

高可靠性户外 LED 警示灯具的气候适应性设计研究

朱应平

温州商宇科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：户外 LED 警示灯具是交通疏导、公共安全预警、工业现场警示等场景的核心设备，其运行可靠性取决于对复杂气候环境的适应能力。极端温度、强降水等气候因素易使灯具出现光衰加剧、密封失效等问题，影响警示功能。本文针对灯具气候适应性提升需求开展高可靠性设计研究，剖析不同气候环境对灯具核心部件的影响机理，结合多学科理论，提出涵盖结构防护、热管理等的全方位设计方案。通过多维度优化设计，确保灯具在极端气候下长期稳定运行，光衰和防护性能达标。研究成果完善了灯具气候适应性设计理论体系，为提升户外警示设备可靠性与寿命提供技术支撑，有重要工程应用价值与社会安全意义。

【关键词】：户外 LED 警示灯具；气候适应性；可靠性设计；密封防护；热管理；材料选型

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.071

1 引言

1.1 研究背景与意义

随着城市化和公共安全需求提升，户外 LED 警示灯具应用场景拓展至复杂环境。这类灯具长期暴露，受多种气候因素影响，气候环境制约其运行稳定性与寿命，是可靠性核心瓶颈。

当前灯具普遍气候适应性不足，高温使芯片和电源性能衰减，低温影响启动运行，高湿度和降水引发短路，强紫外线加速老化，沙尘造成污染和堵塞，增加维护成本，甚至引发事故。

开展高可靠性户外 LED 警示灯具气候适应性设计研究，理论上可揭示作用机理、建立理论框架、完善理论体系；实践上可提升适应能力、延长寿命、降低成本、保障警示功能，为安全提供保障。

1.2 研究现状综述

国内外学者围绕户外 LED 灯具可靠性与气候适应性开展大量研究。热管理设计聚焦散热结构优化和热传导效率提升，采用多种散热技术，部分通过数值仿真优化；密封防护多采用橡胶密封圈等方式，部分引入新型材料；材料选型聚焦外壳和光学材料耐候性优化，选用耐腐蚀和耐紫外线材料，部分进行表面改性；电气防护采用防水驱动电源等提升稳定性。

然而，现有研究存在不足：气候适应性设计缺乏系统性，未考虑多种气候因素耦合作用；热管理设计与气候环境匹配度不足；密封结构长期可靠性不足；缺乏综合验证方法。本文针对这些空白开展研究，提升设计科学性与全面性。

2 户外气候环境特征与灯具失效机理分析

2.1 典型户外气候环境特征分类

户外气候环境复杂，按影响灯具性能核心因素分四类：极端温度、降水与高湿度、强紫外线辐射、沙尘环境。极端温度含高温（热带、亚热带及夏季内陆地区，可达 40℃ 以上，部分沙漠超 60℃）和低温（寒带、温带冬季及高海拔地区，低至 -40℃ 以下，部分极寒地区低于 -50℃）。降水与高湿度环境含强降雨、暴雨等，相对湿度超 85%，部分沿海盐雾腐蚀灯具。

强紫外线辐射常见于高海拔、热带及沙漠地区，加速材料老化。沙尘环境多见于沙漠边缘等，磨损灯具表面、堵塞散热通道。

2.2 气候因素对灯具核心部件的影响机理

极端温度显著影响灯具核心部件。高温下 LED 芯片光效下降、寿命缩短，驱动电源元件易故障，外壳材料密封性能下降；低温时 LED 芯片发光与启动受影响，储能部件容量降，密封材料脆化，金属件易有裂纹。降水与高湿度环境通过多种途径影响灯具，雨水渗入、结露、盐雾腐蚀都会造成问题。强紫外线辐射加速灯具材料老化失效，如透光罩透光率降等。沙尘对灯具主要是磨损与堵塞，影响透光与散热。

2.3 户外 LED 警示灯具的核心失效形式

基于气候影响机理，户外 LED 警示灯具核心失效分四类：光衰（LED 发光强度与色温变化，由极端温度与紫外线辐射引起）、密封（灯具进水、结露，因温度与降水影响）、结构腐蚀（金属部件锈蚀，由盐雾与高湿度引起）、电气故障（驱动电源等损坏，由高温、进水等引起）。各类失效相互关联，气候适应性设计需综合考虑耦合关系优化。

3 气候适应性设计的核心理论与设计原则

3.1 核心设计理论基础

户外 LED 警示灯具的气候适应性设计以热传导与热辐射理论、密封防理论、材料耐候性理论、电气防护理论为核心。热传导与热辐射理论为热管理设计提供支撑，通过分析热量在灯具内部的传导路径与辐射散热规律，优化散热结构设计，确保 LED 芯片结温控制在允许范围；密封防护理论指导密封结构设计，通过分析密封材料的压缩变形规律与密封间隙的变化特性，提升密封可靠性，防止水、沙尘等侵入。

材料耐候性理论为材料选型与改性提供依据，通过研究材料在极端温度、紫外线辐射、腐蚀环境下的老化规律，选择耐候性优异的材料或采用合适的改性工艺，延长材料使用寿命；电气防护理论指导电气系统设计，通过分析电气元件在复杂气候环境下的失效机理，采用合理的防护措施，提升电气系统的

稳定性与抗干扰能力。

3.2 气候适应性设计原则

户外 LED 警示灯具的气候适应性设计遵循“环境适配、系统协同、可靠性优先、经济实用”的核心原则。环境适配原则要求设计充分结合灯具的应用地域气候特征，针对不同的气候环境进行差异化设计，确保设计方案与实际气候条件精准匹配；系统协同原则要求统筹考虑灯具各部件的设计，实现热管理、密封防护、结构设计、电气防护的协同优化，避免单一部件优化而整体性能不足的情况。

可靠性优先原则要求在设计过程中优先保障灯具的长期运行可靠性，选用耐候性优异的材料与成熟可靠的技术，确保灯具在极端气候条件下仍能正常发挥警示功能；经济实用原则要求在满足可靠性需求的前提下，合理选择材料与工艺，控制设计与制造成本，提升产品的市场竞争力。同时，设计需兼顾安装便捷性与维护可行性，降低后期运维成本。

4 高可靠性户外 LED 警示灯具气候适应性优化设计

4.1 热管理系统气候适应性优化设计

热管理系统优化旨在实现不同温度环境下高效散热与温度控制，避免极端温度影响 LED 芯片与驱动电源。采用“主动散热 + 被动散热”复合结构，以被动散热为基础，主动散热依温度变化自适应启动，提升效率并降低能耗。

被动散热结构优化：采用一体化鳍片式散热外壳，贴合 LED 铝基板与外壳，减少热阻；鳍片尺寸与布局依地域温度设计，高温区用高密度长鳍片，低温区减小尺寸并涂保温涂层；填充导热硅胶垫，提升热传导效率。

主动散热结构优化：引入温度自适应微型风扇，结温超阈值启动，低于阈值停止；驱动电源模块设独立散热腔并涂导热膏，与发光模块散热结构隔离；优化空气流通通道，避免热积累。

4.2 密封防护系统优化设计

密封防护系统优化目标是实现防水、防尘、防盐雾，采用“多重密封 + 结构防护”方案。

多重密封结构设计：灯具外壳与透光罩连接处用双重硅橡胶密封圈，第一重防水防尘，第二重增强密封与缓冲；出线口用防水接头与灌封胶双重密封；驱动电源模块外壳连接处焊接与密封圈结合。

结构防护设计：灯具外壳流线型，避免积水沙尘堆积；透光罩设防雨檐；散热鳍片间隙设可拆卸防尘网；盐雾环境下，外壳用氟碳涂层，金属密封部件电镀镍；灯具内设置排水孔与吸湿剂。

4.3 材料选型与表面改性优化

材料选型选耐候性材料，表面改性提升耐候与抗老化能力。外壳选 6061 铝合金，阳极氧化处理，膜厚 15 μm 以上；透光罩选耐紫外线 PC 材料，表面抗划伤处理；密封材料选氟硅橡胶；驱动电源电子元件选工业级耐温元件，电容用固态电容。提升高温稳定性与使用寿命，针对极端低温选低温性能优的电池储能部件，保障应急警示功能。通过合理材料选型与表面改性，提升灯具气候适应性。

4.4 电气系统气候适应性优化设计

优化目标是提升抗干扰、抗浪涌、过温过流保护能力，确保复杂气候下稳定运行。采用“硬件防护+软件控制”方案提升可靠性。

硬件防护设计：在驱动电源输入端设浪涌保护器，用金属氧化物压敏电阻与气体放电管组合电路吸收雷电浪涌与电网操作过电压；设过温、过流保护装置，过热或电流过大时切断电路；在 LED 发光模块设均流电路，保证电流均匀。

软件控制优化：引入智能温度控制算法，监测温度调整 LED 工作电流；设故障自诊断功能，故障时切换应急模式并记录信息；优化驱动电源拓扑结构，提升转换效率。

4.5 结构强度与抗风载优化设计

针对户外强风、沙尘冲击，优化结构强度，提升抗风载与抗冲击能力。用有限元分析校核外壳与安装结构强度，优化形态与尺寸。

外壳结构优化：采用一体化成型工艺，减少连接部位；薄弱处设加强筋；优化壁厚分布，平衡强度与轻量化。

安装结构优化：用不锈钢安装支架，优化结构形态，采用三角支撑；用高强度螺栓与防松垫圈，防松动。

针对沙尘冲击，迎风面加厚透光罩，边角用圆角设计。通过结构强度优化，确保恶劣气候下灯具结构完整与运行稳定。

5 气候适应性设计的理论验证与优化方向

5.1 理论验证方案设计

为验证气候适应性优化设计有效性，设计涵盖多气候因素的理论验证方案，通过数值仿真与模拟实验结合评估灯具气候适应性能。验证指标包括 LED 芯片结温控制、密封防护等级、材料老化速率等。

极端温度环境验证，通过热仿真和高低温循环模拟实验评估热管理与密封电气性能；降水与高湿度环境验证，通过防水防尘测试和盐雾腐蚀实验评估密封防护与抗腐蚀性能；强紫外线辐射验证，通过紫外线加速老化实验评估材料耐紫外线性能；沙尘环境验证，通过沙尘冲击与堵塞模拟实验评估抗冲击与防堵塞能力；结构强度验证，通过风载仿真与冲击测试评估抗风载与抗冲击能力；电气系统验证，通过浪涌和过温过流测

试评估电气防护可靠性。

5.2 核心理论验证结果

热管理系统验证显示,高温 60℃时 LED 芯片结温可控,低温 -50℃时灯具正常启动;密封防护验证表明,防水防尘等级达 IP67,盐雾实验后性能良好;紫外线加速老化实验显示,PC 透光罩透光率下降率低,外壳无明显老化;沙尘环境验证表明,灯具透光罩无破损,散热效率下降率低;结构强度验证表明,灯具能承受强风载与沙尘冲击;电气系统验证表明,浪涌防护和过温过流保护可靠,故障自诊断功能有效。

5.3 验证结果分析与优化方向

理论验证表明,设计方案能提升灯具适应能力,各项指标达设计目标,但仍有优化空间:极端高温与强紫外线耦合环境下,LED 芯片光衰加快;长期沙尘环境下,散热通道防尘网积尘影响散热;低温环境下,电池储能容量下降;智能温度控制算法响应慢。

针对问题提出优化方向:一是优化热管理散热结构,采用新型散热技术,透光罩用抗紫外线涂层;二是研发自清洁防尘结构,采用仿生设计结合风力自清洁;三是选用低温性能好的储能材料或用电池加热保温技术;四是优化智能控制算法,采用模糊与 PID 控制结合算法。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕高可靠性户外 LED 警示灯具的气候适应性设计开展研究,得出结论:户外 LED 警示灯具受极端温度、降水、高湿度、强紫外线辐射、沙尘等气候因素综合影响,核心

失效形式有光衰、密封、结构腐蚀、电气故障失效,且相互耦合影响运行可靠性。

提出的全方位气候适应性优化设计方案,涵盖热管理、密封防护、材料选型、电气防护、结构强度,能提升灯具对复杂气候的适应能力。复合散热结构实现高效散热与控温,双重密封与防护提升防水防尘防盐雾性能,耐候性材料选型与改性减少老化,电气防护与智能控制提升稳定性,结构强度优化增强抗风载与抗冲击能力。

理论验证显示,优化后灯具在恶劣气候下,LED 芯片结温合理,密封防护达 IP67,材料老化慢,电气系统稳定,结构强度达标,各项性能达设计目标。研究成果完善了理论体系,为提升设备可靠性与寿命提供技术支撑。

6.2 未来展望

未来研究可在以下方向深化:智能自适应设计上,引入物联网与传感器融合技术,监测气候参数,实现动态自适应调整;研究数字孪生虚拟仿真技术,构建模型精准优化设计。

材料创新方面,探索新型耐候性材料应用,研究自修复技术提升长期可靠性。节能优化上,结合新能源技术开发供电灯具,优化驱动技术提升效率、降低能耗。

功能拓展方面,增加健康状态监测功能,开发多场景自适应警示模式提升效果。标准化与产业化方面,推动设计标准化研究,制定标准与规范;加强产学研合作,优化工艺、降低成本,推动成果转化;开展实地验证,持续优化设计提升竞争力。

通过多维度创新与推广,提升灯具气候适应性与可靠性,为多领域提供优质设备,推动行业技术升级发展。

参考文献:

- [1] 周必成,洪梅娟,何伟鹏,等. LED 户外灯具光通维持率现状探讨[J]. 中国照明电器,2025(2):38-42,53.
- [2] 胡喆. 浅谈工业设计及机械设计制造技术在户外灯具制造中的应用[J]. 中国设备工程,2020(12):170-171.
- [3] 黄彤光. 户外 LED 灯具结构防水和材料防水的技术分析[J]. 中国照明电器,2015(1):26-28.
- [4] 田甜,李廷瑀,封鹏,等. 高耐候性面板显示主动发光交通标志的 LED 光源板涂胶工艺研究[J]. 中国照明电器,2020(11):7-13.
- [5] 熊雄.公路交通标志标识优化设置研究[J].工程与建设.2022,36(2).