

文章编号: 1001-3806(2024)06-0900-06

吊舱式一体化灯抽运固体激光器高效脉冲电源的设计

赖厚川*, 邹加壮, 阳佳峰, 王率军, 雷 晗
(西南技术物理研究所, 成都 610041, 中国)

摘要: 为了实现机载脉冲激光介质高效抽运电源的小型轻量化, 采用一体化结构设计方法, 设计了一套为吊舱式灯抽运固体激光器脉冲氙灯提供抽运能量的高效脉冲电源系统。对氙灯放电特性及器件参数进行了理论分析和实验验证, 获得了氙灯放电主回路关键器件参数, 试制了原理样机并进行了联调实验。结果表明, 电源系统总质量约为 48 kg, 电容充电时间为 3.76 s, 氙灯放电峰值电流为 3.6 kA, 电流脉宽为 1.06 ms; 实际测试数据与理论数据基本一致, 脉冲电源系统放电回路参数设计合理。该关键技术具有可行性, 采用一体化结构设计方法后, 脉冲电源系统体积重量能满足特殊设备的使用需求。

关键词: 激光技术; 脉冲电源; 一体化结构; 脉冲氙灯; 放电特性

中图分类号: TN245 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.016

Design of high-efficiency pulse power supply for integrated podded lamp-pumping solid-state laser

LAI Houchuan*, ZOU Jiazhuang, YANG Jiafeng, WANG Shuaijun, LEI Han
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of low relative load capacity and small volume capacity of helicopter platform, and to achieve the purpose of efficient pumping of airborne pulse laser media, an integrated structural design method was adopted to design an efficient pulse power supply system that provides pumping energy for pulse xenon lamps of podded lamp-pumping solid-state laser. Theoretical analysis and experimental verification were conducted on the discharge characteristics and device parameters of xenon lamps, and the key device parameters of discharge main circuit of xenon lamp were obtained. A principle prototype was trial-produced, and joint debugging experiments were conducted. The results show that the actual test data are basically consistent with the theoretical data, and the discharge loop parameters of the pulse power supply system are designed reasonably. The total mass of the power supply system is about 48 kg, the capacitor charging time is 3.76 s, the peak discharge-current of xenon lamp is 3.6 kA, and the pulse width is 1.06 ms, respectively. After adopting the integrated structural design method, the volume and weight of the pulse power supply system can meet the requirements of the airborne platform, verifying the feasibility of the key technology.

Key words: laser technique; pulse power supply; integrated structure; pulse xenon lamp; discharge characteristics

0 引言

激光因具有方向性好、亮度高、单色性好、相干性强等优点, 被广泛应用于工业、医疗、国防等领域。高能激光器作为大功率激光发射装置, 可对各种目标进行直接毁伤, 具有速度快、精度高、多次重复使用、效费比高等优点^[1-3], 在军事领域具有巨大的应用价值, 可应用于车载^[4-5]、舰载^[6-7]及机载^[8-9]平台上。将高能激光器集成到现有的机载平台上, 能够发挥出其独特的作用^[10]。机载高能激光器的独特优势主要体现在持续性、致命性、高机动性、低空防御能力、效费比高等

几个方面^[11-12]。理论上只要能量供应正常, 高能激光器就能持续作用于各种目标。因此, 小型高能激光器可有效提升直升机综合能力, 具有广泛的应用前景和发展潜力^[13]。

直升机受限于其有限的搭载空间, 对搭载的载荷有严格的体积和重量要求, 而现有高能激光器庞大的体积和重量严重制约了机载高能激光器的发展与应用^[14]。激光电源作为高能激光器的重要组成部分, 实现其轻量化和小型化是机载高能激光器必须满足的要求^[15]。作为高能激光器的能源中枢, 激光电源承担着全系统电源变换、传输及为工作介质提供高压大电流抽运的作用。传统的脉冲功率电源采用分离式布局, 导致其结构分散且体积重量较大, 采用等比缩小的方式无法满足机载高能激光器小型轻量化的使用需求。

* 通信作者: lhch43@163.com

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-12-29

本文作者针对机载吊舱式高能固体激光器的抽运氙灯,设计了一种集高压充电、电容储能、点火放电为一体的灯抽运固体激光器高效脉冲电源系统。为有效减轻电源系统的体积和重量,采用干式结构高能量密度金属化薄膜电容作为储能介质,并采用一体化结构设计,按照功能分区,优化系统布局结构,将激光电源各部分集成为一个整体,实现整机的小型轻量化。

1 脉冲电源系统

1.1 系统组成

图 1 为一体化灯抽运固体激光器高效脉冲电源系统(以下简称脉冲电源系统)的组成示意图。包括高压充电模块、电容储能模块以及点火放电模块,其中,高压充电模块由高压充电器、充电隔离和泄放回路等组成;电容储能模块包括 4 组高能量密度储能电容;点火放电模块主要由 4 组成型电感、点火控制板和高压点火模块组成。

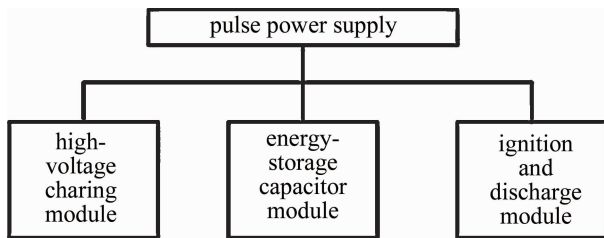


图 1 脉冲电源系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse power supply system

1.2 工作原理

脉冲电源系统的主要功能是由高压充电模块接收来自系统的综合控制信号,将输入电压通过高压充电模块给高能量密度储能电容充电,然后通过点火放电模块击穿氙灯,使储能电容中的能量在短时间内释放至氙灯,抽运脉冲氙灯产生辐射能量,激发固体激光器产生高能激光。

脉冲电源系统采用机载三相 380 V 交流供电。当高压充电模块接收到来自系统的充电指令时,启动高压充电器,把三相交流输入转换为高压直流输出,然后经过充电隔离电路给储能电容充电,充电方式为恒流充电,达到其额定电压时,关闭高压充电器,停止充电,进入放电等待状态。当高压充电模块接收到系统发出的点火命令时,产生点火信号传递给点火控制板,使其产生点火脉冲输出给高压点火模块,高压点火模块产生高压脉冲击穿抽运氙灯,随后储能电容中的能量在短时间内释放给抽运氙灯。储能电容完成放电后,系统发出泄放指令给高压充电模块,将储能电容剩余的电压经过泄放电阻泄放至安全电压以下,至此完成一

个充电→点火→放电→泄放循环,然后等待进入下一个工作循环。脉冲电源系统工作原理如图 2 所示。图中,AC(alternate current)是交流电,DC(direct current)是直流电,HV(high voltage)是高压。

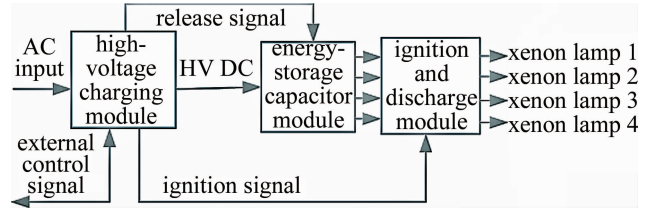


图 2 脉冲电源系统工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of pulse power supply system

高压充电器原理框图如图 3 所示。选择串联谐振变换电路作为本方案中高压充电器的主回路,通过合理的参数设计可以使功率器件实现软开关,有效降低器件高频运行时的开关损耗,实现高效电源充电。三相交流电先经过不控整流电路转变为直流电,再通过串联谐振变换电路,将直流电经高频逆变、升压、整流后输出 4 路高压直流电分别给 4 组储能电容器进行恒流充电。

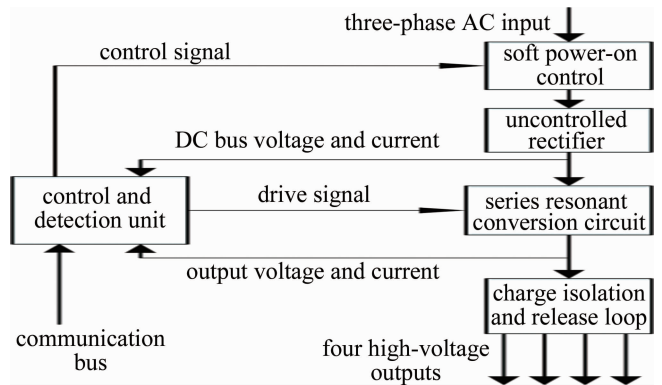


图 3 高压充电器原理框图

Fig. 3 Schematic diagram of high-voltage charger

点火放电模块原理框图如图 4 所示。在接收到高压充电模块的点火命令后,点火控制板将点火信号进行光电隔离,并转换成点火脉冲输出给高压点火模块。高压点火模块中的点火变压器产生 4 组正负对称高压点火脉冲击穿 4 支氙灯,辅助高压电路输出点火高压,为点火变压器原边提供点火所需的辅助高压。电容储能模块中的 4 组储能电容器 C 和 4 个成型电感 L 组成 4 个 LC 放电回路,分别给 4 支氙灯提供抽运能量。当点火命令发出后,要求 4 台储能电容器严格同步输出,以保证 4 支氙灯同时点燃。为了保证氙灯点燃的高度同步性,采用同一个触发电路同时驱动多对点火变压器以达到严格同步点火的目的。负载氙灯所需点火脉冲电压高,为了保证脉冲氙灯可靠点燃,同时让点火电

压不至于太高,以降低设备及电缆耐压等级,并减小高压带来的电磁干扰,在每支氙灯对应的放电回路中设计有一对正负脉冲点火变压器。在收到点火信号后,点火变压器可产生一对正、负对称的高压脉冲加到氙灯两端,使氙灯两端获得不低于击穿氙灯所需的高压点火脉冲,保证氙灯可靠击穿。考虑到常用空气间隙开关的放电重复频率一般都可以达到 100 Hz 以上,且氙灯击穿电压较高,因此本方案储能电容放电回路中不单独设置放电开关,而是直接将氙灯作为回路的放电开关。氙灯工作时的实际放电频率(0.2 Hz)远小于空气间隙开关的理论频率,可以满足绝缘恢复的要求。这样设计的优点在于不存在弱电控制信号导致的误触发或者拒动作等问题,形成了较好的电磁兼容环境。

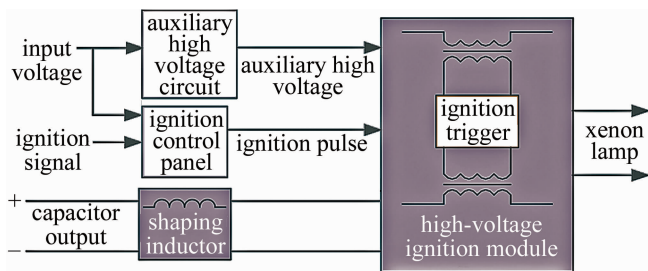


图4 点火放电模块原理框图

Fig. 4 Schematic diagram of the ignition and discharge module

2 一体化结构设计

传统的脉冲电源由充电器、储能器、点火器及控制器等设备组成,每个设备采用分离式或部分合并式设计,设备间相互独立,采用电缆连接后组成整个电源系统。这种分离式设计导致电源系统体积和重量较大,无法满足机载系统苛刻的体积和重量要求。针对该问题,本方案中采用一体化结构设计和单元模块化设计,尽可能减少单体部件,优化布局,最大程度地缩减或取消部件之间的连接线缆,将激光电源各部分集成为一个整体。电源内部采用金属框架搭接,统一制作机箱外壳,采用模块化方案设计每个部件,使用相同的外观、统一的接口,从而达到减小电源系统体积和重量的目的。

脉冲电源系统包括高压充电模块、电容储能模块和点火放电模块,3个模块之间通过法兰连接,安装在一个直径 430 mm、长度 800 mm 的圆筒中,外部用铝制蒙皮覆盖,整个电源系统总质量约为 48 kg。图 5 为脉冲电源系统结构分布图和原理样机照片。高压充电模块集成了高压充电器、充电隔离和泄放回路等,安装在系统的最底部,采用分层设计的方案,充分提高空间利用率,以实现高压充电器的小型化要求。

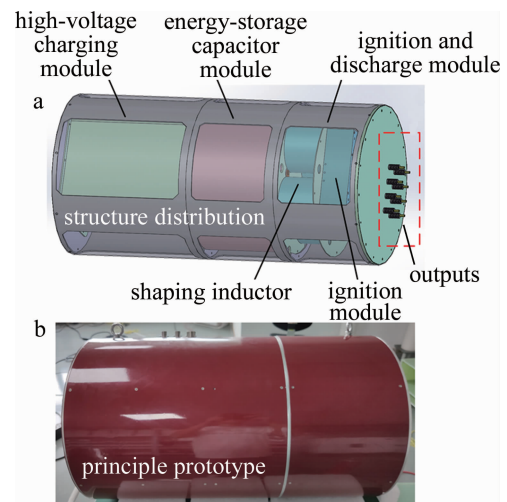


图5 电源系统结构分布图与原理样机

Fig. 5 Structure distribution of power system and principle prototype

由于脉冲氙灯所需抽运能量高,通常其脉冲电源系统需配备大容量储能电容,而常规储能电容庞大的体积和重量严重制约了脉冲电源系统的小型化和轻量化。按照系统的小型化、轻量化要求,本方案储能电容器选择干式结构高能量密度金属化薄膜电容,其具有储能密度高、输出功率大、成本低等诸多优势,特别适合作为脉冲电源系统的储能介质。4个高能量密度储能电容采用一体化设计集成为电容储能模块,储能电容器直接布置于金属外结构腔中进行灌封,成为一个独立的电容器单元。储能电容与金属结构直接通过环氧板隔离绝缘,并留有足够的间隙;使用低温固化环氧树脂进行整体灌封,保证储能电容有足够的绝缘可靠性和使用稳定性。

点火放电模块集成了4组成型电感、点火控制板和高压点火模块,布置在电源系统的顶层,顶层分为上下两层,上层放置高压点火模块及点火控制板,下层放置成型电感。高压点火模块内部电路承载结构件选用绝缘性能良好的聚四氟乙烯整体成型,在完成硬件设计及安装固定以后,直接用硅胶灌封,使之成为一体,保证密封性和绝缘性。成型电感采用多层螺旋管结构设计,有利于增大电感线圈之间的耦合系数,减小整体电感的体积和重量。

3 参数设计与仿真验证

3.1 氙灯负载特性

脉冲氙灯作为脉冲电源系统的负载,具有非线性的伏安特性。当氙灯点燃时,灯内气体快速电离,氙灯阻抗也迅速降低,当电离程度最大时,氙灯阻抗达到最小值,此后氙灯开始熄灭。但由于等离子体的时域记忆效应,氙灯阻抗并不是立刻上升,而是在最小值处维

持一段时间,此后再缓慢上升^[16-17]。

氙灯阻抗表现为时间与电流密度的函数,灯内电弧稳定后,氙灯两端电极电压和通过氙灯的电流满足 Goncz 公式^[18-19]:

$$U = K_0 I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: U 为氙灯两端电极电压; I 为氙灯电流; K_0 为氙灯的灯常数,表征氙灯阻抗特性,其与氙灯充气气压、氙灯长度和内径有关。 K_0 的值可以通过下面等式求得^[20]:

$$K_0 = 0.477 \left(\frac{p}{450} \right)^{0.2} \frac{l}{d} \quad (2)$$

式中: p 为氙灯充气气压,单位为 Pa; l 为氙灯长度,单位为 m; d 为氙灯内径,单位为 m。

由式(1)和式(2)可以求得氙灯电阻为:

$$R_D(I) = 0.477 \left(\frac{p}{450} \right)^{0.2} \frac{l}{d} I^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:下标 D 表示氙灯负载。给定氙灯充气气压和外形尺寸等参数后,即可得出氙灯的非线性伏安特性曲线。

3.2 电路参数计算

本文中所采用的氙灯极间距为 0.33 m,灯内径为 0.02 m,充气气压为一个标准大气压(101.3 kPa),则可根据 3.1 节中所列公式求得氙灯的灯常数为:

$$K_0 = 0.477 \left(\frac{p}{450} \right)^{0.2} \frac{l}{d} = 0.477 \times \left(\frac{101300}{450} \right)^{0.2} \times \frac{0.33}{0.02} = 23.25 \quad (4)$$

系统的主要技术指标为:最大抽运能量 17 kJ;最大抽运脉冲电压 4.2 kV;电流脉宽 0.8 ms ~ 1.5 ms。假设每支氙灯的抽运能量和抽运电压均相同,则每支氙灯需要的抽运能量 $E = 4.25$ kJ。根据指标要求可以求得单个储能电容值为:

$$C = \frac{2E}{U^2} = 482 \mu\text{F} \quad (5)$$

选取 4 只电容值为 500 μF 的干式结构金属化薄膜电容作为抽运能量的存储介质,其耐压值为 5.5 kV,额定电流为 5 kA。所选电容器最大充电电压为 4.2 kV,最大抽运能量为 17.64 kJ,满足系统指标要求。

氙灯放电时应使电路处于临界阻尼状态下,这样可以确保储能电容最大程度地释放电能,此时放电电流的脉宽约为 $t_p = 3\sqrt{LC}$ ^[21],根据指标要求取电流脉宽为 1.0 ms,则可以求得单个成型电感值为:

$$L = \frac{t_p^2}{9C} = 223 \mu\text{H} \quad (6)$$

对于成型电感的选型,要求其对外界的电磁干扰

小、能量密度高、损耗低、体积小且电感值准确。成型电感采用多层螺旋管结构设计,定制电感值为 300 μH ,额定电流为 5 kA,耐压值为 10 kV,内阻不大于 200 $\text{m}\Omega$ 。

3.3 仿真验证

为便于分析,将氙灯 LC 放电主回路等效成 2 阶 RLC 零输入电路,如图 6 所示。图中, R 表示回路总电阻(不包括氙灯), L 表示成型电感, C 表示储能电容, D 表示氙灯负载。由于氙灯本身具有一定电感,因此实际电路往往比设计电路的输出电流脉宽大。在相关软件中建立仿真模型,电路参数为: $C = 500 \mu\text{F}$; $L = 300 \mu\text{H}$; $R = 200 \text{m}\Omega$ (氙灯电阻除外)。图 7 为储能电容电压设定为 4.2 kV 时的氙灯电流仿真波形。从图中可以看出,氙灯放电时的电流峰值可达 3.55 kA,峰值时间为 408 μs ,电流脉宽为 1.05 ms。

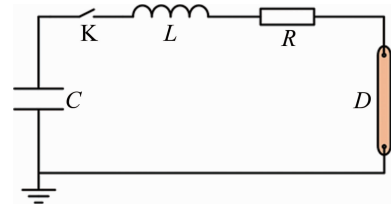


图 6 氙灯放电主回路等效模型

Fig. 6 Equivalent model of main discharge loop of xenon lamp

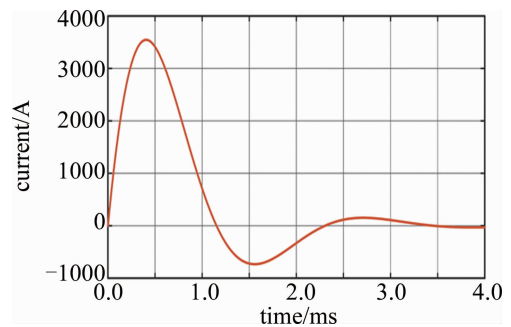


图 7 氙灯电流仿真波形

Fig. 7 Current simulation waveform of xenon lamp

4 实验验证

各模块调试完毕后,进行脉冲电源原理样机组装,并与激光器进行联调实验,实验时通过上位机界面对电源系统进行控制及指令下发。充电测试时,任选一路氙灯充电支路进行测试,将示波器的高压探头与氙灯正极相连,负极连接至接地端。系统上电后,储能电容电压设定为额定 4.2 kV,高压充电器输出电流为 2.3 A,则理论上充满电所需时间为 3.65 s。示波器采集的充电电压波形如图 8 所示。从图中可以看出,充电电压设置为最高工作电压 4.2 kV 时,充电时间为 3.76 s,与理论值非常接近,充电时间小于 4 s,可以保

证5 s一次重频的技术要求。

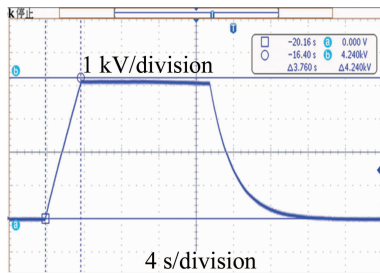


图8 储能电容充电电压波形

Fig. 8 Charging voltage waveform of the energy storage capacitor

氙灯放电实验时,设置充电电压为4.2 kV,采用空心罗氏线圈套在任一根放电电缆上用以测试氙灯放电电流。图9为单次放电和3次重频放电的电压电流波形。从测试结果可以看出,放电电流波形和设计阶段的仿真波形基本一致,峰值电流为3.6 kA,电流脉冲持续时间约为1.06 ms,重频放电频率为0.2 Hz,满足技术要求,说明放电回路的参数设计是正确的。

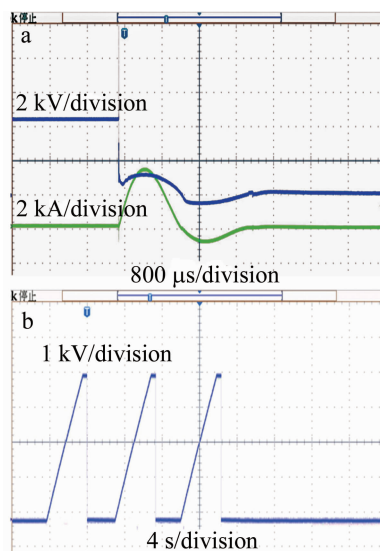


图9 4.2 kV 放电电压电流波形

Fig. 9 Discharge voltage and current waveform under 4.2 kV

5 结论

针对吊舱式灯抽运固体激光器,设计开发了为脉冲氙灯提供抽运能量的高效脉冲电源系统,通过电路优化并采用一体化结构设计,实现了脉冲电源系统的小型轻量化,制作的原理样机直径为430 mm,长为800 mm,整体质量不超过50 kg。实验结果表明,电源系统充电电压可达4.2 kV,电容充电时间为3.76 s,氙灯放电峰值电流为3.6 kA,放电电流脉宽约为1.06 ms,重复放电频率可达0.2 Hz,满足系统指标要求。原理样机测试结果与仿真结果基本保持一致,说

明理论分析与主电路参数设计合理,验证了高效脉冲电源系统方案的可行性及稳定性。

参考文献

- [1] LI M. Development trend of the laser weapon and analysis[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(11): 16-20 (in Chinese). 李旻. 激光武器的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(11): 16-20.
- [2] LI Y Y, WANG J H, LI Zh. Development situation of high-energy laser weapons[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(6): 1-6 (in Chinese). 李怡勇, 王建华, 李智. 高能激光武器发展态势[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 1-6.
- [3] YANG J B, ZONG S G, CHEN L F. 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.
- [4] ZHU M Zh, CHEN X, LIU X, et al. Situation and key technology of 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): 20200230.
- [5] HUANG P, CAO G H, ZHANG H J, et al. Development analysis of US Army vehicle tactical laser weapons[J]. Laser Technology, 2022, 46(6): 817-822 (in Chinese). 黄沛, 曹国辉, 张海晶, 等. 美国陆军车载战术激光武器发展分析[J]. 激光技术, 2022, 46(6): 817-822.
- [6] LUO L, TAN B T. Research on operational application of shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(7): 1058-1063 (in Chinese). 罗磊, 谭碧涛. 舰载激光武器作战运用研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 1058-1063.
- [7] XU C R, SUN Sh Y, SHE B, 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). 徐粲然, 孙世岩, 余博, 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.
- [8] YI H Y, SUO X W, YI X Y, et al. Development of AC-130J AHSL 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.
- [9] DU Z B, TANG H R, LIU K, et al. Development and flight test characteristics of Israeli's airborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(12): 1547-1553 (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): 1547-1553.
- [10] JIANG J F, ZHANG Zh, GAO G B. Study on energy storage and power supply of airborne laser weapon[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 84-91 (in Chinese). 姜锦锋, 张著, 高光波. 机载激光武器储能供电研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(19): 84-91.
- [11] YI W W, QU Ch H, REN G G. Tactical airborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2): 131-139 (in Chinese). 伊炜伟, 屈长虹, 任国光. 战术机载激光武器[J]. 激光与红外, 2018, 48(2): 131-139.
- [12] HE Y, RONG X Sh. Research on the development trend of airborne

- laser weapon system of US Army[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(4): 38-42(in Chinese).
- 何有, 荣祥胜. 美军机载激光武器系统发展趋势研究[J]. 飞航导弹, 2021(4): 38-42.
- [13] TIAN Ch Y, ZHANG M Sh. 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.
- [14] LIU L H, TAN B T, ZHANG X Y, *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.
- [15] AN H X, DENG K, BI Zh Y. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment[J]. Chinese Optics, 2017, 10(3): 321-330(in Chinese).
- 安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 321-330.
- [16] SHAO R Y, LIU J J, WU R H, *et al.* Pulsed xenon lamp power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31(2): 021001(in Chinese).
- 邵若燕, 刘建军, 吴睿骅, 等. 脉冲氙灯电源研究[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(2): 021001.
- [17] MA N. Study on electrical analysis and design of test system for high-power pulsed xenon flashlamp[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016(in Chinese).
- 马宁. 高功率脉冲氙灯测试电源的分析与设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [18] GONCZ J H, NEWELL P B. Spectra of pulsed and continuous xenon discharges[J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(1): 87-92.
- [19] GONCZ J H. Resistivity of xenon plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36(3): 742-743.
- [20] KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- 克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [21] LI B, LI B T, HUANG B, *et al.* Design of high reliability pulse xenon lamp power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(6): 065004(in Chinese).
- 李波, 李博婷, 黄斌, 等. 高可靠性脉冲氙灯电源设计[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(6): 065004.