

大功率LED车灯风冷散热系统性能优化研究*

陈从平¹, 马超^{1**}, 尹丽伟², 张屹¹, 陈小春²

(1. 常州大学机械与轨道交通学院, 江苏常州 213164; 2. 常州星宇车灯股份有限公司, 江苏常州 213022)

摘要: 大功率LED车灯采用风扇进行强制对流散热, 针对风扇周边空间尺寸影响车灯散热性能的问题, 采用有限元仿真、均匀设计法及响应面分析相结合的研究方法进行优化研究。首先, 利用有限元软件FloEFD研究了风扇护风罩与壁面的径向距离 A 、风扇入风口与壁面的距离 B 及风扇出风口与散热器的距离 C 三个设计参数对大功率LED车灯风冷散热系统散热性能的影响; 然后, 使用均匀设计法设计试验方案进行响应面分析并拟合出三个参数与LED焊点温度之间的回归模型, 利用Pareto分析法确定三个参数对系统散热性能的影响大小; 最后, 利用Minitab软件的响应优化器, 以LED结温最小化为目标, 确认三个参数的最佳组合是 A 为8.4 mm、 B 为16.3 mm、 C 为4.3 mm。通过对最佳组合进行实验, 表明此组合具有最优的散热性能, 同时仿真和实验结果具有一致性, 验证了仿真的可靠性。

关键词: 发光二极管车灯; 有限元仿真; 响应面法; 风冷散热

中图分类号: TN41; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0034-08

Performance Optimization of Air-cooled Cooling System for High Power LED Headlights

CHEN Congping, MA Chao, YIN Liwei, ZHANG Yi, CHEN Xiaochun

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213164, CHN; 2. Changzhou Xingyu Auto Lamp Co., LTD, Changzhou Jiangsu 213022, CHN)

Abstract: High-power LED headlights adopt fans for forced convection heat dissipation. Aiming at the problem that the size of the surrounding space of fans could affect the heat dissipation performance of headlights, finite element simulation, uniform design method and response surface analysis were combined to carry out the optimization research. Firstly, the finite element software FloEFD was used to study the influence of three design parameters on the heat dissipation performance of the high-power LED headlight air cooling system: the radial distance between the fan shield and the wall (A), the distance between the fan inlet and the wall (B), and the distance between the fan outlet and the radiator (C). Then, the uniform design method was used to design the test scheme for response

收稿日期: 2022-09-21

* **基金项目:** 国家自然科学基金(51875053); 国家重点研发计划课题(2018YFC1903101); 江苏省产业前瞻与关键核心技术——碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022044)

作者简介: 陈从平(1976—), 男, 博士, 教授, 研究领域为微尺度流体动力学与3D打印;

马超(1998—), 男, 硕士研究生, 研究领域为流体动力学与车灯热设计; (E-mail: Mchao10756@163.com)

尹丽伟(1988—), 男, 高级工程师, 研究领域为车灯力学设计与车灯热设计。

** **通讯作者**

surface analysis, and the regression model between the three parameters and LED solder joint temperature was fitted, and the influence of the three parameters on the system heat dissipation performance was determined by Pareto analysis method. Finally, the response optimizer of Minitab software was used to minimize the LED junction temperature, and the optimal combination of three parameters was confirmed to be 8.4 mm for A, 16.3 mm for B, and 4.3 mm for C. Through the experiment of the best combination, it showed that the combination had the best heat dissipation performance. At the same time, the simulation and experimental results were consistent, verifying the reliability of the simulation.

Key words: LED headlight; finite element simulation; response surface method; air cooling

引言

近年来,LED光源因其节能环保、响应速度快、可靠性高、使用寿命长^[1-2],且能够提高汽车耐久性和舒适性等优点^[3],已逐步取代卤素灯、氙气灯等传统光源,成为车用照明领域的主要光源^[4-5]。LED芯片的大部分能量会转换为热量,热量过高将会缩短LED的使用寿命甚至损坏芯片,因此必须采用合理的散热方式保证LED车灯正常工作^[6]。对于低功率的LED车灯,自然对流即可实现有效散热;而随着大功率LED车灯的广泛使用,仅依靠传统的被动散热不能够满足散热需求,因此需要增加主动散热方式^[7]。常见的主动散热方式包括热管、风冷及液冷散热,但热管散热的成本较高且导热能力有限,液冷散热成本高、结构复杂且可靠性差;相比于热管及液冷散热,风冷散热成本较低且可靠性更高,因此使用冷却风扇进行强制对流散热是当前大功率LED车灯首选的散热方式^[8-9]。

目前国内外研究者通过仿真模拟等方法对冷却风扇及其散热性能进行了大量的研究。Srinivasa等^[10]研究了冷却风扇和导流罩的设计参数对其散热性能的影响,结合CFD模拟和响应面法得到了风扇浸入比、扇芯距和导流罩倒角长度比的最佳取值。Kim^[11]对发动机冷却风扇外形进行单向流固耦合分析,研究了冷却风扇的性能和耐久性,采用改变冷却风扇叶片和后掠角的方法,通过对比实验确定了冷却风扇的最佳设计参数。Wilkinson等^[12]以某款M型纯转子轴流风扇为例,研究了叶尖间隙、叶片角度和轮毂配置对风扇性能的影响,表明在一定范围内,风扇性能与叶尖间隙成反比、与叶片角度成正比,且平板轮毂在低风速时可以显著提高风扇的性能。吴本南^[13]研究了风冷散热系统中风扇的安装方式,表明在产品的散热设计中,当受到空间结构

尺寸等条件限制时,可以调整冷却风扇与发热元件的间隔距离,以获得更好的散热效果。徐锦华等^[14]利用风筒仿真模型研究了环形风扇的轴向伸入距离及径向间隙对风扇性能的影响,并指出冷却风扇在风筒中不同的轴向伸入距离对径向间隙的要求不同。杨丽君等^[15]利用仿真方法研究了风扇安装位置对整车冷却能力的影响,表明当散热器与机体距离不变时,风扇与散热器的距离对散热器冷却能力的影响十分显著。

上述研究方法都是通过优化风扇结构或改变风扇与热源的距离来提高散热效果,未考虑风扇周边空间尺寸对其散热性能的影响。文章采用数值仿真方法研究了风扇护风罩与壁面的径向距离、风扇入风口与壁面的距离及风扇出风口与散热器的距离三个设计参数对大功率LED车灯风冷散热系统散热性能的影响。采用均匀设计法和响应面法对三个设计参数进行试验设计,拟合出三个参数与LED焊点温度 T_s 之间的回归方程并确定三个参数对系统散热性能的影响大小。最后利用响应优化器得出三个设计参数的最佳组合方案,有效提高风冷散热系统的散热性能。

1 模型构建

文章以某款LED车灯的风冷散热系统为例进行优化研究,其实物模型如图1(a)所示。该散热系统采用V型散热器并使用冷挤压工艺,相比传统铸铝工艺散热器,其导热性能有很大改善,搭配安装在散热器底部的轴流风扇,能够有效提高系统的散热性能。使用UG软件对大功率LED风冷散热系统进行建模,由于车灯结构较复杂,为了减少计算量及方便仿真结果分析,最终建立的简化模型如图1(b)和1(c),主要包括LED、PCB板、散热器、风扇支架、风扇护风罩、风扇扇叶以及风扇转子。

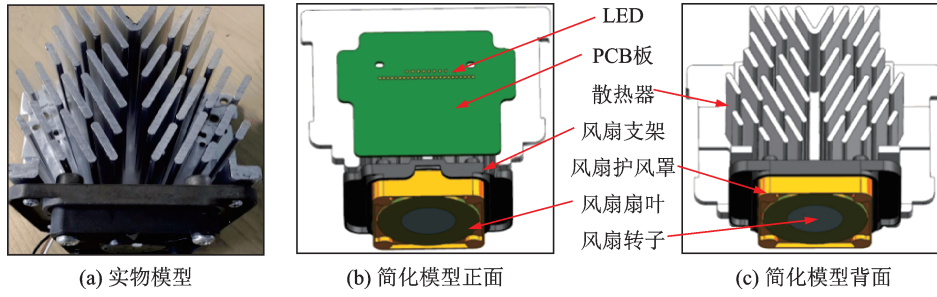


图1 LED风冷散热系统

Fig.1 LED air cooling system

文章主要考虑风扇护风罩与壁面的径向距离、风扇入风口与壁面的距离及风扇出风口与散热器的距离三个设计参数对大功率LED风冷散热系统散热性能的影响。图2为风扇散热系统设计参数示意图,风扇护风罩与四周壁面径向距离相等,令径向距离为 A 、风扇入风口与壁面的距离为 B 、风扇出风口与散热器的距离为 C , A 、 B 、 C 的初始值分别为3 mm、10 mm、3 mm,此工况下通过仿真得到LED焊点温度 T_s 为128.7℃。

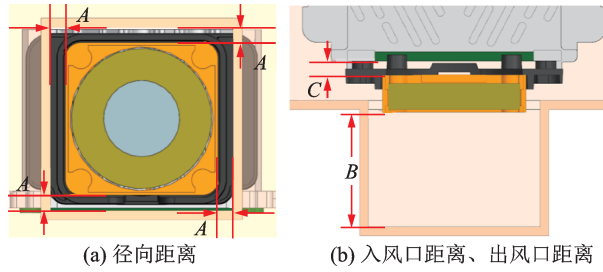


图2 设计参数示意图

Fig.2 Schematic of design parameters

2 单因素仿真分析

使用有限元软件FloEFD仿真分析 A 、 B 、 C 三个因素对大功率LED车灯散热性能的影响,计算过程将空气视为不可压缩流体并遵守以下方程:

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2)动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \Delta u \\ \rho \left(\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \Delta v \\ \rho \left(\frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \Delta w - \rho g \end{aligned} \quad (2)$$

(3)能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (3)$$

式中: u 、 v 、 w 分别是 x 、 y 、 z 轴坐标的速度矢量; P 表示压强; ∇ 是哈密顿算子; Δ 是拉普拉斯算子; g 为重力加速度; μ 是动力粘度; T 是温度; c_p 是比热容; k 是导热率; S_T 为粘性耗散项。

LED结温 T_j 是衡量优化效果的标志,其计算式为:

$$T_j = T_s + P \times \eta \times R_{th} \quad (4)$$

式中: T_s 为LED焊点温度; P 、 η 和 R_{th} 分别为LED的功率、热转换效率和热阻。

由于同规格LED的功率、热转换效率及热阻是相同的,则根据式(4)可知,LED结温 T_j 与焊点温度 T_s 的增量具有一致性。为了减少工作量,以焊点温度 T_s 表征风冷系统的散热性能。

2.1 仿真条件设置

为了保证仿真计算结果的准确性,首先进行网格无关性验证,采用矩形自适应网格技术生成六面体网格进行仿真计算。结果表明,当网格数量从100万增加到250万时, T_s 温度降低了6℃;当网格数量从250万增加至500万时, T_s 温度变化小于0.5℃。因此,综合考虑计算精度和计算时间,仿真计算在网格数量250万条件下进行。

采用基于有限体积法的离散数值技术,选择蒙特卡罗辐射模型;环境温度为70℃,外壁面与环境的热交换系数为10 W/(m²·K);重力加速度方向为 Z 方向,大小取9.81 m/s²;32颗LED采用体积热源方式计算,单颗LED的功率为1.5 W;风冷散热系统主要部件的材料热物性参数设置见表1。本研究选用某款5015型轴流风扇,即风扇护风罩的尺寸为长50 mm、宽50 mm、厚度为15 mm。该风扇的风量为0.34 m³/min,转速为5 000 r/min,最大风压为40 Pa。

表1 风冷散热系统主要部件的材料热物性

Tab.1 Thermal and physical properties of the main components of the air-cooled cooling system

零部件	材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$
PCB板	MCPCB-Cu	2 700	131(轴向) 362(径向)	870
风扇护风罩	PC	1 200	0.2	1 530
散热器	冲压铝	2 707	220	820
风扇扇叶	PC	1 200	0.2	1 530
风扇支架	压铸铝	2 680	113	963
风扇转子	PC	1 200	0.2	1 530

2.2 结果分析

通过控制变量法分别改变A、B、C三个距离参数进行仿真分析,探究三个参数对大功率LED车灯风冷散热系统散热性能的影响。

图3~图4分别为不同径向距离A对散热性能的影响及其对应风速矢量云图。可见径向距离从0增加到4 mm时散热器表面风速从1.1 m/s增加到4 m/s,LED的 T_s 温度下降了6.5 °C;当径向距离继续增大时,散热器表面风速变化微弱, T_s 变化很小,可以忽略。

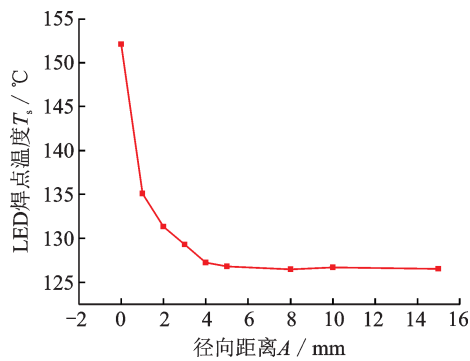


图3 径向距离A对温度影响

Fig.3 Effect of radial distance A on temperature

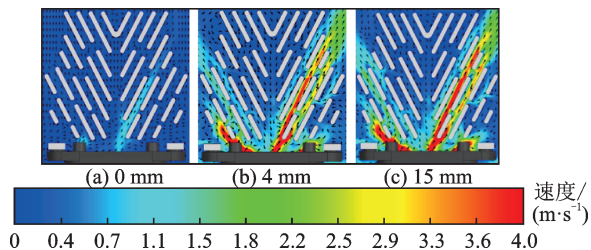


图4 不同径向距离速度矢量云图

Fig.4 Velocity vector cloud images with different radial distances

图5~图6分别为不同入风口距离B对散热性能的影响及其对应风速矢量云图,可见入风口距离从1 mm到8 mm时散热器表面风速显著增加,LED的 T_s 温度从133.5 °C下降到127.5 °C,这是由于散热器表面风速越快,对流换热能力越强;当入风口距离超过8 mm后,散热器表面风速与8 mm时相比波动较小, T_s 下降不足0.5 °C。

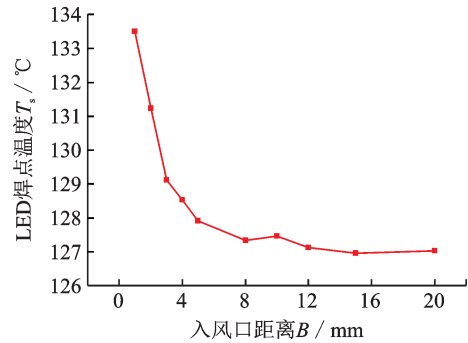


图5 入风口距离B对温度影响

Fig.5 Effect of inlet distance B on temperature

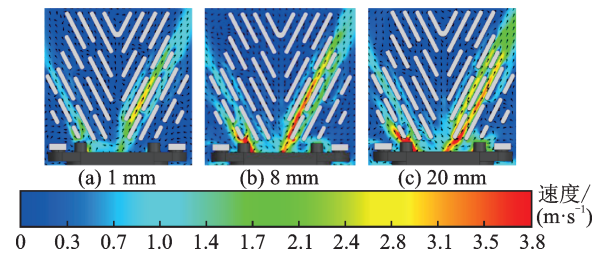


图6 不同入风口距离速度矢量云图

Fig.6 Velocity vector cloud images with different inlet distances

图7~图8分别为不同出风口距离C对散热性能的影响及其对应风速矢量云图,可见出风口距离从2 mm增加到8 mm时,散热器表面风速变化较弱,LED的 T_s 温度有上下波动的趋势;当出风口距离从8 mm增加到20 mm时,散热器表面风速明显降低,散热器换热能力持续减弱, T_s 温度升高4 °C。

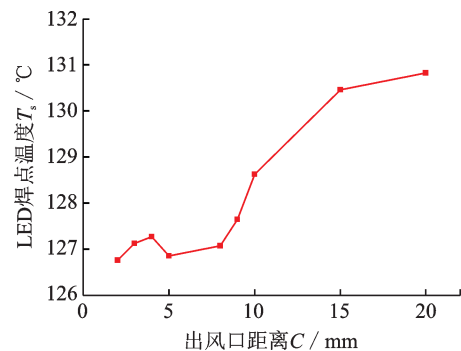


图7 出风口距离C对温度影响

Fig.7 Effect of outlet distance C on temperature

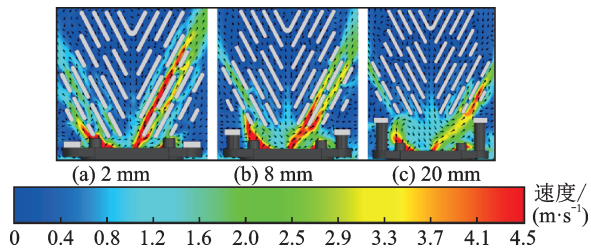


图 8 不同出风口距离速度矢量云图

Fig.8 Velocity vector cloud images with different air outlet distances

通过以上分析表明, A 、 B 、 C 三个参数均对风冷散热系统的散热性能存在不同程度的影响。而实际上,以上三个设计参数对系统散热性能的影响并不是独立的,整体散热性能是它们耦合影响和作用的结果。因此,文章采用均匀设计法及响应面法展开进一步的优化设计研究,确定 A 、 B 、 C 三个参数的最优组合,提高风冷散热系统的散热性能。

3 优化设计

响应面法的原理是建立一个回归方程有效表示响应变量与影响因素之间的函数关系,通过分析影响因素在有限范围内对响应变量的影响,实现对响应变量的优化^[16]。针对文章 A 、 B 、 C 三个设计参数对车灯散热性能的非线性耦合影响,构造二阶响应模型为:

$$Y(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 \quad (5)$$

式中: β_0 是常数项; β_i 表示变量线性效应; β_{ij} 是交互项效应; β_{ii} 表示二次效应; k 是输入变量个数; X_i 为输入变量。文章中共有 3 个输入变量,分别为距离 A 、 B 、 C 。

3.1 试验方案

根据以上单因素仿真分析得到的结果,将三个设计参数作为考察变量进行优化研究,各设计参数的取值范围见表 2。

表 2 设计参数取值范围

Tab.2 Value range of designed parameters

设计参数/mm	取值范围
径向距离 A	[5, 12]
入风口距离 B	[6, 21]
出风口距离 C	[2, 9]

为了降低试验量且不失一般性,采用均匀设计法设计试验方案,其中入风口距离 B 划分为 16 水平,径向距离 A 和出风口距离 C 各划分为 8 水平,运用拟水平方法按照 3 因素 16 水平混合水平均匀设计表 $U_{16}(16^3)$ 进行试验方案设计。试验参数和模拟仿真结果见表 3。

表 3 均匀设计试验方案

Tab.3 Uniform design test plan

方案	A /mm	B /mm	C /mm	$T_s/^\circ\text{C}$
1	6	20	4	126.77
2	7	7	8	128.96
3	5	17	9	129.71
4	8	19	7	127.33
5	7	13	6	126.32
6	6	14	3	126.92
7	5	9	5	127.87
8	10	21	6	127.39
9	12	8	7	129.53
10	10	6	3	129.40
11	12	18	2	127.23
12	11	12	4	126.72
13	9	16	5	126.36
14	11	15	8	129.38
15	9	11	9	129.63
16	8	10	2	128.30

3.2 响应面分析

根据表 3 的试验设计及仿真结果,将径向距离 A 、入风口距离 B 、出风口距离 C 分别作为输入变量,LED 的焊点温度 T_s 作为响应变量,利用软件 Minitab 对试验数据进行响应曲面分析,得出的方差分析结果见表 4。由表 4 中数据可知,整个模型对应的 F 值为 54.63、 P 值为 0.000 小于显著性水平 0.05,因此可以判定回归模型是显著有效的;而交互项 AB 的 P 值为 0.996,远大于显著性水平,表明交互项 AB 与响应变量 T_s 的关联性不显著。为了简化响应面模型,后续分析将不考虑此项。

图 9 为拟合模型的残差图,残差正态概率图中的点分布在一条直线附近,表明拟合模型的残差符合正态分布;残差与拟合值图中散点随机分布在 0 水平线两侧,残差最大值仅为 0.35 且没有呈现喇叭型或漏斗型,证明拟合模型具有常量方差,表明拟合结果具有较高可靠性。

由以上分析可得输入变量 A 、 B 、 C 与响应变量 T_s 之间回归模型为:

表4 模型方差分析
Tab.4 Model variance analysis

来源	DF	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	9	23.766 4	2.640 71	54.63	0.000
线性	3	10.745 9	3.648 64	75.49	0.000
A	1	0.636 8	0.636 83	13.18	0.011
B	1	2.936 3	2.936 32	60.75	0.000
C	1	7.794 9	7.794 87	161.27	0.000
平方	3	9.299 9	3.099 96	64.14	0.000
A ²	1	1.660 8	1.660 79	34.36	0.001
B ²	1	2.885 9	2.885 86	59.71	0.000
C ²	1	7.298 4	7.298 42	151.00	0.000
双因子交互作用	3	2.644 4	0.881 48	18.24	0.002
AB	1	0.000 1	0.000 09	0.00	0.966
AC	1	1.163 9	1.163 89	24.08	0.003
BC	1	1.518 6	1.518 62	31.42	0.001
误差	6	0.290 0	0.048 33		
合计	15	24.056 4			

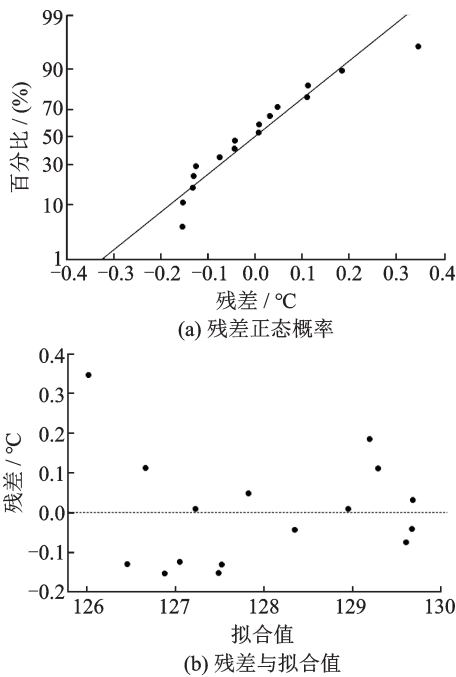


图9 响应面模型残差图

Fig.9 Model residual plot of response surface

$$T_s = 145.51 - 1.546A - 0.9327B - 2.557C + 0.0765A^2 + 0.02393B^2 + 0.1715C^2 + 0.0608AC + 0.03471BC \quad (6)$$

进一步,图10为输入变量与响应变量的 Pareto 图。由 Pareto 分析法可知,出风口距离 C 对 LED 的 T_s 影响最大,其次是风扇入风口距离 B,径向距离 A 对 T_s 影响最小。在设计过程中,应抓住主要影响因素,优先考虑风扇出风口与散热器的距离。

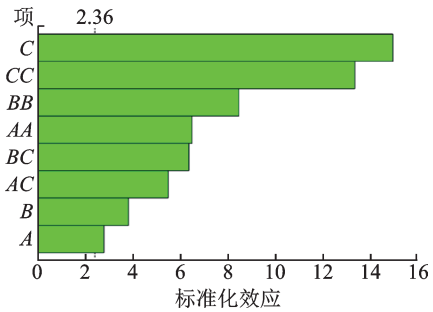


图10 影响因素 Pareto 图

Fig.10 Pareto diagram of influencing factors

3.3 响应优化器预测

由回归模型(6)可知,二次项系数为正值。通过求解此二阶回归模型进行响应优化器预测,能够得到 LED 焊点温度 T_s 的最小值及其对应距离 A、B、C 的分别取值。图11为模型(6)的预测结果,可见风扇径向距离 A 为 8.4 mm,入风口距离 B 为 16.3 mm,出风口距离 C 为 4.3 mm 时,LED 的 T_s 温度可以达到最小值 125.9 °C。

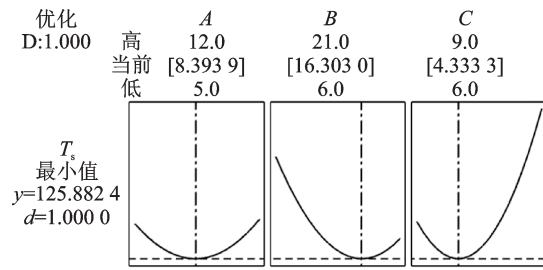


图11 响应优化器预测

Fig.11 Response optimizer prediction

4 优化方案验证

4.1 仿真分析

将 A、B、C 分别设为 8.4 mm、16.3 mm、4.3 mm 进行仿真,图12所示为仿真结果温度云图。抽取的 LED 的 T_s 为 126.1 °C,而据模型(6)预测结果为 125.9 °C,预测结果与仿真结果相差 0.2 °C,表明响应面优化模型预测结果具有较高的准确性。

风冷散热系统优化前后各设计参数及仿真结果如表5所示。由表可知,经过对设计参数 A、B、C 的优化后,LED 焊点温度 T_s 降低了 2.6 °C,即 LED 结温 T_j 降低了 2.6 °C,故而验证了通过优化可有效提高风冷散热系统的散热性能。

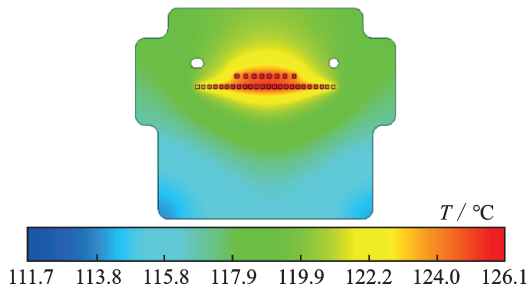


图 12 仿真温度云图

Fig.12 Simulation of temperature cloud map

表 5 优化前后设计参数及仿真结果

Tab.5 Designed parameters and simulation results before and after optimization

工况	A/mm	B/mm	C/mm	$T_s/^\circ\text{C}$
优化前	3	10	3	128.7
优化后	8.4	16.3	4.3	126.1

4.2 实物验证

根据图 12 云图中温度的分布进行布点测温,如图 13 所示。使用两根 K 型热电偶分别测量 Ch1 和 Ch2 两颗 LED 的焊点温度,为了防止热电偶脱落影响测试结果,使用 AB 胶将热电偶固定在 PCB 板上。

测温过程中,首先将烘箱温度设置为 70°C ,将热电偶另一端插入数据采集器,点亮 LED 并开始扫描。等待约 120 分钟,车灯内各零部件温度达到稳定状态,停止测试。根据测试数据可知,达到稳态时 Ch1 和 Ch2 两颗 LED 的焊点温度 T_s 最大值为 127.2°C ,实际测试的 T_s 与仿真结果相比浮动约 1.1°C ,证实了仿真结果的可靠性,而误差主要来源于实验时无法排除环境因素变化带来的影响。根据 LED 规格书可知,该 LED 的热阻 R_{th} 为 5.4 K/W ,热转换效率 η 取 0.8;因此,将测试的 T_s 代入式(4)可得 LED 结温 T_j 为 133.7°C ,远小于 LED 的耐温 150°C ,可以确保该车灯的正常工

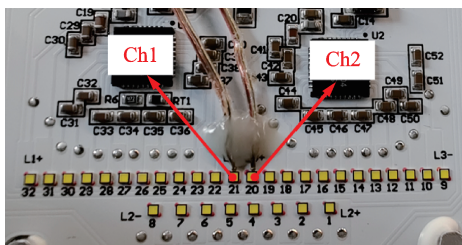


图 13 LED 测温点布置

Fig.13 Arrangement of LED temperature measurement points

5 结 论

大功率 LED 车灯的散热效果是衡量车灯整体性能的重要指标。冷却风扇周边空间尺寸与大功率 LED 车灯风冷散热系统的散热性能密切相关。文章通过对风扇护风罩与壁面的径向距离、风扇入风口与壁面的距离及风扇出风口与散热器的距离三个影响因素进行研究,得出如下结论:

(1) 采用控制单因素法得到了风扇护风罩与壁面的径向距离 A 、风扇入风口与壁面的距离 B 及风扇出风口与散热器的距离 C 三个设计参数对大功率 LED 车灯风冷散热系统散热性能的影响。当径向距离 A 大于 5 mm 、入风口距离 B 大于 8 mm 、出风口距离 C 在 2 mm 到 9 mm 时,散热系统表现最佳。

(2) 利用 Pareto 分析法确定了三个设计参数对系统散热性能的影响大小,并得出出风口距离 C 为主要影响因素,其次是入风口距离 B ,径向距离 A 对系统散热性能影响最小。

(3) 通过求解响应面优化结果的回归模型进行响应优化器预测,确定了三个设计参数的最佳组合方案为径向距离 8.4 mm 、入风口距离 16.3 mm 、出风口距离 4.3 mm ,可使 LED 结温 T_j 降低 2.6°C ,有效提高了风冷散热系统的散热效果。

基于某款 5015 型轴流风扇研究了风扇径向距离、入风口距离及出风口距离对风冷系统散热性能的影响。虽然未考虑风扇本身性能及其他风扇对风冷散热系统的影响,但后续相关研究可以参照文中的研究方法进行。

参 考 文 献

- [1] Kwag D S, So S H, Baek S M. Study on thermal and structural stability of high power light-emitting diode lighting system[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2014, 14(5): 3564-3568.
- [2] Wang W, Zou J, Zheng Q, et al. The effect of different filament arrangements on thermal and optical performances of LED bulbs[J]. Applied Sciences, 2020, 10(4): 1373.
- [3] Long X, He J, Zhou J, et al. A review on light-emitting diode based automotive headlamps[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 29-41.
- [4] 林 灏. 国内外 LED 车灯发展状况分析[J]. 民营科技, 2016, 11: 225.
- [5] 刘 珂, 付宗国. 汽车照明系统现状及未来发展[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(1): 142-144.
- [6] 刘东静, 王浩洁, 樊亚松, 等. LED 汽车前照灯散热结构设计与分析[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(7): 63-68.
- [7] 郭聪慧. 基于发光二极管的汽车前照灯散热研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [8] 李俊清. 新型 LED 汽车车灯的设计研究[J]. 科技资讯, 2019, 17(6): 74+79.

[9] 吴启明. LED智能汽车前照灯的传热性能优化研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2021.

[10] Srinivasa V K, Srinivasa R S, Shome B. Design of experiments enabled CFD approach for optimizing cooling fan performance [C]. SAE 2014 World Congress and Exhibition, Detroit, USA, 2014.

[11] Kim S C. Optimal design using flow-structure interaction analysis method of engine generator cooling fan[J]. Journal of the Korean Institute of Gas, 2020, 24(3): 47-53.

[12] Wilkinson M B, van der Spuy J, von Backström T W. Performance testing of an axial flow fan designed for air-cooled heat exchanger applications [C]. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, American Society of Mechanical Engineers, Prague, Czech Republic, 2018, 50985: V001T09A005.

[13] 吴本南. 风冷散热系统风机安装方式研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(10): 87-90+96.

[14] 徐锦华, 倪计民, 石秀勇, 等. 车用冷却风扇安装位置对其性能影响的分析研究[J]. 汽车技术, 2012, 1: 1-5.

[15] 杨丽君, 辛志鹏, 曹原, 等. 风扇安装位置对整车冷却能力的影响研究[J]. 机电技术, 2018, 5: 89-92.

[16] Ren G, Heo S, Kim T H, et al. Response surface method-based optimization of the shroud of an axial cooling fan for high performance and low noise [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(1): 33-42.



征 稿 启 事

《光电子技术》创刊于1981年,季刊。由南京电子器件研究所主办,是国家级科技类学术期刊,连续被WJCI数据库收录,是中国科技核心期刊,中国学术期刊综合评价数据库来源期刊,中国科技论文统计源期刊,中国科学引文数据库来源期刊。

期刊征稿范围主要是具有原创性、先进性和应用价值的光电子和光学相关领域的创新性科学技术报告和论文,包括但不限于:光学信息获取、显示和处理,光子和光电子器件,传输与交换光子器件,应用光学,微纳光子学,光子集成技术与器件等,光学与光电子学技术。

投稿方式:请发电子稿(word版本)至邮箱:gdjs@chinajournal.net.cn和gdjstg@163.com。请作者在投稿时注明联系信息(邮寄地址,电话)。

本刊未与任何网站合作征稿。

根据相关国家标准及数据库入编要求,作者投稿时请注意以下要求:

(1)标题:中文标题控制在20个汉字以内,英文标题最多为400个字符;

(2)摘要:学术论文、研究报告的摘要应写明研究目的、方法、新的结果和结论。综述、评论性文章的摘要应简要说明论文内容的要点。摘要中不要使用多余的词语,尽量减少背景信息、工作意义,不希望出现公式、矩阵。英文摘要的长度不超过150个单词(含介词);

(3)关键词:3~8个。中文关键词应使用中文全称表示,尽量不采用英语缩略语。中、英文各关键词之间用分号隔开。在中、英文关键词的下方分别给出论文的中图分类号与EEACC(或PACC);

(4)基金项目:按照国家有关部门规定的正式名称写明基金项目,并在圆括号内注明其项目编号。多项基金项目应依次列出,其间用分号隔开;

(5)作者及其工作单位:作者姓名汉语拼音的写法为姓在前,名在后,姓氏的全部字母均大写,名字的首字母大写。工作单位需给出所有作者的工作单位全称、所在省市及邮政编码,英文部分还应在邮编之后加上国别代码“CHN”;

(6)电子信箱:应给出第一作者或联系人的E-mail,如第一作者为研究生,宜将导师作为联系人;

(7)插图与表格:应安排在文中的相应位置。图题、表题需中、英文对照,图、表内的中文词均改为英文,插图希控制在10幅以内;

(8)参考文献:请按GB/T7714—2005著录并标明文献类型:

a. 期刊:作者. 篇名(文题)[J]. 期刊名称, 出版年; 卷号(期号): 起止页

b. 专著:作者. 书名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页

c. 会议录、论文集:作者. 文题[C]. 文集编者. 会议录或论文集名, 出版地: 出版者, 出版年: 起止页

d. 学位论文:作者. 文题[D]. 学位授予单位, 编号或缩微制品序号, 年份

e. 文献中作者项:①姓在前,名在后,去缩写点;②3人以下应全列出,4人以上则只列出3人后再加上“等”(et al.)

f. 文献类型标识:

参考文献类型	论著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利	联机网络
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P	OL