

LED 照明准直透镜结构优化设计

严强 高椿明 生艳梅 陈霄 杨俊

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 基于非成像光学理论,根据固体照明光源 LED 特性,开展了车用照明准直光学镜头的优化研究。以非成像光学的理论为基础,从现有准直透镜结构出发,建立了简化的 LED 准直照明结构模型,并利用光学仿真设计软件 Zemax 对简化的模型进行了优化设计;利用三维建模软件 SolidWorks 建立准直结构模型,导入光学仿真软件 TracePro 中进行仿真分析并进一步优化,优化后的准直透镜光能利用率提高了 6%;根据优化结果开模制作准直结构样品;最后,建立测试系统,开展优化前后透镜的光学性能对比测试。研究结果表明,5 m 处中心最大光强提高了约 128%,在相同照度(50 lx)处照射面积提高了约 25%。

关键词 光学设计;非成像光学;准直透镜;光能利用率;LED

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.112203

Optimization Design of LED Collimating Lens

Yan Qiang Gao Chunming Sheng Yanmei Chen Xiao Yang Jun

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The lighting collimating lens is designed for the use of headlight of automobile, in which LED is used as lighting source. Firstly, the simplified illumination structure model is built, which is designed based on the theory of non-imaging optics and the parameters of traditional lenses. The structure is optimized by optical simulation software Zemax. Secondly, the three-dimensional (3D) model of lens is set up by SolidWorks software and simulated by TracePro. The results show that the optimized lens' light-use efficiency is improved by about 6%. Thirdly, the optimized lens is made and prepared for test. Finally, the experimental system is set up, by which the optical characteristics of the traditional and optimized lenses are investigated. The results show that the maximum light intensity is improved by about 128% at 5 m away and the irradiated area at the same illumination (50 lx) is enlarged by about 25%.

Key words optical design; non-imaging optics; collimating lens; light-use efficiency; LED

OCIS codes 220.2945; 120.1680; 150.2945; 170.2945; 230.3670

1 引言

随着照明行业的发展和节能环保的要求,LED 被认为将替代传统的白炽灯、荧光灯等照明光源,具有广阔的应用前景。与传统的照明光源相比,LED 具有高亮度、高可靠性、低功耗以及使用寿命长的特点^[1-2]。作为新一代的绿色照明光源,LED 被广泛应用于室内和室外照明领域^[3-5],如投影背光源、屏幕显示、各种车灯等。但是,由于 LED 发出的光近似朗伯体分布,其发光强度会随着辐射角度的变化而呈近余弦变化,因此发光角度大,方向性差,不能直接应用于照明。因此,需要针对不同的照明需求,对 LED 进行二次开发设计,根据不同的照明系统,使 LED 的光能得到合理的分配和应用。

近年来,基于 LED 的准直照明透镜主要利用自由曲面对光能进行重新分配实现多种照明效果。二次光

收稿日期: 2013-07-04; **收到修改稿日期**: 2013-07-16; **网络出版日期**: 2013-09-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费(ZYGX2012Z006)、四川省青年基金人才培养计划(2011JQ0025)

作者简介: 严强(1990—),男,硕士研究生,主要从事照明设计以及热分析方面的研究。E-mail: 870523508@qq.com

导师简介: 高椿明(1973—),男,博士,教授,主要从事光声光信息以及无损检测方面的研究。

E-mail: gaocm@uestc.edu.cn(通信联系人)

学设计的方法主要有经验试错法和偏微分求解法两种。试错法主要是利用三维(3D)建模软件如 SolidWorks、Pro/E 等绘制出光学镜头,然后将设计的结构在非成像光学仿真软件(TracePro、LightTools 等)中进行光线追迹^[6-8]来判断照明面的照度和整个光强的分布情况。但这种方法工作量太大,且不一定成功。偏微分求解法是利用非球面的透镜,建立基于偏微分方程的数学模型,通过将反射、折射等原理以及曲面参数化,利用能量守恒定律优化而得。而这种方法对数学方面要求很高,不适合一般的光学设计人员。

本文通过调研并测试市场上已有的 LED 准直透镜的参数,结合偏微分求解和试错法,利用专业照明仿真软件 TracePro 模拟分析镜头可行性。鉴于 TracePro 在自动优化方面的欠缺,采用光学设计软件 Zemax 进行优化分析,能缩短设计时间,提高镜头设计质量。

2 优化分析方法

一般来说,针对 LED 的照明光学准直透镜有菲涅耳透镜^[9]和自由曲面透镜。本文采用基于部分非球面的透镜,利用高透光材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),将发散的光重新分配,实现准直照明系统的设计。

准直透镜的设计主要采用旋转对称的折射-全反射-透射的结构。图 1(a)所示为透镜的二维(2D)简化模型,图 1(b)为透镜的三维模型。图中曲面 1 为透射聚光部分,该部分直接经过透镜进行折射聚光,大大增加了中心区域的光强,能够有效提高光的利用率。曲面 2 为全反射聚光部分^[10]。从 O 点出射的光线,经过 A 点处折射,使入射角度增大,在 B 点发生全反射,使光线理论上水平出射,这样有效地提高了光的利用率。为增加中心区域的光强度,曲面 1 经优化后为偶次非球面^[11-13],曲面 2 为抛物面。为节省材料,在光线出射处实行镂空处理,各面均平行,不影响透镜的准直效果。

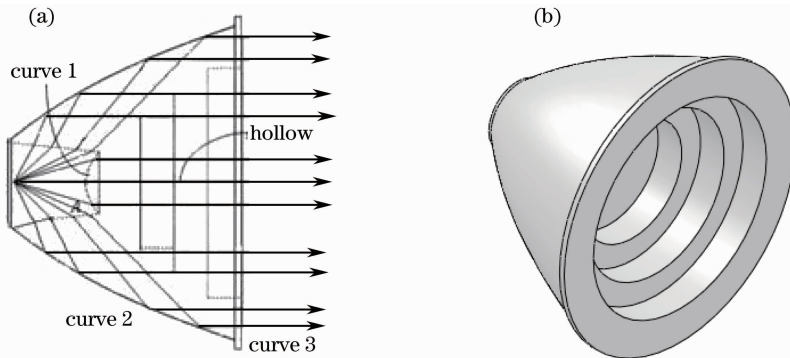


图 1 LED 透镜结构。(a)二维模型示意图;(b)三维结构图

Fig. 1 LED lens structure. (a) 2D model; (b) 3D model

2.1 Zemax 优化分析

采用无焦和物方远心设置,光源设置为半角为 75° 的面光源。利用旋转对称的偶次非球面进行优化,设置物距为 11 mm,像平面离透镜位置为 5000 mm。在 Zemax 的默认优化函数下,选择 RMS-Angular Radius-Centroid 优化模式,其余采用默认参数,经优化得到透射曲面的参数方程:

$$f(x) = -11.66(1 - \sqrt{1 - 0.00735x^2}) - 0.05545x^2 + 8.4531 \times 10^{-4}x^4, x \in [-5, 5]. \quad (1)$$

由于 LED 光源相对较小,在这里等效为一点光源。在光经 A 点进入透镜时,是从光疏介质进入光密介质,会发生折射,光线以较大入射角进入全反射面。如图 2 所示,根据 LED 光源的特点和光线的分布,假设光源在 O 点,OA 为光源出射光线,经过 GR 面的折射之后,入射到 B 点,并发生全反射,使绝大部分的光线都能在水平或偏离水平方向最小的角度上出射。

假设抛物曲面的方程为 $f(x) = ax^2 + bx + c$,任意入射光线为 l_0 ,光线从 O 点出射。通过求解未知参数,利用微分原理可以推导出最佳的曲面方程为

$$f(x) = -0.0075x^2 + 0.78x + 6.65, x \in [0, 33]. \quad (2)$$

2.2 TracePro 仿真分析

将利用 Zemax 优化后的准直透镜,导入 TracePro 中进行仿真分析,通过定义具有朗伯光分布的 LED

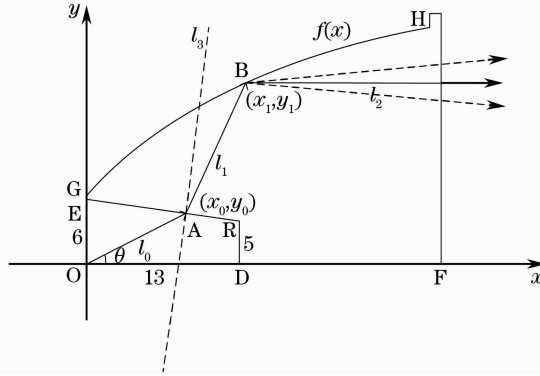


图 2 光线经抛物面焦点平行出射示意图

Fig. 2 Ray parallel out off parabolic surface

光源,联合仿真分析,探究模型优化的可行性。

光源按照实际使用 3 W 白光 LED,采用 1 mm×1 mm 的矩形面光源模拟,光线呈朗伯体分布,追迹计算约 75 万条光线,接收面为 2.5 m×2.5 m 的矩形区域,初始位置在距光源 5 m 处。

经仿真分析,得到如图 3(a)所示光斑图,从图中可以直观地看出光强的大致分布。图 3(b)为优化前后透镜的 5 m 处仿真截面光强变化曲线,从图中可以看出,在具有相同的照明范围内,优化后的透镜明显具有更大的光强。分析可知,利用 Zemax 优化后的准直镜头与原始的准直镜头相比,能够很好地将分散的 LED 光准直,提高了光斑的中心光强。

图 4 给出优化前后的透镜随距离变化的总光强和中心最大光强的对比曲线。由图 4(a)可以直观地看

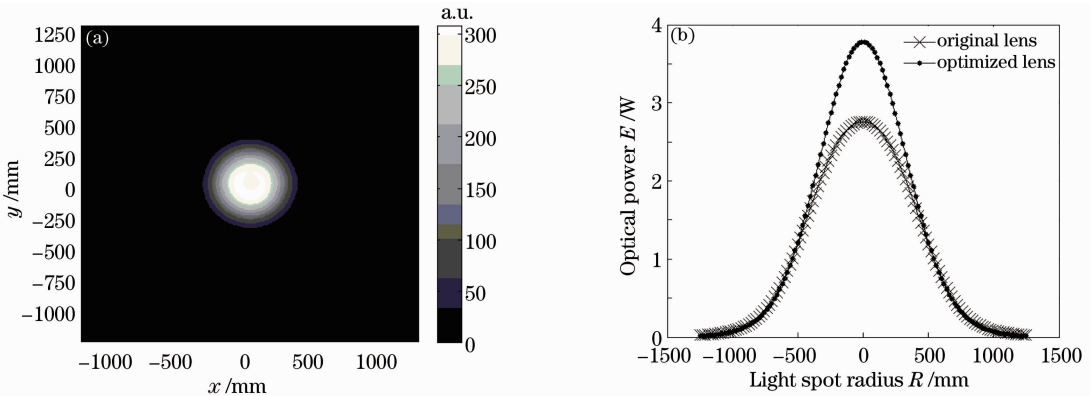


图 3 5 m 处光斑光强分布。(a)光斑投影图;(b)优化前后光斑截面光强分布曲线

Fig. 3 Light distribution at 5 m away. (a) Light spot; (b) sectional light distribution before and after optimization

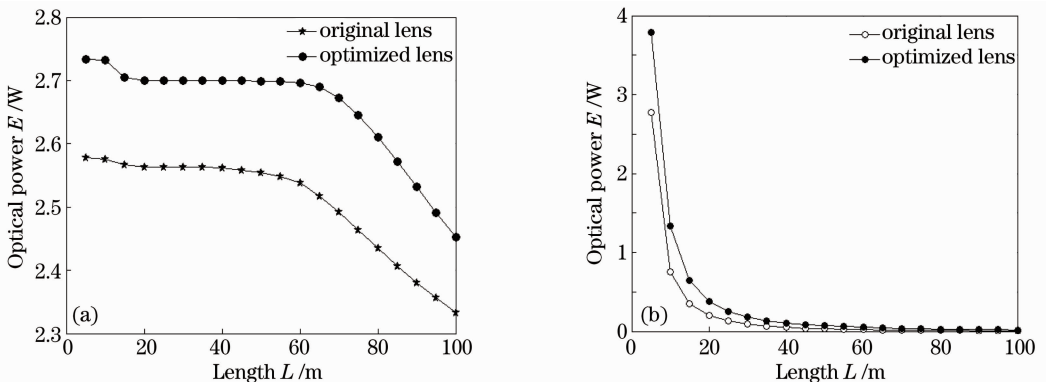


图 4 随距离变化光强大小。(a)总的光强变化曲线;(b)中心光强变化曲线

Fig. 4 Variation of light intensity. (a) Total intensity; (b) central intensity

出,优化后的镜头比优化前的镜头具有更高的光利用率,提高了大约6%。图4(b)表明经过优化后的镜头中心光强明显大于未经优化的镜头。

3 实验及结果

将优化后制作的准直镜头与LED进行封装处理,加上驱动电路^[14-15],照明系统正常工作。在该状态下按照图5所示的测试方法对照明系统在不同距离的光斑进行光强测试,整个测试在暗环境下完成,对比分析原镜头和优化镜头的数据。

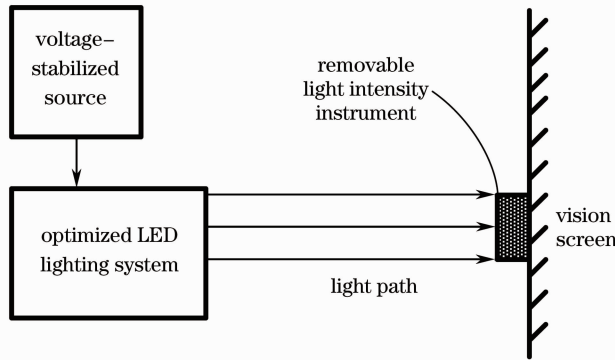


图5 光强测试系统示意图

Fig. 5 System of testing light intensity

图中光幕为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的网格化配光屏幕,照明系统中心光强最大处处于配光屏幕的中心处,测试过程中保持光斑的位置不动。

图6(a)和(b)分别为5 m处和7 m处原始透镜和优化后的透镜的光斑纵横截面的光强测试曲线图。从图中可以直观地看出,优化前5 m处光斑的中心光强为127.6 lx,优化后为291 lx,优化后的透镜的中心光强比原始透镜明显更高,提高了约128%;在具有相同光强(50 lx)时,优化前的透镜照明光斑直径为1.2 m,优化后的照明光斑直径为1.5 m,照明光斑直径增大了25%,经优化后的镜头比原始镜头具有更大的照明范围。优化前7 m处光斑的中心光强为81.9 lx,优化后为183.1 lx,优化后的透镜中心光强比优化前提高了约123.6%,在具有相同的光强(50 lx)时,优化前的透镜照明光斑直径为0.7 m,优化后的照明光斑直径为1.5 m,照明光斑直径增大了约114%。

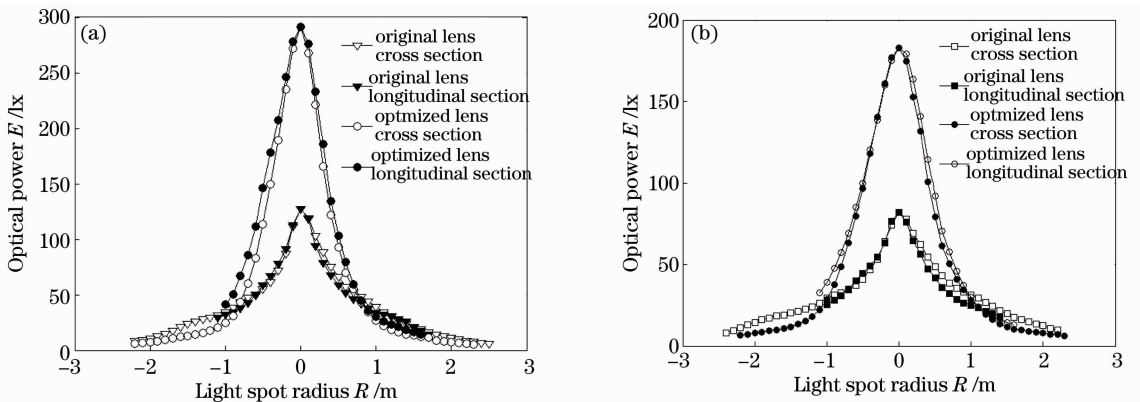


图6 透镜光斑截面光强。(a) 5 m处光强;(b) 7 m处光强

Fig. 6 Sectional light intensity distribution. (a) 5 m away; (b) 7 m away

经优化前后的准直透镜的中心光强对比曲线如图7所示。当距离为1 m时,优化前透镜的中心光强为805 lx,优化后为1390 lx,优化后的中心光强提高了约72.7%。随着距离变大,优化前后的透镜中心光强均急剧变小,最后趋于一致。

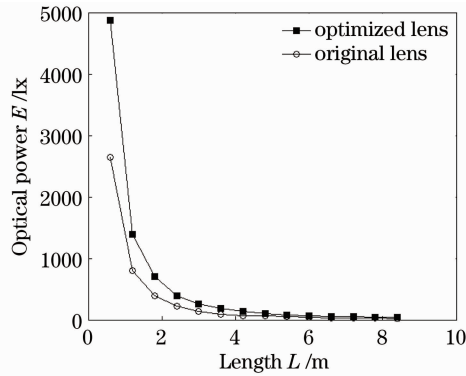


图7 随距离变化透镜中心光强对比曲线

Fig.7 Light intensity at the center of the lens versus distance

4 结 论

通过结合 Zemax 优化功能和 TracePro 照明仿真能力的优化设计方法研究及相应的实验测量,得到以下结果:

1) 建立了 LED 准直透镜的简化模型,利用 Zemax 和 TracePro 完成了对准直透镜的两个部分的优化设计。利用各种优化参数的对比仿真,通过分析其辐照度分布以及光能的利用率,确定最终的优化方案。

2) 建立了环境光强为 5 lx 的光强分布测试系统,满足车灯光强的测试要求。

3) 在相同的照明距离下测试得到,经优化后的透镜在 5 m 处中心光强提高了约 128%;在相同光强(50 lx)下,优化后系统的照明光斑直径提高约 25%;在 7 m 处中心光强提高了约 123.6%,50 lx 光强下,照明光斑直径提高了约 114%。

总之,通过利用光学辅助设计软件 Zemax 和 TracePro 优化设计的准直照明透镜,实现了对 LED 光源的合理的光能分配,为提高设计效率提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 Yan Ping, Li Jianqing. Computer aid design of optical system of LED for illumination [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25(3): 181-200.
严萍,李剑清.照明用LED光学系统的计算机辅助设计[J].半导体光电,2004,25(3):181-200.
- 2 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
李林,王光珍,王丽莉,等.实现均匀照明的LED系统设计方法[J].光学学报,2012,32(2):0222002.
- 3 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297-2301.
余桂英,金骥,倪晓武,等.基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J].光学学报,2009,29(8):2297-2301.
- 4 Shogo Kitano, Shinichiro Haruyama, Masao Nakagawa. LED road illumination communications system [J]. Vehicular Technology Conference 2003, 2003, 5: 3346-3350.
- 5 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
丁毅,顾培夫.实现均匀照明的自由曲面反射器[J].光学学报,2007,27(3):540-544.
- 6 Hans Joachim Frasch, Gerhard Steinmeiz, Carl Zeiss. Monte Carlo methods in raytracing software [C]. SPIE, 2002, 4769: 55-64.
- 7 J Mackey. Accuracy and efficiency of raytracing photoionisation algorithms [J]. Astronomy & Astrophysics, 2012, 539: A147-A161.
- 8 Matthias B Hulin, Johannes Hanika, Wolfgang Heidrich. Polynomial optics: a construction kit for efficient ray-tracing of lens systems [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(4): 1375-1383.
- 9 Tu Hao, Chen Jiabi, Qin Han, *et al.*. An optical design based on improving LED array far field illumination intensity [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2013, 24(1): 74-80.

- 涂 浩, 陈家璧, 秦 汉, 等. 基于提高 LED 阵列远场照度的设计[J]. 照明工程学报, 2013, 24(1): 74—80.
- 10 Michael Bass. Handbook of Optics (3rd edn.) [M]. Washington DC: Optical Society America, 2009. 42—127.
- 11 Jiang Jinbo, To Sandy, W B Lee. Design and fabrication of freeform reflector for automotive lighting system [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008, 19(3): 46—52.
- 蒋金波, 杜 雪, 李荣彬. 汽车照明系统的设计及超精密自由曲面加工技术[J]. 照明工程学报, 2008, 19(3): 46—52.
- 12 Qingfeng Wang, Dewen Cheng, Yongtian Wang, *et al.*. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements [J]. Appl Opt, 2013, 52(7): 88—99.
- 13 ZEMAX Manual. Optical Design Program User's Guide [M]. ZEMAX Development Corporation, 2009. 266—285.
- 14 Bin-Juine Huang, Chun-Wei Chen, Chin-Dian Ong, *et al.*. Development of constant-power driving control for light-emitting-diode (LED) luminaire [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 645—651.
- 15 Diego G Lamar, Manuel Arias, Alberto Rodriguez. Design-oriented analysis performance evaluation of a low-cost high-brightness LED driver based on flyback power factor corrector [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2614—2626.