

积分球通用 LED 光源灯座的优化设计

刘 鹏¹, 刘向明¹, 马建设²,

1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055

摘 要: 积分球内部的直插式灯座既不适用于铝基板式 LED 光源的安装, 也不能满足功率型 LED 光源的散热要求. 针对这一问题, 通过三维软件为积分球设计一种通用的外接灯座, 利用 ANSYS 软件的热分析模块, 对该灯座加载模拟的最大设计热载荷并进行热稳态仿真分析, 以得到整个灯座的模拟温度场分布. 然后利用 ANSYS 软件的多目标驱动优化分析工具, 对灯座模拟温度场中的最高温度点(区域)进行结构优化设计, 以降低灯座的最高温度. 最后在实验条件下, 调节程控直流电源, 加载最大设计电功率, 验证热稳态下整个灯座的实际温度分布, 并与仿真进行比较. 结果表明, 实验得到的灯座温度场分布与仿真得到的温度场分布十分接近, 经优化后的灯座最高温度明显降低.

关键词: 积分球; LED 光源; 灯座; 多目标驱动优化分析; 优化设计

中图分类号: TP3

文献标识码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2015. 01. 011

0 引 言

积分球是专门用于 LED 光色参数测量和光谱分析的仪器. 近年来, LED 光源以其体积小、能耗低、响应快、寿命长等诸多优点, 在各个领域得到广泛使用. 积分球作为一种重要的 LED 测试分析仪器, 在 LED 光源的快速研究和发展中发挥了极大作用.

积分球球内设有两脚直插灯座, 适用于两脚形式的 LED 光源, 但由于目前绝大多数 LED 光源都采用铝基板的形式, 直插灯座不再适用. 此时需另行设计积分球的外接灯座. 此外, 对于大功率 LED 光源, 外接灯座还需兼具散热器的功能. 本文的目的在于为积分球设计一种通用的外接灯座, 该灯座不仅能满足铝基板形式的 LED 光源的便捷安装与测试, 同时能充分满足 LED 光源的散热要求.

1 外接灯座设计方案

本文以 0.5 m 规格的积分球为例, 该积分球球体直径为 500 mm, 对光通量的测试范围为 1~1 999 lm.

1.1 LED 光源热耗散功率 P_d

良好散热条件下, 通常功率型 LED 光源的光效可达 100 lm/W 以上. 本文选取实用光效为 100 lm/W 的光源作为设计样本, 即该规格积分球

可测试的 LED 光源最大功率约 20 W. 目前 LED 光电转换效率只有约 20%~30%, 剩余的都将转化为热量. 取光电转化效率为最低的 20%, 则该 LED 光源的热耗散功率为 16 W.

1.2 温度设计

LED 结温超过 120 °C 后会造成光通量下降、光效降低等不良后果. 本文设计要求为 LED 结温不高于 120 °C. LED 芯片样本内热阻约 1.5 °C/W, 则此芯片壳温不能高于 90 °C. 铝基板热阻约为 1 °C/W, 则铝基板另一侧温度不高于 70 °C. 铝基板与灯座间的热界面材料采用常用的导热硅脂, 导热系数为 3 W/(m·°C), 厚度约 0.5 mm, 其热阻为 0.28 °C/W, 则灯座最高壁温不得高于 64.4 °C.

1.3 外接灯座的设计

经测量, 积分球外接端口直径为 46 mm, 深度为 40 mm. 外接灯座采用最常用的矩形肋片式散热器形式, 灯座材料采用最常用材料 Al6063-T5, 其导热系数为 209 W/(m·°C), 表面经过阳极氧化处理, 辐射率约为 0.6. 为消除接触热阻, 肋片由整块铝锭切削加工而来, 肋厚与肋间距不宜过小, 以保证可加工性. 参照相关资料的经验公式, 并结合本文实际, 确定灯座各个参数的初始值^[1], 如表 1 所示.

表 1 灯座各参数初始设计值

Table1 The each initial design values of lamp holder

圆柱凸台 直径 D/mm	圆柱凸台 深度 B/mm	基座厚 d/mm	肋高 H/mm	肋厚 a/mm	肋间距 b/mm	肋数 N	基座长(肋长) L/mm	基座宽 W/mm
46	40	5	30	4	6	7 个	64	64

根据灯座入品处尺寸,结合表 1 中的灯座凸台尺寸,利用 Solidworks 软件建立外接灯座的三维模型,如图 1 所示。

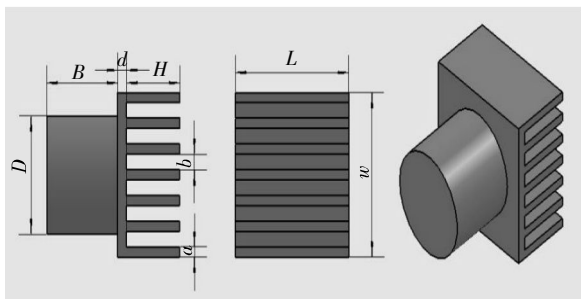


图 1 外接灯座三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of the external lamp holder

1.4 散热方式

自然对流散热和强制对流散热是肋片散热器最常用的两种散热方式. 本文条件下,灯座的肋片部分暴露在积分球外部,故肋片的外形尺寸可不受空间限制. 此外,如采用强制对流散热,肋片端需加装风扇固定位,还需考虑风扇供电等问题. 综合以上因素,灯座采用自然对流散热^[2].

1.5 灯座肋片安装方向

据场协同理论,当肋片沿重力场方向时有最佳协同角和最佳散热效果,故肋片沿肋长方向竖直放置.

2 ANSYS Workbench 稳态热分析

ANSYS Workbench 的稳态热分析需给定对流换热系数,该参数的准确性对于整个热分析的准确性至关重要. 采用试算迭代法来确定自然对流换热系数. 即先假设一个试算值,用 ANSYS Workbench 稳态热分析计算得到灯座的温度场和灯座肋片壁温^[3],再将此温度作为条件代入相应的实验关联式中,计算出该温度条件下的对流换热系数. 比较两个对流换热系数的差值,并更换新的试算值,用 ANSYS Workbench 进行第二次稳态热迭代计算. 当前后的换热系数相差不超过 1%,即可认为迭代收敛,得到最终的换热系数.

据传热学理论,确定本文条件下灯座肋片与空气对流散热的流态,并利用相关实验关联式计算自然对流换热系数^[4],其迭代过程如表 2 所示.

表 2 迭代计算值

Table2 Iterative calculation value

迭代次数	试算值 $h_1/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	热分析求得的壁温 $t_w/^\circ\text{C}$	R_a	N_u	计算值 $h_2/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	$ h_2-h_1 /h_1$
0	5	70.8	7.0×10^5	15.53	6.89	37.8%
1	6	67.5	6.61×10^5	15.32	6.75	12.5%
2	6.5	66.0	6.37×10^5	15.18	6.69	2.9%
3	6.6	65.7	6.32×10^5	15.16	6.68	1.2%
4	6.7	65.5	6.28×10^5	15.13	6.67	0.4%

从表 2 可以看出,当试算值 $h_1=6.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 时,稳态热分析前后的对流换热系数相差仅为 0.4%,迭代收敛,即本文实验条件下,空气的自然对流换热系数为 $6.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,此条件下灯座的 ANSYS Workbench 的热稳态分析温度场如图 2 所示.

灯座最高温度位于与导热硅脂接触的壁面,为 68.5°C ,高于设计要求的 64.4°C ,因此需要对灯座的肋片参数进行优化,确保灯座最高壁温不高于设计要求.

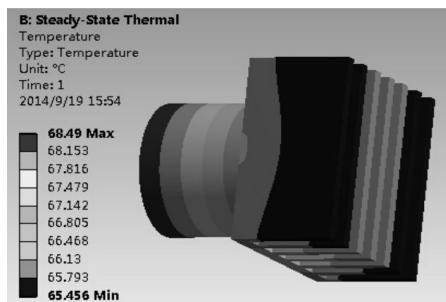


图 2 $h=6.7 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 时灯座的温度场分布
Fig.2 Temperature field distribution of the lamp holder when $h=6.7 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$

3 灯座的优化

ANSYS Workbench 平台具有卓越的优化分析能力^[5],本文采用其中的 Goal Driven Optimization (多目标驱动优化分析)工具,利用 Parameters Correlation (参数相关性优化分析工具)和 Response Surface(响应曲面优化分析工具)对灯座的肋片参数进行优化设计^[6].保持肋片数 N 为 7 个不变,选取基座厚 d 、基座长(肋长) L 、基座宽 W 、肋高 H 、肋厚 a 、肋间距 b 等六个参数作为输入变量,选取灯座最高壁温和灯座体积两个参数作为设计输出.综合各项边界条件,给定各设计变量的取值范围,详见表 3.

表 3 设计变量取值范围

Table.3 Design variables ranging

设计变量	d/mm	L/mm	W/mm	H/mm	a/mm	b/mm
初始值	5	64	64	30	4	6
上限值	3	50	60	20	2	3
下限值	6	70	80	40	5	8

系统根据各个变量的取值范围,采用蒙特卡罗抽样方法,列出 45 个设计样本,分别求解后,自动找出产生极值的四个设计样本.六个设计变量对输出目标的影响关系,如图 3 所示.从图 3 中可以看出,对灯座的体积影响最大的三个设计变量分别是肋厚 a 、肋高 H 、肋长 L ,对灯座壁温影响最大的三个设计变量分别是肋高 H 、肋长 L 、肋厚 a ,可见这三个设计变量是优化设计的关键参数.

表 4 优化前后的各参数对比

Table4 Each parameter comparison between before and after optimization

设计变量	肋长 L/mm	肋宽 W/mm	基座厚 d/mm	肋厚 a/mm	肋间距 b/mm	肋高 H/mm	灯座体积/ mm^3	最高壁温/ $^{\circ}\text{C}$
初始值	64	64	5	4	6	30	1.4×10^5	68.5
优化处理值	70	49.7	4.3	2.3	5.6	39	1.25×10^5	64.2

用优化处理后的值更新灯座模型,重新进行热稳态分析,对应的稳态热分析得到的温度分布:最高壁温为 64.2°C ,最低壁温为 60.7°C .

4 实验验证

按照优化后的灯座尺寸,选择 AL-6063 为材料,加工出灯座实体.实验设备安装如图 4 所示.

采用福禄克公司的红外测量仪作为测温设备,将程控直流电源输入功率设为 20 W ,点亮 LED 光源.每隔 10 min 用红外测量仪测试一次灯座的

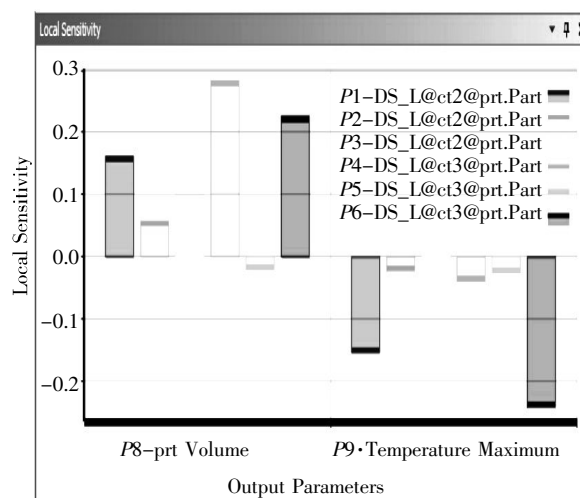


图 3 设计变量与输出目标的敏感关系

Fig.3 Sensitive relationship between design variables and output targets

设置温度不高于 64.4°C 为硬性要求,寻找体积最小的设计样本.软件经计算后会自动筛选出的三个最符合要求的设计候选样本中,其中一个设计样本有最小体积 $1.27 \times 10^5\text{ mm}^3$,因此这个设计样本就是最佳优化设计样本.

为了便于实际加工,对设计样本 A 中的六个设计变量值进行适当处理.为保证基座宽度方向两端不留空余(即满足 $7a+6b=W$),对多出的宽度予以切除,每个变量的小数点后仅保留一位.按照处理后的设计变量值修改灯座模型,重新进行热稳态分析,将得到的结果与优化前进行比较,如表 4 所示.

温度,当灯座壁温不再升高并保持在一个稳定温度值时,此时灯座温度到达热稳态,此时的灯座温度场分布如图 5 所示.

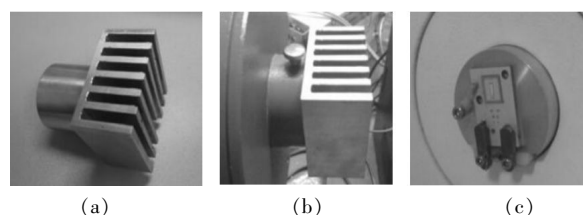


图 4 实验设备安装示意图

Fig.4 The installation diagram of experimental equipment

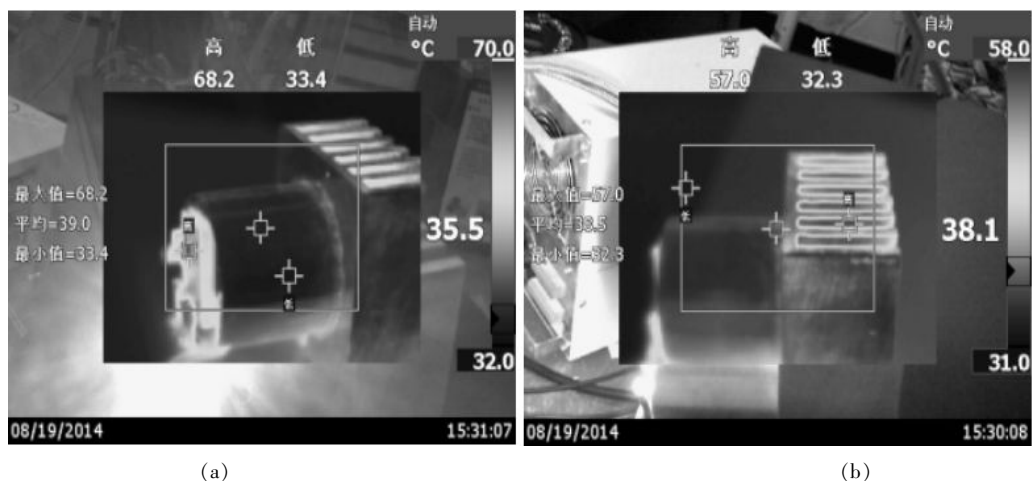


图 5 灯座温度分布

Fig.5 The temperature distribution of lamp holder

对比热稳态仿真得到的温度分布与实验条件下得到的温度分布,如表 5 所示。

表 5 仿真与实验条件下的灯座温度分布

Table5 The temperature distribution under simulation and experiment conditions

项目	最高壁温/℃	最低壁温/℃
仿真结果	64.2	60.7
实验结果	62	58

从表 5 可以看出,仿真结果与实验结果两者十分接近,说明 ANSYS Workbench 仿真分析和优化效果是可靠和准确的。

5 结 论

在 ANSYS Workbench 中,利用其强大的多目标驱动优化分析工具,结合稳态热分析,阐述了在满足灯座壁温不超过最高设计壁温的前提下,缩小灯座体积,减轻灯座重量并节省材料的优化设计方法,并用实验证实了这种优化效果。与传统方法相比,该设计方法不仅省时和高效,而且大大降低了生产成本。对于此类问题的优化设计均具有指导意义。

致 谢

在研究过程中,清华大学深圳研究生院国家光盘中心提供了实验场地与实验设备,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

[1] 龙昊,付桂翠,高泽溪.自然空气冷却情况下功率器件散热器的优化设计 [J]. 电子元件与材料,2003,22 (03):18-21.

LONG Hao,FU Gui-cui,GAO Ze-xi.Optimal design of natural air cooling radiator case power devices [J]. Electronic Components and Materials,2003,22(3):18-21.(in Chinese)

[2] 陈方,廖义德,郭敏,等.动车检修库无罩引风系统性能研究[J].武汉工程大学学报,2011,33(08):95-98.

CHEN Fang,LIAO Yide,GUO Min,et al.Study of uncovered airinduced system in CRH base [J].Journal of Wuhan Institute of Technology,2011,33 (8):95-98. (in Chinese)

[3] 喻九阳,王明伍,郑小涛,等.高温法兰连接系统温度场的有限元分析 [J]. 武汉工程大学学报,2014,36 (10):31-36.

YU Jiu-yang,WANG Ming-wu,ZHENG Xiao-tao,et al. Temperature field analysis of flanged joints at high temperature based on finite element method[J].Journal of Wuhan Institute of Technology,2014,36 (10):31-36.(in Chinese)

[4] 张奕,郭恩震.传热学[M].南京:东南大学出版社,2004.

ZHANG Yi,GUO En-zhen.Heat transfer [M].Nanjing: Southeast University Press,2004.(in Chinese)

[5] 李兵,何正嘉,陈雪峰.ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M].北京:清华大学出版社,2008.

LI Bing,HE Zheng-jia,CHEN Xue-feng. ANSYS workbench design,simulation and opti mization [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2008.(in Chinese)

[6] 郑小涛,龚程,徐红波,等.油-水-气三相旋流器分离验证及气-液腔结构优化 [J]. 武汉工程大学学报,2014,36(10):37-41.

ZHENG Xiao-tao,GONG Cheng,XU Hong-bo,et al. Verification of separation performance of oil-water-gas cyclone and optimization of structure of liquid-gas separation chamber [J].Journal of Wuhan Institute of Technology,2014,36(10):37-41.(in Chinese)

Optimum design of universal LED light source holder for integrating sphere based on ANSYS

LIU Peng¹, LIU Xiang-ming¹, MA Jian-she²

1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2.Graduate School at SHENZHEN, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

Abstract: The internal direct-insert-type lamp holder of integrating sphere was not suited for the installment of aluminium substrate-type LED light source, and it was also not met the cooling requirement of the power LED light source. To solve this problem, an universal external lamp holder for integrating sphere was designed by 3D software, and the entire temperature distribution of this lamp holder was simulated by the thermal analysis module of ANSYS software, after loading the simulant maximal design load and making a thermal steady-state analysis. Then according to the highest temperature distribution points(areas), the structural optimization design of the lamp holder was made by the goal driven optimization tool of ANSYS software to reduce the maximal temperature of the lamp holder. Finally, the actual temperature distribution in the thermal steady-state was verified and the temperature distribution was compared with the simulation results, after loading the maximal design electric power by regulating the programmable direct current power source under experimental conditions. The results show that the temperature distribution of lamp holder obtained by experiment is very close to the temperature distribution obtained by the simulation, and the maximum temperature of the lamp holder is reduced significantly after optimization.

Keywords: integrating sphere; LED light source; lamp holder; goal driven optimization; optimum design

本文编辑:陈小平