

机载光电设备直流供电保护电路设计

胡锦涛达 钱锋 张迪 孙鸿宇*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 吉林省长春市 130000)

摘要: 本文针对机上复杂的电磁环境,为保证光电设备正常工作同时与机上其他电子设备之间能互相协调、互不干扰的运行,设计了一种供电保护电路,实现了尖峰吸收、输入防反接、滤波、掉电维持等功能,满足机上电磁兼容要求。同时,此电路设计简单、供电保护全面、满足机载设备要求、成本较低,具备广泛的应用价值。

关键词: 机载电子设备; 保护电路; 直流电源

1 引言

机载光电设备作为一种光学探测和预警装置,由信号处理单元和光学载荷单元组成,用于对可见光波段、红外波段、紫外波段等多种波长的电磁波进行探测或成像,获取图像和视频信息,在航空光学成像与探测领域有着多种关键应用。

在飞机直流电源系统中,瞬态电压包括浪涌电压和尖峰电压^[2]。尖峰电压会影响飞机内部电子设备正常工作,光电设备电源在设计中要能抑制尖峰电压,避免对光电设备内部信号处理单元和光学载荷单元等重要电子元件造成损坏。同时,机上各电子设备之间分工不同,电子环境复杂。一方面,外部的电磁干扰可能通过传导耦合等方式进入光电设备电源,如果没有合理的滤除电磁信号的干扰,可能会影响光电设备的正常工作。另一方面,由于电源模块工作的特殊频段,产生的高频谐波等瞬态脉冲可能发射电磁干扰(EMI),即光电设备电源本身是干扰源。为了不干扰机上其他电子产品的正常运行,机载光电设备需满足特定的电磁兼容要求。文献^[1]提出了两种LC谐振滤波的谐波抑制方法,这种抑制方法可以更好的减少直流电路中的谐波占比,对电源效率有明显的提升。文献^[2]基于航空领域电器设备的特殊环境需求,设计了一个特定功率下的保护电路,包括尖峰抑制和欠压过压浪涌保护等,通过保护电路可以有效地在航空特殊环境下保护重要电子设备不受损坏。文献^[3]分析了直流电源有源滤波器的设计原则,提出了新的设计方法,保证了低频段的良好特性。文献^[4]设计了双路输出的DC/DC升压电路,同时增加了过温保护和欠压过压保护功能,可以适配更加复杂的使用环境。文献^[5]和设计了一种小功率的之路电源,分别支持4.2V和12V两路输出,同时可用ARM控制继电器切换电源内部的电池状态,用PID控制算法稳定电压输出。文献^[6]提出了一种瞬间冲击电流的计算方法,同时根据此方法计算出的冲击电流大小判断出是否对冲击电流进行抑制,能有效保障重要元器件不受尖峰电流的损坏。目前的多数保护方案电路复杂,成本较高,多数电路只能单一的实现某种功能,如需将多种保护功能集成到一起元器件较多,同时需要多级电路的级联。虽然也能实现功能,但越复杂的电路和众多元器件也造成了可靠性差等问题。因此为保证机载光电设备能够全状态工作,同时能和机上其他电子设备互相协调互不干扰,如何设计一个简单、低成本、轻量化的供电

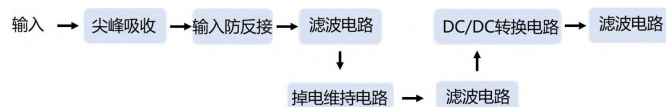


图1: 整体方案

保护电路是本文要解决的一个重要问题。

2 方案需求

机载光电设备均采用机上电源系统进行供电,光电设备需满足机上电源要求。国家军用标准(GJB)对于飞机供电特性提出了具体的要求,随着此项技术的不断迭代,国家军用标准也对供电标准提出了不同的要求,而不同版本的飞机供电标准在不同类型的飞机上均有使用。GJB 181-1986飞机供电特性要求,在汇流条转换时,中断供电时间不超过50ms,在电源中断状态下,对用电设备的性能不作任何要求,但应保证设备安全,且电源恢复后应能立刻恢复用电设备的技术要求,用电设备应能完全恢复;对于采用直流28V供电的电子器件,应能承受5次欠压浪涌,每次欠压浪涌的间隔为1min,欠压浪涌为输入电压8V,持续50ms;对于采用直流28V供电的电子器件应经受5次过压浪涌,每次过压浪涌间隔1min,实验方法与欠压浪涌测试相同,首先将设备在正常稳态电压下供电,然后使输入电压增加到80V,最后再恢复到正常稳态电压。GJB 181A-2003飞机供电特性要求,在汇流条或电源转换状态下,电压的变换值会限制在零和正常工作极限模式下,持续时间不大于50ms,该状态下不作性能要求,当供电系统恢复正常工作时,电子设备可以恢复到初始的正常工作状态。GJB 181B-2012飞机供电特性要求,在汇流条或电源转换模式下,电压的变换值会限制在零和正常工作极限模式下,持续时间不大于50ms,在上述供电转换时可以不要求用电设备工作,当供电恢复正常时,用电设备应自动恢复其性能。

本文设计的机载光电设备直流供电保护电路满足如下要求:

瞬态要求: 过压50V/12.5ms正常工作,50V/50ms不损坏设备;

瞬断要求: 瞬断200μs不中断工作;

耐尖峰电压: 光电设备在200V/0.15μs尖峰电压下正常工作。

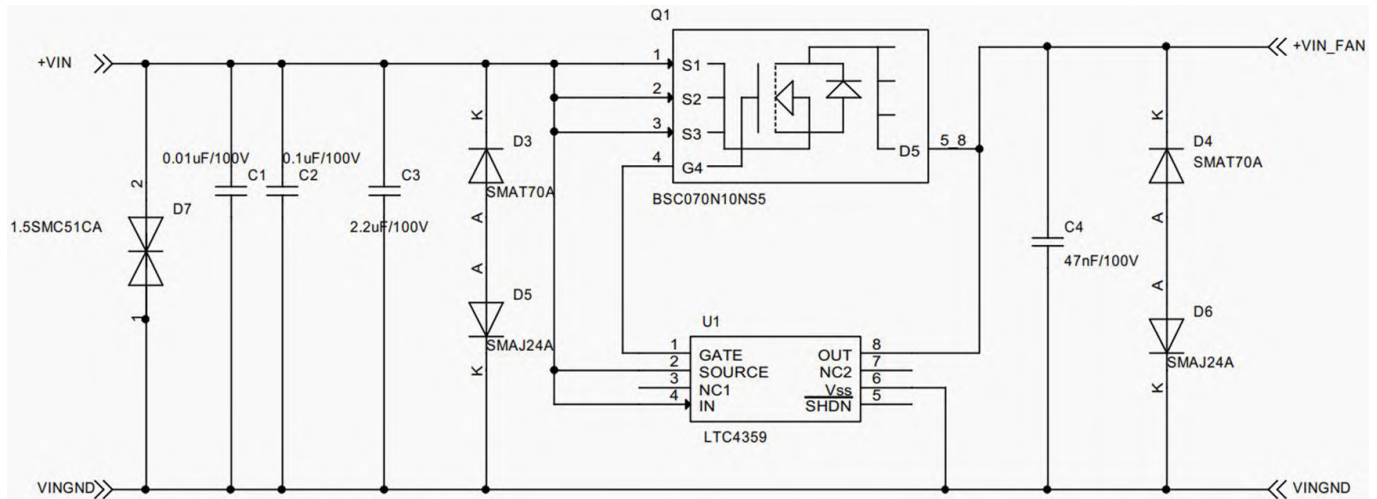


图 2: 尖峰吸收电路及输入防反接电路

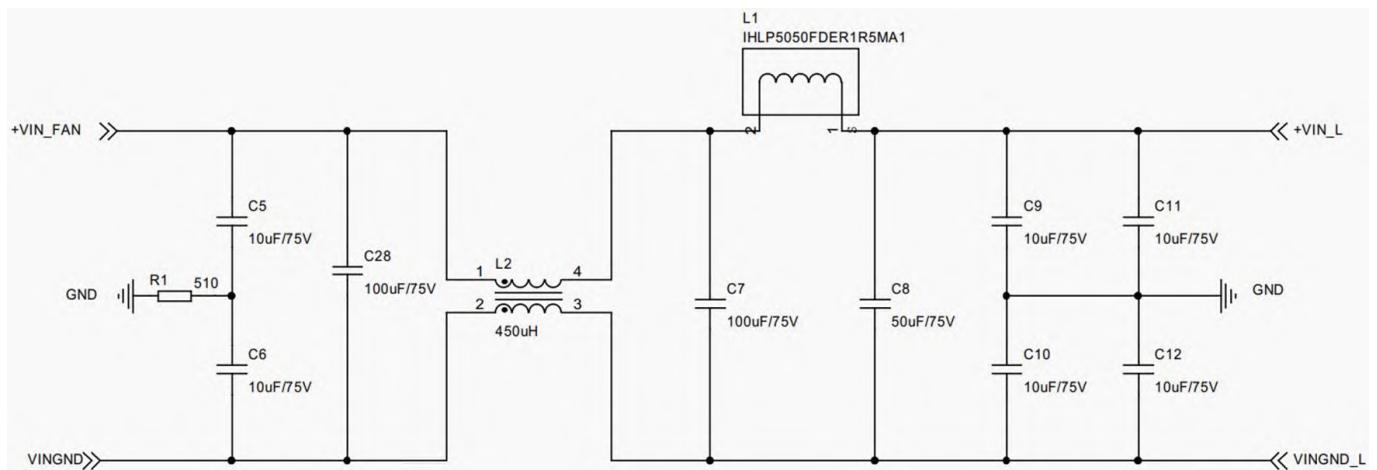


图 3: 滤波电路

3 工作原理

整体方案由尖峰吸收电路、输入防反接电路、滤波电路、掉电维持电路、DC/DC 隔离转换电路组成，整体方案如图 1。首先通过尖峰吸收电路，吸收 200V 的高压尖峰。通过二极管对浪涌电压钳位，控制芯片和 MOS 管进行防反接保护。通过滤波电路，对输入的共模信号与差模信号及噪声产生抑制。掉电维持电路通过上电时给储能电容充电，放电时通过二极管给 DC/DC 模块提供能量满足方案需求中的抗瞬断要求。最后通过 DC/DC 电路给后级的信号处理单元和光学载荷单元稳定电压输出。

4 电路设计

4.1 尖峰吸收电路及输入防反接电路

国内外半导体公司最近推出的大多数防反接解决方案大多基于 PMOS 晶体管或 NMOS 晶体管的防反接方法。由于 MOS 管具有作为可控开关的特性，设计者可以根据测试环境控制 MOS 管的接通和断开，并且由于当今功率 MOS 管

的内阻已经小到毫欧级，在最佳情况下导通电阻为 4.2mΩ。保护场效应管可以与输入和输出电路串联，如果使用 PMOS 场效应管，则将其串联在地线上，如果使用 NMOS 场效应管则将其与电源串联。一旦受保护电路的电源输入反向电压，保护场效应管将断开，以避免反向电流损坏关键电子设备，并维持整个电路正常工作。其次，还可以通过电阻器、齐纳二极管、电容器和 MOS 管来分压，以形成保护电路。分压电阻器可以向 MOS 管提供偏置电压，齐纳二极管主要是为了防止栅源电压过高而损坏 MOS 管。如果使用 PMOS 管，保护电路主要集中在电源的高端。相反，如果使用 NMOS 管，则形成的保护电路用于电路的低侧布线。

在本文中，200V 尖峰吸收电路采用电容和 TVS 管组成，利用电容电压不能突变的特性及 TVS 管钳位吸收 200V/0.15μs 的尖峰电压。TVS 管选用 1.5SMC51CA，击穿电压 53.6V，钳位电压 70.1V。输入防反接电路由控制芯片和 MOS 管组成，利用 MOS 管体二极管达到防反接功能。控制芯片选用二极管控制器 LTC4359，具备反向输入保护功能，支持 4V~80V 输入。LTC4359 可驱动外部 N 沟道

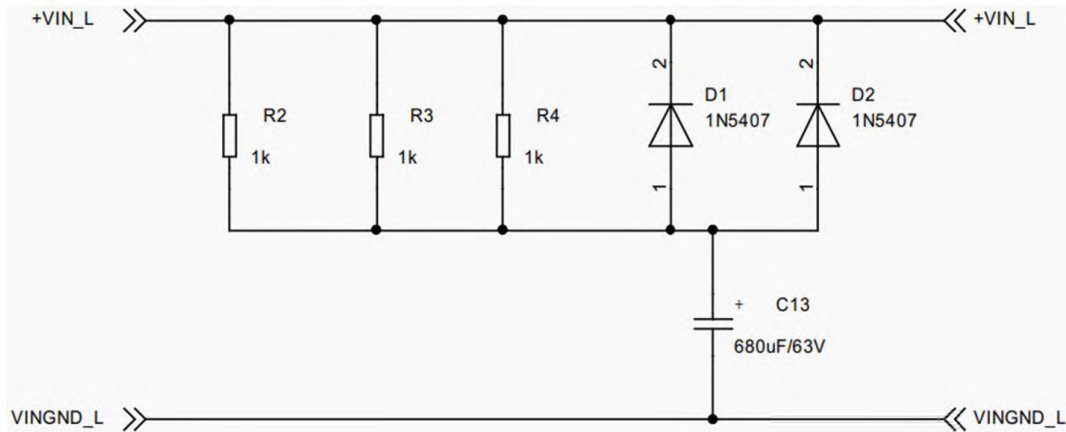


图 4: 掉电维持电路

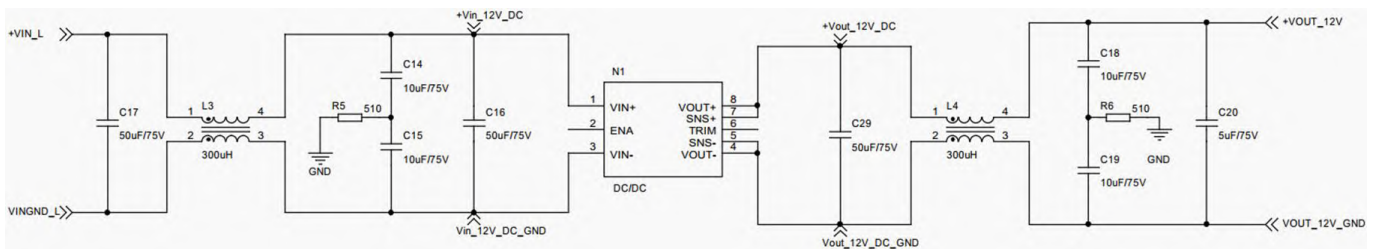


图 5: DC/DC 隔离转换电路



图 6: 电源板实物图

MOSFET 来替代肖特基二极管。它控制 MOSFET 的正向压降，以确保即使在轻负载下也能平稳地传递电流，而不会产生振荡。如果电源发生故障或短路，快速关闭可将反向电流瞬态降至最低。当应用在较大电流的二极管时，LTC4359 功耗较低、散热、电压损失和 PCB 面积也有所降低。MOS 管选用 BSC070N10NS5，NMOS 场效应管，VDS 大于 100V。详细原理图见图 2。

4.2 滤波电路

滤波电路的主要作用是防止 EMI 问题产生干扰，机上复杂的电子设备工作过程中会周期或间断的产生电流变化，

如开关电源工作会有固定的一个开关频率，MOS 管开通和关断脉冲的产生会伴随其上升沿和下降沿，并产生多种谐波。这些源头可能在某些频段合成电磁能量，通过电路传导影响到周围环境。本文在 DC/DC 的输入输出两级，都添加了滤波电路来滤除谐波的影响。系统中一般接收到的噪声以两种方式引入系统。传导 EMI：这种类型的噪声是从系统中的其他部件接收的，这种噪声通过直接传导或电容或电感耦合作为电流传播到系统中。辐射 EMI：噪声是辐射发射和接收的，这意味着辐射 EMI 是串扰的一种形式，一些减少串扰的策略也适用于辐射 EMI。每个机构都可以将任何一种类型的噪声放入电子系统的某个部分。PCB、IC 或电缆组件上的任何一对迹线或导线都可能经历两种类型的噪声：共模噪声和差模噪声^[7]。共模噪声在互连的每一侧具有相同的幅值和极性，而差模噪声具有相反的极性。差模噪声是在具有相同和相反极性的互连的两个部分之间测量的，而共模噪声适用于具有相同相位和极性的互联。两种形式的噪声都是由外部辐射在互连中引起的。在工程应用中，主要抑制共模噪声。通常使用共模扼流圈抑制共模噪声，绕组之间共享串联连接的共模扼流圈是一种电感器，在单个磁芯上缠绕不止一个线圈。通电时，共模扼流圈对噪声信号提供高阻抗。需要的信号通过线圈，而不需要的信号使用共模扼流圈衰减。共模扼流圈设计用于低电阻，导致有限的功率损耗。

本文的滤波电路采用共模与差模滤波相组合的电路结构，能够对 DM 和 CM 干扰起到共同抑制的作用，同时着重考虑以下设计原则：

(1) 双向滤波功能——电网对电源、电源对电网都有

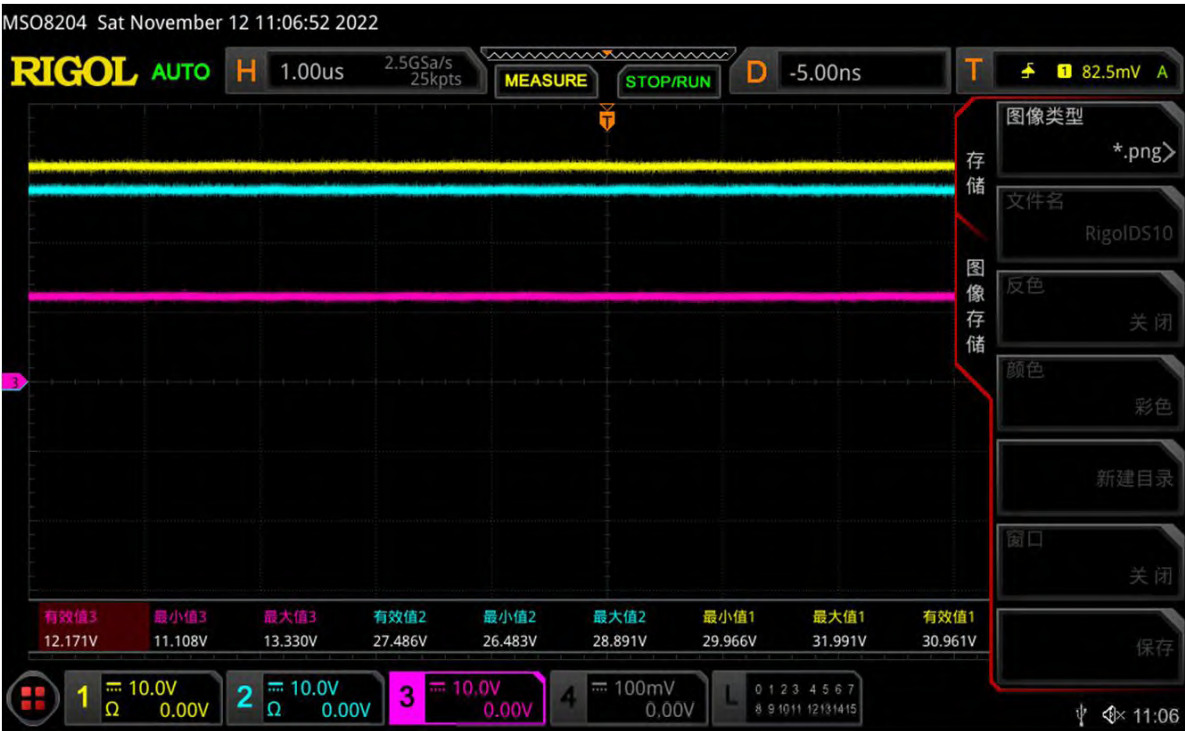


图 7：两路输出波形

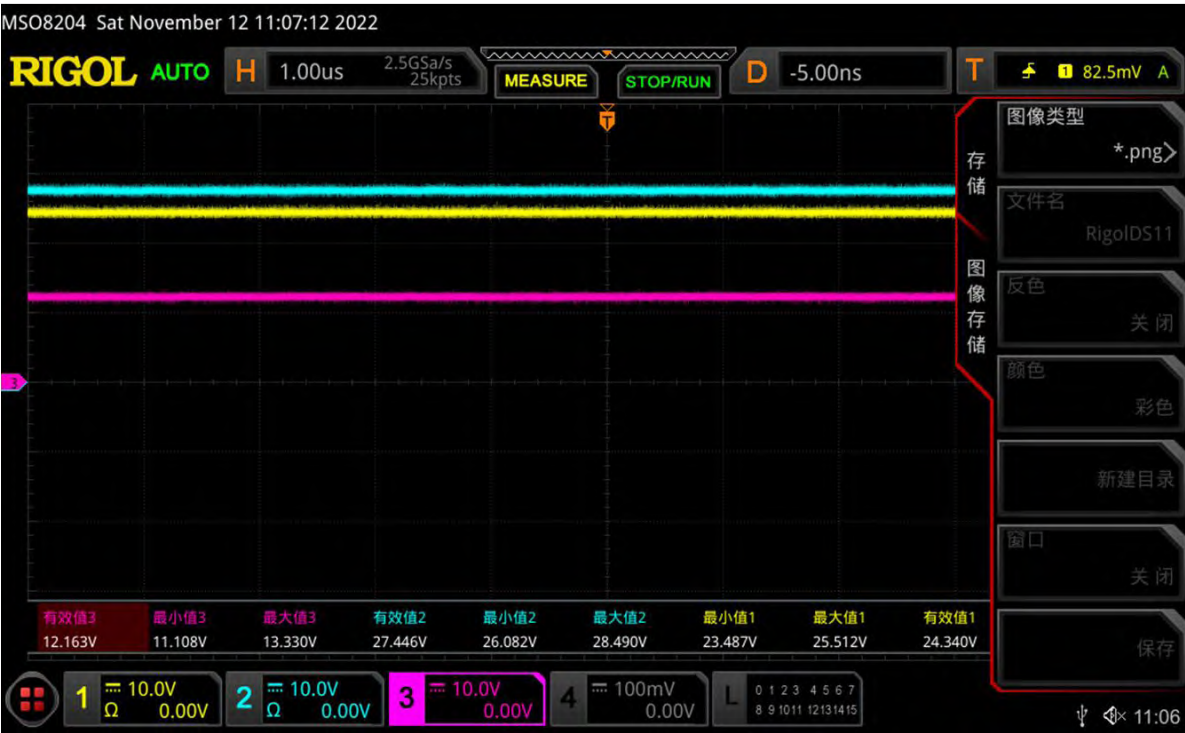


图 8：两路输出波形

滤波功能。

(2) 能有效地抑制差模干扰和共模干扰。

(3) 最大程度地满足阻抗失配原则。

整体设计原则如下，输入共模抑制电感范围 300μH~2mH，输入差模抑制电感在 1μH~2μH，太大可能导致能量

吸收。输入输出两端各并联电容 50μF~100μ，差模电感选用 IHLP5050FDER1R5MA1，电路设计如图 3。

4.3 掉电维持电路

机载光电设备的掉电维持电路与机载输入电源连接，在

输入电源欠压或掉电时,通过保护电路进行放电,为相应分系统提供直流电源。在需要欠压与掉电保护的电路中,需要增加掉电维持电路。通过合理划分机载光电设备不同功能分系统,对需要上电启动时间或维持设备安全的分系统,在分系统的供电输入端增加掉电维持电路的设计。上述方案既可实现光电设备欠压与掉电保护,又可避免整机安装大容量储能电容增加光电设备的体积与重量。因此,该掉电维持保护系统在满足国家军用标准要求的同时,能够尽可能在更小的体积与重量下实现上述标准要求。

掉电维持采用电阻、二极管、高能混合钽电容组成的掉电维持电容,上电时通过电阻给储能电容充电,放电时通过二极管给 DC/DC 模块提供能量,具体电路见图 4。

当供电发生欠压或掉电过程中,能量输入为零,两个二极管均处于反向截止状态,此时光电设备所需的能量全部由储能电容 C 提供。掉电维持电容计算公式如下:

$$Q = CU \quad (1)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

$$W = \int_0^t I U dt = \int_0^t C \frac{dU}{dt} U dt = C \int_0^E U dU = \frac{1}{2} C E^2 \quad (3)$$

式中, Q 为电容所带电荷量, C 为电容值, U 为电容两端电压, I 为电容器充电电流, t 为掉电维持时间,取 200μs, W 为电容器储能能量, E 为输入电压取 28V。考虑能量传输损耗,能量转换效率 η 取 85%。故电容值计算如下:

$$\frac{1}{2} C (E^2 - U_{min}^2) \eta = P_{out} t \eta = P_{in} t \quad (4)$$

$$C = \frac{2 * P * t}{E^2 - U_{min}^2} \quad (5)$$

U_{min} 为最小输入电压,取 18V。带入公式计算出 C 为 386μF。考虑电容 20% 容差,取 C 为 500μF。在实际使用中,选择 680μF 的钽电容,既能满足尺寸重量的要求,也能实现掉电维持所需电容值。

4.4 DC/DC 隔离转换电路

DC/DC 变换电路主要由 2 支路 DC/DC 隔离功率模块组成,是电源组件的主要功能电路,DC/DC 隔离功率电路实现各路输出电压的转换,在选取功率模块时,参数要满足电源组件技术要求中对输入电压范围、功率、输出电压、电压稳定度、纹波、效率、保护功能、隔离与绝缘、抗电强度、温度范围等指标参数的要求。两路 DC/DC 分别输出 28V 和 12V,28V 用在给光电设备的光学载荷单元供电,12V 用在给光电设备的信号处理单元供电。其中一路 DC/DC 隔离转换电路见图 5。每路模块输入输出都增加滤波电路,能够保证整机电磁兼容通过,且保证输出纹波达标。

5 实验验证

在电路原理分析的基础上,焊接出实际的供电保护电路如图 6 所示。

首先进行地面测试,利用直流电源作为本文设计电路的输入。在给光电设备供电之前,利用示波器测量出供电保护电路的两路输出,当输入欠压和过压时,输出均稳定在 28V 和 12V,如图 7、图 8 所示。在实际使用工程中,直流电源正负极反接不会对光电设备造成损坏。其次利用机上电源作为供电保护电路的输入,供电保护电路的输出电压正常。同时在机上复杂的电磁干扰环境中,光电设备的信号处理单元和光学载荷单元能维持正常工作状态,也不会对机上其他电子设备造成电磁干扰。因此,供电保护电路可以成功应用在机上复杂的电磁环境,作为光电设备稳定工作的保障。

6 总结与展望

本文提出的机载光电设备直流供电保护电路可以有效防止输入供电接反而导致后级重要信号处理单元和光学载荷单元的损坏,同时抑制输入端的瞬态电压尖峰和浪涌电压,限制开机浪涌电流,钳位其输出电压到后级信号处理单元和光学载荷单元的安全工作电压范围内,在输入电源欠压或掉电时,能维持光电设备稳定工作。同时,具有电路设计简单、供电保护全面、成本较低等特点。该方案在工程实践中具有较好的应用价值,目前已在机载光电设备中成功应用。

参考文献

- [1] 胡毅,董晓雅,马璐,王亚文,张勇. 电容滤波直流电源电路谐波产生分析与抑制方法 [J]. 盐城工学院学报 (自然科学版), 2020, 33 (02).
- [2] 曹海港. 航空直流电源瞬态电压抑制研究 [D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [3] 田野. 用于直流电源电磁干扰抑制的有源滤波器设计 [D]. 国防科学技术大学, 2012.
- [4] 张剑. 一种直流电源转换电路的研究和设计 [D]. 电子科技大学, 2006.
- [5] 程红丽,张雷雷,贾龙飞. 一种双路输出不间断直流电源的设计 [J]. 电子器件, 2019, 42 (03): 652-656.
- [6] 王威,王勇. 直流电源冲击电流计算方法及抑制 [J]. 电力电子技术, 2022, 56 (03): 15-18.
- [7] 邱燕,肖岚,曹海港. 基于噪声仿真的 EMI 滤波器研究 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (09): 96-100.

作者简介

胡锦达 (1996-), 男, 吉林省磐石市人。硕士研究生。研究实习员。研究方向为数字信号处理。
钱锋 (1987-), 男, 湖南省长沙市人。博士研究生, 副研究员。研究方向为图像处理与目标识别。
张迪 (1992-), 男, 黑龙江省哈尔滨市人。硕士研究生, 助理研究员。研究方向为数字信号处理。
孙鸿宇 (1992-) (通讯作者), 黑龙江省哈尔滨市人。硕士研究生, 研究实习员。研究方向为红外图像处理。