

文章编号 1004-924X(2015)10-2778-04

## 水下航行器光学隐蔽深度测量系统

朱海荣<sup>1\*</sup>, 朱海<sup>1</sup>, 刘金涛<sup>2</sup>, 温亚楠<sup>3</sup>, 李惟羽<sup>1</sup>

(1. 海军潜艇学院, 山东青岛 266000; 2. 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266000;  
3. 青岛市光电工程技术研究院, 山东青岛 266000)

**摘要:** 为了实现对水下航行器光学隐蔽深度的实时测量, 研制了水下航行器光学隐蔽深度测量系统。根据目标背景对比度的传输理论, 分析了目标背景对比度在海水、大气、海面的传输特性, 建立了水下航行器光学隐蔽深度模型。基于该模型分析了测量水下航行器光学隐蔽深度所需要的参数, 设计了测量海水上行辐照度、海水下行辐照度、海水体衰减性系数、海水漫衰减性系数和 underwater 航行器表面反射率的测量方法, 并完成一次海上试验。试验测得良好天气情况下特征尺度为 12 m 的水下航行器的光学隐蔽深度为 25~35 m。试验结果表明, 设计的测量系统可以实现对水下航行器光学隐蔽深度测量, 并适用于各类潜艇。由于改变了传统的在水面进行深度测量的方式, 该系统工作稳定可靠, 提高了隐蔽性和对海域测量的准确度, 可为水下作战决策提供帮助。

**关键词:** 光学隐蔽深度测量; 水下航行器; 目标背景; 对比度

**中图分类号:** TJ67; U666.16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2778

## Measurement system for optical concealment depth of underwater vehicle

ZHU Hai-rong<sup>1\*</sup>, ZHU Hai<sup>1</sup>, LIU Jin-tao<sup>2</sup>, WEN Ya-nan<sup>3</sup>, LI Wei-yu<sup>1</sup>

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266000, China;  
2. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;  
3. Qingdao Academy for Opto-electronics Engineering, Qingdao 266000, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 846770081@qq.com

**Abstract:** To realize the real-time measurement of optical concealment depth for a vehicle under water, an optical concealment depth measurement system for the underwater vehicle was developed. According to the target background contrast transfer theory, the transport properties of the target background contrast in sea water, air and sea were analyzed and a model of underwater optical concealment depth for the vehicle was established. On the basis of the model, required parameters for measuring optical concealment depth of underwater vehicle were analyzed and the measuring methods for the water upward irradiance, water downward irradiance, water body attenuation coefficients, water diffuse attenuation coefficients and underwater vehicle surface reflectivity were designed. Then, an experiment on sea was completed, and it shows that underwater optical concealment depth of the vehicle

收稿日期: 2015-04-22; 修订日期: 2015-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61573040)

with a characteristic scale of 12 m ranges from 25 m to 35 m under good weather conditions. The experimental results indicate that the measurement system successfully measures the depth of optical concealment of the vehicle and also is suitable for other submarines. As it avoids the traditional depth measurement mode, the system has stable and reliable operation, improves the conceal ability and measuring accuracy, and provides the supports for underwater flight decision.

**Key words:** optical measurement of concealment depth; underwater vehicle; object background; contrast ratio

## 1 引言

非声学水下航行器的探测手段主要有光学探测、微波遥感探测、磁探测、电场探测等。随着水下航行器消音、消磁技术的应用,光学探测成为了基本的水下目标探测手段<sup>[1]</sup>,因此水下航行器的光学隐蔽是最基本的航行安全保证条件之一。水下航行器的光学隐蔽深度是指在平静海面 and 大气能见度较好的情况下,在海面 200 m 高处航空侦察机上通过目力、望远镜或光学相机能够观测到的水下目标的最大深度<sup>[2]</sup>。中国近海水深较浅,实时获取所在海洋环境的光学隐蔽深度,对确保水下航行器活动过程中航行的安全性,提高航行器的隐蔽能力和作战能力,正确指导指挥员反光学侦查及辅助作战的重大意义。

目前,国内军事上水下航行器反光学探测的航行深度依旧是参照透明度盘深度来估计的,即约 30 cm 直径的白色圆盘下沉到恰好看不到深度<sup>[3]</sup>。然而在形状和颜色上,白盘和水下航行器对光传输的影响有明显的差异,因此该方法的测量误差较大,仅适用于水面状态测量。传统的海洋光学环境测量有遥感手段和光学浮标获取,但传统的测量方法无法实时地将数据传给执行水下任务的无人机或潜艇。在战术运用上,潜艇的反光学探测手段主要是利用气象、水文条件增加航行深度,减少上浮次数和通气管状态下的航行时间<sup>[4]</sup>。综上,光学隐蔽深度测量系统可以实时获取水下航行器所在海洋环境的光学隐蔽深度,对保障其航行安全具有重要的军事应用价值。本文基于辐射传输理论和目标背景对比度理论<sup>[5]</sup>建立了水下航行器的光学隐蔽深度模型,并设计了光学隐蔽深度测量系统。该系统通过实时获取海水上行辐照度、海水下行辐照度、海水体衰减系数、海水漫衰减系数以及航行器表面反射率<sup>[6]</sup>及实时

计算得到光学隐蔽深度。

## 2 水下航行器的光学隐蔽深度模型

### 2.1 目标背景对比度传输理论

目标背景对比度是识别目标的判定标准之一。它是表述水下目标与背景之间辐射差别的参量,水下航行器的固有对比度可表示为:

$$C_0 = \left| \frac{L_0 - L_{b0}}{L_{b0}} \right|, \quad (1)$$

式中:  $L_{b0}$ ,  $L_0$  分别是水下航行器处的背景辐亮度和固有辐亮度。距离航行器  $r$  处的对比度为观观对比度<sup>[3]</sup>,为:

$$C_r = \left| \frac{L_r - L_{br}}{L_{br}} \right|, \quad (2)$$

式中:  $L_r$ ,  $L_{br}$  分别是距离航行器  $r$  处的航行器辐亮度和背景辐亮度。

海水中辐射传递方程为:

$$\frac{dL}{dr} = -cL + L_*, \quad (3)$$

式中:  $c$  是海水体积衰减系数,  $L_*$  是辐射总增量。

目标背景对比度的传输过程如下:第一个过程是在海水中的传输,第二个过程是在海面传输,第三个过程是在空气中传输。

#### 2.1.1 海水中的传输特性

根据式(3),航行器辐亮度和背景辐亮度的辐射方程分别为:

$$\frac{dL_r}{dr} = -cL_r + L_*, \quad (4)$$

$$\frac{dL_{br}}{dr} = -cL_{br} + L_*. \quad (5)$$

两式相减得到:

$$\frac{d(L_r - L_{br})}{dr} = -c(L_r - L_{br}). \quad (6)$$

将式(1)、(2)代入式(6)得到:

$$\frac{C_r}{C_0} = \left| \frac{L_{b0}}{L_{br}} \right| e^{-\sigma}. \quad (7)$$

又因为  $L_{b0} = L_{br} e^{-k \cos \theta r}$ , 得到对比度传输方程为:

$$a_r = \frac{C_r}{C_0} = e^{-(c+k \cos \theta) r}, \quad (8)$$

式中:  $k$  为海水漫衰减系数。那么两个连续路径  $r$  和  $s$  的海水漫衰减系数为:

$$a_{r+s} = a_r a_s, \quad (9)$$

### 2.1.2 海面传输特性

忽略太阳直射的影响,海面的反射效应可表示为:

$$\gamma = \frac{L_u(0^-) t}{L_u(0^-) t + L_{sky} \rho_s n_w^2}, \quad (10)$$

式中:  $L_u(0^-)$  为水次表面向上辐亮度,  $\rho_s$  为海面反射率,  $n_w$  是海水折射率。根据 Preisendorfer 结论,海面折射及波浪效应为:

$$\beta = 1 - \exp\left[-\frac{\tan^2 4\phi}{2\sigma^2}\right], \quad (11)$$

式中:  $\phi$  为海水次表面航行器的半视角,  $\sigma^2$  为海面光学状态。

### 2.1.3 在空气中传输特性

消光<sup>[7-8]</sup>是指大气对辐射强度的衰减作用,经过路径传输后的大气光谱透射比为:

$$\tau(r) = \frac{C_r}{C_0} = e^{-\mu r}. \quad (12)$$

其中  $\mu$  为消光系统。

## 2.2 模型的建立

航空侦察观测到的表观对比度为:

$$C_r = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot a_r \cdot C_0. \quad (13)$$

由于航行器本身不会发光,所以航行器的固有对比度为:

$$C_0 = \left| \frac{L_0 - L_{b0}}{L_{b0}} \right| = \left| \frac{r_i E_d - E_u}{E_u} \right|, \quad (14)$$

式中:  $E_u$  是海水上行辐照度,  $E_d$  是海水下行辐照度,  $r_i$  是航行器表面反射率。

从海水背景中识别航行器所需要的目标背景阈值对比度  $C_t$  为<sup>[9]</sup>:

$$\ln C_t \approx (\ln \alpha + 0.5)^{-1} - 2, \quad (15)$$

式中:  $\alpha$  为目标视角,与航行器的特征尺度  $L$ 、观察距离  $H$  以及探测器的放大倍率  $M$  有关。  $M$  是辅助目视器材的放大倍率,裸眼无助目视时  $M=1$ 。即有:

$$\alpha \approx 3.44 \frac{ML}{H}. \quad (16)$$

当  $C_r$  下降到  $C_t$  时,航行器的深度就是光学隐蔽深度,有:

$$C_t = \tau \cdot \gamma \cdot \beta \cdot C_0 \cdot e^{-(c+k \cos \theta) \cdot D}, \quad (17)$$

化简后得:

$$D = \frac{\ln\left(\left|\frac{r_i E_d - E_u}{E_u}\right| \cdot \gamma \cdot \beta \cdot 10^{2 - (\ln \alpha + 0.5)^{-1}} \cdot e^{-\mu H}\right)}{c + k \cos \theta}, \quad (18)$$

式中:  $D$  为航行器的光学隐蔽深度,  $H$  为侦察机的飞行高度。因此,在已知海面反射效应折射及波浪效应的情况下,通过测量海水体积衰减系数、漫衰减系数、海水下行辐照度、海水上行辐照度、航行器表面反射率可以得到光学隐蔽深度。

## 3 测量系统的设计

### 3.1 海水下行辐照度测量

海洋渐近光场中的下行辐射存在极强的方向性<sup>[10]</sup>,辐射通量集中在天顶方向较窄的立体角内,航行器的姿态变化会造成集光器的光轴偏离天顶方向<sup>[11]</sup>,余弦误差也会影响海水中下行辐照度的测量<sup>[12]</sup>。

当余弦集光器的光轴方向偏离天顶时,基于海洋渐近光场的二分量简化模型为:

$$L(\theta) = L_1 + L_2 |_{\theta=0}, \quad (19)$$

式中:  $L_1$  为漫反射辐射率分量,角分布与方向无关,对辐照度的贡献不随集光器姿态的变化而变化;  $L_2 |_{\theta=0}$  为垂直下行辐射率分量,对辐照度的贡献与集光器姿态角的余弦成正比。

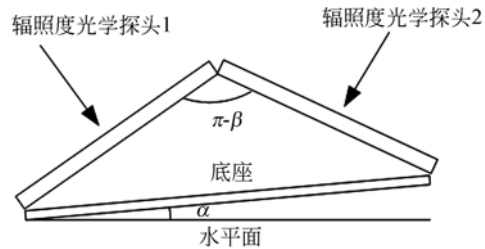


图 1 下行辐照度双光学探头测量

Fig. 1 Measurement of downward irradiance with double optical probes

如图 1 所示,用光轴共处同一垂直面的两个  $2\pi$  立体角辐照度测量传感器来同时测量海洋的下行辐照度,则有:

$$E_{1d} = \pi L_1 + L_2 \cos\left(\frac{\beta}{2} + \alpha\right), \quad (20)$$

$$E_{2d} = \pi L_1 + L_2 \cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right), \quad (21)$$

式中:  $\alpha$  为两传感器底座在它们的光轴平面内的姿态角,  $\beta$  为两传感器光轴之间的夹角, 有:

$$L_2 = \frac{E_{2d} - E_{1d}}{2 \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (22)$$

$$L_1 = E_{1d} - \frac{E_{2d} - E_{1d}}{2 \sin \frac{\beta}{2} \sin \frac{\alpha}{2}} \cos(\frac{\beta}{2} + \alpha). \quad (23)$$

由式(22)和(23)可见, 根据姿态传感器测量的姿态数据, 利用两个传感器就可以解算下行辐照度的两个分量。这样, 海洋的实际下行辐照度为:

$$E_d = \pi L_1 + L_2. \quad (24)$$

### 3.2 海水上行辐照度测量

上行辐照度测量最大的干扰源为阴影效应。根据上行渐近光场的各向同性分布简化模型, 只要在任意方向测量海洋渐近光场的上行辐射率, 然后在上行的  $2\pi$  立体角内积分, 就可获得上行辐照度。如图 2 所示, 采用在水平方向测量辐射率的方式对上行辐照度实施间接测量, 图中箭头代表光学探头的光轴方向。

$$L_u = (1 - k)L_{\min} + kL_{\max}, \quad (25)$$

式中:  $L_u$  为海水中的上行辐射率,  $L_{\min}$  为下俯辐射率探头的测量结果,  $L_{\max}$  为上仰辐射率探头的测量结果,  $k$  为潜艇遮挡效应的校正系数。采用横向辐射率测量法, 只要选取合适的遮挡效应校正系数, 就能最大限度地降低阴影效应的影响。

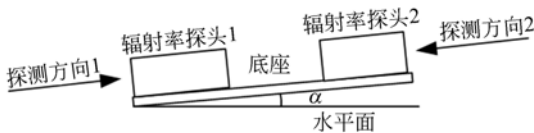


图 2 上行辐照度双辐射率光学探头测量

Fig. 2 Measurement of upward irradiance with double radiance optical probes

### 3.3 海水体积衰减系数测量

海水的衰减系数为:

$$c = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\phi_a + \phi_b}{\phi_i \Delta l}, \quad (26)$$

式中:  $\phi_i$  为平行入射光通量,  $\phi_a$  为吸收光通量,  $\phi_b$  为散射光通量。若采用人工准直光源, 式(26)可简化为:

$$\frac{d\phi}{dl} = -c\phi. \quad (27)$$

因此, 在两个位置上测量辐亮度, 即有:

$$c = -\frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{\phi_2}{\phi_1}. \quad (28)$$

### 3.4 海水漫衰减系数测量

根据海洋两流辐射传输理论<sup>[11]</sup>, 可将海水看作是一种水平平面分层介质, 下行辐照度的传输方程为:

$$K_d(z, \lambda) = -\frac{1}{E_d(z, \lambda)} \frac{dE_d(z, \lambda)}{dz}, \quad (29)$$

式中  $K_d$  是海水的下行漫衰减系数。忽略漫衰减系数随深度的变化, 在两个深度上测量下行辐照度, 则有:

$$K_d(\lambda) = -\frac{1}{z_2 - z_1} \ln \frac{E_d(z_2, \lambda)}{E_d(z_1, \lambda)}. \quad (30)$$

### 3.5 航行器表面反射率测量

航行器表面对入射光的反射作用近似为朗伯反射, 所以航行器反射率可表示为:

$$R_s(\lambda) = \frac{\pi L_s(z, \lambda)}{E_d(z, \lambda)}, \quad (31)$$

式中:  $L_s(z, \lambda)$  是航行器上表面的反射光辐射率,  $E_d(z, \lambda)$  是海洋下行辐照度。

水下航行器光学隐蔽深度测量系统的研制主要包括各探测模块和信息处理模块的设计、水密外壳体加工及装置总体集成。该系统可实现水下自主工作, 采集和处理辐照度、辐射率光电流; 采用的存储卡和无线传输的设计, 可实现数据的离线存储及实时传输, 便于测量数据的分析。该系统调试如图 3 所示。



图 3 测量系统调试

Fig. 3 Debugging of measurement system

## 4 实验与结果

2015年1月18日,在青岛某码头对水下航行器光学隐蔽深度测量装置进行了海上试验,如图4所示。探测装置利用缆绳吊放,由专用的计算机操作平台通过无线传输向探测装置发送启动信号。在吊放过程中完成海水下行辐照度、上行辐照度、深度、海水漫衰减系数的测量。测量完成后,数据通过无线传输的方式发送到计算机。



图4 海上试验

Fig. 4 Experiment on sea

图5~图7分别为测量得到的海水下行辐照度、海水上行辐照度和漫衰减系数随深度的变化曲线。

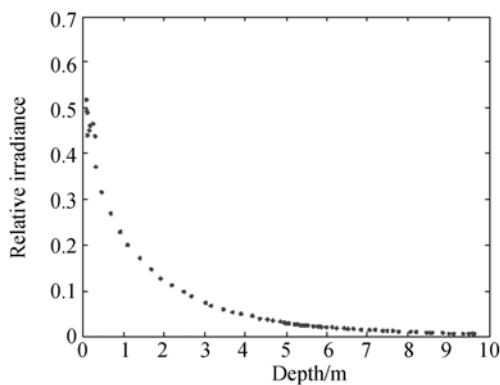


图5 下行辐照度

Fig. 5 Variation of downward irradiance with depth

良好天气条件下,计算得到200 m高空裸眼无助目视,特征尺度为12 m,表面反射率为0.02的水下航行器的光学隐蔽深度,如图8所示。

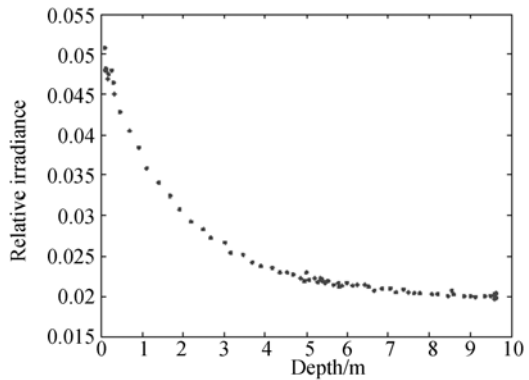


图6 上行辐照度

Fig. 6 Variation of upward irradiance with depth

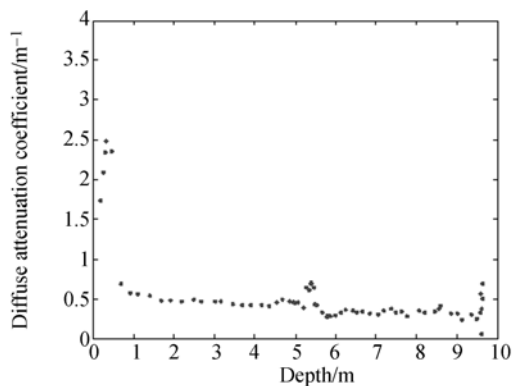


图7 漫衰减系数

Fig. 7 Variation of diffuse attenuation coefficient with depth

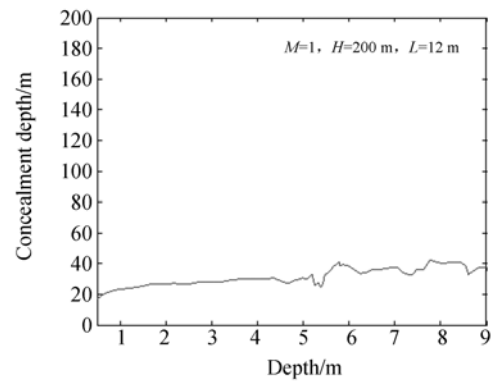


图8 光学隐蔽深度测量结果

Fig. 8 Measurement result of optical concealment depth

## 5 结论

本文建立了水下航行器光学隐蔽深度模型,完成了光学隐蔽深度测量系统的设计,并进行了海上试验测量,获取了计算光学隐蔽深度需要的

海洋参数,得到了试验码头水域下行辐照度、上行辐照度随深度的变化情况。用测量得到的辐照度相对值的比值得到模型中的海水衰减系数和漫衰减系数,因此不需进行辐照度定标。测量过程中海流会干扰漫衰减系数的测量,这可以通过增加采样频率和减慢测量系统的升降速度来优化。试验得到良好天气情况下,该码头水域特征尺度为12 m时,水下航行器的光学隐蔽深度为25~35 m;而且在不同的水深测量会得到不同的光学隐

蔽深度,这主要受海水光学参数垂向分布的影响。

水下航行器光学隐蔽深度测量系统适用于各型潜艇,改变了出海前需要潜艇浮起在水面测量的方式,提高了隐蔽性和对海域测量的准确度,有助于水下作战辅助决策。下一步工作主要是系统测量精度的提高、测量系统的小型化设计、测量系统与潜艇的共形设计,以及姿态和阴影效应对测量的影响研究。

### 参考文献:

- [1] 崔国恒,于德新.非声探潜技术现状及其对抗措施[J].火力与指挥控制,2007,32(12):10-13.  
CUI G H, YU D X. Non acoustic detection technology of submarine and its countermeasures[J]. *Fire and Command Control*, 2007, 32(12):10-13. (in Chinese)
- [2] 朱海,姜璐,梁波,等.水下目标光学隐蔽深度遥感获取方法[J].中国激光,2007,34(5):699-702.  
ZHU H, JIANG L, LIANG B, *et al.*. Optical concealment depth of underwater target by remote sensing method[J]. *Chinese Laser*, 2007, 34(5): 699-702. (in Chinese)
- [3] 姜璐,朱海,李松,等.机载激光雷达最大探测深度同海水透明度的关系[J].激光与红外,2005,35(6):397-399.  
JIANG L, ZHU H, LI S, *et al.*. The relationship between the airborne laser radar maximum detection depth of seawater transparency[J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35(6):397-399. (in Chinese)
- [4] 李家良.潜艇运动光电特性及隐蔽技术发展动向综述[J].现代防御技术,2010,38(5):145-149.  
LI J L. A summary of the development of the photoelectric characteristics of the submarine and the development of the concealed technology[J]. *Modern Defense Technology*, 2010, 38(5):145-149. (in Chinese)
- [5] 范伟,王毅,饶瑞中,等.根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择[J].红外与激光工程,2005,34(2):177-182.  
FAN W, WANG Y, RAO R ZH, *et al.*. According to the characteristics of atmospheric radiation wavelength band selection method for target detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2):177-182. (in Chinese)
- [6] 付跃刚,邱旭,刘智颖,等.目标激光反射率测试方法研究[J].仪器仪表学报,2006,27(2):1215-1216.  
FU Y G, QI X, LIU ZH Y, *et al.*. Method of target laser reflectivity measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(2): 1215-1216. (in Chinese)
- [7] 顾吉林.典型天气大气辐射传输特性研究[D].大连:大连海事大学,2012.  
GU J L. *Research on Transmission Characteristics of Atmospheric Radiation Typical Weather*[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese)
- [8] 李力,金伟其,黄有为,等.一种低对比度可见光超视距成像的实时图像增强方法[J].兵工学报,2010,31(2):242-247.  
LI L, JIN W Q, HUANG Y W, *et al.*. A method to enhance the real-time image with low contrast and visible light over the horizon imaging[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010, 31(2): 242-247. (in Chinese)
- [9] 冯皓,张军.气象条件对可见光斜视探测目标的影响模型及其应用[J].气象科学,2004,24(2):205-211.  
FENG H, ZHANG J. Meteorological conditions influence on visible strabismus detection model and its application [J]. *Meteorological Science*, 2004, 24(2):205-211. (in Chinese)
- [10] 赵巧华,宋玉芝.多次散射对向上漫射散射系数及漫射吸收系数影响的数值研究[J].遥感学报,2009,16(5):763-778.  
ZHANG Q H, SONG Y ZH. Numerical study of the effect of multiple scattering on upward scattering coefficient and absorption coefficient of diffusion[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 16(5): 763-778. (in Chinese)

- [11] 路伟,汤华涛. 滑模控制在水下航行器横滚姿态控制中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(9): 55-57.  
LU W, TANG H T. Sliding mode control for underwater vehicle roll application in attitude control [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(9): 55-57. (in Chinese)
- [12] 赵进平,王维波,矫玉田,等. 海面大气和海洋条件变化引起的太阳辐照度高频变化分析[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(4): 1-8.  
ZHAO J P, WANG W B, JIAO Y T, *et al.*. Analysis of cause of the change of atmospheric and sea surface condition of high frequency variation of solar irradiance[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2010, 40(4): 1-8. (in Chinese)
- [13] 陈立贞. 中国海垂直非均匀海洋光学特性进一步研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.  
CHEN L ZH. *Chinese Sea Vertically Inhomogeneous Ocean Optical Properties for Further Study* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)

作者简介:



朱海荣(1988—),男,江苏南通人,博士研究生,2014年于海军潜艇学院遥感所获得硕士学位,主要从事海洋光学及潜艇航行安全方面的研究。E-mail: 846770081@scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)