



## 机载激光武器试验评估技术研究

杜梓冰 李晓明

**Research on test and evaluation technology of airborne laser weapon**

DU Zibing, LI Xiaoming

引用本文:

杜梓冰, 李晓明. 机载激光武器试验评估技术研究[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 507–513. DOI: 10.5768/JAO202445.0310003

DU Zibing, LI Xiaoming. Research on test and evaluation technology of airborne laser weapon[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 507–513. DOI: 10.5768/JAO202445.0310003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310003>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### [某型机载武器投放轨迹姿态测量方法研究](#)

Method for measuring delivery trajectory and attitude of a certain type of airborne weapon

应用光学. 2017, 38(6): 953–957 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603002>

##### [高能激光武器目标打击的多物理场系统仿真](#)

Multiple physical fields system simulation for high energy laser weapon target attacking

应用光学. 2017, 38(4): 526–532 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0401002>

##### [一种机载光电设备减振系统设计及稳定精度试验研究](#)

Design of vibration damping system for airborne optoelectronic equipment and research on stability accuracy test

应用光学. 2018, 39(4): 453–459 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401002>

##### [美国舰载激光系统的成熟度评估](#)

Technology readiness level assessment on ship-borne laser weapon system

应用光学. 2021, 42(1): 9–15 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101002>

##### [双目立体视觉技术在结构试验中的应用](#)

Application of binocular stereo vision technology in structural test

应用光学. 2018, 39(6): 821–826 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601008>

##### [地面最小操纵速度试飞光电测试方法](#)

Photoelectric test method for ground minimum control speed flight test

应用光学. 2021, 42(6): 1072–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 03-0507-07

# 机载激光武器试验评估技术研究

杜梓冰<sup>1</sup>, 李晓明<sup>2</sup>

(1. 中国飞行试验研究院, 陕西 西安 710089; 2. 复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 10076)

**摘要:** 由于毁伤机理和使用方法的不同, 现有机载武器和传感器的试验方法不适用于机载激光武器。为研究其特殊的试验与评估技术, 从国外典型机载激光武器的试验情况着手, 分析了主要的试验阶段、试验内容、试验类别、管理特点等, 对气动光学特性、出光特性、目标探测识别跟踪、光束控制和杀伤性试验等主要科目的内容、方法进行研究。研究表明, 美国为了避免试验技术落后研制技术, 采取了多计划安排一体推进、大力构建试验机、建设试验设施和循序渐进开展试验等管理措施促进相关的研究。建议加强试验技术的投入, 适时建设体系化试验机, 加强测试和靶标等领域的研究, 以期为新质武器的成熟和应用提供帮助。

**关键词:** 机载激光武器; 演示验证; 飞行试验; 试验机; 试验技术

中图分类号: TN248; TJ953; V217

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310003

## Research on test and evaluation technology of airborne laser weapon

DU Zibing<sup>1</sup>, LI Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China; 2. Science and Technology on Complex Aviation Systems Simulation Laboratory, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Due to the differences in damage mechanisms and combat methods, the existing test methods for airborne weapons and sensors are not applicable to airborne laser weapons, and it is necessary to study the foreign special test and evaluation techniques. Starting from the test situation of typical airborne laser weapons in foreign countries, the main test phases, test contents, test categories, and management characteristics were analyzed, and the contents as well as methods of the main subjects, such as aerodynamic-optical characteristics, light emission characteristics, target detection, identification and tracking, beam control, and lethality test were studied. The results show that, in order to avoid the test technology lagging behind the research and development technology, the America has adopted the management measures of promoting relevant researches such as multi-program arrangement, vigorously construction of test machines, building of test facilities and conduct of tests in a gradual manner. It is recommended that the investment in testing technology should be strengthened, the systematic testing machines should be constructed in a timely manner, and the research in the areas of testing and targeting should be enhanced, with a view to promoting the maturation and application of new qualitative weapons.

**Key words:** airborne laser weapon; demonstration verification; flight test; experimental aircraft; test technology

## 引言

机载高能激光武器是美国下一代战斗机、新型轰炸机研制中重点讨论的武器, 是一种颠覆性

新质作战力量, 具有光速到靶、攻击灵活、精准毁伤、持续作战能力强、作战效费比高等优点, 有望首先应用于应对空空导弹、防空导弹, 以提高载机

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-10-05

基金项目: 基础加强基金 (2022-JCKY-JJ-0598, 2023-JCJQ-JJ-0089)

作者简介: 杜梓冰 (1986—), 男, 高级工程师。E-mail: duzibing@126.com

防御能力,发展成熟后可拓展至对面打击、反弹道导弹、反卫星等领域<sup>[1,6]</sup>。

国外的车载、舰基高能激光武器已经不断扩大型号列装和应用,但机载高能激光武器相比其他平台的激光武器更加复杂和困难,激光器与机载平台、大气、目标相互作用关系复杂,科学机理和工程问题仍较多,因此尚未有型号应用。美国从上世纪 70 年代起开展机载高能激光武器相关的研究,国防部下属空军等部门支撑了多个机载高能激光武器系统项目,出台了对应的投资管理计划,进行了低功率替代、全状态级演示验证飞行试验,验证了基本原理和关键技术,逐步提升了技术成熟度<sup>[1]</sup>。

试验是验证新装备技术成熟度的必要手段。西北核技术研究所刘晶儒等人比较全面地总结了陆基激光武器的试验技术体系<sup>[6]</sup>;李华等人从试验靶场建设、试验设施和试验技术等方面研究了国外强激光武器试验概况<sup>[7]</sup>;刘国权等人从试验基地的角度阐述了战术高能激光武器试验的特点,分析了国内对相关试验资源的需求,提出了发展建议<sup>[8]</sup>;魏昊波等人研究了美国高能激光系统试验与评价技术的政策、靶场资源建设、试验组织特点等<sup>[9]</sup>。这些研究范围包括地基、舰基、机载等多种领域,有较大的借鉴意义,但研究范围比较宽泛,没有专门针对机载高能激光试验评估技术的研究。

鉴于机载平台与其他平台特性差异大,机载激光武器难以直接沿用其他平台激光武器试验技术,本文着重研究美国、前苏联和以色列等国机载高能激光武器试验情况,从试验项目、试验机建设、试验场和试验设施建设等方面分析、总结提炼试验技术体系,以期为后续相关的研究提供借鉴和支撑。

## 1 国外机载高能激光武器发展概况

美国是最早开始机载高能激光武器研究的国家,影响力较大的项目包括 1976 年开始的机载激光实验室 (airborne laser laboratory, ALL) 项目、1992 年开始的机载激光武器 (airborne laser,ABL) 项目、2000 年开始的先进战术激光武器系统 (tactical laser weapon, ATL) 项目<sup>[1]</sup>。这些项目开展了形式多样的地面试验、飞行试验,对地面车辆、空中靶机、靶弹等进行了毁伤试验,通过这些项目获得了激光器、光束控制、大气传输评估、靶标建

设等领域的技术研究以及工程经验,为后续各相关项目奠定了技术、工程和管理方面的基础<sup>[1,6]</sup>。近年来,美国持续重点支持激光器小型化、先进光束控制、飞行员激光防护、反激光等方面的研究项目,并计划在歼击机、无人机、轰炸机上加装激光武器,将激光武器列为下一代空中优势主宰(NGAD)系统簇的核心能力项<sup>[10]</sup>,以形成空战领域新的不对称作战优势。

前苏联与美国在激光器的发明及武器化研究初期几乎保持同步,于 1977 年基于“伊尔-76MD-90E”建设了机载激光武器演示验证机,命名为“别里耶夫 A-60”,但试飞研究进度落后于美国,该项目后因前苏联解体而下马<sup>[5]</sup>。有报道称俄罗斯近年重启了机载激光器反卫项目研究,未来还可能在较新的运输机和新型战略轰炸机上配装激光武器<sup>[5]</sup>。

以色列近期计划是采用波音公司的运输机安装 100 kW 级激光武器。为了实现该目标,在前期采取了循序渐进、逐步递增的方式开展试验,于 2021 年基于赛斯纳 208B 小型民用飞机建设了 1 万瓦级的试验机,于 2021 年 6 月的飞行试验中击落了约 1 km 远的“蓝鸟”靶机、“天空打击者”巡飞弹,成为第 3 个开展机载高能激光武器全系统飞行试验的国家<sup>[5]</sup>。

## 2 国外机载高能激光武器试验内容和方法

### 2.1 试验总体情况

试验评估是促进装备系统作战能力生成和实战化应用的重要手段。美国一般将武器装备的试验按阶段划分为研制试验与评估、鉴定试验与评估、作战试验与评估等类型,从国外机载高能激光武器的发展来看,都只处于研制试验与评估阶段,主要是摸索科学规律、验证关键技术、发现潜在的设计或技术问题,以提高技术成熟度、降低工程技术研发风险,尚未到鉴定试验、作战试验的阶段。通过对 ABL 等项目的试验进行分析,机载激光武器的试验从形式上可分为数字仿真试验、风洞试验、地面半实物仿真试验、部件级地面试验、全系统级机上地面试验、飞行试验等<sup>[11]</sup>。从试验专业领域可分为气动光学特性试验、出光试验、目标探测识别跟瞄试验、光束控制试验、杀伤性试验。飞行试验包括低功率替代试验、全状态试验,其中在

低功率替代试验中采用较低功率激光器,一般用于验证目标跟踪、光束控制、大气补偿、全系统全交战过程的功能模拟试飞等,如ABL项目在2007年就开展了50次低功率替代飞行试验<sup>[11-12]</sup>,在低功率替代飞行试验后再进行全状态飞行试验,对系统各项功能性能进行全面验证。

## 2.2 气动光学特性试验

机载激光武器出光后的第一步挑战即是光从炮塔射出后穿过炮塔周围的复杂流场进入大气。炮塔附近流场结构复杂,存在马蹄涡、分离剪切层、局部超声速区、局部激波等,光束穿过其中会发生偏折、抖动、波前畸变、远场光斑弥散和峰值强度降低等强烈的气动光学效应,导致到靶激光强度降低,从而严重影响毁伤效能<sup>[11]</sup>。因此,首先应开展启动光学特性的试验,分析气动光学效应,以便开展抑制工作。

美国波音公司、洛·马公司、圣母利亚大学、佐治亚理工学院和佛罗里达州立大学、MZA Associates公司等一直致力于气动光学效应研究和试验。在ABL、机载激光气动光学实验室、航空自适应控制、先进自防御激光器等项目研究中<sup>[11-12]</sup>,采取的研究方法是先进行CFD数值仿真,然后利用阿诺德工程发展中心和艾姆斯研究中心等地的风洞进行气动光学效应测量和自适应校正控制方法研究。利用风洞试验数据与CFD仿真数据进行比对修正模型,再利用赛斯纳、猎鹰飞机以及全状态试验机等进行飞行试验,使用真实飞行试验数据进一步校准数字仿真和风洞试验模型,通过数字仿真、地面风洞、他机飞行试验、本机飞行试验等相结合的方式不断研究如何更好地控制炮塔上方的空气流动,逐步优化炮塔布局、尺寸等,以最大限度地减轻光学畸变,减少空气流动对激光系统性能的影响<sup>[11]</sup>。

## 2.3 出光特性试验

出光特性试验的目的是为了验证激光器是否工作可靠,以及出光持续时间是否能达到杀伤水平。出光特性试验内容和顺序一般为:地面单模块试验、地面集成低功率试验、地面满功率试验、地面机内低功率试验、空中机内低功率试验、空中满功率试验,基本试验过程如下:先由跟踪系统捕获到靶目标,然后引导高能激光器向靶目标发射激光束,通过在出口及靶标上布置测量传感器,测量并计算出激光器的光电效率、输出功率、光束质

量,以及照射到靶目标上的光斑半径、连续工作时间和总能量等参数<sup>[6, 8]</sup>。

在出光特性试验中,如何准确测量激光远场能量的时空分布特性是关键,是其他各类参数评定的基础,现在常见的是采用光电阵列靶斑仪作为测量设备<sup>[6-7]</sup>。在机载高能激光的试验中,由于平台飞行速度快,在靶斑仪上的入射角变化快,对靶斑仪测量范围、测量精度均要求高,相关设备的研制也比较困难<sup>[6-7]</sup>。

## 2.4 目标探测识别跟踪试验

激光武器系统是由多个系统组成的多级目标搜索与跟踪系统,稳定跟踪是有效杀伤目标的基本前提。机载激光武器相比陆基、舰载激光武器的典型特征是武器平台和目标都可能处于高速运动状态,对跟踪稳定性的要求更高,激光束不仅要瞄的准,而且要能在高动态条件下在目标上锁定一定的时间,相关的试验需要更加的充分<sup>[6]</sup>。通过研究ABL等项目试验情况,可将跟踪试验内容和顺序设计为:地面上单系统试验、机上集成后对地面静目标试验、机上集成后对地面动态目标试验、机上集成后对空中目标试验、空中对地面目标试验、空中对空中目标试验<sup>[12]</sup>。目前,美军已经具备了跟踪瞄准地面、空中的静态目标、机动目标的跟踪试验能力。此外,美国弹道导弹防御局称,ABL项目在2009年6月完成了2次对“小猎犬-猞猁”舰空导弹的跟踪和大气补偿试验以及低功率发射试验;机载激光器试验台项目在2011年完成了对“民兵III型”洲际弹道导弹的激光追踪试验、对“米诺陶-4”火箭的被动跟踪试验,试验中通过红外系统捕获并跟踪了一枚500 km外的助推段导弹<sup>[13-17]</sup>。

## 2.5 光束控制试验

在强激光武器系统中,光束控制系统利用激光束实现远程传输,并使其能量集中最大化。光束控制试验目的是验证其精确地指向并聚焦目标的能力,具体过程如下:系统首先对目标进行定位、跟踪并确定与目标间的距离,然后补偿大气湍流,最后验证激光器连续跟踪目标时保持激光光束聚焦的能力,以及对大气影响的动态补偿能力<sup>[6, 16]</sup>。

ABL等项目开展了多种状态下的试验。如利用替代激光器完成了千瓦级跟踪照明激光器和信标照明激光器的地面和控制低功率发射试验、激光光学试验,这种跟踪激光器采用与杀伤性高能激光器不同的波长,主要用于指示目标,验证了跟

踪和瞄准弹道导弹的能力<sup>[13]</sup>。ABL 项目自 2000 年开始利用他机、本机的低功率替代、全状态等试验系统, 进行了多场景下的光束控制、动态补偿试验<sup>[6, 13]</sup>, 证实了 ABL 团队正确实现了光束系统光学组件、操纵可变形反射镜和传感器的校准, 从而可以将激光导引向真正的目标。试验结果表明, 由光学部件、随动机构、应变透镜和传感器构成的光波控制子系统的校准效果很好。前苏联也利用试验机开展了大量的大气光学、光束控制飞行试验, 积累了丰富的经验。

### 2.6 毁伤靶试

毁伤靶试是全面检查系统各项功能和性能的试验, 验证不同功率、出光时间、攻击角度下对不同目标的毁伤能力, 从而发现系统存在的问题并改进, 美国和以色列都开展了毁伤靶试, 试验顺序为: 实验室试验、地面对静态材料试验、地面对静态实物试验、空对空目标试验<sup>[7-9]</sup>。

靶试需要配置相应的靶标, 美国使用了靶材、模拟靶标、真实目标等多类靶标, 包括静态目标、动态目标。为了验证武器系统的多种作战能力, 也需要针对不同的靶标进行试验。如, ATL 项目先是于 2009 年 6 月 13 日在白沙靶场完成了对地面假目标的打靶试验, 然后于 8 月 30 日完成对地面固定车辆的打靶试验<sup>[13]</sup>。ABL 项目在 2010 年 1 月对一枚装备有测量系统的“远程导弹模拟靶装置”靶弹进行了打靶试验; 2010 年 2 月起, ABL 先后拦截了固体燃料探空火箭、“飞毛腿”战术弹道导弹、“小猎狗-猞猁”导弹等目标, 最大成功拦截距离 80 km<sup>[13]</sup>。以色列在 2021 年 6 月使用“蓝鸟”靶机、“天空打击者”巡飞弹为靶标完成打靶试验<sup>[5]</sup>。由于激光武器的作用效果在于激光与目标的长时间相互作用, 对材质、目标结构、作战态势的逼真性要求较高, 因此需要比较真实的靶标。这不仅使得试验组织复杂、代价高昂, 而且由于靶弹的存在, 整个试验的安控也变得更加复杂。

## 3 主要管理措施和方法

### 3.1 多计划安排一体化推进

美国在上世纪末本世纪初, 敏锐地认识到在定向能、智能、高超声速等领域, 其试验技术与设计技术存在较大的差异。为避免试验技术落后于设计技术, 采取了多种措施促进相关试验技术的发展<sup>[18]</sup>。在机载激光武器试验领域, 采取了一些与传

统武器发展中不一样的做法。

一方面, 推行研制与试验一体化。机载激光武器与机载激光测距机、激光定向干扰仪等激光产品相比, 存在作战对象不同、能量不同、目的不同等差异; 与机载导弹、炸弹等传统武器相比, 存在使用方式不同、毁伤机理不同等差异。因此, 机载激光武器需要独特的试飞和评价技术, 无法直接沿用传统的试验技术体系。为此, 美国大力推行设计试验一体化, 从国防预算中安排试验项目及资金, 在项目研究立项之初即考虑地面试验、飞行试验等相关试验<sup>[14, 18-19]</sup>。

另一方面, 在各试验鉴定管理计划里安排专门的激光武器试验研究内容, 主要包括 1991 年设立的试验与评价核心投资计划<sup>[20]</sup>、2002 年设立的试验与评价/科学与技术计划、2007 年设立的联合任务环境试验能力计划<sup>[20]</sup>, 以促进激光武器试验技术的发展<sup>[20]</sup>。试验鉴定科技计划中的 8 个新兴试验项目之一即为激光武器的定向能试验, 如图 1 所示<sup>[20]</sup>。

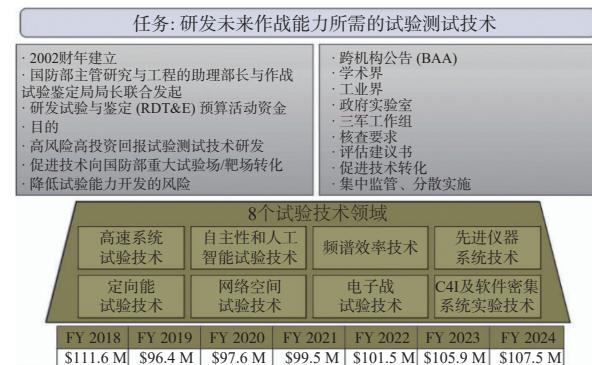


图 1 美国试验计划

Fig. 1 Test plan of America

### 3.2 建设试验机进行演示验证试飞

用各类试验飞机进行关键技术、产品的验证, 是航空先进技术研究、产品研制的关键技术手段和途径<sup>[5]</sup>。机载激光武器系统庞大、技术复杂, 作用机理与传统武器有根本差别, 作用效果与载机特性、大气特性、目标材质和作战态势等息息相关, 这些因素的影响是仿真、地面试验难以完全模拟的, 必须通过真实的飞行试验进行探索, 并逐步解决<sup>[3]</sup>。美国陆续启动了多种平台的激光武器项目, 在 ABL、ALL、ATL 等项目中均基于大型运输机建设了演示验证用试验机<sup>[1]</sup>, 前苏联、以色列也建设了专业试验机。试验机建设过程中, 为了降低成本、加速研发进程, 都尽量坚持采用现有的部

件或系统, 或者直接使用技术已经成熟的商用部件, 再根据需要对载机做适应性改装, 这比专门研制一架试验飞机省时、节约经费, 且试验平台的可靠性更高。ABL 试验机布局如图 2 所示<sup>[13-14]</sup>, 它是所有激光武器试验机中建设最为全面、系统的试验机, 由载机平台、广域态势感知系统、激光器、光束控制/火控系统和作战管理与指挥、控制、通信系统等组成, 对机载激光武器的发展有重要的借鉴意义<sup>[13-14]</sup>。

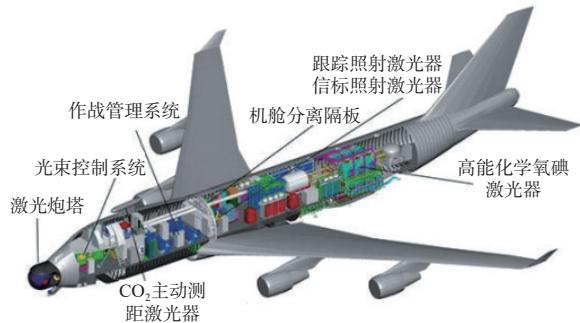


图 2 ABL 机载系统组成与布局

Fig. 2 Composition and layout of ABL airborne system

### 3.3 构建全方位试验资源

为支持从仿真试验到全系统靶试试验的开展, 推进集成前原型系统的发展, 演示验证高能激光武器系统的各种功能, 美国各部门配套建设了全面的试验设施资源, 建设了多种试验平台, 开发了新型的测试技术, 以提高高能激光武器试验鉴定的能力, 如高能激光系统试验设施、固体激光器试验平台、空军的机载激光试验台等<sup>[9]</sup>。

其中, 建设最早、最为全面的是白沙靶场内的激光武器试验设施, 近年来各军种也新建了相关的实验室<sup>[9, 15]</sup>。80 年代末开始, 在白沙靶场建设了高能激光系统试验设施、战术高能激光器静态试验场、危险测试区等试验区<sup>[9, 13]</sup>, 以及光束导引仪、脉冲激光脆弱性测试系统、战术高能激光光束控制器、激光试验台、联合高功率固体激光器、固态光纤激光器、目标反射能量测量系统、地面目标辐照度测量系统、大型真空室、光学维护设施等试验设施<sup>[9, 13]</sup>, 同时还拥有完善的大气建模、预测和测量系统, 能研究大气对高能激光系统的影响。这些试验设施能支持三军、国防部、美国航空航天局以及外国和商业定向能系统的试验, 能够提供试验设施和实验室、试验数据分析和文件编制等一站式服务, 从而为各种激光的传输、毁伤能力, 生存能力, 脆弱性和动态交战特性提供独一无二的

试验和评估能力。

美国海军自本世纪初在位于加州的穆古角海上靶场发展激光武器试验能力, 使用圣尼古拉斯岛作为测试场地, 放置激光武器靶标, 利用退役军舰作为激光武器试验船, 支持地对地、地对空、空对空和空对地激光武器试验, ABL 项目也曾在此开展飞行试验。美国海军又于 2021 年 12 月 3 日在加州文图拉县海军基地建成定向能系统集成实验室, 与穆谷角靶场联合, 用于定向能武器技术和样机的研究、开发、集成、试验, 是美国海军唯一能在复杂海洋环境中测试、发射与评估激光武器的专用完整实验设施, 可进行海上目标和海上空中目标的打击试验, 试验区域覆盖 10 万平方千米的受控空域与海域。

美国陆军 2022 年在红石兵工厂建设定向能系统集成实验室, 以加速激光武器技术融入作战系统。定向能系统集成实验室作为建模和模拟的关键场所, 支持激光系统在作战应用场景中应对各种威胁, 加快和简化激光武器的研发, 成为未来激光武器技术试验的场所。

美国空军研究实验室定向能部门 2022 年向蓝光环公司授予了一份为期 10 年、总金额 8000 万美元的合同, 以建立一个专门用于定向能武器建模和仿真的虚拟靶场, 作为定向能武器公共试验设施, 支撑美国防部对定向能武器的兵棋推演<sup>[21]</sup>。2023 年 1 月, 又向辐射技术公司采购激光武器试验与测试服务。

### 3.4 制定合理的试验发展路径

在系统梳理美国所有机载高能激光武器试验活动后, 不难发现, 其试验遵循以下发展路线: 先实验室试验后外场试验、先地面试验后空中试验、先模拟试验后实物试验、先单模块试验后集成性试验、先分系统试验后全系统试验、先静态试验后动态试验、先低功率试验后高功率试验、先替代性试验后实体试验、先被动试验后主动试验<sup>[12]</sup>。

随着技术的进步和系统的发展, 高能激光武器试验的难度不断提高, 试验的条件逐步接近真实的作战环境, 靶目标类型不断增多, 靶标的作战能力不断增强, 复杂性逐步提高。试验类型从研制试验逐步过渡到作战试验与鉴定, 前者的功能是验证系统的工程设计和开发过程的完备性, 而后者则是全面评估武器系统的作战能力。在高能激光武器试验中, 只有在较低层次的演示试验中, 试验成功率达到一定高的水平后, 才会继续提高试

验难度，并在此基础上逐步向“实战化”迈进。这种渐进的发展路线很大程度上降低了发展新型军事技术和武器系统的风险，提高了试验的成功率。纵观整个 ABL 研发项目，美军依次对“出光试验、跟踪瞄准试验、飞机适航性试验、集成性试验”4 个知识点进行了试验，这 4 个知识点中，又有许多小的知识点。

#### 4 发展启示和建议

注重体系化发展，推行研制和试验同步发展。在激光武器设计的同时，同步考虑构建试验设计、试验方法研究、评估指标体系、试验资源建设等技术体系，采取逐个突破的方式开展研究，避免研发出来后再进行试验研究，出现试验技术与装备研制不匹配的情况。

机载高能激光武器系统庞大而复杂，与载机平台、大气环境、目标的作用效果复杂，需要通过大量的试验试飞探索相关的科学规律，不可一蹴而就，需循序渐进发展。

建设系列化试验机，采取部件级、分系统级、全系统级逐步递进的飞行试验方式，验证关键技术、关键部件，逐步提升技术成熟度，降低研发风险，尽量避免“一步到位”的发展思路。

加强测试测量和专用靶标体系构建。研究专用空-空、空-天试飞所需的特殊测试技术和设备，构建逼真度高、工程周期和经费均能满足的靶标。

#### 5 结束语

机载高能激光武器的研制比其他任何机载武器的研制都更难，而试验和评估是其研发历程中的必要环节。美国通过 ALL、ABL、先进自防御激光武器等机载激光武器项目的研究，突破了众多关键技术，积累了丰富的工程经验，目前正向型号应用转换。在机载高能激光武器的发展过程中，需要与之配套的持续支持试验与评估的研究，适时建设试验机。美国当前试验内容主要包括气动光学效应、出光能力、探测识别与跟踪、光束控制、杀伤性等方面，需要建设配套的试验设施，如半实物仿真系统、各类型靶标、专用测量系统等。

#### 参考文献：

- [1] 张雪. 第五代战斗机机载武器发展设想及关键技术[J]. 航空兵器, 2017, 24(4): 8-13.
- [2] 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): 91-94.
- [3] ZHANG Xue. Development assumptions and key technologies of airborne weapons for the fifth generation fighters[J]. Aero Weaponry, 2017, 24(4): 8-13.
- [4] ZHANG Yizhuo. Progress in airborne lasers weapon research[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 91-94.
- [5] 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): 1201001.
- [6] LIU Zejin, YANG Weiqiang, HAN Kai, et al. Research on the design criteria of laser weapons[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201001.
- [7] 许晓军. 高能激光六十年: 回顾与展望[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 11007.
- [8] XU Xiaojun. Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(1): 11007.
- [9] 杜梓冰, 汤恒仁, 刘琨, 等. 以色列机载激光武器发展及试飞特点研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1547-1553.
- [10] DU Zibing, TANG Hengren, LIU Kun, et al. Development and flight test characteristics of Israeli's airborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(12): 1547-1553.
- [11] 刘晶儒, 杜太焦, 王立君. 高能激光系统试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 180-184.
- [12] LIU Jingru, DU Taijiao, WANG Lijun. High energy laser system test and evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 180-184.
- [13] 李华, 成斌, 王非, 等. 国外强激光武器试验技术[J]. 光电技术应用, 2003, 18(3): 1-4.
- [14] LI Hua, CHENG Bin, WANG Fei, et al. Foreign development of high energy laser weapons and prospect of test technology[J]. Electro-optics & Passive Countermeasures, 2003, 18(3): 1-4.
- [15] 刘国权, 史圣兵, 陈振兴. 国内战术激光武器现状及中心试验需求分析[J]. 兵器试验, 2015(4): 39-41.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [ 10 ] Air Force. Department of defense fiscal year (FY) 2023 budget estimates[R]. Washington: Office of the Secretary of Defense, 2022.
- [ 11 ] 陈勇, 袁强, 姚向红, 等. 转塔气动光学效应的自适应校正分析[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2401004.  
CHEN Yong, YUAN Qiang, YAO Xianghong, et al. Adaptive correction analysis of aero-optical effects of a turret[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2401004.
- [ 12 ] 光研部落. 美国报道战斗机载激光武器吊舱项目气动光学风洞试验取得进展[EB/OL]. (2021-08-08)[2023-09-15]. [http://www.sohu.com/a/482099812\\_100034932.html](http://www.sohu.com/a/482099812_100034932.html).
- [ 13 ] CHRISTOPHER B, HILDRETH S A. Airborne laser (ABL): issues for congress[R]. Washington: Congressional Research Service, 2007.
- [ 14 ] 陈黎. 美国机载激光器研发近期进展情况及未来前景[J]. 激光与红外, 2011, 41(3): 243-247.  
CHEN Li. Development status and prospects of American airborne laser[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(3): 243-247.
- [ 15 ] US Army. White sands missile range-range customer handbook[R]. State of Mexico: WSMR Business Development Office, 2012
- [ 16 ] 朱文越, 钱仙妹, 饶瑞中, 等. 高能激光大气传输性能评估技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 1203002.  
ZHU Wenyue, QIAN Xianmei, RAO Ruizhong, et al. Evaluation technology of high energy laser atmospheric propagation performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 1203002.
- [ 17 ] 殷宗迪, 高志远, 朱猛, 等. 机载激光武器高精度跟踪控制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 3788.  
YIN Zongdi, GAO Zhiyuan, ZHU Meng, et al. Research on high precision tracking control technology of airborne laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 3788.
- [ 18 ] SAYLER K M, HOEHN J R. Defense primer: directed-energy weapons[R]. Washington: Congressional Research Service, 2022.
- [ 19 ] STUPL J, NEUNECK G. Assessment of long range laser weapon engagements: the case of the airborne laser[J]. *Science & Global Security*, 2010, 18(1): 1-60.
- [ 20 ] 张宝珍, 尤晨宇, 吴建龙, 等. 从美国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.  
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.
- [ 21 ] 蓝海长青智库虚拟靶场+最新战斗管理概念!美空军 Deke Deuce实验聚焦定向能/动能系统联动 | 武器[EB/OL]. (2022-03-08)[2023-10-5]. <https://www.163.com/dy/article/H1UPIQCH0511DV4H.html>.