

# 机载激光武器储能供电研究\*

姜锦锋<sup>1</sup>, 张 著<sup>2</sup>, 高光波<sup>1</sup>

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 中国人民解放军火箭军驻沈阳地区专用装备军事代表室, 沈阳 110000)

**[摘要]** 激光武器作战时瞬时功耗 500~700kW, 目前机载供电很难直接满足需求, 为了满足机载激光武器高功率输出的作战需求, 在机载发电机和激光武器能量输入级之间需要进行高能储存。针对 100kW 激光输出功率, 分析激光武器系统用电需求, 通过供电方式及储能装置对比, 提出以机载发电机、储能装置及激光器激励源组合供电思路, 比较飞轮储能和电池/超级电容组合储能两种可实施方案, 并利用超级电容器组作为储能装置开展了机载激光武器供电技术研究, 验证了机载超级电容储能供电的可行性。

**关键词:** 机载激光武器; 供电需求; 储能装置; 超级电容; 飞轮储能; 机载发电机

## Study on Energy Storage and Power Supply of Airborne Laser Weapon

JIANG Jinfeng<sup>1</sup>, ZHANG Zhu<sup>2</sup>, GAO Guangbo<sup>1</sup>

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. Military Resident Representative Bureau of Special Equipments of the PLA Rocket Force in Shenyang Area, Shenyang 110000, China)

**[ABSTRACT]** The instantaneous power consumption of 100kW laser weapon is about 500–700kW. At present, airborne power supply is difficult to meet the demand directly. In order to satisfy the requirement of instantaneous high energy output of airborne laser weapon, high energy storage is required between the airborne generator and the laser weapon input stage. According to the laser weapon with output power of 100 kW, the power supply idea of laser weapon is analyzed. The idea of combining power supply of airborne generator, energy storage device and laser excitation source is put forward by the comparison of power supply mode and energy storage device. The research on the power supply technology of airborne laser weapon is carried out by using the super capacitor group as an energy storage device, and the feasibility of the airborne super capacitor energy storage power supply is verified.

**Keywords:** Airborne laser weapon; Power supply; Energy storage device; Super capacitor; Flywheel energy; Airborne generator

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.084

将激光武器集成到现有的机载武器系统中, 可弥补现有武器系统的不足, 发挥其独特的作用, 用于对空/地目标进行软/硬杀伤, 如破坏来袭导弹的末端制导能力, 对地面固定/移动目标进行“点”攻击<sup>[1]</sup>。

近年来, 固体激光器的重大成果是 LD 泵浦的固体激光器(DPSSL), 固体激光器二极管泵浦技术已经演示验证了能够显著提高效率, 减小激光器热负载。未来使用二极管泵浦的光纤激光器电光转换更高, 可大幅降低热负载, 减小激光武器系统储能供电部分的体积和重量, 使集成机载平台成为可能<sup>[2]</sup>。

机载激光武器供电对象主要包括激光器驱动源、制冷系统及循环系统等, 如图 1 所示。从供电流程来看,

\* 基金项目: 航空支撑项目(61901040301)。

一般包括:(1)机载发电机→(充电机)→储能装置→激光器驱动源→激光器;(2)机载发电机→制冷系统;(3)机载发电机→冷却循环系统。

## 1 供电需求

### 1.1 系统组成

针对广泛应用的 LD 泵浦固体激光器, 综合激光武器系统电光转换效率、激光器驱动源效率、激光武器冷却系统制冷效率及冷却循环系统供电等因素, 如激光输出功率达到 100kW, 发电机瞬时输出功率应在 550~700kW, 如图 2 所示。

LD 泵浦的固体激光器能量从输入到输出大致要经历两个阶段, 电光转换→光光转换, 前者转换效率

在 60% 左右,后者转换效率在 50% 左右<sup>[3]</sup>。整个系统电光转换效率一般在 25%~35%,由发电机至激光器激励源电转换效率约为 90%,武器级激光输出功率 100kW,则系统瞬时输入电功率(不考虑制冷和循环)为  $100\text{kW} \div 30\% \div 90\% \approx 370\text{kW}$ 。产生的热功率约为 270kW,一般压缩机制冷功率为制冷量的 50%~60%<sup>[4]</sup>,为了实时将热量散出,要求瞬时制冷功率至少 135kW。同时冷却循环系统根据试验数据分析,平均输出 1kW 的激光需要 0.7~0.8kW 的冷却循环供电,当激光输出功率为 100kW 时,冷却循环系统需要电功率约为  $100\text{kW} \times 0.8 = 80\text{kW}$ 。综上所述,激光武器输出功率为 100kW,热管理系统需要供电功率为压缩机制冷功率与冷却循环功率之和,即  $135\text{kW} + 80\text{kW} = 215\text{kW}$ 。机载激光武器系统瞬时供电功率约为激光器供电功率与热管理系统供电功率之和,即  $370\text{kW} + 215\text{kW} = 585\text{kW}$ 。

## 1.2 供电方式

### 1.2.1 发电机直接供电

达到武器级的激光输出功率一般考虑在 100kW,发电机输出功率应在 500~700kW。目前机载平台输出功率在 90~480kW,且全机总电气负载量约占全机主发电容量的一半。机载平台的瞬时发电功率远远不能满足机载激光武器系统的用电需求。可以考虑机载独立的任务电源,针对激光武器系统供电,设计任务电源满足

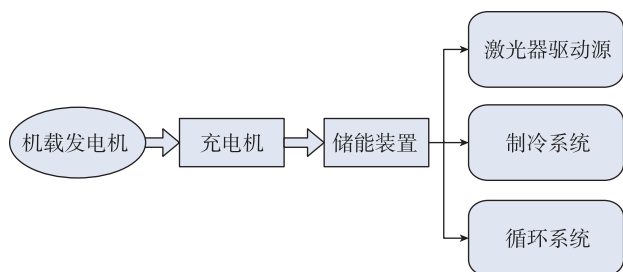


图1 机载储能供电组成框图

Fig.1 Block diagram of airborne energy storage power supply

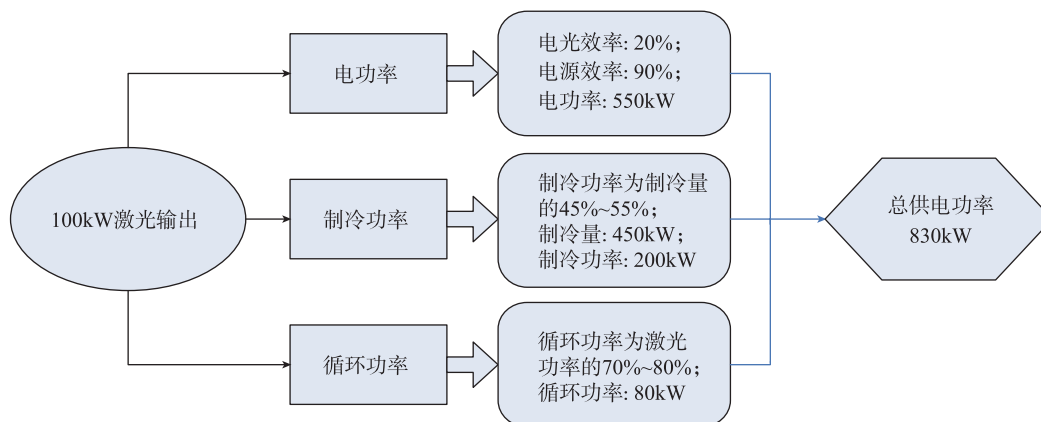


图2 机载激光武器供电需求图

Fig.2 Power demand diagram of airborne laser weapon

输出功率在 500~700kW 的要求。如图 3 所示,机载发电机输出直接经过整流后作为激励源的直流输入,激励源为大功率高频开关连续恒流或脉冲恒流源,泵浦源为负载激光器。

### 1.2.2 发电机、充电机和储能装置组合供电

机载激光武器在工作期间所需的输入功率在 500~700kW,现行机载供电无法满足短时大功率输出的要求,如不采用独立任务电源的方式,机载激光武器需在发电机和激光器激励源之间设置能量储存装置,在激光武器准备阶段时,通过机载充电器对储能装置进行充电,假定一个作战周期 60s,且激光器输入功率 585kW,充电时间 0.5h 来计算,充电器输出功率大约为 60kW。

供电系统如图 4 所示,供电设备一般指机载发电机,激光器工作于短时大功率输出工况,其瞬时大电流放电会产生电磁干扰,为不影响其他电气设备工作,可设置任务发电机;充电装置初始大电流恒流充电、充电后期涓流充电,把储能装置的充电过程与管理系统结合,实现对储能装置的快速、安全充电<sup>[5]</sup>;储能装置采用高密度电池和高功率密度超级电容的组合形式;激励源采用高频软开关设计,实现恒流或脉冲恒流输出;泵浦源一般为二极管阵列。上述各分设备通过参数优化、功能组合、模块合并等方法,减小体积和重量,实现一体化设计目标。

### 1.2.3 发电、充电一体机与储能装置组合供电

将储能装置前级充电器并入发电机组,发电机组通过限流、限压或功率限制实现发电机直接完成对储能装置的充电,可考虑采用恒功率限压发电模式,如图 5 所示。

## 2 储能装置

目前应用的电能存储方式,主要可分为电化学储能、物理储能和电磁储能。电化学储能主要有铅酸电池、氧化还原液流电池、钠硫电池、二次电池(镍氢电池、镍

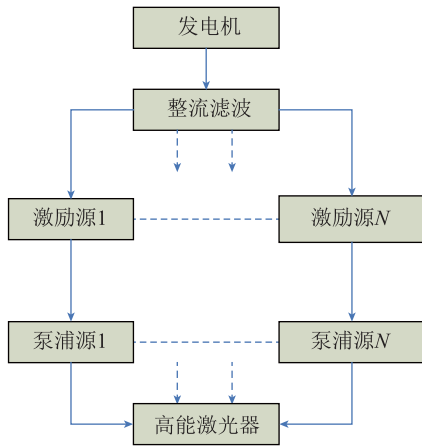


图3 机载独立任务供电示意图

Fig.3 Schematic diagram of power supply for airborne independent mission

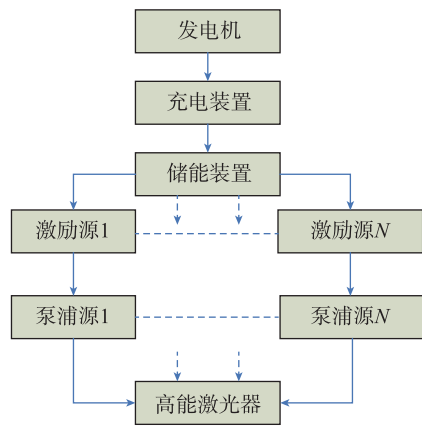


图4 发电机、充电及储能组合供电示意图

Fig.4 Power supply diagram of generator, charging and energy storage device

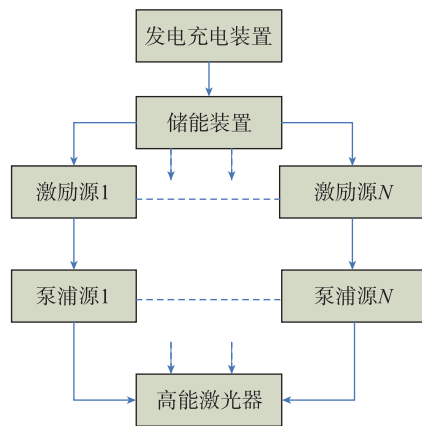


图5 发电、充电一体式储能供电示意图

Fig.5 Schematic diagram of power supply of energy storage with integration of power generator and charger

镍电池、锂离子电池)、超级电容储能等储能形式;物理储能方式主要有抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能;电磁储能方式包括超导储能<sup>[6]</sup>,储能方式参数对比如表1所示。

各种储能技术在其能量密度、功率密度、响应速度、系统寿命、运行可靠性及成本等方面均具有不同特性,机载激光武器系统要求储能装置满足高能量和功率密度、满足机载环境要求、快速充放电、循环使用寿命长、可靠性高等特性。

由此分析以下3种可能应用于机载激光武器的储能方式:电池储能(即电化学储能)、超高速飞轮储能及超级电容器储能。

### 2.1 电池储能

铅酸电池在高温下寿命缩短,与镍镉电池类似,具

表1 储能方式对比表

Table 1 Comparison of energy storage methods

储能类型	额定容量 / MW	比容量 / (W·h·kg <sup>-1</sup> )	比功率 / (W·kg <sup>-1</sup> )	连续放电时间	效率 / %	成本 / (美元·kW <sup>-1</sup> )	寿命 / 次(放电深度为 80%)	响应时间	运行温度
飞轮	10 <sup>-3</sup> ~10	40~230	> 5 × 10 <sup>3</sup>	15s~15min	70~80	40~80	10 <sup>4</sup> ~6 × 10 <sup>4</sup>	<1s	-40~+50℃
铅酸电池	10 <sup>-3</sup> ~50	35~50	75~300	1min~数h	60~80	25	2 × 10 <sup>2</sup> ~5 × 10 <sup>3</sup>	<10s	10~30℃
钠硫电池	10 <sup>-3</sup> ~40	150~240	90~230	1min~数h	80~90	85	<3 × 10 <sup>3</sup>	<10s	290~320℃
锂离子电池	≤ 8 × 10 <sup>-2</sup>	150~200	200~315	1min~数h	85~95	120	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup>	<10s	-10~+50℃
全钒液流电池	<0.8	80~130	50~140	1min~数h	70~80	60	<1.3 × 10 <sup>4</sup>	<10s	10~+35℃
抽水蓄能	10 <sup>2</sup> ~2 × 10 <sup>3</sup>	—	—	4~10h	60~70	200	10 <sup>4</sup> ~5 × 10 <sup>4</sup>	10s~4min	1~35℃
压缩空气储能	10~3 × 10 <sup>2</sup>	—	—	1~20h	40~60	150	8 × 10 <sup>3</sup> ~3 × 10 <sup>4</sup>	1~10min	35~50℃ (储气温度)
超级电容器	10 <sup>-3</sup> ~1.5	0.2~10	10 <sup>2</sup> ~5 × 10 <sup>3</sup>	0.1s~1min	80~95	85	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup>	<1s	-30~+50℃
超导储能	5 × 10 <sup>-3</sup>	1~10	10 <sup>7</sup> ~10 <sup>12</sup>	ms~15min	80~95	200	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	<5ms	4.2~77K

有较低的比能量和比功率。锂离子电池比能量高、自放电小、环境友好,但比功率较低。钠硫和液流电池则被视为新兴的、高效的大容量电力储能电池,但钠硫电池需要在 300℃ 的环境温度中运行,同时比功率也不能满足瞬时大功率输出的激光武器特性需求<sup>[7]</sup>。

锂电池储能由于功率密度低,无法单独作为储能装置满足高能激光武器供电要求,但可以应用于机载激光武器上制冷、循环及控制系统等供电。利用其能量密度高、环境适应性强的特点可作为高能量存储装置。

## 2.2 飞轮储能

利用超高速旋转的飞轮储存能量,并通过机电能量转换装置实现机械和电能的相互转换,如图 6 所示。具有比能量较高、比功率高、电能和机械能之间的转化效率高、可快速充电、实现免维护和具有良好的性能价格比等特点,随着高温超导在磁悬浮方面的突破,使磁悬浮轴承和飞轮真空密封得到工程应用,同时伴随高强度材料发展及电力电子技术的进步,超高速飞轮在高功率脉冲供电领域有着广泛的应用前景<sup>[8]</sup>。图 7 所示为飞轮储能供电结构示意图。

超高速飞轮技术由于其特殊的工作特点,需要特定的真空室和稳定的工作平台,同时需要考虑飞轮运动对载机飞行的影响,目前较难集成到机载平台上。

## 2.3 超级电容器

超级电容器具有一些自身的优势,没有可动部分,既不需要冷却装置也不需要加热装置,工作时,内部没有发生任何化学变化。超级电容器能够安全放电,安装简易,结构紧凑,可适应各种不同的环境。具有功率密度大、可快速充放电,且循环寿命长,不易老化,但能量密度低的特点。

超级电容器在军事装备领域已有诸多应用,激光器、粒子束武器、航天飞行器、导弹等在启动时需要超高速功率脉冲电源,采用高比能量电池与超级电容器组合满足高能量大功率输出的要求<sup>[9]</sup>。

## 3 储能方式

### 3.1 飞轮储能

飞轮储能比容量可以达到 40~230W·h/kg,比功率一般大于 5kW/kg,且成本不高,与其他储能方式相比较,飞轮储能方式比容量及比功率都较高,从重量、体积及维护成本考量,可集成机载平台,但飞轮高速运行影响飞机飞行姿态,未来可考虑采用将飞轮储能装置内置于多自由度转台的方式解决飞轮运转对载机的不利影响。

高能量密度的飞轮储能依赖于飞轮转速的提高,而飞轮高速运转的限制条件是材料的强度、轴承的转速以及真空条件。需研制更高性能的材料、优化结构设计和

采用先进的制造工艺。目前数万 r/min 的高速电机尺寸、重量优势显著,但突出的问题是高频电磁损耗引起的散热问题,这对于真空条件的高速电机更具挑战性。高承载力、稳定性及微损耗的高温超导磁悬浮是大容量飞轮储能系统的轴承发展方向<sup>[10]</sup>。

### 3.2 电池与超级电容组合储能方式

电池目前储能比容量可以达到 200W·h/kg,比功率一般在 300W/kg 左右,能量密度高,而功率密度低;超级电容比容量 10W·h/kg,比功率一般在 5kW/kg,其能量密度低,而功率密度高;为满足机载激光武器高能储能和高功率放电的特性需求,储能系统既要有快速响应部分,也要有一定的储能容量。显然,电池或超级电容

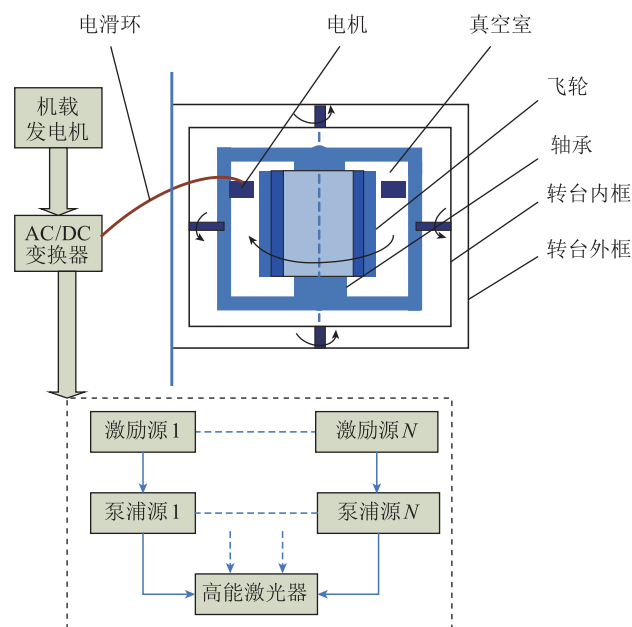


图6 飞轮储能供电系统

Fig.6 Power supply system of flywheel energy storage

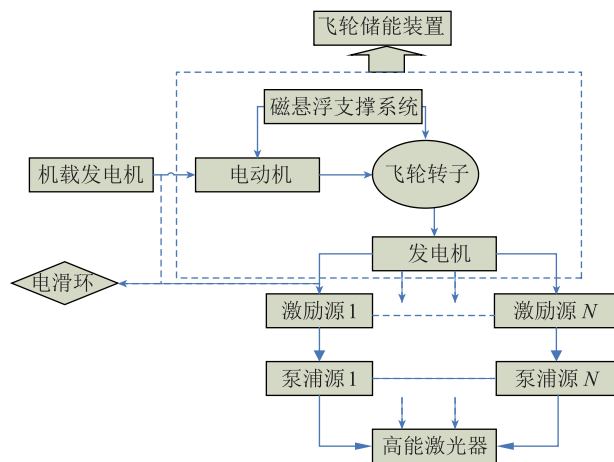


图7 飞轮储能供电结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of flywheel energy for power supply

任一种储能元件很难同时满足这些要求,因此采用混合储能是必要的。混合储能可以将具有快速响应特性的储能系统和具有大容量储能特性的储能系统联合使用、协调控制,从而最大限度地发挥储能技术的性能<sup>[1]</sup>,储能方案如图8所示。

机载发电机对高比能量电池和高比功率超级电容器组进行充电,管理系统实时检测及反馈控制实现单体电池及超级电容器的匀压、温度检测、过压欠压保护。制冷和循环系统瞬时功率不高,可由电池组直接供电,超级电容器组负载多级激励源,在激光武器工作过程中,储能装置的输出电压不断降低,为了充分利用储能装置存储的能量,激光电源在设计时需考虑宽电压范围输入,使得在低电压输入时电源可以完成能量输送。激励源采用高频开关设计,在满足电磁干扰的前提下实现小型化、轻量化目标。

#### 4 超级电容储能供电系统

在某激光吊舱演示验证系统中研制了一套以超级电容器作为储能装置的系统样机,系统由充电储能装置一体设备、多路恒流源及模拟负载组成,系统指标:重量<190kg;供电电压200V;脉冲电流1200A;平均电功率

$\geq 15\text{kW}$ ;频率200Hz。

#### 4.1 系统组成

系统组成如图9所示。根据载荷能力,充电机的输出功率根据战技指标中的作战时间间隔进行设计,目前机载发电机输出多为115V/400Hz三相交流,地面试验采用220V/50Hz单相交流供电,由充电机完成对超级电容器组的储能,电容器组在储能设备控制单元作用下对激光器恒流源进行供电,恒流源为宽电压输入,电压范围设计在100~200V,输出根据激光器功率需求进行设置。机载控制单元完成整个系统输出控制以及系统状态查询监测,包括输出电流设置、脉宽设置、频率设置、过流检测、过压欠压保护、超级电容温度监测等。24V电源实现控制单元供电,在机载条件下,增加备用电池在供电故障情况下保障控制单元供电。

#### 4.2 充电装置

充电电源采用高频开关全桥变换拓扑结构,交流输入送入PFC,产生平滑的直流电压,直流电压经过全桥逆变,产生高频交流信号,二次整流滤波,通过反馈控制实现可控稳流输出。控制单元实时检测储能装置充电状态,实现初始大电流恒流充电、后期涓流充电的模式,如图10所示。

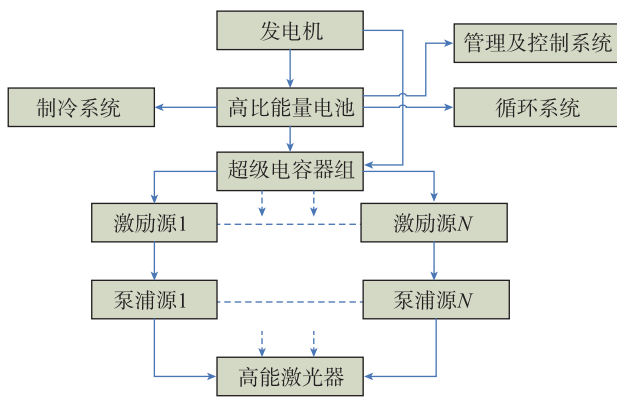


图8 电池与超级电容组合供电系统

Fig.8 Schematic diagram of power supply for airborne independent mission

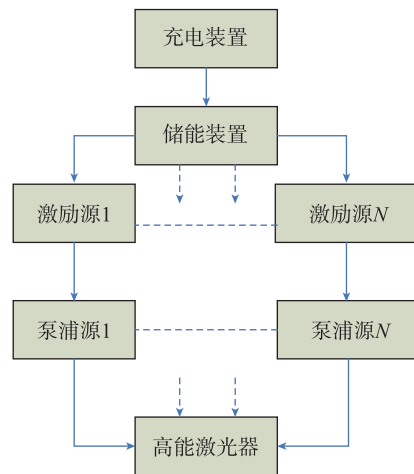


图9 系统结构框图

Fig.9 Structure diagram of system

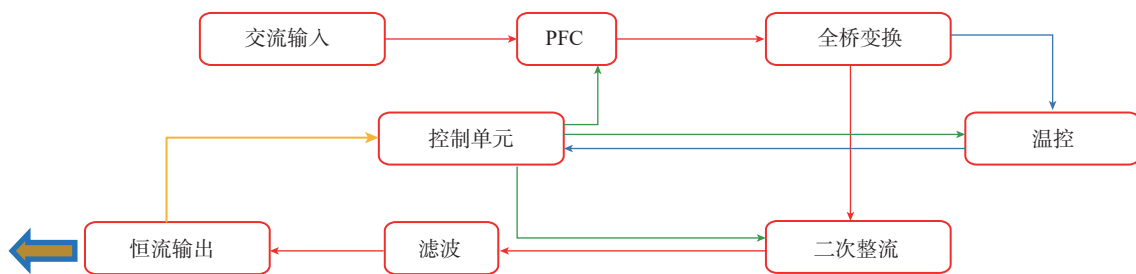


图10 充电机原理框图

Fig.10 Principle block diagram of charger

### 4.3 储能设备

超级电容充电时间短、支持大电流放电、使用寿命长并且温度特性好,适合激光武器电源的强放电、间断工作的工作特点,因此采用超级电容做储能器件是优选方案。

为降低系统风险,储能元件采用成熟商品化超级电容。超级电容组包括 150 节 UCPY3000F 超级电容单体。单体峰值电流 2060A,容量 3000F。

(1) 用于驱动激光器子系统电源的电容数量。

串联数量  $N$ : 根据输出二极管电压 150V 的要求,则激光器子系统驱动源的输出电压约为 200V,故所需 UCPY3000F 超级电容单体节数  $N = \frac{200}{2.7} = 74.07$ ,取 75 节。电容容量:  $V = \frac{3000F}{75} = 40F$ 。

激光器激励源输出所需能量计算(按工作 1min 计算),每路电流输出 120A,共 8 路,合计 960A。工作频率 100Hz,脉宽 300us,激励源输出电压 200V。激光器 1min 工作输入能量:

$$E = I \times V \times p \times f \times t$$

$$= 960 \times 200 \times 300 \times 10^{-6} \times 100 \times 60 = 345600J$$

超级电容在一个工作周期内电容上电压压降不能大于 30V,提供的能量:

$$W_3 = \frac{1}{2} \times C \times U^2 - \frac{1}{2} \times C \times (U - \Delta U)^2$$

$$= \frac{1}{2} \times C \times 200^2 - \frac{1}{2} \times C \times (200 - 30)^2 = 222000J$$

根据计算,一组超级电容不能满足使用要求,拟选用两组并联输出。

(2) 能量均衡。

超级电容因为单体电压低,一般作为储能元件时,需要若干单体串联在一起使用,以提高能量源的输出电

压,串联在一起的单体需要均衡充放电,提高单体性能和使用寿命,因此在为储能装置充电时需要配备能量均衡管理系统。

鉴于系统的工况,采用主动均压方式,即在每一个单体两端均并联一个均衡电路,当单体长期工作于浮充状态,其中有单体电压超过 2.7V,由于并联电路的作用,使差异逐渐减小。

模块在运行时内部温度越低,使用寿命越长。模块内部设有温度监控单元,实时检测模块内部温度。必要时,可以对模块进行降温处理,提高储能装置的工作安全可靠,延长使用寿命。超级电容充放电可达 50 万次,可在  $-40 \sim 70^\circ\text{C}$  温度范围内正常工作。

每个超级电容器都设计有均压保护单元、电压和温度监控单元,通过接插件引出模块过压和温度信号,方便对模块进行监控,提高电容器组工作的可靠性和安全性。

### 4.4 激励源

每个激励源由 DC-DC 电路、恒流充电电路、A/D 转换、功率驱动、异常保护电路等组成。采用现代电力电子技术和智能微处理器技术设计而成。该电源具有良好的电压、电流输出特性,输出电流波形无过充、无反充现象,上升沿和下降沿特性好,开关机系统干扰小,系统工作稳定可靠,具备完善的 LD 保护功能,使其工作在最佳状态。激励源具有 485 通信接口,可以远程设定电流、脉宽、频率,也可以向控制单元上报自身工作状态。

激励源原理如图 11 所示,其中电容  $C$  为储能电容组, MOSFET 为主功率调整管,  $R$  为采样电阻, LD 为激光二极管负载, MCU 为单片机。DC 输出实现对储能电容  $C$  的恒流充电。充电完毕后,由 MCU 单元检测电压,电压符合要求后, MCU 单元发出允许工作指令。MCU 单元在接收到控制单元发射激光的信号后,输出 12 位

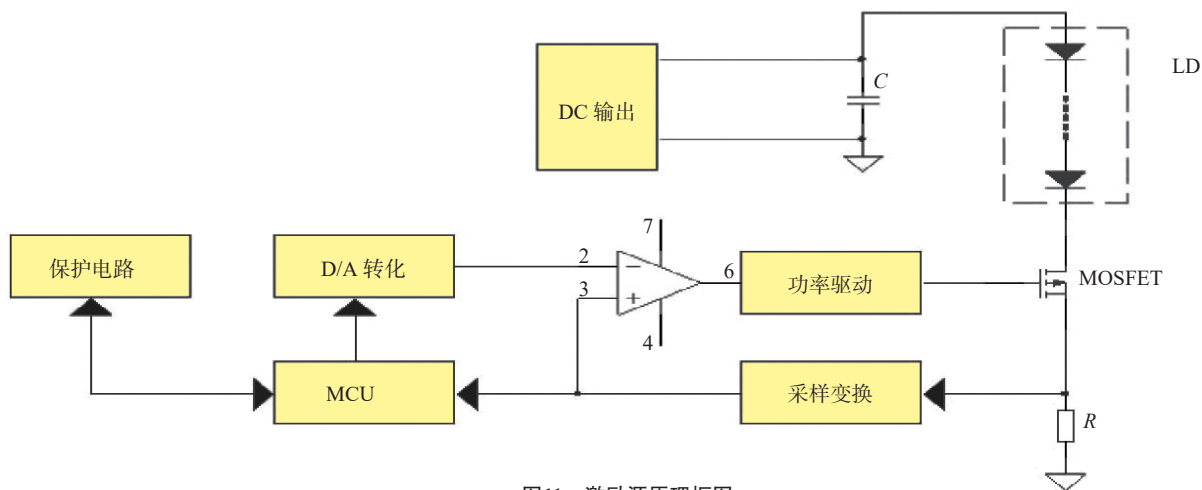


图 11 激励源原理框图

Fig.11 Schematic diagram of excitation source

的数字信号,送入 D/A 转换单元。由 D/A 转换单元将 12 位数字信号转换为相应的模拟参考电压信号。采样电阻将通过 LD 中的电流转换为相应的电压,经过放大后,送入放大器的负端,与参考电压比较后,产生功率驱动信号,此信号控制功率管的开关程度,从而实现电流的大小调节。同时由于负反馈电路的存在,实现了每个脉冲电流的恒定。改变参考电压,就可以实现输出电流的变化。保护单元中,含有过压保护、欠压保护、过流保护、限制脉宽保护和开关机保护,确保在异常的情况下关断功率电路,避免损伤二极管阵列。

### 5 试验结果与讨论

该样机开展了储能装置对比试验;充电机、储能装置及激光器激励源带载试验;样机高低温、冲击振动及机载电磁兼容性等相关试验。

#### (1) 储能超级电容对比试验。

超级电容 1: 储能电压 48V, 单体容量  $1 \times 10^6\text{F}$ , 1.6V, 共 30 节。超级电容 2: 储能电压 38.8V, 单体容量 3000F, 2.7V, 共 18 节。试验结果如图 12、13 所示, 分别带载激励源脉冲输出电流 70A 的恒流负载, 如图 14 所示。

通过示波器测试波形可以看出, 在 70A 脉冲电流输出条件下, 电容 1 输出波形畸变较大, 表明该超级电容

内阻较大, 不适应大电流输出工况。

#### (2) 超级电容器组带载试验。

储能装置单体 3000F 电容模组 2 组, 每组 40 节, 串联使用。激励源 8 路并联输出电流 960A, 脉宽 300us, 工作频率设为 100Hz, 试验结果如图 15 所示。

在超级电容器组额定电压范围内, 调整每次充电电压, 从储能电压 165~195V, 通过示波器观察输出电流波形, 在上述工况下储能装置一次充电带载工作时间约为 55s, 试验结果如图 15 所示, 图 16 为测试现场。

#### (3) 超级电容器组及激励源环境试验。

按飞机环境技术要求中振动功能试验量值图, 中机身和机翼内 1/3 区曲线进行振动功能试验。振动方向为 X、Y、Z 3 个方向; 振动时间为 30min/ 轴向。冲击波形为后峰锯齿波或半正弦波; 峰值加速度为 20g/15g; 冲击方向为 6 个方向; 持续时间 11ms; 冲击次数 3 次/ 方向, 如图 17 所示。高温工作 45℃, 低温工作 -35℃。

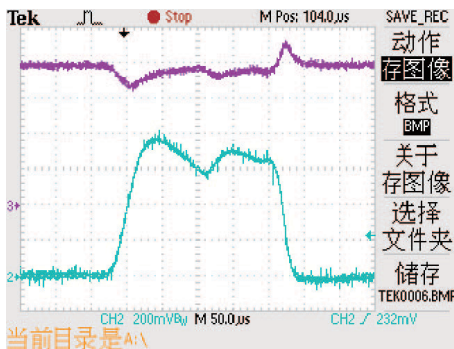


图12 脉冲输出70A时电容1输出电压波形(紫)和输出电流波形(绿)

Fig.12 Voltage and current waveform (capacitor 1)

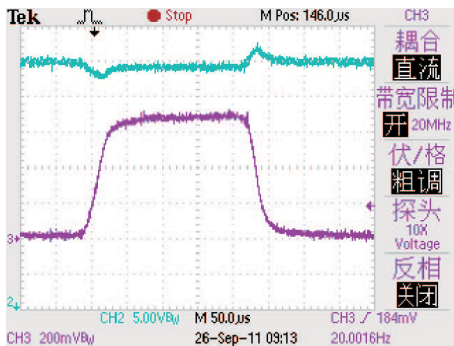


图13 脉冲输出70A时电容2输出电压波形(绿)和输出电流波形(紫)

Fig.13 Voltage and current waveform (capacitor 2)



图14 电容器1、2带载对比试验

Fig.14 Contrast test of two kinds of capacitor

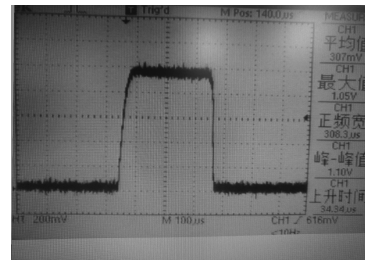


图15 电容器组带载测试

Fig.15 Loading test of super capacitor groups

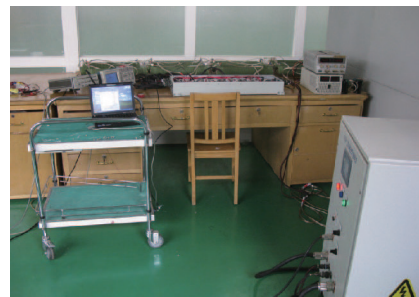


图16 测试现场图

Fig.16 Test scene

按装机要求规定进行电磁兼容性试验, RS103、CS114、CS115 及 CS116 4 项电磁兼容试验在航空工业沈阳所电磁兼容实验室完成, RE102 在北京电子 4 所完成。

通过开展高低温工作、冲击振动及电磁兼容性试验(图 18、19),验证了该机载储能供电设备满足装机条件,且负载激光器输出能量变化 0.5% 以内。

## 6 结论

针对激光武器短时高能输出的特点,通过对 100kW 激光武器的分析,明确激光武器供电需求,并对各种储能介质进行了比较,提出了基于储能系统的机载激光器供电方案,在此基础上形成了充电机、超级电容器组储能装置及 8 路并联输出的系统样机,开展了系统带载及环境试验。该样机已在机载激光器应用方面得到验证,实现了利用超级电容储能装置与多路激光器激励源的机载平台系统集成。

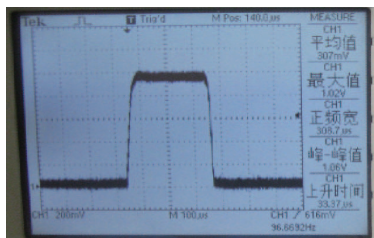
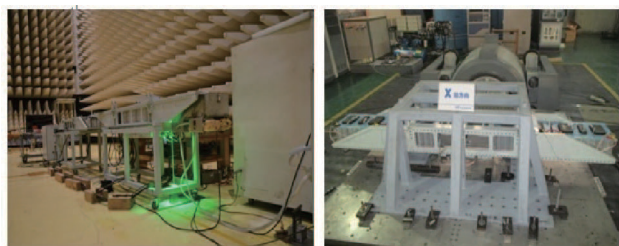


图17 设备环境试验后测试脉冲电流波形

Fig.17 Pulse current waveform after environmental test of equipment

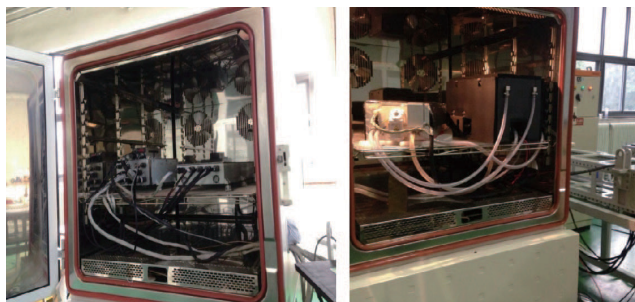


(a) 电容兼容测试

(b) 冲击振动测试

图18 设备电磁兼容及冲击振动试验

Fig.18 EMC and impact vibration test



(a) 高温试验

(b) 低温试验

图19 高低温试验

Fig.19 High and low temperature test

## 参考文献

- [1] 王向晖, 杨树谦, 袁健全. 激光武器及飞航导弹的防护技术[J]. 航天电子对抗, 2011, 22(5): 9-11.  
WANG Xianghui, YANG Shuqian, YUAN Jianquan. Laser weapon and defense techniques of winged missile[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2011, 22(5): 9-11.
- [2] 刘毅. 机载战术激光武器关键技术探讨[J]. 航空兵器, 2011(5): 45-46.  
LIU Yi. Airborne tactical laser weapon key techniques discussion[J]. Aero Weaponry, 2011(5): 45-46.
- [3] 李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 45(7): 18-22.  
LI Jinmin. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 45(7): 18-22.
- [4] 孙超. 机载蒸发循环仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
SUN Chao. Numerical investigations of the vapor cycle system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [5] 代娟. 超级电容智能充电机的研制[D]. 重庆: 西南大学, 2013.  
DAI Juan. Design and research of intelligent charger for super capacitor[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.
- [6] 邢俊芳. 储能技术在电子系统中的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.  
XING Junfang. Application and research of energy storage technology in power system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [7] TARIQ M, MASWOOD A I, GAJANAYAKE C J, et al. A Lithiumion battery energy storage system using a bidirectional isolated DC-DC converter with current mode control for more electric aircraft[J]. Computer Applications & Industrial Electronics, 2016, 3: 149-154.
- [8] 吴晋波. 飞轮储能技术及其在电力系统控制中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
WU Jinbo. Flywheel energy storage technology and its application in power system control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011.
- [9] SONI S R, UPADHYAY C D, CHANDWANI H. Analysis of battery-super capacitor based storage for electrical vehicle[C]// International Conference on Energy Economics & Environment, 2015.
- [10] 邓自刚, 王家素. 高温超导飞轮储能技术发展现状[J]. 电工技术学报, 2013, 23(12): 2-4.  
DENG Zigang, WANG Jiasu. Status of high superconducting flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 23(12): 2-4.
- [11] 李逢兵. 含锂电池和超级电容混合储能系统的控制与优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LI Fengbing. Control and optimization of hybrid energy storage systems containing lithium-ion batteries and super-capacitors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

通讯作者: 姜锦锋, 高级工程师, 研究方向为激光技术, E-mail: yx\_jjf@126.com。

(责编 铃兰)