 使之能作为现役密集阵武器的附件运行。图 7 显示, 独立运行的 LaWS 系统位于顶层舰桥的雷达附近。为了更好地与现有舰船系统的融合, 2007 年雷神公司的密集阵武器系统 M15 被提议作为 LaWS 系统的集成平台, 避免了在军舰甲板上又出现一个万向节装置的重要设计问题。这种方式已在 2011 年英国宇航公司承包的 10kW 美军舰载战术激光系统(MK38-TLS) 得到验证。目前在激光武器战场应用尚未明确的情况下, 这种方式没有破坏军舰的外观, 更容易被海军接受; 同时又为在地基上解决反 RAM 任务提供了一条切实可行的途径, 使舰载近程战术武器兼具火炮和激光打击能力。这种方式得益于 LaWS 系统作战激光器的全光纤设计方式, 当然也存在一定挑战: 在机械特性上, MK15 密集阵底座可以挂载的额外重量, 必须保持在大约 544kg ~ 680kg; 此外最好情况是, 附加的激光武器没有对底座在角度、峰值速度或加速度上的瞄准/上升运行中产生实质影响。目前激光器重量为 4536kg^[7], 未来发展的一个方向是其重量的控制。

(5) 在实战中根据士兵的反馈意见进行改进。据报道, LaWS 在庞塞号军舰上的测试数据, 将用于指导海军研究办公室“全固态激光器技术成熟计划”^[19] 的进一步研究高效费比的、可作战的激光样机。

参 考 文 献

[1] JUSTIN F. The future is now: navy to deploy lasers on ships in 2014 [EB/OL]. (2013-04-08) [2014-10-11]. <http://www.foxnews.com/tech/2013/04/08/future-is-now-navy-to-deploys-lasers-on-ships-in-2014>.

[2] SEAN G. Navy will deploy first ship with laser weapon this summer [EB/OL]. (2014-03-07) [2014-10-11]. <http://arstechnica.com/information-technology/2014/03/navy-will-deploy-first-ship-with-laser-weapon-this-summer>.

[3] ZHAO Y S, LI Q, ZHOU C. Analysis of shipborne laser weapon and its development trend [J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30 (7): 1-3 (in Chinese).

[4] LU H L, FENG J L, ZENG P. Development of American high energy laser weapon in 2010 year [J]. Winged Missiles Journal, 2011 (7): 20-24 (in Chinese).

[5] ZONG S G, WU R H, CAO J, et al. Developments and trends of high energy laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013 (8): 080016 (in Chinese).

[6] US NAVY. 1250074754-Naval sea systems command [EB/OL]. (2004-07-15) [2014-10-11]. [http://www.navsea.navy.mil/nswc/dahlgren/Leading Edge/Directed Energy/files/inc/1250074](http://www.navsea.navy.mil/nswc/dahlgren/Leading%20Edge/Directed%20Energy/files/inc/1250074).

[7] NAVY POSTGRADUATE SCHOOL. Directed energy weapons [EB/OL]. (2013-01-06) [2014-10-11]. <http://www.nps.edu>.

[8] ROBIN S, BOBERT P. Laser weapon system (LAWS) adjunct to the close-in weapon system (CIWS) [EB/OL]. (2012-01) [2014-10-11]. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA557757>.

[9] GAIL O. IPG photonics offers world's first 10kW single-mode production laser [EB/OL]. (2009-06-17) [2014-10-11]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06/ipg-photonics-offers-worlds-first-10-kw-single-mode-production-laser.html>.

[10] BILL S. High power fiber laser technology [EB/OL]. (2013-09-10) [2014-10-11]. <http://www.ipgphotonics.com>.

[11] RONALD O R. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: background and issues for congress [EB/OL]. (2012-06-29) [2014-10-11]. <http://www.crs.gov/>.

[12] WANG G B, LIU C L. Experimental research of the ablation threshold of Kevlar/epoxy [J]. Laser Technology, 2003, 27 (5): 457-459 (in Chinese).

[13] GUO Y L, LIANG G Z, QIU Z M, et al. Effect of laser parameters on mass ablation rate of carbon fiber reinforced composite [J]. Acta Materiae Compositiae Sinica, 2006, 23 (5): 84-88 (in Chinese).

[14] SU Y, WAN M. High energy laser system [M]. Beijing: Nation defense industry Press, 2004: 39-59 (in Chinese).

[15] RICHARD W. A bad day for maritime UAVs [EB/OL]. (2010-08-08) [2014-10-11]. <http://www.sldinfo.com/?=10701>.

[16] RICHARD S. Surface navy 2014: LaWS laser weapon prototype gets set for initial deployment [EB/OL]. (2014-01-16) [2014-10-11]. <http://www.janes.com/article/32492/surface-navy-2014-laws-laser-weapon-prototype-gets-set-for-initial-deployment>.

[17] GEORGE D. The US military has deployed a laser weapon to the Persian gulf [EB/OL]. (2014-11-25) [2014-12-20]. <http://io9.com/the-u-s-military-has-deployed-a-laser-weapon-to-the-pe-1663220820>.

[18] MIKHAIL A V, THOMAS W, LEONID A B, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, V15 (2): 269-280.

[19] OFFICE OF NAVAL RESEARCH. All system go: navy's weapon ready for summer deployment [EB/OL]. (2014-04-07) [2014-10-11]. http://www.navy.mil/submit/display.asp?story_id=80172.