

doi: 10.3788/gzxb20164511.1122003

LED 汽车前大灯散热器正交优化设计与分析

廖炫, 郭震宁, 潘诗发, 李建鹏, 张佳宁

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:设计了一种 LED 汽车前大灯散热器结构,该结构主要由一条通风管和一台无叶风扇组成.在 SolidWorks 软件中建立该散热结构模型,并导入 FloEFD 软件进行散热仿真,得到 LED 结温温度为 148℃.提出在通风管中填充矩形翅片和填充蜂窝结构两种改进方案.仿真结果表明,采用两种改进方案后 LED 汽车前大灯的结温温度分别下降至 102.01℃ 和 86.20℃.对填充蜂窝结构方案进行正交优化试验,分析得出影响该系统散热性能的因素依次为:蜂窝等效直径、蜂窝类型、填充长度、壁厚和通风管长度.按照该顺序优化参数值,得到最优散热结构.仿真结果表明,经过正交优化后,LED 汽车前大灯的温度降为 75.17℃,进一步提高了整体结构的散热性能.最后分析了该结构的基板温度与风速的关系,结果表明当风速低于 5 m/s 时,温度随着风速的增大急剧降低,当风速高于 5 m/s 时,温度下降趋势相对缓慢.

关键词:LED 散热;蜂窝结构;FloEFD;正交试验;汽车前大灯;温度

中图分类号:TN312

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)11-1122003-6

Orthogonal Optimization Design and Analysis of the LED Car Headlights

LIAO Xuan, GUO Zhen-ning, PAN Shi-fa, LI Jian-peng, ZHANG Jia-ning

(Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: A type of LED automobile headlamp radiating structure was put forward, which was mainly composed of a ventilation pipe and a non-leaf fan. The corresponding model was generated in SolidWorks and the thermal condition was calculated with FloEFD thermal simulations. Results showed that the LED junction temperature was 148℃. Adopting two improved schemes, which rectangular fins and the honeycomb structure were filled into ventilation pipe respectively, the junction temperature of LED headlamps decreased to 102.01℃ and 86.20℃ respectively. With the orthogonal experiment, the scheme of filling honeycomb structure indicated that the factors affecting the system heat dissipation performance were as follows: the cellular equivalent diameter, honeycomb type, filling length, wall thickness and ventilation tube length. Therefore, the optimal heat dissipation structure was obtained by the parameter value of this order. Simulation results showed that, after orthogonal optimization, the temperature of LED headlamps was reduced to 75.17℃, which further improved the heat dissipation performance of the whole structure. Finally, the relationship between the wind speed and the thermal structure's substrate temperature was discussed. The result demonstrated that when the wind speed was lower than 5m/s, the temperature decreased sharply with the increase of wind speed, and when the wind speed was higher than 5m/s, the temperature descend trend was relatively slow.

Key words: LED cooling; Honeycomb structure; FloEFD; Orthogonal experiment; Car headlights; Temperature

OCIS Codes: 220.2945;220.4830;230.3670;120.6780;120.6810

0 引言

与传统光源相比,发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)具有色纯度高、响应速度快、耐震动、能耗

基金项目:福建省科技计划引导性重点项目(No. 2016H0022)和福建省重点实验室开放基金(No. 2014201)资助

第一作者:廖炫(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为 LED 散热结构设计与优化. Email: liaoxuan1990@139.com

导师(通讯作者):郭震宁(1958—),男,教授,博士,主要研究方向为 LED 光学设计与散热设计. Email: znguo@hqu.edu.cn

收稿日期:2016-04-18;录用日期:2016-09-01

<http://www.photon.ac.cn>

低、体积小便于设计、使用寿命长等优点,因此,它被广泛用于雾灯、制动灯、倒车灯、转向信号灯、位置灯、牌照灯等汽车外部照明灯具上^[1].近年来,随着超高亮度大功率白色LED的出现及其生产成本的降低,LED被逐步应用于汽车前大灯.然而LED只有20%~30%的输入功率转化为光能,其余70%~80%则转化为热能^[2],若热量不能及时散出去,温度的升高会导致其性能下降甚至失效.对此,不少学者进行了相关研究:S. W. Jang^[3]等提出利用微喷射流对车灯进行强制散热,并讨论了热沉形状对散热效果的影响;S. J. Park^[4]等研究了不同形状翅片对车灯散热的影响,得出放射性径向鳍片散热效果最佳;J. Wang^[5]等提出采用热管配合翅片进行散热,该方案能有效降低芯片温度.但这些研究都没有充分利用汽车行驶过程中产生的气流且存在体积较为庞大的缺点.

本文结合汽车行驶和静止两种情况,提出了一种新型LED汽车前大灯散热系统,将无叶风扇运用于该散热结构,通过温控技术判别其是否启动,达到节能效果.利用SolidWorks构建该系统的三维图形,导入FloEFD仿真软件进行散热模拟仿真.基于有限元原理,使用正交试验设计方法对系统的通风管及蜂窝结构进行优化,最终获得最优的尺寸参数组合,节省了时间并提高了效率.

1 理论基础

图1为本系统的散热结构,流体流经管内的主要方式可分为层流和湍流,何时出现湍流是一个很重要的问题,引入雷诺数进行区分,其定义为^[6]

$$Re = \rho D_h v / \mu \quad (1)$$

式中, ρ 为流体的密度, μ 为流体的粘滞系数,由于本文设定空气温度为40℃,查常压气体的热物性表可得,空气密度 $\rho \approx 1.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\mu \approx 188.32 \times 10^{-7} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s})$, v 为流体的流速, D_h 为水力直径,其表达式为^[7]

$$D_h = 4A / P \quad (2)$$

式中, A 为面积, P 为周长.

当 $Re \leq 2000$ 时,流体的流动方式是层流;当 $Re > 4000$ 时,流体的流动方式是湍流;当 $2000 < Re < 4000$ 时,流体的流动方式不稳定(可能由层流变为湍流或相反)^[6].

有限元FloEFD仿真软件可以全面分析各类LED灯具的热传导、热对流及热辐射,求解各类LED灯具内外的温度场和流场等,非常适用于LED汽车前大灯散热模拟仿真^[8-10].故可通过仿真确定流体流经通风管道的状态,进而在有限元FloEFD仿真软件中选择相应的流体类型,得到相应的结果.

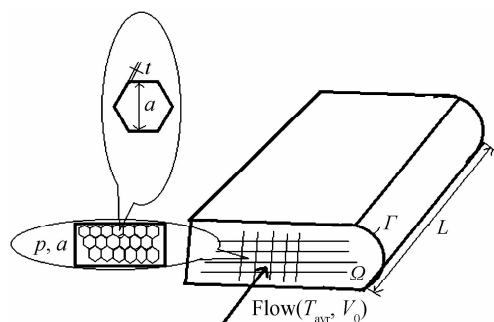


图1 蜂窝结构换热模型

Fig. 1 Honeycomb structure heat transfer model

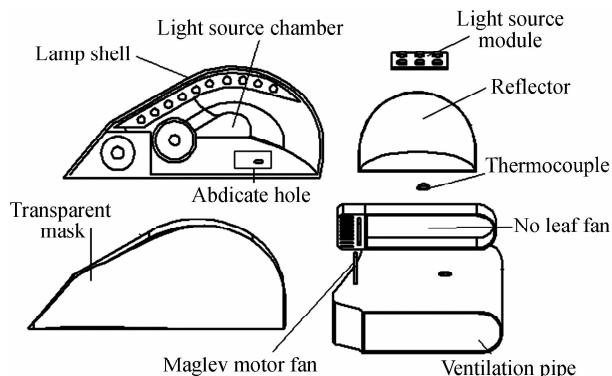
2 模型建立与描述

2.1 模型建立

本文设计的LED汽车前大灯散热器主要由一条通风管和一台无叶风扇组成.通风管的进风口可延伸至汽车前进气格栅,出风口可延伸至发动机舱盖或前轮上方,这样可以充分利用汽车行驶过程中产生的空气对流进行散热.当车辆行驶速度达到一定值时,甚至可以不需要风扇就能完成LED汽车前大灯的散热.当LED汽车前大灯工作,而汽车低速行驶或者静止时,仅仅依靠汽车行驶所产生的气流来散热就不能满足要求.

因此,在设计LED汽车前大灯散热器中加入了无叶风扇,无叶风扇的出风口设置在通风管内壁,方向朝向通风管出风口.

在三维制图软件SolidWorks中建立LED汽车前大灯散热模型,如图2.图2(a)中,光源模组嵌入让位孔中,配合反光罩,置于光源腔中;热电偶安装在光源模组的正下方.考虑到自然对流散热无法满足要求且带叶片的风扇会阻碍通风管中空气流动,系统采用无叶风扇进行主动散热,如图2(b).所采用的无叶风扇出风环与通风管截面相同,安装于通风管内且其进风口位于靠近通风管进风口一侧,同时用磁浮马达风扇替换无叶风扇基体中的一般风扇,以便满足任何角度安装,如图2(c).透光面罩与灯壳相互扣合,光源模组与通风管紧紧贴合.整灯示意图如图2(d).



(a) Explosion view of heat transfer model

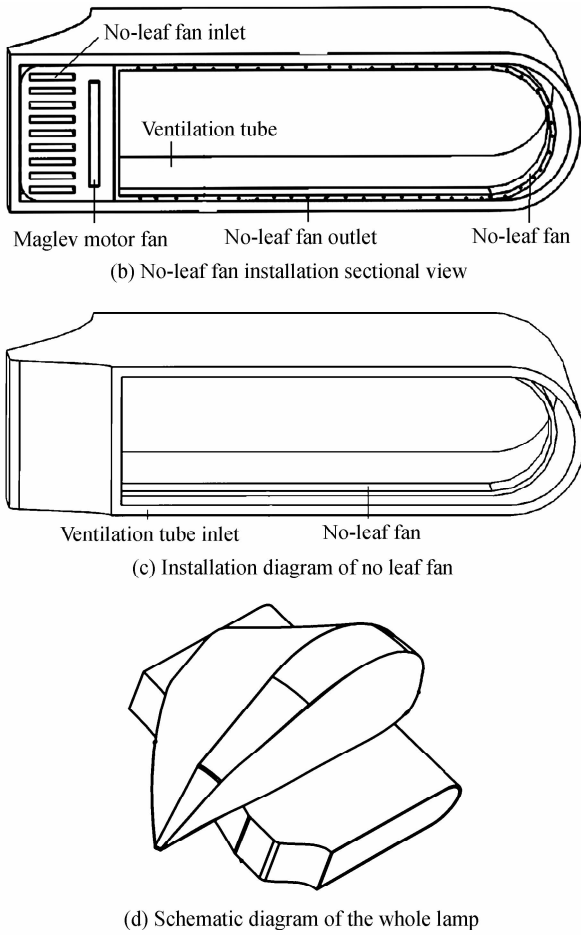


图2 LED汽车前大灯散热模型
Fig. 2 Schematic diagram of LED headlights

2.2 系统工作方式

LED光源模组工作时,产生的热量垂直传递到散热通道的壁体上.当车辆高速或较高速行驶时,会形成一股强气流冷风从散热通道的进风口进入,流经散热通道并带走LED光源模组产生的热量,最后从散热通道的出风口排出.当车辆处于低速行驶状态或静止状态时,进入散热通道内的气流会减弱,带走的热量减小,使整个系统的温度上升.当热电偶探测到的温度达到其预先设定的温度上限时,启动无叶风扇,利用无叶风扇产生的风力增强散热通道内的空气对流,对传递到散热通道的热量进行强制散热,使得整个系统的温度降低.考虑到LED芯片的安全温度为 85°C ^[11],将热电偶的温度下限设定为 75°C ,当热电偶探测到的温度低于 75°C 时,关闭无叶风扇,从而进一步达到节省能源的效果.

3 模型热仿真

考虑到整个系统绝大多数热量由光源模组1产生,将前大灯做适当简化:用密封方形盒子(热导率设为0)代替透光面罩、灯壳及其内部除光源模组外的所有物体,各部分材料热导率见表1.用文献[12]所述

方法进行仿真.光源输入功率 30W ,热功耗为 24W (80%的输入功率转换为热量),环境温度设为 50°C ,模拟汽车低速行驶情况,将入口速度设为 18 km/h (空气经过无叶风扇作用后时速可达 35 km/h ,且其为无级变速^[13]),模拟炎热无风高温夏季,气体温度为 40°C 时的情况.仿真结果如图3.

表1 各部分材料热导率

Table 1 Each part of the material thermal conductivity

Structure module	Chip	Copper substrate	Ventilation tube and filler material	Bonding layer	Sealed box
Thickness/mm	0.1	2	--	0.2	1
Material	GaN	Composite layer	Aluminum alloy	Solder paste	Insulator
Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K})$	130	20	166	40	0

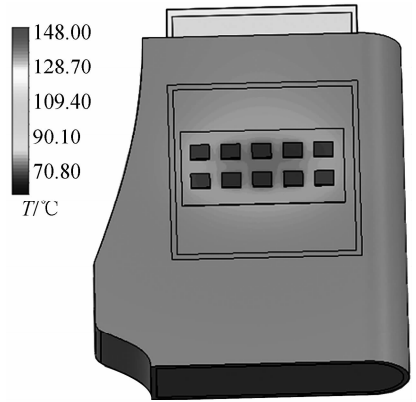


图3 温度分布云图

Fig. 3 Temperature distribution cloud image

由图3可知,该系统最高温度为 148°C ,远远超出最大允许结温温度 125°C .因此,要对其进行改进,提出两种不同措施:1)在通风管中加散热翅片,如图4(a);2)采用蜂窝填充,如图4(b).模拟仿真结果如图5.

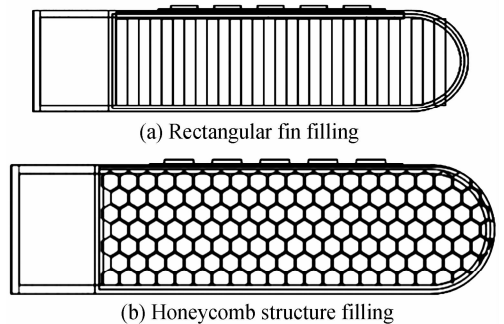
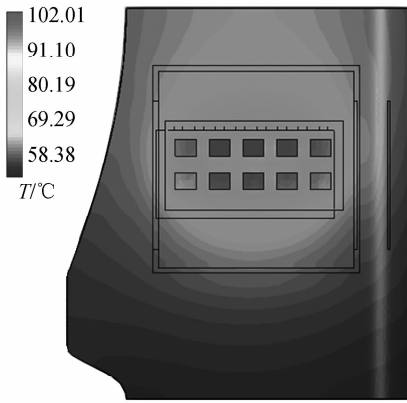
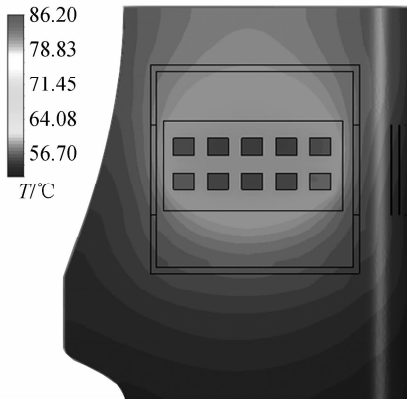


图4 两种不同的改进措施

Fig. 4 Filling with different structure



(a) Temperature contours of rectangular fin filling



(b) Temperature contours of Honeycomb structure filling

图5 两种措施改进后的温度分布云图

Fig. 5 Temperature contours of the two different types of improvement

对比图3和图5可知:经改进后,系统的最高温度分别为 102.01°C 和 86.20°C ,与原来相比,分别下降了 45.99°C 和 61.8°C ;不同填充物对系统散热性能贡献不一样,采用蜂窝填充比翅片填充散热性能更好.分析原因可知:增加填充物可以增大物体和流体空气的接触面积,即增加散热表面积,进入通道的风可以带走更多的热量,故散热能力大大增强;而当采用不同填充物时,物体和空气的接触面积不一样,散热表面积也就不同.另外,空气流经不同结构遇到的阻力大小不同导致风速也会不一样,最终引起散热效果的不同.

4 正交试验优化及分析

4.1 正交试验优化

为了进一步增强散热效果,对蜂窝填充方式进行优化.蜂窝类型(A)、蜂窝等效直径(B)、蜂窝壁厚(C)、填充蜂窝长度(D)和通风管长度(E)等因素均会对散热效果产生影响^[14],因此,采用正交试验来优化.

以A、B、C、D、E为正交表中的关键因子,结合正交表L16(4^5)^[15]可得出表2前六列.表中 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别表示正三角形、正方形、圆形和正六边形蜂窝.通过理论计算得出每种模型的雷诺数Re,用来判断流

体类型,以表中数据建立相应的模型,导入FloEFD中进行热仿真,得出在不同实验参数下LED汽车前大灯的最高温度,将其填入表2中.

表2 LED汽车前大灯正交实验安排

Table 2 The orthogonal experiment table of LED headlamps

Times	A	B/mm	C/mm	D/mm	E/mm	T/°C	Re
1	A_1	2	0.5	15	60	83.26	337(CL)
2	A_1	4	1	20	70	91.63	674(CL)
3	A_1	6	1.5	25	80	95.48	1012(CL)
4	A_1	8	2	30	90	100.8	1349(CL)
5	A_2	2	1	25	90	80.42	584(CL)
6	A_2	4	0.5	30	80	87.05	1168(CL)
7	A_2	6	2	15	70	99.86	1752(CL)
8	A_2	8	1.5	20	60	105.1	2336(CT)
9	A_3	2	1.5	30	70	79.13	584(CL)
10	A_3	4	2	25	60	85.29	1168(CL)
11	A_3	6	0.5	20	90	96.3	1752(CL)
12	A_3	8	1	15	80	103.5	2336(CT)
13	A_4	2	2	20	80	77.16	1168(CL)
14	A_4	4	1.5	15	90	84.04	2336(CT)
15	A_4	6	1	30	60	87.12	3505(CT)
16	A_4	8	0.5	25	70	93.98	4673(TL)

注:CL表示层流;CT表示层流和湍流均有;TL表示湍流.

通过正交实验极差分析并结合表1数据,整理可得A、B、C、D、E五个因素对温度的影响趋势(图6)和各个参数的极差表(表3).

表3 各个参数极差

Table 3 The range of different parameters

Parameters	A	B	C	D	E
Temperature range	7.60	20.85	1.79	4.14	0.73

4.2 分析与讨论

由图6(a)可知,当蜂窝类型孔为正六边形蜂窝时,LED汽车前大灯结构模型的温度最低,说明对于本结构而言,这四种蜂窝类型中,正六边形蜂窝的散热效果最好.这是由于在热传导一定的情况下,正六边形蜂窝结构的孔化率要比其它蜂窝结构的孔化率高,即该散热结构同空气的接触面积大于其它蜂窝结构,这样外界冷空气流经通风管时就能带走更多热量,基板温度自然就会下降.

由图6(b)可知,随着蜂窝孔等效直径的增加,基板温度增大.这是由于蜂窝孔等效直径的增加虽然使结构同空气的接触面积增加,但同时也让蜂窝变得稀疏,蜂窝壁面无法迅速将基板导出散去,导致大量热量会在管壁上堆积.因此,结构的温度会上升.

由图6(c)可知,随着蜂窝壁厚度的增加,基板最高温度先减小后增大.这是由于随着蜂窝壁厚度增加,热量能够快速传递到蜂窝结构,但是,在通风管截面一定

的情况下,蜂窝壁厚增加势必会引起孔化率降低,影响对流散热.所以,当通过热传导传递的热量大于对流散热损失的热量时,总体上散热是增强的,基板温度会下降,反之亦然.

图6(d)和(e)中基板最高温度变化趋势相似,都是先减小后增大,原因和图6(c)类似,不同之处在于它们是通过影响进风口和出风口之间的压降影响气体流速进而导致对流发生变化,这里不再赘述.

由表3可知,不同因素对该系统的散热影响效果不一样.根据正交优化实验原理:极差越大的因素,对

目标(这里表现为散热效果)的影响也越大.因此,各因素对散热效果影响的次要顺序为: $B \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E$.这就要求在建立模型时应率先考虑蜂窝等效直径 B ,而后依次是蜂窝类型 A 、填充长度 D 、壁厚 C 和通风管长度 E .根据图6不难得出散热效果最好的因素组合为 $A_4B_1C_2D_3E_3$ (即蜂窝类型为正六边形,等效直径为2 mm,蜂窝壁厚为1 mm,蜂窝填充长度为25 mm,通风管长度为80 mm).这个组合并没有出现在表1所示的16个正交优化方案中,故需验证其是否是最佳方案.

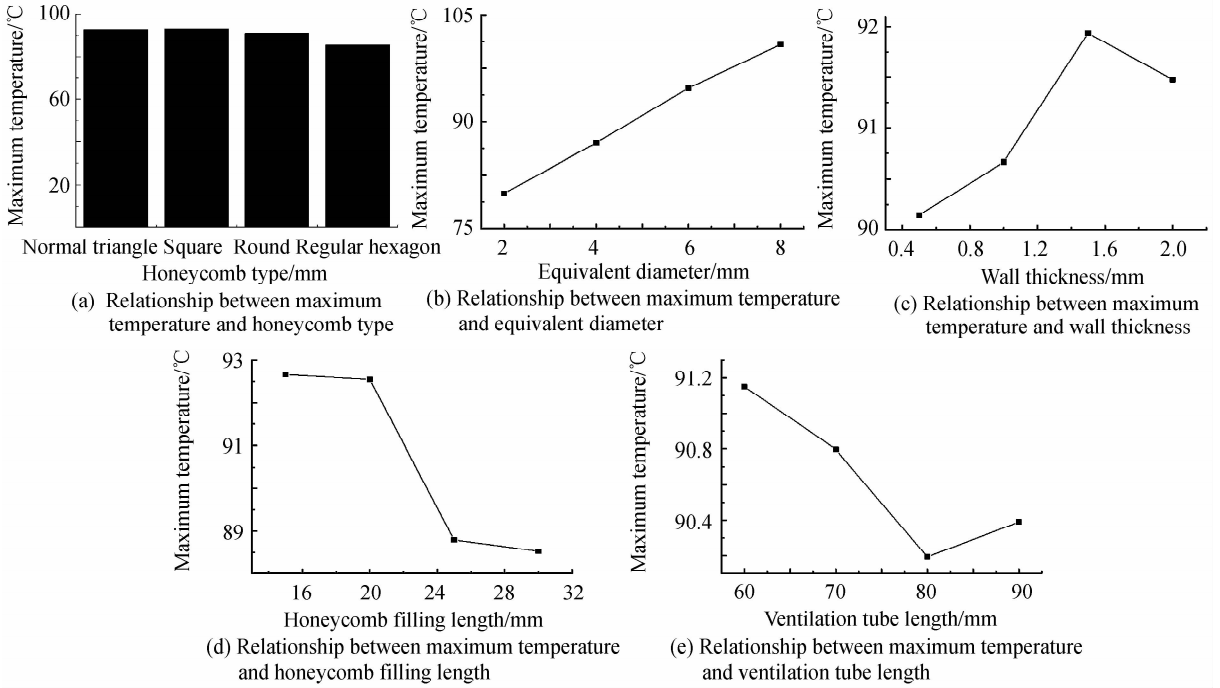


图6 不同因素和结构最高温度的关系

Fig. 6 Relationship between different factors and the structure of the maximum temperature

以组合 $A_4B_1C_2D_3E_3$ 为具体模型参数,建立相应模型如图7(a),仿真得到优化的LED汽车前大灯的模拟图如图7(b).由图可知,经过正交试验优化后LED汽车前大灯的最高温度为75.17°C,对比优化前的86.20°C,降低了11.03°C.显然,经过优化后,LED汽车前大灯的散热性能有了进一步的提升.

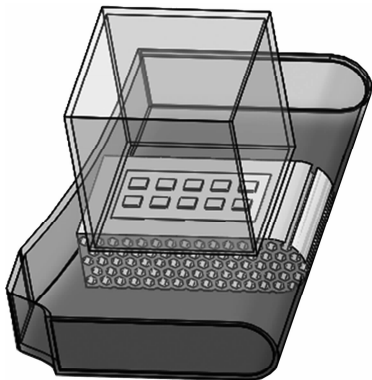


图7 优化后模型和温度分布云图

Fig. 7 Optimization model and simulation diagram

针对优化后的LED汽车前大灯散热结构,研究基板温度与进风口风速的关系,在FloEFD中,模拟通风管进风口风速从0.3m/s到10 m/s,得到基板温度见表4.

表 4 温度与风速的数据样本

Table 4 Data samples of temperature and wind speed

$v/(m \cdot s^{-1})$	0.3	0.5	1.0	1.5	2.5
$T/^\circ C$	130.5	116.4	98.6	90.6	83.2
$v/(m \cdot s^{-1})$	3.5	5.0	6.5	8.0	10
$T/^\circ C$	77.9	75.1	73.5	72.4	71.5

由表 4 可知,基板温度和风速并非简单的线性关系,当风速低于 5m/s 时,温度随着风速的增大而急剧降低;风速高于 5 m/s 时,温度下降趋势相对缓慢. 风速等于 5 m/s 时,温度降为 75.1 $^\circ C$,在安全温度范围内,此时可以关闭无叶风扇;反之,当汽车行驶产生的气流低于 5 m/s 时,则需要开启无叶风扇.

5 结论

本文对 LED 汽车前大灯散热器进行了设计与优化,将无叶风扇运用于散热器设计中,讨论了汽车静止和行驶两种情况的散热. 建立模型,对其进行热仿真,得到 LED 结温温度为 148 $^\circ C$. 采用在通风管中填充蜂窝结构的改进方案,将 LED 汽车前大灯的温度降为 86.20 $^\circ C$. 利用正交实验对散热系统进行优化,得到最佳参数组合,以此建立相应的结构模型. 仿真结果表明:优化后的温度为 75.17 $^\circ C$,比优化前降低了 11.03 $^\circ C$,系统散热性能进一步提升. 最后,分析了该结构的基板温度与风速的关系,当风速低于 5 m/s 时,温度随着风速的增大急剧降低,当风速高于 5 m/s 时,温度下降趋势相对缓慢.

参考文献

- [1] SANDERSON S W, SIMONS K L, WALLS J L, *et al.* Lighting industry: structure and technology in the transition to solid state[J]. *Social Science Research Network Electronic Journal*, 2008:16-17.
- [2] FAN A, BONNER R, SHARRATT S, *et al.* An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes [J]. *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement & Management Symposium*, 2012:319-324.
- [3] JANG S W, LEE Y L. A study on the thermal performance of automotive LED head lamps with synthetic jet [J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, **11**(5): 3294-3298.
- [4] SANG J P, LEE Y L. Study on the development of high-efficiency, long-life LED fog lamps for the used car market[J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2014, **15**(4): 201-206.
- [5] WANG J, CAI Y X, ZHAO X J, *et al.* Thermal design and simulation of automotive headlamps using white LEDs[J].

Microelectronics Journal, 2014, **45**(2): 249-255.

- [6] WANG Xiao-qing. The application of Reynolds number in biology [J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science)*, 2003, **21**(5): 67-69.
王晓青. 雷诺数及其生物学意义[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2003, **21**(5): 67-69.
- [7] WANG Bo. Optimum design of multi-functional orthotropic honeycomb materials[J]. *Acta Material Composite Sinica*, 2008, **25**(3): 202-209.
王博. 正交各向异性蜂窝材料多功能优化设计[J]. 复合材料学报, 2008, **25**(3): 202-209.
- [8] WANG Jin-liang, YE Ren-guang. Optimal design of sunflowers radiator based on chimney effect [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2014, **1**(21): 103-104.
王金亮, 叶仁广. 基于烟囱效应的太阳花型散热器的优化设计[J]. 机电信息, 2014, **1**(21): 103-104.
- [9] WANG R T, WANG J C. Optimization of heat flow analysis for exceeding hundred watts in HI-LEDs projectors [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, **67**: 153-162.
- [10] YUNG K C, LIEM H, CHOY H S, *et al.* Thermal investigation of a high brightness LED array package assembly for various placement algorithms [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **63**(1): 105-118.
- [11] LIU Jiao, LIU Juan-fang, CHEN Qing-hua, *et al.* Thermal management of novel 12W LED bulb for the substitution of 100W incandescent bulb [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014(7): 866-871.
刘娇, 刘娟芳, 陈清华, 等. 替代 100 白炽灯的新型 12W LED 球泡灯的散热性能研究[J]. 发光学报, 2014 (7): 866-871.
- [12] CHEN Jie, CHEN Zhong, LI Xiao-hong, *et al.* Heat dissipation modeling research of high power LED spot lamp for lighting[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **38**(1): 60-64.
陈杰, 陈忠, 李小红, 等. 照明用大功率 LED 射灯散热建模研究[J]. 半导体技术, 2013, **38**(1): 60-64.
- [13] WANG Han-xiang, ZHAN Min, XU Hai-zhen. Fluid analysis and optimization of circular export of the non-leaf fan [J]. *Fluid Machinery*, 2013, **41**(5): 19-21.
王旱祥, 詹敏, 徐海珍. 无叶风扇绕环出口分析与优化[J]. 流体机械, 2013, **41**(5): 19-21.
- [14] WANG Bo. Optimum design of multi-functional orthotropic honeycomb materials[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, **25**(3): 202-209.
王博. 正交各向异性蜂窝材料多功能优化设计[J]. 复合材料学报, 2008, **25**(3): 202-209.
- [15] ZHENG P, LIU H, WANG J, *et al.* Optimization of experimental conditions by orthogonal test design in a laser-induced breakdown experiment to analyze aluminum alloys [J]. *Analytical Methods*, 2014, **6**(7): 2163-2169.