

# LED 面板灯一体化密封边框结构优化与光效分析

蔡胜超

嘉兴品惠照明电器有限公司 浙江嘉兴 314000

**【摘要】**针对传统分体式LED面板灯的装配公差、密封失效及高热阻瓶颈,本文探讨一体化密封边框的协同优化机制。基于几何光学与辐射传热学,分析一体化结构对光子传输与热流分布的约束,揭示“结构—热—光”多物理场耦合机理。通过构建侧壁微结构、优化自然对流通道及调控异质材料连接,建立协同模型。研究论证了密封界面漏光抑制与热膨胀失配下的应力释放策略,阐明微观形貌调控对提升光提取效率与环境可靠性的关键作用。旨在构建定性理论体系,为高光效、高可靠性面板灯的理性设计提供坚实支撑。

**【关键词】**LED面板灯;一体化密封边框;结构优化;光效分析;几何光学;热管理;多物理场耦合

Optimization and Light Efficiency Analysis of the Integrated Sealed Frame Structure for LED Panel Lights

Cai Shengchao

Jiaying Pinhui Lighting Electrical Co., Ltd. Jiaying, Zhejiang 314000

**【Abstract】**Addressing the assembly tolerances, sealing failures, and high thermal resistance challenges of traditional split-type LED panel lights, this study investigates the synergistic optimization mechanism of an integrated sealed frame. Based on geometric optics and radiation heat transfer theory, the research analyzes how the integrated structure constrains photon transmission and thermal flow distribution, revealing the "structure-heat-light" multi-physics coupling mechanism. By designing side wall microstructures, optimizing natural convection channels, and controlling heterogeneous material interfaces, a synergistic model is established. The study demonstrates strategies for suppressing light leakage at sealing interfaces and managing stress release under thermal expansion mismatch, highlighting the critical role of microstructural morphology control in enhancing light extraction efficiency and environmental reliability. The findings aim to establish a qualitative theoretical framework that provides robust support for rational design of high-efficiency, high-reliability panel lights.

**【Key words】**LED panel light; integrated sealed frame; structural optimization; luminous efficacy analysis; geometric optics; thermal management; multiphysics field coupling

## 1. 引言

LED照明已全面取代传统光源,其中面板灯因出光均匀柔和,广泛应用于办公、商业及医疗领域。然而,复杂环境要求灯具结构从单纯机械承载转变为集光场调控、热管理及环境隔离于一体的关键组件。

传统分体式结构弊端显著:累积公差导致光学腔体偏差,降低出光均匀性;拼接缝隙易致水汽灰尘侵入,引发密封失效;多接触界面热阻大,阻碍散热并形成“热—光”恶性循环;为保强度增加的壁厚则推高成本并损失出光面积。

针对上述瓶颈,一体化密封边框结构应运而生。该结构将边框、散热器及部分光学部件整合为单一连续体,消除了装配界面,根除漏光渗水风险,可实现IP65及以上防护等级,显著降低系统热阻,并赋予光学设计更大自由度以提升光效。

然而,一体化设计涉及光、热、力多物理场耦合的复杂优化难题,现有研究缺乏对协同机制的系统阐释。因此,本

文旨在通过理论分析与逻辑推演,深入探讨光传输路径重构、密封界面力学行为及热—光耦合模型等核心机理,构建“结构—热—光”协同设计理论范式,为开发下一代高效、可靠、长寿命的LED面板灯提供科学依据,推动产业向高品质方向发展。

## 2. 一体化边框的光学重构与光子传输机制

### 2.1 侧壁全反射边界条件的建立与杂散光抑制

在传统分体结构中,边框内壁常因粗糙或未做处理而成为光损失源头,导致漫反射或光能吸收。一体化密封边框通过高反射率材料或镀膜工艺,将侧壁重构为理想光学反射边界。基于几何光学,当光线入射至光滑侧壁时发生镜面反射;若优化侧壁倾角并构建光密至光疏介质界面,更可触发全反射(TIR),实现光子无损耗反弹。一体化设计允许在侧壁集成微棱镜阵列或曲面轮廓,精确控制反射矢量,将原本逃逸的大角度光子强制偏转至法线方向,使其穿过扩散板。这种机制将边框从“光黑洞”转变为“光

增益区”，显著扩大有效发光面积。此外，一体化无缝结构消除了装配缝隙引起的无序反射与衍射，确保光路确定性。通过优化几何参数构建“光陷阱”，可使非轴向光线经有限次反射后被有效利用或吸收于非可视区，从源头净化光场，提升均匀度并抑制眩光。

### 2.2 扩散板与边框配合界面的光场匀化效应

出光均匀性是面板灯的核心指标，而扩散板与边框的配合方式至关重要。传统结构的接触间隙易导致边缘亮环或暗带等“边缘效应”。一体化成型实现了安装槽位的微米级精度，消除了宏观几何误差引起的光场畸变。从辐射传输理论看，紧密贴合使边框内侧成为扩散板边缘的延伸反射镜，将原本泄漏的光子反射回边缘区域，补偿了因遮挡或光程差导致的亮度衰减。通过优化接触面倒角，可引导光线在界面处发生特定折射或反射，平滑边缘亮度过渡。同时，一体化设计结合光学硅胶填充或真空贴合，消除了空气层，构建了连续介质光路，显著降低菲涅尔反射损失。逻辑上，一体化边框已超越机械支撑功能，成为参与光场整形与匀化的关键光学组件，是实现高光效与高均匀度的核心要素。

## 3. 密封界面的力学行为与环境防护机理

### 3.1 异质材料连接处的热应力演化与密封稳定性

LED 面板灯由铝合金、PC、PMMA 及硅胶等异质材料复合而成，各材料热膨胀系数（CTE）差异显著。工作时热源导致部件升温，CTE 不匹配诱发界面热应力。传统分体结构依赖紧固件松动或橡胶变形释放应力，长期循环易致预紧力丧失而渗漏。一体化结构虽使应力分布复杂化，但为可控管理提供可能。基于弹性与断裂力学，通过拓扑优化设计柔性过渡区或应力释放槽，利用几何非线性吸收热变形能，避免应力峰值超越材料极限。合理的截面设计（如工字型、带加强筋）可提高惯性矩，增强抗弯能力，减小热膨胀相对位移。此外，一体化消除了螺栓连接的局部应力集中，使热应力沿周长均匀分布。在微观接触层面，精密模具控制的过盈配合或共注塑工艺确保了界面持续均匀的接触压力。只要结构设计保证变形协调性，即便在宽温域循环下，接触压力仍能维持在安全阈值以上，构建出自适应的热应力平衡系统，确保长期密封稳定性。

### 3.2 毛细阻滞效应与湿气扩散动力学模型

微观湿气渗透是影响寿命的关键因素。水汽分子可通过高分子自由体积孔隙扩散，单纯增加密封厚度效果有限。一体化结构引入迷宫式密封路径与毛细阻滞效应，从物理机制阻断扩散。依据 Fick 定律，扩散速率与路径长度成反比。一体化设计在结合界面构建曲折微通道（迷宫密封），极大增加有效扩散距离，降低浓度梯度，延缓水汽侵入时间。若在界面引入疏水纳米涂层或微结构，利用表面张力产生的毛细阻力，可进一步阻止液态水侵入。逻辑上，一体化消除了拼装缝隙，将渗透路径限制于材料本体，通过选用低透水性

基材从源头切断湿源。针对冷凝水问题，传统结构易存积水死角，而一体化边框可集成集水槽与单向呼吸阀，利用重力与气压差定向排出凝结水并防倒灌。这种主被动结合的防护策略依赖精确流道控制，使一体化边框成为动态环境调节系统，实现对水汽渗透与凝结的全方位防御。

### 3.3 结构完整性对防护等级的跃升机制

传统分体结构的防护等级受限于装配公差与密封圈老化，难以稳定维持高 IP 等级。一体化密封边框通过消除物理拼接缝隙，从根本上杜绝了因配合间隙导致的宏观泄漏通道。逻辑推演表明，结构完整性的提升直接转化为防护性能的质变：连续的材料介质使得外部尘埃与液态水无法通过机械缝隙侵入，仅需应对材料本体的微观渗透。结合前述的应力自适应设计与迷宫密封策略，一体化结构能够轻松实现 IP65 甚至更高防护等级。理论分析显示，在无外部机械连接点的情况下，系统的失效模式由“界面失效”转变为“材料失效”，而高性能工程材料的耐候性远优于橡胶密封件。因此，一体化设计不仅提升了初始防护能力，更通过消除老化敏感节点，显著延长了高防护性能的生命周期，为灯具在潮湿、多尘等恶劣环境下的可靠运行提供了坚实的物理基础。

## 4. 热管理系统的结构集成与散热效能优化

### 4.1 连续导热路径构建与界面热阻消除

LED 光电转换伴随大量热耗散，若不及时排出将导致结温升高，引发光效下降（热猝灭）、色漂移及寿命缩短。传统分体结构中，热量经“基板-散热器-边框”传递，多层固体接触界面产生显著接触热阻，严重阻碍热流。一体化密封边框通过将散热鳍片与外框设计为单一连续体，彻底消除了中间接触界面，构建了从热源到环境的无间断连续导热路径。从传热学看，热阻包含导热、接触及对流传热三部分，其中接触热阻受表面粗糙度与紧固力影响极大且不稳定。一体化设计使热量在均质材料内部直接传导，仅受材料导热系数限制。选用高导热铝合金或复合材料成型，可最大化纵向导热效率，迅速将热量横向扩散至整个边框表面，增大有效散热面积并降低热点温度。此外，一体化边框较大的质量赋予其高热容，可作为热缓冲池吸收启动瞬间或功率波动的脉冲热量，平抑温度波动。这不仅提升了稳态散热能力，更增强了系统应对动态热负荷的鲁棒性，为芯片提供低温稳定环境，间接提升光效与寿命。

### 4.2 自然对流通道的气动优化与烟囱效应强化

对于无风扇面板灯，自然对流是主要散热方式，效率取决于换热面积与气流状况。传统结构受限于组装工艺，鳍片简单稀疏，难以形成高效气流。一体化设计允许对散热通道进行精细化气动优化。基于流体动力学，自然对流源于冷热空气密度差。一体化结构可构建垂直贯通通道，减少局部阻力与涡流。通过优化鳍片间距避免边界层重叠，设计流线型

进出口减少入口损失,可最大化空气质量流量,显著增强“烟窗效应”。利用计算流体动力学(CFD)原理,还可在边框内部设计导流叶片或湍流发生器,破坏层流边界层以增强扰动,提高对流换热系数。此外,结合安装倾斜角或墙面效应设计非对称通道,可引导气流沿最佳路径流动。这种精细化的几何设计使得被动散热效率大幅提升,确保系统在静音状态下维持高效热交换。

#### 4.3 辐射散热协同与表面物性调控

除对流外,高温边框表面还通过热辐射散热。一体化设计赋予了表面物性调控的更大自由度,允许对边框外表面进行阳极氧化或喷涂高发射率涂层处理,在不改变几何结构的前提下显著提升辐射散热比例。理论模型显示,在自然对流受限的狭窄空间内,辐射散热占比可高达30%以上。一体化结构实现了自然对流与热辐射的双重强化:几何形状的优化最大化了对流换热,而表面高发射率处理则增强了辐射换热。这种“结构-物性”协同机制构建了高效、静音的被动散热系统,有效降低了系统总热阻,确保了LED面板灯在全寿命周期内的光效稳定性与环境可靠性,从根本上解决了高光效灯具的热管理瓶颈。

### 5. 多物理场耦合下的结构拓扑优化策略

#### 5.1 光-热-力耦合机制的理论建模与权衡分析

一体化边框设计是典型的多物理场耦合难题。高光效要求内侧高反射且结构紧凑,往往限制散热面积扩展;散热优化需巨大表面积与开放风道,却可能增加漏光风险或削弱刚度;力学强度需求则倾向增加壁厚,进而阻碍光线透出与热量传导。单一目标优化易导致其他性能恶化,必须建立光-热-力耦合综合评价模型以寻求全局最优。系统科学视角下,各物理场存在复杂反馈:温度升高改变材料折射率及引发热膨胀,进而扰动光路与密封压力;光照不均诱发的局部温差则导致热应力集中。理论建模需联立麦克斯韦方程组、傅里叶定律与Navier-Stokes方程、胡克定律与平衡方程。通过灵敏度分析识别关键设计变量,并确定其最优区间。在多目标优化中,利用遗传算法等搜索Pareto前沿,获取一系列非劣解集合,使设计师能依据具体场景优先级筛选最佳方案,从理论层面避免盲目试错,实现性能的系统性权衡。

#### 参考文献

- [1]赵田. LED面板灯光斑均匀度研究[J]. 工程建设与设计,2025(10):37-39.
- [2]张仕辉. LED路灯防水密封优化设计研究[J]. 中国照明电器,2023(4):13-15.
- [3]刘共升,胡兴,张文华. 基于室内大功率LED灯具的散热装置设计与优化[J]. 中国照明电器,2024(8):104-107.
- [4]刘维茜,白建波,李茹,等. 基于响应面分析法的LED导热塑料散热器的结构设计及优化[J]. 照明工程学报,2020,31(5):75-81,106.

#### 5.2 基于增材制造的复杂微结构实现路径

传统挤压、压铸工艺受限于几何复杂度,难以实现理论最优拓扑。增材制造(3D打印)技术的突破,特别是金属与高性能聚合物打印,为极致优化提供了新路径。该技术允许逐层堆叠,轻松制造内部点阵、梯度孔隙及仿生微纳表面等传统工艺无法实现的结构。在边框内部构建高比表面积晶格结构,可同时实现轻量化、高强度与高效散热;在内侧直接打印微棱镜或自由曲面,则能达成像素级光场调控。这种“设计即制造”模式消除了模具束缚,使基于多物理场耦合生成的复杂拓扑完美落地。未来一体化边框将演变为集光波导、热超材料及力学桁架于一体的功能梯度材料体。结合材料基因工程,利用高通量计算与机器学习筛选兼具高导热、高反射、低膨胀及高强度的新型配方,并通过增材制造实现成分空间梯度分布。这种材料与结构的协同设计,将打破物理极限,真正达成光、热、力性能的完美统一,推动照明器具设计迈向智能化与集成化的新高度。

### 6. 结论

本文系统构建了LED面板灯一体化密封边框从光学重构、环境防护、热管理到多物理场耦合优化的完整理论逻辑。研究表明,该结构是突破传统分体式灯具性能瓶颈、实现高光效与高可靠性统一的关键路径。

光学上,一体化设计通过建立全反射边界与消除装配间隙,有效回收杂散光并匀化边缘光场,显著提升光提取效率与均匀性。防护上,揭示了其通过协调异质材料热应力演化及利用毛细阻滞效应,在宽温域下维持密封稳定性并阻断湿气渗透的内在机理。热管理上,论证了连续导热路径与自然对流强化模型在消除界面热阻、优化气流通道中的核心作用,为芯片提供了低温稳定环境。

针对光-热-力耦合的复杂机制,本文提出了基于拓扑优化与增材制造的协同策略,强调只有权衡多方指标并利用先进制造实现复杂微结构,方能释放一体化设计的最大潜力。综上所述,一体化边框是集光、热、力及材料科学于一体的系统工程。本文构建的理论框架为理解其性能提升机制提供了清晰视角,奠定了开发下一代智能、高效、长寿命照明产品的坚实基础,推动产业向绿色可持续方向迈进。