

基于 ANSYS 的 LED 灯具热分析

南京汉德森科技股份有限公司 饶连江 raolianjiang@163.com

摘要: 大功率高亮度发光二极管 (LED) 以其节能、环保、寿命长等出色性能逐渐渗透到现代照明中, 业界专家预测在 21 世纪上半叶, 以 LED 为代表的新型光源将会逐步发展成为电光源的主流产品。然而, LED 照明仍面临着几大难题: 发光效率、显色指数、结构散热等。高温对 LED 发光质量和使用寿命影响巨大, 从设计上说, 防止过热是最具挑战性的任务之一。因此, 使用计算机辅助分析结合实验的方法来模拟 LED 组件的工作性能变得越来越重要。

关键词: ANSYS、LED、CAE、热分析

Thermal Analysis for LED Lump Based on ANSYS

Abstract: High-power high-brightness light-emitting diode (LED) for its energy-saving, environmental protection, long life and other outstanding performance penetrate gradually into modern lighting. LED experts predict that half of the 21st century LED lighting will be gradually developed as the main products of the power light. However, LED lighting is still facing several big challenges: light-emitting efficiency, color rendering index, structure of thermal and so on. High temperature on the LED light-emitting enormous impact on the quality and service life, from the design that prevent the overheating is the most challenging tasks. Therefore, the use of computer-aided analysis combined with experimental methods to simulate the working performance of LED lump becomes increasingly important.

Key Words: ANSYS、LED、CAE、heat-analysis

一、引言:

大功率高亮度发光二极管 (LED) 是 21 世纪最具发展前景的一种新型冷光源。它的发光机理是靠 PN 结中的电子在能带间跃迁产生光能, 当它在外加电场作用下, 电子与空穴的辐射复合发生电致作用将一部分能量转化为光能, 而无辐射复合产生的晶格震荡将其余的能量转化为热能。由于光谱中不含红外成分, 产生的热量不能靠辐射散发, 故称 LED 为冷光源。

目前 LED 的发光效率只有 10%~25%, 其余的能量转化为热能, 如果 LED 芯片中的热量不能及时散发出去, 会加速器件的老化, 一旦 LED 的温度超过最高临界温度, 往往会造成 LED 永久性失效。据报道, LED 在 30℃ 下工作的寿命比在 70℃ 下工作时长 20 倍[1], 因此散热技术是 LED 灯具设计的关键技术之一。

热交换是通过导热、对流换热和辐射换热三种基本方式进行的, 可分为瞬态热交换和稳态热交换。一般来说, 工程分析中可不考虑辐射换热。对于连续介质, 设某一时刻 τ , 物体内所有各点在直角坐标系中的温度场为 $t=f(x, y, z, \tau)$, 导热的微分方程可表达如下:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \Phi \dots \dots \dots (1)$$

式中 ρ 为密度, 单位 kg/m^3 ; c 为比热容, 单位 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ 为热导率 (导热系数), 单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; Φ 为内热源强度, 单位 W/m^3 。

对于连续介质, 二维对流换热的能量微分方程如下:

$$\rho c_p \left[\frac{\partial t}{\partial \tau} + u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y} + t \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中 c_p 为比定压热容, 对于固体和不可压缩流体, $c_p = c$; u, v 分别为 x, y 方向的速度[2]。

上述热交换的矩阵形式如下:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = [Q(T)] \dots\dots\dots (3)$$

式中 $[C(T)]$ 为比热矩阵; $[K(T)]$ 为传导矩阵, 包含导热系数和对流系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{\dot{T}\}$ 为温度对时间的导数; $[Q(T)]$ 为节点热流向量。

二、分析项目描述:

1. 灯体描述:

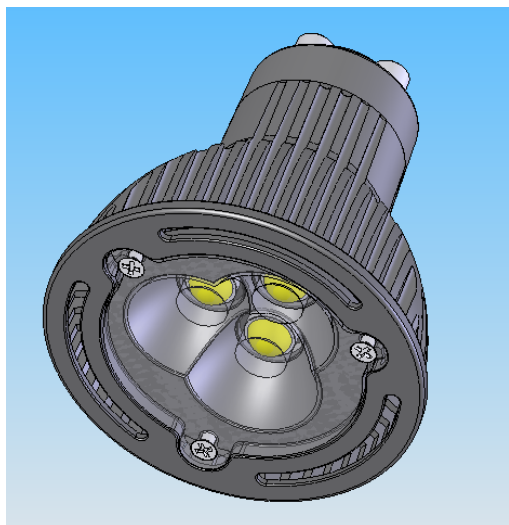


图 1 LED 灯具模型

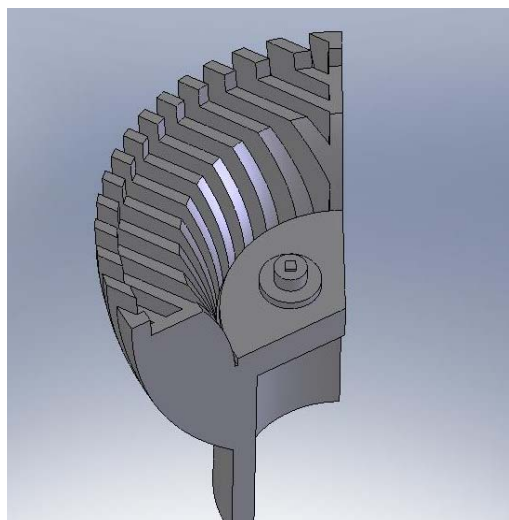


图 2 简化模型

分析模型是一款某大型公司的 LED 灯具, 外形规格 $\phi 48 \times 38$, 安装 3 颗 1W 的标准 LED, 安装直径 $\phi 12$ (均布)。

2. 灯体模型简化:

为了节省计算机资源的开支, 由灯具的对称性, 取 1/3 模型进行简化分析 (图 2), 单颗 LED 的封装结构及元器件组成见图 3 和图 4:

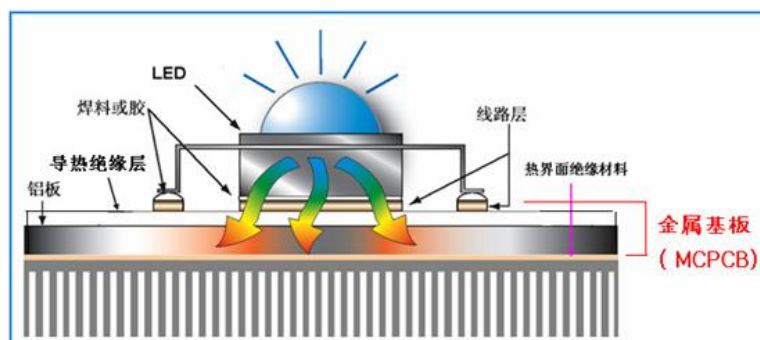


图 3 LED 封装结构图

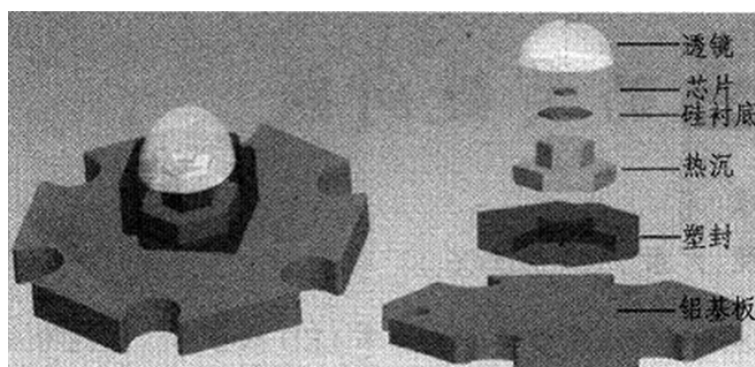


图 4 单颗 LED 组成图

简化后的模型包括：灯体、铝基板、热沉和 LED 发光芯片。LED 封装的塑料部分（热阻很大）、透镜、衬底及细导线等可省略。

根据文献，1W 单颗 LED 热辐射带走的热量约为总热量的 1.63%，只考虑热传导与对流，改变不同封装填充材料，对热导温度的降低影响不大（即使找到一种热导率高达 $7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的环氧树脂成分封装材料时，相比使用热导率仅为 $0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 的环氧树脂成分封装材料时，芯片温度下降不多，铝基板温度只下降了 2.271°C ，实际上，热导率超过 $7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 以上可商业化的透明硅树脂封装材料目前尚无文献报导）[3]，LED 芯片通过银胶与热沉导热，热沉与铝基板及铝基板与灯杯均通过硅胶导热，元件紧密结合，通常硅胶结合厚度为 μm 级。为便于分析，可以忽略银胶和硅胶的影响。LED 热沉材料常采用镀银铜，考虑到铜材纯度及银胶对热导的影响，实际导热系数比铜略低。

LED 芯片的热承受力不大于 110°C ，考虑安全裕度（一般取为 $10\sim 15^\circ\text{C}$ ），芯片 PN 结温度不得大于 95°C ，实际应用中，为了延长 LED 的使用寿命，结温一般控制在 70°C 以下，该值也常作为热设计的参考阈值，之后，温度每升高 10°C ，寿命约降低一半。

建立有限元模型时，考虑到网格划分，删除了对结果影响不大的圆角、小孔和部分小特征。

3. 若干关键问题讨论：

(1) 灯体材料：

灯体材料的选择主要考虑材料的导热能力、价格及工艺性。导热系数的大小表明金属导热能力的大小，导热系数越大，热阻越低，导热能力越强，导热系数的大小通常是通过实验的方法确定的。在金属材料中，钻石和银的导热系数最高(见表 1)，但成本太高；纯铜其次，但加工不容易。LED 散热灯壳一般采用铝合金 6063T5，这是因为铝合金的加工性好(纯铝由于硬度不足，很难进行切削加工)、表面处理容易、成本低廉，通常由压铸或挤压成型，实验表明，热导率约为纯铝的 $1/2$ ，随着温度上升，铝合金的热导系数呈增大的趋势，分析中忽略了铝合金热导系数随温度的变化。

表 1 金属导热系数表

名称	导热系数 (W/m. K)
钻石	2300
银	429
铜	401
金	317
铝	237
镁	156
锌	121
铁	80
锡	67
铅	34.8

(2) 空气对流系数:

热交换过程广泛地存在于管内自然或强迫对流流动、气体外掠平板等其它现象中。由于热交换的计算关联式很难给出比较精确的计算结果,并且使用时很容易出现错误,所以通常情况下我们建议使用一些经验的数据[4]。空气对流系数经验公式如下:

$$\text{内表面: } h = 2.5 + 4.2v \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{外表面: } h = (2.5 \sim 6.0) + 4.2v \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中 h 为空气对流系数, v 为空气流速。

一块 0.2m^2 水平放置的平板,在自然对流情况下与空气的对流换热系数大约为 $5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$,在空气流速为 $3\text{m}/\text{s}$ 的强迫对流情况下与空气的对流换热系数大约为 $15\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ [4],考虑到该款 LED 灯多用于室内封闭环境,灯具外部对流系数取为 $5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$,灯具内部对流环境取为 $2.5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$,CAE 分析时取灯具的环境温度为室温 25°C 。

(3) 发热量:

散热问题是功率型 LED 需要解决的一个重点问题,散热效果的优劣直接关系到器件的可靠性。大家知道,增加 LED 的输入功率,LED 的亮度会成比例地增强,但由于 LED 的效率远低于 100% ,目前功率型 LED 只能将少数部分电能转化为光能,而剩下的约 80% 的能量转换为热能,考虑电源发热、辐射换热及其他能量交换,综合实验测试数据,发热量可取为 LED 标称功率的 80% ,本模型中的发热量约为 0.8W ,芯片标称尺寸为 $1 \times 1 \times 0.25\text{mm}$,发热率为 $3.2\text{W}/\text{mm}^3$,为了模拟芯片均匀发热,芯片的热阻取为一个较小值。

三、ANSYS 分析及实验测试

热分析有限元软件采用在 CAE (Computer Aided Engineering) 行业领先的 ANSYS 软件。ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发,是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。程序可处理热传递的三种基本类型:传导、对流和辐射,热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析[5]。本次进行的是稳态热交换分析。

ANSYS 有限元分析结果主要包括温度分布、温度梯度及热流密度(图 5-8)。

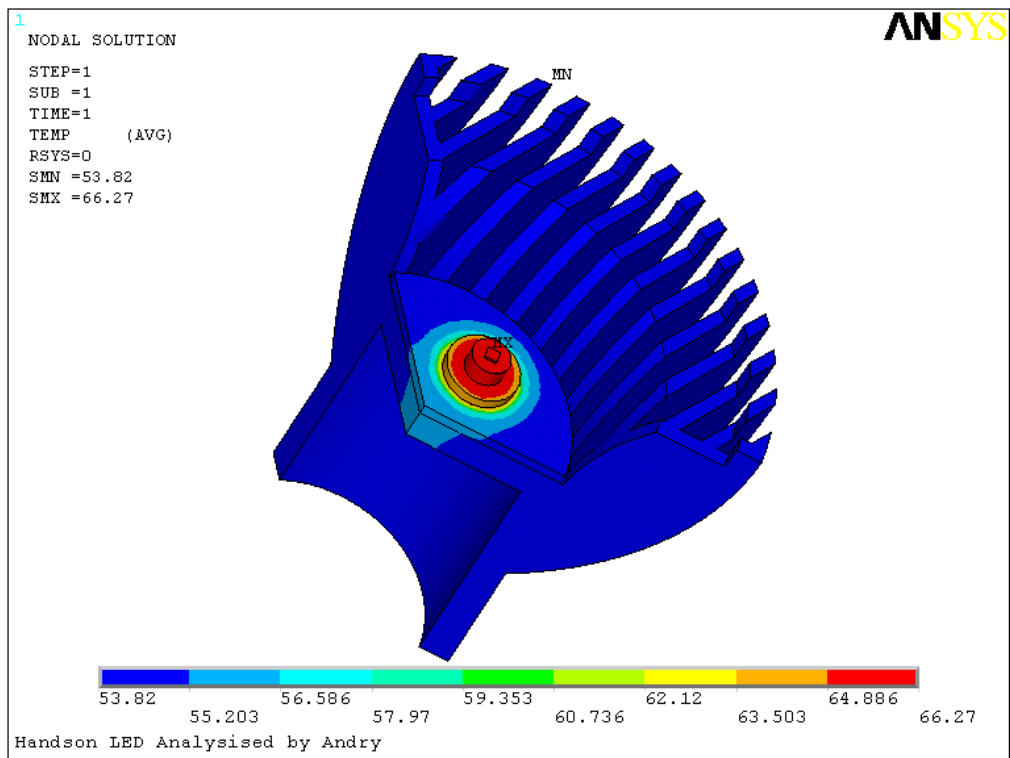


图 5 温度分布

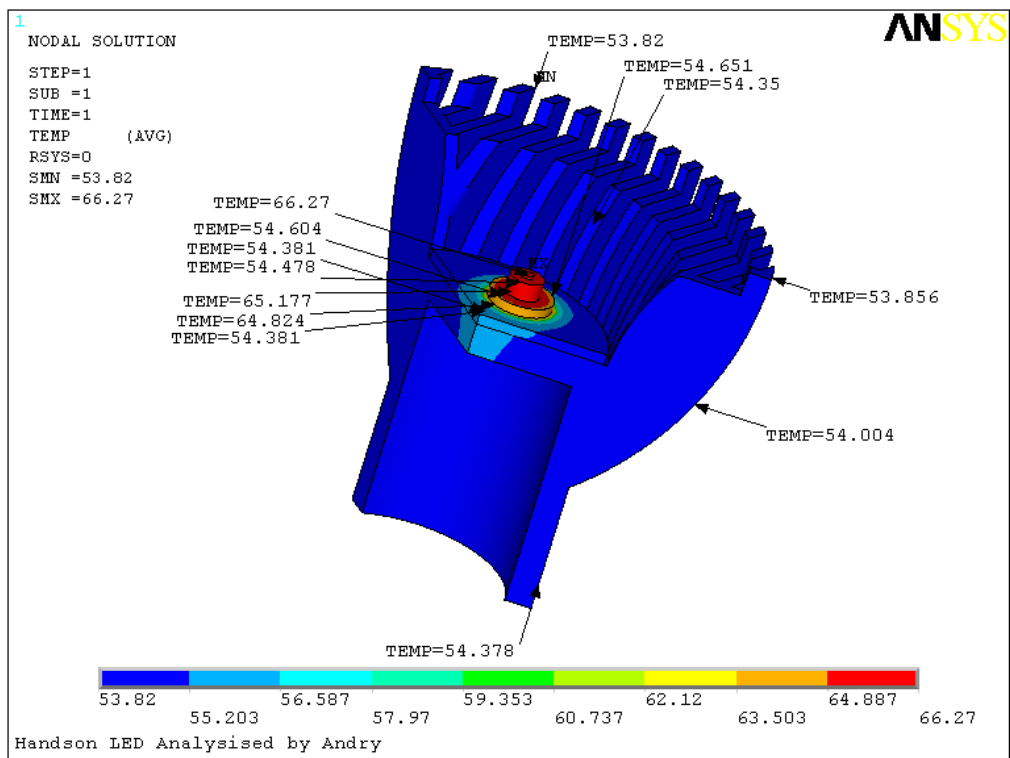


图 6 温度分布关键点值

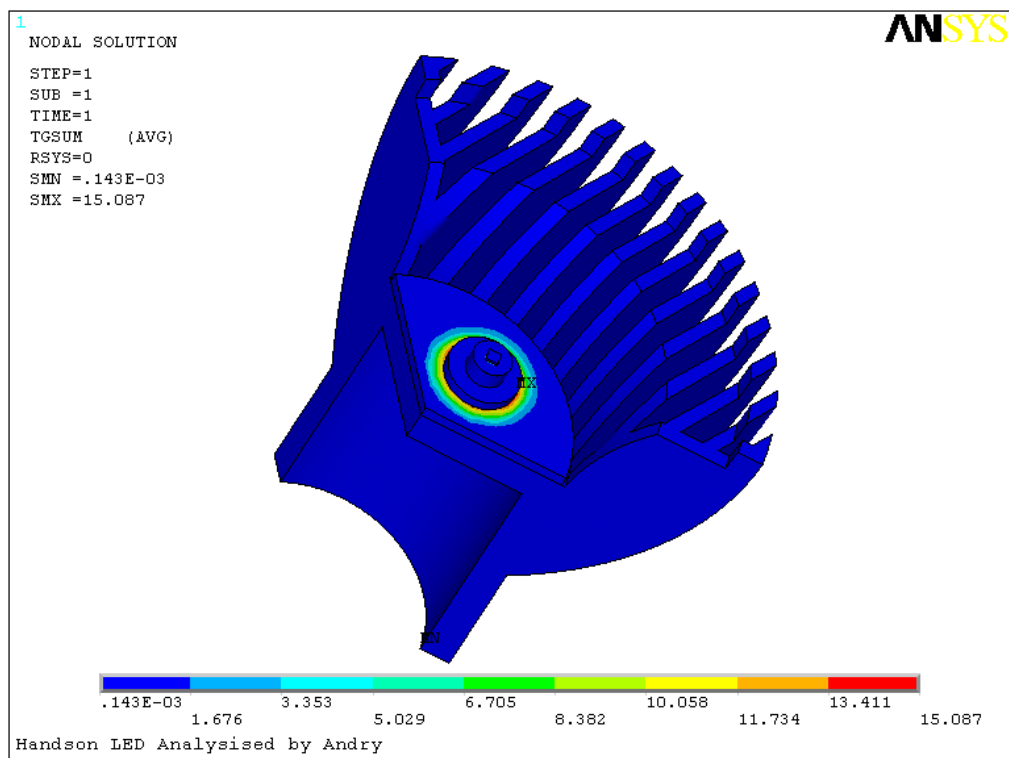


图 7 温度梯度

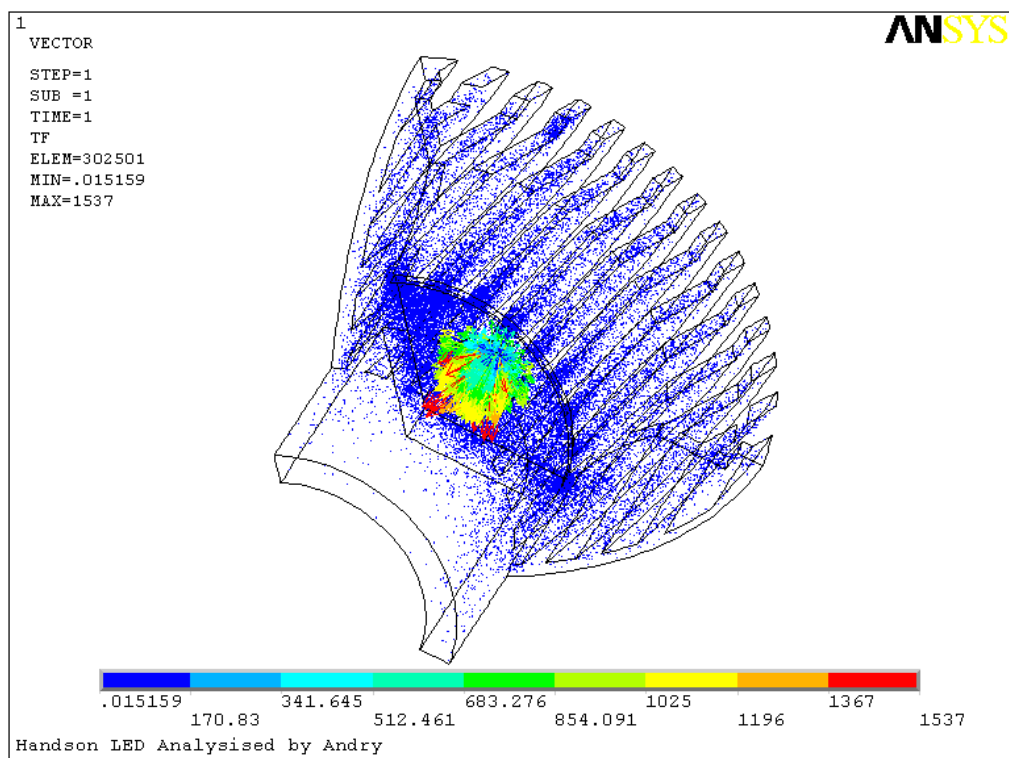


图 8 热流密度

我们选择了 3 个样品进行温度测试(测试点见图 9)，光源分别为 Cree(2 个)和 Handson (1 个)，测试设备为多点温度巡检仪(型号 TMP-2，如图 10)，采用热电偶温度测试原理，测试结果如表 2，测试环境为室温 26.9℃，密闭房间。

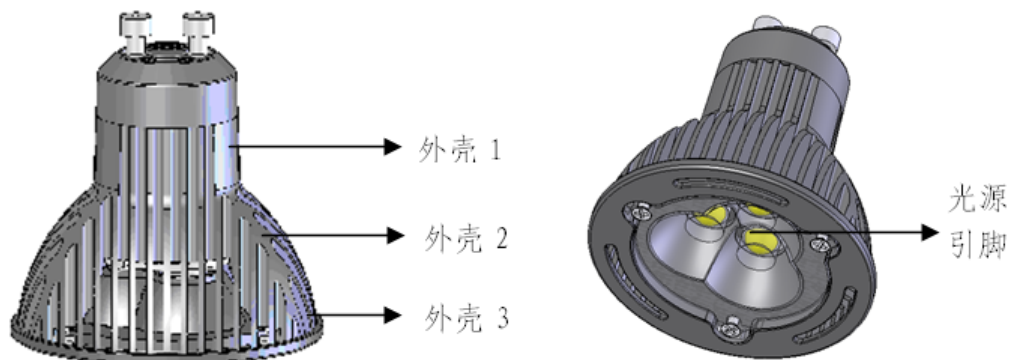


图 9 灯具测试点示意图



图 10 多点温度巡检仪 TMP-2

表 2 LED 灯体温度测试结果

测试项目	引脚/℃	外壳 1/℃	外壳 2/℃	外壳 3/℃
Cree 1#	69.5	57.8	58.6	56.8
Cree 2#	66.8	58.3	59.4	55.4
Handson 3#	69.0	58	58.6	56.9

四、结果分析:

ANSYS 分析结果显示, 最高温度出现在芯片及引脚部位, 为 66.27℃ (在阈值 70℃ 范围内), 最低温度为灯具外壳大端面处 (外壳点 3), 为 53.82℃, 一般来说, LED 灯具的外壳设计温度须低于 60℃。分析结果也显示了温度梯度及热传递矢量, 可用于指导灯具元件的布局。热通主要集中在热沉和铝基板的结合区域, 为热导的主要通道, 更换不同厂商的光源, 在相同的灯具功率下, 温度分布及其温度梯度差异不大, 与设计时的 CAE 分析结果对比如下:

表 3 实验测试温度与 CAE 分析结果对比

项目	环境	引脚温度/℃	外壳温度/℃		
CAE 分析	25.0℃, 密闭	66.27	54.378	54.004	53.856
实测 1#	26.9℃, 密闭	69.5	57.8	58.6	56.8
实测 2#	26.9℃, 密闭	66.8	58.3	59.4	55.4
实测 3#	26.9℃, 密闭	69.0	58	58.6	56.9

ANSYS 分析是在室温 25℃的密封环境下,外壳最低温度为 53.82℃,中心温度 66.27℃,换算到测试温度(26.9℃)下分别约 55.7℃、68.2℃。考虑到测试设备、测试环境和有限元模型的简化,存在一定的误差,最大误差为 3.5℃,中心引脚和外壳温度最大误差率分别为:

$$\frac{69.5 - 68.2}{68.2} \times 100\% = 1.91\% \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{59.4 - 55.904}{55.904} \times 100\% = 6.25\% \dots\dots\dots (7)$$

实验测试的外壳温度存在一定的温度梯度,导致该现象的主要原因为电路发热,在测试点 1 的内腔安装有恒流源驱动电路模块,电路模块发热,会使测试点 1 和它附近的点 2 温度升高。而测试点 3 远离电路模块,所以与仿真值更为接近,最大误差仅为:

$$56.9 - (53.856 + 1.9) = 1.144^\circ\text{C} \dots\dots\dots (8)$$

最大误差率为:

$$\frac{56.9 - (53.856 + 1.9)}{53.856 + 1.9} \times 100\% = 2.05\% \dots\dots\dots (9)$$

利用先进的计算机仿真分析,在设计时,我们就能比较准确的把握产品的温度分布情况,针对温升比较集中的地方进行散热结构改进、优化,满足客户和设计的需求,从而提升产品的质量和性能。

参考文献:

- [1] 新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M]. 毛兴武等. 人民邮电出版社, 2008
- [2] 热工基础[M]. 于秋红. 北京大学出版社, 2009
- [3] 改善大功率 LED 散热的关键问题[J]. 王静、吴福根. 电子设计工程, 2009. 4
- [4] Move Your Thermal Strategy For Air-Cooled Electronics Up In The Design Flow[J]. Byron Blackmore、Robin Bornoff、John Parry, 2005
- [5] ANSYS8.0 热分析教程与实例解析[M]. 张朝晖. 中国铁道出版社, 2005