

蓝牙控制恒流驱动智能感应灯的能效与稳定性测试分析

江兴刚

怀化职业技术学院 湖南怀化 418000

摘要: 本文分析如何使用蓝牙控制恒流驱动智能感应灯系统, 研究人员搭建了标准化的测试平台, 在该平台中评估智能感应灯系统的能效特性与运行稳定性。研究的重点为恒流驱动电路设计对能源利用效率的影响, 结合智能感应模块的集成特性, 研究人员提出了覆盖多场景的测试方案。最终的实验数据表明优化后的驱动电路在典型的工况下能够实现85%以上的能源转换效率, 在复杂的电磁干扰环境中仍能保持输出电流波动幅度低于3%。

关键词: 蓝牙控制; 恒流驱动; 智能感应灯; 能效分析; 稳定性测试

智能照明与物联网技术融合后向低功耗、高集成度方向的迈进, 使用蓝牙控制恒流驱动智能感应灯, 利用恒流驱动技术保障LED光源工作稳定, 结合红外/微波双模感应模块保障智能感应灯有环境感知的功能, 可以使用蓝牙协议完成设备组网控制, 此类智能照明系统在楼宇照明、仓储管理等场景有极佳的应用潜力。

一、恒流驱动电路设计

智能感应灯的恒流驱动电路使用了BUCK拓扑结构, 利用PWM调光芯片与场效应管组成闭环的控制系统。智能感应灯的恒流驱动电路设计包含了输入滤波单元、DC-DC转换模块及电流反馈环路, 如电感的选型需要兼顾饱和电流与DCR值, 确保智能电灯系统在12V-24V输入电压范围内输出电流波动不超过 $\pm 2\%$ 。采用同步整流技术能使智能感应灯的驱动模块空载功耗降低至0.3W以下^[1]。

二、智能感应模块集成

智能感应灯的感应模块整合了热释电红外传感器, 该感应模块使用数字滤波算法实现了运动信号的精确识别。信号处理流程包含了三级放大、带通滤波及阈值比较, 最终输出的TTL电平触发了蓝牙模块。最终的测试发现在0.5m/s行人移动速度下, 智能感应灯的系统响应延迟能够控制在200ms以内, 误触率低于0.5次/小

时。智能感应灯的蓝牙5.0模块采用主从一体设计, 支持Mesh的组网功能, 经过实际测试发现其在空旷的环境通信距离可达80米^[2]。

三、测试方法与实验设计

(一) 测试平台搭建

研究人员对供电单元选择了可编程的直流电源, 该电源的输出电压范围覆盖12V至24V, 电流的输出能力为5A。使用的电源通过GPIB接口与上位机通信, 能够实现电压瞬态冲击模拟。研究人员考虑到消除电源纹波对测试结果的潜在影响, 对输出端的串联高精度的LC滤波电路, 经过测试其在满载的条件下输出的噪声峰峰值可以控制在2mV内。信号采集单元的示波器带宽配置为100MHz, 采样率达2.5GS/s。万用表则使用了六位半分辨率型号, 万用表负责输入功率。设备通过触发同步机制实现数据时间对齐。测试中研究人员使用恒温恒湿箱与电磁兼容组成模拟环境, 恒温箱的工作温度范围为-20℃至60℃, 湿度控制精度为 $\pm 2\%$, 电磁兼容暗室使用了吉赫兹横电磁波传输室结构, 内部铺设吸波材料, 能开展150kHz至30MHz频段的辐射抗扰度测试。

为了验证测试平台的可靠性, 研究人员在正式实验前展开了为期一周的预运行考核。在预运行期间对标准电阻施加阶梯负载, 利用计算机记录输入输出参数的变化曲线。采集到的数据显示在1Ω至100Ω负载范围内, 平台的测量误差始终小于0.5%, 重复性试验的标准差控制在0.2%内^[3]。

(二) 测试参数与指标

1. 能效指标

研究人员在测试时使用了四线制接线法消除线损的

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项“基于蓝牙恒流驱动技术的智能感应灯研究”(项目编号: 23C0923)。

作者简介: 江兴刚(1974—), 男, 苗族, 湖南新晃人, 本科, 正高级实验师、高级技师, 研究方向: 智能电子技术。

影响，分别记录了设备的待机、感应触发、持续点亮三种模式下的功率消耗。在光效测试中研究人员使用积分球配合光谱辐射计，测试的环境符合CIE127的标准要求。积分球内壁喷涂高漫反射涂层，在开口处配置了标准白板用于校准。待测的灯具固定于球心位置，使用可编程的电源设置不同的亮度等级，待光输出稳定后记录光谱功率的分布数据。待机功耗的专项测试需要研究人员基于蓝牙模块的工作状态实现切换，设备处于待机模式时蓝牙芯片存在周期性唤醒检测控制指令的行为。研究人员设置的测试系统配置数据记录仪，记录仪的采样频率设置为每秒1000次，能够精确的捕捉短暂的电流尖峰。

2. 稳定性指标

研究人员的输出电流纹波测试采用差分探头配合示波器，探头的带宽覆盖直流至50MHz，共模抑制比达120dB。在测试时将示波器设置为persistence显示模式，研究人员长时间捕获观察电流波形的重复性特征。响应时间的测试需要在暗室环境中进行，研究人员在暗室中布置运动轨迹模拟装置。该装置由步进电机驱动导轨系统，能远程编程控制移动的速度与路径。感应模块的前方设置光电门传感器，使用时间数字转换芯片精确测量从目标进入探测区域到灯具亮度达稳定值90%的间隔时长。连续工作稳定性的测试则由高温老化箱与程控电源联动控制，研究人员模拟了实际使用中的温度循环与电压波动工况。老化箱设置为-20℃至60℃的温度交变程序，每1个温度极值保持4小时，循环周期持续720小时。研究人员在测试期间每隔24小时进行一次全功能检测，记录项目包括输出电流、感应灵敏度、通信质量等参数。

(三) 实验方案设计

研究人员采用三组对比方案，A实验组为传统恒压驱动感应灯，B实验组为未优化电磁屏蔽的原型机，C实验组为完成全部改进的测试样机。每个实验组配置了五台完全相同的设备，使用轮换测试法减少个体差异的影响。在能效测试阶段设置三个测试节点，设备上电初始阶段、持续点亮四小时稳态阶段、触发感应后的瞬态阶段。研究人员在每个节点记录不同测试组的输入功率、输出光通量、工作电流参数^[4]。

稳定性测试则分为短期波动测试与长期老化测试两个阶段，短期测试在温控箱内进行，研究人员使用编程控制箱内温度以每小时5摄氏度的速率升降，观察设备在热胀冷缩环境下的参数。长期测试使用了双机热备份

方式，两台设备交替承担测试任务，确保720小时连续运行期间的数据不丢失。异常工况测试专门设计三类典型场景，分别为电压突变测试通过可编程电源模拟电网波动，在0.1秒内完成12V至24V的电压跳变；电磁干扰测试利用信号发生器产生特定频谱的干扰信号，耦合方式包含空间辐射与传导注入两种形式；机械振动测试在三维振动台中实施，模拟设备在运输安装过程中可能遭受的机械应力^[5]。

四、实验结果与分析

(一) 能效测试结果

研究人员的实验数据显示，在50%亮度档位下优化后的C实验组样机输入功率稳定在8.2W水平，与传统的恒压驱动A实验组设备降低1.7W。C实验组采用了同步整流技术使开关损耗降低，亮度档位下调至30%时，C实验组的输入功率降至5.1W，而A实验组的设备因为调光电路效率下降，功率仅降低至6.8W。在光效测试结果分析中，设备运行100%亮度档位时C实验组的样机光效达到130流明每瓦，较A实验组设备提升了18流明。设备运行在50%亮度档位时，C实验组的样机光效维持在125流明每瓦水平，而A实验组的设备因调光电路效率衰减，光效下降至112流明每瓦^[6]。

在待机功耗测试中，研究人员使用测试模式捕捉C实验组样机在蓝牙深度睡眠状态下的待机电流仅0.6毫安，折合待机功耗0.08W。每次蓝牙的芯片唤醒检测控制指令时，瞬时电流峰值达15毫安，但持续时间不足2毫秒，对整体的待机功耗影响微乎其微，如表1所示。表中数据表明在相同亮度输出条件下，C实验组样机的光效与功耗比明显优于对照组。

表1 关键能效参数对比表

测试组别	亮度档位	输入功率 (W)	光效 (lm/W)	待机功耗 (W)
A组	100%	12.3	112	0.35
A组	50%	8.5	112	-
A组	30%	7.2	105	-
B组	100%	11.8	120	0.28
B组	50%	8.0	115	-
B组	30%	6.5	108	-
C组	100%	10.5	130	0.08
C组	50%	8.2	125	-
C组	30%	5.1	120	-

(二) 稳定性测试结果

研究人员经过测试发现在满载运行状态下，C实验

组样机的输出电流纹波峰峰值稳定在12毫安水平，较B实验组的原型机降低。通过调整电感匝数与电容等效串联电阻，能够抑制开关的噪声^[7]。当环境温度升至50℃时，C实验组样机的纹波增幅较小，而A实验组的设备因电解电容ESR随温度升高增加，导致纹波幅度上升明显。在响应时间测试中，测试的目标以0.5米/秒的恒定速度通过感应区域，光电门传感器记录触发时刻，示波器同步捕获灯具亮度的变化曲线。实验数据显示C实验组的样机从检测到运动信号到亮度达稳定值90%的响应时间较快。

研究人员设置-20℃至60℃的温度循环周期，每个温度极值保持4小时。测试期间每24小时进行全功能检测。经过720小时连续运行后，C实验组的样机在50%亮度档位的光通量维持率较为理想，而A实验组的设备因为驱动电路温漂问题光通量衰减。在30V/m场强的辐射干扰下C实验组样机蓝牙通信未出现误码，但感应模块出现短暂误触发。在机械振动测试中，研究人员设置了5Hz至500Hz的扫频过程，C实验组的样机输出电流波动幅度始终控制在安全阈值内。振动后的外观检查显示PCB焊点、连接器等部位未见裂纹，功能复测确认所有参数符合初始状态。

（三）异常工况分析

在电压突变测试中，研究人员输入了电压突升至26V时，C实验组的样机驱动电路立即启动过压保护，输出电流在15毫秒内降至安全阈值以下。电压恢复正常后设备自动重启并恢复工作，整个过程未出现功能异常问题。在电磁干扰测试中辐射的干扰采用双锥天线产生30V/m场强的脉冲调制信号，传导干扰则使用电源线注入特定频谱的噪声电流。测试中C实验组的样机在强电磁干扰下出现短暂通信中断，但感应模块仍能维持基本检测功能。干扰信号通过电源线耦合进入系统，在数字滤波器的作用下虚假触发信号被有效抑制。测试结束后设备各项功能自动恢复正常，未出现性能退化现象。在

机械振动测试中在5g加速度的幅值振动条件下，C实验组的样机输出电流波动幅度控制在安全阈值内^[8]。在振动结束后的外观检查中显示PCB焊点、连接器等部位未出现松动迹象。

五、讨论

经过研究人员设置的实验数据证实，在智能感应灯中设置恒流驱动与智能感应模块能提升系统的能效。智能感应灯优化后的驱动电路在轻载时能够自动切换脉冲频率调制模式，降低了待机能耗。感应灯内置的金属屏蔽罩提升了设备的电磁抗扰度。

参考文献

- [1] 项琴燕. 基于问题解决的控制系统项目式实验教学实践——以“楼道智能感应灯系统设计”为例[J]. 中国信息技术教育, 2024(11): 64-67.
- [2] 蒋帅帅, 周志峰. 基于GD32智能人体感应灯的控制设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(9): 117-120.
- [3] 戴竹苗, 杨文韬, 黄益路, 等. 基于51单片机的智能雷达感应灯控系统[J]. 集成电路应用, 2023, 40(2): 14-15.
- [4] 李文杰, 倪春晖, 钱迎, 杨柳, 翟娟. 基于单片机的智能人体感应多功能台灯的设计[J]. 2024(2): 42-44.
- [5] 蒋贤才, 徐慧智. 混合驾驶环境下交叉口空间资源动态控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 63-73.
- [6] 李文斌. 智能感应灯[J]. 发明与创新: 小学生, 2023(4): 1.
- [7] 刘娟, 柯俊怡, 黄忠, 等. 基于STM32单片机的智能人体感应灯设计[J]. 轻工科技, 2024, 40(6): 129-131.
- [8] 彭国意, 谭婵源, 程婷婷, 等. 牙科综合治疗机灯光智能追踪系统设计[J]. 中国医疗器械信息, 2024, 30(6): 1-3.