

基于计算流体动力学的 LED 车前灯热优化设计

胡书红 余桂英 岑益超

(中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 针对大功率阵列 LED 车前灯的散热节能问题,以计算流体动力学为理论依据,采用 Ansys-icepak 建模,仿真时以模型几何参数为变量、模型最高温度和质量为约束函数、模型热阻为目标函数,分别对 LED 汽车前照灯的插片式鳍片、圆柱式鳍片两种被动散热结构单模组进行设计、仿真和优化,结果表明,在初始环境温度 85 °C 的相同边界条件下,优化后的插片式鳍片模型重量 0.2756 kg、最高温升 12.52 °C、热阻 1.026 °C/W,优于圆柱式鳍片模型,且符合 LED 车灯散热标准。整灯设计时,在车灯组前方底部设置进气格栅,在后上侧设置出气口,利用汽车向前行驶而产生的反方向风速加强内部对流,使车速在一档内的 2 m/s 时整体温升就低于 10 °C,有效提高了散热效率。

关键词 热学系统;优化设计;计算流体动力学;LED 车前灯;Ansys-icepak

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s116004

Thermal Optimized Design of LED Headlamp Based on CFD

Hu Shuhong Yu Guiying Cen Yichao

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract The paper focuses on the heat dissipation efficiency problem existed with LED automobile headlamps. Based on computational fluid dynamics, Ansys-icepak is used to build plug-in fin and cylindrical fin models for LED headlamp heat dissipation structures. During simulation and optimization, the model's geometric parameters are set as variables, highest temperature and mass are set as constraint functions, thermal resistance is set as objective function. The result indicates that under the same boundary condition with 85 °C initial temperature, the plug-in fin model has mass of 0.2756 kg, temperature rise of 12.52 °C and thermal resistance of 1.026 °C/W, which is better than cylindrical fin model, and accords with the heat dissipation standard of LED headlamp. During design in headlamps, an input air grill and an outlet are arranged at the front bottom and upper back of the headlamp respectively, the opposite direction wind generated from the moving automobile is taken to strengthen internal convection. The results show that when velocity is 2 m/s in grade one, the temperature rise is less than 10 °C, which reflects higher heat dissipation efficiency.

Key words thermal system; optimization design; computational fluid dynamics; LED headlamp; Ansys-icepak

OCIS codes 140.6810; 220.4830; 230.0250; 350.6830

1 引言

发光二极管(LED)因亮度高、能耗低、寿命长、方向性好、响应快、绿色环保等优点作为第四代车灯光源进军汽车照明市场^[1~3],已被广泛应用在组合仪表、阅读灯等车辆内照明和刹车灯、方向灯等外部

照明中,但 LED 车前灯目前尚未普及应用。功率型 LED 尺寸小、光效低、热流密度高^[4,5],而 LED 汽车前照灯一般为阵列式 LED 模组,光源的密集排列、车灯内部的高温环境,使热问题成为制约其量产的主要因素,有效的热设计是 LED 车前灯要解决的关

收稿日期: 2012-01-12; **收到修改稿日期**: 2012-04-20

基金项目: 浙江省重大科技专项计划(2011C12025)、浙江省科技计划(2008C21158)和浙江省研究生教育创新示范基地支持项目(YJ2008023)资助课题。

作者简介: 胡书红(1988—),女,硕士研究生,主要从事 LED 车灯热学系统设计方面的研究。

E-mail: liangyueleng@yahoo.com.cn

导师简介: 余桂英(1965—),女,硕士,教授,主要从事光学设计及精密仪器方面的研究。E-mail: yuguiming11@163.com

键技术之一。LED 车前灯的散热类型分被动式和主动式,主动式包括风冷、热管、液冷等技术^[6,7];主动散热效果因优于被动散热而成为目前 LED 前灯的主流散热方式,但高造价和高维护费用影响其普及。

数值模拟仿真法较实验分析法以将热问题发现在研发阶段、降低资金而占优。随计算机技术及数值计算方法的发展,计算流体动力学(CFD)被有效应用在 LED^[8]及其产品的散热设计中:ARIK 采用有限元(FEM)法分析 LED 芯片温度分布及局部高温对芯片有源层的影响;朱旭平等^[9]采用 FEM 研究功率型 LED 瞬态温度场及热应力分布的影响因数;王乐等^[8]基于 CFD 方法研究对流换热和热辐射对阵列式 LED 散热的影响;Yan Lai 等^[10,11]对阵列式 LED 汽车前灯设计自然及液冷散热结构,证明优化后液冷散热结构的可行性。当前 LED 及其产品散热系统设计中,数值仿真主要做芯片封装及周围温度场和流场分布,未将 LED 与所处环境一体化考虑;优化结构时一般多次取值仿真再利用正交实验法选择最优组合,主观性太强;多数研究人员采用 FEM 法分析结构热学,较有限体积(FVM)法工作量较大,且求解流动与换热问题时的对流项离散处理方法不够成熟。

本文基于 CFD,应用基于有限体积、稳健性更强的 Ansys-icepak,采用被动散热方式,对阵列式 LED 车前灯散热结构进行设计和优化;整灯设计中,结合散热环境,利用汽车前行产生的反方向风速通过格栅进入车灯内部,强化内部空气对流、提高散热效果。研究结果利于提高 LED 汽车前照灯散热效率,进而降低成本。

2 CFD 理论

构建的散热结构 CFD 模型包括质量方程、动量方程、能量方程和状态方程^[12],前三个方程可用通用变量方程表示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi, \quad (1)$$

式中四项分别为时间项、对流项、扩散项和源项。 ϕ 为特征变量,取不同变量时,(1)式对应不同的流体标准方程,如表 1 所示。其中 ρ 为流体密度; $\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$, u, v, w 为流速 \mathbf{u} 在 x, y, z 坐标方向的分量; μ 为流体动力粘度; i 为流体内能; λ 为导热系数; T 为流体温度; p 为流体压力; S_i 为热源; Φ 为粘性耗散的能量输运,其值为

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda \text{div}\mathbf{u}.$$

表 1 标准方程

Table 1 Standard equation

Equation	ϕ	Γ	S_ϕ
Conservation of mass	1	0	0
x-Conservation of momentum	u	μ	$-(\partial p/\partial x) + S_{M_x}$
y-Conservation of momentum	v	μ	$-(\partial p/\partial y) + S_{M_y}$
z-Conservation of momentum	w	μ	$-(\partial p/\partial z) + S_{M_z}$
Conservation of energy	i	λ	$-p\text{div}(\mathbf{u}) + \Phi + S_i$

流体状态方程选择湍流模型中的混合长度零方程^[13]:

$$\mu_t = \alpha l^2 S, \quad (2)$$

式中 μ_t 为紊流粘度; $l = \min(kd, 0.09d_{\max})$, 为混合长度; d 为模型到边界距离; k 为卡曼常数 0.419; $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, 为平均应变率张量; $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$, 为平均应变率。

本文的仿真区域为封闭车灯,湍流状态雷诺数较高,且流体均靠近壁面的边界层区域,流动较为复

杂。因此首先用边界层理论简化 CFD 模型;再基于 FVM 法,采用适用性较强的非结构化网格将车灯区域离散为一系列控制体积;然后在全隐式时间积分方案下,对 $\rho, \mathbf{u}, \Gamma, \Phi$ 做中心差分处理,对 S_ϕ 做线性化处理,线性插值后在控制体积上积分 CFD 控制方程,得到一阶迎风离散格式方程:

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S + a_T\phi_T + a_B\phi_B + b, \quad (3)$$

式中下标 S、N、W、E、T、B 分别表示控制体的前、后、左、右、上、下界面; $a_P = a_P^0 + a_E + a_W + a_S + a_N + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) + (F_t - F_b) - S_P\Delta V$; $a_W = D_w + \max(0, F_w)$; $a_E = D_e + \max(0, -F_e)$; $a_S = D_s + \max(0, -F_s)$; $a_N = D_n + \max(0, -F_n)$; $a_T = D_t + \max(0, -F_t)$; $a_B = D_b + \max(0, F_b)$; $a_P^0 = \rho_P^0 \frac{\Delta V}{\Delta t}$; $b = S_C\Delta V + a_P^0 + \phi_P^0$ 。最后采用 SIMPLE 算法迭代求解该离散方程。

3 建模、仿真及优化设计

3.1 车灯单模组结构方案

3.1.1 车灯 FVM 模型

本文的汽车前照灯单模组选用余桂英等^[14]设计的反射式光学系统模型作为研究对象,为其设计插片式和圆柱式两种被动式鳍片散热结构,灯杯后方设计成鳍片形状,并对其尺寸参数进行优化,如图1(a)、(b)所示。仿真优化时,根据《汽车用LED前照灯国家标准》(GB25991-2010)^[15]中要求以及OSRAM提供的LED芯片参数,为保证车灯目标光通量大于等于1000 lm,设置模型目标温升低于15℃、目标质量低于0.28 kg,以获得热阻最低的结构方案。模型优化前尺寸120 mm×100 mm×63 mm,由LED光源、MCPCB板、反射杯和散热器组成:光源由七颗1.25 W的OSRAM车用LED阵

列组成,光热转换效率80%;MCPCB板为55 mm×30 mm×1.5 mm各向异性基板,嵌入散热器中,缝隙采用导热硅脂填充,包含纵向和横向热阻,如图1(c)所示;散热器、反射杯采用Al6063-T5,表面氧化处理,辐射系数0.5。各部分材料热学性能参数见表2。

表2 材料热学性能参数

Table 2 Material thermal parameters

Components	Material	Thermal coefficient / ($\omega \cdot m^{-1} \cdot k^{-1}$)	
		Isotropy	Orthogonality ($x : y : z$)
Heat sink	Al6063-T5	207	1 : 1 : 1
Substrate	MCPCB	3	60 : 1 : 60
Contact surface	Heat conducting silicon	5	1 : 1 : 1

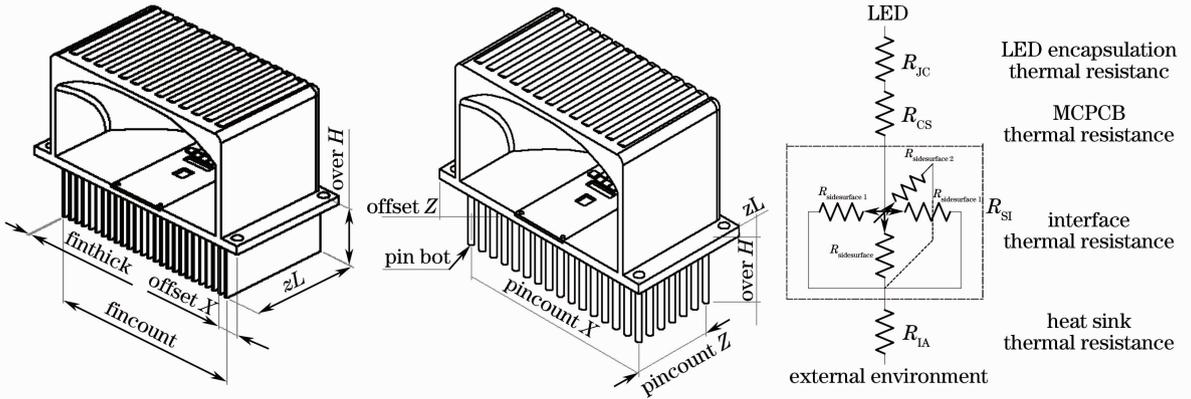


图1 单模组结构。(a)插片式;(b)圆柱式;(c)热阻网络

Fig.1 Single module. (a) Plug-in fin; (b) cylindrical fin; (c) heat resistance network

3.1.2 仿真及优化

参照台湾《照明用发光二极管元件与模组之一般寿命试验方法》(CNS 15247)^[16]中对寿命试验环境温度和空间的建议,仿真时将模型置于初始温度85℃的240 mm×460 mm×180 mm空间中;Ansys-icepak

算得其雷诺数为 2.8246×10^7 ,设为湍流状态;重力方向为光源朝向的反方向;模型采用非结构化网格。目标函数、约束函数、优化变量的设置及优化结果如表3、表4所示,其中,目标函数中的hsrth表示散热器热阻;约束函数中的 T_{max} 、hsms分别表示模型最

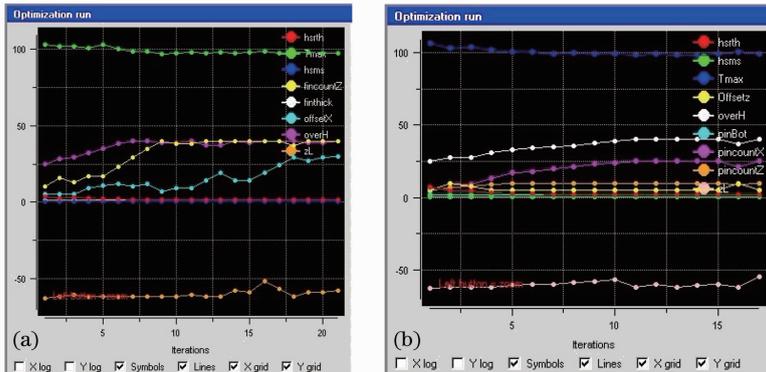


图2 单模组结构优化过程。(a)插片式;(b)圆柱式

Fig.2 Optimization routine of single module. (a) Plug-in fin; (b) cylindrical fin

高温、散热器质量;插片式优化变量中的 $finthick$ 、 $fincount$ 、 $offset X$ 、 zL 、 $over H$ 分别表示鳍片厚度、数量、距底板边缘偏移量、宽度、高度;圆柱式优化变量中的 $pincount X$ 、 $pincount Z$ 、 $offset Z$ 、 zL 、 $over H$ 、 $pinBot$ 分别表示鳍片 X 方向数量、 Z 方向数量、距底板边缘偏移量、所占宽度、高度、圆柱直

径。变量及目标的优化过程曲线如图 2 所示。由结果可知,插片式及圆柱式结构优化后的模型重量、最高温度、热阻均优于设置要求;外部边界条件相同情况下,插片式鳍片所占尺寸较小,最高温升仅为 $12.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,热阻为 $1.026\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}$,优于圆柱式鳍片。

表 3 插片式鳍片优化设置及结果

Table 3 Optimization settings and results of plug-in fin

Settings	Objective function	Constraint function			Optimized variable of fin			
	$hsrth / (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	$T_{\max} / ^{\circ}\text{C}$	$hsms / \text{kg}$	$finthick / \text{mm}$	$fincount$	$offset X / \text{mm}$	zL / mm	$over H / \text{mm}$
	Minimum	100	0.28	1~2.5	10~40	5~30	33~63	25~40
Initial value	3.271	102.7	0.0799	1	10	5	63	25
Results	1.026	97.52	0.2756	1	40	30	58	40

表 4 圆柱式鳍片优化设置及结果

Table 4 Optimization settings and results of cylindrical fin

Settings	Objective function	Constraint function			Optimized variable of fin					
	$hsrth / (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	$T_{\max} / ^{\circ}\text{C}$	$hsms / \text{kg}$	$pincount X$	$pincount Z$	$offset Z / \text{mm}$	zL / mm	$over H / \text{mm}$	$pinBot / \text{mm}$	
	Minimum	100	0.28	5~25	4~10	5~30	33~63	25~40	1.5~2.5	
Initial value	4.132	103.2	0.07354	10	7	5	62	28	1.5	
Results	1.556	99.11	0.2371	25	10	5	60	40	1.6	

3.2 整灯结构方案设计、仿真及分析

3.2.1 方案设计及建模

本文选择插片式鳍片散热结构单模组设计整灯,电源箱封闭在上排模组的下方,尺寸限制在 $240\text{ mm} \times 195\text{ mm} \times 136\text{ mm}$ 内。不影响光照情况

下,在车灯正面下方设置进气格栅,并从上方(黄色)、后方(红色)、左方(白色)、右方(粉色)中选择最佳出气口位置,利用汽车前行产生的反方向风速通过格栅进入车灯内部,强化内部对流,提高散热效果,如图 3 所示(彩图见网络电子版)。

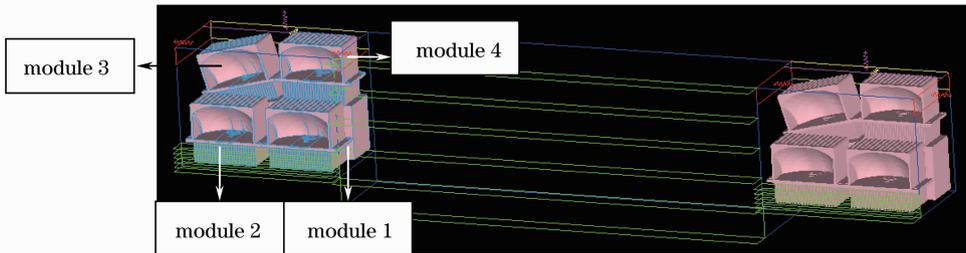


图 3 LED 汽车前照灯模型示意图

Fig. 3 Sketch map of LED automobile headlamp modle

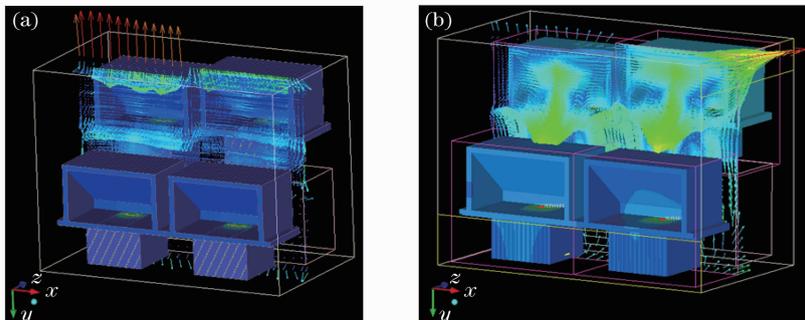


图 4 整灯仿真模拟。(a)封闭;(b)开孔

Fig. 4 Simulation of LED automobile headlamp modle. (a) Closed; (b) opening

3.2.2 仿真及分析

整灯仿真作如下设置：内部初始环境温度 85 ℃；雷诺数 1.8878×10^7 ，设为湍流状态；流体收敛标准 1×10^{-3} ，能量收敛标准 1×10^{-7} ，总体迭代步数 150；重力方向为光源朝向的反方向；非结构化网格数 695545，节点数 743282。

1) 模型封闭与开孔情况对比

表 5 封闭与开孔模型仿真比较

Table 5 Compare of closed and opening modle simulation

Modle	Minimum temperature /℃	Maximum temperature /℃	Mean temperature /℃	Maximum velocity / (m/s)
Closed	90.7768	98.6187	91.111	0.0311
Opening	89.1063	97.8154	90.2105	0.1347

2) 出气口位置对模型温度的影响

本文观察在 2 m/s 风速情况下，分别在模型上方、后方、左方、右方的后上侧设置出气口时模组温升的变化，结果如表 6 所示。由表 6 可知，相同边界条件下，开口在右侧模组温差最大，模组 3 与模组 4 温差达 1.0755 ℃；开口在上侧时，进出口的远离避免气流短路、形成烟卤效应，模组间温差最小，且最高温升相对较低。

表 6 模组温度随开口位置的变化

Table 6 Modules' temperature with different opening locations

Opening position	Module 1 /℃	Module 2 /℃	Module 3 /℃	Module 4 /℃
Upper	94.6706	94.6781	95.4381	95.4294
Back	94.6845	94.7107	95.4827	95.4837
Left	94.6493	94.6737	95.4566	95.5080
Right	94.6606	94.6628	95.5263	94.4508

3) 风速对模型温度的影响

汽车行驶速度一般为五档，为研究开孔情况下汽车前进速度对车灯内部温升的影响，观察了车灯模型在五档内风速变化的情况下内部各模组的温度变化趋势，所选风速为一档内的 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4 m/s，二档内的 6 m/s，三档内的 9 m/s，四档内的 12 m/s，五档内的 16 m/s，仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知，随风速增大，车灯最高温升开始时候迅速降低，然后趋于平缓；后排模组温升高于前排模组 0.8 ℃左右，因为热流上升致使下排模组为上排模组加热。

综上所述，优化后的 LED 汽车前照灯被动式散热结构模型在前部设置进气格栅、在后上侧设置出气口时，车速在一档之内亦能达到很好的散热效果，符合 LED 工作温度和车灯散热要求。

两种情况下的仿真效果如图 4 所示，结果如表 5 所示。由结果可知：封闭情况下内部空气对流主要由经过散热器的热流因密度减小而上升、在重力条件下流场为保持其连续性致使上部冷空气下降补充原热空气位置组成，流速较低，散热效果不够理想；开口情况比全封闭情况温降低 0.8042 ℃，最大流速高 3 倍左右，且内部流动更有秩序。

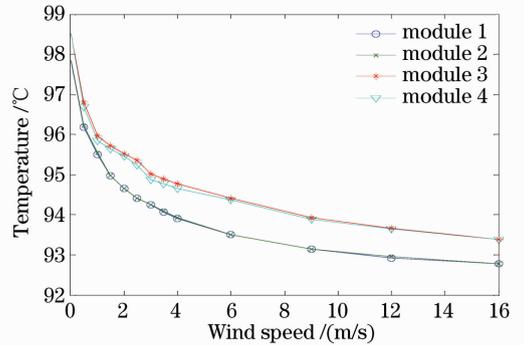


图 5 车灯模组温度随风速的变化

Fig. 5 Modules' temperature with wind speed variation

4 结 论

基于 CFD，为反射式大功率阵列 LED 汽车前照灯单模组设计了插片式鳍片、圆柱式鳍片两种被动式散热结构方案，通过在 Ansys-icpak 中建模、仿真和优化，发现在相同边界条件下，插片式鳍片尺寸较小，质量为 0.2785 kg，温升仅为 12.52 ℃，热阻仅为 1.026 ℃/W，符合 LED 汽车前照灯的散热要求。设计整灯过程中，提出了不影响光照情况下，在车灯前方底部设置进气格栅，通过仿真比较在最佳位置——后上侧设置出气口，利用汽车向前行驶而产生的反方向风速通过格栅进入车灯内部加强对流，有效为车灯散热；风速增大时，车灯最高温度下降由迅速趋于平缓，一档车速时温升低于 10 ℃，有效提高了散热效率，同时验证了被动式散热系统应用在 LED 车前灯中的可行性。

参 考 文 献

- 1 T. Actkahn, S. V. Garimella, J. Petroski *et al.*. Optimal design of miniature piezoelectric fans for cooling light emitting diodes [J]. *IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2004, 1(4): 663~671
- 2 E. F. Schubert. *Light-Emitting Diodes* [M]. New York:

- Cambridge University Press, 2003
- 3 D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. C. Collins. Illumination with solid state lighting technology[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
 - 4 K. Oliver. High power LED arrays special requirements on packaging technology[C]. *SPIE*, 2006, **6143**: 1~8
 - 5 A. Mehmet, W. Stanton. Chip scale thermal management of high brightness LED packages[C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 214~223
 - 6 S. Kiyoshi, S. Masaru, I. Hiroyuki. LED headlamps[C]. SAE 2004 World Congress & Exhibition, 2004, 2004-1-437
 - 7 H. Michael, H. Wolfgang. Design claims and technical solution steps generating the world first full LED headlamp[C]. SAE 2008, World Congress & Exhibition, 2008, 2008-1-337
 - 8 Wang Le, Wu Ke, Yu Yibo *et al.*. Study on LED array heat transfer under natural convection based on CFD [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(12): 1758~1761
王 乐, 吴 珂, 俞益波 等. 基于 CFD 的 LED 阵列自然对流散热研究[J]. *光电子•激光*, 2010, **21**(12): 1758~1761
 - 9 Zhu Xuping, Yu Guiying, Ding Shushu *et al.*. Transient temperature field and thermal stress of high power LED[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(2): 132~137
朱旭平, 余桂英, 丁纾姝 等. 功率型 LED 瞬态温度场及热应力分布的研究[J]. *光电工程*, 2011, **38**(2): 132~137
 - 10 Yan Lai, Nicolás Cordero, Frank Barthel *et al.*. Thermal management of bright LEDs for automotive applications [J]. *Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE*, 2006, **26**(6): 1~5
 - 11 Yan Lai, Nicolás Cordero, Frank Barthel *et al.*. Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**(5-6): 1239~1244
 - 12 Li Renxian. The Foundation of Finite Volume Method [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 1~3
李人宪. 有限体积法基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 1~3
 - 13 Yunusa, Cengel. Heat Transfer; a Practical Approach [M]. New York, WCB/McGraw-Hill Inc, 2007. 109~111
 - 14 Yu Guiying, Jin Ji, Zhu Xuping *et al.*. Optimal design of reflective light emitting diode automotive headlamps[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 112~116
余桂英, 金 骥, 朱旭平等. 反射式发光二极管汽车前照灯的优化设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 112~116
 - 15 National Standardization Technical Committee. National Standard of LED Automobile Headlamp GB25991-2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010
 - 16 General Life Test Method of LED Components and Modules CNS 15247[S]. Chinese Taiwan, 2009

栏目编辑: 马 沂