

具有多重保护功能的 LED 智能电源电路设计与可靠性测试

曾园

金华信园科技有限公司 浙江金华 321000

【摘要】LED照明因高效节能、长寿命等优势已广泛应用于多领域，其核心驱动部件——LED智能电源的性能与可靠性直接关系到系统安全稳定。针对当前电源普遍存在过流、过压、过温等故障风险及智能控制与保护协同不足的问题，本文提出一种集成多重保护功能的LED智能电源电路方案。该方案基于反激式拓扑，融合过流、过压、过温、短路及浪涌等多重保护机制，并嵌入智能控制模块，实现参数动态调节与故障预警。论文详细阐述了主功率电路、保护单元及智能控制模块的硬件设计，并构建涵盖环境适应性、电性能稳定性与寿命评估的可靠性测试体系。测试表明，该电源在极端工况下保护响应时间 $\leq 10\mu\text{s}$ ，智能调节精度误差 $\leq \pm 2\%$ ，整体可靠性较传统电源提升40%以上，可满足多场景下LED照明的安全高效运行需求，为高性能LED电源研发提供理论与实践支撑。

【关键词】LED智能电源；多重保护；电路设计；反激拓扑；可靠性测试；故障预警

Design and Reliability Testing of LED Smart Power Supply Circuit with Multi-Function Protection

Zeng Yuan

Jinhua Xinyuan Technology Co., Ltd., Jinhua, Zhejiang 321000

【Abstract】LED lighting has been widely adopted across industries due to its energy efficiency and long lifespan. The performance and reliability of its core component—the LED smart power supply—directly impact system safety and stability. To address common power supply issues like overcurrent, overvoltage, and overheating, as well as insufficient coordination between intelligent control and protection mechanisms, this paper proposes an integrated LED smart power supply circuit with multi-functional protection. Based on a flyback topology, the design incorporates protection mechanisms for overcurrent, overvoltage, overheating, short circuits, and surges, while embedding an intelligent control module to enable dynamic parameter adjustment and fault prediction. The paper details the hardware design of the main power circuit, protection units, and intelligent control module, and establishes a reliability testing system covering environmental adaptability, electrical performance stability, and lifespan evaluation. Tests demonstrate that the power supply achieves a protection response time $\leq 10\mu\text{s}$ under extreme conditions, with intelligent adjustment precision error $\leq \pm 2\%$. Its overall reliability exceeds traditional power supplies by over 40%, meeting the safety and efficiency requirements for LED lighting in various scenarios. This study provides theoretical and practical support for developing high-performance LED power supplies.

【Key words】LED smart power supply; multiple protection; circuit design; flyback topology; reliability testing; fault warning

一、引言

在全球能源危机与“双碳”战略推动下，LED照明凭借85%以上的电光转换效率、超50000小时寿命及显著节能优势，已成为主流照明技术，而其性能核心在于驱动电源——LED智能电源。该电源不仅需提供稳定直流输出，还需集成调光、调色温、远程通信等智能功能，是系统可靠运行的“心脏”。然而，LED对电压电流波动极为敏感，行业数据显示约60%的照明故障源于电源问题，其中过流、过压、过温等故障占比超80%。传统电源普遍存在保护机制单一、响应滞后（常 $>100\mu\text{s}$ ）、智能与保护功能脱节等问题，难以满足智慧路灯、工业照明、智能家居等场景对高可靠性与智能化的需求。国内外研究虽在拓扑优化、保护电路和智能控制方面取得进展，但仍存在多重保护协同性差、智能与保护未闭环融合、可靠性测试不全面等短板。针对上述问题，本文提出一种集成过流、过压、过温、短路及浪涌等多重保护机制的LED智能电源方案，基于反激式拓扑构建硬件电路，嵌入STM32智能控制单元，实现参数动态调节、故障预警与快速

响应（ $\leq 10\mu\text{s}$ ）；同时建立涵盖电性能、环境适应性与寿命评估的可靠性测试体系，通过“监测-调节-保护-预警”闭环设计，全面提升电源的安全性、稳定性与智能化水平，为高性能LED电源研发提供理论支撑与工程实践路径。

二、LED智能电源的性能需求与保护机制分析

2.1 LED负载特性与电源性能需求

LED具有非线性伏安特性，一旦正向电压超过阈值，电流将急剧上升，因此驱动电源必须具备高精度恒流输出能力。本文面向家居与工业通用场景，设定核心性能指标：输入为90-265V AC（50/60Hz），输出为12-48V DC、0.5-10A连续可调，最大功率 $\leq 200\text{W}$ ；支持0-100% PWM调光、2700K-6500K色温调节及RS485/WiFi远程通信；具备过流、过压、短路、过温、浪涌五重保护，响应时间 $\leq 10\mu\text{s}$ ，支持自动/手动恢复；同时满足能效VI级（待机功耗 $\leq 0.5\text{W}$ ）、功率因数 ≥ 0.95 、输出纹波 $\leq 1\%$ 等标准。

2.2 LED电源典型故障类型与保护机制

典型故障主要源于电应力、热应力及外部干扰。过流多由负载短路或控制异常引起,需采用“瞬时限流+延时停机”策略:电流超1.2倍额定值即限流,持续50ms以上则停机。过压常因电网波动或反馈失效,阈值设为额定电压1.2倍,触发后立即切断输出并报警。过温源于散热不良或环境温度高,通过温度传感器监测关键器件:85℃时降功率运行,100℃时停机,并联动PWM控制风扇主动散热。短路属极端过流,电流达3倍额定值时须“零延时”切断主回路并锁定状态,仅允许手动复位。浪涌由雷击或开关操作引发,需按IEC标准($\pm 2\text{kV}$ 差模、 $\pm 4\text{kV}$ 共模)配置压敏电阻、气体放电管与TVS管构成多级抑制电路,吸收瞬态能量。

2.3 多重保护的协同设计原则

多重保护的协同设计需遵循三大原则:一是优先级清晰——短路与浪涌为紧急故障,需最快响应;过温为缓变故障,采用分级处理。二是信息交互融合——通过智能控制单元整合各保护信号,避免误判。例如,过温触发时同步分析电流电压,若由过流引起,则优先执行过流保护。三是闭环管理机制——保护动作后,系统自动诊断故障类型并上传信息;恢复策略依故障等级而定:轻微过流可自恢复,短路等严重故障需人工干预。该协同架构确保保护快速、准确、安全,显著提升电源整体可靠性。

三、具有多重保护功能的LED智能电源电路设计

3.1 电路整体架构设计

本文设计的LED智能电源采用“AC-DC转换+智能控制+多重保护”三级架构,包含输入整流滤波、主功率变换、输出整流滤波、智能控制、多重保护及通讯六大模块。系统以反激拓扑为核心,交流输入经整流滤波后由主功率电路转换为稳定低压直流,再经LC滤波输出;智能控制模块通过PWM动态调节输出参数;多重保护模块实时监测电参量与温度,故障时快速响应;通讯模块支持远程交互。该架构具备结构简洁、成本可控、电气隔离可靠等优势,智能控制单元作为系统中枢,有效实现各模块协同运行。

3.2 主功率电路设计

主功率部分采用反激式拓扑。输入端配置符合EMC标准的滤波网络,整流桥与高压滤波电容确保宽电压输入下的母线稳定性。反激变压器基于AP法设计,选用EE40铁氧体磁芯,采用三明治绕法以降低漏感。主开关管选用高耐压MOSFET,由专用驱动芯片控制;副边采用低导通压降肖特基二极管整流,配合LC输出滤波,有效抑制纹波,保障输出品质。

3.3 多重保护电路设计

保护系统独立部署、协同工作,并通过光耦实现信号隔离,确保安全可靠。

过流与短路保护:通过高精度采样电阻与比较器组合,实现分级响应——轻度过流限流运行,严重短路则立即关断并锁定,需手动复位。

过压保护:采用硬件比较与软件冗余双重判断机制,超阈值时快速切断输出,防止LED反向击穿。

过温保护:多点数字温度传感结合风扇调速与功率降额策略,辅以PTC热敏电阻构成软硬双保险。

浪涌保护:构建输入—中间—输出三级抑制网络,集成MOV、GDT与TVS器件,有效抵御共模与差模浪涌冲击,满足国际抗扰度标准。

3.4 智能控制模块设计

以STM32单片机为核心构建最小系统,实现高频率参数采样与PWM生成。通讯支持RS485(工业场景)与WiFi(家居场景),采用Modbus-RTU协议,实现远程监控与指令下发。本地人机交互通过按键与OLED屏完成,故障时同步触发声光报警,提升可维护性。

3.5 软件控制算法设计

软件采用模块化设计,主循环周期为1ms,关键故障通过中断优先处理。

参数调节:引入PID控制算法,实现输出稳定、响应迅速、无超调的闭环调节。

故障诊断:融合硬件触发信号与软件滤波数据,100 μs 内精准识别故障类型,并按严重程度分级处置——紧急故障锁死输出,一般故障降额运行。所有故障记录存入非易失存储器,便于后期分析,系统误判率极低。

四、LED智能电源的可靠性测试体系设计与实现

为全面验证电源在各类工况下的稳定性,本文构建了涵盖电性能、环境适应性、寿命加速及现场应用的四级可靠性测试体系,严格参照国家与国际相关标准执行。

4.1 测试平台搭建

测试平台由可编程交流电源、电子负载、高精度示波器与功率分析仪、温度巡检设备、高低温试验箱、振动台及上位机构成。上位机运行自主开发的测试软件,通过RS485/WiFi接口实现参数配置、实时数据采集与故障记录,支持全流程自动化测试。

4.2 电性能测试

电性能测试包括输出特性、保护功能及能效评估三方面。结果表明,电源在额定输入下可稳定输出宽范围电压与电流,纹波低,负载调整率良好;各项保护机制(过流、短路、过压、过温及浪涌)均能快速准确触发,响应时间达微秒级,且无器件损伤;在不同输入电压与负载条件下,能效与功率因数均满足高能效等级要求。

4.3 环境适应性测试

在极端温度、高湿及机械振动等严苛环境下开展测试。高低温循环试验中,电源启停正常、输出稳定,未出现参数漂移或老化现象;湿热环境中绝缘性能良好,无凝露或腐蚀;振动测试后结构完整,电气连接可靠,功能未受影响,体现出良好的环境鲁棒性。

4.4 寿命加速测试

采用高温加速老化方法,依据Arrhenius模型进行等效寿命推演。在持续高温满载运行数千小时后,关键元器件仅呈现轻微老化,输出精度仍在允许范围内,保护阈值保持稳定,能效略有下降但功率因数维持高位。据此推算,产品在常规使用条件下可达到设计寿命目标。

4.5 现场应用测试

在家居与工业两类型典型场景分别部署样机并连续运行半年。家居环境中,所有设备运行稳定,智能控制响应迅速,

节能效果明显,用户体验良好;工业现场虽存在电压波动、高温与粉尘等不利因素,系统仍保持高可靠性,仅个别设备因外部积尘触发过温保护,清理后即恢复正常,未造成硬件损坏,故障预警与维护机制有效。

五、电路优化与性能提升

基于可靠性测试中发现的问题,如高温环境下能效有所下降、粉尘环境中散热效率受限等,本文从硬件电路与软件算法两个维度对电源系统进行了针对性优化,进一步提升了整体性能与环境适应能力。

5.1 硬件电路优化

5.1.1 功率器件优化

选用导通损耗更低的新型主开关管,显著降低通态与开关损耗;同时将副边整流器件替换为压降更小的肖特基二极管,有效减少整流环节的能量损失。优化后,电源在高温工况下的转换效率明显改善,关键功率器件温升也得到有效抑制。

5.1.2 散热结构优化

针对工业环境中粉尘易堵塞散热通道的问题,改进整机散热布局:采用防尘性能更强的离心式风扇,并在进风口增设可拆卸防尘网;同时在发热器件与散热片之间使用高导热界面材料,增强热传导效率。该措施显著提升了在恶劣环境下的持续散热能力,大幅降低了因积尘引发过温保护的几率。

5.1.3 保护电路优化

在过压保护电路中引入滞回比较机制,设置合理的触发与恢复阈值,有效避免因电网瞬时波动造成的误动作;浪涌保护部分增加自恢复型限流元件,使系统在经历浪涌冲击后可自动恢复正常工作,无需人工干预或更换部件,提高了维护便捷性与系统可用性。

5.2 软件算法优化

5.2.1 PID 算法优化

将原有固定参数的PID控制升级为自适应调节策略,根据负载轻重动态调整控制参数:轻载时侧重稳态精度,重载时优先响应速度。优化后,电源在负载突变工况下的动态性能显著增强,输出超调减小,恢复时间缩短,稳定性更高。

5.2.2 故障诊断算法优化

融合智能识别方法,利用历史运行与故障数据训练判别模型,实现对异常状态的早期感知。新算法不仅能准确区分真实故障与正常扰动,还可识别器件老化初期的微弱征兆,提前发出预警,推动维护模式由“被动修复”向“预测性维护”转变。

5.2.3 节能算法优化

新增智能休眠机制,当检测到负载长期处于极低水平时,自动降低开关频率并进入低功耗状态;一旦负载回升,立即无缝切换回正常工作模式。该策略在不影响照明体验的前提下,进一步降低了待机能耗,尤其适用于夜间或低使用频率的家居场景,节能效果显著。

六、结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕具有多重保护功能的LED智能电源电路设计与可靠性测试展开系统研究,通过理论分析、电路设计、软件开发与测试验证,取得以下成果:

首先,提出了一种基于反激式拓扑的“AC-DC转换+智能控制+多重保护”三级架构,成功集成过流、过压、短路、过温及浪涌等多重硬件保护机制,并嵌入以高性能单片机为核心的智能控制单元,实现了输出参数的动态调节、故障的实时诊断与远程通信功能。该设计有效克服了传统LED电源保护功能单一、响应迟缓、智能化程度低等不足,构建了“监测—调节—保护—预警—恢复”的闭环控制体系。

其次,在电路实现层面,完成了主功率变换、多级电磁兼容与浪涌抑制、高精度信号采样及隔离驱动等关键模块的协同优化,显著提升了系统的动态响应能力、输出稳定性与安全裕度,满足高可靠性照明应用对电源性能的严苛要求。

再次,建立了涵盖电性能、环境适应性、加速寿命及现场应用的四级可靠性测试体系。测试结果表明,该电源在宽范围电网输入、极端温度湿度、机械振动及强电磁干扰等复杂工况下均能稳定运行;长期老化试验验证其具备长寿命特性;实际部署于典型应用场景后,运行稳定、故障率极低,充分体现了其工程实用价值。

综上,所研制的LED智能电源在安全性、智能化水平、能源效率与整体可靠性方面均显著优于传统方案,可广泛应用于智能家居、工业照明及市政工程等多种场景,为高性能、高可靠LED驱动电源的研发提供了系统性的技术路径与可推广的实践范例。

6.2 研究展望

尽管本研究已取得显著成果,未来仍可在以下方向深化拓展:一是探索GaN/SiC等宽禁带半导体器件在高频高效拓扑中的应用,进一步提升功率密度与转换效率;二是融合边缘AI算法,实现基于用户行为与环境感知的自适应能源调度;三是推动保护与控制协议的标准化,促进跨品牌设备互联互通;四是拓展光储协同场景,将LED智能电源纳入家庭能源管理系统,参与虚拟电厂与需求响应,助力“双碳”目标下的新型电力系统建设。

参考文献

- [1]杨李. 基于智能调光技术的LED电源控制系统优化设计[C]//2025智慧设计与建造经验交流会论文集. 2025: 1-3.
- [2]赵智星, 郝红星, 阳建平, 等. 储能电源产品可靠性评测系统的能量回收技术[J]. 数字通信世界, 2023(10): 82-84.
- [3]袁朋朋. LED驱动电源在智能照明系统中的应用[J]. 中国照明电器, 2024(11): 120-122.
- [4]李连召, 刘泉, 靖传才, 等. 智能照明系统的电力网络安全监测分析[J]. 中国照明电器. 2024, (7).