

高亮度 LED 消防应急灯具驱动电路稳定性研究

季德武 施晓蒙 戴深宇

浙江银月光电科技有限公司 浙江 温州 325600

【摘要】：高亮度 LED 消防应急灯具需适配市电波动、高低温交变、双电源瞬态切换复杂工况，驱动电路易出现环路振荡、恒流偏移、功率器件热失稳问题。本文以隔离反激式应急驱动电路为研究对象，依托状态空间平均法与奈奎斯特稳定性判据，推演双模态输入阻抗阶跃引发的环路相位衰减机理，结合一维稳态热传导理论解析器件温敏参数与 LED 负载的电流耦合误差。针对高低频耦合扰动，提出 RC 无源阻尼相位补偿结合分段温度前馈校正的协同优化方案。理论推演结果表明，优化后电路全温域恒流误差降至 1.83%，极端市电波动下相位裕度符合安全标准，模态切换电流超调降幅超六成，可满足消防灯具长期稳定运行规范。

【关键词】：高亮度 LED；消防应急灯具；反激驱动电路；环路稳定性；模态扰动；前馈校正

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.043

1 引言

建筑消防应急照明系统是火灾被动安全防护的核心配套设施，现行规范要求应急灯具断电后可维持 90 分钟额定光通量输出，且能适配电网谐波、高低温等复杂建筑工况。相较于普通民用 LED 灯具，消防高亮度 LED 单芯片工作电流达 1.2A、动态内阻仅 $0.32\ \Omega$ ，低阻负载特性会放大驱动电路参数扰动，大幅提升电路失稳风险。

目前机电领域相关研究多集中于应急灯具电池充放电管理，针对高亮度负载的驱动环路稳定性研究存在明显短板。工程中常直接沿用普通 LED 照明驱动拓扑，未适配消防场景双电源切换的瞬态扰动特性，国内消防抽检数据显示，32% 的应急灯具不合格问题，均由驱动电路恒流失稳导致光衰、熄灭引发。

从电路底层逻辑来看，LED 为非线性负温度系数负载，高亮度产品的非线性特征更为突出，其额定工作电流区间的伏安特性曲率远高于普通 LED，会向驱动环路反馈高频杂波。同时，市电供电与断电应急供电的双模态切换，会造成电路输入、输出阻抗阶跃突变，引发控制环路零极点偏移；且电源切换延时越短，阻抗突变斜率越大，电路失稳概率越高。

现有行业优化方案存在明显局限性：多采用固定参数补偿网络，仅适配额定市电工况，无法应对宽域阻抗扰动；且大多仅优化输出端滤波，忽略了蓄电池老化的影响。蓄电池经 500 次循环充放电后内阻会升高 20%，进一步加剧应急工况下的阻抗扰动问题。

本文摒弃传统实物迭代的研究模式，依托状态空间平均法构建双模态统一小信号模型，纳入蓄电池老化内阻变量完善模型，推导阻抗突变与环路零极点的关联机制，建立温度、电流、蓄电池老化三重耦合理论模型，设计动态参数补偿机制，以此完善消防专用高亮度 LED 驱动电路的稳定性理论体系。

2 高亮度 LED 消防应急驱动电路拓扑与扰动源理论解析

2.1 双模态工作拓扑结构

消防应急灯具驱动电路采用市电主回路、备用蓄电池辅回路双输入隔离式反激拓扑，拓扑内部集成市电检测继电器、输出恒流反馈单元、蓄电池降压变换单元。市电正常时，主回路 AC-DC 变换模块将 220V 工频市电转换为 42V 直流母线电压，通过反激变压器隔离降压后为高亮度 LED 阵列提供恒流输出，同时同步完成磷酸铁锂备用蓄电池浮充。市电中断时，毫秒级继电器切断主回路，蓄电池通过 DC-DC 升压模块接入反激变压器原边，维持副边 LED 负载电流恒定。两类模态共用同一套 PWM 反馈控制环路，电路拓扑硬件参数无切换改动，控制参数自适应调整是维持稳定性的唯一路径。

2.2 多维度电路扰动源分类与机理分析

结合消防建筑配电环境五年现场运行统计数据，将驱动电路稳定性扰动划分为输入侧、负载侧、环境侧三类独立扰动，同时补充三者两两耦合的交互扰动机理，厘清单扰动与耦合扰动的失稳阈值差异。输入侧扰动包含市电电压幅值波动与谐波畸变，建筑内部变频风机、电梯等非线性用电设备会向配电网注入 3、5 次奇次谐波，其中 5 次谐波对反激电路扰动作用最强，谐波幅值最高可达基波幅值的 18%，会造成反激变压器原边励磁电流周期性畸变，励磁磁通量偏离饱和区间，变压器漏感等效增大 11%。负载侧扰动来源于高亮度 LED 阵列热内阻漂移，芯片结温每上升 $10\ ^\circ\text{C}$ ，LED 正向导通电压下降 19mV，动态内阻同步衰减 $0.021\ \Omega$ ，消防灯具普遍采用 8 颗芯片并联阵列，单颗芯片内阻失平衡偏差超过 5% 时，就会引发支路电流不均衡，反馈采样信号出现混叠噪声，噪声带宽集中在 20kHz-50kHz，恰好覆盖 PWM 调制频率区间。环境侧扰动为环境温度交变，功率开关管、采样电阻无源器件的电气参数具备温敏特性，MOS 管导通电阻温度系数为 $0.72\%/^\circ\text{C}$ ，高温工况下导通损耗呈指数增长，诱发器件热失控。三类扰动并非独

立作用,谐波扰动会提升器件导通损耗,进一步放大温度漂移,而温度漂移导致LED负载内阻变化,又会加剧谐波电流反射,最终形成闭环耦合失稳。

3 双模态切换下反馈环路相位失稳逻辑推演

3.1 状态空间平均小信号模型构建

忽略变压器漏感极小量值与线路寄生电容二阶参数,基于状态空间平均法选取变压器励磁电流、输出滤波电容电压为两个状态变量,分别构建市电模态、应急模态状态方程,同时计入线路寄生电感的三阶微量做误差修正,避免小信号模型理想化偏差。市电模态下电路输入阻抗为工频整流后阻容滤波阻抗,等效数值为 1240Ω ,阻抗呈容性主导特征;应急模态下蓄电池输出内阻仅 $42m\Omega$,阻抗呈纯阻性主导特征,两类模态输入阻抗相差29.5倍,阻抗性质同步发生转变。将两类模态状态方程做差分运算,得到模态切换瞬时输入阻抗阶跃扰动的小信号增量方程,方程显示阻抗突变会直接改变控制环路传递函数的低频极点位置,容性输入对应的低频极点频率为 $12Hz$,阻性输入对应的低频极点频率偏移至 $47Hz$ 。常规民用LED驱动仅设置单低频极点,极点大幅偏移后环路低频增益超出稳定阈值,引发低频自激振荡,且振荡频率与极点偏移量呈线性对应关系。

3.2 相位裕度衰减量化推演

依据奈奎斯特稳定性判据,环路稳定判定标准为穿越截止频率时相位裕度不低于 45° 。通过传递函数伯德图逻辑推演可得,市电向应急模态切换过程中,原边输入阻抗骤降会使环路低频增益提升 $14.3dB$,相位滞后角度增加 12.7° ,原始固定PI补偿网络无法抵消相位滞后,相位裕度由额定工况 51° 衰减至 33.2° ,低于安全阈值。相位裕度不足会导致输出电流出现 $120Hz$ 低频振荡,电流波动峰值达到 $0.27A$,超出高亮度LED允许波动阈值 $0.08A$,长期振荡会加速LED荧光粉老化,灯具光通量1000小时衰减率超过22%,不符合消防应急照明长寿命要求。

4 温敏参数耦合下恒流精度退化规律推导

4.1 功率器件结温传导链路建模

驱动电路功率损耗主要包含MOS管开关损耗、变压器铜损、输出采样电阻损耗三类,细分损耗成因可分为开通损耗、关断损耗、导通损耗三类,其中关断损耗受环路相位扰动影响最大,也是模态切换瞬态结温飙升的核心原因。在环境温度 $60^\circ C$ 满载工况下,MOS管开关损耗占总损耗比例57%,变压器铜损占比29%,采样电阻损耗占比14%。采用一维稳态热传导理论推演器件外壳到PCB基板、基板到空气的热阻链路,区分垂直传导与水平对流两类热传递路径,测算反激驱动电路整体等效热阻为 $11.2^\circ C/W$,其中PCB基板与空气的对流热阻占据总热阻的63%,是散热短板。结合热阻参数建立结温与输

出电流的耦合关系式,关系式表明输出电流每提升 $0.1A$,器件稳态结温上升 $4.9^\circ C$,结温上升反向增大MOS管导通损耗,导通损耗每提升 $0.1W$,结温额外上升 $1.2^\circ C$,形成正反馈热耦合。在应急模态下,电路占空比提升12%,开关损耗瞬时增加,会出现短时间非稳态结温冲顶,常规散热结构无法快速抵消瞬时温升。

4.2 恒流采样误差退化机理

驱动电路采用低端电阻采样实现恒流控制,采样电阻温度系数为 $125ppm/^\circ C$,未做温度补偿时,环境温度从 $-20^\circ C$ 上升至 $60^\circ C$,采样电阻阻值累计漂移1.02%。叠加LED负载内阻同步漂移影响,反馈环路采样信号与实际负载电流偏差持续扩大。理论推演数据显示,全温域未优化电路恒流误差最大值为7.21%,低温工况下采样电阻阻值偏小,驱动环路误判负载电流不足,主动提升PWM占空比,引发LED过流光衰;高温工况下采样电阻阻值偏大,环路降低占空比,应急照明光通量不满足消防最低照度要求。

5 多扰动协同稳定性补偿优化方案设计

5.1 无源阻尼低频相位补偿网络设计

针对模态切换低频相位失稳问题,摒弃传统单一PI补偿结构,在反馈光耦次级回路增设RC无源阻尼支路,从零极点对消理论层面推演阻尼参数的敏感性边界。原始PI补偿网络会在环路中引入一对共轭复极点,该极点在输入阻抗突变后会进入不稳定右半平面,引发相位滞后。通过零极点对消理论推演阻尼支路参数匹配逻辑,使阻尼支路新增零点精准抵消输入阻抗突变引发的低频极点偏移,同时控制零点频率比环路截止频率低20%,避免零点引入高频干扰。阻尼电容选取依据环路截止频率确定,取值为 $0.1\mu F$,阻尼电阻取值 $2.2k\Omega$,经过参数敏感性理论验证,阻尼电阻上下浮动超过 $\pm 15\%$ 就会丧失极点抵消效果,电容浮动阈值为 $\pm 8\%$,参数容错区间较小。相较于有源补偿电路,无源阻尼支路无需额外供电回路,适配消防灯具低功耗、高可靠性的使用要求,不会增加电路静态功耗,静态功耗增幅低于 $0.03W$,同时具备耐高低温特性,在 $-20^\circ C$ 至 $60^\circ C$ 区间内参数漂移量小于0.4%,不会自身引入新扰动。

5.2 分段式温度前馈校正策略

结合全温域恒流误差退化规律,将工作温度划分为低温段、常温段、高温段三个区间,设置分段式前馈校正系数。通过MCU采集PCB基板热敏电阻电压信号换算环境温度,实时修正恒流采样基准电压。低温区间修正基准电压上浮0.91%,抵消采样电阻负向漂移;高温区间修正基准电压下浮1.04%,抵消采样电阻正向漂移。校正策略不改动硬件拓扑,仅通过控制算法完成参数动态调节,规避硬件器件温敏参数固有缺陷,实现全温域恒流闭环自适应调节。

6 优化方案理论量化验证与鲁棒性分析

本文所有验证均基于电路小信号模态仿真完成,无实物试验与附图数据,通过环路传递函数迭代计算、伯德图数值推演实现全维度量化验证,全部验证数据由线性矩阵迭代求解获得。

研究首先完成双模态切换瞬态稳定性验证,依据国标设置 $\pm 20\%$ 市电电压波动+5次谐波叠加的极端输入工况。优化后电路相位裕度稳定在 $45.3^\circ \sim 51.8^\circ$,符合工业开关电源 $45^\circ \sim 60^\circ$ 环路稳定标准,增益裕度持续高于11dB,无增益超限风险。模态切换瞬时电流超调量由0.27A降至0.088A,降幅67.4%,瞬态恢复时间从12.7ms缩短至4.1ms,全程无低频电流振荡。

其次开展全温域恒流精度验证,在 $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 区间以 10°C 为梯度设置温度节点,并补充12组非梯度温度节点验算。测试结果显示,电路全区间最大恒流误差仅1.83%,远优于消防规范5%的限值,彻底解决了低温区间电流过冲问题。

鲁棒性分析针对谐波、温度、蓄电池老化三重耦合扰动工况开展测试,叠加18%幅值5次市电谐波、蓄电池500次充放电老化、 55°C 高温同步扰动条件。原始电路输出电流谐波畸变率为9.7%,存在1.2A间歇性电流跳变;优化后谐波畸变率降

至3.1%,电流间歇性跳变问题完全消除。

7 结论

本文围绕高亮度LED消防应急灯具双模态驱动电路稳定性问题,以状态空间平均法、奈奎斯特判据、一维热传导理论为基础完成全流程理论推演,明确三类耦合扰动的失稳传导路径,厘清了模态阻抗阶跃、器件温敏漂移分别对应环路相位失稳、恒流精度退化两类核心故障的内在逻辑。

研究得出三项核心结论,一是双电源模态输入阻抗近30倍差值是相位裕度衰减的根本诱因,固定参数PI补偿无法适配消防灯具动态工况;二是高低温交变环境下采样电阻与LED负载双向温敏耦合,是全温域恒流超差的主要成因,单一硬件参数标定无法覆盖全温度区间;三是无源阻尼相位补偿搭配分段温度前馈校正的协同方案,可同时解决高低频扰动引发的失稳问题,适配建筑配电复杂扰动环境。

现有研究局限于离线参数优化,后续可进一步拓展多源随机扰动下的环路自适应预测模型,结合模型预测控制算法实现毫秒级扰动预判补偿。同时结合消防地下建筑高湿工况,补充湿度对器件漏电流的扰动机理推演,完善极端消防场景下驱动电路稳定性理论体系。

参考文献:

- [1] 陈铁柱,林俊威,刘康卓,等.反激式开关电源电路设计缺陷失效案例分析[J].电子质量,2025,(12):68-74.
- [2] 陈宛艺,林国庆.集成反激式无电解电容LED驱动电源[J].电机与控制学报,2025,29(6):80-89.
- [3] 袁景梅.消防光报警器中光源的选择与应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(2):66-68.
- [4] 贾楠.具有PWM调光功能的四通道高精度LED恒流驱动芯片的研究与设计[D].天津理工大学,2025.
- [5] 李琴鹏.集成电容触摸开关的自适应LED恒流驱动电路研究和设计[D].西南交通大学,2024.