

基于菲涅耳现象的 LED 集鱼灯最佳入射角研究

孔祥洪^{1,2}, 陈新军^{1,3}, 王伟杰¹, 杜凯⁴,
卢克祥¹, 钱卫国^{1,3*}, 杨渭²

(1. 上海海洋大学国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学信息学院大学物理实验中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学远洋渔业协同创新中心, 上海 201306;

4. 上海海洋大学工程学院, 上海 201306)

摘要:为了解决平板式 LED 集鱼灯安装不合理的现状,使得 LED 集鱼灯光能得到有效利用,提高诱、集鱼效果,实验分析了海面的菲涅耳现象,利用光学的临界条件原理推导出了菲涅耳公式,并利用透射率和折射率的定义式,得到光通过两个不同介质分界面时透射率和折射率的各分量与入射角的关系式,进而利用 MATLAB 仿真了光在通过海面时透射率和反射率随入射角改变而变化的函数图像。结果显示,透射光强最大时的入射角为 53.6° ,可以此入射角指导 LED 集鱼灯在渔船上的安装。对于平板式 LED 集鱼灯,安装角度可取 36.4° ;对于三列式 LED 集鱼灯,安装角度可取 23.6° ,相邻两列 LED 集鱼灯的夹角为 160° 。

关键词: LED 集鱼灯; 入射角; 菲涅耳现象; MATLAB

中图分类号: S 972.63

文献标志码: A

新型集鱼灯研发和灯光在海水中的传输分布是光诱渔业的重要研究内容^[1]。LED 作为一种新型节能的光源正被逐步引入到光诱渔业中来^[2-4]。钱卫国^[5-6]、崔雪亮等^[7]近年来也尝试使用 LED 集鱼灯,但从目前 LED 水上集鱼灯^[5-7]的设计来看,多数是平板式,有些是三列式(即由三块平板 LED 灯组成),其目的是让光尽量照向海面,使之有别于传统的全方位发光的金属卤化物集鱼灯,从而得到光能的有效利用。但由此也带来了一个问题,目前所安装的 LED 集鱼灯多数是考虑安装便利,即在有效利用渔船现有甲板设施的基础上,对 LED 集鱼灯简单固定,并使发光面与海面呈 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的角度随机安装,缺乏一定的科学性。目前,国内外也没有相对应的具体解决方案,为此,本实验解析了光在海面的菲涅耳现象,尝试从物理学的角度,探究光在进入海

面时入射角与透射率、折射率的关系,并利用 MATLAB 进行数值仿真,为 LED 集鱼灯的合适安装提供参考。

1 模型的建立与仿真

1.1 菲涅耳现象解析及公式推导

平面光波通过不同介质的分界面时会发生反射和折射,廖玲^[8]认为,这一关系可通过菲涅耳公式表达。根据 Max 等^[9]、石顺祥等^[10]、陈军^[11]对光的电磁波理论的描述,一个平面波,沿着单位矢量 $s^{(i)}$ 规定的方向传播,速度为 v ,从一介质传到二介质中, $s^{(r)}$ 和 $s^{(t)}$ 代表反射波和折射波传播方向上的单位矢量。 $s^{(i)}$ 和界面法线所决定的平面叫做入射面,由入射定理和反射定理(边界条件)知, $s^{(r)}$ 和 $s^{(t)}$ 二者都在入射面上。用 θ_i 、 θ_r 和 θ_t 代表 $s^{(i)}$ 、 $s^{(r)}$ 和 $s^{(t)}$ 与 Oz 所形成的

收稿日期:2014-06-20 修回日期:2014-11-24

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(SS2012AA091803);上海市科委项目(2013ZY-87);国家远洋渔业工程技术研究中心开放课题(NERCOF2014KF03)

通信作者:钱卫国,E-mail:wqian@shou.edu.cn

角度(图1)。

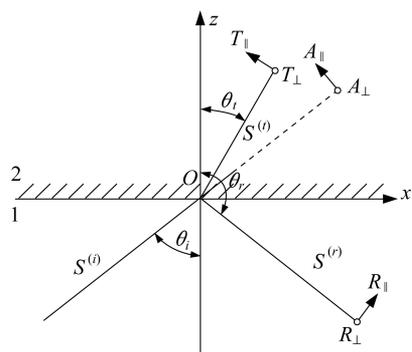


图1 平面波的折射和反射

Fig.1 Refraction and reflection of plane wave

设在空间某一点 \mathbf{r} , 则其波动是时间 t 的函数:

$$V(\mathbf{r}, t) = F(t) = a \cos(\omega t + \delta) = a \cos\left[\omega\left(t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}}{v}\right) + \delta\right] \quad (1)$$

公式中 a (>0) 是振幅, ω 叫做角频率, 是 2π 秒内的震动次数, δ 是初始相位角。

设 A 为入射场电矢量的振幅, 取 A 为复数, 令其位相等于波函数矢量的常数部分, 变数部分:

$$\tau_i = \omega\left(t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(i)}}{v_1}\right) = \omega\left(t - \frac{x \sin \theta_i + z \cos \theta_i}{v_1}\right) \quad (2)$$

把每个场矢量分解成平行于入射面(用下角标 \parallel 表示)和垂直于入射面(用下角标 \perp 表示)的两个分量。各平行分量正方向的选取如图1所示。垂直分量与图平面成直角, 于是入射场电矢量 \mathbf{E} 直角坐标系中的各分量:

$$\begin{aligned} E_x^{(i)} &= -A_{\parallel} \cos \theta_i e^{-i\tau_i} \\ E_y^{(i)} &= A_{\perp} e^{-i\tau_i} \\ E_z^{(i)} &= A_{\parallel} \sin \theta_i e^{-i\tau_i} \end{aligned} \quad (3)$$

磁矢量 \mathbf{H} 的各分量被代入到(4)式中(即, 令 $\mu = 1$),

$$\mathbf{H} = \sqrt{\epsilon} \times \mathbf{E} \quad (4)$$

即可得到三维磁矢量:

$$\begin{aligned} H_x^{(i)} &= -A_{\perp} \cos \theta_i e^{-i\tau_i} \\ H_y^{(i)} &= -A_{\parallel} \sqrt{\epsilon_1} e^{-i\tau_i} \\ H_z^{(i)} &= A_{\perp} \sin \theta_i \sqrt{\epsilon_1} e^{-i\tau_i} \end{aligned} \quad (5)$$

同样, 设 T 和 R 是透射波和反射波的复振

幅, 则相应的电矢量分量和磁矢量分量为

$$\left. \begin{aligned} \text{透射场:} \\ E_x^{(t)} &= -T_{\parallel} \cos \theta_t e^{-i\tau_t}, E_y^{(t)} = T_{\perp} e^{-i\tau_t}, \\ E_z^{(t)} &= T_{\parallel} \sin \theta_t e^{-i\tau_t}, \\ H_x^{(t)} &= -T_{\perp} \cos \theta_t \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_t}, H_y^{(t)} = -T_{\parallel} \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_t}, \\ H_z^{(t)} &= T_{\perp} \sin \theta_t \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_t}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,

$$\tau_t = \omega\left(t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(t)}}{v_2}\right) = \omega\left(t - \frac{x \sin \theta_t + z \cos \theta_t}{v_2}\right) \quad (7)$$

反射场:

$$\left. \begin{aligned} E_x^{(r)} &= -R_{\parallel} \cos \theta_r e^{-i\tau_r}, E_y^{(r)} = R_{\perp} e^{-i\tau_r}, \\ E_z^{(r)} &= R_{\parallel} \sin \theta_r e^{-i\tau_r}, \\ H_x^{(r)} &= -R_{\perp} \cos \theta_r \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_r}, H_y^{(r)} = -R_{\parallel} \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_r}, \\ H_z^{(r)} &= R_{\perp} \sin \theta_r \sqrt{\epsilon_2} e^{-i\tau_r}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,

$$\tau_r = \omega\left(t - \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}^{(r)}}{v_1}\right) = \omega\left(t - \frac{x \sin \theta_r + z \cos \theta_r}{v_1}\right) \quad (9)$$

界面两边 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 的切线分量应该是连续的。因此必须有

$$\left. \begin{aligned} E_x^{(i)} + E_x^{(r)} &= E_x^{(t)}, E_y^{(i)} + E_y^{(r)} = E_y^{(t)} \\ H_x^{(i)} + H_x^{(r)} &= H_x^{(t)}, H_y^{(i)} + H_y^{(r)} = H_y^{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

磁感应强度 \mathbf{B} 和电位移 \mathbf{D} 的法线分量这时自动满足边界条件。把所有分量(3)、(5)、(6)、(8)代入式(10)并利用 $\cos \theta_r = \cos(\pi - \theta_i) = -\cos \theta_i$ 这一结果, 得到关系式:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_i (A_{\parallel} - R_{\parallel}) &= \cos \theta_t T_{\parallel} \\ A_{\perp} + R_{\perp} &= T_{\perp} \\ \sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_i (A_{\perp} - R_{\perp}) &= \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_t T_{\perp} \\ \sqrt{\epsilon_1} (A_{\parallel} + R_{\parallel}) &= \sqrt{\epsilon_2} T_{\parallel} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)的4个方程自然分成两组, 一组只包含平行于入射面的分量, 而另一组只包含垂直于入射面的分量。因此, 这两种波是彼此独立无关的。

本实验设入射波各分量为已知, 从式(11)解出反射波和透射波各分量, 并再次应用麦克斯韦关系 $n = \sqrt{\epsilon}$, 结果得到式(12)所示的菲涅耳公式:

$$\left. \begin{aligned} T_{\parallel} &= \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} A_{\parallel} \\ T_{\perp} &= \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} A_{\perp} \\ R_{\parallel} &= \frac{n_2 \cos\theta_i - n_1 \cos\theta_t}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \cos\theta_t} A_{\parallel} \\ R_{\perp} &= \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} A_{\perp} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

1.2 反射率和透射率

当平面光波在传输过程中遇到两种折射率不同介质的界面时,一般说来一部分反射,一部分折射。为了说明反射和折射各占多少比例,引入了反射率和折射率的概念^[12]。把平面光波的入射波、反射波和折射波的电矢量分成两个分量:一个平行于入射面,另一个垂直于入射面。有关各量的平行分量与垂直分量依次用指标 p 和 s 来表示, s 分量、 p 分量和传播方向三者构成右螺旋关系。除了振幅的 p 分量(平行于入射面的分量)和 s 分量(垂直于入射面的分量)的振幅反(透)射率外,还有能流反(透)射率,它们之间有一定的相互关系,定义见表 1,其中 W 为能流。

表 1 各种反射率和透射率的定义

Tab.1 The definition of various reflectivity and transmissivity

类别 classification	平行分量 p component p	垂直分量 s component s
振幅反射率 amplitude reflectivity	$r_{\parallel} = \frac{R_{\parallel}}{A_{i\parallel}}$	$r_{\perp} = \frac{R_{\perp}}{A_{i\perp}}$
能流反射率 energy reflectivity	$R_{\parallel} = \frac{W_{r\parallel}}{W_{i\parallel}} = \frac{I_{r\parallel}}{I_{i\parallel}}$	$R_{\perp} = \frac{W_{r\perp}}{W_{i\perp}} = \frac{I_{r\perp}}{I_{i\perp}}$
振幅透射率 amplitude transmissivity	$t_{\parallel} = \frac{T_{\parallel}}{A_{i\parallel}}$	$t_{\perp} = \frac{T_{\perp}}{A_{i\perp}}$
能流透射率 energy transmissivity	$T_{\parallel} = \frac{W_{t\parallel}}{W_{i\parallel}} = \frac{I_{t\parallel} \cos\theta_t}{I_{i\parallel} \cos\theta_i}$	$T_{\perp} = \frac{W_{t\perp}}{W_{i\perp}} = \frac{I_{t\perp} \cos\theta_t}{I_{i\perp} \cos\theta_i}$

振幅反射率 r :

$$r_{\parallel} = \frac{R_{\parallel}}{A_{\parallel}} = \frac{n_2 \cos\theta_i - n_1 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}} \quad (13)$$

$$r_{\perp} = \frac{R_{\perp}}{A_{\perp}} = \frac{n_1 \cos\theta_i - n_2 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}}$$

振幅透射率 t :

$$\left. \begin{aligned} t_{\parallel} &= \frac{T_{\parallel}}{A_{\parallel}} = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_2 \cos\theta_i + n_1 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}} \\ t_{\perp} &= \frac{T_{\perp}}{A_{\perp}} = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\theta_i}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

光波的强度 I 本来的意思是平均能流密度,人们经常把它理解成振幅 A 的二次方,在讨论同介质中光的相对强度时,这是可以的,但在讨论不同介质中光的强度时,需要采用它的原始定义:

$$I = \frac{n}{2c\mu_0} |A|^2 \propto n |A|^2 \quad (15)$$

能流 $W = I/M$ (M 为光束的横截面积),由反射定律和折射定律可知,反射光束与入射光束的横截面积相等,而折射光束与入射光束的横截面积之比为 $\cos\theta_t/\cos\theta_i$,因此可得能流反射率 R :

$$R_{\parallel} = (r_{\parallel})^2, R_{\perp} = (r_{\perp})^2 \quad (16)$$

能流透射率:

$$\left. \begin{aligned} T_{\parallel} &= \frac{n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_i\right)^2}}{n_1 \cos\theta_i} (t_{\parallel})^2, \\ T_{\perp} &= \frac{n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_i\right)^2}}{n_1 \cos\theta_i} (t_{\perp})^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

1.3 MATLAB 数值仿真

设平面光波从空气(折射率为 $n_1 = 1$)入射到海水中(折射率为 $n_2 = 1.34$)。参照欧攀^[12]、周群益等^[13]的光学可视化理论,利用 MATLAB 进行方程求解和代码编辑^[14-15],并调用式(13),计算不同角度下的振幅反射率 r_{\parallel} 、 r_{\perp} ,再调用式(14)得到振幅透射率 t_{\parallel} 、 t_{\perp} ,并计算出它们的绝对值,然后运行(图 2 和图 3)。

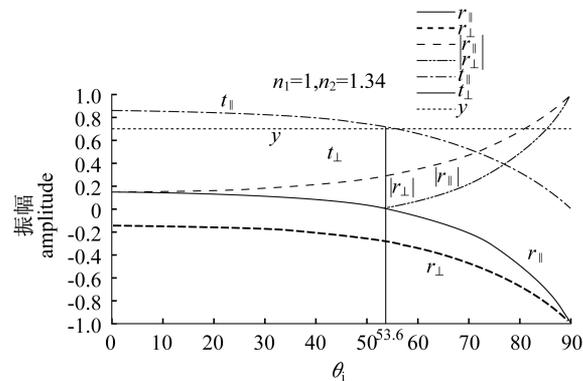


图 2 振幅反射率、振幅透射率随入射角的变化
Fig.2 Amplitude reflectance and transmissivity along with the change of angle of incidence

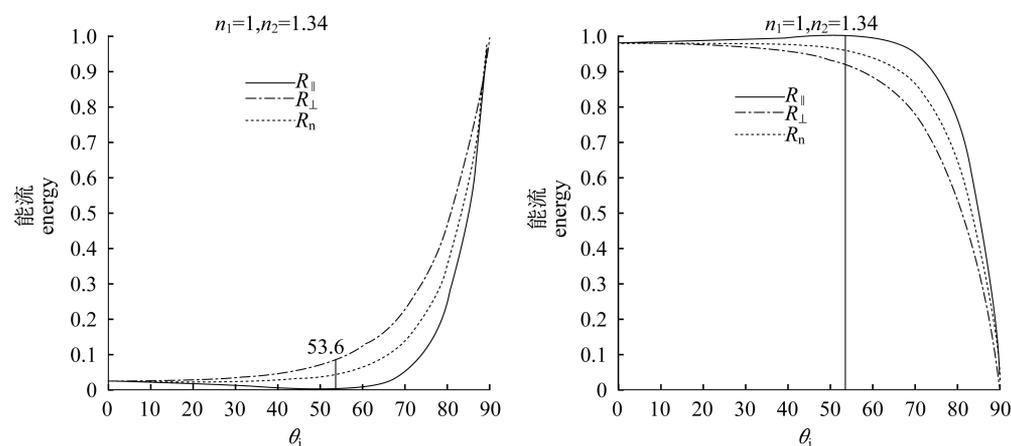


图3 能流反射率、能流透射率随入射角变化图

Fig. 3 Energy reflectivity and transmissivity along with the change of angle of incidence

平面光波从空气入射到海水中用 MATLAB 作出 p 、 s 分量的振幅反射率和振幅透射率以及它们的绝对值随入射角的变化曲线(图 2)。可以看出:当入射角 $\theta_i = 0^\circ$, 即垂直入射时 r_{\parallel} 、 r_{\perp} 、 t_{\parallel} 、 t_{\perp} 都不为 0, 表示存在反射波和折射波。当 $\theta_i = 90^\circ$, 即 $r_{\parallel} = r_{\perp} = -1$, $t_{\parallel} = t_{\perp} = 0$, 即没有折射光波。从图中可以看出当入射角在 53.6° 时, 光的透射率较大。

平面光波从空气入射到海水中用 MATLAB 作出 p 、 s 分量的能流反射率和能流透射率以及它们的平均值随入射角度变化曲线(图 3)。可以看出:当入射角 $\theta_i = 0^\circ$, 即垂直入射时能流反射率、折射率 R_{\parallel} 、 R_{\perp} 表示存在反射波和折射波。当 $\theta_i = 90^\circ$, 即没有折射光波。从图中可以看出当入射角在 53.6° 时, 光的透射率最大。

2 集鱼灯安装的理论分析

2.1 无风浪时

LED 集鱼灯的实际安装示意简图见图 4, 当在海面平静的理想条件下, 也就是说无风浪时渔船不发生侧偏, 则 LED 集鱼灯入射情况可转化为简易数学模型图(图 5)。

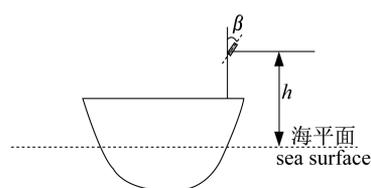


图4 LED 集鱼灯安装示意图

Fig. 4 Installation diagram of LED

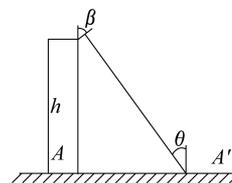


图5 LED 集鱼灯的入射情况简易数学模型图

Fig. 5 The simple mathematical model for incident fish aggregation lamp of LED fish aggregation lamp

在图 5 中, 由于 LED 集鱼灯的尺寸相对于其离海面高度 h 可以忽略, 因此, 可以得到:

$$\beta + \theta = 90^\circ \quad (18)$$

由式(18)得, 光线的入射角 θ 只与 LED 集鱼灯的安装角度 β 有关, 与集鱼灯离海面的高度 h 无关。因此, 要达到实验仿真得到的理想入射角 53.6° , 则 LED 集鱼灯的安装角度 β 始终为 36.4° 。在实际的海面无风浪捕捞作业中, 渔船由于加油、装载渔货等原因使其配载变化, 只造成了集鱼灯高度 h 的变化, 因此不会影响到光线的入射。

2.2 有风浪时

在实际捕捞过程中, 渔船会由于风浪的不同发生不同程度的倾斜, 因此按 36.4° 安装 LED 集鱼灯会造成灯光的能量不同程度损失而达不到最大的集鱼效果(即入射角达不到 53.6°), 因此, 要考虑渔船的横摇。

在实际生产作业中集鱼灯的安装角度不会发生变化, 设其初始的安装角度不变($\beta = 36.4^\circ$), 为了使集鱼灯能达到 53.6° 的入射角, 可以考虑用一种圆弧状的 LED 集鱼灯(相当于三列式 LED 灯按三等分圆弧分布)来补偿平面型的 LED

集鱼灯的缺陷。对于渔船因左右摇摆而倾斜时,可以转化为两种数学模型:左倾和右倾(图 6-a, b)。

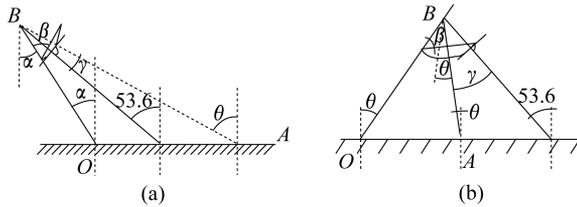


图 6 渔船倾斜时的 LED 集鱼灯入射数学模型

(a) 渔船左倾; (b) 渔船右倾

α 为渔船的倾斜角, A 点为圆弧状集鱼灯的中心点直射海面的入射点

Fig. 6 The simple mathematical model for incident of LED fish aggregation lamp when fishing boats tilt

(a) the fishing boat tilts to the left; (b) the fishing boat tilts to the right

当渔船左倾,此时入射角 $\theta > 53.6^\circ$,因此需要分布在圆弧中点以左的灯来使灯光直射海面时出现 53.6° 的入射角,此入射点必在 O、A 之间(图 6-a),圆弧状的 LED 集鱼灯的弦长长度远远小于 \overline{OB} ,可以忽略,因此得:

$$\beta + \theta - \alpha = 90^\circ \quad (19)$$

由图 6-a,为使灯光直射海面始终存在入射角为 53.6° 的点,至少圆弧中点左侧要分布角度为 γ 的 LED 灯,由式(19)可得: $\gamma_{左} = \alpha$ 。

当渔船右倾时,此时入射角 $\theta < 53.6^\circ$,因此需要分布在圆弧中点以右的灯来使灯光直射海面时出现 53.6° 的入射角,此入射点必在 A 点的外侧(图 6-b),可得:

$$\theta + \beta + \alpha = 90^\circ \quad (20)$$

由图 6-b,为使灯光直射海面始终存在入射角为 53.6° 的点,至少圆弧中点右侧要分布角度为 γ 的 LED 灯,由式(19)可得: $\gamma_{右} = \alpha$ 。

由上可得,此圆弧状的 LED 集鱼灯的内置角 $\delta_{min} = \gamma_{左max} + \gamma_{右max} = 2\alpha_{max}$ 。 α_{max} 为渔船的最大倾斜角,在实际中, $\alpha_{max} = 30^\circ$,因此,此 LED 集鱼灯的内置角 $\delta \geq 2\alpha_{max} = 60^\circ$ 。

综上,只需要做一个角度为 60° 的圆弧状的 LED 集鱼灯来取代原来的平面型集鱼灯,安装示意图如图 7-a 所示。 \widehat{OCD} 为此 LED 集鱼灯, ρ 为其安装角,由 $\beta = 36.4^\circ$, $\delta = 60^\circ$ 得: $\rho = 23.6^\circ$,即其安装角为 23.6° 。

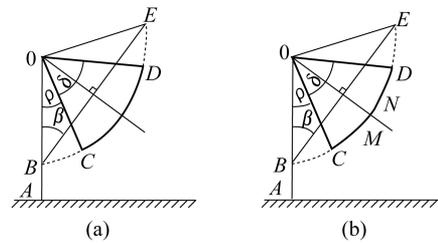


图 7 两种 LED 集鱼灯安装的数学模型简图

(a) 圆弧状 LED 集鱼灯; (b) 三列式 LED 集鱼灯

Fig. 7 The simple mathematical model for installation of two LED fish aggregation lamps

(a) the arc shape type of LED fish aggregation lamp; (b) the three columns type of LED fish aggregation lamp

圆弧状 LED 集鱼灯在实际生产可以用三列式 LED 集鱼灯取代,即将 \widehat{CD} 换成折线段 \overline{CMND} , \overline{CMND} 为三列式 LED 集鱼灯(图 7-b),则 $\angle CMN = \angle DNM$ 为此三列式 LED 集鱼灯的内置角。由图 7-b 可得: $\angle CMN = \angle DNM = 160^\circ$ 。

3 讨论

3.1 关于 LED 光能传输的计算方法

集鱼灯的能量传输和分布是该领域的研究要点,郑国富^[16]、崔浙珍^[17]、钱卫国等^[18]、官文江等^[19]分别应用不同的照度计算方法对渔场中的灯光分布进行了分析,但主要是针对金属卤化物灯等进行分析。赵志杰^[20]、王淑凡^[21]则从 LED 光源本身的结构性能出发,对 LED 光源的内部结构优化布置进行分析。但这些计算模式都不能解决 LED 集鱼灯在渔船上的合理布置这一问题。本研究在分析菲涅尔现象原理的基础上,推导出菲涅尔公式及光在各个方向上的透射率、反射率,并运用 MATLAB 软件仿真出光线在穿过海面时入射角与反射率、折射率的关系图,由此进行 LED 光诱集鱼的最佳入射角分析,从光的物理性能上进行了问题的解析和处理,理论上更为正确。

3.2 LED 集鱼灯在渔船上的合理布置

我国多数的光诱渔船仍主要使用金属卤化物集鱼灯,之前的集鱼灯合理配置研究也都是以金属卤灯为研究对象的,如沙锋等^[22]对鲈(*Scorpaenopsis japonicus*)灯光围网渔船的水上集鱼灯所进行的研究也是围绕金属卤灯进行的。而从目前 LED 集鱼灯的研究现状来看,主要集中在如何使用更高发光效率的 LED 光源,以及尽可能选择合适的光谱范围来满足实际的渔业诱集需要。在合理布置

LED 集鱼灯方面所做的工作并不多,使得 LED 集鱼灯的使用效果得不到更好的发挥。本研究建立了实际渔船捕捞时 LED 集鱼灯安装的数学模型简图进行分析,并探讨了平面型 LED 集鱼灯安装角度及其存在的问题,并以 53.6° 的入射角为出发点,对三列式 LED 集鱼灯的最佳入射角进行了计算,认为三列式 LED 集鱼灯安装角为 23.6° ,相邻两列集鱼灯的内置角至少为 160° 。

参考文献:

- [1] Qian W G. Study on the optimal allocation of fish aggregation lamps in squid jigging fisheries [D]. Shanghai: Shanghai Fisheries University, 2005: 1 - 146. [钱卫国. 鱿钓渔业中集鱼灯的优化配置研究. 上海:上海水产大学,2005:1 - 146.]
- [2] Okamoto T, Takahashi K, Ohsawa H, *et al.* Application of LEDs to fishing lights for Pacific saury [J]. Journal of Light and Visual Environment, 2008, 32(2): 88 - 92.
- [3] Choi J S, Choi S K, Kim S J, *et al.* Photoreaction analysis of squids for the development of a LED-fishing lamp [C]. Proceedings of the 2nd international conference on maritime and naval science and engineering. Brasov, Romania. 2009: 92 - 95.
- [4] 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, 2012(39): 89 - 96.
- [5] Qian W G, Chen X J, Qian X L, *et al.* The optical characteristics of LED fish aggregation lamp(300W) and its energy efficiency [J]. Marine Fisheries, 2011, 33(1): 99 - 105. [钱卫国, 陈新军, 钱雪龙, 等. 300W 型 LED 集鱼灯光学特性及其节能效果分析. 海洋渔业, 2011, 33(1): 99 - 105.]
- [6] Qian W G, Chen X J, Lei L, *et al.* The optical characteristics of 300 W green light LED lamps used for fish aggregation [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2012, 27(5): 471 - 472. [钱卫国, 陈新军, 雷林, 等. 300 W 型绿光 LED 集鱼灯的光学特性. 大连海洋大学学报, 2012, 27(5): 471 - 472.]
- [7] Cui X L, Zhang W X. Validation and promotion of the new LED sets fish lamp energy saving effect of a real ship [J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2013, 32(2): 170 - 172. [崔雪亮, 张伟星. 新型 LED 集鱼灯节能效果实船验证及推广. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 170 - 172.]
- [8] Liao L. The Fresnel Phenomenon and its application in Maya [J]. China Education Innovation Herald, 2012(17): 78 - 79. [廖玲. 菲涅尔现象及其在 Maya 中的应用. 中国科技创新导刊, 2012(17): 78 - 79.]
- [9] Max B, Emil W. Principles of optics [M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 32 - 35.
- [10] Shi S X, Liu J F, Sun Y L. Electromagnetic theory of light; The transmission and control of light [M]. Xi'an: Xi'an Electronic and Engineering University, 2006: 11 - 58. [石顺祥, 刘继芳, 孙艳玲. 光的电磁论: 光波的传播和控制. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 11 - 58.]
- [11] Chen J. Electromagnetic theory of optical [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 26 - 48. [陈军. 光学电磁理论. 北京: 清华大学出版社, 2000: 26 - 48.]
- [12] Ou P. Advanced optical simulation (MATLAB version)-optical waveguide, laser [M]. Beijing: Beijing University Aeronautics and Astronautics Press, 2011: 9 - 19. [欧攀. 高等光学仿真 (MATLAB 版) - 光波导, 激光. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 9 - 19.]
- [13] Zhou Q Y, Hou Z Y, Liu R S. MATLAB visualization of university of physics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 226 - 251. [周群益, 侯兆阳, 刘让苏. MATLAB 可视化大学物理学. 北京: 清华大学出版社, 2010: 226 - 251.]
- [14] Xue D Y, Chen Y Q. The MATLAB solution of advanced applied mathematical problem [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 1 - 120. [薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1 - 120.]
- [15] Zhang Z Y. MATLAB 6. 5 proficiency [M]. Beijing: Beijing University Aeronautics and Astronautics Press, 2003: 17 - 134. [张志涌. 精通 MATLAB 6. 5 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 17 - 134.]
- [16] Zheng G F. Light-field calculation of light-attraction lamp and discussion on its suitabilities to fishing gear and methods in light-pelagic trawl for squid [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(2): 215 - 220. [郑国富. 诱鱼灯光场计算及其对光诱鱿鱼浮拖网作业的影响. 台湾海峡, 1999, 18(2): 215 - 220.]
- [17] Chui X Z, Arakawa F, Arimoto G, *et al.* Line source

- modeling in small squid fishing boats fish lamp and its illumination in the water distribution [J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 2003, 69 (1): 44 - 51. [崔渐珍, 荒川久幸, 有元贵文, 等. 线光源モデルを用いた小型イカ釣り渔船集鱼灯の水中照度分布解析. 日本水产学会誌, 2003, 69 (1): 44 - 51.]
- [18] Qian W G, Wang F. Comparative study on the calculated methods of illuminate of sea surface about aggregating fish lamps [J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2004, 23 (4): 285 - 290. [钱卫国, 王飞. 集鱼灯海面照度计算方法的比较研究. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2004, 23 (4): 285 - 290.]
- [19] Guan W J, Qian W G, Chen X J. Computing underwater downward irradiance of fish aggregation lamps in class I ocean water based on Monte Carlo method [J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34 (10): 140 - 151. [官文江, 钱卫国, 陈新军. 应用 Monte Carlo 方法计算水上集鱼灯向下辐照度在一类海水中的分布. 水产学报, 2010, 34 (10): 140 - 151.]
- [20] Zhao Z J. Design and analysis of high intensity LED lighting module for underwater optic field [D]. Taiwan: Cheng Kung University, 2010: 1 - 64. [赵志杰. 高亮度 LED 模组于水下光场之设计与分析. 台湾: 成功大学, 2010: 1 - 64.]
- [21] Wang S F. LED light source effect to the growth characteristics of the plant and optimization design [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013: 1 - 71. [王淑凡. LED 光质对植物生长特性影响及光源优化设计. 天津: 天津工业大学, 2013: 1 - 71.]
- [22] Sha F, Qian W G, Wu Z Q. The theoretical calculations of underwater irradiance of upper water fish aggregation lamps and its optimal allocation in light purse seine vessels for chub mackerel (*Scomber japonicus*) [J]. Journal of Marine Sciences, 2013, 31 (1): 85 - 90. [沙锋, 钱卫国, 吴仲琪, 等. 鲈鱼灯光围网渔船水上集鱼灯水中照度分布及优化配置的理论计算. 海洋学研究, 2013, 31 (1): 85 - 90.]

The optimum incidence angle of LED fish aggregation lamp based on Fresnel phenomenon

KONG Xianghong^{1,2}, CHEN Xinjun^{1,3}, WANG Weijie¹, DU Kai⁴,
LU Kexiang¹, QIAN Weiguo^{1,3*}, YANG Wei²

(1. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Experimental Center of Physics, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Collaborative Innovation Center for Distant-water Fisheries, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: LED lamp is a new type of light source which was introduced to light fishing, and its reasonable arrangement on boat will directly relate to the effect of luring fish. The article analyzes the Fresnel Phenomenon. The formula of relationship between each component of transmittivity and refractive indexes and angle of incidence when light goes through two different interfaces of medium can be get through the Fresnel's formula that is deduced from the principle of optical critical condition and the definition formula of transmittivity and refraction. And then, we can get the functional images that the transmittivity and refraction changed because of the variation of incidence angle when light passes through the sea surface by making use of MATLAB. The incidence when intensity of transmission beam reaches the maximum is 53.6° . This incidence angle can guide the installation of LED fish aggregation lamp in fishing boat. But the incidence angle could be changed to 36.4° for flat plate type LED fish aggregation lamp and could be changed to 23.6° for the three columns type of LED fish aggregation lamp. The included angle between two columns of LED fish aggregation lamps is 160° .

Key words: LED fish aggregation lamp; incidence angle; Fresnel phenomenon; MATLAB

Corresponding author: QIAN Weiguo. E-mail: wgqian@shou.edu.cn