

应用于海洋监测的水下变焦镜头设计

马海宽^{1,2}, 曹 焯^{1,2}, 褚东志^{1,2}, 吴 宁^{1,2}, 马 然^{1,2}, 张述伟^{1,2}, 史 倩^{1,2}

¹山东省海洋环境监测重点实验室, 山东 青岛 266100;

²山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266100

摘要 设计了大相对孔径的三档变焦光学系统来监控海洋生态监测仪器的工作状态。该系统的设计通过 Zemax 软件实现, 总长度为 200 mm, 系统采用 6.4 mm×4.8 mm 的 CCD 感光板, 三档变焦焦距分别为 8, 14, 28 mm, 变焦过程中相对孔径为 1/1.4, 短焦时最大视场角为 52°。最大视场角下, 当奈奎斯特频率为 42 lp/mm 时, 系统的 0 视场的调制传递函数(MTF)值为 0.8, 0.707 视场的平均 MTF 值为 0.7, 1 视场的平均 MTF 值达 0.6; 10 μm 范围内, 几何包围能量均在 90%; 畸变控制在合理的范围。该系统变焦比高、结构简单、相对孔径大, 适用于海水中海洋生态监测仪器的监控, 能够及时地反馈海洋生态监测仪器的工作状态信息, 大大降低了海洋生态监测仪器的维护成本。

关键词 海洋光学; 水下光学成像; 变焦系统

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100101

Design of Underwater Zoom Lens for Marine Monitoring

Ma Haikuan^{1,2}, Cao Xuan^{1,2}, Chu Dongzhi^{1,2}, Wu Ning^{1,2},

Ma Ran^{1,2}, Zhang Shuwei^{1,2}, Shi Qian^{1,2}

¹Shandong Ocean Environment Monitoring Technology Key Laboratory, Qingdao, Shandong 266100, China;

²Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract In order to monitor the working status of marine ecological monitoring instruments, a three-gear zoom optical system with large relative aperture is designed. This system is designed with Zemax software and its total length is 200 mm. The system uses a 6.4 mm×4.8 mm CCD camera, and the three-gear zoom focal lengths are 8, 14, and 28 mm, respectively. The relative aperture remains at 1/1.4 during zoom process. The maximum field of view is 52° with short focus. At maximum field angle, when the Nyquist frequency is 42 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) of the system at 0 field of view is 0.8, the average MTF is 0.7 at 0.707 field of view, and the average MTF value at 1 field of view reaches 0.6. In 10 μm range, the diffraction encircled energy is 90%, and distortion control is in a reasonable range. The system has high zoom ratio, simple structure and large relative aperture. It is suitable for monitoring the marine ecological monitoring instruments and can timely feedback their working status information. Therefore it greatly reduces the maintenance cost of marine ecological monitoring equipment.

Key words oceanic optics; underwater optical imaging; zoom system

OCIS codes 010.4450; 220.4830; 220.1250; 220.3620

1 引言

在海洋环境监测领域中, 为了保障海洋生态监测仪器能够高效稳定地运行, 先进的海洋水下光学成像技术显得越来越重要。传统的光学水下成像系统是由空气介质中使用的光学系统经过装配隔水密封窗口改造而成的。光在水下及在水与空气的界面传播时会遵循光的反射定律和折射定律, 而海水的折射率和色散易

收稿日期: 2017-05-01; **收到修改稿日期:** 2017-05-11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400801)、海洋公益性行业科研专项(201505007)、山东省重点研发计划(2015GGX103031)、山东省自然科学基金(ZR2014YL006)

作者简介: 马海宽(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学传感器设计方面的研究。E-mail: dzmahaikuan@163.com

受盐度、温度和压力的影响,每提高1%,折射率大约提高0.00185;在10~20℃温度范围内,海水的温度每升高1℃,折射率减小0.0001^[1]。这些现象导致传统水下成像系统工作时镜头的像差过大、视场角变小,不能很好地满足水下成像的要求^[2-4]。

另外,光在水下传输的过程中,海水的吸收和散射等导致光衰减较快,在水质较好的海水中,光也只有十几米的传输距离,所以传统水下成像系统工作距离较短。因此,为满足海洋监测的需求,要增大镜头的相对孔径,以提高水下光的利用率和增加工作距离^[5]。为解决海洋中水下成像的问题,需设计水下专用的工作镜头。目前,已报道的水下成像系统的相对孔径可以控制在1/1.8~1/1.4,视场角达60°,可实现两倍变焦^[2,5-6],这些水下光学成像系统在大变焦比情况下,很难实现大相对孔径和大视场的清晰成像。

水下成像系统的常见窗口类型有平行玻璃平板和半球形窗口,平行玻璃平板窗口比较简单,但是这种类型窗口的隔水密封方式将使光学镜头的视场角变小,而且平行玻璃平板窗口的耐压性较低,不适用于较深的海域。半球形窗口在结构上可承受深水中较大的水压^[3,7],正好弥补了平行玻璃板窗口的不足。

2 海水对光学成像的影响

海水对光束的衰减作用是影响水下成像系统工作性能的重要因素。海水对光束的散射和吸收是限制其传输距离的关键因素。海水中有大量的溶解物质和非溶解物质,溶解物质主要为盐类物质,包含氯化钠、氯化镁、硫酸镁、硫酸钙和硫酸钾等^[8];非溶解物质主要有黄色物质与浮游植物等。海水中这些物质的存在增加了其对光的衰减作用。浊度较高的海域,衰减更为严重^[9-11]。

单色光在海水中传播,海水中物质的吸收所引起的辐射通量损失为: $d\phi = -a\phi dr$,其中 a 为海水吸收系数。考虑黄色物质、浮游植物等对吸收的影响,吸收系数 $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda)$,其中 $a_w(\lambda)$ 、 $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_y(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 分别为水分子、浮游植物、黄色物质和盐类对光的吸收系数, λ 为波长^[12-13]。海水的散射所引起的辐射通量损失为: $d\phi = -b\phi dr$,散射系数 $b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_d(\lambda)$,其中 $b_w(\lambda)$ 、 $b_{ph}(\lambda)$ 、 $b_d(\lambda)$ 分别为水分子、浮游植物、盐类对光的散射系数^[12-13]。海水的散射严重影响了光的传输,大大缩短了水下成像距离,图像的对比度下降,大大降低了成像质量。海水对不同波段的可见光具有不同的吸收效率,在自然光照射下,随着拍摄距离的增加,成像质量亦受影响^[14]。因此,需要设计一种适用于海洋水下工作环境的专用摄像系统。

3 水下变焦成像系统设计

本研究针对工作于海洋中的叶绿素仪、浊度仪、多参数水质仪等海洋生态仪器,设计了海水下变焦光学成像系统。水下变焦成像系统针对海洋生态仪器集成系统进行水下成像,成像目标大小为30 mm×30 mm。成像目标大小、成像距离和焦距的关系为

$$f = h \times \frac{D}{H}, \quad (1)$$

$$f = w \times \frac{D}{W}, \quad (2)$$

式中 f 为成像系统的焦距, D 为成像目标与成像系统的距离, h 和 w 为靶面成像的高度和宽度, H 和 W 为成像目标的高度和宽度。根据(1)和(2)式,取 $f = 8$ mm、 $w \times h$ 为4.8 mm×6.4 mm、 $W \times H$ 为30 mm×30 mm,得成像目标与成像系统距离 D 为50 mm。固定成像系统位置 D ,变换焦距时,可对8 mm单个参数传感器进行清晰成像,观察传感器表面的生物附着情况。

成像光学系统主要由隔水密封窗口、前固定组、变焦组合和后固定组组成,如图1所示。设计光学系统时,变焦方式采用三档机械变焦。变焦过程中保持相对孔径为1/1.4,三档焦距分别为8,14,28 mm,视场角最大可达52°,密封窗口采用半球型密封水窗。水下镜头采用11片透镜,并引入两片非球面透镜,光学系统总长为200 mm。工作焦距为8 mm时,该系统具有较大的视场和观测范围,可以监测多个生态仪器的运行是否正常;工作焦距为14 mm或28 mm时,该系统的视场和成像范围缩小,放大倍率变大,可以对单个仪器表面的生物附着情况进行清晰成像,能够即时反馈信息以保证生态仪器的良好运行。研究设计的海水中的

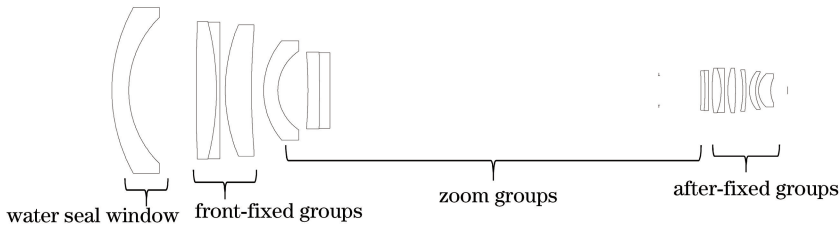


图1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical system layout

光学成像系统,相对现有系统具有大相对孔径、高三档变焦比和大成像视场的优势。

3.1 变焦镜头结构设计

为解决水下工作的难题,更好地监测生态仪器的生物附着情况和仪器运行状态,研究设计了适用于水下工作的摄像镜头。为满足成像的要求,该系统采用 $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ 的成像 CCD,像元尺寸为 $12 \mu\text{m}$,设计中光学窗口外围环境设置为海水。变焦镜头相对孔径 D/f 为 $1/1.4$,三档变焦焦距分别为 $8, 14, 28 \text{ mm}$,最大视场角为 52° 。三档变焦的结构分别如图 2 所示。

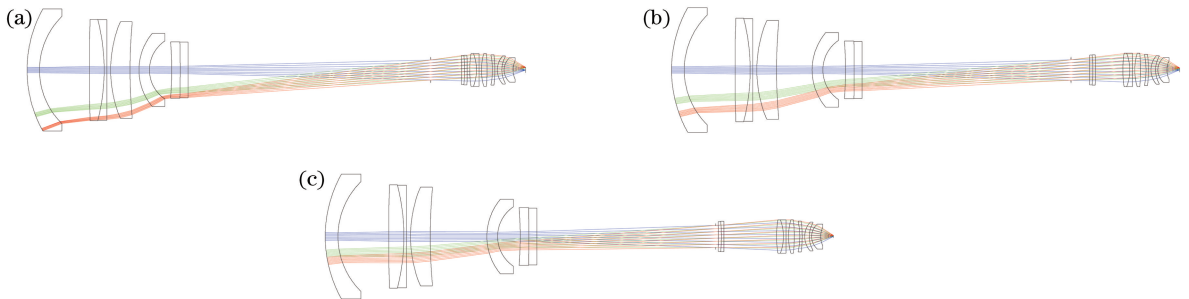


图2 变焦光学系统结构图。(a) 8 mm 焦距;(b) 14 mm 焦距;(c) 28 mm 焦距

Fig. 2 Layout of zoom optical system. (a) Focal length: 8 mm; (b) focal length: 14 mm; (c) focal length: 28 mm

所设计光学系统中,第 5、6、7、8、9 镜片组成变焦组。隔水窗口采用弧形结构的石英玻璃,透射率高,对像质影响小,可以承受深水区的压力。采用 4 片双胶合透镜(SF6 与 N-LAK33、N-LAK33 与 SF6、N-BAK2 与 SF1、N-LAK33 与 SF6)和 2、4 两片非球面镜(SF6、N-LAK33),可以很好地校正近轴球差和部分色差^[15]。非球面透镜满足非球面公式^[16-17]:

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \times (ch)^2}} + a_2h^2 + a_4h^4 + a_6h^6 + a_8h^8 + a_{10}h^{10} + \dots$$

前固定组单透镜材料为 N-LAK33,变倍组单透镜材料为 N-LAF3,后固定组单透镜材料依次为 N-PSk53、SF6、N-FK5、N-LAK14。其中, c 为非球面顶点处的曲率, h 为非球面上任一点到光轴的距离, k 为二次曲面的圆锥系数, a_2, a_4, a_6, \dots 为非球面相对于基准二次曲面的变形系数。

3.2 变焦镜头优化结果

成像光学系统的性能可以用多种形式描述。研究采用光学调制传递函数(MTF)、几何包围圆能量图和场曲畸变曲线来表征设计镜头的质量。在优化过程中,以波长 587 nm 的光消单色相差,系统的光谱设计范围为 $486 \sim 656 \text{ nm}$ 。依据奈奎斯特频率 $N = 1/2d$ (d 为像元大小), N 值为 42 lp/mm ,三档不同焦距的 MTF 见图 3。图 3(a) 为 8 mm 焦距下镜头的 MTF,当 $N = 42 \text{ lp/mm}$ 时, 0 视场的平均 MTF 值达到 0.8 , 0.707 视场的平均 MTF 值为 0.7 , 1 视场的平均 MTF 值为 0.6 。图 3(b) 为 14 mm 焦距下镜头的 MTF,在此焦距下,各视场都能达到较好的效果,且 MTF 值均可达 0.8 。图 3(c) 为 28 mm 焦距下的 MTF,在 $N = 42 \text{ lp/mm}$ 时,各视场 MTF 均值均在 0.8 以上。

图 4(a)、图 5(a)、图 6(a) 分别为三档焦距下的几何包围圆能量图。在距离质心 $10 \mu\text{m}$ 范围内,包围能量均在 90% 。在不同视场下,三种焦距下的相对照度均在 80% 以上。图 4(b)、图 5(b)、图 6(b) 分别为三档焦距下的场曲和畸变, 8 mm 焦距下系统的畸变控制在 20% 左右, 14 mm 焦距下系统的畸变控制在 10% , 28 mm 焦距下系统的畸变控制在 6% 以下。摄像系统主要用于海洋中生态仪器正常运行的长期成像监测,且畸变并不会影响成像的清晰程度,因此可以满足监测的需求。

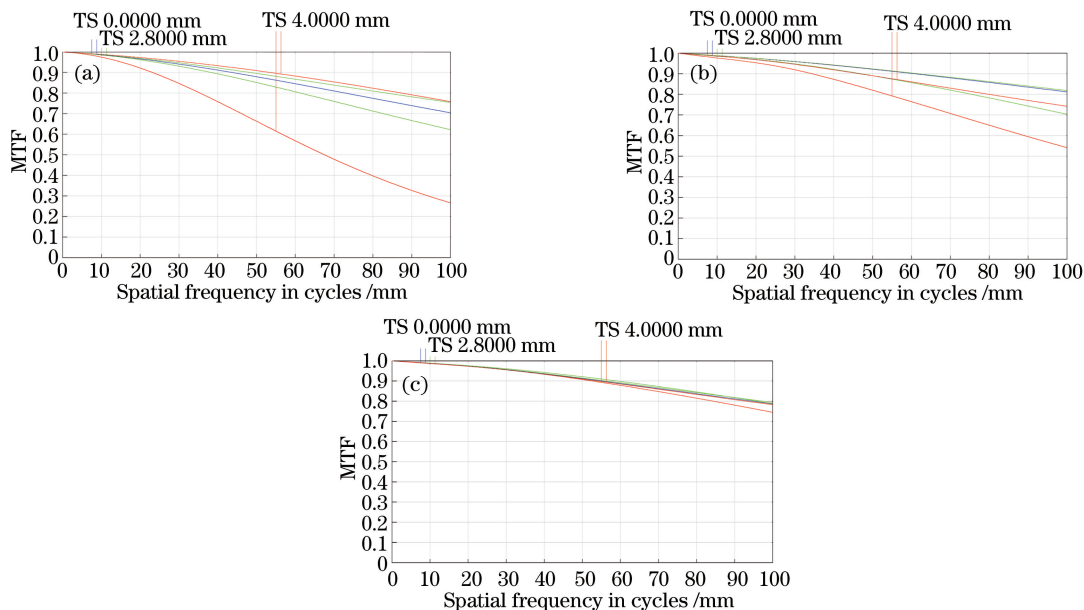


图3 变焦光学系统传递函数。(a) 8 mm 焦距;(b) 14 mm 焦距;(c) 28 mm 焦距

Fig. 3 MTF diagram of zoom optical system. (a) Focal length: 8 mm; (b) focal length: 14 mm; (c) focal length: 28 mm

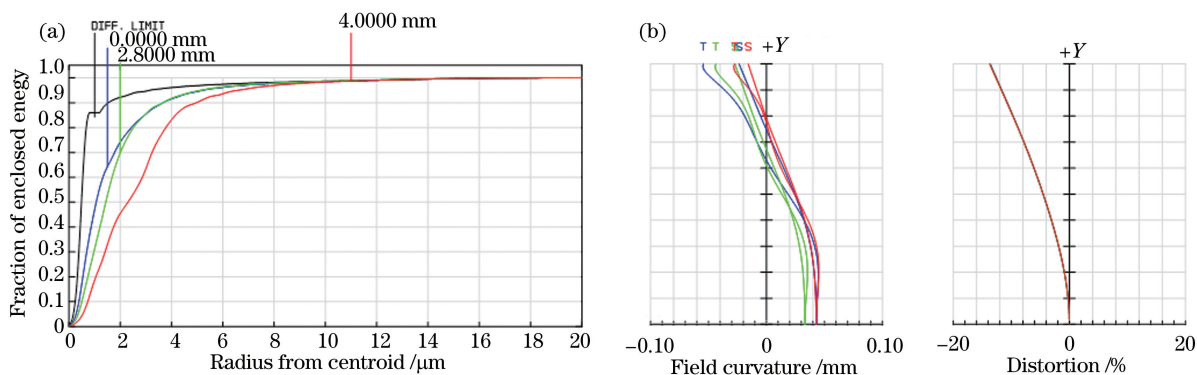


图4 8 mm 焦距系统的(a)包围圆能量和(b)场曲和畸变

Fig. 4 (a) Diffraction encircled energy and (b) field curvature and distortion of the system with the focal length of 8 mm

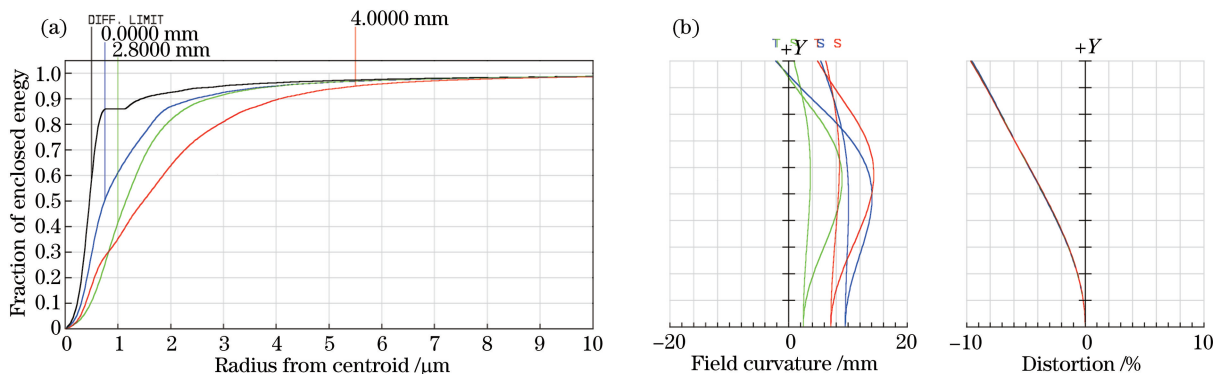


图5 14 mm 焦距系统的(a)包围圆能量和(b)场曲和畸变

Fig. 5 (a) Encircled energy and (b) field curvature and distortion of the system with the focal length of 14 mm

4 结 论

分析了海水对光学成像的影响,利用 Zemax 软件设计并优化了适用于海水的三档变焦光学成像系统。

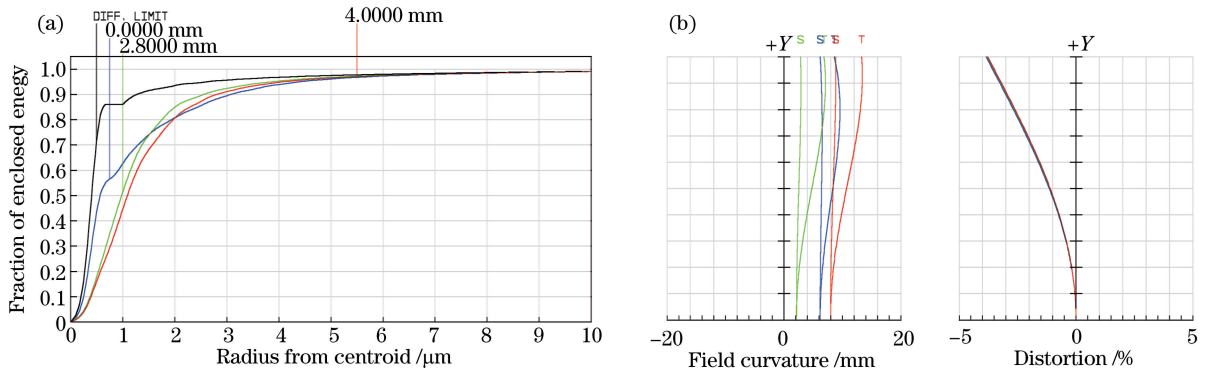


图 6 28 mm 焦距系统的 (a) 包围圆能量和 (b) 场曲和畸变

Fig. 6 (a) Encircled energy and (b) field curvature and distortion of the system with the focal length of 28 mm

光学系统的三档变焦比为 1.8 和 3.5, 变焦过程中相对孔径保持为 1/1.4, 水下最大视场角为 52° , 光学总长为 200 mm。设计的光学成像系统, 结构相对简单, 三档焦距下均具有较好的 MTF 值, 相对照度在 80% 以上, 畸变控制在合理的范围内。光学成像系统在水下工作时, 能够大范围地监控海洋生态仪器的运行状态、小范围地观测仪器表面生物的附着情况, 为仪器的维护和保养节省了人力和成本。

参 考 文 献

- [1] Lai Jin, Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Optical system design[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
莱金, 周海宪, 程云芳. 光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] Xie Zhengmao, Dong Xiaona, Chen Liangyi, 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.
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.
- [3] Sun Chuandong, Li Chi. Optical design of the lens for underwater imaging system [J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 5-11.
孙传东, 李驰. 水下成像镜头的光学设计[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(5): 5-11.
- [4] Laudo J S, Wurm K, Dodson C. Liquid-filled underwater camera lens system[C]. SPIE, 1998, 3482: 698-702.
- [5] Lu Weitao, He Junhua, Yan Yadong. Underwater switch-zoom optical system with middle angle and large relative aperture[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(16): 3675-3678.
卢卫涛, 何俊华, 闫亚东. 中等视场大相对孔径水下两档变焦光学系统[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(16): 3675-3678.
- [6] Xie Zhengmao, Dong Xiaona, He Junhua. Design of underwater low light photographic objective[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 6-10.
谢正茂, 董晓娜, 何俊华. 水下微光摄影物镜的设计和研制[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 6-10.
- [7] Zhai Xuefeng, Dong Xiaona, Wang Guofu, et al. Design of underwater zoom lens[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 416-420.
翟学锋, 董晓娜, 王国富, 等. 水下变焦镜头的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 416-420.
- [8] Zhai Congcong, Han Xueyun, Peng Yufeng, et al. Research on light transmission characteristics of some inorganic salts in seawater[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010101.
翟聪聪, 韩雪云, 彭玉峰, 等. 海水中不同盐分水溶液对光的透射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010101.
- [9] Yang Dingtian, Cao Wenxi, Yang Yuezhong, et al. Optical characteristics of water in the Pearl River mouth[J]. Ecological Science, 2004, 23(1): 1-4.
杨顶田, 曹文熙, 杨跃中, 等. 珠江口水体的光学特征及分析[J]. 生态科学, 2004, 23(1): 1-4.
- [10] Hickman G D, Harding J M, Carnes M, et al. Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 36(3): 165-178.
- [11] Zhao Liancheng, Mao Zhihua, Tao Bangyi, et al. Analysis of uncertainties associated to underwater hyperspectral

attenuation measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0401004.

赵连成, 毛志华, 陶邦一, 等. 水下高光谱衰减测量的不确定度分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0401004.

- [12] Pegau W S, Gray D, Zaneveld J R. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6035-6046.
- [13] Dossommel S M, Zeisse C R, Barrios A E, *et al.* Low-altitude infrared propagation in a coastal zone: refraction and scattering[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(18): 3706-3724.
- [14] Zhang Hui. Analysis of optical properties of water on the influence of optical imaging quality under water[J]. *Electronic Test*, 2013(20): 261-262.
张辉. 水的光学特性对水下光学成像质量影响的分析[J]. *电子测试*, 2013(20): 261-262.
- [15] Bian Yinxu, Wang Heng, Guo Tianyi, *et al.* Design of ultra-short throw ratio projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1222002.
卞殷旭, 王恒, 郭添翼, 等. 超短投影距的投影物镜设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1222002.
- [16] Xu Qiuyun, Xu Chen, Li Bo, *et al.* Optical testing design for plenty of large off-axis aspherical mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012005.
徐秋云, 徐晨, 李博, 等. 大口径批量化离轴非球面镜的检测光路设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012005.
- [17] Zhou Xiangdong, Bai Jian. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白剑. Q-type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0722003.