

# 美国机载激光武器研究进展

张亦卓

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

**[摘要]** 自 20 世纪 70 年代起, 美国先后开展了 CO<sub>2</sub> 激光器、化学激光器的机载演示验证, 共完成 3 轮机载激光武器样机研制, 并完成打靶试验。自 2009 年固体激光技术首次突破百千瓦输出以来, 愈加着力开展电驱动固体激光器研制及配套技术研究。美国机载激光武器发展呈现出由战略应用向战术应用转变、由大型平台向小型平台转变、由化学激光向固体激光转变的趋势。机载激光武器正在从试验演示向武器装备转化。回顾了美国机载激光武器发展历程, 结合技术发展现状和预测, 提出机载激光武器发展差距和发展建议。

**关键词:** 机载激光武器; CO<sub>2</sub> 激光; 化学激光; 固体激光

## Progress in Airborne Lasers Weapon Research

ZHANG Yizhuo

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Since 1970s, the United States has carried out the CO<sub>2</sub> laser and chemical laser airborne demonstration experiments and completed 3 rounds of airborne lasers prototype development in total. The shooting test was also completed. Since the solid-state laser breakthrough 100 kilowatts output for the first time in 2009, more and more efforts have been carried out. At present, the development of electrically driven solid-state lasers is being carried out to achieve airborne applications in the near future. Airborne laser weapons are being transformed from test demonstrations to weaponry. This paper reviews the development process of airborne laser weapons in the US, and analyzes the current development and trends of airborne laser weapons according to the existing research and development plans.

**Keywords:** Airborne lasers Weapon; CO<sub>2</sub> laser; Chemical laser; Solid-state laser

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.091

激光武器是指将高能激光束聚焦到作战目标上, 摧毁或使作战目标失效的定向能武器, 具有快速、灵活、精确和使用成本低等特点。进入 21 世纪以来, 美国不断在激光武器的演示验证上取得突破, 并将激光武器装备计划提上议事日程, 德国、俄罗斯等国家也纷纷投入巨资进行研究<sup>[1]</sup>。激光光束传输受天气情况影响大, 靠近地面水平方向上大气对激光的衰减最为严重, 高度越高影响越小。因此, 激光武器装载在受这些因素制约较小的飞机或高空武器平台上更能发挥其光速拦截优势。

### 1 机载激光武器概念

机载激光武器是以飞机为平台的激光武器系统, 可应用于预警机、轰炸机、运输机、加油机、战斗机、直升机等各种空中平台, 远距离干扰致盲来袭导弹导引头、机载光学传感器等光学敏感目标, 近距离硬毁伤弹体、机

体结构, 消除来袭导弹、飞机等典型空中威胁, 具备反应快速、全方位攻击等特点, 察打一体、软硬兼备、攻守皆能, 具有战术、战略运用潜力, 和常规武器相结合将大幅提高飞机的生存和攻击能力。

机载激光武器系统要正常工作, 首先要实现与载机平台集成问题, 综合考虑载机平台提供的空间、载重、供电、散热和振动环境、电磁兼容等方面的约束, 保障激光武器系统高效稳定工作并减小激光武器对载机的影响。图 1 是美国 ABL 机载激光武器布局, 系统由波音 747 客机改装而来。

### 2 技术体制

CO<sub>2</sub> 激光是最早达到武器级功率水平的激光体制, 但波长较长导致发射系统庞大, 激光系统体积大且维护困难, 更适合在激光焊接、切割、熔覆等工业领域中应

用。目前可实战应用的激光武器采用的主要技术体制包括化学激光和固体激光<sup>[2-3]</sup>。其中化学激光可方便实现大功率兆瓦级输出,进行硬毁伤或远距离干扰,但体积庞大且存在排放污染问题,适合地基、舰载使用;固体激光器体积紧凑、重量轻,但目前输出功率较低,更适合对体积重量要求较为苛刻的机载、车载平台环境使用。

### 2.1 化学激光器

化学激光器是目前效率最高、技术最为成熟的激光器,并且最先达到实战需要的功率水平,因此美国 ABL、ATL 都采用氧碘激光器进行集成验证。然而,化学激光器实战部署困难,使用中存在问题,包括:结构复杂庞大、重量大,战术作战飞机无法搭载,化学染料易燃、剧毒、有腐蚀性,使用维护繁琐且费用昂贵。图 2 是美国与以色列联合研制的氟化氙激光武器。

### 2.2 固体激光器

固体激光器具有全电能驱动的特性,具有以下特点:(1)采用光学抽运的方式,完全由电能转化而来,因此可采用“全电化”的工作方式;(2)固体增益介质一般有较长的上能级寿命和较宽的增益谱,这使得固体激光能够很好地用于脉冲制式。

固体激光器的特点使其具有结构紧凑、效费比高以及可以多制式输出等优点。由于固体增益介质内部产生的热量只能由表面耗散,使得增益介质在高功率泵浦时产生较大的温度梯度,导致热应力和热畸变,从而导致热损伤和光束质量退化等问题。图 3 为美国洛·马公

司的高功率光纤激光器用增益光纤,光纤被缠绕在散热器上。

## 3 发展历程

### 3.1 机载激光实验室 (ALL) 计划

美国空军早在 20 世纪 60 年代,已经开始研究如何在飞机上安装激光器,击落空中飞行的目标。1973 年,美国空军在一架 KC-135A 加油机上,利用百千瓦级 CO<sub>2</sub> 气动激光器作为光源,开展了“机载激光实验室”(ALL)计划。1983 年,击落了一枚 AIM-9B“响尾蛇”导弹,成功实现了公里级距离打击空-空导弹。图 4 为 ALL 计划演示样机照片,红框内为搭载的激光转塔。

该计划用了 12 年时间,演示验证了高能激光拦截空中目标的技术可行性,为后续机载激光武器演示验证项目开辟了道路。ALL 计划一定程度上解决了激光武器机载过程中的高能气体激光输出、高精度跟瞄等问题,但在许多关键技术领域尚未取得突破。

### 3.2 机载激光武器 (ABL) 计划

20 世纪 80 年代后期,新型兆瓦级氟化氙激光器 (DF) 和氧碘激光器 (COIL)、捕获、跟踪、瞄准技术、自适应光学技术、大口径轻质光学反射镜制造技术不断取得突破。

海湾战争结束后,美国空军针对不断扩散的弹道导弹威胁,提出 ABL 计划,用于拦截敌方助推段弹道导

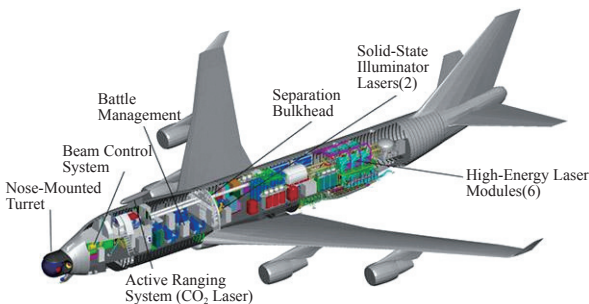


图1 ABL机载激光武器布局  
Fig.1 Layout of airborne laser ABL

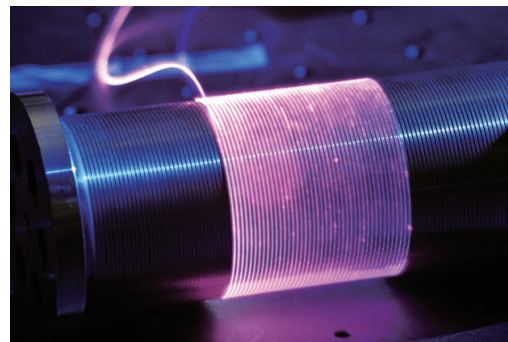


图3 洛克希德·马丁公司光纤激光器用增益光纤  
Fig.3 Gain fiber for fiber laser of Lockheed Martin



图2 地基战术化学激光武器  
Fig.2 Ground-based chemical laser



图4 ALL计划演示样机  
Fig.4 Demonstration prototype of ALL

弹。1996年11月空军和波音等联合完成ABL概念设计,用于对战区弹道导弹进行探测、跟踪并在其助推段将其击毁<sup>[4]</sup>。ABL整个发展历程可以分为4大阶段<sup>[5]</sup>。第1阶段用了6年时间,进行方案设计、技术准备和概念论证。第2阶段是单元技术突破和子系统研制的快速发展阶段,不断取得技术突破,发展势头总体良好,但新的技术问题持续出现,导致了进度的大幅拖延。最初计划2004年初开展首次导弹拦截试验,但2004年才实现6模块氧碘激光器首次出光和波音747-400F改装后的适航飞行。第3阶段是项目计划多次调整和系统集成过程中不断解决新问题的阶段。2005年实现了6模块氧碘激光器全功率工作;2006年完成了低功率发射和模拟跟瞄试验,验证了光束控制、火力控制系统和自适应光学系统;2007年完成激光照明目标的跟瞄试验,验证了跟踪瞄准系统对空中飞行目标的捕获和跟踪能力,演示了完整作战过程;2008年完成了全功率激光器飞机平台安装调试,实现了地面试验状态下的全系统全功率工作。第4阶段是全系统预备试验阶段,2009年ABL进行了一系列成功的飞行试验,完成了武器系统功能检查、对飞行导弹的跟踪瞄准、大气传输补偿和低功率激光发射、首次对飞行测量靶弹的打击试验、首次全功率激光飞行发射试验。在4个阶段完成后,进行了助推段导弹拦截演示,于2010年摧毁了80km外的助推段液体弹道导弹<sup>[6]</sup>。

ABL计划由于资金和技术问题,进度数次调整,研发进度一再推迟,最终未达到预期的能力水平。但其导弹拦截试验首次演示了激光在机载平台上的作战能力,在激光武器单元器件<sup>[7]</sup>、分系统和系统集成方面取得了重大进展,攻克了诸多技术难题,技术水平世界领先,对于机载激光武器的实战化应用具有重要意义。

### 3.3 先进战术激光武器(ATL)计划

在ABL计划进度不断拖延的同时,美国国防部在先进概念技术演示计划中,支持波音公司开展ATL计划。ATL计划采用成熟的万瓦级氧碘激光器和光束控制系统,进行战术应用。

该计划的目标是:针对成熟的氧碘激光器和光束控制系统开展集成,研制新型的激光发射系统,安装到作战飞机平台上,使其能够作为一种战术级激光武器对地面目标进行精确打击。ATL作战主要针对地面目标,光束定向能装置安装在C-130飞机的腹部,图5展示了系统内部布局。ATL于2009年成功击毁了15km外的地面车辆<sup>[8]</sup>。

ATL计划采用成熟技术开展系统集成,先于ABL完成试验,开展了机载激光武器精确打击地面固定目标和机动目标试验,验证了战术运用能力,标志着机载激

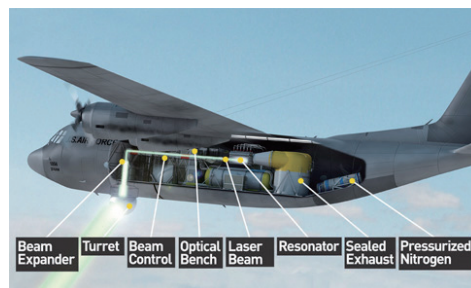


图5 ATL机载激光武器布局  
Fig.5 Layout of airborne laser ATL

光武器发展重心向战术运用的转移。

## 4 当前重点计划

在美国国防部“联合高功率固体激光器”(JHPSSL)计划支持下,2009年固体激光器首次突破了可满足实战战术毁伤使用的100kW输出功率,标志着激光武器技术体制变革的开始。

首台百千瓦固体激光器是由美国诺格公司于2009年3月完成的,该系统用每链路输出15kW的7个链路相干合束,输出功率达到105.5kW,光束质量优于3倍衍射极限,连续工作时间超过300s。2010年2月,美国达信公司用6个17kW激光模块串联,实现单链路100kW激光输出,第2个实现了固体激光器百千瓦激光功率输出。相比化学激光,固体激光具有体积紧凑、全电驱动等诸多优势,随着其功率水平、光束质量的突破,美国机载激光武器计划的技术体制全面向固体激光转变。

### 4.1 大型飞机电激光器(ELLA)计划

由美国国防预先研究计划局(DARPA)与空军研究实验室(AFRL)合作,为B-1B战略轰炸机加装百千瓦激光器并进行飞行测试的演示验证项目<sup>[9]</sup>。

DARPA在“高能液体激光区域防御系统”(HELLADS)项目支持下,发展了150kW激光器,包括冷却系统在内的总重低于750kg,用于ELLA激光器验证样机。HELLADS项目由通用原子公司主导,已经实现了大功率激光输出并具备优良的光束质量。HELLADS项目经理李奇·巴格内尔表示:“技术障碍是巨大的,但值得欣慰的是我们已经生产了一型固态激光器,并达到该尺寸激光器中无可匹敌的功率和光束质量。现在HELLADS已经做好了准备,将在外场试验中对抗一些我们战士在实战中面临的最棘手的战术威胁。”

ELLA计划已使固体激光器重量功率比达到空前的5kg/kW,并仍在持续开展技术攻关,增大输出功率水平、减小体积重量、提升工程性能。固体激光技术的持

续突破,使得激光武器具备搭载在作战飞机平台的能力,并催生了后续计划,包括 SHIELD、LPLD。

#### 4.2 自卫高能激光器演示样机 (SHIELD) 计划

固体激光虽然当前尚不能搭载在战斗机上实施空战任务,但由于其良好的发展势头和巨大的应用潜力,美空军正积极推进研发紧凑型全电驱动激光武器。以期不久的将来将其集成到作战飞机上,通过改变空中交战规则,继续保持空中优势。为此,美空军实验室制定了3阶段发展计划:一是研制一个功率几十千瓦的自保护高能激光验证装置,计划2020年基于AC-130武装攻击机开展演示验证;二是研制一个具有100kW的远程防御系统,计划2022年基于F-15等传统战斗机开展演示验证;三是研制一个300kW的远距攻击系统,集成在F-22、F-35等5代机及未来6代机等隐身平台,用于毁伤敌方飞机和地面目标。

#### 4.3 定向能研究 (DER) 项目

ABL计划虽然中止,但美国防部导弹防御局(MDA)仍坚持助推段是拦截和摧毁导弹的理想时间段,并未放弃用机载激光武器拦截助推段弹道导弹的探索研究。DER项目随后启动,探索不同于ABL的“大型飞机+化学氧碘激光武器”技术路线,改用高空无人机平台搭载和使用输出功率200kW级的激光武器进行拦截。

在高空使用,可有效克服激光光束传输受天气情况影响的问题。在DER项目支持下,通用原子公司旗下的航空系统公司曾利用其“死神”无人机试验“多光谱瞄准系统”(MTS-C),实现单架“死神”就能对助推段弹道导弹进行精确跟踪瞄准,演示样机如图6所示。

随着固体激光技术的高速发展,其体积重量更小、输出功率更大、光束质量更好,已经可能搭载在无人机上进行长时间巡航。低功率激光演示器(LPLD)计划是DER项目的最新研究计划,旨在解决激光器的功率和孔径尺寸问题。该项目采用了先进的光束控制系统和光纤激光器,开展高空无人机用激光探测和拦截助推段弹道导弹的研究工作。预计LPLD项目将采用能够



图6 加装多光谱瞄准系统的“死神”无人机  
Fig.6 UAV with multi-spectral aiming system

在约18km高度飞行的高空无人机(如“全球鹰”)搭载固体激光武器,可完成高空长航时值班,实现战略应用目的。

## 5 展望

回顾发展历史,自ABL/ATL之后,美国机载激光武器发展呈现出由战略应用向战术应用转变、由大型平台向小型平台转变、由化学激光向固体激光转变的趋势,机载激光武器正在从试验演示向武器装备转化。

推动机载激光技术发展必须解决能源供应、体积、重量、高低温、振动、低气压等诸多实际问题,才能真正满足复杂环境需要。美国利用30年的时间完成了3轮机载激光武器的样机研制和集成验证,才形成技术体系,突破各项关键技术。

目前我国激光器功率水平紧追美国,但仍存在一些技术薄弱环节:(1)样机研制和工程化设计验证要协调推进,要综合考虑平台的空间、载重、供电、散热和振动环境、电磁兼容等方面的约束,保障激光器系统高效稳定工作,并减小其对平台的影响内;(2)激光光源需要集成在有限体积和重量范围内,关键器件的环境适应性研究需全面展开;(3)发展能源管理技术,对能源供应、热管理等方面实施系统优化,解决平台供电与散热能力有限的问题。

相对于地基、舰载、车载平台,机载条件最为苛刻,解决激光武器机载问题,可以向其他平台复制,制造出规模更大的系统。因此,应加快相关系统验证,开展高功率激光器机载环境适应性和系统飞行验证,尽早暴露和解决机载激光实用化进程中的技术问题。

## 参考文献

- [1] 齐予,易亨瑜. 国外机载激光武器技术进展[C]//2010国防空天信息技术前沿论坛论文集. 北京:中国宇航学会,2010:1-6.
- QI Yu, YI Hengyu. Technology progress of foreign airborne laser weapon[C]//Forum on the Frontier of National Defense Aerospace Information Technology. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2010: 1-6.
- [2] 陈金宝,郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. 中国激光,2013,40(6):0602006
- CHEN Jinbao, GUO Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
- [3] 宗思光,吴荣华,曹静,等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展,2013(8):152-161.
- ZONG Siguang, WU Ronghua, CAO Jing, et al. Developments and trends of high energy laser weapons[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013(8): 152-161.

(下转第100页)

提高了柔性生产线的性能,验证了遗传规划算法搜索和优化调度规则的有效性和可行性。

遗传规划算法可对调度规则完成有效搜索和优化的原因在于:通过遗传算子,种群不断进化,最终获得较优规则;使用二叉树表示调度规则个体,其结构可变,利于遗传算子的执行和群体的进化;算法中充分考虑了可能影响任务优先级的因素,利于找到较优规则。

在试验过程中,当生产规模较小时,GP算法运行耗时约130000ms,该过程在生产线实际运行前完成,将其获得的优化规则直接应用于调度算法中;基于任务优先级的调度算法运行一次耗时30~150ms,满足实际生产中小批量规模下生产调度的实时性要求。当生产规模较大时,GP算法效率降低,还需对算法做出进一步的改进。

#### 4 结论

本文针对柔性生产线的调度问题,分析了调度过程中需考虑的各种约束条件,在满足所有约束条件下,基于工序任务的优先级属性设计了相应的算法。通过优化工序任务优先级的计算方法——调度规则来完成调度方案的优化。利用遗传规划方法进行调度规则的搜索与优化,获得的优化规则进行在线应用,完成工序优先级的计算和生产线调度方案的快速求解,以满足实际生产要求。利用实例进行了试验,结果表明,与EDD等常用规则相比,由遗传规划算法得到的调度规则有效提高了设备利用率和减小了拖期时间,证明遗传规划算法可以用于解决生产线调度问题。本文设计的调度方法已经应用到了实际的生产线管控系统中。整个调度方案和优化过程还需要进一步改进,以提高解的质量。

#### 参考文献

[1] AHMADI E, ZANDIEH M, FARROKH M, et al. A multi objective optimization approach for flexible job shop scheduling problem under random machine breakdown by evolutionary algorithms[J]. Computers & Operations Research, 2016, 73: 56-66.

[2] THÖRNBLAD K. On the optimization of schedules of a multitask production cell[D]. Trollhättan: Chalmers University of Technology, 2011.

[3] THÖRNBLAD K. Mathematical optimization in flexible job shop scheduling modelling, analysis, and case studies[D]. Sweden: University of Gothenburg Göteborg, 2013.

[4] THÖRNBLAD K, STRÖMBERG A B, ALMGREN T, et al. Optimization of schedules for a multitask production cell[J]. Surgical Infections, 2010, 16(6): 821-824.

[5] SYBERFELDT A, KARLSSON I, NG A. An industrial case study of web-based simulation-optimization[C]//Industrial Simulation Conference. Skövde, 2011.

[6] BLACKSTONE J H, PHILLIPS D T, HOGG G L. A state-of-

the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations [J]. International Journal of Production Research, 1982, 20(1): 27-45.

[7] KOZA J R. Genetic programming: on the programming of computers by natural selection[M]. Cambridge: MIT Press, 1992.

[8] ĐURASEVIĆ M, JAKOBOVIĆ D, KNEŽEVIĆ K. Adaptive scheduling on unrelated machines with genetic programming[J]. Applied Soft Computing, 2016, 48: 419-430.

[9] BRANKE J, HILDEBRANDT T, SCHOLZREITER B. Hyper-heuristic evolution of dispatching rules: a comparison of rule representations [J]. Evolutionary Computation, 2014, 23(2): 249-277.

[10] 范华丽,熊禾根,蒋国璋,等.基于遗传规划的动态作业车间调度规则生成研究[J/OL].计算机集成制造系统,(2016-12-16) [2017-08-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20170818.1120.006.html.

FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, et al. Research on the generation of dispatching rules for dynamic Job-shop scheduling problem based on genetic programming algorithm[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, (2016-12-16) [2017-08-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20170818.1120.006.html.

[11] 刘晓冰,焦璇,宁涛,等.基于双链量子遗传算法的柔性作业车间调度[J].计算机集成制造系统,2015,21(2):495-502.

LIU Xiaobing, JIAO Xuan, NING Tao, et al. Flexible job shop scheduling based on double chains quantum genetic algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(2): 495-502.

[12] RAJENDRAN C, HOLTHAUS O. A comparative study of dispatching rules in dynamic flow shops and job shops[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(1): 156-170.

通讯作者:邹方,研究员,研究方向为数字化与柔性装配、智能控制, E-mail: yzoufang@sina.com。

(责编 大漠)

(上接第94页)

[4] 任宁,刘敬民.美国机载激光武器发展浅析[J].红外与激光工程,2008(37):379-382.

REN Ning, LIU Jingmin. Analysis for american air-borne laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(37): 379-382.

[5] BARTON D K. Report of the APS study group on boost-phase intercept systems for national missile defense[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[6] TIRPAK J A. Setting a course for the airborne laser[J]. Air Force, 2003, 86(9): 46-50.

[7] BUTLER A. Ray of Light[N]. Aviation Week & Space Technology, 2010-94-28.

[8] FEIN G. Textron picked for high energy laser program phase III [J]. Defense Daily, 2006, 229(6): 1-2.

[9] 陈黎.美国的ELLA“大型飞机电激光器”项目-未来的“激光轰炸机”[J].国防科技工业,2013(3):66-67.

CHEN Li. ELLA of the US—Laser bomber in the future[J]. Defence Science & Technology Industry, 2013(3): 66-67.

通讯作者:张亦卓,博士、高级工程师,研究方向为固体激光及激光加工技术, E-mail: yizhuolaser@foxmail.com。(责编 大漠)