

深海探测变焦光学系统的设计

杜柯¹ 程雪岷¹ 郝群²

(¹ 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)
(² 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 为了满足深海探测的需求,设计了大相对孔径、水下专用的变焦光学系统。对水下变焦系统的特点和设计方法进行了研究。采用机械式变焦方式,设计了像面尺寸为 $8.8\text{ mm}\times 6.6\text{ mm}$,变倍比为 $2\times$ 的变焦光学系统。变焦过程中光学系统相对孔径保持不变,相对孔径为 $1/1.4$,短焦端的全视场为 66° ,长焦端的全视场为 36° ,有效焦距范围 $5.9\sim 11.8\text{ mm}$ 。变焦系统使用一片高阶非球面,系统总长为 245 mm 。水密窗口采用圆顶壳式水窗,抗静压能力强。在短焦、中焦和长焦位置,空间频率 42 lp/mm 处的轴上视场和 1.0 视场的光学传递函数值均大于 0.6 ,另外系统各变焦位置的最大畸变均小于 5% 。变焦系统结构紧凑,成像质量良好,可以满足实际应用的需要。

关键词 光学设计; 水下光学系统; 变焦系统; 大相对孔径

中图分类号 TH74; TB85 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.092201

Design of Optical Zoom System for Deep-Sea Detection

Du Ke¹ Cheng Xuemin¹ Hao Qun²

(¹ Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)
(² School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract In order to meet the requirements of deep-sea detection, an underwater optical zoom system with large relative aperture is designed. Characteristics and design principles of underwater zoom system are analyzed. The optical system is a mechanically compensated zoom system; its image size is $8.8\text{ mm}\times 6.6\text{ mm}$ with zoom ratio of $2\times$. Its F -number is kept constant at 1.4 during zooming process. In its short focal length mode, its field-of-view (FOV) is 66° , while its FOV in long focal length mode is 36° and its effective focal length ranges from 5.9 mm to 11.8 mm . The zoom system employs one high-order aspheric surface and its overall length is 245 mm . The water-air interface of the zoom system is the concentric lens which is able to withstand high static pressure. For short, middle and long focal length positions, the modulation transfer function (MTF) of the system is always larger than 0.6 for in-axis field and 1.0 field at the spatial frequency of 42 lp/mm . Moreover, the maximum distortion for all zoom positions in the whole FOV is less than 5% . With compact design and high image quality, the zoom system can meet the requirements of practical application.

Key words optical design; underwater optical system; zoom system; large relative aperture

OCIS codes 220.4830; 010.7295; 080.3620

1 引言

随着我国经济和科技的发展,对于海洋开发和探测的研究得到了越来越多的关注,国家近期更是提出了建设“海洋强国”的战略。水下摄影技术作为水下探测的基本手段,受到了广泛关注^[1-2]。由于水介质的光

收稿日期: 2013-04-24; 收到修改稿日期: 2013-05-08; 网络出版日期: 2013-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61275003)、教育部博士点基金(20101101110016)、深圳市基础研究计划(JC201005310719A)、“防生机器人与系统”教育部重点实验室2012年开放基金

作者简介: 杜柯(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: rcasio@163.com

导师简介: 程雪岷(1976—),女,博士,副研究员,主要从事光学设计优化算法、目标探测等方面的研究。

E-mail: cheng-xm@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

学特性与空气不同,如果将地面光学成像系统经过防水密封后直接用于水下,不但会造成视场损失和聚焦误差,像差也发生变化,从而使成像质量变差、图像变形、清晰度降低^[3-5]。为了实现较高的成像质量,需要设计水下专用光学系统。由于水介质的吸收和散射特性,使得光能迅速衰减,光学系统的工作距离很短,此即水下光学系统的微光特性^[5-6]。根据光学系统的像面照度公式^[5]可知,当系统焦距、目标亮度、水路径衰减系数以及水的折射率不变时,水下光学系统的像面照度与通光口径的平方成正比。

为了提高水下光学系统的光能利用率和工作距离,需要设计大通光口径的光学系统。为了实现大的观测范围,水下成像光学系统需要有较大的视场。水下光学系统的水密窗口不仅影响水下光学系统的防水密封性,还会影响光学系统的成像质量。水密窗口有两种形式,一种是平板式,一种是圆顶壳式。两种水密窗口各有优缺点^[4-5,7]。水窗的设计需要考虑水下的光谱特性、抗压强度和透射率等因素。

2007年以前报道的水下成像系统其相对孔径一般在 $1/2.8\sim 1/2.0$,水下全视场角低于 40° ^[3,7-8],而2007年之后的设计其相对孔径为 $1/1.8\sim 1/1.4$,视场角大于 60° ^[9-11],上述光学系统都是定焦系统。变焦系统可以实现对目标连续变倍率成像,已有的报道分别实现了 $1.28\times$ 连续变焦^[4]和 $2\times$ 非连续变焦^[12]的水下成像系统,前者变倍比过小,后者虽然实现了两倍变焦,但是其变焦是非连续的。

本文采用机械式变焦,设计了 $2\times$ 连续变焦的水下光学系统。变焦过程中系统的相对孔径保持不变, F 数为 1.4 ,满足大通光口径的要求。水中短焦端的全视场为 66° ,长焦端全视场为 36° 。对于深海水下环境,光学系统需要有较强的抗静压能力,本文的水下变焦系统选择圆顶壳式的水窗。该变焦系统结构紧凑,成像质量高,可满足水下探测要求。

2 水下变焦系统的设计方法

2.1 水下光学系统的参数设定

由于水下的微光特性,本文的设计采用高信噪比、低照度的CCD摄像器件。具体参数为:最小照度 0.001 lx ,信噪比 50 dB ,像素单元尺寸为 $12\ \mu\text{m}$,CCD成像器件的靶面为 $2/3\text{ inch}$ ($1\text{ inch}=2.54\text{ cm}$)。

根据使用要求和当前技术条件,水下变焦系统的 F 数为 1.4 ,可以满足像面照度的要求。变焦系统在水中短焦端的全视场为 66° ,长焦端的全视场为 36° 。变焦系统的光焦度范围为 $5.9\sim 11.8\text{ mm}$ 。

成像光学系统在没有渐晕的情况下,边缘视场的相对照度满足余弦四次方定律:

$$E' = E_0 \cos^4 \omega, \quad (1)$$

式中 E' 和 E_0 分别为边缘视场照度和轴上视场照度, ω 为物方半视场角^[13]。短焦端的像方半视场角为 33° ,此时边缘视场照度只有中心视场照度的一半。但是对于微光系统,像面照度应具有较好的均匀性^[14-15],因此引入负畸变以提高轴外视场的像面照度^[13]。为了保证变焦系统在变焦过程中像面照度不发生变化,要求变焦过程中系统的拉赫不变量(nu_y)恒定。因此将系统光阑放置在运动组元之后,使得出瞳大小和位置不变,从而满足 nu_y 恒定。

设计的水下连续变焦系统用于环境监测和目标监测,要求系统相对畸变在 5% 以内。作为水下光学系统,对非寻常光(e光)消单色像差,系统光谱范围 $0.48\sim 0.6\ \mu\text{m}$ 。

2.2 光学系统设计与优化

水下变焦系统的设计既要保证在变焦过程中像面位置保持不变,还要满足成像质量的要求。水下变焦系统的设计分为高斯参数求解和像差设计两个阶段。变焦系统的高斯参数决定光学系统的结构形式,并影响系统最终的成像质量,因此合理分配系统的光焦度十分重要^[16-19]。通过高斯求解,合理地选取光学系统结构,以满足系统变倍比、色谱等要求,完成高斯解后利用高斯括号法求得各组元的初始结构,然后利用光学软件优化,完成系统的设计。由于水下变焦光学系统有较大的相对孔径和视场,为了保证成像质量,需要选择合理的结构尽量减小高阶像差。为了得到大视场,除了消除位置色差、球差、彗差之外,还要考虑像散、场曲、畸变及倍率色差的问题。

采用正组补偿的变焦系统,长度较长,口径较小,前固定组焦距较长,二级光谱较小。采用负组补偿的变焦系统,长度较短,但口径较大,前固定组焦距较短,二级光谱较大^[16,17]。本文采用负组补偿的形式。变焦系统选用一一十十的结构,理想高斯模型如图1所示,其中 Φ_1, Φ_2, Φ_3 和 Φ_4 分别为前固定组,补偿组,变倍

组和后固定组。各组的焦距分别为 f'_1, f'_2, f'_3 和 f'_4 。长焦和短焦时各组元的间隔分别为 e_{11}, e_{21}, e_{31} 和 e_{1s}, e_{2s}, e_{3s} 。图 1 中 IMA 为像面, e_4 为系统的后工作距。

设计系统在长焦和短焦位置补偿组满足物像交换原则,以使得系统总长最短^[17]。以短焦为计算初始位置,取归一化值 $f'_3 = 1, e_{3s} = 0.5$, 组元 Φ_3 的放大率为 $m_{3s} = -\frac{1}{\sqrt{\Gamma}}$, 其中 Γ 为变倍比。为保证各组元不相撞, $e_{1s} = 0.25, e_{2s} = 1.8$, 后工作距 $e_4 = 0.3$ 。根据高斯成像原理^[17], 有

$$m_{2s} = [m_{3s}(f'_2 + f'_3 - e_{2s}) - f'_3] / f'_2 m_{3s}, \quad (2)$$

$$f'_1 = e_{1s} + (1/m_{2s} - 1)f'_2, \quad (3)$$

$$f'_4 = e_4 [(1 - m_{3s})f'_3 - e_{3s}] / [(1 - m_{3s})f'_3 - e_{3s} - e_4], \quad (4)$$

式中 m_{2s} 为组元 2 在短焦时的放大率。

取 $f'_2 = -1.56$, 可得 $m_{2s} = 0.6, f'_1 = -0.79$ 和 $f'_4 = 0.4$ 。从短焦到长焦, Φ_3 从右向左移动。为保证像面位置不变, $e_{31} = 0.5 + f'_3(m_{3s} - m'_{3s})$ 。设任意变焦位置处, 组元 Φ_3 的倍率为 m'_{3s} , 其相对短焦时位移量为 q 。设此时组元 Φ_2 的倍率为 m'_2 , 位移量为 Δ 。若组元向右移动, 则位移量为正, 否则为负。变焦组元的位移曲线计算公式^[17]如下:

$$m'_{3s} = q/f'_3 + m_{3s},$$

$$b = -\frac{f'_3}{f'_2} \left(\frac{1}{m'_3} - \frac{1}{m_{3s}} + m'_3 - m_{3s} \right) + \left(\frac{1}{m_{3s}} + m_{3s} \right),$$

$$m'_2 = (b - \sqrt{b^2 - 4})/2,$$

$$\Delta = f'_2 \left(\frac{1}{m'_2} - \frac{1}{m_{2s}} \right),$$

$$e'_3 = e_{3s} - q,$$

$$e'_1 = e_1 + \Delta. \quad (5)$$

图 2 是变焦系统组元位移变化曲线。可以看出, 补偿组在短焦和长焦时的位置相同, 满足物像交换原则。

考虑光学系统像方远心的结构, 将系统光阑置于后固定组的物方焦点位置。根据变焦系统高斯解, 可以求解出各组的第一辅助光线高度和第二辅助光线高度^[17], 由此确定各组元的结构型式。各组的相对孔径都小于 $1/2$, 因此球差都较小。前固定组采用两个单透镜, 主要是校正像散和场曲。前固定组的彗差和色差需要由后组进行补偿。变焦组和补偿组其结构选择为单双或双单的形式, 以校正色差。变焦组和补偿组的彗差和像散符号相反, 从而进行相互补偿。补偿组的第二辅助光线高度很大, 因此其胶合面弯向系统光阑。后固定组的相对孔径较大, 另外还需要补偿前组的剩余像差, 因此采用双单的结构。在设计中, 前固定组自身没有消色差, 系统的变焦和补偿组元在变焦过程中对系统色差进行补偿, 令初阶色差系数 C_I 和 C_{II} 约束在 0.001 以内, 来控制变焦系统的系统色差。同时, 选定大焦距的前固定组, 可以有效地减小系统的二级光谱。根据各组元的三阶像差系数的高斯括号法表达式^[20], 合理设置其数值范围, 利用最小二乘法, 可以求解出组元的初始结构。三阶像差系数与初始结构的关系为^[20]。

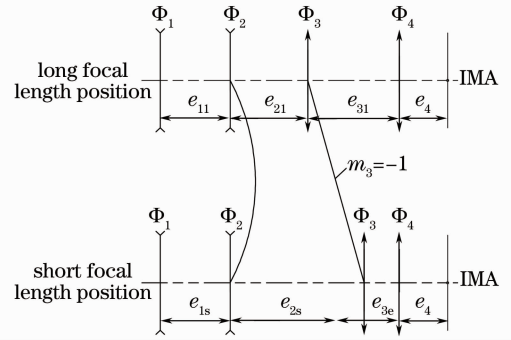


图 1 水下变焦系统的高斯模型

Fig. 1 Gaussian model of underwater zoom system

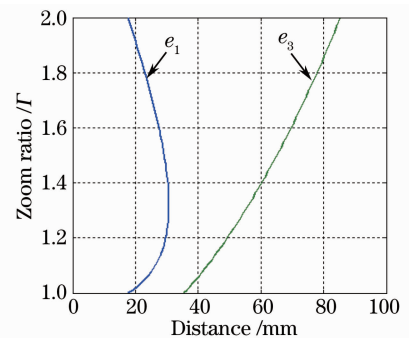


图 2 变焦组元的位移变化曲线

Fig. 2 Displacement curve of the zoom groups

$$\begin{cases} S_{\text{I}} = u_0^4 \sum a_j^2 g_{2j-1} \omega_j \\ S_{\text{II}} = u_0^3 \sum a_j b_j g_{2j-1} \omega_j \\ S_{\text{III}} = u_0^3 \sum b_j^2 g_{2j-1} \omega_j \\ S_{\text{IV}} = H^2 \sum k_j / n_j n_{j-1} \\ S_{\text{V}} = u_0 \beta^3 \sum b_j / a_j (b_j^2 g_{2j-1} \omega_j + d_0^2 k_j^2 / n_j n_{j-1}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} a_j = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-1}/n_{j-1}, -c_j n_{j-1}] \\ b_j = 1 \quad \text{for } j = 1 \\ b_j = [-d_1/n_1, k_2, \dots, -c_j n_{j-1}] \text{ for } j > 1 \\ \omega_j = g_{2j}/n_j^2 - g_{2j-2}/n_{j-1}^2 \\ g_{2j} = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-1}/n_{j-1}, k_j] \\ g_{2j-1} = [-d_0, k_1, \dots, k_{j-1}, -d_{j-1}/n_{j-1}] \\ g_{2j-2} = [-d_0, k_1, \dots, -d_{j-2}/n_{j-2}, k_{j-1}] \end{cases}. \quad (7)$$

补偿组中包含一个非球面,非球面的方程为 $Z = cr^2 / \{1 + [1 - (1 + K)c^2 r^2]^{1/2}\} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10}$,其中 K 为 conic 系数, A 、 B 、 C 和 D 分别为高阶非球面系数。对于补偿组初始结构的求解需要考虑非球面系数对三阶像差的影响^[21]。表 1 给出四个组元的初始结构的求解结果。

表 1 四个组元的初始结构求解结果

Table 1 Solutions of the initial structure of four groups

	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
Front fixed group	49.480	13.000	Silica
	36.480	5.001	
	47.800	8.000	HK2
	31.119	—	
Compansated group	-83.965	10.922	HK2
	25.142*	5.970	
	163.252	5.500	Hlaf3B
	33.364	16.000	ZF52
	-116.250	—	
Zoom group	104.942	19.359	HZK4
	-38.672	5.501	ZF6
	-139.635	0.500	
	Infinity	8.187	HK7
	-72.348	—	
Rear fixed group	-21.093	5.300	ZF11
	153.873	6.077	Hlak52
	-29.779	0.100	
	45.851	5.500	Hlak52
	-319.798	23.436	
	16.083	9.950	HZlaf1
	21.929	—	

* Aspheric coefficients, $K = -0.764$, $A = -0.870 \times 10^{-5}$, $B = C = D = 0$

将以上设计得到的初始结构代入 CODE V 软件,最后的优化结果如图 3 所示,图 3(a)~(c)分别对应变焦系统的短焦、中焦和长焦位置,系统总长为 245 mm。光学系统总共 12 片,选用 7 种玻璃 HK2,ZF2,ZF4,ZF52,HZK11,HZK9B 和 Hlaf54。前固定组由圆顶壳式水窗和一个弯月形透镜组成。补偿组由一个含 10 阶非球面的透镜和一个双胶合透镜组成。高阶非球面有利于校正系统的高阶球差和畸变。补偿组中的

双胶合透镜的胶合面曲率半径比较小,胶合面两边玻璃材料的折射率差也较小($\Delta n=0.02$),因此光线在胶合面的入射角比较大,有较大的高阶像差,其正负号与后组透镜的高阶像差相反,因此可以相互补偿。变焦组由一个双胶合透镜和凸透镜组成,其彗差和像散与补偿组正负号相反。由于后固定组之前的透镜组对光线的发散作用,使得后固定组的光线偏折比较小,其轴外像差相对要小,主要用来校正轴上点球差以及补偿前组产生的轴外像差。

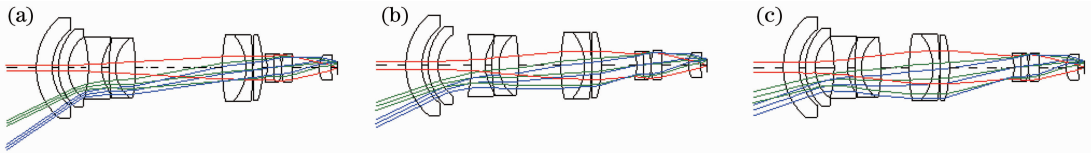


图3 变焦光学系统结构图。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 3 Optical layout of zoom system. (a) Short effective focal length (EFL); (b) middle EFL; (c) long EFL

3 像质评价

表2给出变焦系统点列图的均方根(RMS)直径数值,各变焦位置不同视场的RMS直径均小于 $12\ \mu\text{m}$,都在一个像素单元以内。

图4是变焦系统的调制传递(MTF)曲线,变焦系统在短焦、中焦和长焦位置的各个视场在奈奎斯特频率($42\ \text{lp/mm}$)处的MTF值均大于0.6。其中0.7视场的子午方向和弧矢方向MTF的平均值大于0.7。

表2 点列图RMS直径

Table 2 Spot diagram RMS diameter

Field	0	0.7	10
RMS diameter for short EFL / μm	6.211	8.196	10.275
RMS diameter for middle EFL / μm	5.178	7.883	8.432
RMS diameter for long EFL / μm	9.163	7.175	10.753

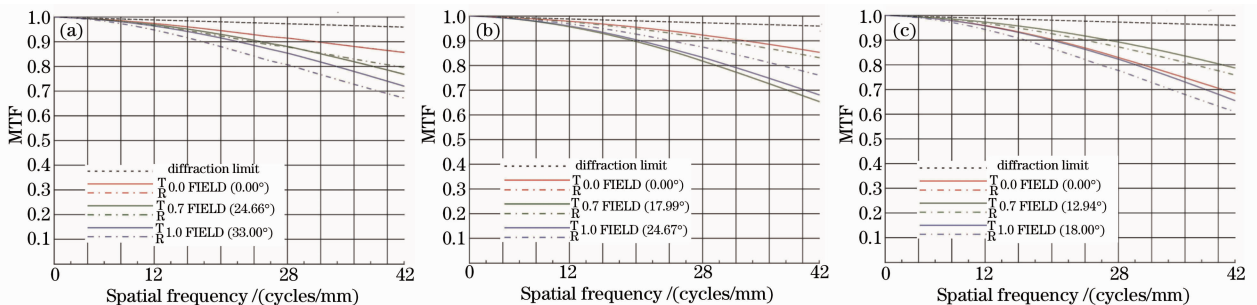


图4 光学传递函数。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 4 MTF diagram. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

图5是变焦系统的纵向球差、场曲和畸变曲线,在光谱范围内,边缘视场最大像散小于 $0.02\ \text{mm}$,二级色谱小于 $0.04\ \text{mm}$,相对畸变在5%以内。

图6是变焦系统的衍射包围圆能量曲线。如图所示,在各变焦位置,75%的能量都在一个像素单元以内。图7是变焦系统的相对照度曲线。如图所示,各变焦位置边缘视场的相对照度大于98.6%。

4 结 论

水下连续变焦光学系统需要满足变焦过程中变焦组元凸轮曲线连续平滑、像面照度均匀性和像质校正要求等限制,而对于用于深海探测的光学系统,特别提出了结构紧凑的要求,以减小深潜器载荷。本文分析了系统构型、消色差、像面照度均匀的设计原理,以及满足物像交换原则时变焦组元倍率计算方法,给出了可工程化的水下连续变焦光学系统设计思路。该光学设计采用像方远心结构,通过四组元由负组元进行变焦补偿的光学结构布局,实现了采用圆顶壳式水窗的 $2\times$ 变焦距光学系统紧凑结构设计,系统 F 数达到1.4,长焦端全视场

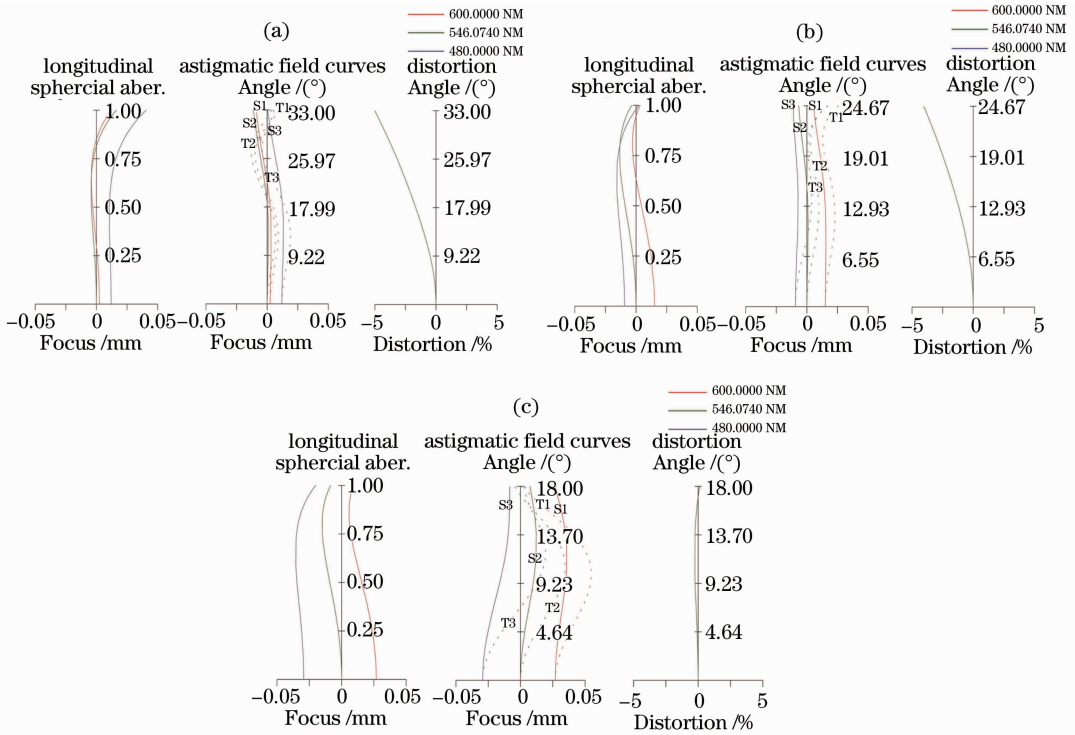


图 5 纵向球差,场曲和畸变。(a) 短焦;(b) 中焦;(c) 长焦

Fig. 5 Longitudinal spherical aberration, field curves and distortion. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

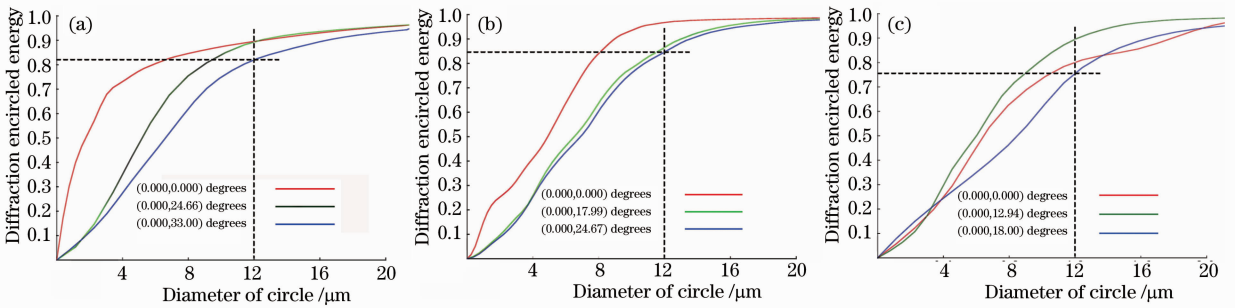


图 6 包围圆能量。(a) 短焦;(b) 中焦;(c) 长焦

Fig. 6 Diffraction encircled energy. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

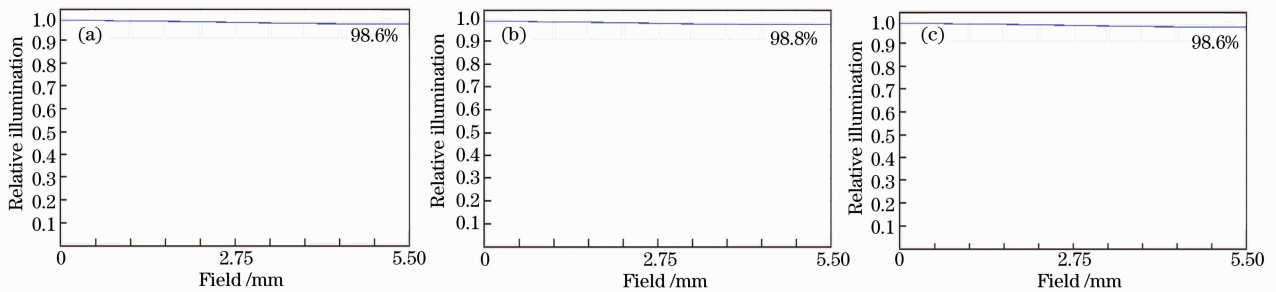


图 7 相对照度。(a) 短焦;(b) 中焦;(c) 长焦

Fig. 7 Relative illumination. (a) Short EFL; (b) middle EFL; (c) long EFL

角为 36° ,短焦端全视场角为 66° 。在整个变焦过程中,凸轮曲线平滑,空间频率为 42 lp/mm 处的全视场光学传递函数大于 0.6,系统在 $12 \mu\text{m}$ 的像素尺寸内能量集中度大于 75%。在边缘视场引入适量畸变(小于 5%),因而像面具有较好的均匀性,边缘视场相对照度为中心视场的 98.6%。连续变焦的系统设计考虑了深潜器对大范围搜索和确定目标的应用需求,且具有很好的像面照度均匀性,可以满足实际需要。

参 考 文 献

- 1 Andrew J W, John D P, Dan C. The development of a compact underwaterstereoscopic video camera[C]. SPIE, 1997, 3012: 92-95.
- 2 Gary M T. Area reconnaissance, object relocation, and classification using cooperating autonomous underwater vehicles [C]. SPIE, 1999, 3711: 195-202.
- 3 Sun Chuandong, Li Chi, Zhang Jianhua, *et al.*. Optical design of the lens for underwater imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 5-11.
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.
- 4 Zhai Xuefeng, Dong Xiaona, Wang Guofu, *et al.*. Design of underwater zoom lens[J]. J 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.
- 5 Modunce L E. Underwater Photography[M]. Zhang Wendi Transl. Beijing: Science Press, 1979.
默顿斯 L E. 水中摄影学[M]. 张闻迪 译. 北京: 科学出版社, 1979.
- 6 Sun Chuandong, Chen Liangyi, Gao Limin, *et al.*. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. J Applied Optics, 2000, 21(4): 39-46.
孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4): 39-46.
- 7 Clinton E, Rekhad D. Tale of two underwater lenses[C]. SPIE, 1991, 1537: 203-214.
- 8 Xi Lifeng, Cai Jianguo, Chen Liangyi, *et al.*. Research on underwater television camera[J]. J Shanghai Jiao Tong University, 1997, 31(6): 129-132.
奚立峰, 蔡建国, 陈良益, 等. 水下电视摄像系统的研制与开发[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(6): 129-132.
- 9 Zhu Caixia, Yan Yadong, Shen Mande, *et al.*. Low-light-level imaging system for underwater anti-terrorism[J]. J Applied Optics, 2008, 29(2): 220-224.
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.
- 10 Xie Zhengmao, Dong Xiaona, He Junhua. Design of underwater low light photographic objective[J]. J 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.
- 11 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.
- 12 Lu Weitao, He Junhua, Yan Yadong, *et al.*. 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, 等. 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.
- 13 Xue Qingsheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(1): 15-20.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 15-20.
- 14 Zhao Qiuling, Wang Zhaoqi, Sun Qiang, *et al.*. Design of refractive/diffractive optical system for head-mounted night vision goggle[J]. J Optoelectronics • Laser, 2004, 15(7): 759-762.
赵秋玲, 王肇圻, 孙 强, 等. 用于头盔微光夜视仪的折/衍混合光学系统设计[J]. 光电子 • 激光, 2004, 15(7): 759-762.
- 15 Yang Shengjie. Optical design for high resolution cooled mid-wavelength infrared wide-angle imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0822003.
杨胜杰. 高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0822003.
- 16 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2674-2679.
陆 强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2674-2679.
- 17 Tao Chunkan. Zoom System Design[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- 18 Cheng X M, Wang Y T, Hao Q, *et al.*. Automatic element addition and deletion in lens optimization[J]. Appl Opt, 2003, 42(7): 1309-1317.
- 19 Cheng X M, Wang Y T, Hao Q, *et al.*. Expert system for zoom lens design[C]. SPIE, 2004, 5249: 419-424.
- 20 Sung Chan Park. Zoom system design of 14× using optimized lens modules[C]. SPIE, 1997, 3129: 60-67.
- 21 J Meiron. On the design of optical systems containing aspheric surfaces[J]. J Opt Soc Am, 1956, 46(4): 288-292.