

Research and Optimal Design of the Structure of LED Luminaire Radiators

Ping Liu

Guangdong Branch of Meizhi Optoelectronic Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528311, China

Abstract

LED luminaires are increasingly widely used in the field of lighting, but their heat dissipation issues directly affect the luminous efficiency, lifespan, and reliability of the luminaires. This paper focuses on the structural research and optimal design of LED luminaire heat sinks, deeply analyzing the characteristics and deficiencies of existing heat sink structures. Combining thermal principles such as heat conduction, convection, and radiation, it explores the influence mechanisms of materials, structural parameters, operating conditions, and other factors on heat dissipation performance. Furthermore, it proposes systematic optimization design strategies from dimensions such as multi-objective optimization, bionic manufacturing, material composites, and intelligent control. Through case analysis to verify the effectiveness of optimization methods, and looking forward to future research directions, this paper aims to provide technical support for the high-performance and miniaturization development of LED lighting products, and promote high-quality progress in the LED lighting industry.

Keywords

LED lighting fixtures; heat sinks; structural research; optimization design; thermal management

LED 灯具散热器的结构研究与优化设计

刘平

美智光电科技股份有限公司广东分公司, 中国·广东 佛山 528311

摘要

LED 灯具在照明领域的应用愈发广泛,但其散热问题直接影响灯具的光效、寿命与可靠性。本文聚焦 LED 灯具散热器的结构研究与优化设计,深入分析现有散热器结构的特点与不足,结合热传导、对流、辐射等热学原理,探究材料、结构参数、工况等因素对散热性能的影响机制,进而从多目标优化、仿生制造、材料复合、智能控制等维度提出系统的优化设计策略。通过案例分析验证优化方法的有效性,并对未来研究方向进行展望,旨在为 LED 照明产品的高性能化、小型化发展提供技术支撑,推动 LED 照明行业的高质量进步。

关键词

LED 灯具; 散热器; 结构研究; 优化设计; 热管理

1 引言

随着全球能源危机与环保意识的提升,半导体照明技术凭借其节能、环保、寿命长等优势,在室内外照明、景观照明、汽车照明等领域实现了大规模应用。据统计,2024 年全球 LED 照明市场规模已突破千亿美元,年复合增长率保持在 8% 以上。然而,LED 芯片的电光转换效率仍存在局限,通常仅有 20%-30% 的电能转化为光能,其余大部分以热能形式释放。研究表明,LED 芯片结温每升高 10°C,其光衰速度将加快一倍,寿命缩短约 50%。因此,散热器作为 LED 灯具热管理系统的核心部件,其结构设计的合理

性与优化程度直接决定了 LED 灯具的光效、寿命与可靠性,是制约 LED 照明技术进一步发展的关键因素之一^[1]。

近年来,国内外学术界与产业界针对 LED 灯具散热器的结构开展了大量研究。在结构形式上,从传统的翅片式、热管式散热器,发展出相变散热器、微通道散热器、仿生结构散热器等新型结构;在材料应用上,从铝合金、铜等金属材料,拓展到石墨烯、碳纳米管等新型复合材料。但现有散热器仍面临诸多挑战:其一,部分高性能散热器(如微通道散热器)加工工艺复杂、成本高昂,难以实现规模化应用;其二,散热器的结构设计与 LED 灯具的整体集成度不足,导致系统级热管理效率低下;其三,针对复杂工况(如高温、高湿度、强振动等)的适应性设计仍显欠缺。鉴于此,深入开展 LED 灯具散热器的结构研究与优化设计,具有重要的理论意义与工程应用价值^[2]。

【作者简介】刘平(1981-),男,中国江西南昌人,本科,工程师,从事灯具照明研究。

2 LED 灯具散热器的热学基础与结构类型

2.1 热学基础

LED 灯具的散热过程主要涉及热传导、热对流和热辐射三种热传递方式。热传导是热量在固体内部的传递，其效率主要取决于材料的热导率；热对流是热量通过流体（空气或液体）的流动进行传递，与流体的流速、流态及散热器的表面结构密切相关；热辐射则是通过电磁波的形式传递热量，与散热器的表面 emissivity（发射率）等因素有关^[3]。

在 LED 灯具中，芯片产生的热量首先通过热传导传递到散热器的基板，再由基板通过热传导、热对流（若为风冷）或热传导结合相变（若为相变散热）等方式传递到外界环境。因此，散热器的结构设计需综合考虑这三种热传递方式的协同作用，以实现高效散热。

2.2 常见结构类型

2.2.1 翅片式散热器

翅片式散热器是应用最为广泛的传统结构形式，其通过在基板上设置大量翅片来增加散热面积，利用空气对流实现热量散发。翅片的形状（如直翅、斜翅、针翅等）、间距、高度等参数对散热性能影响显著。例如，针翅式散热器相较于直翅式，具有更大的比表面积，在小空间内可实现更高效的散热，但加工难度也相对较高。

2.2.2 相变散热器

相变散热器利用相变材料（PCM）在相变过程中吸收大量潜热的特性来实现散热。当 LED 芯片温度升高时，PCM 吸收热量发生相变（如固态变液态），将热量储存起来；当温度降低时，PCM 释放热量发生逆向相变。这种结构的优势在于能有效控制 LED 芯片的温度波动，但其缺点是 PCM 的导热系数较低，往往需要与高导热材料配合使用，且 PCM 存在相变循环次数限制，长期可靠性有待提升。

2.2.3 微通道散热器

微通道散热器是近年来兴起的一种高效散热结构，其在基板内加工出大量尺寸微小的通道（通常通道尺寸在数百微米级别），冷却液（如水、乙二醇溶液等）在通道内高速流动，通过强制对流实现高效换热。这种结构的散热效率极高，适用于高功率 LED 灯具的散热需求，但微通道的加工工艺复杂，成本较高，且存在冷却液泄漏的风险。

2.2.4 仿生结构散热器

受自然界中生物散热结构的启发，如昆虫的翅脉结构、植物的叶脉结构等，研究者们设计出了仿生结构散热器。这类散热器通过模拟生物结构的高效热传递路径，在保证散热性能的同时，可实现结构的轻量化与小型化。例如，模仿蝴蝶翅膀脉络的散热器结构，在相同体积下，其散热面积与热传递效率均有明显提升。

3 LED 灯具散热器结构的影响因素分析

3.1 材料因素

散热器的材料热导率是影响热传导效率的关键因素。

常见的散热器材料中，铜的热导率（约 401 W/(m·K)）高于铝合金（约 200 W/(m·K)），因此铜制散热器的热传导性能更优，但铜的密度大、成本高，限制了其在一些对重量和成本敏感的灯具中的应用。近年来，石墨烯复合材料因具有极高的热导率（单层石墨烯热导率可达 5300 W/(m·K)），成为散热器材料研究的热点，将其与铝合金或铜复合，可显著提升散热器的热传导性能。

3.2 结构参数因素

3.2.1 翅片参数（针对翅片式散热器）

翅片高度：在一定范围内，翅片高度增加，散热面积增大，散热性能提升，但过高的翅片会导致空气流动阻力增大，且可能出现翅片间热耦合现象，反而降低散热效率。

翅片间距：间距过小会阻碍空气流动，导致对流换热系数降低；间距过大则散热面积不足。需根据实际工况（如空气流速、热源功率等）优化翅片间距，通常存在一个最优间距值。

翅片厚度：厚度增加可增强翅片的结构强度，但会减小有效散热面积，需在强度与散热面积之间进行权衡。

3.2.2 微通道参数（针对微通道散热器）

通道尺寸：通道尺寸减小，换热面积与单位体积的换热系数增大，但通道内流动阻力也会显著增加，需结合冷却液的流量、泵功率等因素进行优化。

通道形状：不同的通道形状（如圆形、矩形、梯形等）对流动特性与换热效率的影响不同。例如，矩形通道在相同截面积下，具有更大的湿周，有利于增强换热。

3.2.3 相变材料填充结构（针对相变散热器）

PCM 填充率：填充率过高会导致 PCM 在相变时的体积膨胀难以控制，且会增加散热器重量；填充率过低则潜热储存能力不足。需根据 LED 芯片的发热功率与工作时间特性，确定合适的 PCM 填充率。

PCM 封装结构：封装结构需保证 PCM 与高导热材料的充分接触，以弥补 PCM 导热系数低的缺陷。常见的封装结构有蜂窝状、多孔介质填充等，可有效增加 PCM 与导热材料的接触面积。

3.3 工况因素

LED 灯具的工作环境（如环境温度、空气流速、湿度等）与工作模式（如持续工作、间歇工作等）对散热器的散热性能影响较大。在高温、低空气流速的环境下，散热器的散热效率会显著降低，因此在结构设计时需充分考虑灯具的应用场景，如户外灯具需重点考虑自然对流与防风沙设计，而室内灯具则可结合强制风冷进行优化。

4 LED 灯具散热器的优化设计策略

4.1 多目标优化设计方法

采用多目标优化算法（如遗传算法、粒子群算法等），将散热器的散热效率、重量、体积、加工成本等作为优化目标，建立多目标优化模型。以翅片式散热器为例，可将翅片

高度、间距、厚度等作为设计变量,以芯片结温最低、散热器重量最轻为优化目标,通过优化算法求解 Pareto 最优解,为设计者提供多种权衡方案。

4.2 仿生结构与先进制造技术结合

结合 3D 打印等先进制造技术,实现仿生散热器结构的精准制造。3D 打印技术可突破传统加工工艺的限制,制造出复杂的仿生脉络结构,使散热器在轻量化的同时具备高效的热传递路径。例如,利用 3D 打印技术制造模仿植物叶脉的散热器结构,其内部热传导路径与外部空气对流路径相互协同,可大幅提升散热效率。

4.3 材料复合与结构创新

开发高导热复合材料散热器,如在铝合金中添加石墨烯纳米片,通过改善材料的热导率来提升散热性能。同时,对散热器结构进行创新,如采用“基板-微翅片-相变材料”复合结构,结合热传导、对流与相变的优势,实现多机制协同散热。这种结构中,微翅片增强空气对流散热,相变材料吸收峰值热量,基板保证热量的快速传递,三者共同作用可有效控制 LED 芯片的温度。

4.4 数值模拟与实验验证结合

利用计算流体力学(CFD)软件(如 Fluent、ANSYS Icepak 等)对散热器的散热性能进行数值模拟,分析流场、温度场分布,优化结构参数。在数值模拟的基础上,制作样机进行实验验证,测量芯片结温、散热器表面温度等关键参数,对比模拟结果与实验结果,修正优化模型,确保优化设计的准确性与可靠性。

5 案例分析

以某款 300W LED 投光灯的散热器优化设计为例,原散热器采用传统直翅式铝合金结构,翅片高度 20mm,间距 5mm,厚度 2mm,在环境温度 25℃、自然对流工况下,芯片结温为 85℃,超出了 LED 芯片的安全结温范围(通常 $\leq 80^\circ\text{C}$)。

5.1 优化设计过程

材料优化:采用铝-石墨烯复合材料(石墨烯添加量为 5%)替代纯铝合金,材料热导率提升至 $250 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

结构优化:利用遗传算法对翅片参数进行多目标优化,得到最优翅片高度 18mm,间距 4mm,厚度 1.5mm,并在翅片表面添加仿生纹理(模仿蜻蜓翅膀的微结构)以增强空气对流。

数值模拟:通过 Fluent 软件模拟,优化后的散热器在相同工况下,芯片结温降至 78°C ,满足安全要求。

实验验证:制作优化后的散热器样机,进行热性能测试,实验测得芯片结温为 79°C ,与模拟结果误差在 5% 以内,验证了优化设计的有效性^[4]。

5.2 优化效果分析

优化后的散热器相比原结构,在芯片结温降低 7°C 的同

时,重量减少了 12%,实现了散热性能与轻量化的双重提升,且加工成本仅增加了 8%,在可接受范围内。

6 结语

本文系统研究了 LED 灯具散热器的结构类型、影响因素与优化设计策略,得出以下结论:

LED 灯具散热器的散热性能由热传导、对流、辐射三种热传递方式协同决定,其结构设计需综合考虑材料、结构参数与工况的影响。

翅片式、相变、微通道、仿生、热管等散热器结构各有优劣,需根据 LED 灯具的功率、应用场景、成本要求等选择合适的结构形式。

多目标优化、仿生制造、材料复合、智能控制等优化设计策略可显著提升散热器的散热性能、轻量化水平与可靠性。

未来,LED 灯具散热器的研究可向以下方向拓展:

智能自适应散热结构:结合形状记忆合金、压电材料等智能材料,设计可根据温度自动调整散热面积、流道尺寸的自适应散热器。例如,形状记忆合金翅片可在温度升高时自动展开,增加散热面积;温度降低时自动收缩,减少风阻。

多物理场耦合优化:深入研究热、流、固、电多物理场耦合下的散热器性能,建立更精准的多物理场仿真模型,实现散热器与 LED 芯片、驱动电路的系统级优化设计^[5]。

绿色制造与回收:开发可回收、环保的散热器材料与制造工艺,如采用可降解高分子复合材料、免切削的精密铸造工艺等,降低散热器的环境影响。

人工智能驱动的设计:利用机器学习算法(如深度学习、强化学习),基于大量散热器设计案例与性能数据,自动生成最优结构设计方案,提高设计效率与创新性。

随着这些研究方向的不断推进,LED 灯具散热器的结构设计将更加高效、智能、绿色,为 LED 照明行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 张伟,李明,王亮. LED灯具热管理技术研究进展[J]. 照明工程学报, 2023, 34(1): 1-8.
- [2] 陈涛. 基于仿生结构的LED散热器优化设计[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 201-208.
- [3] 王浩. 高功率LED微通道散热器的流动与换热特性研究[D]. 上海交通大学, 2021.
- [4] Smith J, Johnson A. Thermal management of LED lighting systems using phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115342.
- [5] 刘华. 石墨烯复合材料在LED散热器中的应用研究[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(3): 456-462.