

〈红外应用〉

用于辅助驾驶汽车的红外照明系统

庄亚宝, 刘杰, 薛豪, 朱向冰

(安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 为了解决在现有道路照明条件下, 因环境照度不够、环境光强快速变化等原因, 造成车辆对周边物体自动识别的准确率低的问题, 本文通过软件仿真, 设计了一种车载红外补充照明系统。使用红外 LED 作为光源, 光源发出的光线经抛物面反射镜准直后, 通过单排复眼透镜, 在距离光源 25 m 处得到均匀性大于 90% 的矩形光斑, 系统的辐射能利用率达到 98%, 通过 30 个照明模块组成平面阵列, 目标照明面的平均辐照度大于 0.8 W/m^2 。结果表明, 采用单排复眼透镜实现匀光, 其结构简单, 装配公差宽松; 本设计方法适用于其他照明系统。

关键词: 照明设计; 辅助驾驶; 红外照明; 复眼照明系统

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2023)09-0990-06

Vehicle Infrared Illumination System for Assistant Driving

ZHUANG Yabao, LIU Jie, XUE Hao, ZHU Xiangbing

(School of physics and electronic information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: An onboard infrared supplementary illumination system is designed through software simulations to solve the problem of low recognition accuracy caused by insufficient ambient illumination and rapid changes in ambient light intensity in an advanced driving assistance image recognition system. IR light-emitting diodes (LEDs) are used as light sources. After collimating the light emitted by the light source with a paraboloid mirror, a compound eye lens is used to realize a rectangular spot with uniformity greater than 90% 25 m away from the light source with radiation energy-use efficiency reaching 98%. The target surface is illuminated using 30 light-source module arrays, and the average irradiance of the target surface is greater than 0.8 W/m^2 . The results show that the assembly tolerance of a single-compound eye lens is looser, and the design method is flexible and suitable for use in other lighting systems.

Key words: illumination design, assistant driving, infrared illumination, compound eye illumination system

0 引言

高级辅助驾驶系统 (Advanced Driving Assistance System, ADAS) 是实现无人驾驶技术的重要基础, 其中摄像头是环境感知的基本设备。使用两个摄像头拍摄时, 可以在图像匹配的情况下测量障碍物的距离和大小, 但车载摄像头拍摄速率高、曝光时间短^[1], 在现有的道路照明条件下, 夜晚难以拍摄到高质量的障碍物图像^[2]; 采用激光雷达能够准确测量物体的距离和大小, 但激光雷达价格昂贵, 并容易受到恶劣天气

的影响, 另外激光雷达难以准确地识别交通标志。为提高 ADAS 目标识别的准确度和运行速度, 目前进行了很多图像识别的算法研究^[3-5], 但摄像头拍摄的图像质量会严重制约识别的效率。因此, 提高车载摄像头拍摄图像的质量是一个重要的研究课题。

采用主动红外系统能够以低成本的方式, 拍摄出高质量图像。拍摄到的图像质量受照明条件的制约, 道路照明经常不能满足拍摄高质量图像的要求, 可以采用红外光进行补充照明, 再通过红外相机拍摄出清晰的图像^[6-7]。相比较而言, 被动红外系统探测距离远,

收稿日期: 2022-06-19; 修订日期: 2022-07-20。

作者简介: 庄亚宝 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计。E-mail: 476736180@qq.com。

通信作者: 朱向冰 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电系统设计。E-mail: zxbing@mail.ahnu.edu.cn。

基金项目: 安徽省教育厅科研项目 (672162)。

但探测器价格较高，难以普及。进口的高档汽车，如奔驰采用的是主动红外系统，而奥迪和宝马采用的是被动红外系统；国内的红旗等品牌的高端汽车大多采用的也是主动红外系统。

为了提高对车辆周边物体识别的准确率，本文针对主动红外系统，设计了一种均匀照明光学系统。观瞄系统采用加装了可见光截止红外滤光片的黑白CCD（Charge Coupled Device）摄像头，在不考虑其他红外干扰的情况下，可以实现对本红外照明频率的最大响应。红外照明模块应在目标面处，达到照明均匀性和辐照度要求^[8]。为实现好的均匀照明效果，现有设计采用双排复眼照明方法^[9-13]，但结构仍然比较复杂，本文提出一种结构简单的均匀照明方法，并进行了软件仿真。

1 均匀照明方法分析

均匀照明技术的应用十分广泛，有两种常用的均匀照明方法。一种是自由曲面反射镜方法，其代替了早期的分块拼接的曲面反射镜方法，具体方法是建立光源经自由曲面到目标照明面的映射，求解微分方程，通过B样条插值和优化得到自由曲面反射镜^[14-15]，此方法适用于点光源；另一种是复眼照明方法，常使用两块参数一样的复眼透镜，对称放置，前后对应的子透镜为一子透镜组，经过各个子透镜组的光束通过聚焦透镜照射在整个目标面上并相互重叠，实现目标面均匀照明。

本文使用复眼照明方法，相较于自由曲面反射镜方法，复眼照明方法匀光效果好、辐射能利用率高、设计简单。

双排复眼照明方法可以应对准直光线有小发散角的情况，如小尺寸面光源发出的光线准直后有小的发散角，若使用双排复眼照明方法设计，此时前后两排子透镜还是一一对应关系，可以减弱光线小发散角带来的旁瓣，但其结构较为复杂。单排复眼透镜方法结构简单，但只适用于准直较好的光源。对于点光源，准直效果好，不需要双排复眼透镜解决小发散角问题，此时使用单排复眼照明方法更加简单。LED（Light Emitting Diode）光源在准直时完全可以当成点光源处理，而且使用率越来越高。因此，使用LED光源可以进一步简化复眼照明系统，并降低成本。

2 设计照明单元

2.1 系统参数

国家标准^[16]汽车近光灯和远光灯的测试距离是25 m，参考现有车灯照明标准，使用多个灯具分别向

不同方向照射，向正前方照射距离达到25 m，向两侧的照射距离大于12 m，向后方照射距离大于6 m，红外照明面上的光斑应是均匀、稳定的矩形。

表1给出了向正前方照射的照明模块的光学指标，限于篇幅，向其他方向照射的性能指标不再一一列出。

表1 向正前方照射的灯具光学指标

Table 1 Optical indicators of lamps illuminating straight ahead

Parameters	Index
Irradiance uniformity	>80%
Irradiation distance/m	25
Spot width and height/m	8×3
Average irradiance/(W/m ²)	>0.8

2.2 初始光学结构

设计之初，需要选好红外光源。综合考虑反射率、背景亮度、气象条件、光学元器件等因素^[17]，使用810 nm的红外光照明。经过比较后，采用OSRAM公司的SFH-4780S型红外LED，可以当成点光源，将其IES文件导入到ZEMAX\Objects\Sources\IESNA文件夹中。单颗红外LED的尺寸为3.5 mm×3.5 mm×2.39 mm，幅通量约为660 mW，辐射特性如图1所示。

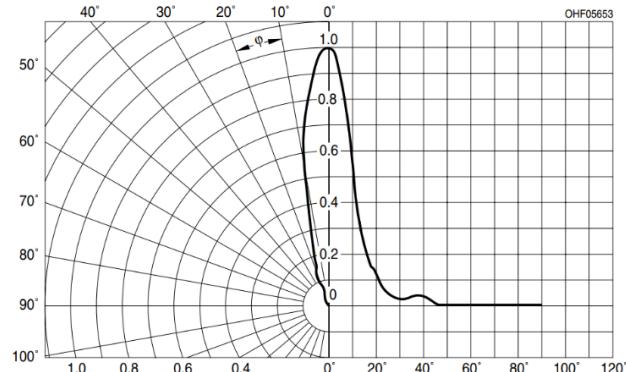


图1 红外LED的辐射特性

Fig.1 Radiation characteristics of the infrared LED

本设计使用单排复眼照明方法，具体方法如下：先使用抛物反射面或消球差透镜准直LED光源发出的光线，再使准直后的光线通过单排复眼透镜即可实现目标面均匀照明。相较于双排复眼照明系统，本系统中每个光学通道的光线在准直后只受一块子透镜调制，各个通道在目标面上形成等大的光场区域并相互重叠。各个子透镜完全相同，为平凸透镜，其第二面采用二次曲面消除部分球差，可提高边缘辐照强度和系统的辐射能利用率。

使用抛物面镜对LED发出的光线进行准直，将LED放在抛物面的焦点上。考虑到目标照明面较远，不使用聚焦透镜，通过调节复眼透镜的焦距，使各子

透镜在目标面上形成的光场区域与目标面大小匹配,如图2是照明系统的结构原理图。

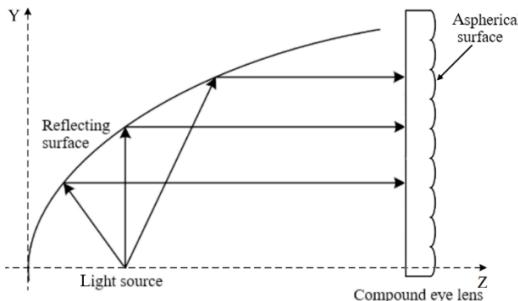


图2 照明系统的结构原理图

Fig.2 Structural schematic diagram of the illumination system

准直抛物面是无穷远点与焦点的等光程面,由 $Y-Z$ 面的曲线绕 Z 轴旋转得到。以反射面左顶点为坐标原点,建立右手坐标系,反射面方程为:

$$z = \frac{1}{4a}(x^2 + y^2) \quad (1)$$

式中: x, y, z 为反射面上点的坐标, y 取大于零部分, a 为LED光源的 Z 坐标,即抛物面焦点,本设计将LED光源放置 Z 轴上5 mm处,辐射方向为 Y 轴正方向。为充分利用光源能量,抛物面半径取23 mm。

复眼透镜采用PMMA(Polymethyl Methacrylate)材料,易于加工。下面将介绍如何得到子透镜参数。

照明系统可以看成平行光入射各个子透镜,聚焦后继续传播,照射到照明面,如图3是子透镜光路示意图。理想情况下,平行于光轴、入射高度为 h 的光线,经过焦距为 f 的聚光透镜后,与光轴的夹角 U 可由式(2)得到:

$$f = h / \tan U \quad (2)$$

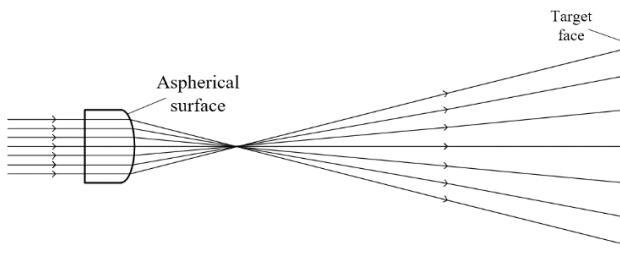


图3 子透镜光路

Fig.3 Optical path of sub lens

理想情况下,平行于光轴均匀入射子透镜的光线,将在目标照明面上均匀分布。目标照明面宽度和高度之比为8:3,因此复眼透镜中每一块子透镜宽和高之比也为8:3。通过边缘光线分析,可得到公式^[18]:

$$\tan \theta = \frac{H}{2D} \quad (3)$$

式中: θ 为最大视场; H 为目标面光斑的高度3 m; D

为目标面的位置25 m,解得 $\tan \theta$ 为0.06。当子透镜的半径确定时,焦距 f 就确定了,子透镜高度的近似计算公式为:

$$\frac{h_0}{2} = f * \tan \theta \quad (4)$$

式中: h_0 为子透镜高度; f 为子透镜焦距。

若球差较大,将导致边缘光线与光轴的角度大于理想值,如图4所示,边缘光线与子透镜光轴的交点 F_0' 在像方焦点 F' 的左侧^[18],与光轴的夹角也比理想值更大,边缘光线将射出目标面,边缘辐照强度弱,辐射能利用率低。

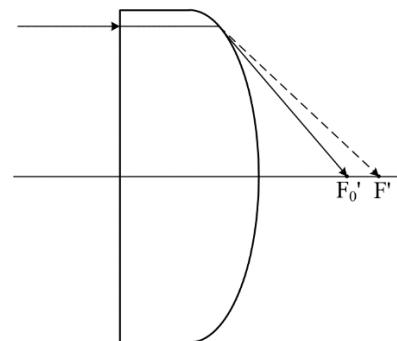


图4 对球差的分析

Fig.4 Analysis of spherical aberration

使用二次曲面可以很好地消除球差。二次曲面公式如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (5)$$

式中: c 是曲率; r 是矢径数值; k 是圆锥系数。 r 越大, k 对 z 影响越大,面型越偏离球面,而 r 较小时接近球面,正好消除随 r 增大的球差。

复眼照明将各个子光束在整个目标面重叠,因此在一定限度内,子透镜尺寸越小,单个子透镜接受到的平行光的均匀性越好,其在目标面成像越均匀。因制作工艺等原因,复眼透镜尺寸不能无限减小,每个子透镜单元的宽度设计为0.8 mm,高度为0.3 mm。使用公式(3),得到子透镜焦距为2.5 mm。

子透镜的初始结构是在序列模式下得到的,子透镜厚度设置为3 mm,第一面为平面,固定子透镜的焦距为2.5 mm,优化第二面的半径和圆锥系数,得到消球差的子透镜参数。在非序列模式下,将复眼透镜中心设置在 $Y=12$ mm处,将子透镜初始结构导入, X 方向有60个子透镜, Y 方向有80个子透镜。

2.3 优化

在ZEMAX中设置好初始结构,对1000万条光线追迹,同时微调子透镜第二面的半径和圆锥系数值。经过仿真发现,消除子透镜的部分球差可以实现

均匀照明。优化后的子透镜厚度为 3 mm, 二次曲面的曲率半径为 -1.212 mm , 圆锥系数 k 为 -1.82 , 图 5 给出了优化后的目标照明面上的辐照度分布图, 辐照度单位是 W/m^2 , 优化时设置光源能量为 1 W。

光线经过光学系统后, 在 25 m 处的目标面上得到尺寸为 $8 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的矩形照明面, 辐射能利用率达到 98%, 均匀性大于 90%。

在仿真中, 尝试增大子透镜的尺寸, 将子透镜宽度设置为 1 mm 左右并设置为变量, 高度固定为 0.375 mm, 利用 ZEMAX 进行优化。结果表明, 子透镜的宽度和高度比不是严格的 8:3, 原因是子透镜的球差与孔径有关, 二次曲面无法同时满足 X 方向和 Y 方向球差校正的要求, 此时需要调整子透镜的宽高比, 以同时满

足照明均匀性和照明面尺寸要求。在不考虑改变子透镜厚度和材料的情况下, 本设计优化的自由度是子透镜第二面的半径、圆锥系数和宽度, 避免了直接在非序列模式下优化时速度慢的问题。

3 整体结构与公差分析

单个照明模块不能在目标面上达到 0.8 W/m^2 的辐照度, 使用 30 个光学结构组成平面阵列进行照明, 如图 6 所示。阵列的宽度和高度分别为 244 mm 和 149 mm, 在 25 m 处的目标照明面上, 平均辐照度可达到 0.81 W/m^2 , 满足设计指标的要求。因为采用抛物反射面, 系统尺寸较大, 可以使用消球差透镜进行准直^[10], 系统尺寸将会减小。

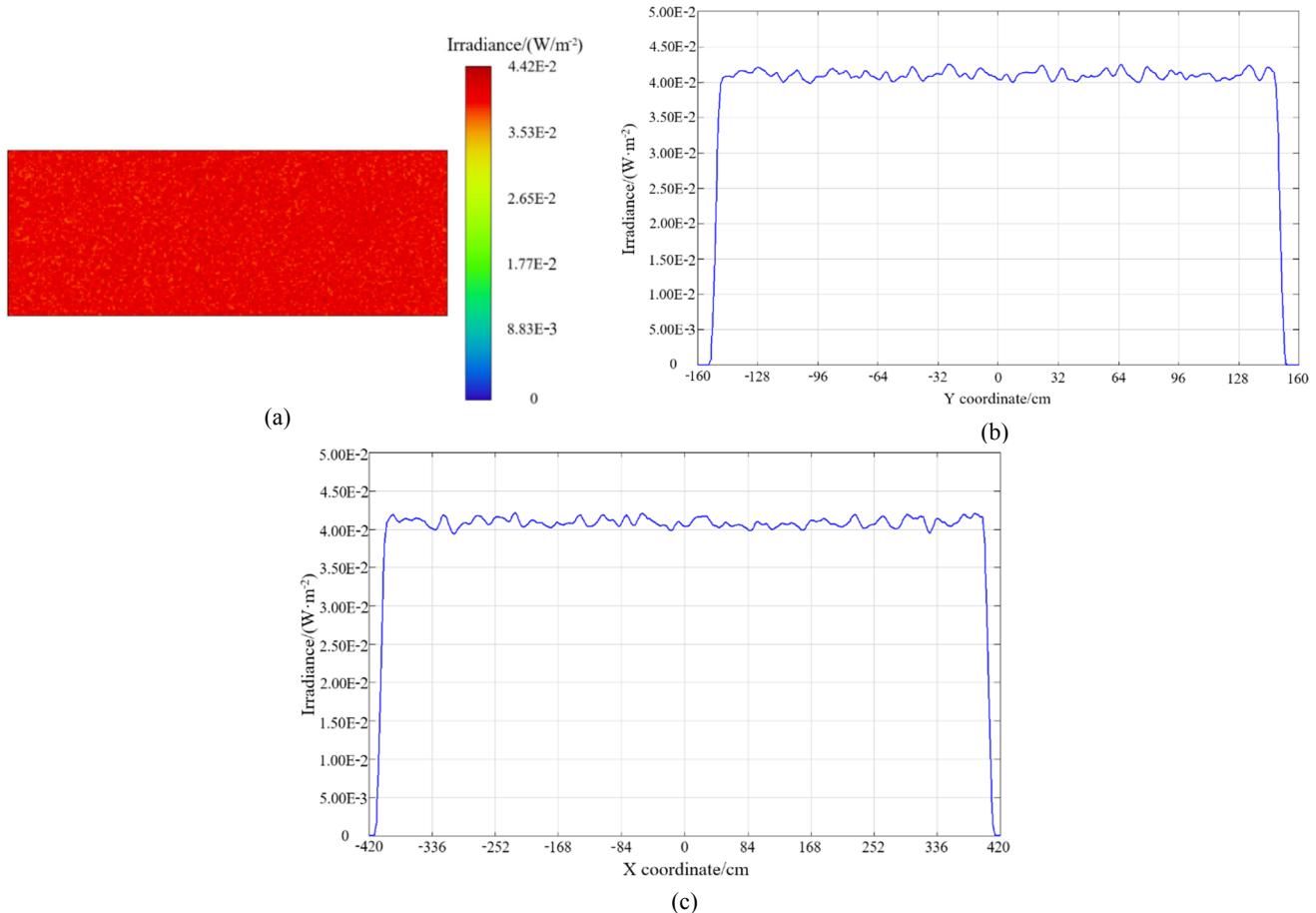


图 5 优化后的目标照明面的辐照度分布情况。(a) 伪彩色图; (b) Y 方向; (c) X 方向

Fig.5 Irradiance distribution on the target surface after optimizing. (a) Pseudo-color map; (b) Y direction; (c) X direction

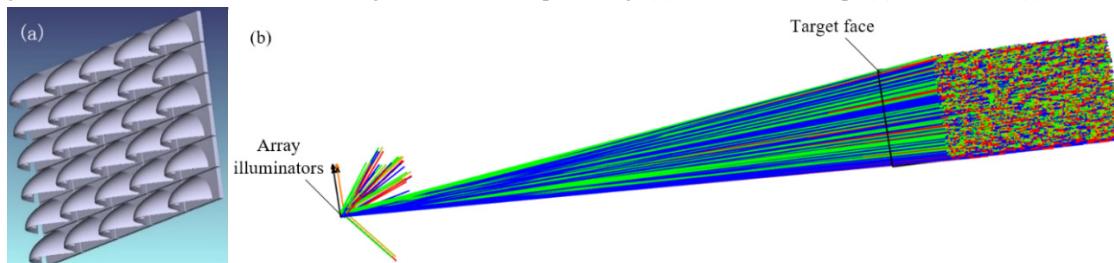


图 6 30 个光学结构的平面阵列及其照明效果 (a) 照明模块阵列; (b) 照明效果

Fig.6 A planar array of 30 optical structures and its illuminating effect. (a) Array illuminators; (b) Illuminating effect

合理的公差分配能降低成本，减少制造、加工、装配的难度^[19-20]。根据抛物面、复眼透镜的加工水平以及系统装配水平，初步分配公差。使用 ZEMAX 功能进行公差分析，进行了 500 次的模拟制造，目标面上的辐照度和均匀性基本满足要求，最终的公差分配如表 2 所示。

表 2 红外照明模块的主要公差分配

Table 2 Main tolerance allocation of infrared illuminators

Type	Tolerance
Surface tolerances	Radius/mm 0.04
	Thickness/mm 0.02
	PV(peak-to-valley)/μm 0.4
Material	Index 0.002
Element tolerances	Decenter X/mm 0.02
	Decenter Y/mm 0.02
	Decenter Z/mm 0.02
	Tilt X/° 0.04
	Tilt Y/° 0.04
	Tilt Z/° 0.02

表 2 中，Surface tolerance 包括复眼透镜子透镜的曲率半径公差、厚度公差，以及二次曲面的 PV 值；Material 是复眼透镜的材料，Index 指折射率；Element tolerances 包括装配过程中原件的偏心和旋转公差，decenter x 是沿 X 轴的偏移，tilt x 是以 X 轴旋转的角度。

4 结论

本文设计了一种红外照明装置，对 ADAS 中图像拍摄进行补充照明，以提高系统识别率。选择波长 810 nm 的 LED 光源，用抛物面反射镜将光线准直，使用复眼照明方法，在车辆正前方 25 m 处，实现了宽 8 m、高 3 m 的均匀照明，辐照度均匀性大于 90%，辐射能利用率达到 98%；通过 30 个照明模块阵列对目标面进行照明，达到 0.8 W/m² 的照明要求。

本文指出复眼照明系统的复杂程度主要取决于准直效果，当准直效果较好时不需要使用两块复眼透镜，只需要解决球差带来的边缘光线分布不均问题。本文提出的设计方法只使用一块复眼透镜，对准直后的光线进行角度调制，结构简单，装配公差宽松。使用二次曲面压缩边缘光线，使得辐射能利用率增大，边缘辐照度增强。本设计方法效率高，避免了在非序列模式下直接优化速度慢的问题，还便于调整照明面的尺寸。本设计方法适用于其他的照明系统，如紫外曝光机、工业扫描枪等。

参考文献：

- 畅里华, 王旭, 温伟峰. 高速摄影激光照明技术取得新进展[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 1-3.
CHANG Lihua, WANG Xu, WEN Weifeng. New progress has been made in laser illumination technology for high-speed photography[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(4): 1-3.
- 李堃. 面向辅助驾驶的全天候灯语识别技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 47-48.
LI Kun. Research on All-Weather Light Recognition Technology for Assisted Driving[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 47-48.
- 柳毅. 面向智能辅助驾驶的道路目标检测和路况识别技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020: 32-43.
LIU Yi. Road Target Detection and Road Condition Recognition Technology for Intelligent Assisted Driving[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020: 32-43.
- 滕碧红. 微光环境下基于 R-CNN 优化算法的交通道路图像识别[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2021, 23(6): 64-69.
TENG Bihong. Traffic road image recognition based on R-CNN optimization algorithm in low light environment[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition*, 2021, 23(6): 64-69.
- Borrego Carazo J, Castells Rufas D, Biempica E, et al. Resource-constrained machine learning for ADAS: a systematic review[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 40573-40598.
- 刘杰, 翟从鸿, 朱向冰. 红外光学系统在辅助驾驶中的应用研究[J]. 中国照明电器, 2019(12): 16-19.
LIU Jie, ZHAI Conghong, ZHU Xiangbing. Application of infrared optical system in assisted driving[J]. *China Light & Lighting*, 2019(12): 16-19.
- 许俊. 汽车主动夜视红外发射系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-5.
XU Jun. Research on Automobile Active Night Vision Infrared Emission System[D]. Changchun: Jilin University, 2017: 1-5.
- 陈庆佑. 主动式红外夜视仪中的几个重要参数问题[J]. 红外技术, 1985(4): 22-27.
CHEN Qingyou. Several important parameter problems in active infrared night vision instrument [J]. *Infrared Technology*, 1985(4): 22-27.
- 周平. 液晶投影仪照明系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 19-32.
ZHOU Ping. Research on Lighting System of Liquid Crystal Projector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 19-32.
- 王沛沛, 杨西斌, 朱剑锋, 等. 基于复眼透镜的大面积均匀照明方案研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 771-778.
WANG Peipei, YANG Xibin, ZHU Jianfeng, et al. Research on large area uniform illumination scheme based on compound eye lens[J]. *Applied Optics*, 2014, 35(5): 771-778.

- [11] 云竹溪, 杨波, 潘帅, 等. 应用于工业扫描枪的照明系统设计[J]. 光学仪器, 2020, 42(3): 45-49.
YUN Zhuxi, YANG Bo, PAN Shuai, et al. Design of lighting system for industrial scanning gun[J]. *Optical Instruments*, 2020, 42(3): 45-49.
- [12] 张燃, 张国玉, 张健, 等. 大面积发散太阳模拟器的均匀照明[J]. 光学精密工程, 2019, 27(3): 552-560.
ZHANG Ran, ZHANG Guoyu, ZHANG Jian, et al. Uniform illumination of large area divergent solar simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 552-560.
- [13] 郭昊成, 黄宇欣, 郭方正. 基于液体透镜的复眼透镜阵列的照明特性研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(29): 210-211.
GUO Haocheng, HUANG Yuxin, GUO Fangzheng. Study on illumination characteristics of compound eye lens array based on liquid lens[J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2020, 16(29): 210-211.
- [14] 陈宇灏. 光学自由曲面在 LED 道路照明领域的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 12-26.
CHEN Yuhao. Application of Optical Free-Form Surface in LED Road Lighting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 12-26.
- [15] 陈忠雨. 基于自由曲面的紫外 LED 匀光系统研究[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2018: 13-20.
CHEN Zhongyu. Research on UV LED Smoothing System Based on Free-Form Surface[D]. Chongqing: University of Chinese Academy of Sciences (Chongqing Institute of Green Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences), 2018: 13-20.
- [16] 上海汽车灯具研究所. 发射对称近光和/或远光的机动车前照灯[S]. GB 19152-2016, 北京: 中国标准出版社, 2016.
The Institute of Shanghai Automotive Lighting. Motor Vehicle Headlamps Emitting a Symmetrical Passing Beam or A Driving Beam or Both[S]. GB 19152-2016, Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [17] 王红培, 栾光琦, 田超, 等. 天气条件对车载红外辅助驾驶性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 1-7.
WANG Hongpei, LUAN Guangqi, TIAN Chao, et al. The influence of weather conditions on vehicle infrared assisted driving performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 1-7.
- [18] 张以謨. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021: 44.
ZHANG Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2021: 44.
- [19] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 9-32.
LI Jianjun, CHU Chunyan, LU Weitong, et al. Research progress in preparation and application of microlens array [J]. *Acta optica Sinica*, 2021, 41(21): 9-32.
- [20] 尹超, 李艳秋, 闫旭, 等. 深紫外光刻照明系统的微反射镜阵列公差分析[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 150-156.
YIN Chao, LI Yanqiu, YAN Xu, et al. Tolerance analysis of micro mirror array in deep UV lithography illumination system[J]. *Acta optica Sinica*, 2020, 40(7): 150-156.