

文章编号 1004-924X(2019)11-2289-07

## 全海深大视场超高清光学系统设计

姜 洋<sup>1\*</sup>, 全向前<sup>2</sup>, 杜 杰<sup>1</sup>, 邢 妍<sup>1</sup>, 吕深圳<sup>1,3</sup>, 孙 强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为满足我国深海成像设备需求,针对水下光学像差特点完成了全海深大视场光学成像系统设计。根据深海系统使用环境,对光学参数与结构形式进行了分析与探讨;采用常用玻璃及球面透镜设计,完成了小型化低成本高性能的光学设计实例;通过控制光线角度来提高光学系统能量利用率。选用 YAG 透明陶瓷为抗压窗口材料,通过有限元力学分析仿真获得形变与抗压阈值。通过 ANSYS 软件分析窗口与支撑结构,设计满足全海深 11 000 m 使用环境(120 MPa)要求。光学系统的工作波段为 410~630 nm,视场角达 80°,相对孔径为 1/2.8,全视场 MTF>0.3(@91 lp/mm)。该系统成像质量及光学窗口抗压性均满足深海成像科考需求。

**关键词:**光学设计;水下成像;大视场;海水光学特性

**中图分类号:**TH74;P715.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192711.2289

## Design of deep-sea optical imaging system with wide field of view and ultra-high resolution

JIANG Yang<sup>1\*</sup>, QUAN Xiang-qian<sup>2</sup>, DU Jie<sup>1</sup>, XING Yan<sup>1</sup>, LÜ Shen-zhen<sup>1,3</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences,  
Sanya 572000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: le-zhi@yeah.net

**Abstract:** In order to meet the needs of deep-sea imaging devices in China, a whole deep-sea wide-field-of-view optical imaging system was designed based on the aberration characteristics of an underwater optical system. According to the operating environment of the deep-sea system, the optical parameters and structural forms were analyzed. A sample optical design characterized by miniaturization, low cost, and high performance was completed using common glass and spherical lens. The energy utilization of the optical system was improved by controlling the light angle. With YAG transparent ceramics as a material for anti-compression window, the deformation and anti-compression thresholds were

收稿日期:2019-05-05;修订日期:2019-06-27.

基金项目:国家重点研发计划项目重点专项(No. 2018YFC0307900);中国科学院科研设备研制项目(No. YJKYYQ20180067)

obtained by finite-element mechanical analysis and simulation. Analysis of the window and supporting structure using ANSYS software suggests that the design met the requirements for use in 11,000 m whole deep-sea environment (110 MPa). The operating band of the optical system is 410~630 nm, the field-of-view angle reaches  $80^\circ$ , the relative aperture reaches 1/2.8, and the MTF of the full field-of-view  $>0.3$  (@91 lp/mm). The imaging quality of the system and the anti-compression performance of the optical window meet the needs of deep-sea imaging for scientific investigation.

**Key words:** optical design; underwater imaging; wide field of view; optical properties of seawater

## 1 引言

海洋覆盖了地球 71% 的面积,蕴含着丰富的科学宝藏。但即使在 21 世纪的今天,人类仍然对海斗深渊(6 000~11 000 m)的自然信息知之甚少,近年来深渊科考成为各国竞相研究的热点。在世界大洋最深处的马里亚纳海沟(深度达 11 000 m),设备要承受 110 MPa 左右的高压。光学系统设计一方面要考虑光学窗口的抗压性,还要适用于海水介质的特殊光学特性<sup>[1]</sup>。陆上使用的光学成像系统是针对空气介质进行像差校正的,若直接用于海水中,介质的差异<sup>[2-3]</sup>(海水折射率  $n \approx 1.339$ ,阿贝数  $V \approx 57.9$ )将造成视场角的减小,还会在大视场处产生明显的垂轴色差。尤其对于大靶面大视场镜头,边缘视场的像质恶化更加明显。若采用附加矫正镜的方法,还会涉及光瞳匹配等新问题。为消除海水光学特性对像质的退化,开发专用的深海光学成像系统十分必要<sup>[4-5]</sup>。

国外主要集中在深海成像系统的商用产品开发。美国的 Deepsea Power&Light、挪威 ME-TAS、英国的 BOWTECH、Kongsberg、Tritech 等公司及美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI-Woods Hole Oceanographic Institution)都有深海相关视频摄录产品,但普遍采用陆上镜头配合抗压光学窗口封装使用。国内对水下成像的研究起步较晚,中科院西安光机所、沈阳自动化所和上海恒生电讯公司等也采用简单集成封装方式,满足了深海探索的初步需要。但大多分辨率偏小,像元偏小微光能力不足,图像品质无法满足高端深海成像需求<sup>[6-10]</sup>。

本文结合深海光学成像环境的特点,充分考虑海水介质及光学窗口的像差校正,选择耐高压的透明陶瓷材料制作窗口,完成了全海深大视场、

大靶面深海光学成像系统设计。该系统能够进行水下 1~10 m 的清晰成像,为深海科考提供了强有力的技术装备支持。

## 2 设计思路

### 2.1 海水光学特性

由于海水对可见光的强吸收与散射效应,海面 200 米以下已经没有自然光线。海水的散射效应会使得景深严重退化,过小的  $F/\#$  会制约清晰成像范围。水下光学系统设计时,主要考虑介质折射率与色散的影响。由于海水、光学窗口与空气折射率的差异,光线经过介质界面时会产生偏折,因此空气中设计的光学镜头直接用于水下会产生明显的像质退化<sup>[11-12]</sup>。对于大视场系统,海水色散产生垂轴色差更加严重,增加了光学设计的难度。

### 2.2 光学设计考量

海水对可见光的衰减具有波长相关性,海水对蓝绿光波段透过率较高,其它波段随传输距离衰减严重。光学设计既要考虑远距离探测能力,又要兼顾近距离物体的色彩还原,并需考虑 LED 照明光源的光谱特性,选择能谱比较集中的谱段进行设计<sup>[13]</sup>。

深海压力对镜筒造成的挤压变形会影响光学系统的径向间距;目标距离的改变等都是需要考虑的焦面变化因素;温度、盐度、压强等因素对海水折射率的影响也可以通过系统调焦补偿。留有足够的调焦余量以适应各种工作环境。

光学系统需采用准像方远心设计方案。优化过程中要控制主光线在像面的入射角度,一方面可以满足探测器微透镜阵列的主光线入射要求,还可以提高像面边缘照度。大视场光学系统设计时将滤光片置于镜片组,减小滤光片的波段漂移问题。

3 光学系统设计

深海无光环境必须采用主动照明,为了充分利用有限的光能,深海光学系统应尽量采用较大像元尺寸的探测器;由于海水散射效应对景深的退化作用,很难达到空气中的景深效果,相对孔径在保证微光性能的同时还要保证足够的清晰成像范围<sup>[14-15]</sup>。系统主要参数如表 1 所示。

表 1 深海光学系统的主要参数

Tab. 1 Main parameters of deep-sea optical imaging system

| 指标                          | 参数          |
|-----------------------------|-------------|
| 工作波段/nm                     | 410~630     |
| 分辨率                         | 4 096×3 072 |
| 视场角/(°)                     | 80          |
| 像元大小/ $\mu\text{m}$         | 5.5         |
| F/#                         | 2.8         |
| 帧频/(frame·s <sup>-1</sup> ) | 60          |
| 耐压强度/MPa                    | >120        |
| 成像距离/m                      | 0.5~10      |

若工作距离(物距)远大于系统焦距,可使用以下公式计算水下光学系统的焦距:

$$y = nf \cdot \tan \theta, \quad (1)$$

式中: $y$ 为像面对角线半高, $f$ 为光学系统焦距, $\theta$ 为光学系统半视场, $n$ 为海水介质的折射率。

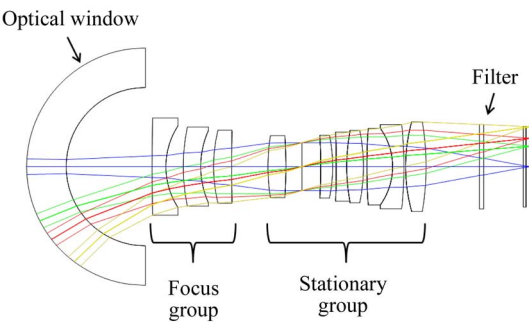


图 1 深海光学系统结构

Fig. 1 Layout of deep-sea optical imaging system

如图 1 所示,光学系统由光学窗口、调焦组、固定组、滤光片及探测器组成。光学窗口采用同心等厚的半球罩以满足光学与抗压需求,光学系统对焦采用镜片组前组轴向移动的方式保证清晰成像。镜组均采用球面面型设计,探测器有微透镜阵列像面主光线的入射角度控制在 10°以内;设计过程中,控制光学表面的光线入射角度,尽量减小大视场离轴像差。系统在不同目标距离的调焦量如图 2 所示。

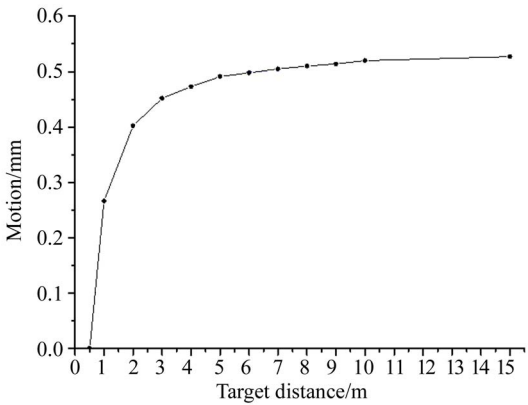


图 2 不同目标距离的调焦量

Fig. 2 Focus motion vs. target distance

海水中蓝绿光波段的能量衰减最少,为了在有限的光照下达到较高的信噪比,设计中需要考虑玻璃材料在工作波段的透过率。图 3 为设计中所使用的 5 种光学玻璃材料的透过率,它们在 400~650 nm 内均大于 92%。

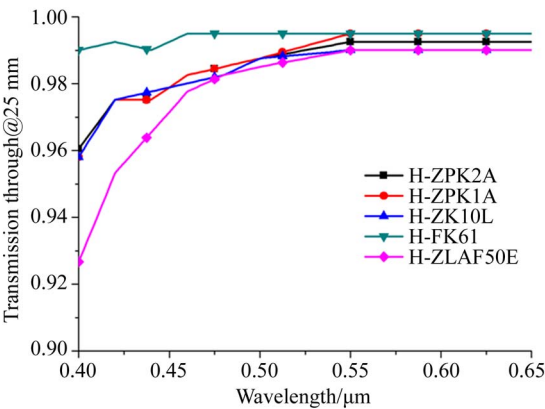


图 3 玻璃材料透过率

Fig. 3 Transmission of glass vs. wavelength

## 4 测量实验与成像质量评价

### 4.1 设计结果

11 000 m 深海环境温度为  $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 图 4、图 5

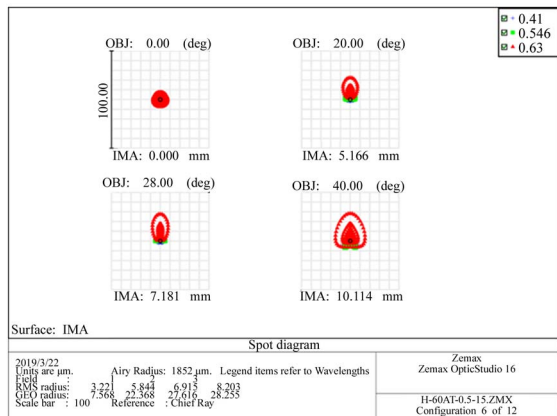


图 4 光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of optical system

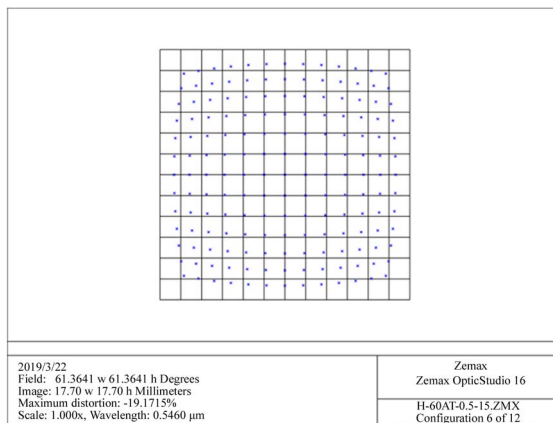
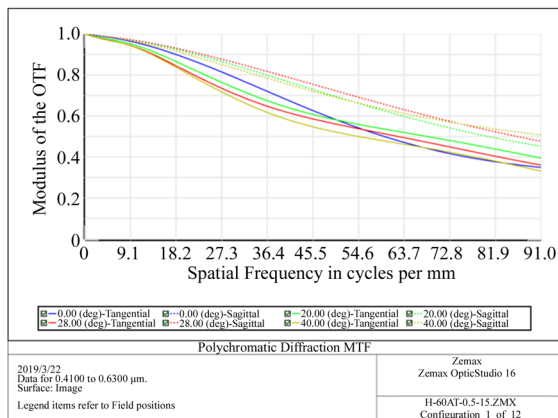
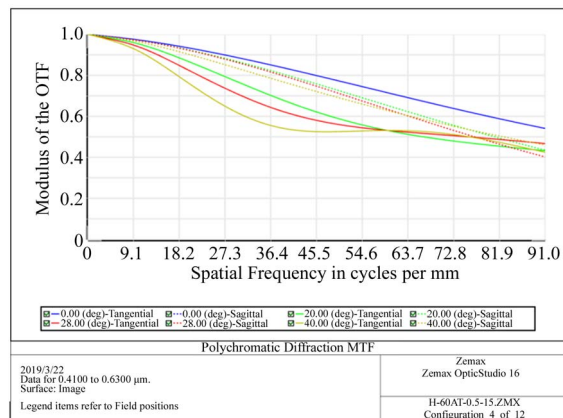


图 5 网格畸变

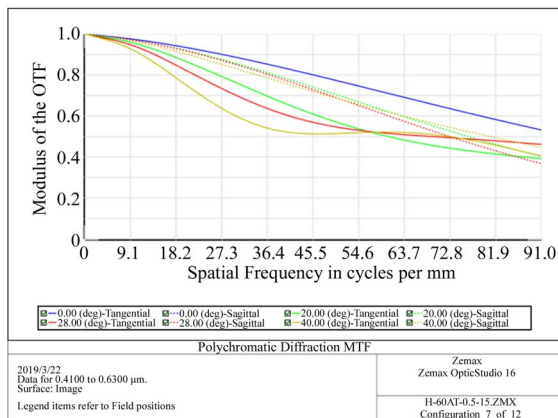
Fig. 5 Grid distortion



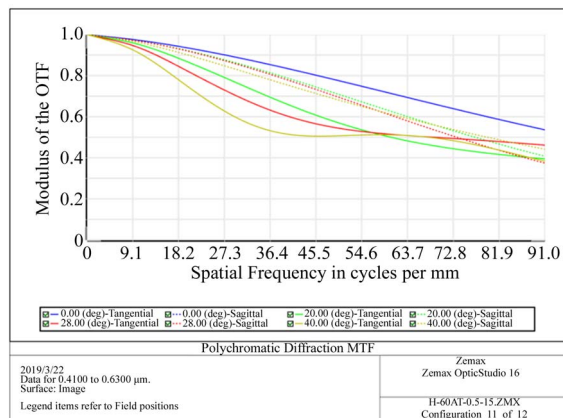
(a) @0.5 m



(b) @3 m



(c) @6 m



(d) @10 m

图 6 不同目标距离处深海光学系统的调制函数

Fig. 6 MTFs of deep-sea optical imaging system at different distances

和图 6 均为系统在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的仿真结果。畸变不会影响像质,同时桶形畸变还可以提高边缘视场像面照度,因此优化设计过程中不作为优先校正的像差项。

如图 6 所示,不同目标距离情况在 91 lp/mm (像元大小为 5.5  $\mu\text{m}$  的 Nyquist 频率)处,MTF 均大于 0.3,由此表明,该光学系统在 1~10 m 的成像范围内具有较好的成像质量。

4.2 公差分析

通过分析光学系统加工、装调中产生的误差容限合理分配公差,才能在可接受的成本与技术要求下获得最佳性能设计;通过迭代优化公差敏感项,来降低加工及装调对像质影响的敏感度,本系统在 Zemax 软件中的公差设置如表 2 所示。

表 2 深海光学系统的公差分配  
Tab. 2 Tolerance distribution of parameters for deep-sea optical imaging systems

| 公差类型         | 公差范围 |
|--------------|------|
| 曲率半径(光圈数)    | 3    |
| 镜片厚度/mm      | 0.02 |
| 面偏心 X,Y/mm   | 0.01 |
| 面倾斜 X,Y/(°)  | 0.01 |
| 局部光圈         | 0.3  |
| 元件偏心 X,Y/mm  | 0.01 |
| 元件倾斜 X,Y/(°) | 0.1  |

对典型工作距离 6 m 的组态进行公差分析,使用 MTF 对系统像质敏感度进行评价。500 次蒙特卡罗仿真结果如表 3 所示,全视场 MTF 大于 0.3 (@91 lp/mm)的概率为 90%,满足系统使用要求。

表 3 蒙特卡罗公差分析结果  
Tab. 3 Result of Monte Carlo tolerance analysis

| 概率/% | MTF 值        |
|------|--------------|
| 90   | 0.307 320 27 |
| 80   | 0.331 066 68 |
| 50   | 0.379 436 99 |
| 20   | 0.415 425 38 |
| 10   | 0.432 594 98 |

5 耐高压光学窗口的有限元分析

深渊 11 000 m 深度的海水静压可达 120 MPa,因此仪器设备必须满足全海深设计需要。在设计阶段的窗口结构及支撑壳体的有限元力学分析是十分必要的,初期分析可以预先发现结构问题,合理调整设计参数,可以节约试制成本,缩短研发周期提高成功率,为壳体打压验证实验提供技术保障<sup>[16-17]</sup>。窗口玻璃的位移及形变量还可以为光学系统调焦量提供参考依据。壳体要承受外部高压,采用钛合金(牌号:TC4)材料加工;壳体筒内接近常压,结构组件采用铝合金材料加工。镜组及内结构都固定在尾端盖上,所以高压环境下仅会影响光学窗口与镜组第一片透镜的间距。球罩、镜座及镜筒产生的形变由 Workbench 分析可得,如图 7 所示,在光轴方向其最大移动量为 229.5  $\mu\text{m}$ 。通过凸轮机构调整前组补偿可以保证成像质量。

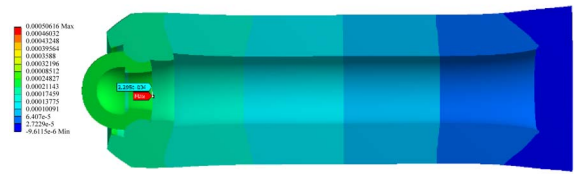


图 7 轴向形变的 Workbench 分析  
Fig. 7 Workbench analysis of axial deformation

光学窗口采用 YAG 透明陶瓷材料制成,材料属性如表 4 所示。利用有限元分析软件 ANSYS 对在高压(120 MPa)使用环境下的光学窗口进行静力分析。壳体材料选用钛合金(TC4),材料属性见表 5。

表 4 YAG 透明陶瓷材料属性  
Tab. 4 Material properties of YAG crystalline ceramics

| 指标                                        | 参数      |
|-------------------------------------------|---------|
| 光谱透过范围/ $\mu\text{m}$                     | 0.2~5.6 |
| 弹性模量/( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$ ) | 235     |
| 抗弯强度/MPa                                  | 280     |
| 抗压强度/MPa                                  | 750     |

表 5 壳体钛合金(牌号:TC4)的材料属性

Tab. 5 Material properties of titanium alloy

| 指标                                        | 参数   |
|-------------------------------------------|------|
| 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )    | 4.62 |
| 弹性模量/( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-2}$ ) | 96   |
| 抗拉强度/MPa                                  | 960  |
| 屈服强度/MPa                                  | 824  |

图 8 与图 9 为系统有限元分析结果。球罩所受最大压应力为 337 MPa, 最大拉应力为 30 MPa, 均小于 YAG 透明陶瓷材料的许用应力, 安全系数为 2.23; 镜座最大等效应力为 296 MPa,

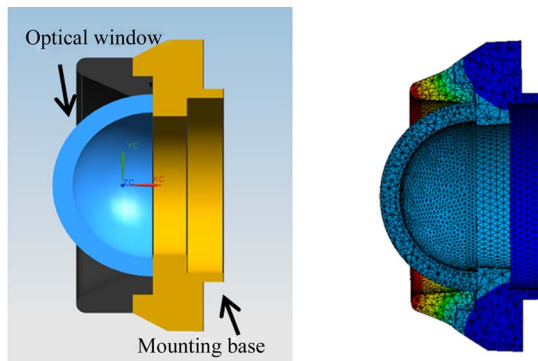


图 8 球罩安装及形变示意图

Fig. 8 Schematic diagram of dome installation and stress deformation

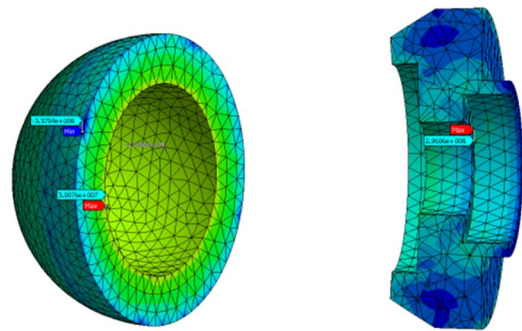


图 9 球罩及安装座应力分布

Fig. 9 Stress distribution of dome and mounting mount

小于钛合金 TC4 的材料许用应力, 安全系数为 3.24, 满足在全海深最大 120 MPa 压力的使用条件。

## 6 结 论

本文根据全海深光学成像需求, 探讨了海水光学特性对光学系统的影响因素, 完成了大视场、大靶面深海成像光学系统设计。利用光学设计软件建模仿真, 该系统全视场的光学传递函数大于 0.3 (@91 lp/mm); 利用有限元分析光学窗口及底座应力, 结果满足 120 MPa 全海深使用条件。该成像系统有望应用在深海生态环境研究、地质地貌勘察、矿产资源勘探等科学领域。

## 参考文献:

- [1] DAVID T. *The Deep-sea Floor: an Overview* [D]. Ecosystems of the deep Ocean. Amsterdam; Elsevier, 2003, V(28): 5-39.
- [2] HUIBERS P D T. Models for the wavelength dependence of the index of refraction of water[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(16): 3785-3787.
- [3] AUSTIN R W, HALIKAS G. The index of refraction of seawater[R]. Defense Technical Information Center, 1976.
- [4] DAN S. A focal viewport optics for underwater imaging[C]. *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XV*, SPIE, 2014, 9192: 91920P-1-13.
- [5] LAIKIN M. Design of an in-water corrector system [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(19): 3777-3780.
- [6] 谢正茂, 董晓娜, 陈良益, 等. 大视场大相对孔径水下专用摄影物镜的设计[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 891-895.
- [7] XIE ZH M, DONG X N, CHENG L Y, et al.. Design for special underwater photography objective lens with wide angle and large relative aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 891-895. (in Chinese)
- [8] 朱彩霞, 闫亚东, 沈满德, 等. 基于水下反恐的微光成像系统[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 220-224.
- [9] ZHU C X, YAN Y D, SHEN M D, et al.. Low-light-level imaging system for underwater anti-terrorism[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 220-224. (in Chinese)
- [10] 杜柯, 程雪岷, 郝群. 深海探测变焦光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 147-153.
- [11] DU K, CHENG X M, HAO Q. Design of optical



- zoom system for deep-sea detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 147-153. (in Chinese)
- [9] 孙传东, 李驰, 张建华, 等. 水下成像镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(5): 5-11.  
SUN CH D, LI CH, ZHANG J H, *et al.*. Optical design of the lens for unerwater imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 5-11. (in Chinese)
- [10] 曹易辉. 水下微光成像镜头的设计和研[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.  
CAO Y H. *Design of Underwater Low Light Imaging System*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013. (in Chinese)
- [11] 范之国, 宋强, 代晴晴, 等. 全局参数估计的水下目标偏振复原方法[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1621-1632.  
FAN Z G, SONG Q, DAI Q Q, *et al.*. Underwater target polarization recovery method based on global parameter estimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1621-1632. (in Chinese)
- [12] 王一斌, 尹诗白, 吕卓纹. 自适应背景光估计与非局部先验的水下图像复原[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(2): 499-510.  
WANG Y B, YIN SH B, LU ZH W. Underwater image restoration with adaptive background light estimation and non-local prior[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(2): 499-510. (in Chinese)
- [13] 全向前, 陈祥子, 全永前, 等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 153-165.  
QUAN X Q, CHEN X Z, QUAN Y Q, *et al.*. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 153-165. (in Chinese)
- [14] 刘庆省, 郭全家, 杨德旺, 等. 小型高灵敏度水下拉曼光谱系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 8-13.  
LIU Q X, GUO J J, YANG D W, *et al.*. A compact underwater Raman spectroscopy system with high sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 8-13. (in Chinese)
- [15] 吴厚德, 侯昱辰, 许文海, 等. 水下自主航行器微光相机驱动系统设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2605-2613.  
WU H D, HOU Y C, XU W H, *et al.*. Design of driving system for AUV low-light level camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2605-2613. (in Chinese)
- [16] 沈凌敏. 水下摄像系统的设计与研究[D]. 北京: 中国科学院, 2009.  
SHEN L M. *Underwater Photoelectrical Imaging Design and Reaserch*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
- [17] 许尧. 几种特殊光学系统的设计及其有限元分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.  
XU Y. *The Design of Several Special Optical Dystems and Finite Element Analysis*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

#### 作者简介:



姜 洋(1984—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2013年于中科院长春光机所获得博士学位,主要研究方向为微光成像及水下光学系统设计。E-mail: le\_zhi@yeah.net



全向前(1989—),男,内蒙古赤峰人,助理研究员,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事深海光学照明与成像方面的研究。E-mial: quanxq@idsse.ac.cn