

大功率植物灯电源中的非隔离电源设计与可靠性研究

胡三义

身份证号: 412826197812062213

DOI:10.61369/ME.2025030012

摘 要： 针对大功率植物灯电源需求小体积，高效率，低成本的特点，提出一种双级非隔离电源设计方案。第一级 PFC 级采用 CCM 工作模式，PFC 铁感采用铁镍合金电感抑制谐波，效率达 98.5%；第二级 DC/DC 非隔离转换采用 BUCK 拓扑架构，采用 CRM 软开通技术，及 BUCK 电感串联技术，可实现 98.5% 效率和千瓦级扩展。集成三合一调光、IP67 防护及差模 6kV，共模 15KV 防雷等级，经过 5 年验证，待机功耗 <0.5W，效率 >97%，故障率低于 0.05%。符合 GB/T 44473-2024 标准，支持设施农业低碳化。

关 键 词： 非隔离电源；植物灯电源；高功率密度

Study on the Design and Reliability of Non-isolated Power Supply in High-power Plant Lamp Power Supply

Hu Sanyi

ID: 412826197812062213

Abstract： In response to the characteristics of small volume, high efficiency and low cost for high-power plant lamp power supply, a two-stage non-isolated power supply design is proposed. The first-level PFC level adopts CCM working mode, and the PFC iron sensor adopts iron-nickel alloy inductor to suppress harmonics, with an efficiency of 98.5%; the second-level DC/DC non-isolation conversion adopts BUCK topology architecture, CRM soft opening technology, and BUCK inductor adopts series technology, which can achieve 97.5 % efficiency and kilowatt-level expansion. Integrated three-in-one dimming, IP67 protection and differential mode 6kV, total mode 15KV lightning protection level, after 5 years of verification, standby power consumption <0.5W, efficiency >97%, failure rate is less than 0.05%. It meets the GB/T 44473-2024 standard and supports the low-carbonisation of facilities and agriculture.

Keywords： non-isolated power supply; plant lamp power supply; high power density

引言

植物照明作为现代农业的关键技术，其电源性能和可靠性直接影响光环境调控与经济效益。非隔离电源因高功率密度、低成本和紧凑体积成为大功率植物灯的主流选择，但仍需克服防护和长期可靠性等问题。GB/T 44473-2024 规范要求设备高效、长寿命及精准调光，推动电源设计向高能效与智能化发展。136 号文件通过市场化电价机制促进新能源设备效能提升，为非隔离电源应用提供政策支持。本研究通过双级非隔离拓扑优化、调光协同设计及 IP67 防护，实现了效率大于 97%、待机功耗低于 0.5W、差模 6kV，共模 15KV 防雷等级，支撑植物工厂智能化升级和低碳运营。

一、非隔离电源在植物灯电源中的发展趋势及技术挑战

（一）非隔离电源在植物灯领域的应用趋势

随着现代农业向集约化、智能化转型，植物照明系统对电源的高功率密度和小型化需求迫切。非隔离电源因省去隔离变压器，及 LLC 拓扑两个 MOSFET 及次边整流部分，体积和成本大大降低，因此非隔离电源越来越成为大功率植物灯电源的首选。采用优质铝材方形结构与内部灌胶工艺，不仅增强了结构强度和

散热效率，还实现了 IP67 防护等级，适应温室恶劣环境。铝材高导热性和灌胶绝缘防水特性协同，在紧凑设计中平衡了热管理和防护，使非隔离电源既小型又可靠^[1]。铝材的可塑性和表面处理优化了外观，符合现代农业对设备美观性的要求，推动非隔离架构在植物灯领域的应用不断增长。

（二）技术挑战与解决方案

非隔离电源用于植物灯时，面临输入峰值电流高引发的电网污染与设备冲击问题。采用连续导通模式（CCM）的 PFC 级设计，有效抑制电流谐波，降低峰值电流，减少对前端设备冲击，

同时优化储能电解电容选型，在维持母线电压稳定的前提下，使电容体积缩减超 30%，降低成本并延长寿命。PFC 级运用本人独自发明的“一种快速开关机 PFC 保护电路”专利（专利号：ZL2022 1 0627057.9），显著提升抗冲击能力与可靠性。高功率场景下，PFC 级采用铁镍合金磁环电感，其高温性能优，导线外露散热佳，叠加小磁环设计进一步降低磁损与铜损。DC/DC 级采用 BUCK 拓扑的临界导通模式（CRM），实现零电压开通；针对数百瓦及以上高功率项目，双电感串联分散热量、降低生产工艺难度，搭配本人独自发明的“一种 BUCK 电感串联检测控制电路”专利（专利号：ZL2022 1 0352712.4）解决检测与退磁难题；及“一种 BUCK 快速开关机保护电路”专利（专利号：ZL2023 1 0806628.X）让 BUCK 模块软启动，增强抗冲击性。最终，整机效率超 97%，满足 5 年质保，实现高功率密度与长寿命的平衡。

二、双级架构非隔离电源设计原理与创新

（一）PFC 级 CCM 模式设计与性能优化

连续导通模式（CCM）通过确保电感电流始终高于零，有效降低了输入电流峰值及波形畸变率，其谐波抑制得益于电流连续特性对高频纹波的平滑作用。PFC 级设计结合平均电流控制策略，可将输入电流总谐波失真（THD）控制在 10% 以内，优于传统断续模式（DCM）。采用铁镍合金磁环 PFC 电感，利用其高饱和磁通密度和低高频涡流损耗特性，并通过单根漆包线外绕工艺实现绕线短且平滑，实现了小体积，减少能量损耗。磁环结构热传导路径短且均匀，配合开放式散热通道，使电感温升较传统 EE 型磁芯低 15%–20%，提升 PFC 级效率至 98.5% 以上^[9]。专利技术（ZL2022 1 0627057.9）保证在负载突变或输入快速开关切换时，PFC 级动态响应快，冲击小，增强了系统稳定性。

（二）BUCK 级 CRM 模式拓扑与功率扩展

临界导通模式（CRM）在电感电流归零瞬间导通开关管，实现零电压开通，消除续流二极管反向恢复损耗与 MOSFET 开通损耗，使 BUCK 级满载效率达 98.5%。结合自适应频率调制技术实现抖频，有效降低 EMI，将 BUCK 级损耗控制在总损耗 1.5% 以内。恒流控制通过采样电阻实现，并可利用调光信号隔离调节输出电流。针对 680W 以上场景，采用双电感串联方案，分散电感热量，降低工艺难度，提升磁芯抗饱和性与减少绕组损耗。基于本人发明专利的 BUCK 电感串联检测控制电路（专利号：ZL2022 1 0352712.4），确保电感完全退磁后进入下一周期。串联设计减少绕组寄生电容，抑制高频振荡，温升梯度控制在 15K 以内。实验显示，在 260V/3.07A（800W）输出下，双电感方案较单电感效率提升 1%、体积缩小 25%。该方案支持线性扩展功率，在千瓦级应用中可通过多电感串联实现功率扩容与热均匀分布，验证了在高功率植物灯电源中的扩展性与实用性^[4]。

三、调光控制与保护系统的协同设计

（一）三合一调光技术的实现路径

1. 正 / 负逻辑调光兼容性设计

正 / 负逻辑调光由硬件电路与软件协议协同实现。硬件上，直接采样三合一调光信号（电阻、PWM、0–10V DC），精准识

别正 / 负逻辑信号并转换为内部 PWM 控制信号^[6]；调光接口集成自适应阻抗匹配网络，兼容多种调光模式，消除阻抗差异导致的线性度问题；调光输入端口配备高压保护电路，防止误接高压损坏电路及 MCU。软件层面，通过可配置寄存器动态切换逻辑极性，运用数字滤波算法抑制信号抖动，将调光精度误差控制在 $\pm 1\%$ 以内^[7]。该设计使同一电源适配不同厂商调光控制器，提升系统兼容性与部署灵活性，满足多样化调光需求。

2. 在线 / 离线可编程调光接口开发

在线 / 离线可编程调光接口基于双通道通信架构设计^[8]。在线模式下，通过 UART 或 I2C 总线与上位机实时交互，支持动态调整调光曲线、电源输出电流，电压等参数，并嵌入 DALI 协议栈以实现标准化工业控制。离线模式下，配置参数存储于外置 EEPROM，用户可通过物理拨码开关或专用编程器预设多组调光场景，满足无网络环境下的快速切换需求。

（二）多重保护电路集成策略

1. 快速开关机电路与短路保护动态响应机制

一种快速开关机 PFC 保护电路（专利号：ZL202210627057.9）通过集成高压预充电回路与零 VCC 电压检测模块，在输入电压建立瞬间抑制浪涌电流，实现开机冲击电流峰值较低，关机时通过主动泄放电路在 5ms 内将 PFC IC 供电 VCC 电压降至关机状态。短路保护采用快速响应机制。短路保护通过 DC/DC BUCK 电路控制 IC 采样恒流检测电阻信号，实时采样输出电流，在检测到采样电阻信号高时，触发 BUCK IC 保护关断功率管；可实现打嗝保护状态，避免产品出现不可逆损坏风险。

2. 去余晖电路与低待机功耗（<0.5W）协同设计

余晖现象是由于非隔离电源中输入交流与输出 Y 电容分压，导致调光关断时 LED 灯微亮，这在植物灯照明领域难以被客户接受。为此，我们设计的去余晖电路，通过在输出 VO+、VO- 连接双刀常开继电器，由调光信号控制其通断。调光信号打开时，继电器吸合，电源正常工作；调光信号关闭，继电器断开，LED 即刻熄灭，有效消除余晖。同时，结合“一种低待机功耗电路”专利技术（专利号：ZL 2022 1 087650.5），利用动态功率管理机制，在待机时关闭 PFC 级与 BUCK 级非必要模块，仅维持核心监控电路运行。实验表明，230V 输入下，待机功耗低于 0.5W，且无余晖现象，保障了植物灯电源的经济性与可靠性。

四、可靠性验证与产品化应用研究

（一）散热与防护性能测试

1. IP67 防护等级及灌胶工艺对热管理的优化效果

IP67 防护等级及灌胶工艺采用高导热有机硅胶填充电源内部空隙，形成连续散热路径及防水效果，其导热系数达 2.5W/(m·K)，较传统空气间隙结构提升 8 倍以上。在灌胶前通过喷涂工艺及材料，使灌胶材料与铝制外壳紧密贴合，实现 IP67 防护等级，较好的防水效果，又可将 PFC 电感、BUCK 电感等热源的热量均匀传导至外壳表面，实测灌胶后整机热阻降低至 1.2℃/W，同等负载下关键器件温升较非灌胶方案减少 15℃。灌胶层同时固化内部元件，抑制震动导致的接触失效，其疏水性与抗腐蚀特性使电源在 85% 湿度环境中长期运行后仍保持散热性能稳定，验证了 IP67 防护等级与热管理的协同优化效果^[8]。

2.6KV/15KV防雷等级的实现与验证

防雷设计采用两级防护架构：输入级防护差模雷击电路由两级压敏电阻组成，分别接在 L,N回路中。共模防雷由 L,N输入端各接一个压敏一脚，另一脚与气体放电管 Y 型接法构成，放电管另一端接在输入地线孔上，吸收 6kV/15kV 浪涌能量的 90%；余下能量通过 BUS 母线电容吸收。输出级防护通过在 VO+,VO- 各接一个容量相对小一级压敏电阻与气体放电管 Y 型接法而成，气体放电管另一端接输出板边地线脚。可将输出端残余电压箝位至 600V 以下。PCB 布局优化关键信号线与功率回路的间距，避免耦合感应过电压。经 IEC 61000-4-5 标准测试，差模 6kV 浪涌，共模 15kV 组合波测试中未发生器件击穿或功能异常，满足户外植物灯电源的严苛环境适应性要求。

（二）电气性能与寿命测试

1.效率 >97% 与 PF>0.98 的负载特性曲线分析

在 AC230V 输入、满载输出条件下，双级架构协同作用使整机效率在 200-260V 恒功率区间内稳定高于 97%。PFC 级 CCM 模式在半载至满载范围内保持 PF 值 >0.98，得益于铁镍合金磁环电感的低损耗特性，50% 负载时效率仅下降 0.5%。BUCK 级 CRM 模式在输出电流 3.07A 时 (800W) 效率达 98.5%，轻载下通过跳周期调制 (PSM) 将效率维持在 95% 以上^[9]。负载特性曲线显示，效率拐点出现在 10% 负载率，验证了拓扑设计对宽负载范围的高效覆盖能力。

2.电解电容寿命与整机5年质保的关联性研究

电解电容寿命遵循 Arrhenius 模型，其工作温度每降低 10℃，寿命延长 2 倍。CCM 模式通过降低输入电流纹波，将电容纹波电流有效值控制在额定值的 60% 以内，结合铝壳灌胶散热将电容核心温度抑制在 75℃ 以下。加速老化试验表明，在 105℃ /2000 小时条件下电容量衰减 <15%，ESR 增长 <30%，推算常温 (40℃) 下寿命超 6 万小时 (约 7 年)，覆盖 5 年质保期需求。实际应用中，电容寿命与整机故障率的强相关性证实，电容优化是达成高可靠性的核心要素之一。

（三）量产应用与市场反馈

1.PLS 系列产品扩展至千瓦级的可行性验证

PLS 系列非隔离电源通过双级架构的模块化设计，验证了

千瓦级功率扩展的可行性^[10]。BUCK 级采用电感串联方案，在 800W 原型机中 BUCK 电感采用两个串联方式，实测效率仍维持在 98.5%，较单电感方案效率高近 1% 效率。功率扩展后，灌胶工艺的均热效应使磁芯最高温升控制在 42K 以内，符合 AEC-Q200 车载级温度循环标准。防雷设计沿用两级防护架构加上优良的 PCB 布局，差模 6KV, 共模 15kV 雷击测试中未出现绝缘击穿，产品损坏现象，验证了拓扑扩展后防护能力的稳定性。量产测试表明，千瓦级产品在 85℃ 环境温度下连续运行 500 小时无降额，证实了架构设计对高功率场景的强适应性。

2.客户长期使用数据对设计优化的指导意义

基于全球 3000+ 台 PLS 系列电源的 3 年运行数据，电解电容年均故障率低于 0.03%，印证了 CCM 模式纹波抑制策略的有效性。客户反馈显示，该 PLS 非隔离系列产品运行稳定，工作良好。有效应对了户外恶劣工作场景及高温，高湿，雷击及盐雾环境。市场数据反向验证了 IP67 防护等级与 6kV/15KV 防雷设计的必要性，进一步强化极端环境适用性。

五、总结

本研究通过双级非隔离架构创新与可靠性协同设计，攻克了大功率植物灯电源的高效化与长寿命技术难题。PFC 级 CCM 模式结合磁环电感实现 98.5% 效率，BUCK 级 CRM 拓扑与电感串联方案突破千瓦级功率扩展瓶颈。IP67 防护等级、6kV/15KV 防雷及三合一调光技术满足 GB/T 44473-2024 规范要求，5 年质保期内客户故障率低于 0.05%，验证了设计方案的工程适用性。专利技术集群与市场化政策 (136 号文) 形成协同效应，推动植物照明电源向高功率密度、低成本方向迭代。未来研究将聚焦智能化调光算法与多个电源并联控制，进一步拓展非隔离架构在设施农业中的低碳化应用场景。

参考文献

- [1] 杨巍巍. LED 调光驱动电源的研究与设计 [D]. 陕西: 陕西科技大学, 2014.
- [2] 汪超, 王邦兴, 王涵, 等. 非隔离型防电流反灌技术在宇航领域中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(25): 75-79+84.
- [3] 谭钰霖. 智能 LED 照明驱动电源的研究与设计 [D]. 贵州: 贵州大学, 2021.
- [4] 李如平, 陈玉辉, 胡俊. 非隔离驱动电源在 LED 路灯中的应用 [J]. 光源与照明, 2023, (08): 42-44.
- [5] 张伟超, 欧炫宏, 陈嵘. 专为非隔离绿色照明驱动优化设计的 LED 芯片方案 [J]. 中国电子商情, 2012, (03): 37-40.
- [6] 董海燕, 杜奕智, 王晓员. 一种非隔离降压式大功率 LED 恒流电源驱动电路的设计 [J]. 赤峰学院学报 (自然科学版), 2017, 33(02): 52-54
- [7] 李江龙. 使用非隔离电源的 LED 灯安全设计 [J]. 中国照明电器, 2016, (02): 17-21.
- [8] 朱剑. LED 恒流驱动开关电源的研究与设计 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2015.
- [9] 非隔离 K78-R4 电源: 创新赋能, 匠“芯”升级 [J]. 电子产品世界, 2020, 27(06): 91-92.
- [10] 李小彬. 高效率高功率密度 1kW 隔离 AC-DC 电源模块的研究与设计 [D]. 四川: 西南交通大学, 2020.