

单模组 LED 光源的一体式汽车前照灯设计

王俊伟,葛爱明,蔡金林,陈镜羽,朱凌

(复旦大学信息科学与工程学院光源与照明工程系电光源研究所,上海 200433)

摘要:随着 LED 光源技术及应用的发展,其在汽车照明市场中所占的份额也逐年增大。目前,市场上大多采用多个模组 LED 光源及其分别的结构设计汽车近光灯和远光灯,再由这些汽车 LED 近光灯和远光灯组合成不同车型的汽车 LED 前照灯,这种方法设计的汽车前照灯体积大、功耗大、成本高、适用车型少。提出了一种以单模组 LED 光源的一体式汽车前照灯系统的光学设计方法,使用一个 LED 光源模组和一组反射器的组合来满足远光和近光的照明的要求,仅仅通过光阑板的切换来达到近光和远光照明的目的,重点通过光学仿真软件模拟仿真的方式,通过对比研究不同光学结构设计方式来确定最后的设计方案。最终给出了一个效率较高、体积较小、应用范围广泛、照明效果好、适用于多种车型的一体式汽车前照灯的设计方法。

关键词:单模组; LED; 一体式; 汽车前照灯; 远近光

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2710-06

Design of single module LED-based integrated headlamp system

Wang Junwei, Ge Aiming, Cai Jinlin, Chen Jingyu, Zhu Ling

(Institute for Electric Light Sources, Department of Light Sources and Illuminating Engineering, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: With the rapid development of LED industry, its share in the automotive lighting market is also growing very fast year by year. At present, there are mainly two design methods of LED-based headlamp which are single-moduled and multi-moduled, what's more, most of the headlamp system are composed of several modules which can just be used by specific cars. This kind of headlamp system has large volume, high power consumption, high cost and narrow application range. The main research of the article was the optical design method of the single-moduled LED headlamp with small volume and outstanding lighting effect. A brand-new design method of LED-based integrated headlamp optical system was proposed, which used only one group of reflectors and one LED module to meet the lighting needs of high beam and low beam using a baffle. The final design method was determined through software simulation and contrast of different design methods to pick up a best one. Finally, it puts forward a new design method of LED-based integrated headlamp system with high efficiency, small volume and excellent lighting effect which can be used by different kinds of cars.

Key words: single module; LED; integrated; headlamp; high and low beam

收稿日期:2015-01-10; 修订日期:2015-02-13

基金项目:国家留学基金(2010610538);上海市自然科学基金(15ZR1402400)

作者简介:王俊伟(1991-),男,硕士生,主要从事光电系统及其控制技术方面的研究。Email:12210720076@fudan.edu.cn

导师简介(通讯作者):葛爱明(1966-),男,副教授,博士,主要从事光电系统的理论与技术方面的研究。Email:amge@fudan.edu.cn

0 引言

随着 LED 市场的迅猛发展,几年前对于普通大众来说还遥不可及的 LED 光源已经慢慢走进了普通消费者的生活中^[1]。目前,LED 的市场大致被细分为以下四个部分:智能照明、汽车照明、Flash LED 以及 UV LED。在这四个细分市场中,汽车照明市场占据着重要的地位,根据海拉的预测,从 2013 年到 2019 年,LED 前照灯的市场占有率将从 1%提升到 10%。现如今,几乎所有的汽车厂商都纷纷推出了搭载 LED 汽车前照灯的产品,包括国外的奔驰、宝马、奥迪和本田等,国内的 LED 汽车前照灯生产厂商主要包括星宇、鸿利光电、比亚迪和雪莱特等。因此,汽车前照灯由传统光源转变为 LED 光源已经形成了大的趋势。

得益于 LED 体积小、光效高等优点,LED 汽车前照灯一经推出便受到了消费者的广泛欢迎,与传统氙气光源相比^[2],LED 光源更加小巧、高效,因此前照灯的外形可以设计得更加美观。然而,由于 LED 的发光方式与传统光源完全不同,使用 LED 作为汽车前照灯光源时必须重新设计反射器,这就带来了不小的研发成本,因此 LED 汽车前照灯价格一直居高不下^[3]。除此之外,LED 前照灯的技术垄断也是其价格始终居高不下的原因之一,现在 LED 汽车前照灯市场的产品主要是厂商为特定车型定制的,这种模式就决定了其成本高昂,因此,能适用于不同车型的 LED 汽车前照灯设计方案将在汽车照明市场上拥有十分广阔的前景。

目前,LED 汽车前照灯的主要有两种结构类型,一种是远光灯与近光灯分离式设计的结构,这种结构的特点是远光灯和近光灯分别采用一个光源模组和一个反射器模组,照明效果优异,设计简单但是结构较大,应用范围不够广泛。另外一种为远近光一体式的结构,这种结构的特点是设计较为困难,但是结构小巧、应用范围广。文中将采用一体式的设计结构,目前市场上有很多采用一体式结构的 LED 汽车前照灯,但是普遍存在照明效果不够优异的缺陷,尤其体现在近光模式下,截止线不够清晰。文中旨在提出一种体积小、照明效果优异的一体式 LED 汽车前照灯设计方案,在仅使用一个 LED 光源模组、一个反射器模组的前提下,提高整个系统的效率与远近

光的照明效果。

1 汽车前照灯设计标准

目前,我国对于 LED 汽车前照灯配光要求的国家标准主要由 GB25991-2010 进行规定,在如图 1 所示的近光配光屏幕上,近光应产生明显的明暗截止线,其水平部分位于 V-V 线左侧,右侧为 HV-H2-H3 线或者 HV-H1-H2-H4 线。其中 HV-H2-H3 线为 15°截止线,HV-H1-H2-H4 线为 45°切线带拐角的截止线。其各测试点照度应满足 GB25991-2010 中的详细要求(如表 1 所示)。

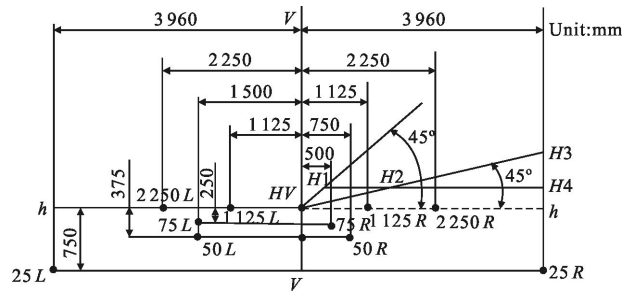


图 1 近光配光图

Fig.1 Distribution of low beam

表 1 近光配光要求

Tab.1 Distribution requirements of low beam

Area	Illuminance/lx
HV	≤ 0.7
B50L	≤ 0.4
75R	≥ 12
25L	≥ 2
50V	≥ 6
50R	≥ 12
25R	≥ 2

相对于 LED 近光的配光要求,GB25991-2010 中对于 LED 远光灯的配光要求相对比较简单。参照图 1 的测试屏幕,LED 远光灯的配光要求照度如表 2 所示。

表 2 远光配光要求

Tab.2 Distribution requirements of high beam

Area	Illuminance/lx
E_{max}	≥ 48 & ≤ 240
HV	≥ 0.80 E_{max}
HV to 1125L & R	≥ 24
HV to 2250L & R	≥ 6

除此之外,对于远近光 LED 前照灯,GB25991-2010 还规定其远光最大照度值应不大于近光 75R 测量照度值的 16 倍。这些配光标准将作为笔者后面 LED 汽车前照灯光学设计的参照。

2 一体式前照灯设计

文中所研究的单模组 LED 光源的一体式汽车前照灯利用单模组 LED 光源、共反射器结构实现远近光两种照明需求,根据 GB25991-2010 中对 LED 汽车近光灯与远光灯的相关要求,要将远光与近光集成在同一模组内,需要解决远光中心照度、近光截止线与展宽这三个问题。图 2 所示为单模组 LED 光源的一体式汽车前照灯系统的整体结构,该前照灯系统由反射器组、可翻转挡板以及透镜三个部分组成,其中反射器组由准直系统以及聚光反射器两部分组成。

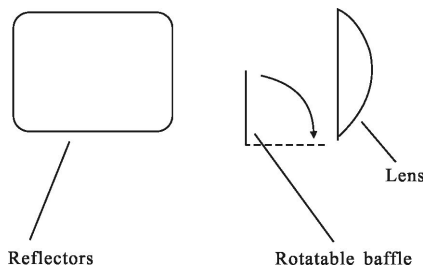


图 2 一体式前照灯结构

Fig.2 Structure of integrated headlamp

2.1 透镜与挡板

可翻转挡板的作用是形成近光所需的清晰截止线,当挡板位于图中实线位置时,前照灯工作在近光模式^[4],当挡板翻转位于图中虚线位置时,前照灯工作在远光模式^[5]。

如图 3 所示,一束平行光经过透镜汇聚于透镜焦点后发散,形成较大的展宽。设透镜焦距为 f ,透镜

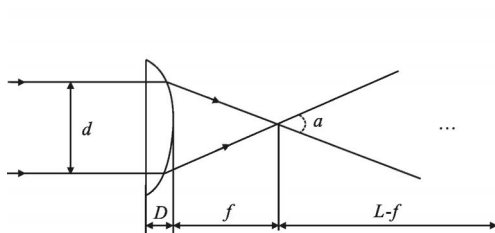


图 3 水平方向展宽

Fig.3 Horizontal extension

到测试屏距离为 L ,平行光束宽度为 d ,透镜厚度为 D ,透镜材料折射率为 n ,展宽为 l ,经过透镜汇聚后的发散角为 α 。则根据它们的几何关系可得透镜焦距 f 的计算公式为:

$$\frac{f+f(n-1)-\sqrt{r^2-(d/2)^2}}{L-f} = \frac{d}{l} \quad (1)$$

根据前级结构可以确定平行光束宽度 d ,再根据其他已知条件可以获得所需透镜的焦距 f 。观察 f 的计算公式可以发现,当展宽 l 越小时,焦距越大。由于近光截止线的存在,当透镜焦距越大时,整个结构的长度也将越长^[6]。因此,为了使得整体结构足够小,采用这种方式来获得较大的水平展宽。考虑到垂直展宽很小,可采用如图 4 所示的方案,位于透镜焦点附近的一束光线经过透镜后会形成一束近似平行的光线。综上,由反射器组出射的光线必须满足水平方向平行,垂直方向汇聚这两个特性。

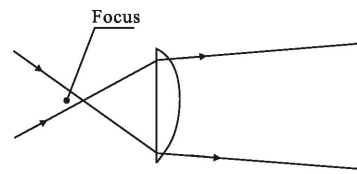


图 4 垂直方向拉伸

Fig.4 Vertical stretch

2.2 反射器组设计

反射器组由准直系统和聚光反射器组成,如图 5 所示为准直系统的结构,其中收光反射器为一个椭球面反射器,LED 位于椭球面的一个焦点处,经过椭球面收光后汇聚于准直抛物面的焦点处,经过准直抛物面反射形成平行光。常见的 LED 准直系统通常为一个简单的旋转对称抛物面反射器,效率很低^[7]。

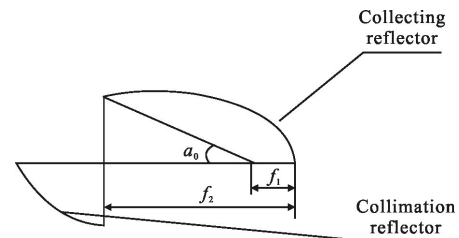


图 5 准直系统

Fig.5 Collimating system

假设 LED 是标准的郎伯体发光,中心光强为 $I_0^{[8]}$,收光反射器第一焦距为 f_1 ,第二焦距为 f_2 ,反射器的

反射率都为 R , 则采用收光反射器后的估算效率 η_1 与不采用收光反射器的效率 η_2 分别为:

$$\eta_1 = \frac{2\pi - \alpha_0 + \alpha_0 \cos(2\alpha_0)}{2\pi} R^2 \quad (2)$$

$$\eta_2 = 0.5 \times R \quad (3)$$

当 α_0 为 $\pi/2$ 时, η_1 最小, 为 $1/2R^2$, 由于反射材料的进步, 反射率 R 实际上十分接近 1^[9]。由公式(2)和公式(3)可知, 收光反射器对于提升整体收光效率有非常明显的作用。同时, 观察 η_1 的计算公式, 当 f_2-f_1 越大时, α_0 越小, η_1 越大, 而由于光源大小的影响, 实际汇聚效果会随着 f_2-f_1 的大小有所变化。去 LED 发光面大小为 $1 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 为了限制整个系统的结构大小, 设 f_2 为固定值 30 mm , 改变 f_1 的大小。如图 6

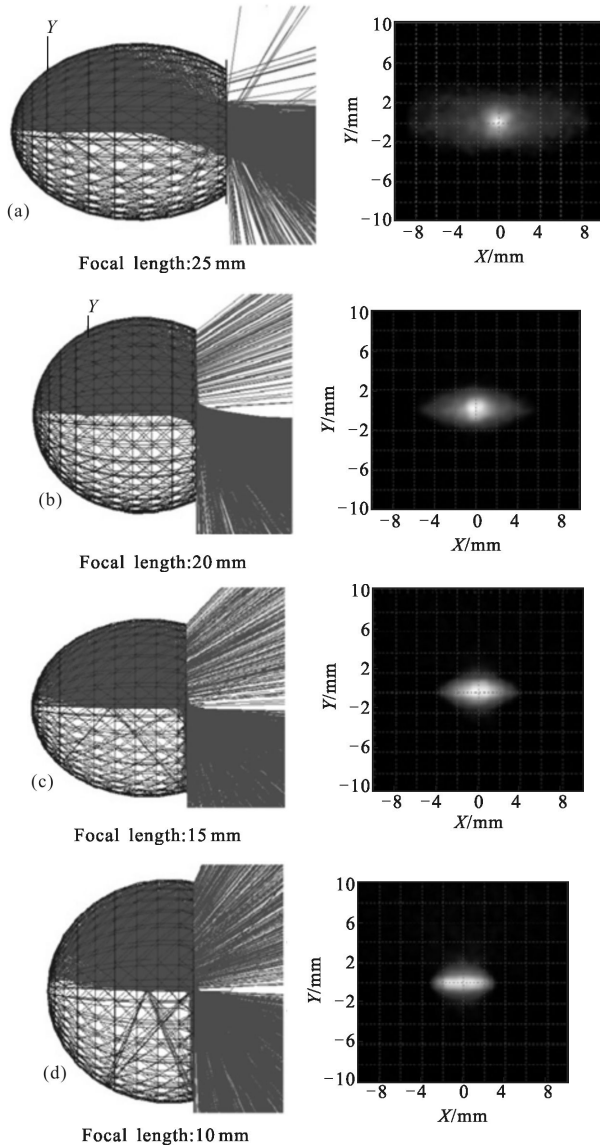


图 6 焦距对于汇聚点光形影响

Fig.6 Influence of focal length on light shape of focal points

所示 f_2-f_1 的大小分别为 25 mm 、 20 mm 、 15 mm 和 10 mm , 观察汇聚点处光形可知, 随之 f_2-f_1 逐渐变大, 整体收光效率逐渐变高, 然而汇聚点处光形弥散斑变大。汇聚点处弥散斑的增大会导致后续准直效果变差, 最终影响截止线的清晰度。因此, 综合考量收光效率与弥散斑大小, 选取 f_2-f_1 为 15 mm 。

准直反射器和聚光反射器分别为旋转对称抛物面反射器和水平拉伸抛物面反射器, 准直反射器作用是将收光反射器获得的光束转换成平行光, 这束平行光经过聚光反射器后, 水平方向保持平行, 垂直方向汇聚到聚光反射器的焦点处。此时, 整个反射器组出射的光束满足水平方向平行、垂直方向汇聚这两个特性。

为了保证测试屏上获得的光斑的最大照度在中心位置, 如图 7 所示, 垂直于 LED 发光面出射的光线经过反射器组反射后, 平行于透镜光轴出射。以理想 LED 光源为原点, 平行于透镜光轴方向为 x 轴建立直角坐标系。设准直反射器母线焦距为 f_3 , 聚光反射器母线焦距为 f_4 , 聚光反射器母线与准直反射器母线的焦点在 x 轴方向偏移距离为 D_1 , 聚光反射器母线焦点 y 坐标为 h 。则聚光反射器母线的直角坐标方程为:

$$(x+15-D_1)^2 = 4f_4(y-h-f_4) \quad (4)$$

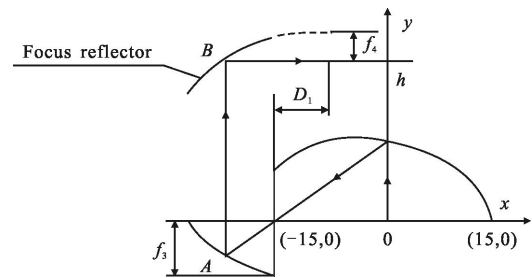


图 7 反射器组平面坐标系示意图

Fig.7 Diagram of the coordinates for reflectors

准直反射器母线直角坐标方程为:

$$(x+15)^2 = 4f_3(y+f_3) \quad (5)$$

设垂直于 LED 发光面出射的光线与准直反射器母线交点 A 的坐标为 (x_1, y_1) , 与聚光反射器母线交点 B 的坐标为 (x_2, y_2) , 则:

$$x_1 = -\frac{2}{3}f_3 - 15 \quad (6)$$

$$y_1 = -\frac{8}{9}f_3 \quad (7)$$

$$x_2 = x_1 = -\frac{2}{3}f_3 - 15 \quad (8)$$

根据反射定理，在 B 点处聚光反射器母线斜率应为 -1，则有：

$$\frac{x_2 + 15 - D_1}{2f_4} = -1 \quad (9)$$

结合公式(8)与公式(9)可得，为了保证测试屏上最大照度位于中心位置，准直反射器母线焦距 f_3 、聚光反射器母线焦距 f_4 以及聚光反射器母线与准直反射器母线的焦点在 x 轴方向偏移距离为 D_1 必须满足：

$$D_1 = 2f_4 - \frac{2}{3}f_3 \quad (10)$$

2.3 建模与仿真分析

根据上一节的相关描述，在 Tracepro 中建立模型，为了模拟实际情况，选取光源大小为 1 mm × 4 mm，依据公式(11)中所给出的几何关系，针对扩展光源调整相关参数获得最佳效果^[10]。

整个系统如图 8 所示，设定光源光通量为 1 000 lm，反射器反射率为 0.95，结合 GB25991-2010 中的要求，在 25m 远处放置测试屏。

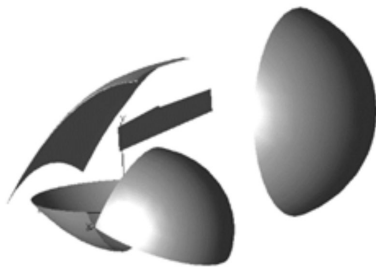


图 8 一体式汽车前照灯结构
Fig.8 Structure of integrated headlamp

当系统工作在远光模式时，测试屏上的照度分布如图 9 所示，各测试点照度见表 3。

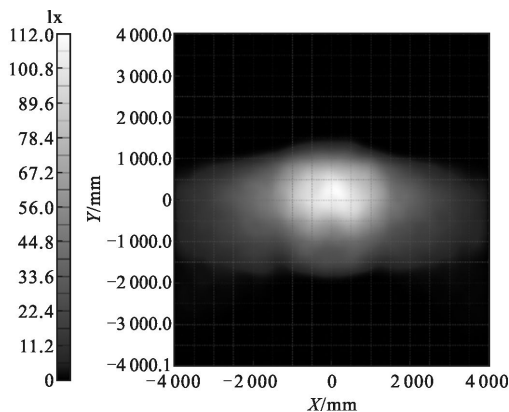


图 9 远光模式时接收屏上的光形
Fig.9 Light shape on receiver under high beam mode

表 3 接收屏上的远光照度

Tab.3 Illumination distribution of high beam on receiver

Test area	Illuminance/lx	Simulation value/lx
E_{max}	≥ 48 & ≤ 240	112
HV	$\geq 0.80 E_{max}$	107
HV to 1125L & R	≥ 24	65
HV to 2250L & R	≥ 6	30

远光中心照度模拟值达到 80 lx，接近国标要求最小照度的两倍，对于提高行车安全有着重要保障。此外，远光光形比较理想，大部分能量集中在中心区域，属于较为理想的远光光形。

当系统工作在近光模式时，测试屏上的照度分布如图 10 所示，重要测试点照度见表 4。

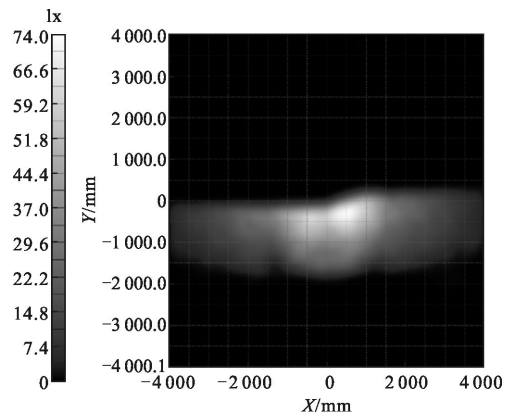


图 10 近光模式时接收屏上的光形
Fig.10 Light shape on receiver under low beam mode

表 4 接收屏上的近光照度

Tab.4 Illumination distribution of low beam on receiver

Area	Illuminance/lx	Simulation value/lx
HV	≤ 0.7	0.56
B50L	≤ 0.4	0.37
75R	≥ 12	74
25L	≥ 2	4
50V	≥ 6	58
50R	≥ 12	65
25R	≥ 2	5.6

近光灯截止线十分清晰，亮点位置位于拐点右下方位置，完全满足国标要求。同时，近光灯展宽也

达到了左右 4 m 多,在国标要求的左右 3 950 mm 处的照度也超过了最低标准。因此,整体来看,近光的仿真结果十分理想,重要测试点照度已经合格。

由仿真数据可以看出,文中所提出的一体式 LED 汽车前照灯设计方案在模拟仿真上已经完全符合国标要求。目前,常用的分离式 LED 前照灯设计方案需要两个 LED 光源模组,并且需要两组反射器分别实现远光照明和近光照明,这也使得整个前照灯照明系统的体积较大,成本较高,实用性较弱,无法匹配多种车型^[11]。文中所提出的一体式设计方法采用了共光源、共光路、共反射器的结构,减小了体积、降低了成本,大大提高了实用性。

3 结 论

根据模拟仿真结果,当系统工作在远光灯模式下时,各测试点超度完全符合国标要求,当系统工作在近光灯模式下时,截止线清晰,各测试点照度满足国标要求。同时,整个系统体积为 95 mm×50 mm×70 mm,远远小于同类型的前照灯系统,并且整体照明效果不逊于市面上的其他产品^[12]。

综上,文中所提出的全新的单模组 LED 光源的一体式汽车前照灯结构利用同一组反射器模组实现远近光两种功能,拥有体积小适用性高、性能优异等优点,可以完全满足汽车照明需求,同时对于提高国内 LED 汽车前照灯研发水平也有重要意义。并且,随着 3D 打印技术和镀膜技术的不断提升,其加工精度已经完全能够满足照明反射器的需求^[13],下一步将以文中设计的一体式 LED 汽车前照灯仿真结构为基础,制作实际模型进行调整测试,进一步优化其结构。

参考文献:

- [1] Zhou Qingchao, Bai Zelong, Lu Lu, et al. Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 313–328.
- [2] Narendran N, Gu Y M. Life of LED-based white light source [J]. *IEEE J Display Technol*, 2005, 1(1): 167–171.
- [3] Wu Han, Zhu Xiangbing, Zhu Qian, et al. Optical design of adaptive front lighting system based on digital micro mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 955–959. (in Chinese)
- [4] Ge A, Du Z, Wang W, et al. High-energy-efficiency optical system for an LED-based headlamp architecture[J]. *Lighting Res Technol*, 2013, 45: 752–757.
- [5] Yu Guiying, Jin Ji. Design of a novel lens for projector system of LED automotive headlamp[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 282–286. (in Chinese)
- [6] Ge A, Wang W, Du Z, et al. Design of an LED-based compound optical system for a driving beam system [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2688–2693.
- [7] Cui Qingfeng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 12–15, 38. (in Chinese)
- [8] Li Can, Song Shumei, Liu Ying, et al. Design of optical system for catadioptric fundus camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1710–1717. (in Chinese)
- [9] Zhong Yuanchang, Zhou Dongqin, Jia Nianlong, et al. LED lighting engineering in automobile and analysis of present situation [J]. *Microcomputer & its Applications*, 2010, 29(23): 1–4, 7. (in Chinese)
- [10] Sun Minglei, Zong Guanghua, Bi Shusheng. Automatic focusing technique based on illumination optimum[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(8): 1508–1514. (in Chinese)
- [11] Wang Hong, Chen Zanji, Wu Heng, et al. Design method of LED headlamp freeform optical lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1529–1534. (in Chinese)
- [12] Zhao Yahui, Fan Changjiang. Design of combined reflectors used in LED street lamps [J]. *Chinese Optics and Applied Optics Abstracts*, 2012, 5(5): 520–524. (in Chinese)
- [13] Jia Aiqin, Cheng Guorui. On the Development of LED Headlamp[J]. *The Guide of Science & Education*, 2013(4): 198–204. (in Chinese)