

机载定向能武器发展趋势及关键技术研究

杜梓冰^{1,2}, 汤恒仁^{1,2}, 李 泱^{1,2}, 张旭霞¹, 温颖倩¹, 潘翔宇^{1,2}, 刘昊天¹

(1. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710029)

摘 要:为应对机载定向能武器对空战的影响,需科学研判其发展状态。首先研究了机载定向能武器的基本概念、作战应用场景、优缺点,分析了国外主要机载高能激光、高功率微波武器发展概况,然后对国外在定向能武器发展方面的主要做法进行研究。国外通过前瞻布局、建立完善管理机构、持续投入、重视配套试验设施建设等方式快速推进机载定向能武器的发展,而机载高能激光武器将是最先实现装备的定向能武器,机载高功率微波武器在短期内的主要形式仍是作为导弹、炸弹的战斗部。机载定向能武器应尽早开展装机试验,持续攻克小型化、高功重比、高效环控、电磁兼容防护等难题,突破作战使用方式、总体设计集成、试验平台构建、试验评估等关键技术,并持续投入、长远布局协同发展、重视通用空中试验平台的建设,加大探索性飞行试验,通过不断的试验促进技术的逐步成熟。

关键词:机载定向能武器;高能激光武器;试验技术;试验机平台;飞行试验

中图分类号:V217.1;TJ955;TJ951 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.002

Research on the development trend and key technology of airborne directed energy weapons

DU Zi-bing^{1,2}, TANG Heng-ren^{1,2}, LI Yang^{1,2}, ZHANG Xu-xia¹,

WEN Ying-qian¹, PAN Xiang-yu^{1,2}, LIU Hao-tian¹

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China)

Abstract: In order to cope with the impact of airborne directed energy weapons on air warfare, it is necessary to scientifically study and judge their development status. Firstly, the basic concepts, combat application scenarios, advantages and disadvantages of airborne directed energy weapons are studied, and the development of major airborne high-energy lasers and high-power microwave weapons in foreign countries is analyzed, and then the main practices of foreign countries in the development of directed energy weapons are studied. Foreign countries rapidly advance the development of airborne directed energy weapons through forward-looking layout, establishment of perfect management institutions, sustained investment, and attention to the construction of supporting test facilities, etc. The airborne high-energy laser weapons maybe the first directed energy weapons to be realized, airborne high-power microwave weapons will remain as the main form of the combat section of missiles and bombs in the short term. Airborne directed energy weapons should carry out mounted tests as early as possible, continue to overcome the miniaturization, high power-to-weight ratio, high efficiency ring control, electromagnetic compatibility protection and other difficult problems, breakthroughs in the mode of combat use, overall design and integration, test platform construction, test and evaluation and other key

基金项目:基础加强基金(No. 2022-JCJQ-JJ-0598; No. 2023-JCJQ-JJ-0889)资助。

作者简介:杜梓冰(1986-),男,硕士,从事试验鉴定研究。E-mail:duzibing@126.com

收稿日期:2024-04-02;修订日期:2024-05-27

technologies, and sustained inputs, long-term layout of the synergistic development of the emphasis on the construction of a common air test platform, increase the exploratory flight test, and promote the technological through constant testing gradually mature.

Keywords: airborne directed energy weapons; high power laser weapon; testing and evaluation techniques; testing platform; flight test

1 引言

高能激光和高功率微波武器是目前发展较为成熟的定向能武器,其中美国、德国、英国、法国、以色列、俄罗斯等在陆基、车载、舰载、星载定向能武器领域不同程度的开展了试验、应用,机载领域发展相对较慢^[1-11]。

国外在“机载激光实验室(ALL)”、“机载激光武器项目(ABL)”、“先进战术激光器(ATL)”等项目中进行了机载内装式激光武器的试飞,持续开展激光武器的小型化研究,目前正在大力推进“自卫高能激光演示样机(SHIELD)”吊舱式激光武器^[12-14],并将关键技术逐步转换到其下一代战斗机、轰炸机中^[15]。美国开展了机载空射微波弹的试飞^[10-11]。

随着蜂群无人机、集群低成本弹药的快速发展,定向能武器得到快速发展,以期利用定向能武器的高效费比特征开展反无人机、反集群作战等。近年来,国内大量学者对激光武器、微波武器的研究并追踪国外发展,主要针对设计技术,如激光器设计、大气传输、微波源设计等,在定向能武器发展整体概况、国外先进做法、以及先进技术到装备之间必须的试验评估的研究较少^[10-14]。

本文重点对国外机载高能激光武器、高功率微波武器的这几方面进行深入的研究,主要研究信息来源于国外公开的政策文件、权威的国防预算等数据,剖析在推动定向能武器持续发展方面的主要措施手段、关键技术发展趋势等。

2 定向能武器概况

2.1 作战应用领域和影响

定向能武器主要包括高能激光武器、高功率微波武器和粒子束武器,前二者较为成熟。通过近几十年的试验和使用,陆基、车载、舰载、岸基、机载、星载等不同平台激光武器已经证明了可行性、有效性,目前正往更高效能方面发展,国外智库分析认为未来应用领域广泛^[1-7],可应用于战术、战役、战略目标作战,防御防空导弹、空空导弹,攻击作战飞机,打

击巡航导弹、弹道导弹和卫星等;可以提供高效的太空控制和对其他关键天基资产的保护;可用于攻击时间敏感、定位不准的目标;可以促进新的战略行动,微波武器可用于非致命的“战略轰炸”战役,如破坏发电和配电了,攻击埋藏在地下的、加固的或与平民或基础设施同处一地的武器;能精确打击,可帮助减少平民伤亡,可用于在中程范围内进行非致命交战^[1-4]。

国外智库分析认为机载高能激光、高功率微波武器等定向能武器的军事影响将是革命性的,包括战术层面、作战层面、战略层面,在战术层面,定向能武器将提供打击目标的新机制,也助力其他军事系统^[1-2];作战层面,其影响不仅会因其在整个态势中的扩散而产生,还会因其改变当前任务完成方式的能力而产生^[1-2];在战略层面上,定向能武器的影响将取决于其支持全新任务的能力,如远程防御、空间打击、非破坏性战略打击等^[1-2]。

2.2 主要优势和不足

国外通过持续的试验、使用表明,高能激光、高功率微波武器攻防兼备,明显的技术优势是能光速交战,几乎发射后可以立即达到目标;持续攻击,使用成本低廉;精确交战,附带损伤小;能通过控制所用能量的大小来产生不同的效果,故毁伤可控,可分级响应;激光武器可以同时作为传感器和武器使用,发挥的军事效能是可扩展和灵活的;在使用前几乎是不可探测的,能突然发起攻击,只有目标被击中才可能探测;在解决传播损耗问题后,激光武器、微波武器的射程可能大于其它攻击手段;后勤保障压力小,战场转移方面,作战适应性强^[1-10]。

但高能激光、高功率微波武器也不是万能的,有其固有劣势,如激光武器、微波武器都是以直线路径传输,无法对有遮挡或强防护的目标作战;大气吸收、散射和湍流以及热晕等影响激光传输效能,大气同样也影响微波传输;激光单次只能攻击一个目标,多次攻击之间需要一定的时间间隔,用于充能、散热

等,限制了应对饱和攻击的能力;虽然能够瞬时攻击目标,但连续式激光需要在目标上持续一定时间才能产生作用,对于特殊材料或连续滚转目标的效果较差;在一定条件下,激光和微波都可能被敌方反射,对自身、友军都可能造成误伤^[1-11]。

3 国外机载定向能武器发展概况

定向能武器中,粒子束武器成熟度仍较低。由于高功率微波武器容易对平台产生影响,前期机载高功率微波武器发展慢于激光武器,目前主要是作为炸弹、导弹的战斗部,形成可投放式机载高功率微波炸弹、导弹,但随着蜂群无人机、集群弹药类低成本装备和作战样式的快速发展,间接推动高功率微波武器反蜂群作战,未来机载内装集成式微波武器可能快速发展并部署应用^[7-14]。

空基机载高能激光武器发展时间久,但尚无型号应用。国外自上世纪70年代开始机载激光武器演示验证试飞,空军、导弹防御局、陆军、DARPA等先后发展了ALL、ABL(如图1所示)、ATL、SHIELD、“AC-130J‘炮艇机’载高能激光器”、“大型飞机电激光器(ELLA)”、A-60试验机、塞斯纳208B激光武器演示验证等十余个机载激光武器相关项目^[12-14],并规划在下一代战斗机上部署激光器^[2],图2为以色列激光武器试验机。

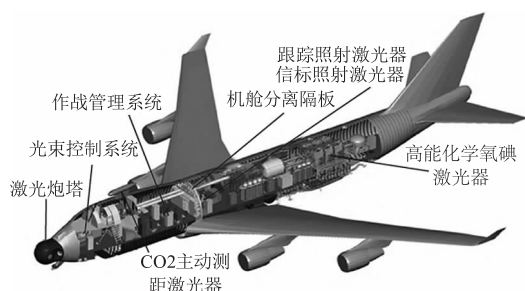


图1 ABL试验机组成结构图

Fig. 1 Composition and structure of ABL



图2 以色列激光武器试验机

Fig. 2 Israeli laser weapon flight test aircraft

通过分析国外典型国防预算可知,国外的机载激光武器的研究已经比较体系、全面,包括固态/光

纤/气体/自由电子激光器、自适应光学、光束控制、转向器、高转化率材料、机载大功率电源系统、机载高效热管理、抗激光武器攻击的飞行器/传感器材料、强激光生物效应、飞行员激光武器防护技术、激光武器效能验证、激光毁伤、紧凑高效系统集成技术、综合演示、地面替代演示、试验与评估技术和大学教育等,涵盖了教育、概念研究、基础理论研究、仿真、地面试验、飞行试验等各个方面。其机载领域新的作战样式和平台不断涌现,不局限于传统的大型运输机平台,新的轰炸机、歼击机、无人机、直升机平台也在不断发展激光武器,空战领域的全平台光速作战能力正加速推进,将对下一场战场产生新的影响^[2,15]。

4 机载定向能武器关键技术

文献^[15]提出高能激光武器在发展过程中其自身面临的主要困难是高能难、远距离作战难、高效毁伤难、高效紧凑难、实战应用难^[15],而高功率微波武器发展中面临同样的问题,更难解决的是与平台的电磁兼容问题,因此小型化、高功重比、高效环控、电磁兼容防护等是这两类武器设计领域的永恒追求,也是关键技术,但要实现机载集成应用,还需要突破以下关键技术。

4.1 作战使用研究技术

从目前陆基、舰载激光武器、微波武器的发展来看,定向能武器短时间内还无法取代常规导弹武器系统,甚至在未来主要与常规武器配合作战,以发挥各自优势实现系统综合效能最优,同时平台总体对其疑虑情况仍然存在,为促进定向能武器的平稳有序发展,首先要开展作战使用的研究,为各体制、各能级定向能武器找到合适的作战定位和场景,从而逐步促进其使用。

4.2 综合集成设计技术

从当前陆基、舰载定向能武器的发展来看,激光武器、微波武器对平台空间、能源等消耗较大,甚至需要为其单独打造一个平台^[12-14]。而新型机载平台的设计建设复杂、成本高、周期长,如何将定向能武器与现有平台集成设计、在新型平台中集成定向能武器的综合设计成为关键的一环。要综合考虑结构空间、振动、供电、环控、系统控制等诸多方面,是集飞行器设计各专业的集大成^[12-14]。

4.3 试验平台构建技术

激光武器、微波武器的作用过程中,与载机平

台、大气、目标作用关系复杂,涉及大量基础理论、工程实践等领域,需要通过大量的飞行试验进行摸索和验证,为此国外从上世纪 70 年代开始,在 ALL、ABL、ATL 等项目基于大型运输机建设了激光武器试验机,其搭载的试验系统全面而复杂,能够验证的内容较多、验证充分,但同时建设代价大、复杂、周期长^[12-14];但 2021 年国外基于塞斯纳 208B 小型民用飞机建设了激光武器演示验证系统^[16],ShiELD 项目计划基于 F-16 开展吊舱方式的演示验证,这些方式对于载机的承载、改装需求较小,容易实现,但同时其搭载系统的能级较低,验证的充分性不如运输机试验机,因此未来的激光武器、微波武器等试验过程中面临着“大而全”、“小而精”两种路线的选择,如何选择合适的路线并建设成为关键。

4.4 试验评估技术

定向能武器在完成设计后,需要通过科学的试验评价其功能、性能,发现缺陷并改进,但是其作战使用方式、毁伤机理等方面与传统武器存在差异,需研究对应的试验评估方法。如在评价模型方面,常规制导武器采用命中概率、圆概率误差 CEP 等指标作为最终的评价方法,这对于定向能武器不适用,目前尚没有合适的模型用于评价定向能武器的性能^[17];试验测量方面,定向能武器关注能量与目标的持续作用,因此对于辐射能量、功率的产生、传递、末端作用过程比较关注^[17-19];试验靶标方面,常规武器试验靶标一般是等效替代,而定向能武器需要在目标上作用一定时间方能生效,与目标材质、结构、攻击态势息息相关,涉及毁伤效果的试验需要高逼真度高等等效性目标^[17-19],这又为试验工程活动带来周期和经费等可行性压力,如何设计既保证真实性又能满足工程试验需求的高性价比配试目标是试验环境构建中的关键技术。

5 国外在关键技术发展方面的主要做法

国外从思想上重视定向能武器,前瞻布局成立了健全的管理机构,快速发展定向能武器,通过不断的试验逐步推进技术的成熟,奠定应用信心,将定向能武器列为关键新兴技术加以研究^[20]。

注重试验技术与研发技术的体系化经费投入。国外在本世纪初意识到其试验能力并不匹配定向能武器研发设计,不满足定向能武器的试验和评估需求,需要新的试验技术解决方案^[21]。因此,除了各

激光武器课题本身有一定的试验经费外,还单独安排了一些课题和经费,对激光武器的试验技术进行专题研究,以保证试验技术与武器设计技术同步发展,避免因试验技术落后而延缓新型装备交付进度^[21]。典型如美国国防部办公厅(OSD)的国防预算。

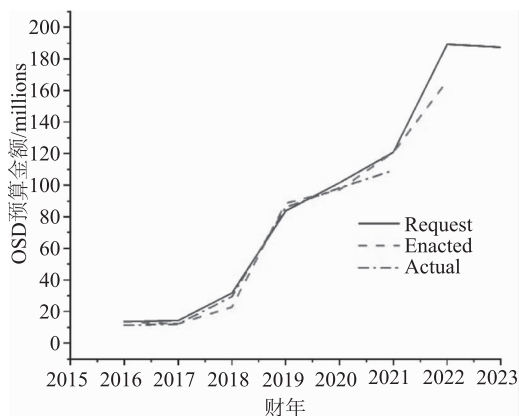


图3 OSD 预算经费变化

Fig. 3 Changes for the OSD's budget

建设通用试验设施,供各行业使用,促进健康发展。试验条件建设方面,国外同步推动建设了大量的靶场、专用设施以完成各类定向能武器的试验与评估,促进定向能技术从研发系统过渡到采办项目,如在白沙靶场、穆谷角基地、科特兰基地等处建设了高能激光系统、高功率微波系统试验场,支持各机构的定向能系统试验^[18],为定向能技术开发提供支撑。

持续进行演示验证试飞,建立完善的技术体系。国外建设了多个激光武器试验机开展试验试飞,促进相关技术的发展和成熟。ALL项目中将 NKC-135 空中加油机改装成机载激光实验室,1983 年试飞中击落了 AIM-9B“响尾蛇”导弹、BQM-34A 火蜂靶机^[12];ABL项目将 B747 客机建设为试验机,在试飞中击落了固体燃料战术导弹“小猎狗-黑雁”和液体弹道导弹“飞毛腿 B,可摧毁最远距离约 80km 的助推段弹道导弹^[12-14];ATL项目基于 C-130 运输机建设试验机,于 2009 年在飞行试验中成功击毁了 15km 外的地面车辆^[12-14];2017 年,雷锡恩公司利用阿帕奇直升机作为试验机,演示了直升机的机载激光武器,命中 1.5km 目标^[12-14];A-60 试验机、塞斯纳 208B 激光武器试验机等都开展了飞行试验;通过这些试飞从不同角度推动了激光武器的

科学研究、技术研究、工程集成、项目管理等的进步,验证了机载激光武器的可行性,后续项目主要集中于小型化、多平台集成、大气传输等关键部分的研究工作。高功率微波方面,2011年通过CHAMP等项目也持续开展试飞验证^[10-11]。

6 结 论

国外通过建立完善管理机构,持续投入经费,长期开展机载高能激光武器、高功率微波武器基础研究、试验研究,型号工程应用逐步加速,对其研究有以下结论:

1. 由于高能激光、高功率微波与载机、大气、目标作用复杂,相关规律仍不够清晰,仍需长期投入;
2. 高能激光、高功率微波短期内仍无法取代常规武器,其与常规武器的协同使用方法研究是重点,以便为不同能量级别高能激光、高功率微波找到合适的应用领域,制定合理的技术指标和发展路线;
3. 由于技术成熟度低、尚有大量科学规律未摸清,需建设试验平台,从模型算法、关键部件、分系统到全系统逐步开展飞行试验验证,提升技术成熟度,降低研发风险;
4. 随着高能激光、高功率微波武器的逐步使用,反定向能武器的研究逐步扩大,对人员、设备的防护研究提升。

参考文献:

- [1] KELLEY M S, ANDREW F, JOHN R H, et al. Department of defense directed energy weapons: background and issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2021.
- [2] KELLEY M S, ANDREW F, JOHN R H, et al. Department of defense directed energy weapons: background and issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2022.
- [3] RONALD O R. Navy shipboard lasers for surface, air, and missile defense: background and issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2015.
- [4] RONALD O R. Navy Shipboard lasers: background and issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2022.
- [5] SCHNEIDER W J. Defense science board task force on directed energy weapons systems and technology applications [R]. Washington, D C, 2007, 10-97.
- [6] MARK G, CHARIS D. Changing the game - the promise of directed energy weapon [R]. Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2012.
- [7] SCHNEIDER W J. Final report of the defense science board summer study task force on high energy laser weapon system applications [R]. Washington, D C, 2001, 9-213.
- [8] CHRISTOPHER B, STEVEN A H. Airborne laser (ABL): issues for congress [R]. Congressional Research Service, 2007.
- [9] JAN S, GTZ N. Assessment of long range laser weapon engagements: the case of the airborne laser [R]. Science and Global Security, 2010, 18: 1-60.
- [10] Zhao Hongyan, Zhouli. Research on the development of high-power microwave weapon abroad [J]. Aero Weaponry, 2023, 30(4): 42-48. (in Chinese)
赵海燕, 周丽. 国外高功率微波武器发展研究 [J]. 航空兵器, 2023, 30(4): 42-48.
- [11] He Juntao, Yao Jinmei, Wang Lei. Research status and prospect of high power microwave technology in the united states and europe [J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(4/5): 123-137. (in Chinese)
贺军涛, 姚金妹, 王蕾. 美欧高功率微波技术研究现状及发展趋势 [J]. 信息对抗技术, 2023, 2(4/5): 123-137.
- [12] Zhang Yizhuo. Progress in airborne lasers weapon research [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 91-100. (in Chinese)
张亦卓. 美国机载激光武器研究进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(7): 91-100.
- [13] Yang Jianbo, Zong Siguang, Chen Lifei. Developments and trends of laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6): 695-704. (in Chinese)
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.
- [14] Tian Chunyu, Zhang Mengshan. Airborne laser weapon and the key technology [J]. Science & Technology Review, 2019, 37(4): 30-34. (in Chinese)
田春雨, 张猛山. 机载激光武器及其关键技术 [J]. 科技导报, 2019, 37(4): 30-34.
- [15] Liu Zejin, Yang Moqiang, Han Kai, et al. Research on the design criteria of laser weapons [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1-5. (in Chinese)
刘泽金, 杨未强, 韩凯, 等. 激光武器设计准则探讨 [J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1-5.
- [16] Du Zibing. Research on key technologies for the construction of high energy laser system testing machines [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(7): 979-986. (in Chinese)

- 杜梓冰. 高能激光系统试验机建设关键技术研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(7): 979–986.
- [17] Liu Jingru, Du Taijiao, Wang Lijun, et al. High energy laser system test and evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- 刘晶儒, 杜太焦, 王立君, 等. 高能激光系统试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [18] 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. (in Chinese)
- 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.
- [19] Wang Xuezheng. Test design for airborne HPM weapon [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(5): 5–9, 14. (in Chinese)
- 王雪铮. 空基高功率微波武器系统试验设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39(5): 5–9, 14.
- [20] ERIC L, KEI K. Critical and emerging technologies list update[R]. National Science and Technology Council. 2022, 2.
- [21] Zhang Baozhen, You Chenyu, Wu Jianlong, et al. Focus areas of US military test technology development in the light of US department of defense test & evaluation/science & technology program[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(10): 1–8. (in Chinese)
- 张宝珍, 尤晨宇, 吴建龙, 等. 从美国防部试验鉴定科技计划看美军试验与测试技术发展重点[J]. 测控技术, 2020, 39(10): 1–8.