

doi:10.3788/gzxb20174606.0622006

# 登陆艇光学对中方法及 LED 引导光源设计

刘典宏, 张晓晖, 张爽

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

**摘 要:** 设计了基于引导光源颜色/相对位置的登陆艇光学对中方法, 登陆艇驾驶员通过不同颜色引导光源间的相对位置判断其是否偏航以及偏航的程度, 从而提高登陆艇快速入舱的精度和安全. 引导光源以横纵向  $90^\circ$  视场角的光束对最远 200m 海面进行均匀照明, 采用 CREE XPE 型号的 LED, 通过改进的网格映射法设计自由曲面透镜以获得要求的矩形照明光场, 仿真与实验结果表明, 所设计的 LED 引导光源可以满足登陆艇光学对中系统的照明要求.

**关键词:** 登陆艇; 对中; 引导光源; 矩形照明; 网格映射法; LED

中图分类号: TJ83

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0622006-7

## Design of Landing Boat Optical Alignment Method and LED Guidance Source

LIU Dian-hong, ZHANG Xiao-hui, ZHANG Shuang

(Ordnance Engineering Department, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, China)

**Abstract:** An optical alignment method based on color / relative position of guidance light source is designed, landing boat pilot can determine whether is yawing and the degree of yawing through the relative position of the light source with different colors, so as to improve the precision and safety when entering into well-dock quickly. Guidance light source beam is of  $90^\circ$  horizontal and vertical angle of view, and illuminate sea surface farthest to 200m for uniform lighting, with CREE XPE LED, free-form lens is designed by improved grid mapping method to obtain the required rectangular illumination field. The simulation and experimental results show that the designed LED guidance source can meet the illumination requirements of the landing alignment system.

**Key words:** Armament science and technology; Landing boat; Alignment; Guidance light source; rectangular illumination; Grid mapping method; Light-emitting diode

**OCIS Codes:** 220.2945; 080.2740; 230.3670

## 0 引言

登陆艇是一种用于抢滩登陆的小型舰艇, 可搭载于大型两栖登陆舰内, 是实施登陆作战的重要工具<sup>[1]</sup>. 为了能够快速有效地完成登陆任务, 需要登陆艇在夜间海面环境下能够快速进入登陆舰坞舱内. 但是由于坞舱艙门的宽度有限, 当登陆艇以一定速度经过坞舱艙门时, 如果登陆舰和登陆艇的艙向不一致, 极易导致入舱失败. 因此一套有效可靠的登陆艇对中系统用于夜间指引登陆艇顺利入舱显得尤为重要.

光学引导手段具有直观、直接和可靠等优点, 在远距离导标灯<sup>[2]</sup>、舰载机着舰引导系统<sup>[3]</sup>都采用了光学引导手段, 操作员可以通过目视直接观察灯光信号. 借鉴舰载机着舰引导系统<sup>[3]</sup>, 登陆艇对中系统对登陆舰后方一定区域内海面进行矩形光场照明, 通过多个引导光源组成的灯组将引导区域划分等角度的引导分区, 为驾驶员提供不同的指示信号辅助其判断是否偏离正确航道以及偏离程度的大小, 可以有效辅助登陆艇夜

基金项目: 海军科研项目 (No. 417210973) 资助

第一作者: 刘典宏 (1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非成像光学设计. Email: 15827442592@163.com

导师 (通讯作者): 张晓晖 (1965-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为水下光电探测、光学系统设计. Email: 779294469@qq.com

收稿日期: 2016-12-06; 录用日期: 2017-03-23

<http://www.photon.ac.cn>

间快速进入坞舱。

由于以往的导标灯、舰载机菲涅耳着舰引导系统使用的光源都为白炽灯泡,寿命短,且经光场整形后体积非常大,LED由一块很小的芯片封装于环氧树脂内形成,与传统光源相比<sup>[4]</sup>,具有体积小、光效高、寿命长、耐冲击等特点,如果以LED作为登陆艇对中系统引导光源,不仅可满足光强要求,还可以减小系统体积,大大提高使用寿命。但是LED是一种视场角接近 $180^\circ$ 的近朗伯辐射体,光场呈现圆锥形非均匀分布<sup>[5]</sup>。为了使LED能够以矩形光场照明,需要对LED进行二次光学设计<sup>[6-8]</sup>实现矩形光场整形。由于自由曲面透镜具有极高的设计自由度,目前已成为LED二次光学设计的最好选择<sup>[9-14]</sup>。而在前期的工作中对设计LED自由曲面透镜实现矩形光场的研究<sup>[15]</sup>可为LED引导光源的设计提供基础。

本文根据登陆艇夜间快速入舱的实际需求,设计了基于引导光源颜色/相对位置的登陆艇对中方法。借鉴舰载机着舰引导系统工作原理,设计登陆艇对中系统对登陆舰后方横纵向分别为 $90^\circ$ 区域内海面进行矩形光场照明,并由多个引导光源将横向引导区域划分5个等角度的引导分区,以提供正确航道以及偏离程度的大小的指引信息。根据登陆艇对中系统对引导光源的要求,采用改进的网格映射法设计LED自由曲面透镜实现矩形光场整形,仿真和实验结果表明由LED与自由曲面透镜组成的引导光源能满足登陆艇对中系统需要的矩形照明光场。

## 1 基于引导光源颜色/相对位置的登陆艇对中方法设计

为了有效辅助登陆舰后方一定区域内的登陆艇快速进舱,登陆艇对中系统对登陆舰后方以横纵向视场角都为 $90^\circ$ 的矩形均匀光场照明,最远可引导200 m纵向范围,如图1所示。

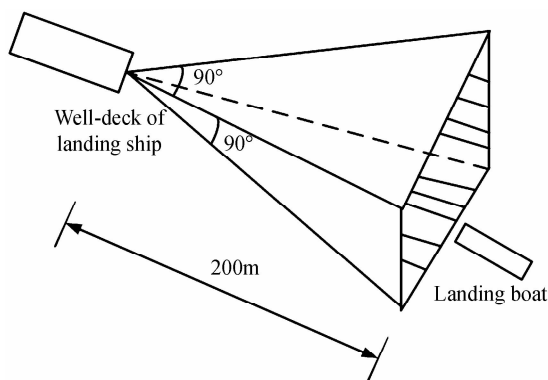


图1 200 m 距离内矩形照明光场

Fig. 1 Rectangular light field within 200 m

为了提高登陆艇入舱的精度和安全,对中系统需要通过多个引导光源将照明区域划分为直航区域和左右偏航区域,同时对每个偏航区域进一步划分为两个分区,以提示偏航程度的大小。

对中系统提供7个颜色不完全相同的LED引导光源(3个为绿色、1个白色、3个蓝色),7个引导光源矩形光束的横纵向视场角都为 $90^\circ$ ,并都向后方以矩形均匀光场照明,这样可以保证在引导区域的任何位置登陆艇驾驶员都能观察到7个引导灯光。为了有效进行5个等角度引导分区划分,7个引导光源之间设置特定的安装位置,如图2所示。

其中3个绿色的LED引导光源为 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $A_3$ ,3个蓝色的引导光源为 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ ,这6个引导光源位于同一排,而白色的引导光源B位于其后一定距离处,同时在安装时保证绿色与蓝色6个引

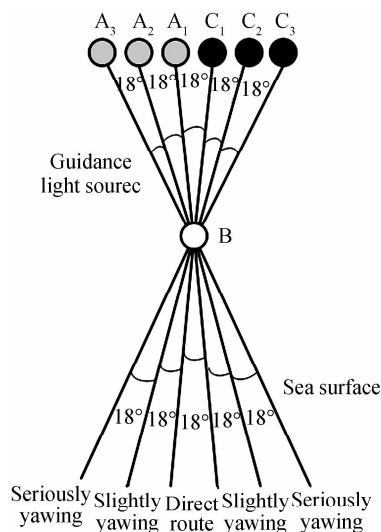


图2 引导光源相对位置划分引导区域

Fig. 2 Division of guidance zone by relative source positions

导光源间任意相邻的引导光源与白色的引导光源所成的夹角为  $18^\circ$ 。通过这种方式可以将两栖舰后方横向引导区域有效划分为 5 个等角度分区。登陆艇驾驶员通过观察白色的引导光源在其他引导光源间的相对位置可有效判断是否偏离正确航道以及偏离程度的大小,具体为:

当 B 在  $A_1$  和  $C_1$  之间,位于正确的航道,无需调整航向。当 B 在  $A_1$  和  $A_2$  之间,处于轻微右偏航状态,需及时调整航向。当 B 在  $A_2$  和  $A_3$  之间,处于严重右偏航状态,需迅速调整航向。当 B 在  $C_1$  和  $C_2$  之间,处于轻微左偏航状态,需及时调整航向。当 B 在  $C_2$  和  $C_3$  之间,处于严重左偏航状态,需迅速调整航向。

## 2 改进的网格映射法设计 LED 引导光源

### 2.1 LED 选择

引导光源需要在 200 m 处形成横纵向  $90^\circ$  的矩形均匀光场,在背景全黑条件下,人眼的最小光刺激值约  $2 \times 10^{-7} \text{ lux}$ ,不考虑大气衰减的情况下,LED 的最小光通量满足

$$\Phi_{\min} = 2 \times 10^{-7} \times 2 \times 200 \times \tan(45^\circ)^2 \text{ lm} = 0.032 \text{ lm} \quad (1)$$

经查阅,CREE XPE 型号的 LED 拥有不同颜色灯珠,且光通量最小的蓝色灯珠也能达到 90lm,完全满足光强要求,该型灯珠的发光尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

### 2.2 改进的网格映射法设计自由曲面透镜

光源网格划分采用  $(u, v)$  光源极坐标,如图 3 所示。设定光线与  $x$  轴的夹角为  $u$ ,光线在  $yz$  平面内的投影与  $z$  轴的夹角为  $v$ ,由于 LED 为近似朗伯状光源,假设中心光强为  $I_0$ ,则不同立体角  $\Omega$  对应的光强  $I(\Omega)$  满足

$$I(\Omega) = I_0 \sin u \cos v \quad (2)$$

空间立体角  $\Omega$  在  $(u, v)$  坐标系的微分为

$$d\Omega = \sin u du dv \quad (3)$$

根据分离变量法,光源光通量满足

$$\iint_{\Omega} I(\Omega) d\Omega = \iint_{\Omega} I_0 \sin^2 u \cos v du dv = I_0 \int \sin^2 u du \int \cos v dv \quad (4)$$

假设光源等光通量划分为  $M \times N$  份,则划分规则满足

$$\begin{cases} \int_0^{u_i} \sin^2 u du / \int_0^{\pi/2} \sin^2 u du = \frac{i-1}{M} & (1 \leq i \leq M+1, 0 \leq u_i \leq \pi/2) \\ \int_{-\pi/2}^{v_j} \cos v dv / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos v dv = \frac{j-1}{N}, & (1 \leq j \leq N+1, -\pi/2 \leq v_j \leq \pi/2) \end{cases} \quad (5)$$

设定目标面照度均匀且为  $E_0$ ,根据能量守恒可以得到光强与目标面照度之间的关系为

$$\iint_{\Omega} I(\Omega) d\Omega = \iint_D E_0 dx dy \quad (6)$$

基于式(6)可对目标面矩形进行对应的等光通量  $M \times N$  网格划分,如图 4。

$$\begin{cases} (x_i/x_0)^2 = \frac{i-1}{M}, & 1 \leq i \leq M+1, 0 \leq x_i \leq x_0 \\ y_j - y_0 = \frac{\left[ \frac{j-1}{N} \sqrt{a^2+b^2} - \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2} \right] - y_0}{-x_0} (x_i - x_0) & 1 \leq j \leq N+1 \end{cases} \quad (7)$$

在网格划分之后,根据对应的拓扑形状可以建立网格节点之间的关系(图 3 和图 4 阴影部分对应)。然后可以构造自由曲面透镜。

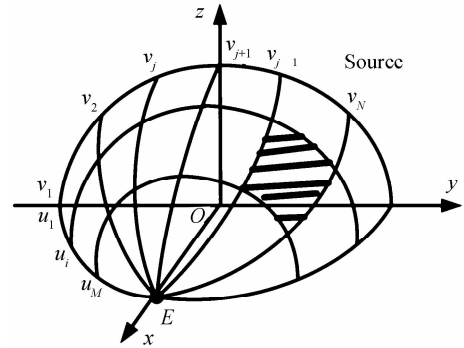


图 3 光源网格划分

Fig. 3 Space grid division of the light source

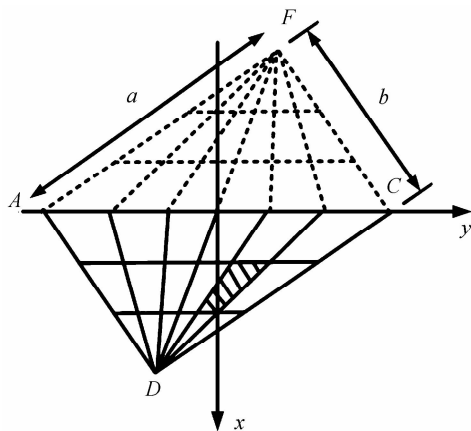


图4 目标面网格划分  
Fig. 4 Target plane division

第一步:计算初始曲线  $G_1$ ,如图5所示.首先设定一个初始点  $P_0$ ,其坐标已知,这里假设为透镜的顶点,它与目标面上的中心点相对应,可以通过式(8)的斯涅尔定律求得其法向量  $\vec{N}_0$ ,其中  $n$  为折射率.得到法向量之后可以继续求得  $P_0$  点的切平面,而下一条入射光线  $\vec{I}_{n1}$  与  $P_0$  点切平面的交点即为点  $P_1$ ,后面点的构造与  $P_1$  点相同,通过这种方式得到一系列离散的点,用样条曲线连接可以得到  $G_1$  曲线.

$$[1+n^2-2n(\vec{O}u\vec{t}\cdot\vec{I}n)]^{1/2}\vec{N}_{i,j}=\vec{O}u\vec{t}-n\vec{I}n \quad (8)$$

第二步:通过迭代法计算其他曲线,如图6所示.方法是对于  $G_j$  条曲线上的任一点  $P_{i,j}$ ,可通过式(8)计算得到法向量  $\vec{N}_{i,j}$ ,那么  $G_{j+1}$  条曲线上的  $P_{i,j+1}$  点可由式(9)求得.

$$(\vec{O}P_{i,j+1}-\vec{O}P_{i,j})\vec{N}_{i,j}=0 \quad (9)$$

第三步,引入法矢量误差控制.由于  $P_{i,j}$  点真正的法矢量  $\vec{N}_{i,j}$ ,满足

$$\vec{N}_{i,j}'=(\vec{O}P_{i,j+1}-\vec{O}P_{i,j})\times(\vec{O}P_{i+1,j}-\vec{O}P_{i,j}) \quad (10)$$

当  $\vec{N}_{i,j}$  和  $\vec{N}_{i,j}'$  的夹角大于设定值,重新采用第一步计算曲线  $C_j$ ,最后对所有曲线进行放样可以得到不连续的透镜曲面.

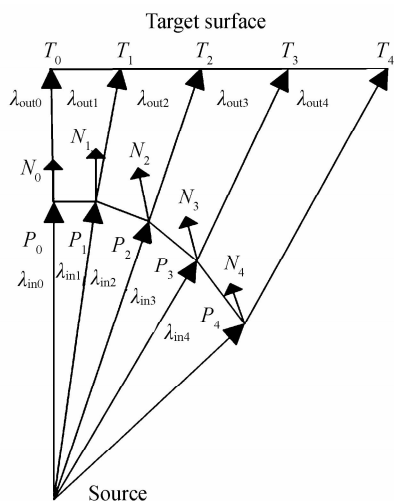


图5  $G_1$  曲线构造过程  
Fig. 5 Constructing curve  $G_1$

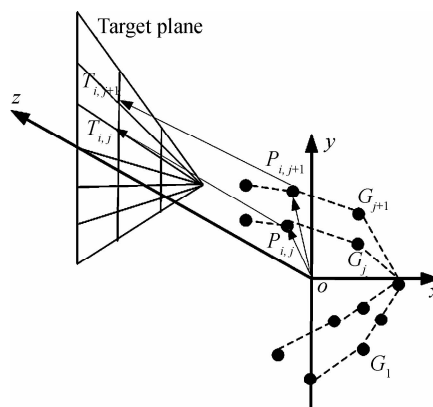


图6 透镜曲面构造过程  
Fig. 6 Surface construction of lens

### 2.3 LED 引导光源设计

引导光源形成的矩形均匀照明光场横纵向视场角均为  $90^\circ$ ,实际上 LED 引导光源要在 200 m 处形成  $400\text{ m}\times 400\text{ m}$  的均匀照明面,如图7所示.

根据改进的网格映射法设计符合照明需求的自由曲面透镜,透镜材料设为 PMMA,折射率为 1.493 5,光源和目标面的划分都为  $300\times 300$  等份.在科学计算软件 MATLAB 中编程可以得到透镜面型数据,根据

这些数据可在三维设计软件 Rhinoceros 中构造自由曲面透镜模型,如图 8 所示,透镜模型尺寸为  $37\text{ mm}\times 37\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ .

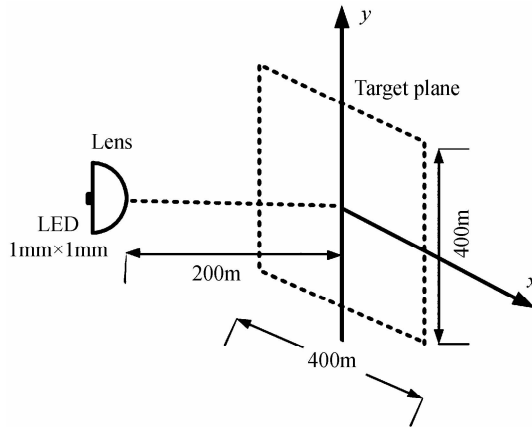


图 7 矩形光场要求

Fig. 7 Rectangular light field demand

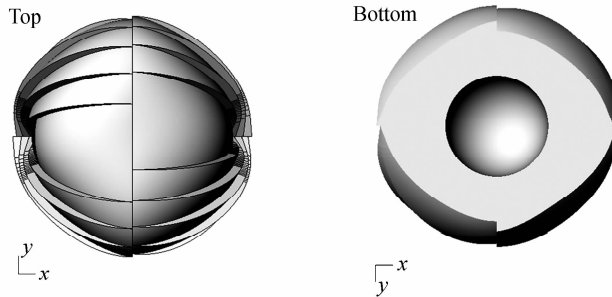


图 8 自由曲面透镜模型

Fig. 8 Free-form lens model

将该透镜模型导入光学仿真软件,设定 LED 尺寸为  $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ ,光通量  $\Phi=90\text{ lm}$ ,采用该 LED 与自由曲面透镜组成引导光源并进行光线追迹,光线数量设定为 50 万.可以得到引导光源在  $200\text{ m}$  的照度分布如图 9 所示.由仿真结果可以知道,引导光源在  $200\text{ m}$  处形成了  $400\text{ m}\times 400\text{ m}$  的照明面,且照度分布均匀,照度值平均分布在  $4\times 10^{-4}\text{ lux}$  左右,远远高于人眼的最小光刺激值,该引导光源满足  $200\text{ m}$  处可见.

为了对比,仿真得到光线追迹后  $2\text{ m}$  处的照度分布,如图 10 所示.

由仿真结果可以知道,引导光源在  $2\text{ m}$  处形成了  $4\text{ m}\times 4\text{ m}$  的照明面,且照度分布均匀,照度值在平均分布在  $4\text{ lux}$  上下,照明横纵向视场角均约为  $90^\circ$ ,该引导光源横纵向视场角在远处和近处也都满足要求.

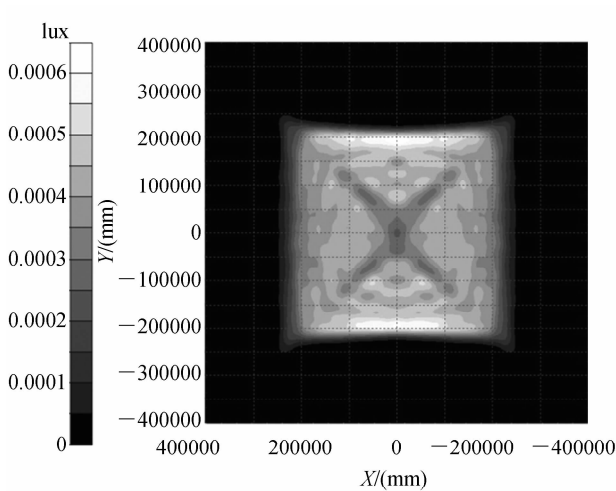


图 9 200 m 照度分布

Fig. 9 Illumination distribution at a distance of 200 m

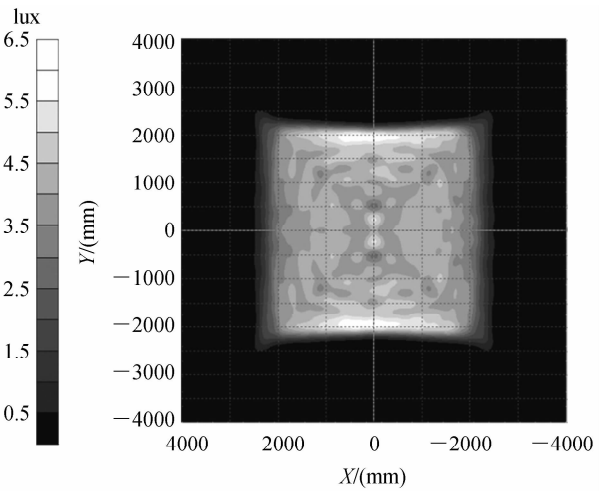


图 10 2m 照度分布

Fig. 10 Illumination distribution at a distance of 2 m

### 3 透镜加工及 LED 引导光源验证

经过上一节光学仿真验证,设计的 LED 自由曲面透镜可用作满足登陆艇光学对中系统要求的 LED 引导光源.为了验证该引导光源的实际效果,在精密数控机床对该自由曲面透镜进行了加工,并与 CREE XPE 白光 LED 灯珠组成了实际的引导光源,如图 11 所示.

在夜间黑暗环境下对 2m 处的室内墙面进行照明,由于墙面宽 6m、高 2.8m,所以只用对称自由曲面透镜的一半进行三角形区域照明(另一半进行完全遮挡),照明效果如图 12 所示.该引导光源在 2m 处形成了宽 5.8m、高 2.9m 的三角形强光区域,且经测量该区域内的照度值均大于 3lux,与仿真结果相符.

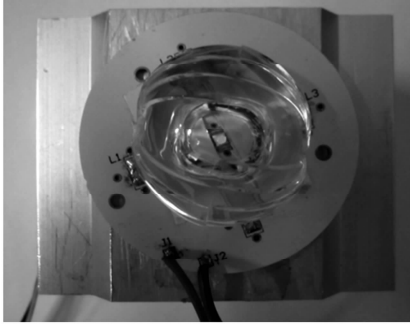


图 11 实际引导光源

Fig. 11 Actual guidance light source



图 12 引导光源 2 m 处照明效果

Fig. 12 Actual illuminance result at a distance of 2 m

通过与图 10 的 2 m 处仿真结果对比可以,仿真结果的矩形区域照度分布均匀,而在实际的三角形强光区域内,出现了 4 条暗纹,均匀性变差,同时在三角形强光区域外存在弱光.分析其主要原因有:设计的自由曲面透镜表面非连续,加工过程中存在误差,抛光也会导致实际透镜表面与理论模型有细微的差别,此外手工组装、测试也会带来误差.但暗纹区域内的照度值也大于 3 lux,根据照度平方反比定律,其在 200m 的照度值也远大于人眼的最小刺激值,不影响引导光源的对中效果.

### 4 结论

本文根据登陆艇夜间快速入舱的实际需求,设计了登陆艇光学对中方法,该光学对中系统由多个引导光源组成,登陆艇驾驶员可以通过白色引导光源在其他不同颜色引导光源间的相对位置判断其是否偏航以及偏航的程度,从而精确控制航向.引导光源需要在 200 m 处形成横纵向 90°的矩形均匀照明光场,由于 LED 的体积小和寿命长的特点,通过改进的网格映射法设计 LED 自由曲面透镜以实现矩形光场整形,仿真结果证明由 LED 与透镜组合成的引导光源能够满足登陆艇光学对中系统对引导光源的要求.为了验证设计的有效性,在精密加工机床对透镜进行加工,并与 CREE XPE 白光 LED 灯珠组成了实际的引导光源,实验结果与仿真结果相符.该引导光源可以有效应用于登陆艇光学对中系统搭建及对登陆艇的实际引导效果试验.

#### 参考文献

- [1] CHEN Guang-wen. The pioneer of sea force to restrict the land force-development of new amphibious warfare ships in different countries[J]. *Modern Weaponry*, 2009, **04**:27-33.  
陈光文. 以海制陆的急先锋-世界各国新型两栖战舰的发展[J]. *现代兵器*, 2009, **04**:27-33.
- [2] SUI Feng, LI Xiang-ning, NIU Lei. Long-range LED pilot lamp design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(07):13-19.  
隋峰,李湘宁,牛磊. LED 远距离可见导标灯设计[J]. *光电工程*, 2014, **41**(07):13-19.
- [3] ZHENG Feng-ying, YANG Yi-dong, HU En-yong. Laser aided lateral visual line up landing system for carrier aircraft [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, **26**(04):430-435.  
郑峰婴,杨一栋,胡恩勇. 激光助降侧向目视对中着舰引导系统[J]. *应用科学学报*, 2008, **26**(04):430-435.
- [4] LUO Yi, FENG Ze-xin, HAN Yan-jun, et al. Optics in solid state lighting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 147-157.  
罗毅,冯泽心,韩彦军,等. 面向半导体照明的光学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 147-157.
- [5] DING Yi, ZHENG Zheng-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2009, **38**(06): 1486-1490.  
丁毅,郑臻荣,顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(06): 1486-1490.

- [6] CHEN Chen, ZHANG Xiao-hui, LIU Dian-hong. Design of optical system for collimating light of LED uniformly [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2015, **27**(04):103-107.  
陈琛, 张晓晖, 刘典宏. LED均匀准直光学系统设计[J]. 海军工程大学学报, 2015, **27**(04):103-107.
- [7] CHEN J J, LIN C T. Freeform surface design for a light-emitting diode - based collimating lens [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(9): 93001.
- [8] CHEN J J, WANG T Y, HUANG K L, *et al.* Freeform lens design for LED collimating illumination [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(10): 10955-10984.
- [9] ZHENG Z R, HAO X, LIU X. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(35): 6627-6634.
- [10] MENG Xiang-wei, LIU wei-qi, FENG Rui, *et al.* Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2014, **43**(08): 16-21.  
孟祥翔, 刘伟奇, 冯睿, 等. 双自由曲面LED均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, **43**(08): 16-21.
- [11] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2011, **40**(9): 1351-1355.  
罗晓霞, 刘华, 卢振武, 等. 实现LED准直照明的优化设计[J]. 光子学报, 2011, **40**(9): 1351-1355.
- [12] DOSKOLOVICH L L, MOISEEV M A. Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle[J]. *Journal of Optical Technology*, 2009, **76**(7): 430-434.
- [13] MOISEEV M A, DOSKOLOVICH L L. Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(3): 225-233.
- [14] SUN Li-wei, JIN Shang-zhong, QIN Song-yuan. Free-form micro-lens design for solid state lighting[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, **39**(5): 860-865.  
孙理伟, 金尚忠, 岑松原. 用于固态照明的自由曲面微透镜设计 [J]. 光子学报, 2010, **39**(5): 860-865.
- [15] LIU D H, ZHANG X H, CHEN C. Free-form lens for rectangular illumination with the target plane rotating at a certain angle [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, **32**(11): 1958-1963.