

doi: 10.3788/gzxb20124111.1327

液体封装 LED 汽车远光灯光学设计

李海涛¹, 张苏娟¹, 张炜², 牟燕妮¹, 吴伟¹, 陆治国³

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

(2 西安邮电大学 理学院, 西安 710121)

(3 西北大学 物理学系, 西安 710069)

摘 要:使用一种导热性能好、粘度小、电绝缘性强、无腐蚀性的透明液体封装 LED, 研究其封装后的光学特性, 以获得一种光效高、散热好、体积小的新型汽车光源. 按照汽车用 LED 前照灯 GB 25991-2010 配光要求, 选用 1 300 Lm 的大功率白光 LED 光源, 采用椭球面玻璃作为灯具基本外壳. 用光学设计软件 TracePro 进行设计, 通过调节光源在灯具内的位置, 修改玻璃外壳形状, 设计出了一款自投射式 LED 汽车远光灯. 设计结果表明: 以目前大功率白光 LED 光源技术, 椭球面玻璃外壳直径在 40~50 mm 范围内的远光灯完全能满足国标要求, 光能收集效率在 86.5% 以上. 最后对制作灯具进行测试, 照度值分布与仿真结果基本吻合.

关键词:LED 远光灯; 液体透镜; 投射式配光; 椭球面玻璃壳

中图分类号: O439; U463.65⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1327-4

0 引言

汽车前照灯是汽车安全行驶必不可少的部件, 自汽车问世以来, 随着照明光源技术的进步, 前照灯经历了白炽灯、卤素灯、HID 灯、LED 灯的发展过程. 其中, 白炽灯和卤钨灯光效在 30 Lm/W 以下, 寿命只有几百小时, 氙气灯和金卤灯光效达 90 Lm/W, 寿命 3 000 多小时^[1], 而光效 150 Lm/W 的蓝光芯片涂黄光荧光粉的大功率白光 LED 光源已经商业化^[2], 寿命可达数万小时. 除此之外, LED 光源比传统光源体积小、响应快、工作电压低^[3], 目前在刹车灯、倒车灯、转向灯、尾灯、以及信号灯等汽车低照度照明应用中技术相对成熟^[4]. 由于大功率 LED 散热困难, 应用于汽车远光灯还具有挑战性. 对于汽车远光灯来说, 它需要采用大功率高光通量的光源. LED 实现大功率高光通量可以用小芯片集成封装或大芯片封装, 大芯片封装使得光源系统的热阻增大^[5], 且芯片中光的自吸收及反射损失会使光效降低, 因此远光灯应使用小芯片集成封装的大功率白光 LED 光源. 随着发光效率提高 LED 取代传统光源作为汽车前照灯是必然局势.

对大功率高通量 LED 远光灯来说, 庞大的体积

和汽车紧凑型设计之间的矛盾是制约其发展的主要因素. 传统 LED 汽车远光灯通过反射、折射、反射与折射共同作用的方式实现配光要求, 体积和质量相当大^[6-9]. 经过改进, 一般采用小型抛物面反射器的 LED 汽车远光灯体积虽有缩小, 但由于其焦距小, 光源位置微小的误差会使配光发生很大的变化^[10]. 目前使用的自由曲面反射器减小了光源位置偏移产生的配光变化, 光能利用效率高^[11-12], 深受人们青睐, 但小型化的自由曲面反射器加工难度大. 最后, 工作温度对 LED 稳定性和寿命影响很大. 针对这些问题, 依据当前大功率白光 LED 光源的电学、光学及封装技术, 应用一种导热性好、粘度小、电绝缘性强、无腐蚀性的透明硅油封装 LED 汽车远光灯, 与传统灯具相比, 除了与光源热沉相连的散热装备外, 光源的其余部分均浸没在硅油环境中. 按照 GB25991-2010 的要求, 对照度分布进行了测试.

1 GB25991-2010 远光灯配光要求

根据汽车用 LED 前照灯 GB25991-2010 要求, 汽车远光灯要实现良好的照明. 配光性能在距离前照灯基准中心前 25 000 mm 的垂直平面配光屏上测试^[13], 照度要求如表 1 所示.

基金项目:国家自然科学基金(No. 60808011)、国际合作基金(No. 10GJHZ517)和航空科学基金(No. 20090898001)资助

第一作者:李海涛(1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 LED 灯具的散热及其光学设计. Email: rlofmccsf@163.com

导师(通讯作者):张苏娟(1975—), 女, 副研究员, 主要研究方向为超快激光技术及其在生物医学方面的应用.

Email: sujuan_zhang@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-06-12; **修回日期:** 2012-09-09

表 1 远光的国标配光要求(单位 lx)

Table 1 Standard limits of high-beam distributing (unit: lx)

Measuring points or zones	Illuminance
E_{\max}	≥ 48 and ≤ 240
HV point	$\geq 0.8 E_{\max}$
HV point to 1 125 L and R	≥ 24
HV point to 2 250 L and R	≥ 6

2 远光灯配光设计

2.1 整体光学系统

本文中远光灯的光学系统包括椭球面玻璃外壳、光源及封装液体,设计要求光源光轴与玻璃外壳的对称轴重合,光通利用效率高,整体灯具系统紧凑.

2.2 光源

目前商业化的小芯片集成大功率白光 LED 光源采用蓝光芯片表面涂黄光荧光粉的技术相对成熟.白光 LED 在标准条件下测得光效可达 140 lm/w 以上,应用于封装的单粒小芯片面积为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,选用小芯片封装成的光源,在 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 范围内集成 9 只芯片的光源光通量远远高于 1 300 lm.这种蓝色芯片表面涂黄色荧光粉的光源光强角度分布范围为 140° 左右.为了设计的精确性,设计时光源应用实际的光强分布,光源发光面使用实际光源的发光尺寸和形状.

2.3 椭球面外壳

封装灯具的液体对 LED 光源不会产生损伤,折射率为 1.55.玻璃外壳的折射率是 1.43.灯具系统对光源发出的光经 3 次折射作用,第一次:光源发出的光线在进入液体的界面处折射;第二次:光线由液体进入玻璃外壳的内表面处折射;第三次:光线由玻璃外壳的外表面进入空气的界面处折射.

由折射定律计算得到

$$\alpha' = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right) \quad (1)$$

α 和 α' 分别是光源光线入射角和折射角,可以计算第一次折射后的角度变化.

根据第二次和第三次折射关系确定椭球面玻璃外壳形状和光源的位置,玻璃非常薄,只考虑光线在表面的作用而忽略光线在玻璃中的传播距离.由椭球面玻璃外壳决定的液体相当于一个椭球凸透镜,利用椭球透镜成像关系实现国标配光要求.图 1 是一个椭球切面,由椭球内侧的点光源 Q_1 发出的光线折射后成像于 Q_2 点,折射成像公式为

$$\frac{n_1}{f_1} + \frac{n_2}{f_2} = \frac{a(n_1 - n_2)}{b^2} \quad (2)$$

a, b 是椭球面的长半轴和短半轴, n_1 为液体折射率,

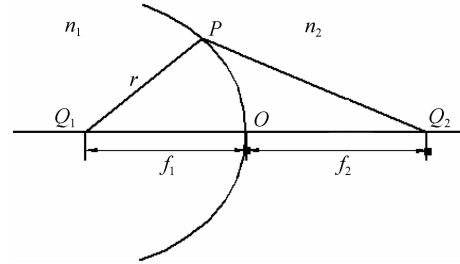


图 1 椭球透镜

Fig. 1 Ellipsoid lens

n_2 为空气的折射率, $f_2 \rightarrow \infty$ 时点光源发出的光折射后平行射出,得到液体椭球透镜的焦点为

$$f_1 = \frac{1.55b^2}{0.55a} \quad (3)$$

此款液体封装 LED 汽车远光灯就是把式(3)的点光源修正后应用于实际光源实现灯具的自身投射式配光.

灯具外壳设计以容易加工和小型化为宗旨,考虑灯具汇聚光线能力和灯具的光能利用效率,设计条件为

$$\left(\frac{b' - \frac{R}{2}}{f_1 - a'}\right) - \tan\left[\arcsin\left(\frac{\sin \gamma}{1.55}\right)\right] \geq 0 \quad (4)$$

式(4)为基础椭球面玻璃外壳形状满足的关系, a' 为基础椭球面玻璃外壳的长度, b' 为基础椭球面玻璃外壳的半径, γ 是光源出射光线的半角宽度, R 表示光源发光部分的孔径,在仿真设计时再调节光源位置及灯具外壳.

这 3 次折射的同时伴随光能反射损耗.介质分界面的透射率与入射角和折射角有关系为

$$T = \frac{\sin 2\alpha \sin 2\alpha'}{2\sin^2(\alpha + \alpha') \cos^2(\alpha - \alpha')} + \frac{\sin 2\alpha \sin 2\alpha'}{2\sin^2(\alpha + \alpha')} \quad (5)$$

另外液体对光能有吸收作用,传播 1 mm 吸收 0.05%.忽略玻璃中的吸收损失.

2.4 仿真分析

定做的光源光强及液体界面处折射后的光强分布如图 2 所示.

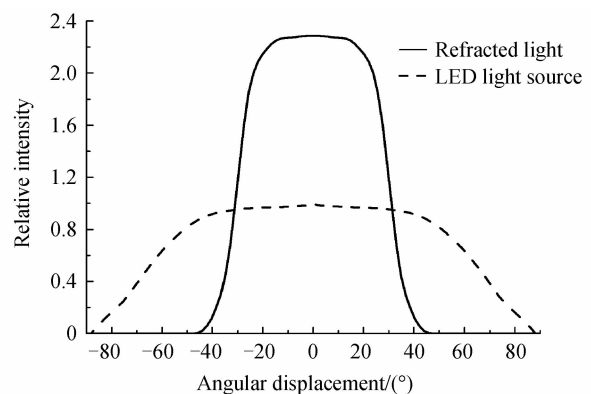


图 2 相对光强分布曲线

Fig. 2 Relative intensity distribution plot

以光源光强峰值为基准,不同角度下光源的光强值及经过液体界面折射后的光强值与此峰值的比值定义为各自的相对光强. 折射后光能分布集中且边缘光强衰减迅速,大大提高了椭球面玻璃外壳的光能收集效率.

使用 SolidWorks 建立灯具玻璃外壳和封装液体模型,应用 Tracepro 光学仿真软件分析照度分布. 液体填充在灯具内部的整个空间,对光线起汇聚作用的是椭球型液体透镜,光源发光面与椭球面玻

璃外壳的对称轴垂直. 确定光源的初始位置 f_1 ,沿玻璃外壳对称轴移动光源以得到最佳配光效果. 光源经液体透镜汇聚后光线与玻璃外壳对称轴近似平行. 然后去掉玻璃外壳多余部分得到玻璃外壳直径. 修正后的椭球面玻璃外壳直径应控制在 50 mm 范围内,表 2 和表 3 是基于 1 300 lm 的大功率白光 LED 集成光源设计的两种不同规格椭球面玻璃外壳的远光灯照度分布值.

表 2 远光灯配光的仿真结果(半长轴 25.02 mm,半短轴 20.62 mm,直径 40.00 mm)

Table 2 Simulative results of the high-beam distributing(semi-major axis 25.02mm, semi-minor axis 20.62 mm, diameter 40.00 mm)

Light source/mm ²	HV point (E_{max})/Lx	HV point to 1 125 L and R/Lx	HV point to 2 250 L and R/Lx	Ellipsoid type lamp shell/Lm	Test screen/Lm	Energy collection efficiency/(%)
3.5×3.5	71.98	≥54.50	≥24.49	1 157.24	1 125.43	86.57
4.0×4.0	56.43	≥48.46	≥23.06	1 168.90	1 130.28	86.94
4.5×4.5	50.79	≥38.58	≥20.01	1 197.68	1 164.76	89.59

表 3 远光灯配光的仿真结果(半长轴 37.55 mm,半短轴 26.00 mm,直径 50.00 mm)

Table 2 Simulative results of the high-beam distributing(semi-major axis 37.55mm, semi-minor axis 26.00 mm, diameter 50.00 mm)

Light source/mm ²	HV point (E_{max})/Lx	HV point to 1 125 L and R/Lx	HV point to 2 250 L and R/Lx	Ellipsoid type lamp shell/Lm	Test screen/Lm	Energy collection efficiency/(%)
3.5×3.5	101.81	≥62.26	≥22.59	1 125.37	1 124.82	86.52
4.0×4.0	85.30	≥63.65	≥21.48	1 206.20	1 203.75	92.59
4.5×4.5	69.76	≥60.32	≥21.30	1 201.92	1 189.84	91.53
5.0×5.0	56.53	≥49.23	≥21.06	1 197.65	1 167.37	89.80

配光测试屏是 6.0×6.0 m² 的平面,分别仿真了测试屏上的光通量和照度,以及椭球面型玻璃外壳部分透射的光通量. 测试屏上的光通量与光源光通量的比值作为远光灯光能收集效率,可以看出光能利用率在 86.5% 以上. 要使灯具更紧凑,必须提高光源发光效率以减小光源尺寸. 结果表明:使用大尺寸灯具外壳或小尺寸发光面的光源都能使 HV 点至 1125R 或 L 之间的照度增强;相反利用小尺寸玻璃外壳的灯具能增大视野范围;可根据不同地区的道路情况选用不同类型的远光灯.

3 实验测试及分析

椭球面型外壳半长轴是 25.02 mm,半短轴是 20.62 mm,采用电真空玻璃材料. 定做 1 300 lm 的 LED 光源发光面为 4.1 mm×4.1 mm. 图 3 是仿真在距离前照灯基准中心 25 000 mm 的垂直平面配光屏上的照度分布. 图 4 是灯具的实物图,43 mm 指光源与外壳顶点的距离,图 5 是实验测试过 HV 点的水平线上照度分布值. 实验结果满足 GB25991-2010 要求. 表 4 为仿真结果与实验结果数据的比较.

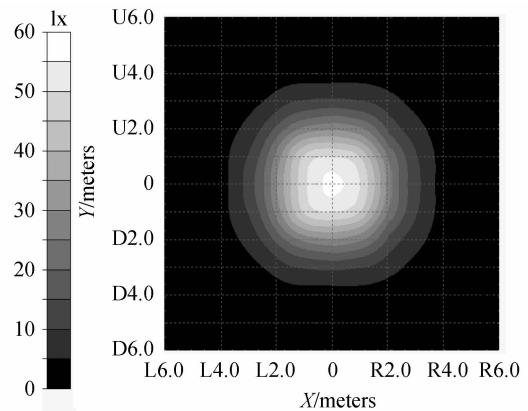


图 3 远光灯的照度分布
Fig. 3 The luminance of the high-beam

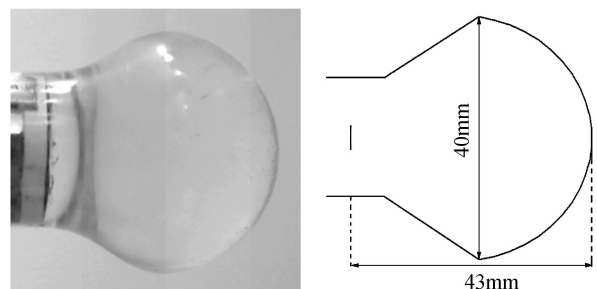


图 4 远光灯形状
Fig. 4 High-beam shape

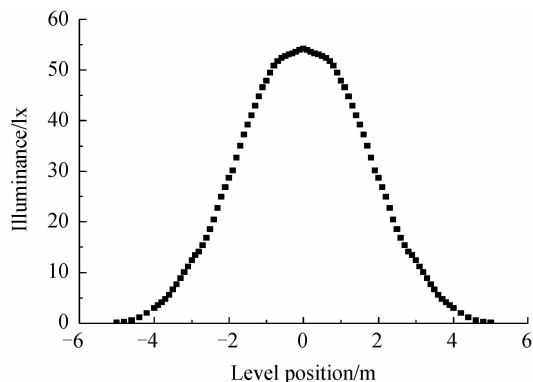


图 5 水平方向光亮度

Fig. 5 Horizontal illuminance value

表 4 仿真和实验结果对比(单位:lx)

Table 4 Comparison of simulation results and experimental results (unit: lx)

	HV point (E_{\max})	HV point to 1 125 L and R	HV point to 2 250 L and R
Simulation results	56.14	≥ 49.97	≥ 23.50
Experimental results	54.17	≥ 46.94	≥ 25.60

实验结果和设计结果数据较吻合,中心照度偏小是因为设计时忽略了玻璃外壳的厚度。

4 结论

应用散热性能强的液体封装远光灯来解决散热问题,同时基于液体的光学性质设计了椭球液体凸透镜实现 GB25991-2010 配光要求,就目前 LED 光源水平,仿真和实验结果都表明了此设计完全可行。

参考文献

- [1] 毛兴武,张艳雯,周建军. 新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2008:89-96.
- [2] RAO H, DING K, SONG J, *et al.* Self-adaptive phosphor coating technology for white LED packaging[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2012, **5**(1): 1-6.

- [3] ZHAO Hua-long, LIANG Zhi-yi, SHI Xing-chun, *et al.* The Design of LED using in optical project[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 244-246.
- 赵华龙,梁志毅,石兴春,等. 利用 LED 的投影系统光源设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2): 244-246.
- [4] Van DERLOFSKE J F, Mc COLGAN M. White LED sources for vehicle forward lighting[C]. *SPIE*, 2002, **4776**: 195-206.
- [5] KAMON Kunihito, TAKESHITA Junichi, FUKUI Tsuyoshi, *et al.* Study on the luminous and thermal characteristics of high-power near-ultraviolet LED packages with various chip arrangements[J]. *Light & Vis Env*, 2009, **33**(3): 142-146.
- [6] Dr. Karsten Eichhon. LED in automotive lighting[C]. *SPIE*, 2006, **6134**: 1-6.
- [7] CHEN Yi-min, NIE Rong, HUANG Jie. Optical design of automotive headlamp with LED[J]. *Journal of Applied Optical*, 2010, **31**(3): 390-394.
- 陈益民,聂蓉,黄杰. 汽车前照灯用 LED 光源的光学设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 390-394.
- [8] YU Gui-ying, CHEN Xiao-li, YAO Shuai, *et al.* An optical design of LED automotive headlamps based on projector systems[J]. *Journal of China Jiliang University*, 2008, **19**(1): 73-77.
- 余桂英,陈晓丽,姚帅,等. 投射式 LED 汽车前照灯的光学设计[J]. *中国计量学院学报*, 2008, **19**(1): 73-77.
- [9] YU Gui-ying, JIN Ji. Design of a novel lens for projector system of LED automotive headlamps[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 282-286.
- 余桂英,金骥. 用于投射式 LED 汽车前照灯的新型配光镜的设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(2): 282-286.
- [10] 屠其非. 白光 LED 应用于汽车前照灯照明中的研究[D]. 上海: 复旦大学光源与照明工程系, 2007, 52-54.
- [11] YANG Bo, LIU Yi-chao, WANG Yong-tian. Automatic design and optimization of segmented free form reflector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 970-973.
- 杨波,刘一超,王涌天. 多曲面反射体的计算机辅助设计及优化[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 970-973.
- [12] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua, *et al.* A light distribution proposal for designing LED dipped headlight[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2904-2908.
- 吴仍茂,屠大维,黄志华,等. 一种 LED 汽车前照近光灯配光设计方案[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2904-2908.
- [13] GB25991-2010. 汽车用 LED 前照灯[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2011.

Optical Design of LED Automotive High-beam Filled with Liquid

LI Hai-tao¹, ZHANG Su-juan¹, ZHANG Wei², MU Yan-ni¹, WU Wei¹, LU Zhi-guo³

(1 Institute of Photonics and Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

(3 Department of physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: To get a new type of automotive light source with high efficiency, better heat dissipation and small volume, LED source filled with cooling, low-viscosity, non-corrosive, electrical insulating and transparent liquid was studied especially on its optical properties. According to GB25991-2010 regulation, high-power white LED of 1300 lumens was chosen as the light source, and ellipsoidal glass shell was chosen as its basic lamp shell. By adjusting position of light source and modifying the shape of glass shell, optical designing program Tracepro was used in designing one projection-type LED automotive source. The results shows that, at the present stage when 40~50 mm diameter glass shells are introduced, illumination distribution of this liquid lens can meet the requirement of GB25991-2010 regulation for high-beam. Energy collection efficiency can reach 86.5%. The illumination intensity of experimental testing is matched with this simulation results.

Key words: LED high-beam; Liquid lens; Projector light distribution; Ellipsoidal glass shell