

# 一种辅助船舶入港的发光二极管导航系统设计与实现

张佳斌, 郭文平\*, 夏珉, 杨克成, 李微

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 为了使船舶能够更加准确地入港和避免发生碰撞, 提出了一种辅助船舶入港的发光二极管(LED)导航系统。该系统采用不同闪烁频率的 3 种颜色灯光对目标水域进行分区, 使照射区域内的船舶可以通过灯光的颜色和频率来准确判定其位置和方向, 进而辅助船舶快速准确地驶向目的地。为了实现该导航系统, 设计了一种大功率 LED 的发射光学系统, 通过矩形集光器和线性菲涅耳透镜使 LED 的出射光束为矩形; 同时设计了控制光源闪烁的电路控制系统, 通过单片机、数模转换器和放大电路实现对光源闪烁频率的调制, 并根据设计的系统制作出样机, 在木兰湖进行验证实验。实验结果表明: 制作的光学系统样机与设计仿真结果吻合, 出射光束在水平方向上的发散角为  $6^\circ$ ; 所设计的导航系统利用颜色对目标水域分区, 从而对区域内的船舶进行导航。

**关键词** 光学器件; 光电系统设计; 水面导航系统; 矩形集光器; 线性菲涅耳透镜; 发光二极管

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1022003

## Design and Implementation of Navigation System for Assisting Ships in Entering Port Based on Light-Emitting Diodes

Zhang Jiabin, Guo Wenping\*, Xia Min, Yang Kecheng, Li Wei

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** In order to make the ship enter port accurately and avoid conflict, we present a water navigation system for assisting ships in entering port based on light-emitting diodes (LED). The system partitions the target water area by three color lights which are flickering in different frequencies. The mariners in the irradiation area can get their position and direction by observing the lights color and frequency. The system can aid the ships enter port more quickly and accurately. In order to achieve this navigation system, we propose a high-power LED optical system. The LED light beam becomes rectangular through the rectangular concentrator and the linear Fresnel lens. A circuit control system is designed to control the flicker of the light source. The modulation of the flicker frequency of the light source is realized through a single chip microcomputer, a digital analog converter and an operational amplifier. The prototype is made according to the designed system. Experiment is conducted to verify the feasibility of the system on the Mulan Lake. The experimental results show that the fabricated prototype and simulation result of design are in good agreement. The divergence angle of the beam in the horizontal direction is  $6^\circ$ . The proposed water navigation system can partition target waters and assist ships in entering the port well by light colors.

**Key words** optical devices; optoelectronic system design; water navigation system; rectangular concentrator; linear Fresnel lens; light-emitting diode

**OCIS codes** 230.3670; 220.4298; 220.2740; 220.2945

## 1 引 言

水路运输自古以来一直是主要的货运和客运方式。除了商用船舶之外, 近年来民用船舶的数量也在急剧增加, 这就增加了船舶在港口和运输水域内

发生冲突的可能性, 尤其是在夜间光线较暗的情况下, 事故发生的概率会进一步增加<sup>[1]</sup>。为了保证船舶航行时的安全, 人们需要优良的导航系统来辅助船员驾船航行。目前使用最广泛的船舶导航系统是自动雷达绘标器, 它通过雷达系统绘制出船舶附近

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-04-25; 录用日期: 2018-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(41406108)

\* E-mail: wpguo@hust.edu.cn

水域的情况,船员根据绘制的地图判定航线,以避免碰撞的发生<sup>[2]</sup>。近年来,移动设备和因特网也被用于水上导航之中,通过卫星定位及卫星拍摄的地图进行导航<sup>[3-4]</sup>。这两种方法均是通过监控整个水域,并根据水域的情况为船舶提供合理的航线。但是这两种方法在实现时都需要在船舶或流域附近搭建很多设备,如雷达和信号基站等。这些设备需要消耗大量的资金去维护,当其中某一部分设备出现问题时,可能会导致整个系统无法正常工作。

在实际使用过程中,雷达或者移动设备导航系统提供的路线,常会因为目标过小或没有及时更新信息而发生错误,船员们仍然需要根据实际的水域环境做出自己的判断。这些判断多是船员根据自身的经验及对地形的熟悉程度做出的。因此,即便已采用上述导航系统来辅助航行,水路上的交通事故仍频繁发生,尤其是在视野不佳的时候。因此,除雷达和定位系统之外,需要一种其他的导航辅助方法帮助船员做出判断,并且能在雷达等系统不能工作时提供导航。

对于上述问题,灯光导引是一种很好的解决方法。导航灯很早就已在水面导航领域使用<sup>[5]</sup>。起初是将航标灯作为导航灯应用在航海领域,航标灯多为白炽灯制作的环形灯,为海上的船舶指引方向<sup>[6-7]</sup>。但白炽灯的使用寿命短,维护周期长,逐渐被发光二极管(LED)替代。LED具有发光效率高、使用寿命长、无故障时间长等特点,常被应用在各种工程领域中<sup>[8]</sup>。但更换光源后,环形灯在一些导航情况下效率过低的缺点仍然存在,例如,在港口或者当船舶由宽阔水域进入狭窄水域时,环形灯不能很好地为船员提供帮助。后来人们发现,将定向单色

灯作为导航灯是一种很好的解决办法。LED定向单色灯主要通过准直设计实现,LED光源的准直设计主要是依靠自由曲面透镜或透射与反射镜结合的方法<sup>[9-10]</sup>来实现。

本文提出并设计了辅助船舶入港的LED导航系统。该系统在船舶目的地处利用经过准直设计的3种不同的单色LED光源对目标水域进行分区,在照射区域内的船舶通过观察灯光的颜色就可以得知目前其相对于目的地的位置,从而根据得到的信息对航线进行调整,最终到达目的地。该系统可以很好地帮助船员在夜间选择更有效、更准确的行进路线。此外,本课题组设计了一种大功率LED光学系统和电路控制系统,用以实现导航系统。

## 2 导航原理

所设计的辅助船舶入港的LED导航系统采用3个经过准直后的不同波长的LED光源照射水面,光源分别为红光、蓝光和绿光,每个颜色的光源都有不同的闪烁频率,以增加不同颜色的辨识度。被照射的水域会根据照射灯光颜色的不同而被分成3个区域。当有船舶驶入照射区域内时,船员可以根据颜色和闪烁频率来辨别相对于目的地的方向和位置,并根据得到的信息做出改变,以准确高效地驶向目的地。导航原理示意图如图1所示。

图1显示的是导航原理的俯视视角,直线EF表示的是水岸线,在EF左边为陆地,右边为水域。梯形ABCD为导航系统照射在水面上形成的光斑,图中虚线为3组光学系统照射的不同颜色光束的分界线,红色代表到达目的地的最佳路线,蓝色代表船舶

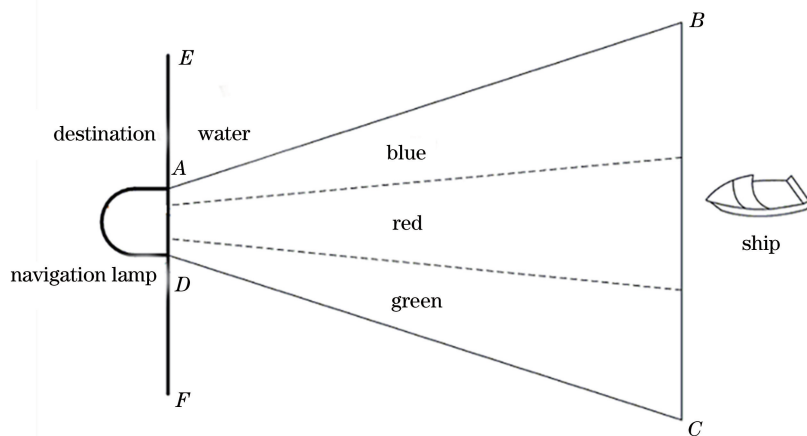


图1 导航方案示意图

Fig. 1 Schematic of navigation scheme

航行的位置偏右,绿色代表偏左。船舶在照射区域内行驶,根据不同颜色或频率的光来分辨方向。相比于环形灯,该导航方案可以更高效地导引船舶驶向目的地。将图 1 中显示的光束发散角定义为水平发散角,与之垂直的是光束的垂直发散角。

所设计的导航系统一般应用在港口等开阔的地方。一般情况下,港口的船舶很多,港口附近的环境也很复杂。因此,LED 导航系统应尽可能早地将船舶引导至最佳的航道上,导航系统照射的距离也应尽可能远。对此,将 LED 导航系统的导航距离设定为 20~2000 m。为了使 LED 导航系统的照射距离尽可能地达到要求,设定 LED 导航系统在岸边的高度为 20 m。LED 导航系统的导航精度与各个颜色照射区域的宽度有关,每个颜色的照射区域越窄,系统对船舶的导航就会越精确。因此,LED 导航系统各颜色照射区域的宽度应结合船舶的长和宽来设

计。查询中国船级社(CCS)资料可知,海船的宽度一般为 40~50 m,长度一般为 200~300 m。因此选择每个颜色的照射区域的宽度在 2000 m 远处为 200 m,这样既可以给船舶留出足够的调整的空间,又可以一定程度上保证导航的精确程度。通过三角函数可以求出每个光束的水平发散角  $\alpha$  为

$$\alpha = 2 \times \arctan \frac{100}{2000} = 5.72^\circ. \quad (1)$$

### 3 光学系统设计

#### 3.1 光源能量

为了选择合适的 LED 光源,根据导航的要求对 LED 光源参数进行计算。简化的照射截面示意图如图 2 所示。导航系统的高度为 20 m。为了尽量简化计算,假设点光源在 A 处,根据导航的要求,点光源照射的距离最远应为 2000 m 处的 D 点。

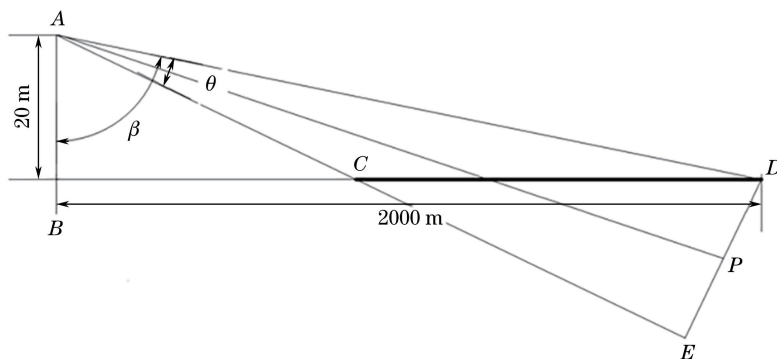


图 2 导航系统照射截面图

Fig. 2 Irradiation sectional view of navigation system

在图 2 中,CD 为导航系统实际照射在海面上的区域,C 点为照射区域距离导航系统最近的点,BC 长为 20 m,D 点为照射区域距离导航系统最远的点,ED 为导航系统理论上的照射区域,P 为 ED 的中点。AD 与 AB 的夹角为  $\beta$ ,光束在垂直方向的发散角为  $\theta$ 。根据图 2 所示导航系统照射截面图中的几何关系,可以得到:

$$\tan \beta = \tan \frac{BD}{AB} = 100, \quad (2)$$

$$\beta = 89.43^\circ \approx 90^\circ. \quad (3)$$

因为  $\triangle ABC$  为等腰直角三角形,可知图 2 中光束在垂直方向的发散角  $\theta$  为

$$\theta = \beta - 45^\circ = 45^\circ. \quad (4)$$

根据这个结果可知 AD 与 BD 接近于平行,AD 与 BD 的长度接近,可视 2000 m。同时由图 2 所示的导航系统照射截面图可知,当人处在 D 点并且可以观察到灯光时,在照射区域内的船舶均可

以观察到导航系统。

由于人眼有自动调节功能,在不同的照度下瞳孔直径是不同的,具体如表 1 所示。同时根据资料可知在背景全黑的条件下,人眼的最小光刺激值约为  $0.2 \mu\text{lX}^{[11]}$ ,即当人眼所在位置处的最低光照度低于  $0.2 \mu\text{lX}$  时,人眼无法感知到所接收的光。当人眼处于暗视觉条件下,人眼处的视场亮度小于或等于  $3 \times 10^{-5} \text{ cd/m}^2$  时,便不能辨别灯光与事物的颜色<sup>[12]</sup>。因此选择表 1 中视场亮度为  $10^{-3} \text{ cd/m}^2$  时的数据作为计算的基础,此时视网膜上的照度  $E = 2.0 \times 10^{-4} \text{ lx}$ ,瞳孔面积  $S' = 47.8 \text{ mm}^2$ ,由此可得眼睛处的光通量  $\phi$  为

$$\phi = E \times S' = (2.0 \times 10^{-4}) \times 47.8 = 9.56 \times 10^{-9}. \quad (5)$$

假设各处的照度是均匀的,当不存在海平面时,光源发出的光照射的区域如图 3 所示。

表 1 不同视场亮度下人眼瞳孔的直径和面积  
Table 1 Diameter and area of eye pupil at different field luminances

Adaptive field luminance / ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Pupil diameter / mm	Pupil area / $\text{mm}^2$	Luminance on retina /lx
$10^{-5}$	8.17	52.2	$2.2 \times 10^{-6}$
$10^{-3}$	7.80	47.8	$2.0 \times 10^{-4}$
$10^{-2}$	7.44	43.4	$1.8 \times 10^{-3}$
$10^{-1}$	6.72	35.4	$1.5 \times 10^{-2}$
1	5.66	25.1	1
10	4.32	14.6	0.6
$10^2$	3.04	7.25	3.0
$10^3$	2.32	4.23	17.6
$2 \times 10^4$	2.24	3.94	109.9

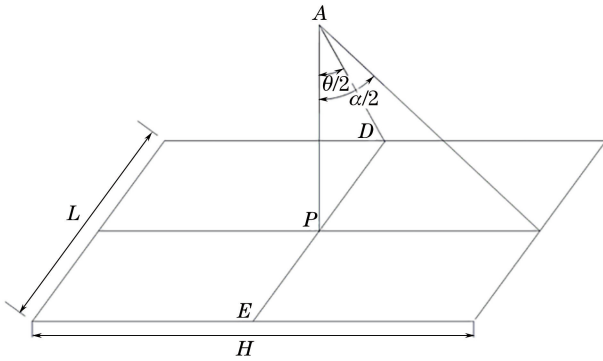


图 3 导航灯照射立体图

Fig. 3 Illumination space diagram of navigation lamp

在图 3 中,光束的水平发散角为  $\alpha$ ,垂直发散角为  $\theta$ 。由图 3 中的几何关系可知:

$$L = 2DP = 2AD \sin \frac{\theta}{2}, \quad (6)$$

$$AP = AD \cos \frac{\theta}{2}, \quad (7)$$

$$H = 2AP \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (8)$$

理论照射区域面积  $S$  为

$$S = H \times L = 4AD \times AP \sin \frac{\theta}{2} \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (9)$$

根据之前的计算结果可知: $\theta = 45^\circ, \alpha = 5.72^\circ, AD = 2000 \text{ m}$ 。将解算结果代入(9)式中可得  $S = 282604.65 \text{ m}^2$ ,所以照射区域内的总光通量  $\phi_0$  为

$$\phi_0 = E \times S = (2.0 \times 10^{-4}) \times 282604.65 \approx 57. \quad (10)$$

根据所得结果可知:在全黑背景下,若要保证观察者在照射区域内可以观测到  $A$  处光源发出的光,则光源所需要的最小光通量约为  $57 \text{ lm}$ 。

虽然导航系统一般在夜晚使用,但考虑到其不

会在完全黑暗的条件下才点亮,而是在傍晚时就需点亮,且现代化港口的灯光也是比较明亮的,因此选择将计算所得的最小光通量放大 150 倍(即  $8550 \text{ lm}$ )较为合适。根据光通量计算可以求出所需要的光源功率。目前市场上的单色光 LED 的发光效率为  $80 \text{ lm/W}$ ,由此可以计算得出 LED 光源的功率  $P$  为

$$P = \frac{8550}{80} \approx 107. \quad (11)$$

由(11)式的计算结果可知, $107 \text{ W}$  的 LED 单色光源可以满足所设计的光学导航系统的要求。最终考虑制作工艺等原因,选择  $100 \text{ W}$  的红色、绿色和蓝色的单色光 LED 光源作为光学导航系统的光源。

### 3.2 光学系统设计

在实现辅助船舶入港的 LED 导航系统中,核心是设计出射光场为长宽比很大的矩形的光学系统。对此,采用了由长方形大功率面阵 LED、矩形集光器和线性菲涅耳透镜组成的方案。

长方形 LED 的发光面为矩形。矩形集光器为改进的抛物面反射镜,由 4 个抛物面组成,相对的两面的抛物面的焦点和焦距相同,入射口与出射口的形状均为与 LED 光源发光面相似的矩形。线性菲涅耳透镜相当于柱面镜只保留了光学表面弯曲的程度,去掉了尽可能多的光学材料,形成了条纹为直线的菲涅耳透镜。线性菲涅耳透镜和柱面透镜的作用相同,只改变垂直于其母线方向的入射光线的夹角,而不改变另一方向入射光线的夹角。从 LED 光源发出的光束的发散角很大,故而首先需要使光束经过矩形集光器的抛物面进行反射,目的是使光束的发散角减小;然后光束再通过线性菲涅耳透镜进行折射,由于线性菲涅耳透镜的特性,光束在水平方向的发散角减小,接近于平行光,而在垂直方向的发散角不变,从而可以形成矩形光束。

图 4(a)、(b)分别为基于矩形集光器的光学系统在水平方向和垂直方向上的光路图。对比两图可以看出,由 LED 光源发出的光束经过矩形集光器和线性菲涅耳透镜后,光束在水平方向上接近于平行光,而在垂直方向的发散角仍旧很大,可在  $2000 \text{ m}$  远处形成矩形光斑。

以下将所设计的光学系统进行仿真。其中:LED 光源的发光面积为  $25 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ;矩形集光器在两个方向上的表面抛物线焦距分别为  $5 \text{ mm}$  和  $8 \text{ mm}$ ,深度为  $200 \text{ mm}$ ;线性菲涅耳透镜的尺寸为  $150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,焦距为  $300 \text{ mm}$ ;光学接收面设

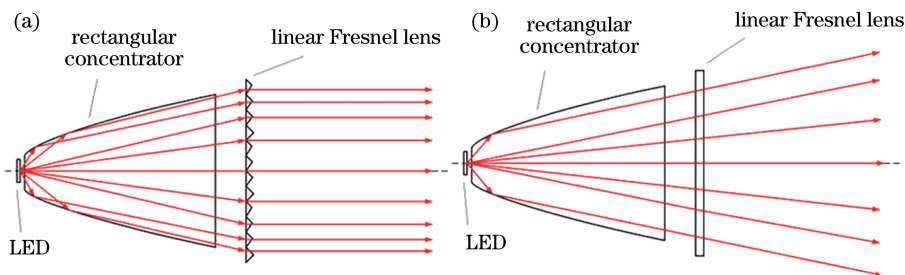


图 4 光学系统光路。(a)水平方向;(b)垂直方向

Fig. 4 Light paths of optical system. (a) Horizontal direction; (b) vertical direction

置在距离 LED 光源 2000 m 远处,并垂直于光轴放置。得到的仿真结果如图 5 所示。

图 5(a)为在 2000 m 远处接收面的照度图,从图中可以清晰地看出接收面的光线主要由中间一个细长的亮斑和两侧的杂散光组成。而从图 5(b)所示的照度曲线中可以知道,接收面上中心的长方形亮斑的照度为周围杂散光的 6 倍以上,在实际应用

时,周围的杂散光会进入相邻光学系统中心的矩形亮斑中,由于两者的亮度差距很大而被掩盖,杂散光的存在不会影响所设计的导航系统的使用。根据图 5(b)所示照度曲线可以求出光学系统照射出中心矩形亮斑在水平方向的发散角约为  $5.72^\circ$ ,在垂直方向的发散角为  $38.66^\circ$ ,符合所设计的水面导航系统的需求。

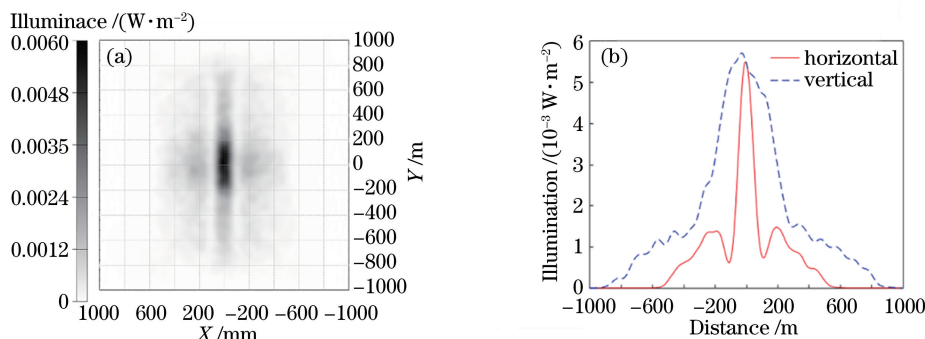


图 5 仿真得到的 2000m 远处的光斑。(a)光斑形状;(b)在水平和垂直方向上的中心照度曲线

Fig. 5 Simulated spot at 2000 m away. (a) Spot shape; (b) illumination curves in horizontal and vertical directions

## 4 电路控制系统设计

在所设计的导航方案中,为了提高导航的效率和精度,设计了 LED 光源在导航期间以不同的频率闪烁,以增加不同颜色光的辨识度,因此在导航系统中加入了电路控制系统。LED 水面导航系统的控制电路主要实现两个功能:一是驱动光学系统中的 LED 光源发光,并可以根据需要改变光源的亮度;二是控制 LED 光源在工作时以特定的频率进行闪烁,并且可以通过计算机串口随时进行调节。

目前,基本上都是通过恒流来驱动 LED 发光,且 LED 光通量的大小与其驱动电流具有密切关系。所以,当改变 LED 驱动电流的大小时,其亮度也会随之改变。目前市场上 LED 驱动电源的工艺和产品都已经十分成熟,因此直接购买符合导航系统要求的 LED 驱动电源即可。本实验选择明纬公司的

HLG-120H-36B。这款电源为明纬 HLG 型 LED 驱动电源,采用的是恒流驱动 LED,B 型产品拥有一根信号线,可以通过对信号线输入直流电压来实现调节电源输出电流的功能。本实验以此为基础改变 LED 的亮度及闪烁。

### 4.1 LED 闪烁控制电路的设计

选用的 LED 驱动电源提供了信号线,向信号线输入不同的直流电压值可以改变输出百分比的额定电流,在信号线中输入 1~10 V 的直流电压,分别对应着 10%~100%的额定电流。所以,当在信号线内输入周期性可调节的直流电压信号时,便可以得到周期性的 LED 驱动电流,从而实现 LED 的闪烁。本控制电路主要是为了得到可调节的周期性直流电压信号。

LED 闪烁控制电路的设计方案如图 6 所示。计算机与单片机(SCM)之间通信,计算机通过向单片机发送命令来改变 LED 的闪烁频率,单片机向计

计算机发送反馈信息,显示当前 LED 光源的闪烁频率。单片机向数模转换芯片(DAC)发送数字信号,控制 DAC 输出的电压值。一般 DAC 提供的参考电压值为 5 V,而信号线需要输入 10 V 的直流电压,电源才会输出 100% 的驱动电流,所以需要

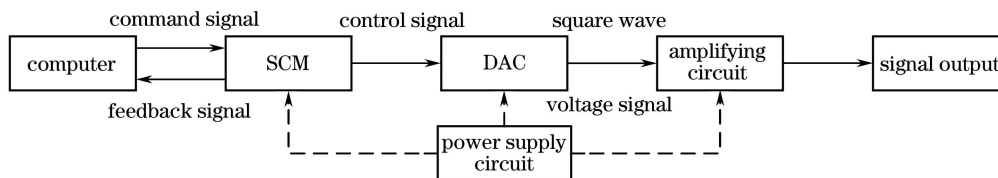


图 6 闪烁控制电路的设计方案

Fig. 6 Design scheme of scintillation control circuit

## 4.2 闪烁程序设计

程序设计的主要目的是通过单片机对 DAC 进行读写操作,输出所需要的特定频率的周期信号,以控制 LED 光源的闪烁。所选用的控制闪烁的周期信号是不同频率的方波信号。程序利用单片机内部的 T0 定时器形成中断,在中断期间依次对各个 DAC 进行操作,改变其输出电压,从而分别形成频率不同的方波。定时器设置的时长为 10 ms,当进入中断时,便会将定时器初始化,进入下一次中断。在中断期间读取 DAC 输出值的改变间隔参数,随后根据参数判断其输出电压是高电平还是低电平,根据判断结果产生一定频率的直流电压方波信号,输入驱动电源后得到一定频率的方波 LED 驱动电流,从而实现 LED 光源的闪烁。

定时器的定时时长为 10 ms,假设 DAC 的输出改变间隔参数为  $X$ ,则在前  $X$  个定时中断时其输出为高电平,在后  $X$  个定时中断时输出电压为低电平。电路输出方波的周期  $T$  和频率  $f$  分别为

$$T = 2X \times 10 = 20X, \quad (12)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1000}{20X} = \frac{50}{X}. \quad (13)$$

## 5 水面导航系统的实验与分析

### 5.1 光学系统样机

根据所设计的光学系统的结构和各部分元件的参数,制作出 3 款相同的样机用来进行验证实验,以确定所设计的光学系统能否实现水面导航的功能。系统样机选择的光源为红光(640~750 nm)、绿光(480~550 nm)和蓝光(450~480 nm)3 种颜色的功率为 100 W 的 LED 光源,其发光面尺寸为 25 mm×15 mm,LED 芯片的排列为 10 串联 10 并联。红色 LED 光源的电压为 20~24 V,电流为

DAC 的输出电压通过放大电路进行放大,从而达到驱动电源调光方案的要求。最后,将输出的电压信号接入驱动电源的调光信号线,就可以实现控制 LED 闪烁的功能。此外,供电电路还可以起到为电路中的芯片及散热风扇供电的作用。

3000~3500 mA;蓝色和绿色 LED 光源的电压为 30~34 V,电流为 3000~3500 mA。3 种波长的 LED 光源的外形尺寸均为 50 mm×32 mm。因矩形集光器结构的特殊性,无法通过传统的机械加工完成,且对其硬度要求不是很高,故而选择增材制造技术来制作。然后再将激光器内表面覆盖一层反光材料,以符合光学系统的要求。选取的线性菲涅耳透镜的尺寸为 300 mm×200 mm,厚度为 3 mm,焦距为 300 mm。制作出来的样机如图 7 所示。为减小杂散光的影响,用黑色硬纸板遮住光学系统样机的框架,并在其内表面附上摄影所用的吸光布来减小侧面杂散光的影响;同时,在出光口处加上光阑以进一步减小杂散光对实验效果的影响。

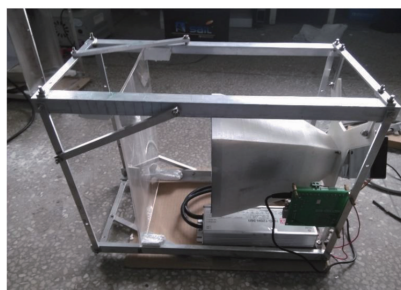


图 7 光学系统样机

Fig. 7 Optical system prototype

### 5.2 LED 导航系统水面实验

利用制作的光学系统样机进行水面实验,目的是验证所设计的导航系统在水面上能否对船舶起到导航的作用。本次实验在武汉木兰湖上进行,该湖水域开阔,适合导航系统远距离照射。实验选择在夜间开展,湖面上的灯光很少,几乎没有其他光源的干扰,可以确保 LED 光学系统照射的效果更容易被观察到。

本次实验的距离最远为 2000 m,在此距离下导

航系统发出的光束不会在水面上形成光斑,灯光的颜色只能由人眼直接观察得到。本次实验人员分为观察组和操作组,操作组人员负责控制 LED 导航系统的开关以及各颜色的亮度和闪烁频率;观察组配备全球定位系统(GPS)定位设备和摄像设备乘船在湖面上行驶,行驶到照射区域后用摄像设备记录当前的灯光颜色,GPS 定位设备记录行驶轨迹,通过对比轨迹和所拍摄的视频可以得知在轨迹各处所对应的灯光颜色,确定所设计的 LED 导航系统能否对目标水域进行分区并对船舶导航。

本次实验将船行驶至距导航系统样机 2000 m 远处的湖面上,在 LED 导航系统的照射区域内垂

直于照射方向行驶,并利用摄像设备记录行驶过程中的灯光颜色。图 8 显示了 LED 水面导航系统样机在实验时的工作图。从图 8 中可以看出,红色光学系统在中间,左边为绿色,右边为蓝色。在湖面上观察灯光的观察组人员可以清晰地分辨红色、绿色和蓝色 3 种颜色的灯光,且每种颜色的灯光闪烁可以明显地辨别出来。当船垂直于照射方向在湖面上行驶时,可以观察到不同位置处 3 种颜色灯光的强弱变化,每种颜色均有一个占主导的区域,虽然相邻的两种颜色有重叠区域,但依然能将照射区域通过颜色加以分区,可以起到导航的作用。

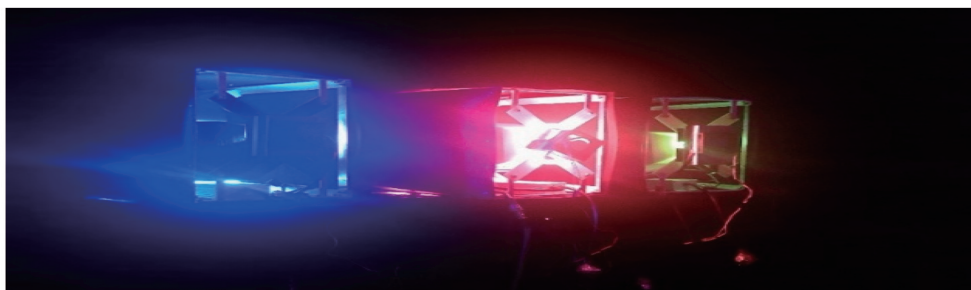


图 8 水面验证实验样机

Fig. 8 Prototypes of optical system during the water surface verification experiment

将摄像机记录的视频中的颜色与 GPS 定位设备记录的轨迹上的点一一对应,就可以得到如图 9 所示的 LED 光学系统照射区域分布图。图 9 中最下方的黑线为船行驶的轨迹,每种颜色的照射区域由轨迹上第一次和最后一次观察到该颜色的光的点确定。图 9 中的放大图显示了船在 2000 m 远处运行时轨迹上各点对应的主要灯光颜色的分布。

图 9 中红色、绿色和蓝色所覆盖的区域即代表每个颜色的光学系统所照射的区域。从图中可以清楚地看到每种颜色的照射区域范围,不同颜色的照射区域互有重叠。将轨迹上的各个颜色照射区域的起点、终点,与 LED 光学系统所在位置组成三角形,通过该三角形就可以计算出每种颜色的灯光照射在轨迹上的发散角。表 2 给出了不同颜色的灯光在 2000 m 远处的发散角,表中的 length 为各颜色照射区域的起点、终点,与 LED 光学系统所在位置组

成三角形的边长。

由表 2 可见:红光与蓝光的发散角接近于同一值,均约为  $6.5^\circ$ ;而绿光的发散角为  $3^\circ 39' 10.2''$ 。这是因为轨迹中绿色照射区域的起点不是绿光光束的边缘,在轨迹的左侧,船没有行驶到部分绿光照射的区域。红光和蓝光的发散角可以说明所设计的基于矩形集光器的光学系统样机发射的光束的发散角为  $6.5^\circ$ ,在 2000 m 处照射区域的宽度为 200~300 m,与导航原理中设计的参数基本一致,可以满足辅助船舶入港的 LED 导航系统对光源的要求。

从图 9(b)中可以看出,红色灯光在轨迹上覆盖的区域最大,这主要是因为红光的波长较长,在空气中的衍射能力更强,相比于蓝光和绿光更容易在大气中传播。所以选择红色照射区域为船舶驶向目的地的最佳区域,可以更好地导引船舶。

表 2 不同颜色的灯光在 2000 m 远处的发散角

Table 2 Divergence angle of different colors at distance of 2000 m away

	Red (length 1=2010 m, length 2=2109 m, length 3=254 m)	Green (length 1=1966 m, length 2=2031 m, length 3=143 m)	Blue (length 1=2034 m, length 2=2167 m, length 3=273 m)
Color			
Angle	$6^\circ 30' 46.4''$	$3^\circ 39' 10.2''$	$6^\circ 30' 35.9''$

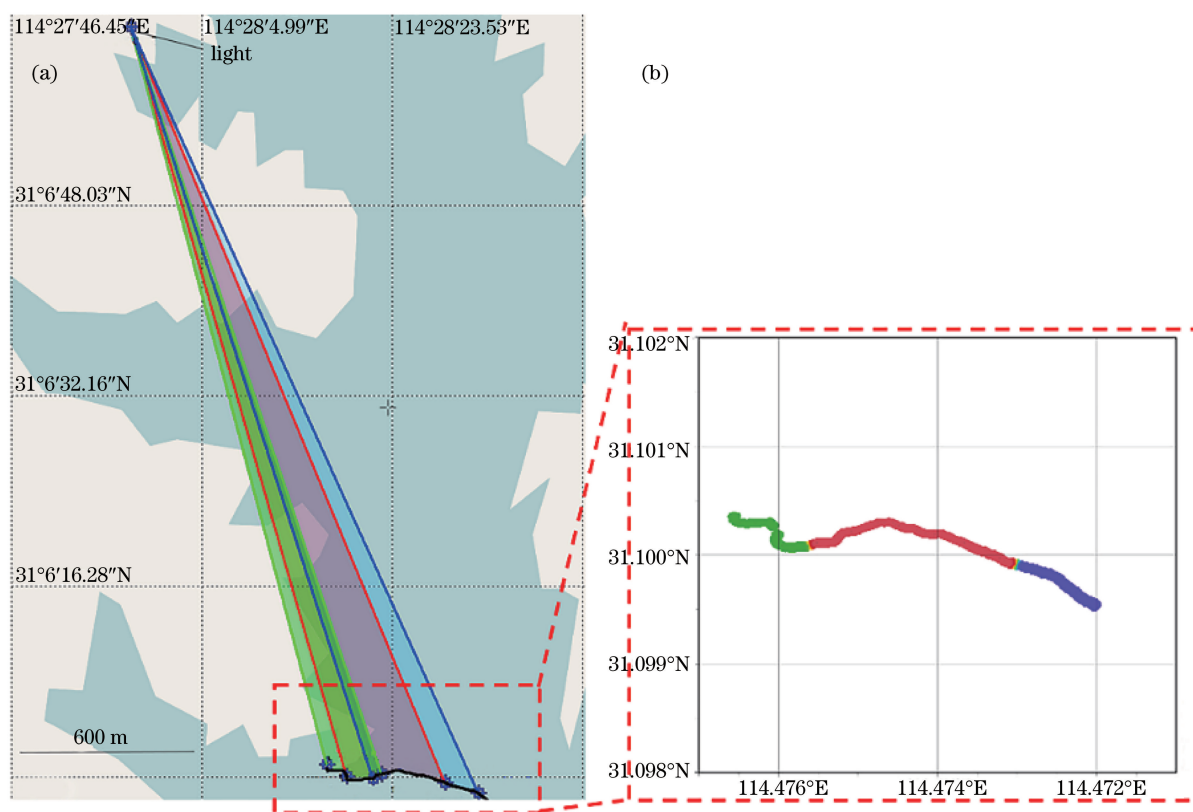


图 9 在 2000 m 处各颜色照射区域分布图

Fig. 9 Color distribution of irradiated area at distance of 2000 m away

在本次实验中,由于湖面波浪和人为驾驶的原因,船行驶的轨迹与光学系统的光轴不垂直,轨迹存在着明显的晃动,但不平整的轨迹对每种颜色光束发散角的测量不会产生影响。由于导航系统作用于水面,灯光照射在水面上时会发生反射和折射,水面形成的波浪会使得灯光的像在纵向和横向上都被拉长<sup>[13]</sup>。相邻两种颜色的灯光的倒影在有波纹的水面上会因为变宽而有重叠,重叠部分的颜色由两种灯光颜色混合而成,这会对船员观察系统灯光时产生影响。

在光学导航系统工作时,系统的光源会一直以不同的频率闪烁,在不同颜色灯光的重叠区域不会因灯光闪烁而出现颜色重叠的情况,水中倒影的重叠部分也会因闪烁的存在而减小对船员判断的影响。在船员进行观察时,光源倒影的亮度小于光源的亮度,所以船员更容易观察到实际的光源,这在一定程度上减小了水面倒影对系统的影响。水面灯光倒影对导航系统的具体影响将会在接下来的工作中进行研究。

## 6 结 论

提出了一种辅助船舶入港的 LED 导航系统。

在目的地利用不同频率闪烁的灯光照射在水域上,并将目标区域通过颜色划分为 3 种区域,驶入照射区域的船舶可以根据观察到的颜色来确定船舶与目的地的相对位置,从而使船舶更加高效、准确地驶向目的地。

所设计的 LED 导航系统由光学系统和控制电路系统组成。LED 光学系统由线性菲涅耳透镜和矩形集光器组成。在 2000 m 远的距离内,光学系统发出的光束的发散角在水平方向上为  $6^\circ$ ,在垂直方向上为  $38.66^\circ$ ,两个方向上的发散角相差很大,光束照射的光斑是矩形光斑,且长宽比很大,保证了导航更加精确。此外,还设计了控制电路用以控制 LED 光源闪烁,提高导航系统的效率。电路控制系统由单片机发送周期可调的数字方波信号给 DAC, DAC 输出的模拟信号经放大器放大后输入驱动电源中,从而改变 LED 光源的驱动电流,得到周期可调的闪烁调制。

最后将设计的导航系统制作成样机,在开阔的湖面上进行验证实验。通过摄像机和 GPS 设备记录的实验现象,分析得到所设计 LED 水面导航系统可以将照射区域通过颜色进行分区,且各区域边界清晰,在照射区域内,船员可以根据颜色确定船的位置与方



向,导航系统可以对船舶起到很好的导航作用。在实验中,各个颜色的照射区域出现了较大的重叠部分,这会对导航系统的实际应用产生一定影响,后续将对光学系统之间的配合开展进一步的研究。

与目前应用最广泛的雷达导航系统相比,所设计的导航方法更加简单和轻便,更容易装配和实现。雷达系统是一种避障式的被动系统,在躲避障碍物时有更好的作用。而本课题组设计的导航系统是一种主动式的导航系统,对于导引船舶入港和穿过狭窄空间具有更好的作用和效果。与新兴的移动设备导航系统相比,所设计的系统不需要在沿途设置信号基站,只需要在目的地放置导航系统,便可对区域内的船舶进行导航,其成本较低,在偏远地区也容易实现。

在实验过程中采用的摄像机可以清晰地记录导航系统的灯光效果,因此在接下来的工作中将考虑通过机器视觉的方法实现船舶的自动导航:通过在船舶上装配摄像头来识别灯光颜色,而后通过识别的颜色自动根据规则调整航向,实现自动导航。

### 参 考 文 献

- [1] Hyla T, Kazimierski W, Wawrzyniak N. Analysis of radar integration possibilities in inland mobile navigation[C]. 16th International Radar Symposium, 2015: 864-869.
- [2] Chin H C, Debnath A K. Modeling perceived collision risk in port water navigation[J]. Safety Science, 2009, 47(10): 1410-1416.
- [3] Zaniewicz G, Kazimierski W, Bodus-Olkowska I. Integration of spatial data from external sensors in the mobile navigation system for inland shipping[C]. Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics), 2016: 16251115.
- [4] Wang F. Internet of things technology and intelligent perception technology in inland navigation management and emergency response service system[C]. International Conference on Information Technology and Applications, 2013: 14031500.
- [5] Ruiz A R J, Granga F S. A short-range ship navigation system based on ladar imaging and target for improved safety and efficiency[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 10(1): 186-197.
- [6] Seung N P, Chul W P, Yong W K, *et al.* Optical design and illumination simulation of Fresnel lenses for marine signal lanterns[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5638: 892-901.
- [7] Ding X H. Application and prospects of LED in navigation mark[J]. Port & Waterway Engineering, 2000(12): 89-91, 95.  
丁晓华. LED在航标上的应用与展望[J]. 水运工程, 2000(12): 89-91, 95.
- [8] Li Z J. Talking about the characteristics and precautions of LED application on navigation light[J]. Guangdong Science & Technology, 2008(12): 180-181.  
李真健. 浅谈LED在航标灯上应用的特性和注意事项[J]. 广东科技, 2008(12): 180-181.
- [9] 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.
- [10] 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COBLED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.
- [11] Sui F, Li X N, Niu L. Long-range LED pilot lamp design[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(7): 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(7): 13-19.
- [12] Jin W Q, Hu W J. Radiation luminosity and chromaticity and their measurement[M]. 1 ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006: 25-29.  
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 1版. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 25-29.
- [13] Zhao H T, Shi S T. Lighting water-surface effect and its mechanism[J]. Light & Lighting, 2013, 37(2): 1-5.  
赵海天, 施世涛. 灯光在水面的光色效应及其机理[J]. 灯与照明, 2013, 37(2): 1-5.