

文章编号:1001-5078(2025)01-0026-07

· 激光应用技术 ·

## 便携式激光反无人机系统设计与实验验证

胡海力<sup>1</sup>, 彭小康<sup>1,2</sup>, 郭鑫民<sup>1</sup>, 何晓博<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国航天三江集团有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 激光反无人机系统是利用高功率激光能量会聚到目标上进行毁伤的定向能系统。当前对于便携任务场景的反无人机需求增加, 由于大功率高功率激光系统重量和体积大, 不易于执行便携任务场景。本文开展了便携式激光反无人机系统设计, 研究可班组携行、可拆卸的便携式激光反无人机系统。本文采用轻小型化主轴跟踪与大行程精跟踪结合的设计方法, 基于风冷散热激光器, 实现了2000 W便携式激光反无人机系统设计。为了验证便携式系统性能, 开展了静态毁伤实验、跟踪实验、动态打击实验、便携性能测试。设计的2000 W的便携式激光系统, 总重量160 kg以内, 具备拆解为四个40 kg以内的单模块, 满足两人携行和搬运使用。外场实验中, 300 m处静态击穿2 mm厚不锈钢板时间为12 s, 动态打击无人机击落时间为9 s。实验结果表明: 设计的激光反无人机系统具有便携性能, 可应用于近距离反无人机任务场景。

**关键词:** 高功率激光系统; 反无人机; 便携式; 外场实验

中图分类号: O435; TH74 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.004

## Design and experimental verification of portable laser anti-UAV system

HU Hai-li<sup>1</sup>, PENG Xiao-kang<sup>1,2</sup>, GUO Xin-min<sup>1</sup>, HE Xiao-bo<sup>1</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Space Sanjiang Group Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The laser anti-UAV system is a direct energy system that uses high-power laser energy to converge onto the target for destruction. The current demand for anti-UAV systems in portable task scenarios is increasing. Due to the weight and volume of high-power laser systems, it is not easy to execute portable task scenarios. This article presents the system design of a portable laser anti-UAV system and research on a portable laser anti-UAV system that can be carried by teams and disassembled. This article adopts a design method that combines lightweight and compact spindle tracking with large stroke precision tracking, and based on an air-cooled heat dissipation laser, realizes the design of a 2000 W portable laser anti-UAV system. In order to verify the performance of the portable system, static damage experiments, tracking experiments, dynamic strike experiments, and portable performance tests were conducted. A 2000 W portable laser system with a total weight of less than 160 kg, capable of disassembling into four single modules weighing less than 40 kilograms, suitable for two people to carry and transport. In the field experiment, the time to penetrate the 2 mm thick stainless steel plate at a distance of 300 m was 12 s, respectively. The dynamic strike UAV can be shot down in 9 s. The experimental results show that the designed laser anti-UAV system has portable performance and can be applied to the anti-UAV task scenario.

**Keywords:** high power laser system; anti-UAV; portable; field experiment

作者简介: 胡海力(1985 -), 男, 副研究员, 主要从事光学设计、激光毁伤、光学测试等方面的研究。

E-mail: huhaili\_hit@163.com

收稿日期: 2024-11-20

## 1 引言

以小型无人机为代表的‘低慢小’目标,民用和军事使用越来越频繁,也给安防和国防带来重大威胁,越来越成为各个国家安防关注的焦点。

‘低慢小’目标是指低空慢速小目标,常见的低慢小目标包括四旋翼无人机等小型航空器,以及风筝和气球等空飘物<sup>[1]</sup>。发展反制‘低慢小’目标的系统已成为热点。各种应对反制‘低慢小’目标的手段也不断涌现,如电子干扰<sup>[2]</sup>、吊网捕捉<sup>[3]</sup>、机枪扫射等,但很大缺点就是效费比都很低<sup>[4-5]</sup>。

随着定向能装备的技术成熟,高功率激光反无人机手段越来越受到重视<sup>[6]</sup>。高功率激光反无人机系统是利用光束发射系统将高能量激光发射到目标体上,实现对目标的干扰和毁伤。

激光反无人机系统具备软硬毁伤结合的优势,有着诸多独特的性能:一是激光装备具有响应迅速和射速快的特点;尤其是可以非常灵活地改变发射方向,以光速传输的速度使其一旦瞄准就能够立刻击中目标;二是激光装备的运行具有相当高的效费比,是导弹等成本的几十万分之一;同时还拥有很强的抗电磁干扰能力<sup>[7]</sup>。

现有大功率高功率激光反无人机系统的不足是体积庞大、成本昂贵,不便捷运输使用,无法在轻型车载平台上,以及楼顶和山顶等特殊地点使用<sup>[8-9]</sup>。当前对于小型车辆、楼顶、山顶等特殊地点的便携反无人机任务需求增加,急需轻质、小型化的激光反无人机系统,便于多域作战灵活部署,以应对最后末端的地面和空中威胁<sup>[10]</sup>。

本文为解决激光反无人机系统存在的上述不足,提供了一种便携式高功率激光反无人机系统。该系统的分系统均可拆解为 40 kg 以内单独小组件,便于搬运和运输,体积小、重量轻、成本低,便捷运输使用,可在楼顶和山顶等特殊地点使用。基于透射式光学系统视场大、小型化、轻量化的优点,应用到高功率激光反无人机系统中,可降低主轴跟踪结构的精度尺寸和重量,再结合风冷激光器,可以实现便携式反无人机系统。

## 2 高功率激光系统简介

高功率激光反无人机系统(如图 1)组成上,一般包括指挥控制分系统、ATP 分系统、激光源分系统、供电分系统和平台分系统<sup>[11]</sup>。指挥控制分系统用于接

收上级指令进行目标引导和跟踪打击控制;ATP 分系统用于探测识别目标、跟踪引导目标、控制高功率激光打击目标;激光源分系统用于输出高功率激光,供系统打击无人机目标;供电分系统用于激光器和其他分系统的供电;平台分系统,一般高功率激光系统需要一套复杂的车载或其他平台系统,用于安装系统硬件。

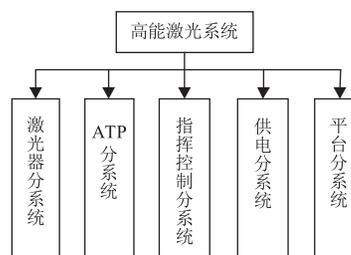


图 1 高功率激光系统组成图

Fig. 1 Schematic diagram of high energy laser system

## 3 便携式激光反无人机系统设计

### 3.1 便携式需求

对标国外便携式激光反无人机系统,如美国推出的“利爪”激光系统<sup>[10]</sup>,具有紧凑式、小型化的便携式系统特色。总结起来,具体便携式需求如下。

(1)轻量化需求:各模块均采用小型化设计,整体占地面积小,单模块重量不大于 40 kg。

(2)模块化需求:激光器选取了现有的汽车制造行业用激光器产品,与电源模块、散热模块以及光束导向器模块集成。可用行李箱运输。

(3)可拆装可便携需求:可以集成在作战车辆上,也可安装在支架上使用,拆卸后可由 4 个行李箱大小的容器收纳,2 名人员即可安装操作。

(4)操作便携:由电池组提供电力,操控简单,可由笔记本电脑和游戏手柄控制。

### 3.2 系统设计

便携式激光反无人机系统,在大功率激光系统基础上,对各个分系统进行便携式设计,满足近距离、模块化、可拆解、两人携行需求。

系统设计思路:以体积重量功耗环境为约束,辅助考虑周期和成本可实现,设定目标函数对扩束倍率、发射口径、成像参数进行迭代,同步进行仿真验证,最终目的是满足跟踪精度、工作距离等总体指标要求。图 2 为系统设计框图。

便携式激光反无人机系统设计要点如下:

(1)激光源分系统(图 3),去掉繁重的水冷散

热设备,采用一体化风冷激光器,体积小重量轻。激光功率 2000 W、 $M^2$  优于 1.5,重量小于 25 kg,电池重量小于 12 kg,整套激光器总质量不超过 37 kg。采用风冷散热输出头,使用时不需要其他配套设备,方便运输和携带。

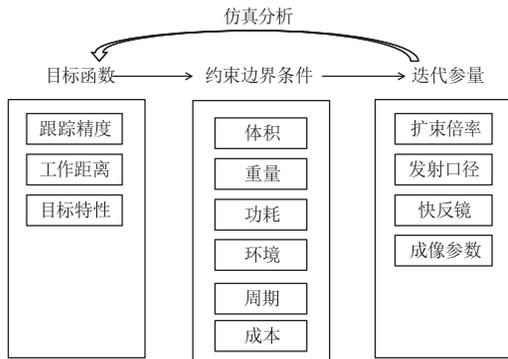


图2 系统设计框图

Fig.2 Schematic diagram of system design

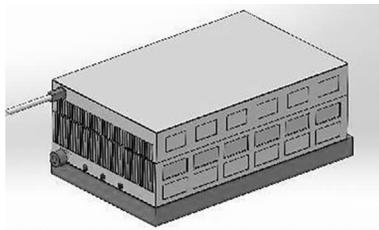


图3 激光源分系统设计图

Fig.3 Design diagram of laser source subsystem

(2)ATP 分系统(图4),采用透射式大视场精跟踪技术,即可实现激光发射和可见光成像共光路设计,即实现观测点即打击点的设计。又可降低对主轴跟踪组件要求,实现小型化轻量化跟踪,发射成像组件和主轴跟踪组件且可分解拆卸。

(3)平台分系统用包装箱作为结构载体,大大减小系统尺寸重量,而且方便搬转运运输,如图5所示。

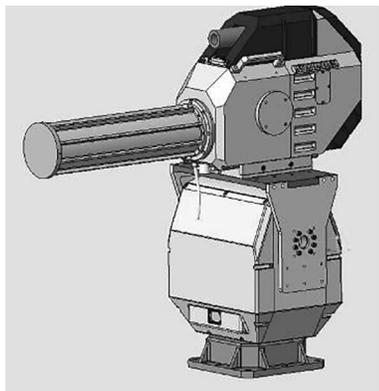


图4 ATP分系统设计图

Fig.4 ATP subsystem design diagram

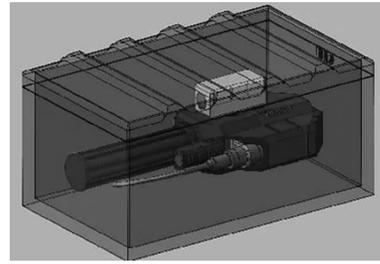


图5 发射成像组件包装箱设计图

Fig.5 Design drawing of packaging box for launch imaging components

### 3.3 工作原理

便携式激光反无人机系统,激光器的高功率激光束,通过光纤耦合准直进入透射式 ATP 分系统,ATP 分系统的激光发射和光路跟踪成像共光路共用快反镜,实现发射光路和成像光路耦合,控制单元通过快反镜即可实现对目标指定部位的成像锁定,又可对目标出光激光打击。图6为激光发射与控制原理图。

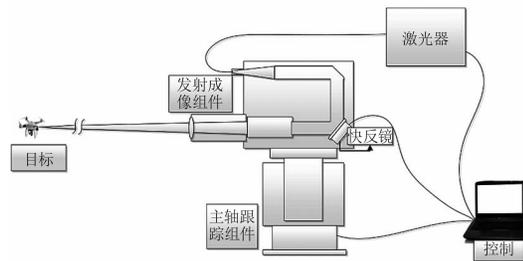


图6 激光发射与控制原理图

Fig.6 Schematic diagram of laser emission and control

便携式激光反无人机系统的跟踪控制原理为复合轴伺服控制理论,如图7所示。复合轴伺服控制系统<sup>[12]</sup>,是由主轴跟踪系统及其上安装一个两轴可调的快速反射镜组成。主轴跟踪系统的视场大、频带较窄、跟踪精度差,完成目标的粗跟踪。子轴跟踪系统,视场小、响应快、跟踪精度高,在粗跟踪基础上完成精跟踪。在本系统中主轴跟踪系统为转台,子轴跟踪系统为包含快反镜的发射成像组件。

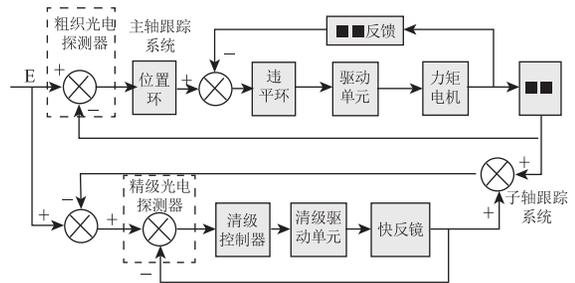


图7 复合轴跟踪控制原理图

Fig.7 Schematic diagram of composite axis tracking control

### 3.4 设计结果及分析

#### 3.4.1 轻量化和模块化设计结果

2000 W 型便携式激光反无人机系统总重量不大于 160 kg,激光器分系统总质量不超过 37 kg。主轴跟踪组件重量 25 kg。控制箱和电脑重量 14 kg。发射成像组件和主轴跟踪组件,可拆分为独立模块,发射成像组件重量 26 kg、主轴跟踪组件重量 15 kg。3 个包装箱和三脚架重量小于 34 kg。

激光发射模块配有标准 QBH 接口,可快速拆卸激光发射光纤与发射成像组件。

#### 3.4.2 便携式设计结果

平台分系统为 3 个包装箱(图 8):激光器一个箱子;光学发射一个箱子;云台和电脑一个箱子。即可两人携行快速部署,也可车载进行机动打击。



图 8 系统拆解为包装箱实物图

Fig. 8 System disassembly into physical pictures of packaging boxes

#### 3.4.3 大视场子轴跟踪设计结果

大视场子轴跟踪设计结果(图 9),光学设计上采用大视场透射式精跟踪光学设计,精跟踪成像视场可达 1.5°,降低了主轴跟踪的尺寸重量,实现了体积小、重量轻、低成本的跟踪瞄准和激光发射。



图 9 大视场子轴跟踪组件实物图

Fig. 9 Physical picture of the large field sub axis tracking component

子轴跟踪核心器件:大扫描角度快反镜(图

10),实现了 1.5°的大行程精跟踪系统设计。精跟踪硬件采用高帧频、高精度的音圈电机型致动器实现对目标的高精度稳定跟踪。

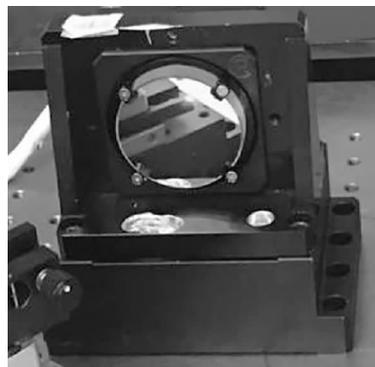


图 10 大扫描角度快反镜组件实物图

Fig. 10 Physical picture of the large scanning angle fast mirror component

#### 3.4.4 作用距离分析

无人机是否能毁伤,取决于在工作距离出高功率激光系统作用到无人机是的到靶功率密度,是否打到无人机毁伤阈值。

高功率激光系统的作用距离与到靶功率密度关系为:在不考虑外界扰动情况下,目标表面到靶平均功率密度  $E$  公式如下<sup>[13]</sup>:

$$E = \frac{\eta PD^2}{\pi(1.22\lambda\beta L)^2}$$

其中,  $\eta$  为发射通道大气透过率;  $P$  为输出功率;  $D$  为发射光斑口径;  $\beta$  为光束质量;  $L$  为工作距离。

由上述公式可以看出,功率  $P$  与  $D^2$  成反比,当激光器功率增大时发射光斑口径可以减小。发射光斑有效口径  $\Phi 120$  mm、激光器输出功率 2000 W,计算到靶功率密度如图 11 所示。

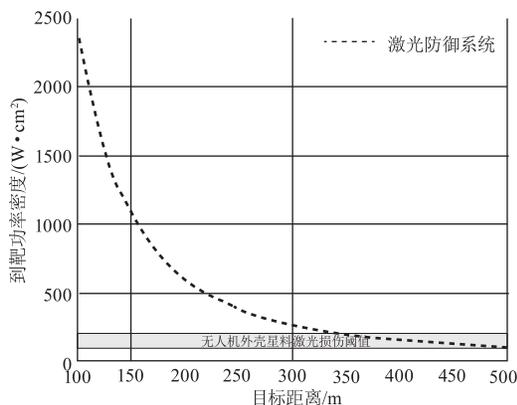


图 11 到靶功率密度与工作距离关系仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of the relationship between target power density and working distance

可见在 500 m 的范围内,到靶功率密度均达到了

无人机外壳激光损伤阈值  $200 \text{ W/cm}^2$ 。根据以往报道数据,无人机毁伤阈值在  $100 \sim 200 \text{ W/cm}^2$  [13-14]。因此,激光功率为  $2000 \text{ W}$  能够满足毁伤距离  $0.1 \sim 0.5 \text{ km}$  的指标要求。

#### 4 实验验证

基于研制的便携式激光反无人机系统样机,开展了实验验证工作,包括静态毁伤实验、无人机跟踪实验、动态打击实验、便携式性能测试等。

实验区域为北方城市郊区,  $500 \text{ m}$  半径范围内安全可控。环境温度为  $+15^\circ\text{C} \sim +25^\circ\text{C}$ , 湿度范围  $20\% \sim 40\%$ , 能见度  $8 \text{ km}$ 。

无人机目标为某典型四旋翼无人机, 尺寸  $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm} \times 196 \text{ mm}$ , 最大水平飞行速度  $20 \text{ m/s}$ 。金属靶板为  $2 \text{ mm}$  厚碳钢板, 尺寸  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

##### 4.1 外场静态毁伤实验

外场静态毁伤实验: 激光出光功率  $2000 \text{ W}$ , 作用距离  $300 \text{ m}$ , 金属靶板为  $2 \text{ mm}$  厚碳钢板。用相机记录不同打击时间时金属靶板的状态。

不同时间金属靶板击穿效果, 如图 12 所示。1 号孔为激光出光  $5 \text{ s}$  结果。2 号孔为激光出光  $9 \text{ s}$  结果。3 号孔为激光出光  $12 \text{ s}$  结果。

实验数据显示 1 号孔已经出现熔融坑, 说明激光功率密度已经达到金属靶板的熔点。2 号孔已经产生了金属熔池, 处于击穿临界点。3 号孔为完全击穿状态。实验结果表明: 研制的便携式激光反无人机系统具备击穿  $2 \text{ mm}$  厚钢板能力。



图 12  $2 \text{ mm}$  厚碳钢板击穿效果图

Fig. 12  $2 \text{ mm}$  thick carbon steel plate breakdown effect diagram

##### 4.2 外场跟踪实验

外场跟踪实验, 验证透射式精跟踪光学系统对

无人机目标的跟踪能力, 对大疆四旋翼无人机, 测试结果如下: (距离  $300 \sim 320 \text{ m}$ 、速度  $5 \sim 6 \text{ m/s}$ ) 目标跟踪精度为  $35.36 \mu\text{rad}$ , 像元角分辨  $6.8 \mu\text{rad}$ 。如图 13、14 所示。



图 13 外场跟踪无人机实测图

Fig. 13 Field tracking UAV actual measurement map

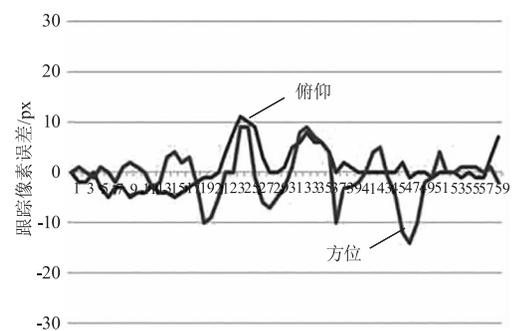


图 14 无人机跟踪像素误差 (距离  $300 \sim 320 \text{ m}$ 、速度  $5 \text{ m/s}$ )

Fig. 14 UAV tracking pixel error (distance  $300 \sim 320 \text{ m}$ , speed  $5 \text{ m/s}$ )

##### 4.3 动态打击实验

动态打击实验, 验证便携式激光反无人机系统对无人机目标的打击能力, 对大疆四旋翼无人机进行飞行中的跟踪与出光打击, 测试结果如下: 激光功率  $2000 \text{ W}$ , 无人机  $9 \text{ s}$  坠落 (打击距离  $300 \text{ m}$ 、速度  $5 \text{ m/s}$ )。毁伤效果如图 15 所示。



图 15 无人机毁伤效果 (距离  $300 \text{ m}$ 、速度  $5 \text{ m/s}$ )

Fig. 15 UAV damage effect (distance  $300 \text{ m}$ , speed  $5 \text{ m/s}$ )

#### 4.4 便携式性能测试

便携式性能测试,是验证系统的便携性能,包括展开和撤收测试。测试结果表明:研制的便携式激光反无人机系统可模块化拆解,2 名人员即可安装操作和展开撤收。使用布局方式具备 3 种型式,可以安装在支架上使用,可拆解为 3 个包装箱进行运输,也可以集成在作战车辆上使用。如图 16 ~ 18 所示。



图 16 便携式系统支架布置图

Fig. 16 Layout of portable system bracket



图 17 便携式系统车载布置图

Fig. 17 Portable system vehicle layout diagram



图 18 便携式系统两人转运图

Fig. 18 Portable system two person transportation diagram

#### 5 结论

本文针对轻量化、模块化、便携式的激光反无人机系统开展了研究,设计了便携式激光反无人机系统,并开展外场实验测试。在外场实验测试中,对以四旋翼无人机为代表的低慢小小目标进行跟踪和毁伤,通过外场实验测试了静态毁伤能力、动态跟踪能力和动态打击能力。

研制的 2000 W 便携式激光反无人机系统,具备拆解为 40 kg 单模块、总重量 160 kg 以内,满足两人携行搬运使用。外场便携式实验中,300 m 处击穿 2 mm 厚不锈钢板时间为 12 s,动态打击无人机 9 s 击落。实验结果表明设计的激光反无人机系统具有便携性能,可应用于近距离反无人机任务场景。

#### 参考文献:

- [1] Han Xiaofei, Meng Wen, Li Yunxia, et al. Key technology of the laser's application in the low slow small target defense[J]. Laser & Infrared, 2013(8): 27 - 31. (in Chinese)
- 韩晓飞, 蒙文, 李云霞, 等. 激光防御低慢小目标的关键技术分析[J]. 激光与红外, 2013(8): 27 - 31.
- [2] Zhang Jing, Zhang Ke, Wang Jingyu, et al. A survey on anti-AV technology and its future trend[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 1 - 8, 34. (in Chinese)
- 张静, 张科, 王靖宇, 等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 1 - 8 + 34.
- [3] Li Yue, Zhou Tongli, Dong Limin. Design of arresting net recovery system for certain unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology: Natural Science Edition, 2004, 18(1): 82. (in Chinese)
- 李悦, 周同礼, 董立敏. 某型无人机拦阻网回收系统设计[J]. 南昌航空工业学院学报: 自然科学版, 2004, 18(1): 82 - 85.
- [4] He Zhongxiang, Li Pengcheng, Wang Shujun, et al. The inhibiting technique aimed at multi-rolling-wing UAV[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2017, 32(3): 42 - 47. (in Chinese)
- 何中翔, 李鹏程, 王淑君, 等. 针对多旋翼无人机的高效压制技术[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(3): 42 - 47.
- [5] Shu Ze, Liu Fang, Xu Haiyang, et al. Development trends and inspirations of anti-UAV equipment overseas[J]. National Defense Technology, 2024, 45(4): 43 - 53. (in Chinese)

- 束哲,刘芳,徐海洋,等. 国外反无人机装备发展态势及启示[J]. 国防科技,2024,45(4):43-53.
- [6] 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.
- [7] Li Wei,Yu Zhifeng,Deng Xiaozhi. Research on the development and construction of laser weapons in the united states[J]. Laser & Infrared,2023,53(11):1637-1643. (in Chinese)  
李伟,余志锋,邓晓智. 美国激光武器发展建设研究[J]. 激光与红外,2023,53(11):1637-1643.
- [8] Zhu Mengzhen,Chen Xia,Liu Xu,et al. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV[J]. Infrared and Laser Engineering,2021,50(7):20200230. (in Chinese)  
朱孟真,陈霞,刘旭,等. 战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析[J]. 红外与激光工程,2021,50(7):188-200.
- [9] Lin Yunzeng,Xu Xiaoyan,Wang Yongfang. Analysis of foreign laser weapon development based on patent trackings[J]. Laser & Infrared,2024,54(2):163-170. (in Chinese)  
林运赠,徐晓艳,王永芳. 基于专利跟踪分析国外激光武器发展情况[J]. 激光与红外,2024,54(2):163-170.
- [10] Yu Huanlong,Wu Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles [J]. National Defense Science & echnology,2019,40(6):42-47. (in Chinese)  
禹化龙,伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展[J]. 国防科技,2019,40(6):42-47.
- [11] Luo Lei,Tan Bitao,Zhang Peng. Research on the development of American ship-borne laser weapons [J]. Aerodynamic Missile Journal,2021,(4):33-37,42. (in Chinese)  
罗磊,谭碧涛,张鹏. 美军舰载激光武器发展研究[J]. 飞航导弹,2021,(4):33-37,42.
- [12] Tang Tao,Ma Jianguang,Chen Hongbin,et al. A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system [J]. Opto-Electronic Engineering,2020,47(10):200315. (in Chinese)  
唐涛,马佳光,陈洪斌,等. 光电跟踪系统中精密控制技术的研究进展[J]. 光电工程,2020,47(10):200315.
- [13] Xu Canran,Sun Shiyang,She Bo,et al. Research on combat effectiveness of ten-kilowatt shipborne laser weapon against UAV [J]. Journal of Ordnance equipment Engineering,2021,42(12):129-134. (in Chinese)  
徐灿然,孙世岩,佘博,等. 万瓦级舰载激光武器反无人机作战效力研究[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(12):129-134.
- [14] Liang Weiwei,Chen Qianrong,Wang Yanbin,et al. Simulation analysis on tactical laser weapon anti-UAV destruction efficiency [J]. Optics & Optoelectronic Technology,2024,22(6):88-95. (in Chinese)  
梁巍巍,陈前荣,王彦斌,等. 战术激光武器对无人机毁伤效果仿真分析研究[J]. 光学与光电技术,2024,22(6):88-95.