

文章编号:1001-5078(2023)07-0979-08

· 综述与评论 ·

高能激光系统试验机建设关键技术研究

杜梓冰

(中国飞行试验研究院,陕西 西安 710089)

摘要:研究高能激光系统试验机建设中的关键技术,以期推动机载高能激光的发展。研究了试验飞机在航空科技领域的作用和地位,并以美国典型的X试验机、F22和F35航电它机进行说明;阐述了试验机在机载高能激光发展中的重要性和必要性,并分别研究了美国、前苏联和以色列机载高能激光武器试验机建设特点,包括已试飞的和规划中的;总体分析了试验机建设过程中关键技术识别、技术成熟度分析、试验机设计、试验机改装和测试记录等关键技术点。

关键词:机载高能激光武器;试验机设计;飞行试验

中图分类号:TJ951;V217 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.001

Research on key technologies for the construction of high energy laser system testing machines

DU Zi-bing

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to promote the development of airborne high-energy laser weapon, key technologies in the construction of a test machine for high-energy laser systems is studied. The role and status of the flight test airplane in the field of aviation science and technology is studied, and illustrated with the typical US X-test aircraft, the F22 and the F35 avionics. The importance and necessity of testing machines in the development of airborne high-energy lasers is explained and the characteristics of the construction of airborne high-energy laser weapons in the United States, the former Soviet Union and Israel, including those that have been flown and those that are planned, are analyzed respectively. Overall analyses of the key technical points in the construction of the test machine are conducted such as key technology identification, technology maturity analysis, test machine design, test machine modification and test documentation.

Keywords: airborne high-energy laser weapon; flight test airplane design; flight test

1 引言

飞行试验贯穿于航空技术和航空产品发展的始终,是科学概念和工程技术应用之间的桥梁。利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和产品研制的关键技术手段和途径^[1],美、俄、英等航空强国均发展了多样的试验

机,最具代表性的是美国的X系列验证机^[2]、F22和F35它机等^[3],促进了航空科学技术的研发进度、降低了技术风险^[4]。

自激光器诞生以来,世界各国都寻求其在武器上的应用,但其系统庞大、技术复杂,作用机理与传统武器有根本性差别,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

作者简介:杜梓冰(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事机载武器飞行试验与鉴定方面的研究。E-mail: duzibing@126.com

收稿日期:2022-08-26; **修订日期:**2022-09-20

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^[4-6]。美国、前苏联、以色列等从上世纪 70 年代后陆续开展了机载激光武器的研究工作,建设了试验机对关键原理、技术进行试飞验证,证明了机载激光武器的可行性,大力推动了激光器、光束控制、气动光学、靶标建设、项目管理等方面的进步^[5,7]。

当前各国机载激光武器的研究方面主要从激光武器出发,研究集中于小型化高功率激光器研制^[4-5]、大气光学效应研究^[8]、激光能量测试评估等^[9],对于飞行试验所需试验机建设的研究较少。

机载激光武器系统是飞机平台与激光武器两大系统的深度结合,不是传统的飞机平台加装一个武器,也不能仅将飞机平台当作激光武器的运载平台,均都是有失偏颇。本文从航空科技发展规律出发,研究试验机的作用和地位,分析国外激光武器试验机建设特点,提炼总结机载激光武器试验机研制建设的关键技术,以期推动高能激光试验机的建设和体系化发展。

2 航空科技发展中的试验机战略

航空技术研究、型号研制涉及多学科多专业,系统复杂技术密集度高、高风险高投入周期长。技术探索注定具有高风险性和不确定性,研究具有科学性,不仅需要大胆设想,更需要小心求证^[3]。在新技术不够成熟时应用于型号研制时难度大、风险高,一旦出现技术缺陷不仅影响载机、人员安全,还可能导致项目推倒重来或下马,对科研发展极为不利,出现人力、财力和物力的损失和浪费^[3]。因此相关的理论、技术必须经过一系列试验的检验,实验室试验只能在模拟或小部分真实环境下进行验证,部分技术必须通过试验机在真实飞行环境下进行验证^[1,10-12]。通过“科学研究”和“应用技术研究”获得的成果只有经过“飞行研究验证”的实践检验和验证才能构成支持型号研制的科学技术应用的基础^[1,12]。

在航空科技领域,通过各类试验机进行领先飞行试验验证、发现缺陷并改进、提升技术成熟度,是美、英、法、俄等世界航空大国的通行做法^[1-3]。通过试验机在真实环境下进行试验,对关键技术进行攻关、验证,确定关键技术的应用效果、可行性和经济性,促进新技术的应用;能及早发现技术缺陷、隐

患并改进,提升技术成熟度,从而缩短研制周期、降低成本和风险;通过试飞能合理评估技术成熟度,提升研究的科学性^[1-4]。

3 航空科技试验机的类型

3.1 试验机分类

美国是世界上试验机发展最早、谱系最全面的国家,其试验机可分为探索性试验机、技术验证机、产品它机验证机、新机验证机这四大类^[2,12]。

探索性试验机,主要是对一些不确定的、未知的理论、模型、方法进行探索,通过试验获取数据验证,如 X-1 对音障的突破、X-15 对高超声速的突破等^[10-12]。

技术验证机,为研究和评价型号总体技术方案可行性,验证新技术、新设备的可行性,主要包括新材料、新结构、新工艺等拟采用的关键技术真实飞行环境下的功能、性能^[10-13]。

产品它机验证机,主要是型号飞机上的产品在其他飞机上进行先期或者同步验证,如 F22、F35 的航电试验机^[2,12]。

新机验证机,也叫原型机,主要是用于产品设计定型试飞用,全面考核评价型号的各项功能、性能、质量、适应性的正式产品,如 F22、F35 的新机,其试飞环境真实,代表产品的最终状态,新机研制中一般会制造多架用途各异的试验机^[2,12]。

根据试验机承担的主要任务专业分,主要可分为气动力它机验证机、发动机它机验证机、飞控系统它机验证机、控制率它机验证机、航电它机验证机等^[12]。

3.2 典型试验机

世界各国建设了各式各样的航空试验机,最具代表性的是美国的 X 系列试验机和 F22 的航电它机等。

3.2.1 X 系列试验机

美国在 1945 年正式开始了 X 系列试验机的研究工作^[10-11],到现在发展了 50 多个试验机。其 X 代表“Experimental(试验)”,即表示不确定又表示对未知的探索,以探索未知为第一要务^[10],主要集中于航空航天领域先进控制率、动力、气动结构等平台方面的验证。在实施中采用渐进式协同开发方法推动技术发展,限量分批突出重点进行新技术飞行验证,利用技术成熟度分析模型进行评估,采取搭载

方式进行飞行试验等方式快速发展^[10-11]。实施中得到了多方的支持,如 DARPA 支持了 11 项,军兵种支持了 18 项,NASA 支持了 22 项,NASA 和 DARPA 共同支持 2 项,民营机构支持 2 项^[10-11]。X 试验机对技术具有巨大的包容性,不限制技术人员思维和工作方式,即使高失败率也仍继续发展新机;有很大的灵活性,试验机的来源可以是快速研制、快速改造,灵活性还表现在时间周期可以短至 10 个月,也可以长到 27 年^[11]。通过系列化的发展,X 系列在航空航天领域诞生了多个世界第一,推动了全世界航空航天科技的进步和发展,有力保证了美国在世界上的领先地位。

3.2.2 F22 和 F35 航电它机

除了 X 系列先进技术验证机外,美国、俄罗斯、英国、法国等航空强国在型号研制过程中还建设了大量的它机试验机,成为飞机子系统研制的必经环节,美国仅爱德华兹空军基地就拥有 C-14、C-135、C-130、B-52 等 10 多种雷达试验机^[2],这些型号它机中对于机载任务系统而言最具代表性的是 F22 和 F35 航电它机。对于 F22 和 F35 这种先进战斗机,由于航电系统种类多、技术新、功能强、综合化程度高,为了降低试飞风险,提高试飞效率,美国在 F22、F35 的研制过程中建设了多个航电试验机。

F22(如图 1 所示)全程使用了波音 757 航电系统试飞验证平台(FTB),对航电系统、设备进行了它机试飞^[12],待技术成熟、状态稳定后再移植到本机试飞。F22 航电它机最典型特征是机头不仅安装了 F-22 的雷达,还在该机头上方安装了一对小型“鸭翼”,该试验机试飞内容占整个项目试飞内容的一半,对雷达、通讯导航和识别、电子战等进行了试飞。通过大量的试飞验证、排故和升级迭代,大幅降低了本机航电系统开发的技术风险,节省了项目经费,加快了研制周期^[2]。



图 1 F22 航电试验机

Fig. 1 Flight test airplane of F22's avionics systems

在 F35 战斗机研制过程中,洛-马公司将一架 AFTIF-16 飞机改装成 JSF 综合子系统技术验证机^[12];诺-格公司将一架 BAC1-11 飞机改装成 JSF35 航电试验机-协同航电试验台(CATB),对传感器航电系统进行验证、测试,软、硬件调整、调试^[12];而波音则将一架波音 737-200 飞机改装成航空电子飞行实验室(AFL),安装了雷达、电子战、前视红外传感器、综合处理机和整套测试设备等^[12]。通过这些它机的飞行试验,验证了 F35 航电系统性能,发现了大量在实验室内无法发现的问题,减少了航电系统研制风险和费用。

4 激光武器试验机建设必要性分析

对于机载高能激光系统的工程应用,判断其成功与否的关键是能否实现激光能量的高效定向传输^[8],涉及到 4 大方面,一是系能上机集成、二是能稳定出光、三是能定向传输到目标上、四是能与目标产生有效作用效果。目前美国等在陆基、舰基、车载激光武器方面都已有型号应用或试用中的背景下,机载高能激光武器仍无型号应用,关键问题之一是机载激光武器作战过程涉及多种因素难以解决,在这过程中,由于环境的巨大差异,当前科学认识和技术手段下,这些问题仅靠仿真计算、实验室试验无法解决,必须通过大量真实环境下的飞行试验进行探索、验证、迭代,逐步促进技术的发展。

大系统的耦合与优化需要通过真实飞行试验的方式去验证、调试。机载激光武器系统复杂、庞大,其集成不仅仅是一个把地面上或者其他平台上的激光武器系统移植到飞机上的问题,国防科大刘泽金的研究结果表明:激光武器研制面临的困难包括兆瓦级高光束质量光源难、远距离作战难、高效毁伤难、高效紧凑难、实战应用难^[4],相应的设计准备要求功重比和功体比决定了系统的体积规模,为适应各类平台应用,应尽量压缩功重比和功体比^[4],需要考虑一体化设计、平台环境适应性、可维护性等因素^[4],热-机-电等多个系统的互联、耦合、优化,需要通过飞行试验的方式进行验证。

机载平台对跟瞄的影响研究需要真实飞行试验。激光武器毁伤机理是激光能量传输到目标上并在小范围内稳定一段时间,要实现能量的聚集投送,必须实现高精度跟瞄,保证出光的稳定性^[14]。机载平台的振动和噪声、外部流场等严重

影响了跟瞄精度,这些特性在不同的大气环境、不同飞行状态下是不同的,必须通过飞行试验的方式探索、验证,并针对性的设计减振措施,这个过程对于机载光电产品是漫长而反复的,需要通过大量飞行试验积累数据。

机载激光武器要实现作战,还需要解决能量通过大气传输到目标上的问题。朱文越指出“高能/高功率激光束在地球大气中传输时,除了衍射效应造成的激光束空间几何展宽之外,其他所有影响激光大气传输效果的主要因素均与大气参数密切相关”^[8],由于大气环境复杂性、时变性,要摸清高能激光与大气的关系,必须通过大量的试验进行。

5 国外典型机载激光武器试验机特点分析

机载激光武器一般包括以高能激光器、高精度跟瞄发射、大功率热管理、作战管理等为一体的综合武器系统^[5,7],其系统复杂、技术难度大,相比于其他武器装备而言发展更为缓慢,虽然美、前苏联、英、法、德、以色列等多国都在研究^[6-11],但至今仍仅有美、前苏联、以色列成功建设了基于大型运输机、小型民机的激光武器试验机,开展了演示验证飞行试验,目前正在发展歼击机、直升机和无人机平台的试验机。

5.1 运输机平台

在作战使用上,部分大飞机是预警机和加油机等高价值目标,本身易于被针对性攻击,需要一定的自卫能力;同时大飞机载重大,适合装载携带大体积激光武器执行战略打击、区域导弹防御等任务^[15-17];在试验机构建上,大飞机载重大、空间大、供电量大、易于改装、便于开展试验,因此美、前苏联等首先选择大飞机作为激光武器试验机,以便验证作战概念、关键技术。

其中,1976年美国空军推出了机载激光实验室(ALL)项目,将CO₂激光武器系统改装于NKC-135运输机上,ATP安装于机身背部,光源等系统安装于舱内^[16]。

美国在1992年推出了持续近20年的机载激光武器(ABL)项目(如图2所示),以波音747-400F为载机进行颠覆性改装^[18]。该试验机主要建设特点是平台载重大、空间大、性能优,对改装和试验极为有利;试验机系统建设全面,各分系统庞大、性能优异,比如态势感知系统能对360°范围内的目标进行

探测跟踪,且作用距离和精度同时较优^[18];对试验机的改装较为彻底、颠覆。在试验中遇到的主要问题的激光器与载机的兼容性、载机振动对激光束控制影响较大,抖动厉害^[18]。

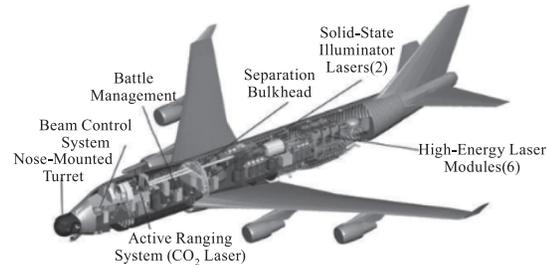


图2 ABL试验机

Fig. 2 Flight test airplane of ABL

美国空军2000年启动的先进战术激光武器系统项目(ATL),将百千瓦级功率的COIL激光器系统安装在C-130运输机上^[16]。美国国防部在2018财年启动了一项指导性工作,在AC-130J空中炮艇机上集成激光武器的机载高能激光(AHEL)计划^[17],通过提供一个高精度、低附带损害、非动能打击的选择,对作战行动产生直接影响,补充原有打击系统,提高隐蔽作战能力。

这些试验机开展的飞行试验包括出光、大气传输、跟瞄试飞、振动测试、集成试飞、光束控制/火力控制系统试飞、毁伤试飞等科目的试飞等,其中ALL试验机在飞行试验中共击落了5枚AIM-9B响尾蛇空空导弹和1架BQM-34A火蜂靶机,ABL试验机在2010年试飞中成功拦截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”^[18],ATL试验机于2009年成功击毁了15km外的地面车辆^[16]。

美国通过这几个试验机的飞行试验,完成了机载激光武器可行性验证,获得了机载激光器、光束控制、大气传输评估、靶标建设等领域技术验证以及工程经验积累,验证了大气层中使用激光武器的可行性,为后续各个项目的研发奠定了技术、工程和管理方面的深厚基础^[7],在此之后的项目中,基本都是针对激光器小型化、紧凑化等关键技术攻关为主。

前苏联与美国在激光器的发明、武器化初期几乎保持同步,在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”(如图3所示),但后续进度落后于美国,后因前苏联解

体而下马,俄罗斯近年重启了机载激光器反卫项目,未来还可能在较新的“伊尔-476”运输机和PAK-DA新型战略轰炸机上配装激光武器^[15]。



图3 A-60 试验机

Fig.3 Flight test airplane of A-60

以色列也规划在波音747上开展100 kW级激光武器演示验证试飞。

5.2 轰炸机平台

大型轰炸机,一般是高价值目标,是敌方攻击的重点,需要一定的防御能力,也需要一种新的打击能力。2009年,美国在开启了大型飞机电激光器ELLA项目,预期将100 kW激光器安装在B-1B轰炸机上用于平台自身导弹防御。

5.3 歼击机平台

随着机载传感器、导弹、先进无人机性能的提升,以及“弹群”、马赛克战等作战概念的出现,战机面临的空中威胁越来越大,传统的防护手段有限,急需新的防护能力。美空军实验室因此在2015财年启动了自卫高能激光器演示样机(Self-protect High Energy Laser Demonstrator, SHIELD)项目,开发战斗机载紧凑型激光武器系统,技术成熟度要求6级,其目标是形成一套集成于F-16一类歼击机的激光武器吊舱,并进行试飞演示,以防御空中导弹、无人机的威胁^[16],然而该项目进度一再延期,直到2022年交付了激光器。根据美国国防部2023财年公开预算显示,SHIELD项目2023年计划完成激光吊舱的系统集成、地面试验,作战任务增加了反巡航导弹,相比2022财年增加预算1839.7万美元,这表明美军从分系统验证中看到了其未来更广阔的作战应用领域,更加重视定向能技术,预计到2023-2024年将开展全系统的飞行试验。

5.4 直升机平台

2022年,俄乌冲突中,乌克兰使用廉价、老旧的单兵便携式低成本防空导弹即可击落价值数千万美元的俄罗斯直升机,战效比很高。这表明直升机面临的主要威胁仍然是地空导弹,急需加强防护能力,其中手段之一即是激光武器。目前美国直升机低能

激光定向干扰系统目前已经比较成熟,能对来袭导弹进行干扰。而在直升机上配装高能激光武器,可以进一步提升对来袭导弹的拦截能力,提高直升机的生存能力。2017年,雷锡恩公司利用阿帕奇直升机作为试验机,演示了直升机载激光武器,命中1.5 km初级和中级目标^[16]。

5.5 小型民机平台

以色列计划远期将100千瓦级激光武器配装于波音的运输机上进行集成,验证机载高能激光武器的作用,并逐渐向型号转变。以色列采取循序渐进,逐步递增的方式开展试验,以色列在2021年6月基于赛斯纳208B小型民用飞机(如图4所示)开展了光纤激光武器的飞行试验,在飞行试验中击落了约1 km远的“蓝鸟”靶机、“Sky Striker”巡飞弹,成为第三个开展机载激光武器全系统飞行试验的国家^[7]。以色列在该次试验中,将整个激光武器系统装于载重仅2吨的小型飞机,以低功率开展演示验证,为远期100 kW千瓦激光武器的型号应用打下基础^[19]。

该机长11.45 m,机高4.53 m,翼展15.87 m,航时6 h,最大巡航速度341 km/h,升限7224,最大可用载重2005 kg,ATP安装于机腹侧面,光源安装于舱内。



图4 赛斯纳208B载机

Fig.4 Cessna 208B flight test airplane

5.6 大型无人机平台

当前无人机平台性能越来越优异,不仅飞行速度快、载重大,更重要的是飞行高度越来越高,因此可以最大程度上避免大气环境和云层对激光武器使用的不利影响。美国国防部导弹防御局(MDA)2016财年在预算“MD98:定向能武器原型开发”中安排了低功率激光演示器(LPLD)项目,目的是将激光武器系统集成于吊舱,挂载于无人机平台,拦截处于助推段的弹道导弹,初始计划平台为MQ-9 Block5。

6 激光武器试验机建设关键技术分析

美国、前苏联和以色列机载激光武器试验机特点和经验表明,机载激光武器与陆基、舰基有很大的不同,试验机的建设应遵循航空科技发展规律,循序渐进分阶段逐步验证,不断的改进,逐步提高稳定

性,关键技术的攻关和验证是主线、技术成熟度的科学评价是基础、试验机的设计和测试改装是实施中的关键。

6.1 关键技术和试验需求识别

机载激光武器系统复杂、庞大,从高能激光的产生、光束控制、大气传输与目标的相互作用等诸多环境,融合了多学科理论、方法和技术^[16]。建设试验机还涉及机载、大气、激光能量测试等,试验技术体系复杂,对于这样的庞大工程,首要工作是识别关键技术问题,明确“验证什么”,如果把普通技术问题当成重点问题去攻关则造成资源浪费、精力的分散,而忽视重大技术问题则会对后期工作带来巨大阻碍^[20]。

因此首先从体系角度全面的识别机载激光武器研发中的关键技术,对其进行判定,将确定的关键技术作为技术成熟度评价对象,为开展试验机建设和试飞打下基础。

6.2 技术成熟度评价

试验机的规划和建设是系统性工程,是目标、资源、资金和技术等多种因素的综合权衡,合理的规划是成功的保障。关键技术识别后,需要进行表 1 的技术成熟度评价^[20],以便清晰了解技术状态,识别技术状态与发展目标之间的差距,使管理部门、技术人员能够了解和把握关键技术发展状况,避免试验机战略规划大而空,可行性差,通过技术成熟度与目标的差异,也能够明确发展计划,应对潜在技术风险,掌握关键过程,提高控制能力。ABL 项目就是最典型的技术成熟度评价不充分,制定的目标和计划太高,以至于最后耗时近 20 年仍下马^[18]。

表 1 技术成熟度等级

Tab. 1 Technology readiness levels

技术成熟度等级(TRL)	度量指标描述
等级 1	基本原理已被发现或描述
等级 2	应用及技术形成基本概念
等级 3	技术概念和应用通过可行性论证
等级 4	技术方案和途径已通过实验室验证
等级 5	部件或功能模块通过模拟环境验证
等级 6	以演示样机为载体通过典型模拟环境验证
等级 7	以工程样机为载体通过典型模拟环境验证
等级 8	以生产样机为载体通过环境验证和试用
等级 9	以产品为载体通过实际应用

6.3 试验机总体设计技术

试验机的设计,会遇到许多互相矛盾的因素,一般新加系统会对原机的各项设计造成影响。邱奇佳制定了如图 5 所示的试验机集成方案^[21],并通过仿真研究表明,在机载激光武器的集成过程中,机载激光武器系统需要庞大的电能供给,产生大量的废热需要处理,激光器的安装占用飞机空间,增大燃油消耗,为了增大作用距离所采用的大口径发射镜会带来气动阻力和隐身方面的问题,总之机载激光武器的安装将会从飞行能力、隐身能力、作战能力、生存能力等诸多方面对飞机产生影响^[21],使之偏离原设计点,为此应该采取一定补偿措施,使得各种设计因素达到新的平衡^[17],无论所验证的设备多急迫,都必须严格遵守基本的安全性、过载、重量、重心、性能、品质、强度、包线、设计极限、预留余度^[22],一架试验机最终就是这各种矛盾的最佳折中,并取得良好平衡的结果^[21-22]。

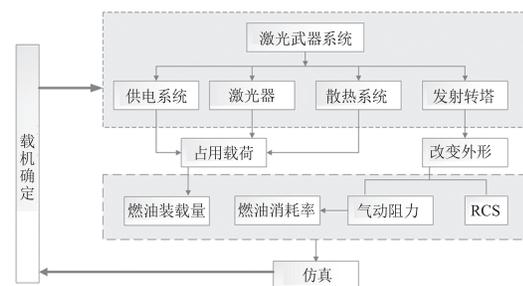


图 5 试验机集成设计分析框架

Fig. 5 Integration and analysis of flight test airplane

在试验机的设计中,安全性的考虑是最核心的,要高度重视新系统对原机安全的威胁。安全性设计过程中尽量使改装“独立”^[22],将试验系统“封装”,减少与载机的接口,使试系统与原机系统尽量相对独立,或能在紧急情况下快速切断接口独立,从而减少安装试验系统对飞机安全的影响。对于经过适航认定的飞机进行改装时,都要求改装后也进适航认证,保持相同的适航水平^[22]。

在满足安全的前提下,需要考虑各项性能的折中,一般采用理论研究和仿真分析相结合的方式^[22],对各种因素给出不同的水平,然后进行组合,仿真分析得到不同的结果,通过不断的迭代寻找最合适的条件。

6.4 试验机改装技术

除了部分 X 系列飞机和新机验证机之外,其余绝大部分试验机均是在成熟飞机上加装新设备集成

建设试验机,国外的机载激光武器试验机也不例外。这类试验机在建设中,需要有先进的改装技术^[22]。

在成熟飞机上加装庞大而复杂的激光武器系统,首先需要进行改装风险分析,识别风险源,进行失败概率和失败后果分析,给出风险等级,对不同等级风险采取不同的处理措施降低风险^[22];改装中要进行气动构型分析,补偿跟瞄系统改装物带来的气动损伤,达到新平衡;根据起降重量、重心限制,以便于设备工作、维护,减少改装工作量等,合理布置舱室和武器系统各设备的安装位置;改装前后进行完整的强度、刚度、振动、颤震和疲劳方面的分析考虑,必要时进行试验验证;采用系统工程方法,充分考虑飞机电磁环境剖面,了解电磁环境水平,进行电磁兼容性设计和管理,避免新系统之间、新系统与原机系统之间出现电磁干扰,影响任务执行和飞行安全^[22];进行“人-机-环境”系统设计,确保系统优化,使飞行员、机上工作人员能够安全、高效、舒适地工作,这对飞行时间长、项目时间长的项目尤为重要^[22]。对于经过适航审定的试验机,改装后还应符合适航审定相关的要求。

6.5 试验机测试技术

建设试验机的目的是通过飞行试验验证和评估设计理念、技术、产品,因此必须要相应的测试记录系统,以便获取试验中各系统的性能参数,用于实时遥测监控和事后处理分析^[22]。对于成熟平台上加装试验系统的,测试偏重于试验系统,对于型号试验机则应对平台、各分系统都进行全面测试。针对各个试验科目,数据测试和记录都应全面、充分、稳定,采样率满足数据处理要求,遥测既要满足飞行安全监控,也要满足任务执行监控。

7 结 语

机载激光武器系统作为一种颠覆性作战系统,是航空技术、激光武器技术两大领域的深度融合,要综合考虑二大领域各自的特点,不能以单一领域的思路去推进,需通过建设试验机开展飞行试验,进行科学机理、先进理论、技术和产品的验证,以提升技术成熟度、降低风险。建设过程中,关键技术的识别和技术成熟度的评估至关重要,是合理建设试验机的基础,而在设计、改装过程中,要以安全为第一目标,同时实现各项技术指标、项目进度、资金、资源等多方面的权衡。

参考文献:

- [1] Li Xiangyang. Research on key technology of weapon test aircraft[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(3): 13-16. (in Chinese)
李向阳. 武器试验机建设关键技术研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(3): 13-16.
- [2] Lü Jie. Flying ahead [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2004. (in Chinese)
吕杰. 飞在前面 - 推动航空技术发展的试验研究机 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.
- [3] Wei Chang. Study on the prototype strategy of aerospace vehicle explore [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
魏畅. 飞行器型号研发中的样机战略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [4] Liu Zejin, Yang Weiqiang, Han Kai, et al. Research on the design criteria of laser weapons [J]. Chinese Journal of Lasers 2021, 48(12): 1201001-11201001-5. (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): 1201001-11201001-5
- [5] Xu Xiaojun. Retrospect and prospect on 60-year development of high energy laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(1): 011007-1-011007-5. (in Chinese)
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): 011007-1-011007-5.
- [6] Qin Zhiyuan, Xu Xiaojun, Liao Weiming, et al. Introduction to laser weapon systems [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
秦致远, 许晓军, 廖为民, 等. 激光武器系统导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014
- [7] 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): 1547-1153. (in Chinese)
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): 1547-1153.
- [8] Wei Haobo, Hu Liming, Song Lei. Development and enlightenment of foreign high power laser system test and evaluation technology [J]. Computer Measurement and 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
- [9] 彭小波. 从 X 系列飞行器看我国“样机”战略(上)[J]. 航天工业管理, 2013, (1):38-40.
- [10] 彭小波. 从 X 系列飞行器看我国“样机”战略(下)[J]. 航天工业管理, 2013, (2):52-55.
- [11] 张启鹏, 刘超强, 刘庆灵. 它机验证试飞技术的发展[J]. 大飞机, 2021, (4):18-21.
- [12] 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):12302-1-12302-12. (in Chinese)
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):12302-1-12302-12
- [13] Research Group of Strategic Research on China's Laser Technology and Its Application by 2035. strategic research on China's laser technology and Its application by 2035 [J]. Engineering sciences, 2020, 22(3):001-006. (in Chinese)
“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”项目综合组. 我国激光技术与应用 2035 发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3):001-006
- [14] 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):20200391-1-20200391-9. (in Chinese)
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):20200391-1-20200391-9.
- [15] Yang Jianbo, Zogn Siguang, Chen Lifei. Developments and trends of laser weapons [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.
- [16] 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.
- [17] Yi Hengyu, Suo Xingwen, Yi Xinyi, et al. Development of AC-130J AHEL system [J]. Laser Technology, 2021, 45(2):174-181. (in Chinese)
易亨瑜, 锁兴文, 易欣仪, 等. 美国运输机机载激光系统研制进展[J]. 激光技术, 2021, 45(2):174-181.
- [18] 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.
- [19] Israel Has Shot Down Drones With An Airborne High-Power Laser [EB/OL]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/41192/israel-has-shot-down-drones-with-an-airborne-high-power-laser>.
- [20] Wan Qin, Lu Huan, Shi Zhenfei, et al. Systematic management of aviation scientific research project based on technology maturity [J]. Trainer, 2016, (2):58-62. (in Chinese)
万琴, 鹿欢, 施振飞, 等. 技术成熟度视角下航空科研项目分类管理研究[J]. 教练机, 2016, (2):58-62.
- [21] Xun Qijia. Combat simulation based effectiveness evaluation methods for airborne laser weapon system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. (in Chinese)
鄢奇佳. 基于作战仿真的机载激光武器 [D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
- [22] Ouyang Shaoxiu, Zhao Xuexun, Qiu Chuanren. Modification design for special-purpose aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
欧阳绍修, 赵学训, 邱传仁. 特种飞机的改装设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.