

# Research on the Maintainability Design of Modular and Easy-to-Disassemble LED Lamps

Wenhui Le

Guangdong Branch of Meizhi Optoelectronics Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528300, China

## Abstract

With the wide application of LED lighting technology, the maintenance efficiency and cost of lamps have become core issues in the industry. This paper addresses the pain points in the maintenance process of traditional LED lamps, such as cumbersome disassembly and difficult module replacement, by proposing a maintainability solution based on modular design and easy disassembly. Through the division of functional modules, innovative easy-disassembly structures, and the construction of a maintainability evaluation system, it achieves rapid replacement and efficient maintenance of lamp components. Combined with the structural design theory and engineering practice in the field of mechanical and electronic engineering, it verifies the significant advantages of this design in improving maintenance efficiency and reducing operation and maintenance costs, providing theoretical and technical support for the reliability design of LED lamps.

## Keywords

Modularization; Easy disassembly; Maintainability

## 模块化及便捷拆装 LED 灯具可维护性设计研究

乐文辉

美智光电科技股份有限公司广东分公司, 中国·广东 佛山 528300

## 摘要

随着 LED 照明技术的广泛应用, 灯具维护效率与成本成为行业关注的核心问题。本文针对传统 LED 灯具维护过程中拆卸繁琐、模块替换困难等痛点, 提出基于模块化设计与便捷拆装的维护性解决方案。通过功能模块划分、便捷拆装结构创新及可维护性评价体系构建, 实现灯具组件的快速更换与高效维护。结合机械电子工程领域的结构设计理论与工程实践, 验证了该设计在提升维护效率、降低运维成本方面的显著优势, 为 LED 灯具的可靠性设计提供理论与技术支持。

## 关键词

模块化; 便捷拆装; 可维护性

## 1 引言

### 1.1 研究背景与意义

在全球节能减排的大趋势下, LED 照明技术迅速普及, 但市面上多数 LED 灯具将光源、散热、驱动模块高度集成, 导致故障后定位困难, 维修耗力, 整机更换又造成资源浪费。模块化设计通过拆分功能模块, 实现故障模块单独更换, 搭配便捷拆装结构, 可缩短维修时间、简化难度, 既解决传统灯具维护难题, 又符合绿色制造与可持续发展要求, 具有重要现实意义和广阔应用前景<sup>[1]</sup>。

### 1.2 国内外研究现状

在国外, 美国能源部制定“可替换照明模块”标准, 规范模块尺寸、接口等参数, 推动了模块化互换性与兼容性

发展。在国内, 研究者针对 LED 路灯维护难题, 卡扣式、磁吸式等便捷拆装结构, 分别实现快速拆装与防水防尘功能。但现有研究缺乏模块化设计与可维护性的系统性分析, 未建立完善的设计理论和评价指标体系, 机械电子工程领域的结构动力学、公差设计理论可为其提供技术支撑。

### 1.3 研究目标与内容

本研究旨在构建“功能模块化 - 结构快拆化 - 维护高效化”设计框架, 解决 LED 灯具拆卸耗时、模块兼容性差等问题。主要内容包括: 一是基于功能分析的模块化设计, 划分独立模块并标准化接口; 二是针对不同模块设计多种快拆机构, 结合 CAD、CAE 技术优化性能; 三是建立可维护性评价指标体系, 通过实验对比验证设计优势<sup>[2]</sup>。

【作者简介】乐文辉(1995-), 男, 中国江西上饶人, 硕士, 从事机械工程研究。

## 2 LED 灯具模块化设计理论基础

### 2.1 模块化设计原理

#### 2.1.1 功能模块划分

LED 灯具的正常工作依赖于多个功能的协同实现，将其分解为三大核心模块，分别为光源模块、散热模块以及驱动模块。

**光源模块：**以 LED 芯片为核心，集成不同的光学透镜（扩散透镜适配室内照明，聚光透镜用于远距离照明），满足不同的配光需求。**散热模块：**由铝合金散热鳍片和高导热系数的铜 / 铝基板组成，鳍片采用叉指状、波浪状等优化结构增大散热面积，基板紧密贴合 LED 芯片背面传导热量。**驱动模块：**集成电源电路与控制芯片，电源电路实现交直流转换、电压电流调控以满足 LED 芯片的工作要求；控制芯片实现对 LED 灯具的调光、调色、开关控制以及智能联动等功能。

这三大模块并非孤立存在，它们通过标准化接口紧密连接在一起。标准化接口涵盖统一规格的机械接口（如导轨插槽、螺栓间距）和电气接口（如插拔式端子），确保模块兼容性、互换性，降低生产与维护成本，方便灯具升级扩展。

#### 2.1.2 结构设计原则

**接口标准化：**在 LED 灯具的模块化设计中，接口标准化是实现模块快速组装和互换的关键。

**机械接口方面，**导轨插槽设计比较实用和常见，便于模块插拔定位；螺栓间距的标准化也至关重要，确保在使用螺栓连接时保证稳定性和可靠性；**电气接口方面，**选用插拔式端子，无需复杂接线，提升安装维护效率，保障导电可靠性。

**轻量化与强度优化：**随着 LED 灯具应用场景的不断拓展，对其轻量化和强度的要求也日益提高。运用有限元分析（FEA）技术，对散热模块等关键部件优化，如在铝合金基材中设计镂空鳍片，在不影响散热效率的前提下减轻重量，同时优化应力分布，增强抗振、抗冲击能力。

### 2.2 可维护性设计准则

**拆卸便利性：**便捷拆装结构需满足单手操作、无工具拆卸要求，如弹簧卡扣式结构是一种常见且有效的快拆结构，为确保操作的便捷性，通常解锁行程应该控制在  $\leq 10\text{mm}$ ，可以提升狭小空间或高处作业的维护效率。**故障定位明确性：**通过合理的模块化布局，将易损部件设计为独立可更换单元，是提高故障定位准确性和维修效率的重要手段。将不同的部位设置成独立的模块，并在灯具外壳设置专门的指示灯，通过不同的灯光状态快速定位故障，缩短诊断时间。**模块复用性：**采用通用化设计，使同一规格模块适配多种型号灯具，减少备件库存种类，降低库存成本，提高资源利用率。

## 3 快拆机构设计与实现

### 3.1 典型快拆机构原理与结构

#### 3.1.1 弹簧卡扣式便捷拆装

适用于灯罩、透镜组等轻量化模块之间的连接。在光

源模块与灯体连接处对称设置弹簧卡扣，卡扣头部为  $45^\circ$  斜面，当模块插入灯体时斜面受压使弹簧收缩，模块到位后卡扣弹入卡槽锁定；拆卸时，维修人员只要按压卡扣上专门设计的凸台，凸台受力后会带动卡扣克服弹簧的弹力向模块内部移动，使弹簧再次被压缩，卡扣脱离卡槽。这种结构单次拆卸时间  $\leq 5\text{s}$ ，可重复插拔  $\geq 10000$  次，维修效率高，耐久性和可靠性强，能满足灯具长期使用过程中的维修需求。

#### 3.1.2 磁吸式快拆接口

适用于散热模块与灯壳之间的连接。在散热模块与灯壳的对应位置，分别嵌入钕铁硼永磁体，通过钕铁硼永磁体实现快速吸附，并搭配高精度定位销防止偏移，并确保散热模块吸附位置精准，保证紧密贴合提高散热效率。将吸附力控制在  $\geq 20\text{N}/\text{mm}^2$ ，兼顾振动环境下的连接稳定性与维护便捷性。该接口无机械磨损，支持盲插，尤其适配户外路灯等高频维护场景，可快速更换故障驱动模块，减少路灯的故障时间，提高城市照明的可靠性。

#### 3.1.3 滑动锁扣式快拆机构

专利“具有快拆式散热结构的 LED 灯总成的制作方法”提出了一种便捷拆装结构，基于此进行优化创新改进，通过滑动定位块与 U 型插杆之间的配合实现模块的快速固定和拆卸。在弹簧的作用下，U 型插杆卡入限位槽锁定；该机构还设计有拨杆，通过拨动拨杆，可以改变 U 型插杆的位置，使其与限位槽分离或卡入限位槽，从而实现锁扣状态的切换。可同时固定多个模块（比如：散热片与风机组件），操作简便，拆卸效率高，结构可靠，适配复杂工作环境。

### 3.2 快拆机构可靠性设计

**材料选择：**便捷拆装结构在 LED 灯具的日常使用和维修过程中，需要承受频繁的插拔、振动以及不同环境温度的影响。因此，对于卡扣、插杆等关键部件采用 PA66+GF30 高强度工程塑料，添加 30% 玻璃纤维增强强度与刚性，耐温范围  $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ ，适配各类工作环境。

**寿命测试：**为了验证快拆机构的机械疲劳性能，确保其在长期使用过程中的可靠性，需要进行严格的寿命测试。通过往复插拔疲劳试验，要求快拆机构失效周期  $\geq 5000$  次，确保长期使用可靠性，若未达标则优化结构或材料。

**防误操作设计：**在 LED 灯具的维护过程中，防止因模块反装导致的电路短路或结构干涉等问题至关重要。设置唯一导向键槽，仅允许模块正向插入，避免反装导致电路短路或结构干涉，提升维护安全性<sup>[3]</sup>。

## 4 可维护性评价体系构建

### 4.1 评价指标体系

为了全面、客观地评估基于模块化与快拆机构的 LED 灯具的可维护性，本研究建立了一套科学合理的评价指标体系，具体内容如下表所示：

### 4.2 量化评价方法

采用层次分析法（AHP）确定指标权重，构建模糊综

合评价模型。以拆卸效率为例，在实验室环境下，对弹簧卡扣式结构和磁吸式结构进行了详细的测试和评估。弹簧卡扣式结构单模块拆卸时间 3.2s、无工具依赖，评分 90 分；这是因为其拆卸时间短，且无需借助工具，极大地提高了拆卸的便捷性和效率。在实际应用中，磁力吸附力的可调节性虽然能够适应不同的工作环境和需求，但也可能会因为磁力的变化而影响拆卸的速度和稳定性，综合考虑这些因素，给予其 85 分的评分。

一级指标	二级指标	测量方法
拆卸效率	单模块平均拆卸时间	秒表计时，重复测试 10 次取均值
	工具依赖度	无工具 / 单工具 / 多工具分类
维护成本	模块更换成本	备件价格与更换工时折算
	停机时间损失	维护过程中灯具停用时长
模块化程度	模块独立性	单一模块故障是否影响整体运行
	接口标准化率	通用接口占比
可靠性	快拆机构寿命周期	疲劳试验失效次数
	模块互换成功率	不同批次模块适配测试通过率

## 5 实例验证与分析

### 5.1 模块化 LED 灯具设计方案

为了进一步验证基于模块化与便捷安装结构的 LED 灯具可维护性设计的有效性和优越性，本研究以一款 60W 户外 LED 路灯作为具体实例，详细阐述其模块化设计方案。

**光源模块：**采用 COB 封装 LED，发光效率高、光色均匀，搭配定制光学透镜组优化配光，通过弹簧卡扣与灯体连接，实现快速拆装。

**散热模块：**采用铝合金鳍片结构，优化形状与排列提升散热效率，底部设计磁吸接口，嵌入钕铁硼永磁体，与灯壳散热基板快速吸附，且支持盲插。

**驱动模块：**集成恒流电源，通过滑动锁扣固定于灯体侧部，可带电更换，缩短故障停机时间。

### 5.2 维护效率对比实验

为了直观地展示模块化便捷拆装在 LED 灯具维护中的优势，进行了维护效率对比实验。选取传统螺丝固定 LED 路灯与模块化便捷拆装 LED 路灯，对比三项常见维护项目，数据如下：

维护项目	传统结构（螺丝固定）	模块化便捷拆装	效率提升
光源模块更换	120s	8s	93.3%
驱动模块更换	180s	15s	91.7%
散热模块更换	240s	20s	91.7%

实验数据可以清晰地看出，在光源模块更换方面，传统结构整个过程需要 120s；而模块化便捷拆装可在 8s 内完成模块更换，效率提升了 93.3%。在驱动模块更换时，传统结构耗时 180s；模块化便捷拆装更换过程仅需 15s，效

率提升了 91.7%。对于散热模块更换，传统结构需要花费 240s；模块化便捷拆装的更换时间缩短至 20s，效率提升了 91.7%。这些数据充分证明了模块化便捷拆装在提高 LED 灯具维护效率方面具有显著优势。

### 5.3 散热性能与可靠性测试

散热性能和可靠性是 LED 灯具的关键性能指标。

**散热性能：**通过热成像仪检测显示，模块化灯具额定功率下芯片结温为 68℃，而传统结构灯具芯片结温高达 80℃；相比之下，模块化设计的灯具芯片结温降低了 12℃，表明模块化设计散热效率更优。

**可靠性：**便捷拆装结构经 5000 次插拔测试无卡扣断裂、磁吸失效现象，这证明了便捷拆装结构具有良好的机械性能和稳定性，能够满足长期使用的需求<sup>[4]</sup>。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

本研究将 LED 灯具划分为光源、散热、驱动三大模块，通过标准化接口实现模块高效连接与互换，有效提升了灯具的可维护性；同时，创新性设计了弹簧卡扣式、磁吸式、滑动锁扣式等多种便捷安装结构，针对不同模块的特点和使用环境，实现了模块的快速拆卸和安装。实验验证显示，模块化灯具单模块更换时间较传统灯具缩短 90% 以上，维护效率大幅提升。

采用通用化模块设计后，备件种类减少了约 50%，维护成本显著降低，为企业带来了可观的经济效益。

建立的可维护性评价指标体系，从拆卸效率、维护成本、模块化程度以及可靠性四个维度，对 LED 灯具的可维护性进行了全面、客观的量化评价。

### 6.2 未来展望

**智能维护与故障诊断：**在模块中嵌入传感器，结合大数据与人工智能，实现故障自动诊断与预测，推动被动维护向主动维护转变。

**3D 打印技术应用：**利用 3D 打印的灵活性，定制复杂形状快拆部件，降低模具成本，提升快拆机构个性化适配能力。

**极端环境适应性研究：**优化材料选择、结构与表面处理工艺，提升快拆机构在高湿度、强振动等极端环境下的耐久性与稳定性。

### 参考文献

- [1] 具有快拆式散热结构的 LED 灯总成的制作方法 (CN119374056A) [P]. 华皓伟业, 2024.
- [2] 模块化 LED 路灯智慧运维技术研究 [J]. 谢俊彦, 城市照明, 2011 (3):21-22.
- [3] LED 灯具可靠性设计与失效分析 [M]. 机械电子工程专业论文, 2018.
- [4] 道路照明领域 LED 光源模组设计要点 [J]. 陈世雄, 中国照明电器, 2014 (5):12-15.