

用于 LED 集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计

刘展宇^{1,2}, 王沛沛^{2**}, 金志樑², 王海洋², 熊大曦^{2*}¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所光与健康研究中心, 江苏 苏州 215163

摘要 进行海上灯光诱鱼作业时, 船体横摇改变了发光二极管(LED)集鱼灯的照明角度, 导致海面光照不断变化, 对吸引和聚集趋光性鱼类产生不利影响。提出了一种利用自由曲面透镜实现扇形光强分布的方法, 在 Y-Z 和 X-Y 平面上的发散角分别为 110° 和 10°。分析了 LED 集鱼灯在渔船横摇角度变化范围(-10°~10°)内的目标面相对照度分布的相似性和误差率。模拟结果和实验结果的正交归一化相似性(NCC)分别大于 98.50% 和 99.53%, 均方根误差(RMSE)分别小于 5.56% 和 4.60%。与普通 LED 集鱼灯和金卤灯比较, 本设计显著提高渔船横摇时 LED 集鱼灯的光照稳定性。结果表明, 在不同照明角度下, LED 集鱼灯的自由曲面透镜能很好地实现海面上的稳定光照。

关键词 光学设计; 自由曲面; 发光二极管; 光照稳定性; 透镜

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0522003

Free-Form Lens Design for LED Fishing Lamp with Stable Illumination

Liu Zhanyu^{1,2}, Wang Peipei^{2**}, Jin Zhiliang², Wang Haiyang², Xiong Daxi^{2*}¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;² Center of Light and Health, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract During the operation of fishing with light at sea, rolling motion of the fishing boat changes the illumination angle of the light-emitting diode (LED) fishing lamp, resulting in continuous changes of the sea surface illumination, which has an adverse effect on attracting and gathering phototactic fish. This article proposes a method using a free-form surface lens to realize a fan-shaped light intensity distribution, with the divergence angles on the X-Y and Y-Z planes being 110° and 10°, respectively. The similarity and error rate of the relative illuminance distribution of the target plane within the illumination angle range of -10°-10° were analyzed. The normalized cross correlation (NCC) of the simulation results and the experimental results are greater than 98.50% and 99.53% respectively, and the root mean square error (RMSE) are less than 5.56% and 4.60%, correspondingly. By comparing this design with a standard LED fishing lamp and metal halide lamp, the results show that the proposed design significantly improves the illumination stability of the LED fishing lamps when the fishing boat rolls, indicating that the free-form surface lens is able to provide stable illumination on the sea surface at different illumination angles.

Key words optical design; free-form surface; light-emitting diode; illumination stability; lens

OCIS codes 220.3620; 040.7190; 230.3670; 220.2945

1 引言

灯光捕鱼是提高渔业生产效率最先进和成功的

方法之一^[1]。长期以来, 人类利用该技术吸引和聚集鱼类。光源从篝火到白炽灯和卤素灯, 再到近年来广泛使用的金属卤化灯, 都验证了灯光捕鱼的有

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-10-16; 录用日期: 2020-11-02

* E-mail: xiongdx@sibet.ac.cn; ** E-mail: wangpp@sibet.ac.cn

效性^[1]。传统光源主要是全方向光源,这意味着使用大量燃料产生的大部分光束分散在空气中,而不是进入水中吸引鱼群,造成大量的能量浪费。随着燃油价格不断上涨,对发光效率低、含汞等有害物质的传统光源进行更新换代迫在眉睫。

发光二极管(LED)因具有寿命长、发光效率高、启动时间较快、显色性好、低碳环保等优点,在光诱捕鱼领域受到越来越多学者的关注^[2-3]。由于 LED 扩展光源的发光特性呈朗伯分布且发光角为 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$,需要对其进行特定的配光设计才能使其更好地适用于实际应用^[4]。一些研究通过使用不规则透镜或自由曲面透镜对 LED 进行二次光学设计,使 LED 更好地满足海上捕鱼的光诱条件。Shen 等^[5-6]通过绘制水平和垂直平面上光强分布曲线的方法设计了非轴对称透镜,得到明暗交替分布的照明区域,能够将鱼群高效地吸引到渔船周围。并利用傅里叶级数和能量映射的方法得到多个同心圆光圈的光照面,结果发现鱼类更容易聚集在暗处,证明该光照模式对聚集鱼类是有效的。此外,Nguyen 等^[7]将高斯分解法应用在自由曲面透镜设计中,该方法同时满足捕鱼和船上活动的照明需求。Kuo 等^[8]利用光线追迹方法设计了聚光光学透镜,增加照明区域内的照度,在不影响渔获量的同时节约了 20.2% 的燃料消耗。基于以上研究,通过设计满足光照模式的透镜,LED 集鱼灯可以替代传统光源。然而,这些关于 LED 集鱼灯的研究主要集中在光照模式上,忽略了船体横摇的影响。

集鱼灯对鱼的吸引分为两个阶段:鱼类受光刺激后向光源方向游动;鱼类聚集在光源下方^[1]。渔船上的灯发出具有固定照明角度的光线,有利于吸引鱼类聚集在渔船周围^[9]。渔船在海上作业时,船体会随着风或波浪保持一定角度内的横摇,悬挂于船舷两侧的集鱼灯的照明角度会随着船体横摇不断变化。现有金卤灯的配光模式呈圆形,因此在船体横摇时照明角度的变化也相对较小。而为了提高海面照度,LED 集鱼灯通常采用较小的发光角以集中能量,这样海面只有小部分照度高,其他部分相对照度低。因此,当船体横摇改变了 LED 集鱼灯的照明角度时,海面和下的光照不断变化,甚至产生闪烁现象,当水下明暗发生强烈变化时,即使鱼类已经被灯光吸引也能提高警惕逃走,影响渔获量^[2,10]。为了解决这些问题,有学者提出在 LED 集鱼灯上附加配重以减小照明角度偏移,但这样做提高了船体重心,影响渔船的安全性^[11]。还有学者采用反射器结

构,得到能量分布近似扇形的发光角,用来改善海面的光照强度变化,却增加了集鱼灯结构的复杂性^[12]。Heo 等^[13]提出了一种由三个模块组成的 LED 集鱼灯,包括主控制模块、照明模块和传感器模块,通过传感器实时反馈船体倾斜角度来调整照明模块的照明角度,但这样使 LED 集鱼灯系统更加复杂。

针对现有的 LED 集鱼灯在船体横摇时海面光照稳定性不足的缺陷,本文提出一种基于自由曲面透镜的 LED 集鱼灯设计方法,在船体横摇时实现海面光照稳定。通过自由曲面透镜实现 LED 集鱼灯的配光曲线呈扇形,很好地满足海面照明区域的光照稳定。利用边缘光线原理,并结合 Snell 折射定律矢量形式得到透镜的自由曲面^[14]。光学软件仿真和实验结果证明,透镜在模拟和实验测试中都满足目标面的光照稳定要求,并利用仿真软件对本设计与普通 LED 集鱼灯、金卤灯进行比较。

2 透镜设计

根据集鱼灯对鱼群吸引的两个阶段,设计 LED 集鱼灯透镜时主要考虑照明范围、能量的有效利用、光照的稳定性能。确定照明范围和能量的有效利用是为了实现更大范围水体的照明,以吸引更多的鱼群,而稳定的光照性能可以使鱼群聚集并持续停留在光源下方。LED 集鱼灯通常悬挂在船体两侧,用来照亮渔船附近海域。为便于分析,建立如图 1 所示的三维坐标系,沿船舷方向为 X 轴,垂直船舷方向为 Y 轴,与海面垂直方向为 Z 轴。

在与船舷水平(X-Y)平面上,研究 LED 集鱼灯的发光角时,需要考虑光线在水中传输时的散射因素,在能量相同情况下,具有较大发光角度的光束在水中传输时散射损耗能量多,而采用较小的发光角能获得更远的光线传输距离^[15-16]。在与船舷垂直(Y-Z)平面上,LED 集鱼灯的有效照明范围从所建立的坐标原点位置 S 一直到远离船舷位置 C,根据几何关系知,为使有效照明范围最远,SC 之间距离 m 趋向于无穷大,此时 $\angle SAC=90^{\circ}$ 。渔船在海上作业时会发生各个方向的摇摆运动,其中横摇运动是最常见也是摇摆幅度最大的一种形式,对集鱼灯的照明角度变化影响最大。通常船舶的最大横摇角度不会超过 10° ,否则易导致船体倾覆^[17]。因此,集鱼灯在渔船上的倾斜角度不超过 10° 。为了满足海面光照稳定,在与船舷垂直(Y-Z)平面内,适当增大 LED 集鱼灯发散角至 110° ,使其在船体发生横摇时仍能保证 90° 的有效照明,如图 2 所示。

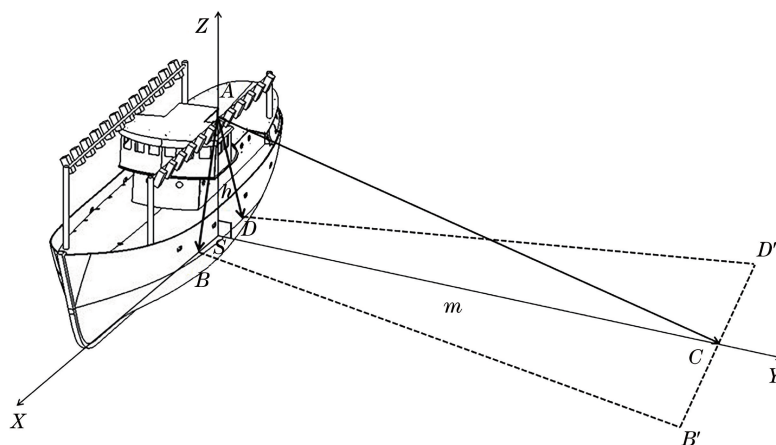


图 1 LED 集鱼灯的光照范围

Fig. 1 Illumination range of LED fishing lamps

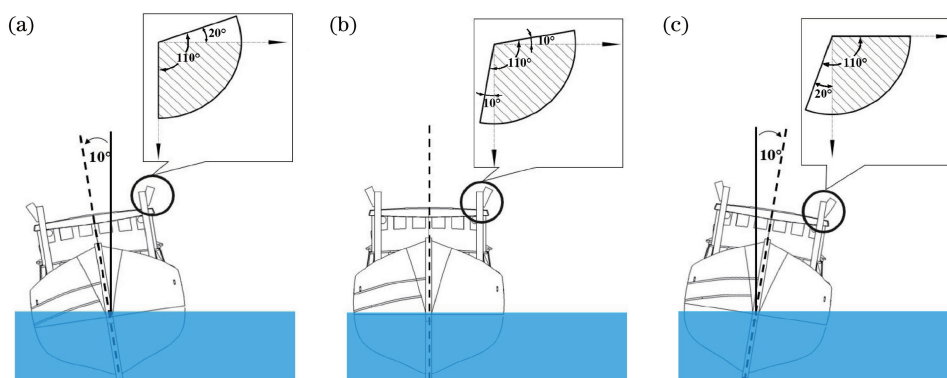


图 2 在船体不同横摇角度下,LED 集鱼灯 110° 发散角与 90° 有效照射角度的关系。

(a) 船体向左侧倾斜; (b) 船体未发生横摇; (c) 船体向右侧倾斜

Fig. 2 Relationship between the divergent angle of 110° and the effective irradiation angle of 90° of LED fishing lamp under different rolling angles. (a) Boat tilting to the left; (b) boat not rolling; (c) boat tilting to the right

根据以上推算,自由曲面透镜的设计需要满足透镜 Y-Z 截面上发散角为 110°, X-Y 截面上发散角尽可能小。此外,对 Y-Z 截面发散角能量进行均匀

划分,得到扇形的配光曲线,在照明角度变化时,LED 集鱼灯仍满足海面照度恒定的要求。设计 LED 集鱼灯透镜时需满足图 3 所示的照明要求。

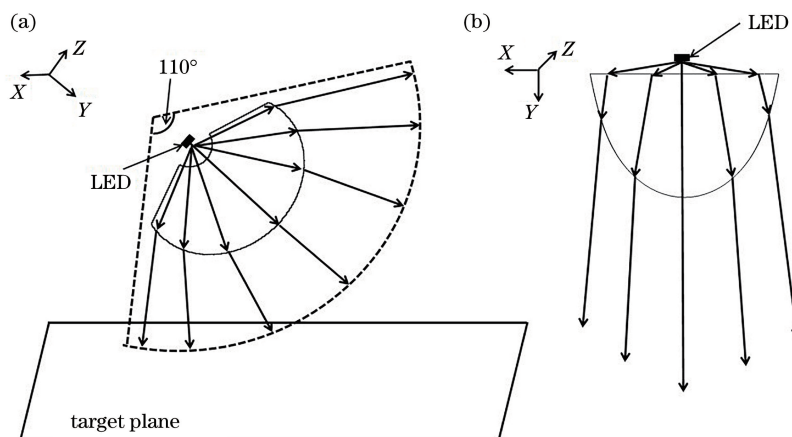


图 3 LED 集鱼灯的发散角。(a) Y-Z 截面上 110° 扇形发散角; (b) X-Y 截面上小角度发散角

Fig. 3 Divergence angle of LED fishing lamp. (a) Fan-shaped divergence angle is 110° on the Y-Z cross-section; (b) small divergence angle on the X-Y cross-section

2.1 透镜结构

为获得光照所需要的能量,LED 集鱼灯系统使用 24 颗 10 W 的大功率 LED 芯片作为光源,将 LED 芯片排列在半径 R 约为 6 mm 的近似圆内,如图 4 所示。分别在 LED 光源的 Y-Z 截面和 X-Y 截面构造透镜结构,以满足 LED 集鱼灯在 Y-Z 和 X-Y 平面不同发散角的需要。在这里,借助边缘光线原理介绍透镜设计方法^[14]。如图 5 所示,反向延长扩展光源边缘与透镜边缘的光线,使它们交于一点,定义 O 点为点光源, O 点发出孔径角为 $2\theta_{\max}$ 的光都照在透镜上,光强分布为朗伯型。此时,光源半径 $R=6$ mm,光源与 O 点处点光源的距离 $h=2$ mm,光源与透镜的距离 $H=10$ mm。点光源最大发光角的计算公式为

$$\tan \theta_{\max} = R/h. \quad (1)$$

经计算可知,最大可利用的发光角 $\theta_{\max} = 71.56^\circ$,此时能量利用率的计算公式为

$$E = \int_0^{\theta_{\max}} \cos \theta d\theta. \quad (2)$$

经计算,若 LED 的总能量为 1,则可利用的能量是 $E=0.948$ 。在采用理想点光源计算透镜结构的同时,保证了能量的利用率。

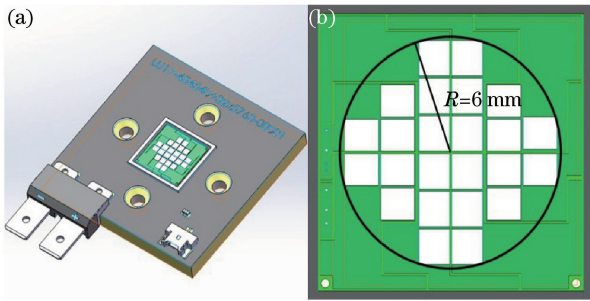


图 4 LED 芯片封装。(a) LED 模块的 3D 模型;
(b) LED 芯片排列分布

Fig. 4 Package of LED chips. (a) 3D model of LED module; (b) distribution of LED chips

2.1.1 计算 Y-Z 截面上的透镜轮廓

在直角坐标系中建立透镜的二维轮廓,如图 6 所示。为了透镜制作方便,第一个面在 Y-Z 截面是曲率半径为定值的曲线,光线经第一个面不改变方向。

从光源 O 点出射的光线经过透镜后与 Y 轴的夹角为 $-55^\circ \sim 55^\circ$ 。这些光线经透镜入射面和出射面折射后,光线能量均匀分配。这里需要对光源的强度分布和相应的出射角进行分割,根据能量守恒定律,将总能量 $E=0.948$ 平均分成 M 份,每份能量的计算公式为

$$e = E/M. \quad (3)$$

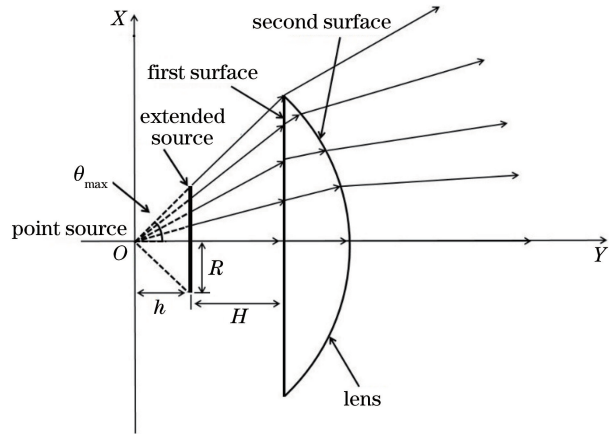


图 5 光学系统截面及光线走向

Fig. 5 Schematic of the cross-section of optical system and light path

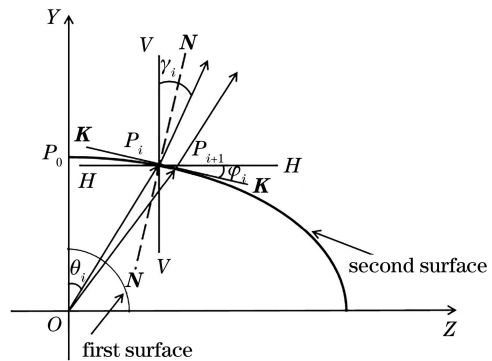


图 6 光线经 Y-Z 截面上的第一个面和第二个面
Fig. 6 Ray tracing on the first surface and second surface of Y-Z cross-section

光源出射光线经过等能量划分,第 i 个等能量光线角度为

$$\cos \theta_i = e \times i, i = 1, 2, 3, \dots, M/2. \quad (4)$$

根据透镜体积要求,确定出射面的初始点 $P_0(z_0, y_0)$ 。 $P_i(z_i, y_i)$ 是出射面上第 i 个构造点,向量 NN 是点 P_i 所在曲面的法线,向量 KK 是点 P_i 所在曲面的切线, VV 是点 P_i 所在曲面的垂直线, HH 是点 P_i 所在曲面的水平线。光源 O 点的出射光线角度为 θ_i ,这条光线经过第二个面折射后与垂直线夹角为 γ_i ,如图 6 所示。基于 Snell 公式,可得到光线经过出射面在点 P_i 处的法线矢量 N :

$$[n_0^2 + n_1^2 - 2n_0n_1(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{O} \cdot n_0 - \mathbf{I} \cdot n_1, \quad (5)$$

式中: n_0 为空气的折射率; n_1 为透镜的折射率,大小取决于透镜的材料; \mathbf{O} 为入射光线的单位矢量; \mathbf{I} 为出射光线的单位矢量。由此可以得到向量 NN 的单位向量 N_i ,则向量 KK 的单位向量 K_i 与 N_i 的关

系为

$$\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{K}_i = 0. \quad (6)$$

同时,由向量 $\mathbf{K}\mathbf{K}$ 可得到光线经过出射面在点 $P_i(z_i, y_i)$ 处的切线斜率 $k = \tan \varphi_i$ 。这里直线 $P_i P_{i+1}$ 与点 P_i 所在曲面切线重合,则点 $P_{i+1}(z_{i+1}, y_{i+1})$ 的坐标与点 $P_i(z_i, y_i)$ 的关系为

$$y_{i+1} = y_i - \tan \varphi_i \cdot (z_{i+1} - z_i). \quad (7)$$

此外,直线 OP_{i+1} 的方程为

$$z_{i+1} = \tan \theta_{i+1} \cdot y_{i+1}. \quad (8)$$

联立(7)式和(8)式,可求出 $P_{i+1}(z_{i+1}, y_{i+1})$ 的坐标:

$$\begin{cases} z_{i+1} = \frac{\tan \theta_{i+1}(y_i + z_i \cdot \tan \varphi_i)}{1 + \tan \theta_{i+1} \cdot \tan \varphi_i} \\ y_{i+1} = \frac{y_i + z_i \cdot \tan \varphi_i}{1 + \tan \theta_{i+1} \cdot \tan \varphi_i} \end{cases}. \quad (9)$$

依次类推,可以求解第二个面上各点的坐标,得到透镜在 Y-Z 截面的轮廓构造点。

2.1.2 计算 X-Y 截面上的透镜轮廓

采用相同的方法计算 X-Y 截面上的自由曲面。第一个面在 X-Y 截面是直线,光线经过第一个面发生折射,再经过第二个面发生第二次折射。如图 7 所示,光源 O 的出射光线角度为 θ_j 。从光源 O 发出的光线与 Y 轴夹角 $\theta_{\max} = 71.56^\circ$ 。光线经过第一次折射后的角度为 θ'_j ,因为点 R_j 是光线在第一个面的折射点,所以 θ_j 和 θ'_j 遵循 Snell 定律,满足的关系为

$$n_0 \sin \theta_j = n_1 \sin \theta'_j. \quad (10)$$

选择 θ_j 作为计算自由曲面的出射光线角度。

不需要考虑能量分布,将光源发光角 θ_{\max} 平均分成 N 份,每份 $\Delta\theta = \theta_{\max}/N$,所以 $\theta_j = j \cdot \Delta\theta$ 。这样点 $R_j(x_{1j}, y_{1j})$ 坐标为

$$\begin{cases} x_{1j} = y_{10} \cdot \tan \theta_j \\ y_{1j} = y_{10} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: y_{10} 为第一个面的纵坐标。直线 $R_i P_i$ 可以表示为

$$\frac{x_{2j} - x_{1j}}{y_{2j} - y_{1j}} = \tan \theta'_j. \quad (12)$$

图 7 中, o_j 是出射光线与垂直线的夹角。为得到尽量小的发散角,同时要有足够的海面照明宽度,这里将 o_{\max} 确定为 5° 。将 o_{\max} 平均分成 N 份,每份 $\Delta o = o_{\max}/N$,所以 $o = j \cdot \Delta o$ 。由此可知出射面上的入射角单位向量 $\mathbf{I}_j = (\sin \theta'_j, \cos \theta'_j)$ 和出射角单位向量 $\mathbf{O}_j = (\sin o_j, \cos o_j)$,根据 Snell 定律,可求出法线的单位向量 \mathbf{N}_j ,表达式为

$$\mathbf{N}_j = (n_0 \mathbf{O}_j - n_1 \mathbf{I}_j) / [n_0^2 + n_1^2 - 2n_0 n_1 (\mathbf{O}_j \cdot \mathbf{I}_j)]^{1/2}. \quad (13)$$

由于点 P_j 所在平面的法线 $\mathbf{N}\mathbf{N}$ 与切线 $\mathbf{K}\mathbf{K}$ 垂直,可得切线单位向量 \mathbf{K}_j 与 \mathbf{N}_j 的关系为

$$\mathbf{K}_j \cdot \mathbf{N}_j = 0. \quad (14)$$

这时,可以定义点 P_j 所在曲面的切线方程为

$$\frac{y_{2j+1} - y_{2j}}{x_{2j+1} - x_{2j}} = \tan \alpha_j. \quad (15)$$

直线 $R_{j+1} P_{j+1}$ 与点 P_j 所在曲面切线的交点是下一个点 P_{j+1} 。联立(11)、(12)、(15)式,可以计算出点 $P_{j+1}(x_{j+1}, y_{j+1})$ 坐标:

$$\begin{cases} x_{2j+1} = \frac{\tan \theta'_{j+1} \cdot y_{2j} - \tan \theta'_{j+1} \cdot \tan \alpha_j \cdot x_{2j} - \tan \theta'_{j+1} \cdot y_{10} + y_{10} \cdot \tan \theta_j}{1 - \tan \theta'_{j+1} \cdot \tan \alpha_j} \\ y_{2j+1} = \tan \alpha_j (x_{2j+1} - x_{2j}) + y_{2j} \end{cases}. \quad (16)$$

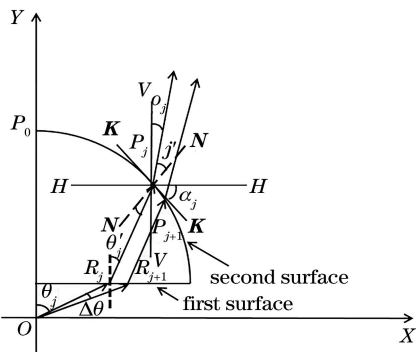


图 7 光线经 X-Y 截面上的第一个面和第二个面
Fig. 7 Ray tracing on the first surface and second surface of X-Y cross-section

以上可以得出 X-Y 截面上的自由曲面结构点。

2.2 建模和分析 LED 集鱼灯透镜

上述方法分别针对两个维度进行独立计算,得到两个维度的曲线数据点。其中在 X-Y 维度上获得两组数据点,分别为 X-Y 截面上的数据点和与 X-Y 截面夹角为 $\theta_{\max} = 71.56^\circ$ 平面上的数据点。将两个维度的数据点导入三维建模软件 SolidWorks,分别拟合得到两个维度上完整的轮廓线^[18]。再通过放样得到透镜的外表面,最后填充得到透镜的完整结构。如图 8(a)所示,底座和孔位用于固定透镜,图 8(b)为透镜的 Y-Z 剖面结构。选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为透镜材料,其折射率为 $n =$

1.49。通过注塑成型工艺制成透镜,其长为 120 mm,宽为 90 mm,透镜高度为 60 mm,如图 8 (c)所示。利用光学仿真软件,在仿真中设置真实的 LED 光源,得到透镜 Y-Z 截面和 X-Y 截面的光强能量分布,如图 9 所示,其中 A 是衡量投光灯光投射能力的一个参数。在透镜 X-Y 截面上,光强

的半峰全宽对应角度约为 13°,在透镜 Y-Z 截面上,光照能量主要集中在 110°的发光角度内,且能量分布均匀。因为在仿真中模拟实际使用的 LED 光源时,发散角与设计存在误差,对于 LED 集鱼灯光照稳定性能,还需要通过进一步的模拟和实验进行验证。

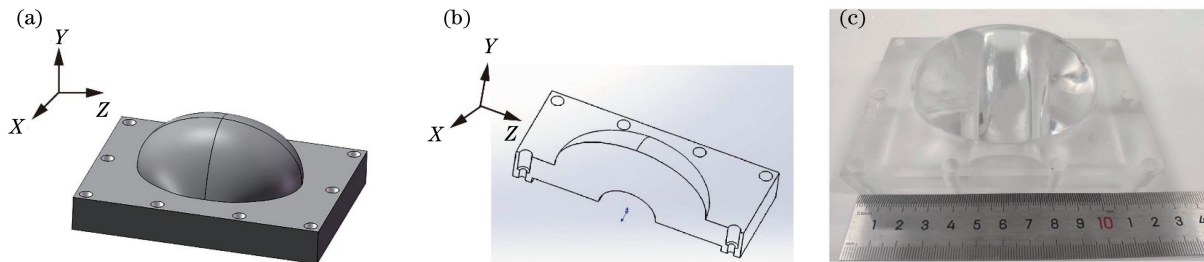


图 8 自由曲面透镜结构。(a)透镜的三维模型;(b)透镜的 Y-Z 剖面;(c)制作的自由曲面透镜样品

Fig. 8 Structure of the free-form lens. (a) 3D model of the lens; (b) Y-Z cross-section of the lens; (c) fabricated free-form lens sample

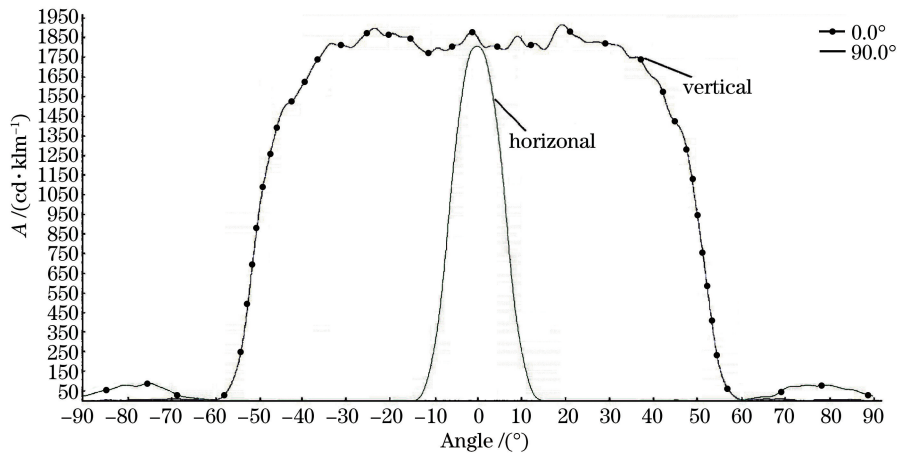


图 9 LED 集鱼灯在 Y-Z 平面上和 X-Y 平面上的光强分布

Fig. 9 Light intensity distribution of LED fishing lamps in Y-Z plane and X-Y plane

3 仿真与实验分析

为了验证所设计的 LED 集鱼灯透镜在渔船横摇时的稳定照明性能,通过仿真分析和实验测量,改变 LED 集鱼灯倾斜角度,以模拟渔船横摇时的 LED 集鱼灯的照明角度,探究目标面上相对照度分布的变化情况。利用光学仿真软件进行模拟,将透镜实体模型导入光学仿真软件 TracePro 中,设置好透镜的材料属性、光源属性及接受面属性,运用蒙特卡罗方法对透镜实体进行光线追迹^[18-20]。通常 LED 集鱼灯悬挂高度距海面 6 m,设置目标面到光源的距离为 6 m,大小设置为 40 m×40 m。LED 光源的总通量为 12000 lm,光源色温为 2700 K。得到 LED 集鱼灯不同照明角度(0°, -5°, -10°, 5°, 10°)条件下目标面的照度图,如图 10 所示。此外,将

LED 集鱼灯放置在距地面高度 6 m 处,在地面得到光照范围,间隔 2 m 测量 Y 轴方向上的照度值,如图 11 所示。改变 LED 集鱼灯的倾斜角度,重复上述方法进行测量,对仿真结果与实验测量结果进行归一化处理,得到不同照明角度下 Y 轴上的相对照度,如图 12 所示,结果表明软件模拟结果和实验结果吻合良好,注塑成型的透镜满足设计要求。

此外,将 0°照明角度下目标面沿 Y 轴方向的相对照度分布作为对照组,其他照明角度(-5°, -10°, +5°, +10°)作为实验组,分析 LED 集鱼灯在不同角度下光照区域的移动情况。通过计算实验组和对照组相对照度分布的相似性程度来探究改变照明角时光照变化情况,引入归一化互相关(NCC)函数。NCC 函数的计算结果清楚地表明实验组和对照组之间的相似性^[21-22],表达式为

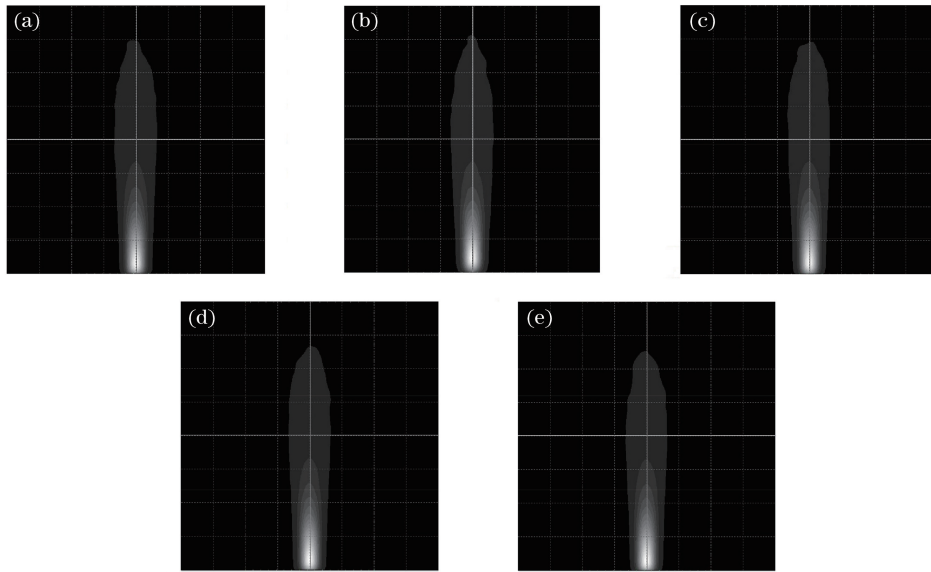


图 10 不同照明角度下目标面上的光照分布情况。(a) 0°; (b) -10°; (c) -5°; (d) 5°; (e) 10°

Fig. 10 Illuminance distribution on the target surface under different illumination angles.

(a) 0°; (b) -10°; (c) -5°; (d) 5°; (e) 10°



图 11 实验测试。(a)现场照明效果;(b)测试点位置

Fig. 11 Experiment measurement. (a) Field illumination effect; (b) location of the test points

$$N_{CC} = \frac{\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X})(Y_{mn} - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X})^2][\sum_m \sum_n (Y_{mn} - \bar{Y})^2]}} \quad (17)$$

式中: X_{mn} 和 Y_{mn} 分别为对照组和实验组的照度值; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为对照组和实验组数据的平均值。若 NCC 值为 1 时,说明实验组与对照组的相对照度分布重合,目标面的光照未变化;若 NCC 小于 1,则实验组和对照组的相对照度分布相似性降低,光照变

化显著。此外,为了比较不同照明角度下目标平面光照强度变化情况,引入均方根误差(RMSE)来衡量实验组与对照组之间的偏差^[23],公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_m \sum_n [X_{mn} - Y_{mn}]^2} \quad (18)$$

式中: S 为计算照度值的数量。当 RMSE 接近 0,说明对照组与实验组无偏差,目标面光照度保持不变。通过引入计算方法,可以直观地表示在不同照射角度下,目标面上照明区域光照变化情况,分别对模拟结果和实验结果进行计算,结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果和实验结果的 NCC 和 RMSE

Table 1 NCC and RMSE of simulation results and experimental results

Parameter	Simulation results				Experimental results			
	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10
Illumination angle / (°)	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10
NCC / %	99.92	99.96	99.89	98.50	99.96	99.95	99.53	99.66
RMSE / %	1.44	0.98	1.63	5.56	2.17	0.88	4.60	3.53

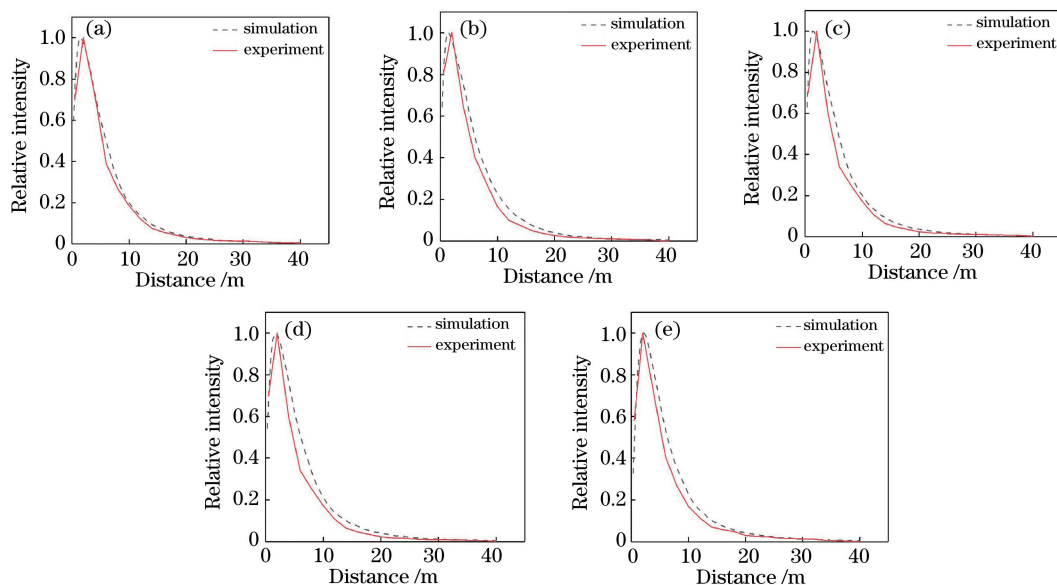


图 12 在不同角度下,目标面 Y 轴方向的模拟和实验测量的相对照度分布。(a) 0° ; (b) -10° ; (c) -5° ; (d) 5° ; (e) 10°

Fig. 12 Simulated and experimental relative illumination distributions on the target plane along Y-axis direction at different illumination angles. (a) 0° ; (b) -10° ; (c) -5° ; (d) 5° ; (e) 10°

从表 1 可知:无论在模拟还是实验条件下,对照组与实验组的相关性匹配度分布大于 98.50% 和 99.53%,说明不同照明角度下目标面上的光照稳定;在模拟仿真中,实验组与对照组的 RMSE 小于 5.56%,而在实验中, RMSE 小于 4.60%,无论在实验和仿真中改变照明角度,LED 集鱼灯在目标面上的光照强度近似不变。

4 对比分析

为探究改进后的 LED 集鱼灯光照稳定性,对改进的 LED 集鱼灯与普通 LED 集鱼灯、金卤灯进行对比。图 13 为三种集鱼灯的实物图。模拟并分析改进的 LED 集鱼灯、普通的 LED 集鱼灯及金卤灯

的光照稳定性。三种集鱼灯的配光曲线如图 14 所示,使用自由曲面透镜的 LED 集鱼灯发光角为 $-55^\circ \sim 55^\circ$,光强分布近似扇形;普通 LED 集鱼灯发光角为 $-30^\circ \sim 30^\circ$,光强分布近似椭圆形;而金卤灯发光角为 $-360^\circ \sim 360^\circ$,光强分布近似圆形。在第 3 节,通过模拟具有自由曲面的 LED 集鱼灯发光,得到不同角度下目标面沿 Y 轴方向的相对照度分布,本节在相同条件下,模拟普通型 LED 集鱼灯和金卤灯发光,得到不同照明角度($0^\circ, -5^\circ, -10^\circ, 5^\circ, 10^\circ$)下目标面沿 Y 轴方向的相对照度分布,如图 15 所示。利用(17)、(18)式计算普通 LED 集鱼灯和金卤灯在不同角度下目标面光照变化情况,结果记录在表 2 中。

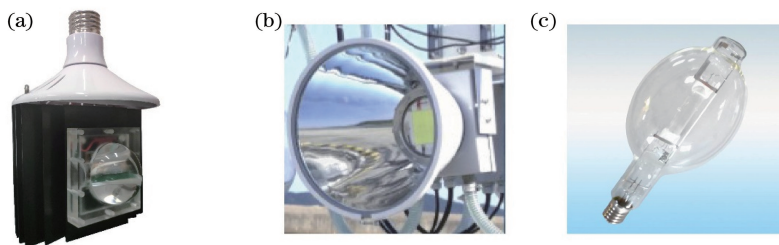


图 13 集鱼灯的实物图。(a)改进的 LED 集鱼灯;(b)普通 LED 集鱼灯^[10]; (c)金卤灯

Fig. 13 Pictures of fishing lamp. (a) Improved LED fishing lamp; (b) ordinary LED fishing lamp^[10]; (c) metal halide lamp

从表 2 可知:普通 LED 集鱼灯在照明角度变化时,目标面相对照度分布的 NCC 值大于 62.22%, RMSE 达 20.41%;与普通 LED 集鱼灯相比,改进 LED 集鱼灯将 NCC 值提高了 36.28 个百分点, RMSE 值降低 14.85 个百分点,自由曲面透镜使

LED 集鱼灯光照稳定性得到明显提高;改进的 LED 集鱼灯在照明角度变化时 NCC 大于 98.50%,始终大于金卤灯的 NCC 值,同时 RMSE 小于 5.56%,明显小于金卤灯的 RMSE。改进的 LED 集鱼灯的光照稳定性优于金卤灯。

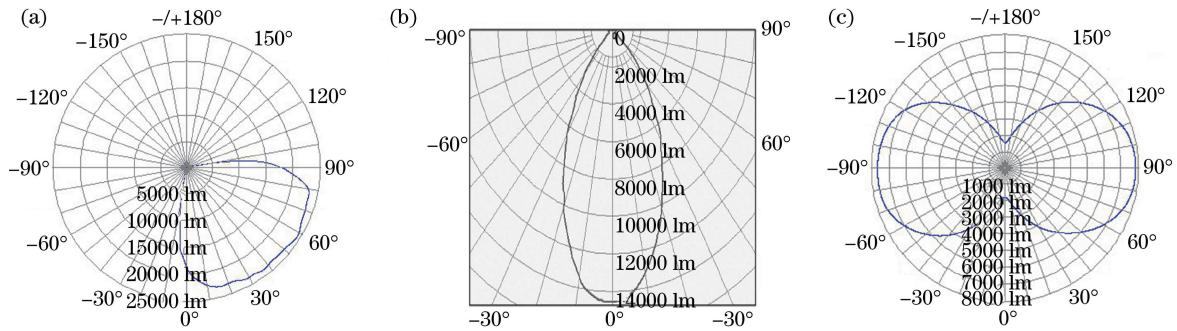


图 14 集鱼灯的配光曲线。(a)改进的 LED 集鱼灯;(b)普通 LED 集鱼灯^[10];(c)金卤灯

Fig. 14 Flux distribution curves of fishing lamp. (a) Improved LED fishing lamp; (b) ordinary LED fishing lamp^[10]; (c) metal halide lamp

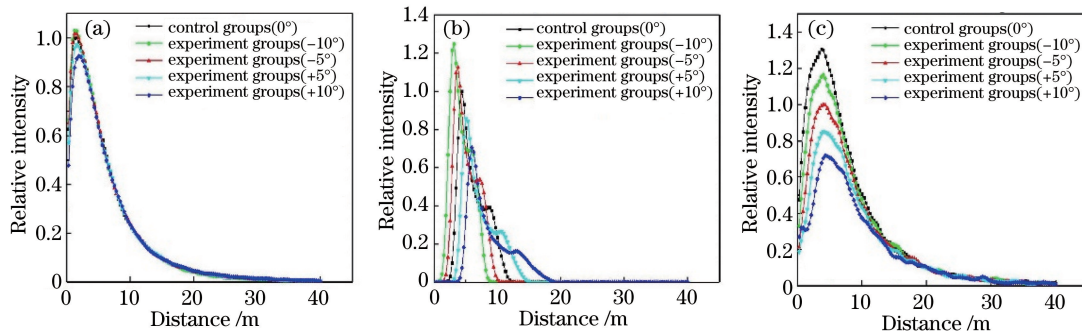


图 15 集鱼灯的相对照度分布。(a)改进的 LED 集鱼灯;(b)普通 LED 集鱼灯^[10];(c)金卤灯

Fig. 15 Relative illuminance distribution of fishing lamp. (a) Improved LED fishing lamp; (b) ordinary LED fishing lamp^[10]; (c) metal halide lamp

表 2 三种集鱼灯的照明稳定性

Table 2 Illumination stability of three fishing lamps

Parameter	Improved LED fishing lamp				Ordinary LED fishing lamp				Metal halide lamp			
Illumination angle / (°)	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10	-10	-5	5	10
NCC / %	99.92	99.96	99.89	98.50	70.34	88.85	87.14	62.22	96.41	97.61	97.62	96.04
RMSE / %	1.44	0.98	1.63	5.56	20.41	11.64	10.82	17.37	13.12	6.77	6.27	12.05

5 结 论

设计了一种 LED 集鱼灯的自由曲面透镜,该透镜能够在船体横摇时保证光照稳定性。改进的 LED 集鱼灯在 Y-Z 平面上实现 110°的发光角,在 X-Y 平面上的发光角为 13°,满足稳定照明需要并减小了散射损耗。对所设计的 LED 集鱼灯透镜在渔船横摇时的稳定性能进行软件模拟和实验测试,结果表明,LED 集鱼灯在不同照明角度下,所设计的自由曲面透镜使目标面的相对照度分布与 0°时相对照度分布的相关性分别大于 98.50%和 99.53%,照度相对偏差小于 5.56%和 4.60%。最后,对所设计 LED 集鱼灯、普通型 LED 集鱼灯、金卤灯进行对比,自由曲面透镜使 LED 集鱼灯在海面的相对照度分布的 NCC 值提高 36.28 个百分点, RMSE 降低 14.85

个百分点,且光照稳定性优于金卤灯。

参 考 文 献

- [1] Nguyen K Q, Winger P D. Artificial light in commercial industrialized fishing applications: a review [J]. Reviews in Fisheries Science & Aquaculture, 2019, 27(1): 106-126.
- [2] Wang G Z, Wang L L, Li F L, et al. Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics [J]. Applied Optics, 2012, 51(11): 1654-1659.
- [3] Zeng D, Peng D S, Jiang Y. LED freeform lens design for roundabout crossing illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 072202.

曾丹, 彭冬生, 蒋月. 用于环形交叉路口照明的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016,

- 53(7): 072202.
- [4] Yang F, He C, Zhang X S. Design and analysis of a primary-secondary system for LED collimating illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 082201.
杨帆, 何川, 张旭升. 一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082201.
- [5] Shen S C, Huang H J. Design of LED fish lighting attractors using horizontal/vertical LIDC mapping method[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26135-26146.
- [6] Shen S C, Li J S, Huang M C. Design a light pattern of multiple concentric circles for LED fishing lamps using Fourier series and an energy mapping method [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13460-13471.
- [7] Nguyen A Q D, Nguyen V H, Lee H Y. Gaussian decomposition method in designing a freeform lens for an LED fishing/working lamp[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, 1(3): 233-238.
- [8] Kuo C Y, Shen S C. Design of secondary lens for LED fishing lamps to evaluation catches energy efficiency in saury fishing [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 66664-66672.
- [9] Bae J H, An H C, Kim S W. The optical characteristics of 240 W high power LED fish luring lamp [J]. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2013, 19(6): 681-687.
- [10] An H C, Bae J H, Bae B S, et al. Operating performance of squid jigging vessel using the LED and metal halide fishing lamp combination [J]. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, 2013, 49(4): 395-403.
- [11] Lee M Y. Fixing device of LED fishing lamp: KR20110063884A [P]. 2011-06-15 [2020-09-13]. https://worldwide.espacenet.com/maximizedOriginalDocument?flavour=maximizedPlainPage&locale=cn_EP&FT=D&CC=KR&NR=20110063884A.
- [12] An H C, Bae B S, Lee K H, et al. Operating performance of hair-tail angling vessel using the LED and metal halide fishing lamp combination [J]. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, 2012, 48(4): 337-345.
- [13] Heo M, Yi H, Oh C Y. Preliminary study on development of ship-rolling-motion-adaptive LED fishing lamp system [J]. *Journal of the Korean Society for precision Engineering*, 2017, 34(8): 563-568.
- [14] Chen E Z, Guo Z N, Zhi J J. Lens design with uniform illumination of the LED extended sources [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2013, 34(6): 632-635.
陈俄振, 郭震宁, 智佳军. LED 扩展光源均匀照明的透镜设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(6): 632-635.
- [15] Shen S C, Huang H J, Chao C C, et al. Design and analysis of a high-intensity LED lighting module for underwater illumination [J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 39: 89-96.
- [16] Shen S C, Kuo C Y, Fang M C. Design and analysis of an underwater white LED fish-attracting lamp and its light propagation [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(183): 1-10.
- [17] Luo T. Numerical simulation of ship roll motions[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
罗天. 船舶横摇的数值模拟分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [18] Li Y X, Liang W Y, Ye H G, et al. COB LED based optical design of transmitting end with uniform luminous intensity distribution for visible light communication systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1022002.
李远兴, 梁文跃, 叶湖贵, 等. 基于 COB LED 的均匀光强分布可见光通信系统发射端的光学设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1022002.
- [19] Gui L, Sun X H, Yin S Y, et al. Modeling error analysis and compensation design for free-form uniform illumination lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022008.
桂立, 孙秀辉, 尹韶云, 等. 自由曲面匀光透镜的建模误差分析及补偿设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022008.
- [20] Zhao H, Li C G, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0422001.
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0422001.
- [21] Sun C C, Lee T X, Ma S H, et al. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(14): 2193-2195.
- [22] Moreno I, Avendaño-Alejo M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [23] Chen H C, Lin J Y, Chiu H Y. Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3201-3212.