

基于自由曲面反光杯的LED阵列系统优化设计

吴铭扬 张巧芬 王桂棠 吴黎明 邓耀华

Optimized design of LED array system based on free-surface reflective cups

WU Mingyang, ZHANG Qiaofen, WANG Guitang, WU Liming, DENG Yaohua

引用本文:

吴铭扬, 张巧芬, 王桂棠, 等. 基于自由曲面反光杯的LED阵列系统优化设计[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1115–1124. DOI: 10.5768/JAO202445.0601002

WU Mingyang, ZHANG Qiaofen, WANG Guitang, et al. Optimized design of LED array system based on free-surface reflective cups[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1115–1124. DOI: 10.5768/JAO202445.0601002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于LED反光杯系统的优化研究

Optimization research based on LED reflective cup system

应用光学. 2024, 45(2): 329–336 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201008>

基于自由曲面透镜的三基色LED照明系统研究

3-Primary-color LED illumination system based on freeform-surface lenses

应用光学. 2019, 40(1): 113–119 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105002>

矩形复合抛物面空间双向照明节能多功能反光杯设计

Design of rectangular composite paraboloid three-dimensional two-way lighting and energy-saving reflective cup

应用光学. 2019, 40(2): 323–333 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205004>

基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统

Panoramic fisheye optical system based on freeform surface design

应用光学. 2022, 43(3): 392–398 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301003>

基于改进粒子群算法的LED光源阵列优化

Optimization of LED light source array based on improved particle swarm algorithm

应用光学. 2022, 43(3): 524–531, 543 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0305003>

基于增强现实的照明系统光学设计与分析

Optical design and analysis of illumination system based on augmented reality

应用光学. 2022, 43(2): 179–190 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1115-10

基于自由曲面反光杯的LED阵列系统优化设计

吴铭扬^{1,2}, 张巧芬¹, 王桂棠¹, 吴黎明¹, 邓耀华¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广工大数控装备协同创新研究院
沧科智能科技有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要: 针对当前机器视觉检测中存在目标面照明均匀度较低与能量利用率不足问题, 本文首次提出运用LED自由曲面反光杯取代普通二极管进行阵列排布, 并优化出最优间距, 实现对目标面中心照度的补偿, 减少大角度光源的损耗, 提升在光源阵列系统中的照明均匀度与能量利用率。首先从理论上分析在自由曲面反光杯光源阵列中, 光源之间最优间距分别与半光强角和目标面距离之间的关系, 然后计算出自由曲面反光杯阵列分别为矩形, 环形, 三角形时的最优间距, 同时运用普通二极管进行相应阵列实验对比分析。实验结果表明: 在3种阵列形式下自由曲面反光杯阵列光源系统的能量利用率高于70%, 照明均匀度高于89%, 与普通二极管阵列相比, 能量利用率至少提升了58.6%, 照明均匀度至少提升了12.8%。其中, 自由曲面矩形阵列光源整体光源照度最高, 能量利用率最佳为74.2%, 与普通二极管阵列相比提升了61.9%; 自由曲面环形阵列光源照明均匀度最好, 照明均匀度最佳为94.1%, 与传统二极管阵列相比提升了15%。最终实验结果得出, 采用LED自由曲面反光杯光源进行阵列组合, 可使整体光源效果得到显著提升。

关键词: 自由曲面反光杯; 斯派罗法则; 阵列组合; 照明均匀度; 能量利用率

中图分类号: TN202; TM923.34

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0601002

Optimized design of LED array system based on free-surface reflective cups

WU Mingyang^{1,2}, ZHANG Qiaofen¹, WANG Guitang¹, WU Liming¹, DENG Yaohua¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Cangke Intelligent Technology Co., Ltd., CNC Equipment Collaborative Innovation Research Institute of Guangdong University of Technology, Foshan 528225, China)

Abstract: In view of the problems of low target surface illumination uniformity and insufficient energy utilization rate in the current machine vision detection, the use of LED free-surface reflective cups to replace ordinary diodes for array arrangement was proposed for the first time, and the optimal spacing was optimized to realize the compensation of the center illumination of target surface, reduce the loss of large-angle light source, and improve the illumination uniformity and energy utilization rate in the light source array system. In the free-surface reflective cups light source array, the relationship between the optimal spacing in light sources and the half-light intensity angle and the target surface distance was first theoretically analyzed, respectively. Then, the optimal spacing was calculated when the free-surface reflective cup arrays were rectangular, circular and triangular, respectively, and the corresponding array experiments were compared and analyzed by using ordinary diodes. The results show that under three array forms, the energy utilization rate of the system is higher than 70%, and the illumination uniformity is higher than 89%. Compared with the ordinary diode array, the energy utilization rate is improved by at least 58.6%, and the illumination uniformity is improved by at least 12.8%. Among them, the overall light source of the free-surface rectangular array light source has the highest illumination, and the optimal energy utilization rate is 74.2%, which is 61.9% higher compared with

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金 (61705045); 2023年佛山市促进高校科技成果服务产业发展扶持项目 (2023DZX02)

作者简介: 吴铭扬 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事机器视觉、非成像光学研究。E-mail: 15915866646@163.com

通信作者: 张巧芬 (1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事机器视觉、非成像光学、光纤通信研究。E-mail: zhqf@gdut.edu.cn

the ordinary diode array. The free-surface circular array light source has the optimal illumination uniformity of 94.1%, which is 15% higher compared with the traditional diode array. The final experimental results show that using the LED free-surface reflective cup light source for array combination, the overall light source effect can be significantly improved.

Key words: free-surface reflective cup; Sparrow's law; array combination; illumination uniformity; energy utilization rate

引言

第四代新光源^[1]发光二极管(light emitting diode, LED)^[2]因功耗低、寿命长、体积小等特点^[3],广泛应用于视觉检测^[4]、日常照明^[5],仪器显示等领域^[6]。特别在视觉检测领域中,能否获取高质量的目标检测图像是视觉检测工序的最重要步骤之一,优质的高质量目标检测图像对后续图像处理,如指定目标物进行特征提取和缺陷分析都具有重要意义。因此,光源在视觉检测中的作用越发重要,较高的照明均匀度^[7]将有效增强目标物体的缺陷显现与特征分离,有助于精确地分离目标物体和环境背景。LED光源较好的性能特点^[8]成为机器视觉领域中的主要光源,但单颗LED光源光照度较低^[9],照明均匀度范围^[10]较小,因此不能满足机器视觉^[11]全方位缺陷检测^[12]的需要。在此背景下,杨超等^[13]运用双向反馈网格法设计了目标面中心无光照度的透镜,实现了较高的均匀度。SUN X等^[14]通过设计特殊的全内反射透镜,解决了机器视觉在不同环境下特定辐照度照明系统,提升了光斑的均匀度。PENG X等^[15]提出一种集成自由曲面透镜和方形棒透镜设计方法,解决了短照明和混合多光谱通道的小检测区间光学效率和均匀性较低问题。唐清奎等^[16]提出一种基于多目标人工鱼群算法,实现了对LED阵列组合的照度均匀度的优化。张航等^[17]在控制距高比的条件下,运用对称性分析将配光曲线进行分段式处理,实现了直下式矩形阵列光源系统的光照均匀度优化。肖韶荣等^[18]提出运用紫外LED阵列组合优化的方式,实现目标面的均匀照明。WU R等^[19]通过运用LED透镜光源的矩形阵列形成系统光源,使得目标面具有较理想的光照均匀度。这些研究结果表明,阵列式^[20]光源系统对于光照均匀度^[21]均有较好的提升效果,但并未着重考虑光源系统中能量利用率的问题,面对光照能量不足和中心照度较低时,大多采用增加光源数量的形式对目标面进行照明补偿^[22],这种不断增加光源数量的形式,使阵列光源系统的散热成为一个较大的问题。

本文通过分析自由曲面反光杯设计原理,运用

自由曲面反光杯对出射光线进行汇集,实现边缘光线对中心照度进行补偿,提升了整体系统的能量利用率。同时运用自由曲面反光杯替代普通二极管进行阵列组合,结合辐照度原理和斯派罗法则对自由曲面反光杯不同阵列方式进行分析,计算出反光杯阵列为矩形阵列、环形阵列、三角形阵列时的最优间距,并分析了自由曲面反光杯在3种阵列形式下的能量利用率和光照均匀度。

1 自由曲面反光杯的设计与仿真

1.1 自由曲面反光杯的设计原理

自由曲面反光杯主要分为第一曲面与第二曲面。通常情况下,第一曲面不进行光线传输,主要由第二曲面对光源出射的大角度光线进行反射。在反光杯系统中光源光线主要分为两部分,一部分是可以直接出射到达目标面的小角度光线,另一部分则是需要通过反光杯内表面进行反射到达目标面的大角度光线。图1为建立的反光杯示意图。以图1中反光杯焦点为坐标原点建立坐标系,抛物线表示反光杯母线,抛物线方程为^[23]

$$H = A \cdot R^2 / 4 + C \quad (1)$$

式中: $A = (2H + \sqrt{4H^2 + R^2}) / R^2$; $C = (2H - \sqrt{4H^2 + R^2}) / 4$ 。图1中 R 为反光杯的出射孔径, H 为反光杯的深度, θ 为光线出光角度。

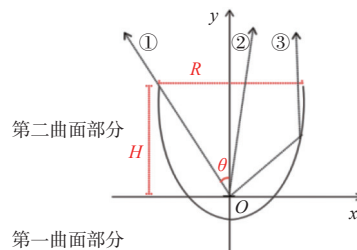


图1 反光杯示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflective cup

在光学系统设计时,若光学系统的出射孔径大于发光芯片尺寸5倍以上,则光学系统内部光源可视为点光源。如图1所示,所有光线可视为从焦点处发射,其中光线①与光线②为直接照射光线,光

线①从反光杯边缘处射出,由边缘光线定理可知,光源光线能够直接照射的角度为 θ ,且当光源发射光线与光轴的夹角大于 θ 时,光线需要先到达反光杯第二曲面,再经反射后到达目标面。由于普通发光二极管的发光角度可达到 180° ,但在视觉检测时目标面一般仅在照射范围 $30^\circ\sim 90^\circ$ 之间,因此若不通过二次光学设计改变大角度光线光路,则将造成大部分光线损失。通过进行自由曲面反光杯设计,将大角度出射光线进行汇聚收集,在一定程度上能够有效增强光源系统的能量利用率,缩小出射光线光照角度,使更多的光线到达目标面。反光杯仿真图和普通二极管仿真图如图2和图3所示。从图2可以看出,经过反光杯设计的光源的出射光线呈汇聚状态,且经反光杯内壁反射,使得更多的出射光线照射到目标面上,能够在一定程度上提升光源的能量利用率,降低光线损耗。从图3可以看出,普通二极管的光线发散角度较大,使整体光线呈发散状态,无法实现光源出射的大角度光线在目标面汇聚,造成光线损耗较大,光能利用效果较差。

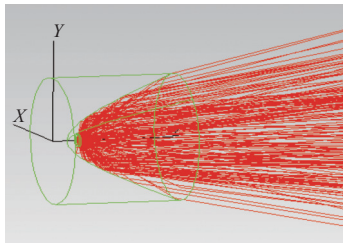


图2 反光杯仿真图

Fig. 2 Simulation diagram of reflective cup

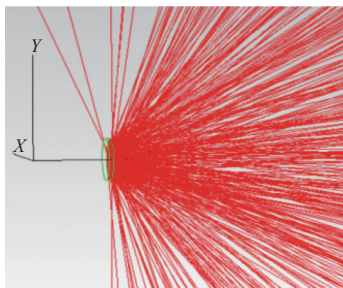


图3 普通二极管仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of ordinary diode

由于在反光杯光源系统中存在较大部分光线经内壁进行发射,需要选择对光线吸收较低、发射率较高的材料进行制作,因此,在反光杯制作时将选用成本较低、可塑性较好的铝材料,并运用真空电镀处理方式,在反光杯内壁形成一层纯铝电镀

膜,使反光杯反射率达到90%以上,能够有效进行光线反射汇聚。同时为了控制反光杯的尺寸精度,采用精度范围在几微米至几十微米范围内的数控机床进行加工,可实现反光杯在毫米量级的尺寸精度,加工的反光杯实物模型如图4所示。图4中反光杯为工厂代加工的半孔径为5 mm,第二面曲率半径为1,第二面圆锥常数为-1.2,厚度为1 mm的实物模型,且反光杯内壁均进行电镀处理,表面具有较好的反射特性。



图4 反光杯实物模型

Fig. 4 Physical model of reflective cup

1.2 自由曲面反光杯辐照度原理

在反光杯光源系统中,由于LED发光芯片尺寸远小于出射孔径,始终被视为点光源。在大多数情况下,LED光源被视为朗伯光源,但在照射时并非所有的光源都属于理想的朗伯体。在单个反光杯光源中,若不考虑发光芯片尺寸、内部材料吸收以及大气的反射、折射等影响,光源照度分布^[9]为

$$E(l, \theta) = E_0(l) \cos^m \theta \quad (2)$$

式中: θ 为光源出射光线与光轴的夹角; $E_0(l)$ 为在光轴方向上距离光源为 l 处的辐照度; m 为光源的辐射模式,当光源为完美的理想朗伯光源时, $m=1$,但实际情况下 m 值大于30。 m 值可以通过半光强角 $\theta_{1/2}$ (半光强角定义为辐照度为光轴方向一半照度时的发光角度)计算得到^[9]:

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (3)$$

在对光源进行自由曲面反光杯建模时,根据平方反比定律^[24]可知,在空间坐标系中,自由曲面反光杯焦平面任意一点 $Q(x, y, z)$ 的辐照强度^[25]可以表示为

$$E(x, y, z) = \frac{Z^m L_{\text{led}} A}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + Z^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (4)$$

式中: L_{led} 为LED发光芯片的亮度,单位为 cd/m^2 ; A 为反光杯面积; (X, Y, Z) 为反光杯的位置坐标。由

单个自由曲面反光杯产生的辐照度可以推出,若存在 n 个自由曲面反光杯同时照射时,总光强度可以表示为

$$E(x, y, z) = E_1 + E_2 + E_3 + \cdots + E_{n-1} + E_n \quad (5)$$

在视觉检测中,单个光源的光照强度不够且不

能够实现检测物体表面的均匀照明,为凸显目标物体表面特征,实现目标物体与背景分离,将继续探究多反光杯阵列系统的搭建,主要研究光源之间的距离对整体照明效果的影响。以2个自由曲面反光杯为例,总光强度为^[25]

$$E(x, y, z) = Z^m L_{\text{led}} A \left\{ \left[\left(x - \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+2}{2}} + \left[\left(x + \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+2}{2}} \right\} \quad (6)$$

式中 d 为2个反光杯中心间的距离。随着间距 d 的增加,2个反光杯光源的照射范围也会不断增大,在间距 d 达到某一值时,照射面的中心照度范围将达到最大,照明均匀度最高,可获得双光源阵列的均匀照度分布。根据斯派罗法则^[9],当 $x=0$, $y=0$ 时,令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$,则得到自由曲面反光杯的间距最大值:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \cdot z \quad (7)$$

由式(7)可以发现,间距 $d_{\max}$ 与 m 和 z 存在一定的关系。通过式(3)可知, m 随着半光强角 $\theta_{1/2}$ 的变化而改变,则将式(3)代入式(7)可得:

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4 \ln \cos \theta_{1/2}}{3 \ln \cos \theta_{1/2} - \ln 2}} \cdot z \quad (8)$$

由式(8)可知,间距 $d_{\max}$ 最终由半光强角 $\theta_{1/2}$ 和目标面与光源间的距离决定。选取 $z=50$ mm 时,分别对半光强角为 10° 、 25° 、 40° 、 55° 、 70° 、 85° 的光源进行计算,同时取 $\theta_{1/2}=30^\circ$ 时,分别对 z 为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm 的光源进行计算,得到的最优间距 $d_{\max}$ 如图5和图6所示。

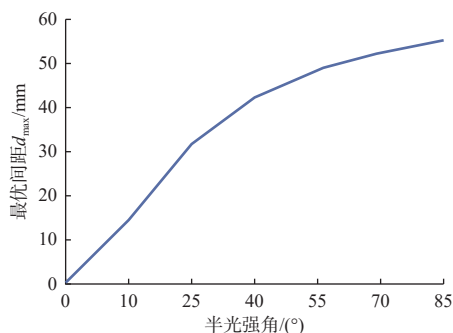


图5 不同半光强角下的最优间距

Fig. 5 Optimal spacing at different half-light intensity angles

由图5和图6可知,光源的最优间距 $d_{\max}$ 与半光强角呈正向关联,与目标面距离呈线性正比例

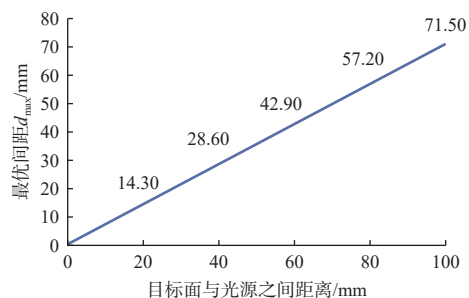


图6 不同目标面距离下的最优间距

Fig. 6 Optimal spacing at different target surface distances

关系。在一定范围内,光源的最优间距 $d_{\max}$ 随着半光强角的增大而不断增大,但达到一定角度后其变化将不断趋于平缓。对于目标面与光源的距离变化,最优间距 $d_{\max}$ 则是随着其增加而不断变大。为进一步验证实验结果,本文建立双光源模型进行验证。设置矩形发光芯片尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,厚度为 0.1 mm ,发射光线为 100 000 条,目标面尺寸设置为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,厚度为 1 mm ,反光杯的第二面曲率半径为 1,圆锥常数为 -1.2 ,目标面距离发光芯片 150 mm ,光源半光强角 $\theta_{1/2}$ 设置为经典角度 7.5° 。根据上述参数可计算得出最优光源间距 $d_{\max}=32.79 \text{ mm}$,分别取间距为 $0.9d_{\max}$ 、 $d_{\max}$ 、 $1.1d_{\max}$ 进行建模分析。具体双自由曲面反光杯光源建模仿真图与照明效果如图7和图8所示。

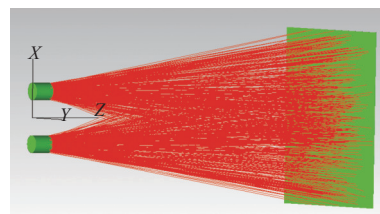


图7 双自由曲面反光杯光源建模仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of double free-surface reflective cup light source modeling

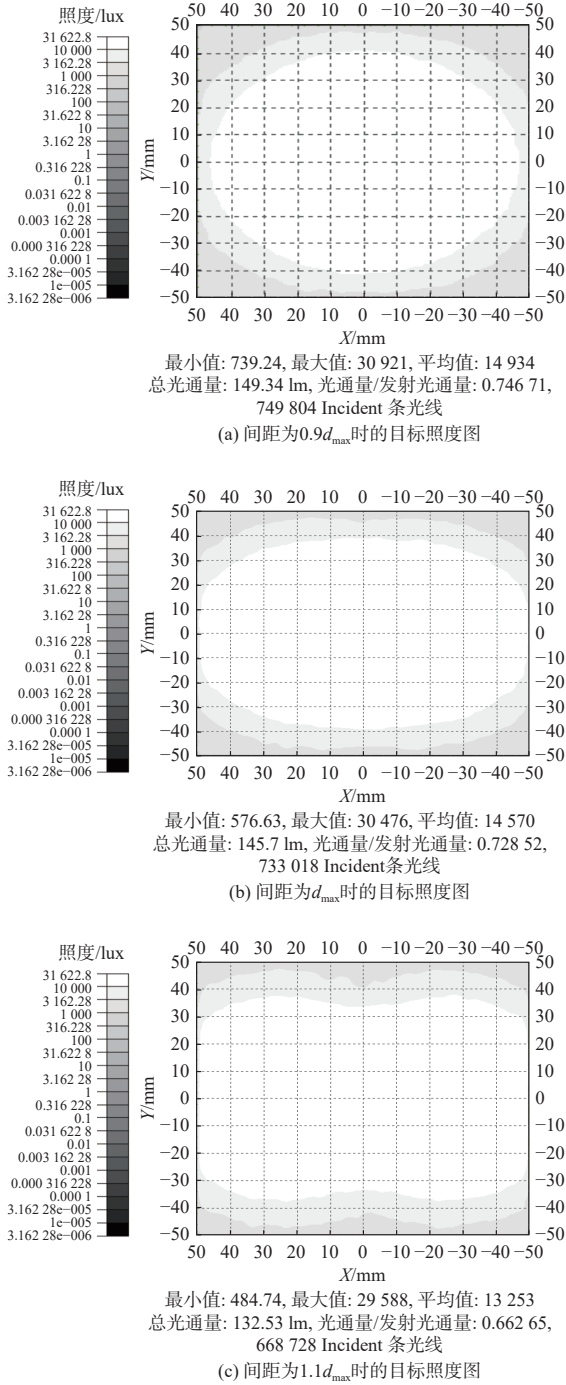


图 8 不同光源间距的照明效果图

Fig. 8 Illumination effect diagram of different light source spacing

由图 8 可以明显看出, 当光源在间距为 $d_{\max}$ 时, 目标面的照明均匀度最高, 且均匀照射区域最

大; 当光源在间距为 $0.9d_{\max}$ 时, 呈现中间部分区域较亮, 四周大面积较暗, 光照均匀度较低; 当光源在间距为 $1.1d_{\max}$ 时, 目标面上中心照度降低, 呈现中间区间照度低, 两侧照度较高的情况。由图 8 可知, 随着光源间距的不断增大, 目标面中心照度逐渐减低, 光照分布将不再均匀, 不能满足较好的照明效果。

2 不同光源阵列系统设计与分析

为满足实际照明环境需求, 将单个光源进行阵列组合, 可以极大地提高光源照度, 同时通过优化后能够在一定区域内满足均匀的照明分布要求, 达到良好的照明效果。不同的阵列系统都具有各自独特的性能, 且光源间距是影响阵列系统照明效果的主要因素。下面将着重研究自由曲面反光杯分别为矩形阵列、环形阵列、三角形阵列这 3 种典型阵列时的最优光源间距, 并分析 3 种阵列形式在各自最优间距条件下的照明效果。

为方便进行 3 种典型阵列系统的建模仿真与对比分析, 统一设定以下参数: 设置发光芯片尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 目标面尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 目标面与光源之间的距离为 150 mm , 反光杯第二曲面的曲率半径为 1, 第二曲面的圆锥常数为 -1.2 , 半孔径为 5 mm , 光源的半光强角 $\theta_{1/2}$ 为 7.5° 。在阵列设计时自由曲面反光杯光源总个数 n 为 9, 分别组合成矩形阵列、环形阵列和三角形阵列的光源进行系统搭建。

2.1 矩形阵列式光源系统设计

在矩形阵列光源组合中, 将 9 个自由曲面反光杯光源按照行列排布形式进行组合, 形成 $N \times M$ 矩阵形式。整体阵列系统的总照度^[24]为

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{led}} A \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ [x - (N+1-2i)(d/2)]^2 + [y - (M+1-2j)(d/2)]^2 + z^2 \right\}^{-(m+2)/2} \quad (9)$$

式中: N 为矩形阵列的行数; M 为矩形阵列的列数; d 为光源间的距离。根据斯派罗法则, 当 $x=0$, $y=0$ 时, 令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$, 则可得到:

$$F(D) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left\{ \left[(N+1-2i)^2 + (M+1-2j)^2 \right] (D^2/4) + 1 \right\}^{-(m+6)/2} \left\{ 1 - \left[(m+3)(N+1-2i)^2 - (M+1-2j)^2 \right] (D^2/4) \right\} \quad (10)$$

式中 $D=d/z$ 。此时根据斯派罗法则, 产生了关于间距 d 作为 m 、 N 、 M 函数最大平坦度的条件, 当

N 和 M 都是偶数时, 最大均匀照明区域条件为 $F(D)$ 函数值为零。当 N 和 M 都是奇数时, 最大均

匀照明区域的条件为 $F(D)$ 函数值取最小值。

根据图9(a)矩形光源阵列排布图可知,9个自由曲面反光杯光源为 3×3 形式排布, $N=3$ 、 $M=3$ 都为奇数,且 $m=80.67$, $z=150$ mm。将相关条件代入式(10)中可计算得出 $d_{\max}=18.1$ mm,根据上述相关计算参数进行矩形阵列光源系统的建模与仿真,仿真结果如图9所示。

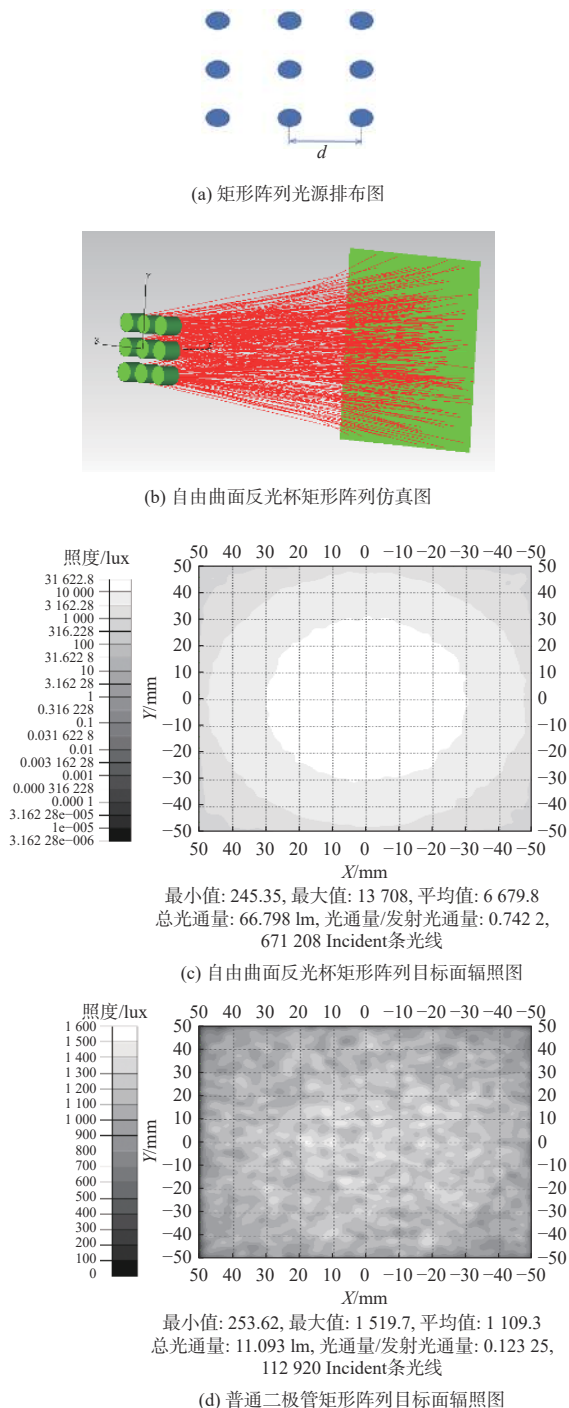


图9 矩形阵列光源仿真效果图

Fig. 9 Simulation effect diagram of rectangular array light source

图9(b)和图9(c)分别为自由曲面反光杯矩形阵列仿真图和自由曲面反光杯矩形阵列目标面辐照图。从图9(c)中可以看出,在自由曲面反光杯矩形阵列光源系统中,目标面中心照度较高且高照度均匀分布区域较广,在轴向方向上中心照度均匀分布区域为目标面 -30 mm $\sim$ 30 mm 范围内,高照度分布区域占到目标面 95% 的范围,整体照度从目标面中心到边缘降低较缓,实现了较大面积内的均匀照明。在均匀分布区间内照明均匀度达到 92.8%,最大照明强度达到 13 708 lux,且经过反光杯处理后的系统整体能量利用率达到 74.2%。将图9(c)与图9(d)普通二极管矩形阵列目标面辐照图对比分析可知,在目标面中经自由曲面反光杯优化后的矩形阵列光源对于光线的汇聚能力更强,中心照度远高于普通二极管阵列的照度,使矩形阵列光源的照明均匀度提升了 12.8%,能量利用率提升了 61.9%。最终实验结果表明,自由曲面反光杯矩形光源系统能够实现整体高照度照明,且照度均匀分布面积较大,能够满足一般条件下所需的大面积、高照度要求。

2.2 环形阵列式光源系统设计

在机器视觉行业中目前最流行的光源就是环形光源,由多个光源进行一定半径排列组合后形成单环组合,再由多个单环结构组合形成多环光源系统。设在环形光源系统中环数为 M ($M>0$, 且为整数),第 i 个环上的光源个数为 N_i ($N_i>2$, $i=1,2,3,\dots$, 且 N 为整数),第 i 个环上的半径为 ρ_i ,根据线性叠加原理可知,目标面上总辐照度^[11]为

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{led}} A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} \left\{ \left[x - \rho_i \cos\left(\frac{2\pi j}{N_i}\right) \right]^2 + \left[y - \rho_i \sin\left(\frac{2\pi j}{N_i}\right) \right]^2 + z^2 \right\}^{-\frac{m+2}{2}} \quad (11)$$

由图10(a)环形阵列光源排布图可知,环形光源的环数和光源数已经确定,由9个LED自由曲面反光杯光源组合成单环环形光源。因此,对于整个光源系统,单环的半径成为影响目标面均匀分布的主要因素。与双光源间距优化相同,可以将式(11)中存在的二阶项问题进行简化,计算出任何穿过LED径向轴的最大坦度条件。根据斯派罗法则,当 $x=0$, $y=0$ 时,令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$,可得:

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{2}{m+2}} \cdot z \quad (12)$$

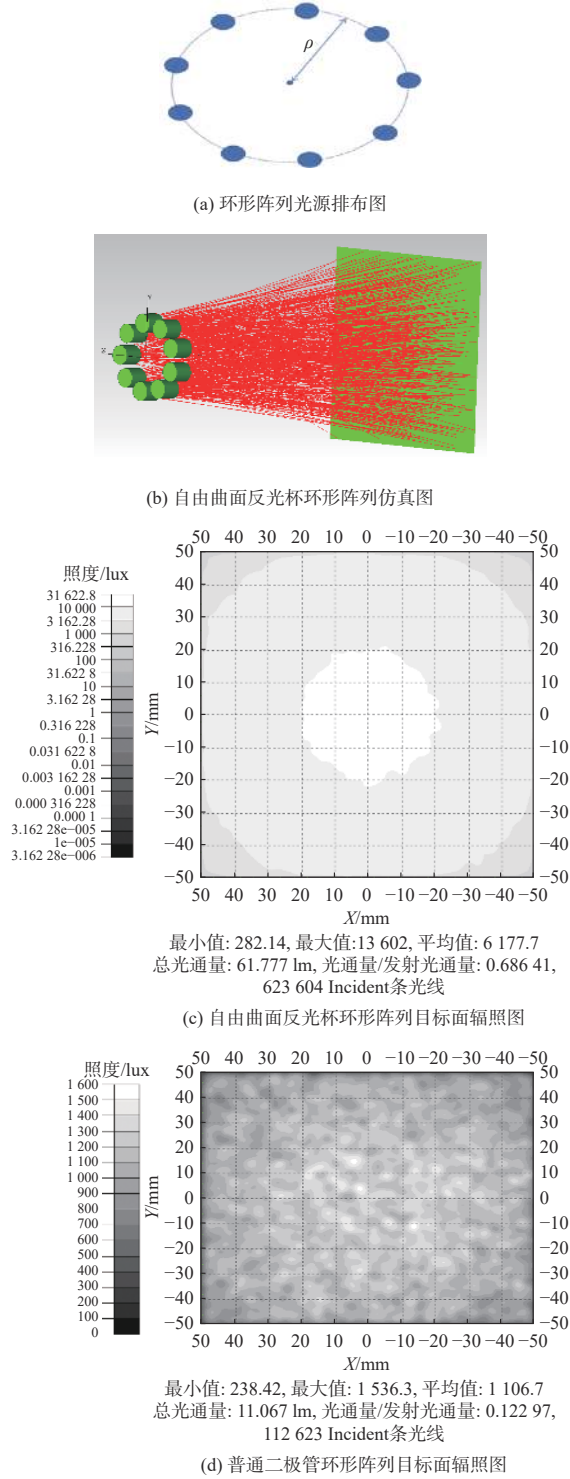


图 10 环形阵列光源仿真效果图

Fig. 10 Simulation effect diagram of circular array light source

根据统一设定的参数 $m=86.67$, $z=150$ mm 进行计算, 可得出环形光源系统的半径 $\rho_i=22.52$ mm。按照环形光源最优半径 22.52 mm 进行建模仿真, 得到如图 10(b) 所示自由曲面反光杯环形阵列仿真图和图 10(c) 所示自由曲面反光杯环形阵列目

标面辐照图。从图 10(c) 中可以看出, 目标面的高照度均匀分布区域较小, 主要集中分布在目标面轴向方向 -20 mm $\sim$ 20 mm 区间范围内, 照明均匀度为 94.1%, 最大照度为 13 602 lux, 系统的整体能量利用率达到 73.9%。将图 10(c) 与图 10(d) 普通二极管环形阵列目标面辐照图对比分析可知: 在自由曲面反光杯阵列条件下, 整体照明效果得到优化, 其中照明均匀度提升了 15%, 能量利用率提升了 61.7%。同时与图 9(c) 进行比较可以看出, 自由曲面反光杯环形阵列系统在目标面范围内, 具有较高的光线汇聚能力, 在目标面小范围区间内实现均匀照明的同时, 也实现了较高的光照度, 并获得了较高的能量利用率。

2.3 三角形阵列式光源系统设计

三角形阵列由于其封装能力强而成为流行光源。根据图 11(a) 所示的自由曲面反光杯三角形阵列排布型式, 由线性叠加原理可得自由曲面三角形阵列光源系统的目标面总照度表达式^[9]为

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{led}} A \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[x - (N_+ - 2i)(d/2) \right]^2 + \left[y - (M + 1 - 2j)(\sqrt{3}d/4) \right]^2 + z^2 \right\}^{-(m+2)/2} \quad (13)$$

式中, $N_{\pm} = N + [(-1)^j \pm 1]/2$, 根据斯派罗法则取得最大平坦度, 当 $x=0$, $y=0$ 时, 令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$, 可得:

$$F(D) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \left[(N_+ - 2i)^2 (D^2/4) + g(D) + 1 \right]^{- (m+6)/2} \right. \\ \left. \left[1 - (m+3)(N_+ - 2i)^2 (D^2/4) - g(D) \right] \right\} \quad (14)$$

式中: $g(D) = 3/4(M + 1 - 2j)^2 (D^2/4)$; $D=d/z$; $F(D)$ 为 m , M , N 的函数, 产生了间距 d 的最大平坦条件。当 N 和 M 都为偶数时, 最大平坦度条件为函数 $F(D)$ 的零点位置, 当 N 和 M 都为奇数时, 最大平坦度条件为函数 $F(D)$ 的最小值位置。如图 11(a) 三角形阵列光源仿真分布图所示, $M=3$, $N=3$ 。再根据统一设定条件: $m=86.67$, $z=150$ mm 进行计算, 得出最优间距 $d=16.7$ mm。根据所设参数条件进行建模仿真, 得到图 11(b) 所示自由曲面反光杯三角形阵列仿真图和图 11(c) 所示自由曲面反光杯三角形阵列目标面辐照图。

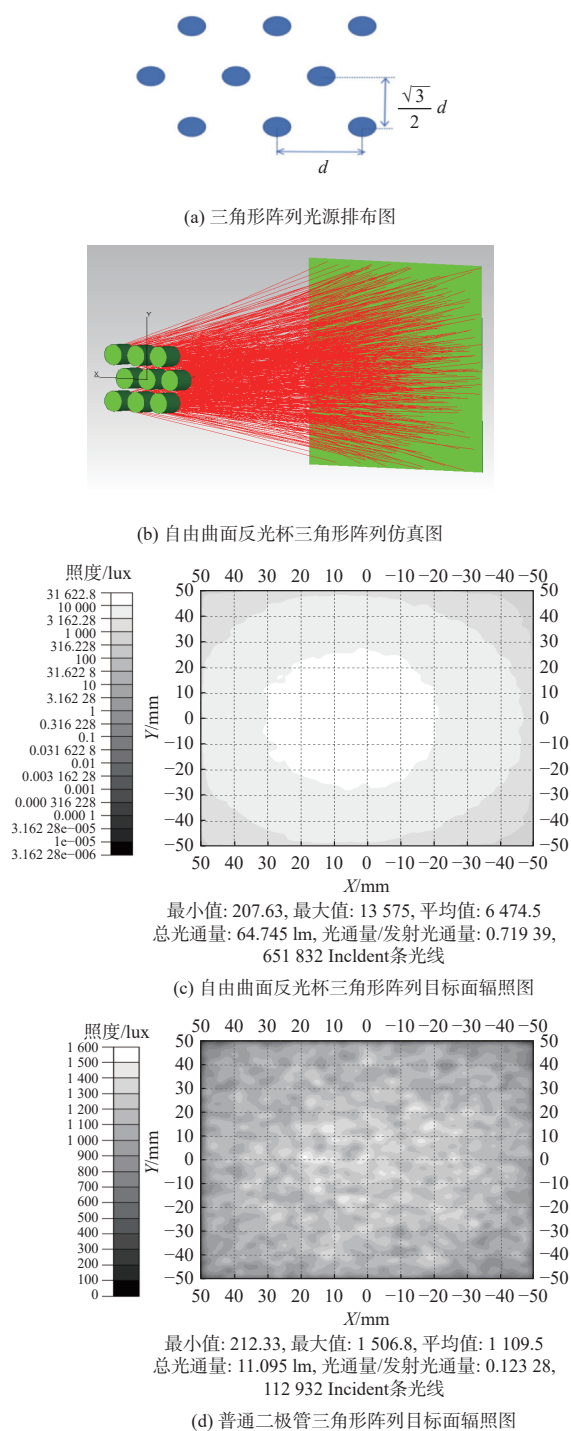


图 11 三角形阵列光源仿真效果图

Fig. 11 Simulation effect diagram of triangular array light source

根据图 11(c)中在目标面上辐照度图效果显示,自由曲面三角形阵列光源在轴向上的均匀照度分布不具有对称性,使得目标面上的均匀照度呈偏离中心点进行分布,在轴向上 $-28\text{ mm}\sim 28\text{ mm}$ 和 $-30\text{ mm}\sim 20\text{ mm}$ 范围内均匀地高照度分布,照明均匀度为 89.6%,最大照度为 13 575 lux,光源系

统能量利用率为 71.9%。在与图 11(d)普通二极管三角形阵列目标面辐照图对比分析时,照明均匀度提升了 16%,能量利用率提升了 58.6%。但在与图 9(c)自由曲面反光杯矩形阵列目标面辐照图相比较中发现,在相同数量的光源组合情况下,自由曲面反光杯三角形阵列系统会产生更小的均匀照度分布,且能量利用率会相对较低。

2.4 实验结果对比与分析

通过对 LED 自由曲面反光杯光源分别进行矩形阵列、环形阵列、三角形阵列排列,得到目标面辐照度图。由实验结果可知,经过自由曲面反光杯优化的阵列系统光源与普通未经优化的二极管阵列光源相比,照明均匀度至少提升了 12.8%,能量利用率至少提升了 58.6%,提升效果均较为显著,证实了改进的有效性。同时由实验结果可知,在 3 种自由曲面反光杯典型阵列形式中,基于自由曲面反光杯矩形阵列系统,在目标面上的均匀照度范围为 $-30\text{ mm}\sim 30\text{ mm}$,且整体光强照度和能量利用率较高,比较适用于大面积、高照度的需求场景。基于自由曲面反光杯环形阵列系统,在目标面上的均匀照度分布范围为 $-20\text{ mm}\sim 20\text{ mm}$,均匀照明分布面积较为集中,照明均匀度较高,比较适用于小范围内照明均匀度要求较高的场景。自由曲面反光杯三角形阵列光源系统的目标面辐照图与矩形阵列的辐照图相比,均匀分布照度范围更小,在 $x=0$ 方向上,均匀照度分布范围为 $-28\text{ mm}\sim 28\text{ mm}$,在 $y=0$ 方向上,均匀照度分布范围为 $-30\text{ mm}\sim 20\text{ mm}$ 。在目标面中心点不能呈现较好的中心对称,仅在 y 轴方向有对称的效果产生。在 3 种自由曲面反光杯阵列系统中,照明均匀度均在 89% 以上,能量利用率均在 70% 以上,取得了较好的照明效果。

3 结论

本文通过设计研究 LED 自由曲面反光杯光源,以边缘光线对中心照射区域进行光线补偿的形成,减少大角度光线的损失,提升光源光线汇聚能力,实现了以 LED 自由曲面反光杯取代普通二极管的改进,从而减少光源阵列造成的能量损耗。同时分析了自由曲面反光杯光源在进行双光源排布时,光源间距对系统光照均匀度的优化问题,根据叠加定理推导出了总照度表达公式,分析了光源间距分别与半光强角和目标面距离之间的

关系, 得出光源间距在有效范围内, 随着半光强角的增大不断增加, 最终趋近于稳定值, 而光源间距随着目标面距离的增加会不断增加。最后进一步运用斯派罗法则和辐照度原理, 分别对 LED 自由曲面反光杯光源进行矩形阵列、环形阵列和三角形阵列排布时的间距进行求解, 推导出了光源在进行 3 种典型阵列分布时的间距公式, 得出最优间距。最终通过建立仿真实验, 实验结果表明, 3 种阵列光源系统的光照均匀度均在 89.6% 以上, 能量利用率在 70% 以上, 且与传统的普通二极管相应阵列进行比较, 得出在自由曲面反光杯阵列照明中, 照明均匀度至少提升 12.8%, 能量利用率至少提升 58.6%, 能够实现较好的照明效果。根据实验结果可知, 3 种自由曲面反光杯典型阵列排布时, 矩形阵列的整体照度较高, 均匀照明分布较广; 环形阵列的光线汇聚能力较强, 均匀照明分布范围较小, 但照明均匀度较高; 三角形阵列的光源间距小, 分布紧密, 存在轴向均匀照度分布差异, 不能够实现目标面均匀照度的中心对称分布。最终得出以下结论: 在 3 种典型阵列组合中, 基于 LED 自由曲面反光杯的矩形阵列系统适用于大面积、高照度的需求场景; 环形阵列系统适用于照明范围较小, 均匀度较高的需求场景; 三角形阵列系统适用于封装体积较小、成本较低的需求场景。

参考文献:

- [1] 曾茂庭, 楼俊, 岑松原, 等. 基于扩展光源的双自由曲面均匀照明设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 172-176.
ZENG Maoting, LOU Jun, CEN Songyuan, et al. Design method of double free surface based on extended light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(19): 172-176.
- [2] 臧泽茂, 苏宙平, 张文裕, 等. 高平滑度自由曲面激光束整形透镜设计[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 357-365.
ZANG Zema, SU Zhouping, ZHANG Wenyu, et al. Design of high-smoothness free-surface laser beam shaping lens[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 357-365.
- [3] BIRCH D A, BRAND M. Design of freeforms to uniformly illuminate polygonal targets from extended sources via edge ray mapping[J]. Applied Optics, 2020, 59(22): 6490-6496.
- [4] 史晨阳, 林燕丹. 机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 118-128.
SHI Chenyang, LIN Yandan. LED ring array design for uniform illumination imaging in machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 118-128.
- [5] 谢洪波, 江敏, 杨磊, 等. 单颗 LED 实现远距离均匀照明系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 543-548.
XIE Hongbo, JIANG Min, YANG Lei, et al. Single LED realizes the long-distance uniform lighting system design[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 543-548.
- [6] YU W, YAO N, PAN J, et al. Highly sensitive and fast response strain sensor based on evanescently coupled micro/nanofibers[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(9): 210101.
- [7] 刘石, 邹国星, 张国玉, 等. 太阳模拟器用自由曲面聚光镜设计[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 289-298.
LIU Shi, ZOU Guoxing, ZHANG Guoyu, et al. The solar simulator was designed with a free-form condenser[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 289-298.
- [8] 吴含笑, 韩星, 芮涛, 等. 远距离投射照明光源设计[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 285-291.
WU Hanxiao, HAN Xing, RUI Tao, et al. Design of the remote projection lighting source[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 285-291.
- [9] MORENO I, AVENDANO-ALEJO M, TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Applied Optics, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [10] ZHANG Q, GAO J, CHEN X. Influence of optical aspheric parameters on obtaining uniform rectangular illumination[J]. Optik, 2014, 125(11): 2577-2581.
- [11] DONG J, LU R, SHI Y, et al. Optical design of color light-emitting diode ring light for machine vision inspection[J]. Optical Engineering, 2011, 50(4): 43001.
- [12] 王德宇, 王雪琨, 于文文, 等. 面向皮革缺陷检测的离轴 LED 曲面阵列照明设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 201-207.
WANG Deyu, WANG Xuekun, YU Wenwen, et al. Off-axis LED surface array lighting design for leather defect detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 201-207.
- [13] 杨超, 宋国华, 范婷婷, 等. 针对 LED 扩展光源照明的自由曲面透镜设计[J]. 光学技术, 2022, 48(2): 129-134.
YANG Chao, SONG Guohua, FAN Tingting, et al. Free-form lens design for LED extended light source illumination

- tion[J]. *Optical Technology*, 2022, 48(2): 129-134.
- [14] SUN X, KONG L, ZHOU P, et al. A design of compound tailored illumination by a total-internal-reflection lens for machine vision[J]. *Lighting Research & Technology*, 2021, 53(8): 777-793.
- [15] PENG X, KONG L, SUN X. Design of a composite lighting system based on a freeform and a rod lens for machine vision[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 2108-2117.
- [16] 唐清焄, 吴燃, 纪佳佳, 等. 基于多目标人工鱼群算法的光疗 LED 照度优化研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(2): 352-359.
- TANG Qingyao, WU Ran, JI Jiajia, et al. Optimization of LED illumination in phototherapy based on multi-target artificial fish algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(2): 352-359.
- [17] 张航, 吴梦苒, 马宇飞, 等. 矩形阵列 LED 均匀配光的对称性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 252-258.
- ZHANG Hang, WU Mengying, MA Yufei, et al. Symmetry analysis of the uniform light distribution for a rectangular array LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 252-258.
- [18] 肖韶荣, 杨丽, 吴群勇, 等. 紫外 LED 圆环阵列均匀照明的实现方法[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 742-747.
- XIAO Shaorong, YANG Li, WU Qunyong, et al. Implementation of uniform illumination of UV LED ring arrays[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(5): 742-747.
- [19] WU R, ZHENG Z, LI H, et al. Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(13): 2257-2263.
- [20] 李竞. 实现 LED 矩形均匀照明的透镜设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(2): 211-214.
- LI Jing. Realize the lens design for uniform illumination of LED rectangle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 211-214.
- [21] 王海洋, 金志樑, 王沛沛, 等. 用于 LED 准直的 TIR 透镜与反光杯效果研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 320-325.
- WANG Haiyang, JIN Zhiliang, WANG Peipei, et al. Effect study of TIR lens and reflective glasses for LED collimation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 320-325.
- [22] 刘百芬, 金小龙, 祝振敏. 基于 LED 阵列与漫反射自由曲面的均匀照明光源设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(4): 598-602.
- LIU Baifen, JIN Xiaolong, ZHU Zhenmin. Design of uniform illumination light source based on LED array and diffuse free-form surface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 598-602.
- [23] 王海洋, 金志樑, 王沛沛, 等. 用于 LED 光源的反光杯准直效果研究[J]. *照明工程学报*, 2021, 32(1): 1-4.
- WANG Haiyang, JIN Zhiliang, WANG Peipei, et al. Study on the collimation effect of reflective cup used for LED light source[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2021, 32(1): 1-4.
- [24] 陈新睿, 韩敬华, 李洪儒, 等. 基于近场均匀照明的 LED 阵列的优化设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 122-127.
- CHEN Xinrui, HAN Jinghua, LI Hongru, et al. Optimized design of LED arrays based on near-field uniform illumination[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122-127.
- [25] 王彬, 高益庆, 付晓辉, 等. 多反光杯 LED 封装技术的应用研究[J]. *半导体光电*, 2013, 34(4): 626-629.
- WANG Bin, GAO Yiqing, FU Xiaohui, et al. Research on the application of multi-reflective cup LED packaging technology[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, 34(4): 626-629.