



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目：大视场高分辨率全海深探测变焦光学系统设计
作者：王雪峰，颜昌翔，王晓东，顾志远
网络首发日期：2022-07-16
引用格式：王雪峰，颜昌翔，王晓东，顾志远. 大视场高分辨率全海深探测变焦光学系统设计[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220713.1942.595.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大视场高分辨率全海深探测变焦光学系统设计

王雪峰^{1,2}, 颜昌翔¹, 王晓东¹, 顾志远^{1*}

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足深海探测需求, 实现深海中更高质量成像, 设计了深海中专用的连续变焦光学系统, 该系统同时具备短焦大视场、高分辨率、高变倍比的特点。根据在深海中使用环境, 考虑了深水压对光学窗口挤压变形造成的像质下降, 对光学窗口进行了光机集成分析, 将面形变化结果以 zernike 多项式形式带入到光学系统中进行优化。对水下光学像差特点和变焦系统的设计方法进行了研究后, 光学系统采用机械式负组补偿变焦方式, 像方远心设计方案。该系统工作距为 5m, 变焦全程 F 数恒定为 3.0, 可实现全视场 $5.7^\circ \sim 90^\circ$, 10 倍连续变焦。变焦系统使用三片非球面, 系统总长为 260mm。在 208lp/mm 处, 整个变焦区域内全视场的调制传递函数 (MTF) 值均大于 0.3, 另外系统各变焦位置的最大畸变均小于 3%。变焦系统结构紧凑, 成像质量良好, 变焦曲线平滑, 可以满足实际应用的需要。

关键词 海洋光学; 光学设计; 光机集成分析; 高分辨率; 高变倍比; 大视场

中图分类号 0436 **文献标志码** A

Design of zoom optical system for deep-sea detection with large field of view and high resolution

Wang Xuefeng^{1,2}, Yan Changxiang^{1,2}, Wang Xiaodong^{1,2}, Gu Zhiyuan^{1,2*}

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

² Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to meet the needs of deep-sea exploration and achieve higher quality optical imaging in the deep sea, a continuous zoom optical system for underwater is designed, which has the characteristics of large field of view, high resolution and high zoom ratio at the same time. According to the operating environment in deep sea, the image quality degradation caused by the extrusion deformation of the optical window caused by deep water pressure was considered, the integrated optomechanical analysis of the optical window was carried out, and the surface shape change results were substituted into the optical system in the form of Zernike polynomial for optimization. After studying the characteristics of underwater optical aberration and the design method of zoom system, the optical system adopts mechanical negative group compensation zoom method and image square telecentric design scheme. The working distance of the system is 5m, the f-number of the whole zoom is constant 3.0, and the system can achieve

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (61805235)、2019-长光复旦-纳米表面结构窄带滤波片及光谱成像上的应用研究 (Y9R633A190)

通信作者: *E-mail: zhiyuangu@gmail.com

the full field of view of $5.7^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 10 times of continuous zoom. The zoom system uses three aspheric surfaces with a total length of 260mm. At 200lp/mm, the MTF values of the whole field of view in the whole zoom area are greater than 0.3, and the maximum distortion of each zoom position of the system is less than 3%. The zoom system features compact structure, good imaging quality and smooth zoom curve, which can meet the needs of practical applications.

Key words ocean optics; optical design; integrated optomechanical analysis ; high resolution; high zoom ratio; large field of view

OCIS codes 010.4450; 220.4830; 080.3620; 220.1250

1 引言

党的十八大明确提出要建设“海洋强国”，这样就必须深海探测方面掌握先进技术，水下光学成像技术作为探测的基本手段就显得尤为重要。由于水介质的光学特性与空气不同，如果将地面光学成像系统经过防水密封后直接用于水下，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^[1-3]，所以设计出深海专用的光学系统十分必要^[4-6]。而连续变焦光学系统不仅可以实现大视场的搜索探测，还能实现小视场的跟踪观察，同时不会造成目标的丢失^[7]，对实现更高质量的成像具有重要意义。

2007 年，翟学锋^[8]设计了一款变倍比为 1.28，短焦全视场为 40° 的水下连续变焦光学系统；2011 年，卢卫涛^[9]设计一款两档变焦，短焦全视场为 60° 的水下非连续变焦光学系统；2013 年，杜柯^[10]设计了应用于深海探测的两倍连续变焦光学系统，其短焦全视场为 66° ；2017 年，马海宽^[11]设计了一款应用于海洋监测的三挡变焦，短焦全视场为 52° 的非连续变焦光学系统；以上光学系统要么是变倍比较小，主要用于大视场监视，要么就为非连续变焦，无法实现变焦过程对水下影像连续获取，而且分辨率普遍较低。2021 年，曲锐^[12]完成了一个短焦全视场 62° ，4K 分辨率的深海连续变焦光学系统设计。以上变焦光学系统在短焦处全视场普遍较小，而且都没有考虑深海水压对水下光窗挤压变形对成像质量的影响。

针对以上问题，本文采用机械补偿式变焦，设计了短焦大视场、高分辨率、应用于深海的 10 倍连续变焦光学系统。从设计考量与指标确认、深海环境下光窗的选型与分析、水下变焦系统设计与优化三个方面出发，阐述了一种应用于深海中大视场连续变焦光学系统的设计方法。该变焦系统结构紧凑，成像质量高，可满足深海探测要求。

2 设计思路

2.1 设计考量及指标

对于应用于深海的光学系统设计，有以下几点考量：

1. 深海折射率不同于普通浅水区，11000 处海水折射率约为 1.339，此处水温在 2 ~ 3℃，

2. 水的可见光光谱响应特性不同于空气，水的透射窗口在蓝绿波段，像差校正时应将 e 光(546 nm) 作为消单色像差谱线, 系统光谱范围为 480~644nm。

3. 水下光学系统工作时必须抗住一定静水压，这一点对水下系统很重要，对于深水系统尤为突出。因此在设计水下系统时，必须保证系统第一片透镜具有足够的抗静水压的强度，以便在系统工作时足以抵抗工作环境的静水压而不致损坏。

4. 由于海水对可见光的强吸收与散射，深海中已经没有自然光线，要借助光源照明，由公式 (1) 可知深海中的光学系统就需要较小 $F/\#$ 的来提高像面照度^[15]。但是由于海水的散射效应，景深会变得退化严重，这样太小的 $F/\#$ 会限制清晰成像范围，经仔细均衡后，取系统的 F 数恒定为 3.0，F 数恒定也尽可能地保证了变焦过程中像面照度稳定。

$$E_t = \frac{\pi B}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \frac{T}{n_\omega^2} \quad (1)$$

式中：B 为未衰减的光照度； n_ω 为海水的折射率；T 为水路径衰减系数。

由于深海下的微光特性^[13-14]，本文采用了 4096*2160 的高灵敏度 CMOS 面阵探测器，像素单元尺寸为 2.4 μm，探测器靶面尺寸为 2/3inch，对角线尺寸为 11mm。短焦半视场为 45°，该系统工作距离为 5m, 远大于焦距，光学系统的短焦焦距可用下式计算：

$$f_s = \frac{y}{n \tan \theta} = \frac{5.5}{1.339 \cdot \tan 45^\circ} = 4.1(\text{mm}) \quad (2)$$

式中：y 为像面对角线一半，f 为焦距，θ 为半视场角，n 为海水的折射率。

本设计为 10 倍连续光学变焦，长焦处焦距为：

$$f_l = 10 * 4.1 = 41(\text{mm}) \quad (3)$$

$$\text{长焦处视场为: } \theta = \arctan \frac{y}{n * f_l} = \frac{5.5}{1.339 * 41} = 5.7^\circ \quad (4)$$

式中：θ 为视场角；l 为相机像面对角线长度；f 为镜头焦距。相应技术参数如表 1 所示。

表1技术参数
Table 1 Technical parameters

Parameter	Value
-----------	-------

Focal length	4.1mm~41mm
Diagonal field of view	5.7°~90°
Zoom ratio	10
Distortion	≤3%
MTF	@208lp/mm>0.3
F-number	3.0
Work wavelength	480nm~644nm
Working distance	5m
Working depth	11000m

2.2 水下光窗选型与分析

球罩和平板是两种典型的水下光窗形式，球罩形状的水下光窗在抗压方面比平板更有优势，而且球罩也比平板所获得的视场大很多，所以我们选择球罩形状的光窗。我们又选用蓝宝石玻璃作为光窗材料，它具有优良的光谱特性，有较好的化学稳定性，耐酸性能好，比重小，膨胀系数小，抗压强度相当高，抗弯强度也不错^[16-18]。

该设计水下工作深度为 11000m，此处的海水静压可达 120MPa，会造成光学窗口的形变，进而降低成像质量。因此对隔水视窗进行光机集成分析^[19]十分必要。利用有限元软件 Patran & Nastran 对隔水视窗进行有限元分析，用 Patran 软件对蓝宝石隔水视窗进行前处理，生成各组元在透镜前后表面节点位置的 bdf 文件。用 Nastran 软件解算受静水压变形后镜面节点的刚体位移并生成变形后透镜前后表面节点扰动的 pch 文件。然后，再进行光机数据转换，生成可由 CODEV 读取的 seq 文件，文件中为用 zernike 多项式拟合^[20-21]的镜面面型，由图 1 可以看出拟合出来的镜面面形比较准确，误差在 0.01waves 级别。表 2 为导入到 codev 的镜面面形参数，经过对比，前后两表面的 zernike 系数与 sigfit 生成的 zernike 系数完全一致。最后再进行光学系统的优化，这样不仅模拟出光学窗口受深海静水压引起的面形变化，又减小了光窗面形变化对像质的影响。

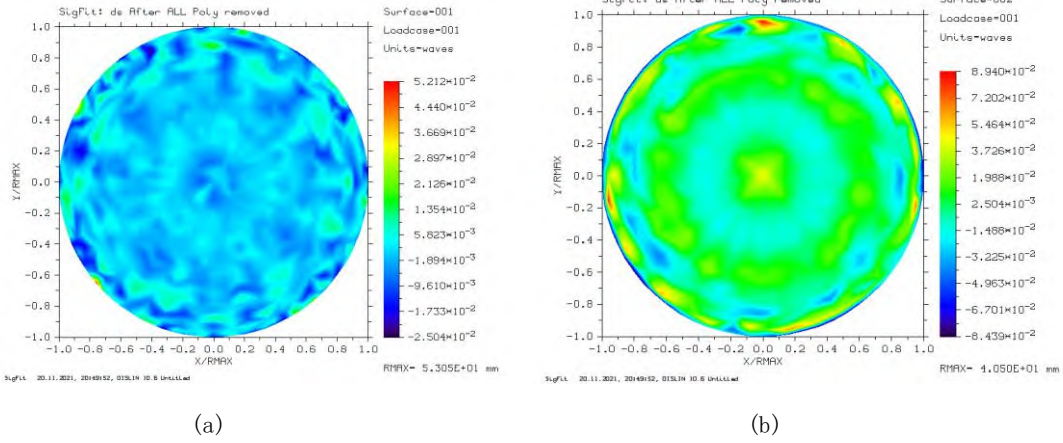


图1 去除刚体位移与标准泽尼克多项式面形后面形残差。(a)表面1面形拟合残差；(b)表面2面形拟合残差

Fig. 1 Surface residuals after removing rigid body displacement and standard Zernike polynomial surface.

(a)Residual of surface 1 surface shape fitting; (b) Residual of surface 2 surface shape fitting

1:	60.00000	16.000000	SAPHIR_SPECIAL	100	100	2:	44.00000	25.430120	100	0
SPS ZRN:						SPS ZRN:				
SCC/SCC						SCC/SCC				
ZP1: 6.7744E-05	ZP2: -1.9820E-07	ZP3: -1.5967E-07	ZP1: 1.4887E-04	ZP2: 1.0578E-06	ZP3: -2.8645E-06					
SCC C2: 100	SCC C3: 100	SCC C4: 100	SCC C2: 100	SCC C3: 100	SCC C4: 100					
ZP4: 7.7973E-05	ZP5: -1.5983E-02	ZP6: -1.5144E-05	ZP4: 1.4249E-04	ZP5: -2.0208E-02	ZP6: -2.3902E-05					
SCC C5: 100	SCC C6: 100	SCC C7: 100	SCC C5: 100	SCC C6: 100	SCC C7: 100					
ZP7: 2.5354E-06	ZP8: 1.0908E-05	ZP9: 1.4567E-05	ZP7: -5.4515E-06	ZP8: -1.8082E-05	ZP9: -3.6930E-06					
SCC C8: 100	SCC C9: 100	SCC C10: 100	SCC C8: 100	SCC C9: 100	SCC C10: 100					
ZP10: 3.5869E-05	ZP11: 3.0910E-05	ZP12: -9.8288E-06	ZP10: 6.6620E-05	ZP11: 4.0644E-06	ZP12: 2.8430E-05					
SCC C11: 100	SCC C12: 100	SCC C13: 100	SCC C11: 100	SCC C12: 100	SCC C13: 100					
ZP13: -4.2430E-03	ZP14: 8.3503E-06	ZP15: 1.0948E-05	ZP13: -5.6565E-03	ZP14: 1.0114E-06	ZP15: 4.4459E-05					
SCC C14: 100	SCC C15: 100	SCC C16: 100	SCC C14: 100	SCC C15: 100	SCC C16: 100					
ZP16: 2.6846E-05	ZP17: -2.3940E-06	ZP18: 1.5401E-05	ZP16: 1.3014E-04	ZP17: -1.3345E-05	ZP18: -3.4793E-05					
SCC C17: 100	SCC C18: 100	SCC C19: 100	SCC C17: 100	SCC C18: 100	SCC C19: 100					
ZP19: 9.0404E-06	ZP20: 1.0701E-06	ZP21: 9.9899E-06	ZP19: 1.4105E-05	ZP20: -7.0541E-06	ZP21: 5.9293E-05					
SCC C20: 100	SCC C21: 100	SCC C22: 100	SCC C20: 100	SCC C21: 100	SCC C22: 100					
ZP22: 1.9136E-05	ZP23: -2.2036E-05	ZP24: -1.1097E-05	ZP22: 4.6418E-05	ZP23: -8.7257E-05	ZP24: -7.4726E-06					
SCC C23: 100	SCC C24: 100	SCC C25: 100	SCC C23: 100	SCC C24: 100	SCC C25: 100					
ZP25: -9.5514E-04	ZP26: -3.5100E-06	ZP27: -8.5297E-06	ZP25: -1.0515E-03	ZP26: 2.9566E-07	ZP27: 6.8868E-05					
SCC C26: 100	SCC C27: 100	SCC C28: 100	SCC C26: 100	SCC C27: 100	SCC C28: 100					
ZP28: 2.2107E-05	ZP29: -7.7369E-06	ZP30: 2.1662E-06	ZP28: 7.8878E-05	ZP29: 2.4383E-05	ZP30: 1.0141E-05					
SCC C29: 100	SCC C30: 100	SCC C31: 100	SCC C29: 100	SCC C30: 100	SCC C31: 100					
ZP31: 1.0276E-05	ZP32: 8.5225E-06	ZP33: 1.2228E-05	ZP31: -1.1700E-06	ZP32: 3.1523E-05	ZP33: 4.1291E-06					
SCC C32: 100	SCC C33: 100	SCC C34: 100	SCC C32: 100	SCC C33: 100	SCC C34: 100					
ZP34: 1.2728E-05	ZP35: -5.5432E-07	ZP36: -7.4463E-06	ZP34: 1.7018E-06	ZP35: -1.2297E-05	ZP36: -3.6900E-06					
SCC C35: 100	SCC C36: 100	SCC C37: 100	SCC C35: 100	SCC C36: 100	SCC C37: 100					
ZP37: -1.5144E-05	ZP38: -3.2231E-04	ZP39: 1.2214E-05	ZP37: -5.3869E-05	ZP38: -1.6122E-04	ZP39: 1.1880E-05					
SCC C38: 100	SCC C39: 100	SCC C40: 100	SCC C38: 100	SCC C39: 100	SCC C40: 100					
ZP40: -1.1959E-05	ZP41: 5.0979E-06	ZP42: 5.3051E+01	ZP40: 3.5961E-05	ZP41: 1.0877E-07	ZP42: 4.0501E+01					
SCC C41: 100	SCC C42: 100	SCC C43: 100	SCC C41: 100	SCC C42: 100	SCC C43: 100					
ZP43: -0.4786326E-6	ZP44: -0.402746E-6	NRADIUS: 5.3051E+01	ZP43: -0.000001	ZP44: 0.9545819E-6	NRADIUS: 4.0501E+01					
SCC C44: 100	SCC C45: 100	SCC C69: 100	SCC C44: 100	SCC C45: 100	SCC C69: 100					
XDE: 0.4786326E-6	YDE: -0.402746E-6	ZDE: 0.027016	XDE: -0.000001	YDE: 0.9545819E-6	ZDE: 0.027181					
XDC: 100	YDC: 100	ZDC: 100	XDC: 100	YDC: 100	ZDC: 100					
ADE: 0.000015	BDE: -0.000011	CDE: 0.000003	ADE: 0.000038	BDE: -0.000029	CDE: 0.000002					
ADC: 100	BDC: 100	CDC: 100	ADC: 100	BDC: 100	CDC: 100					

(c)

(d)

表2 由标准泽尼克多项式表示的镜面面形。(c)表面1面形；(d)表面2面形

Table 2. Specular surface shape represented by standard Zernike polynomials.

(c) Surface 1 surface shape; (d) Surface 2 surface shape

2.3 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。综合考虑本系统的设计宗旨与结构要求，并查阅相关文献与专利后，采用机械补偿负组法^[22-24]。理想高斯模型如图 3 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，焦距由短焦向长焦变化时，变倍组和补偿组先相互靠近，然后一起向右移动。负组补偿既可以实现较大的通光口径，提高水下光学系统的光能利用率，又能实现较大的视场和较小系统长度。

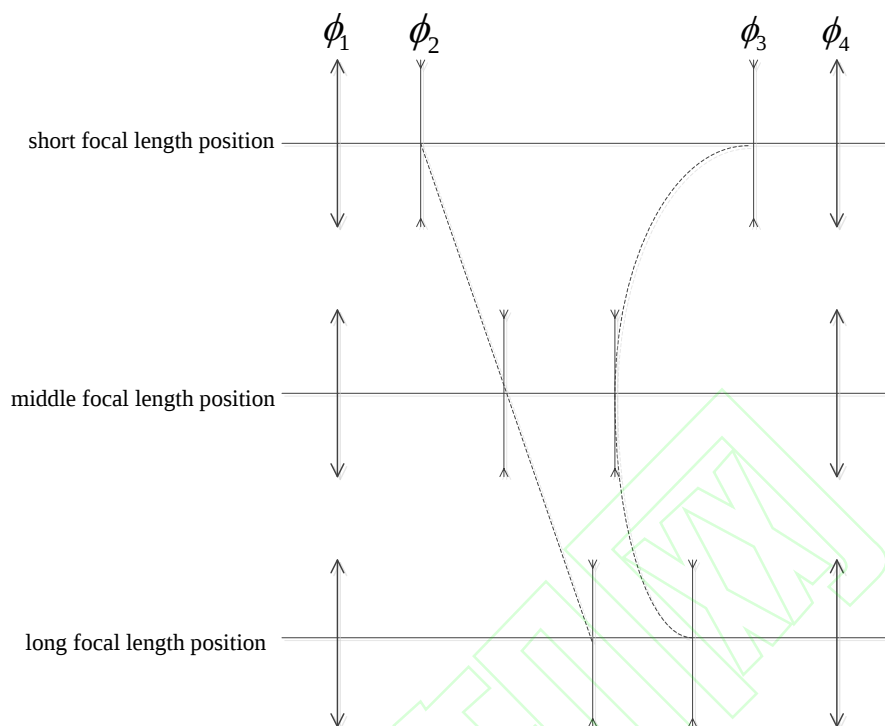


图3 机械负组补偿变焦光学系统

Fig. 3 Mechanical negative group compensated zoom optical system

该设计在短焦视场较大，畸变较大，所以选用反射远镜组^[25]。反远摄镜组具有一定的消除畸变的能力，通过对前固定组进行复杂化，可扩大其视场。随着视场角增大，边缘视场的照度会急剧下降，轴外像点的照度可以表示为：

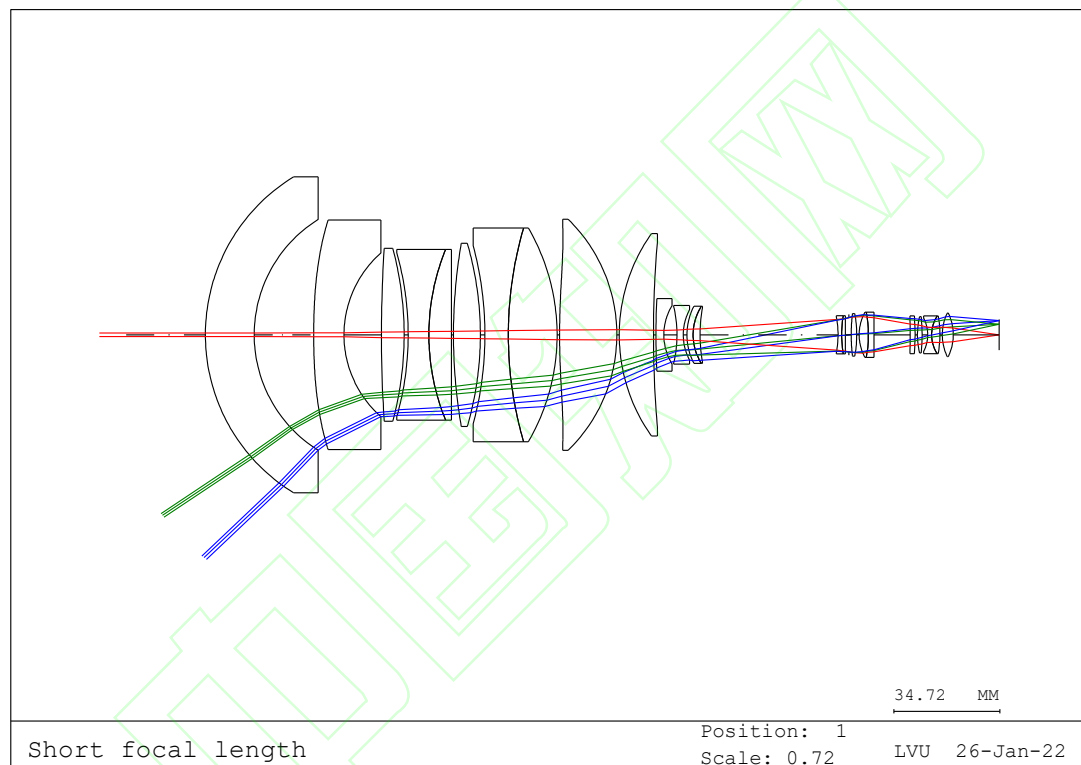
$$E = KE_0 \cos^4 \omega \quad (5)$$

式中： E_0 为轴上像点的照度； ω 为像方半视场角； K 为轴外斜光束截面积与轴上点光束截面积之比

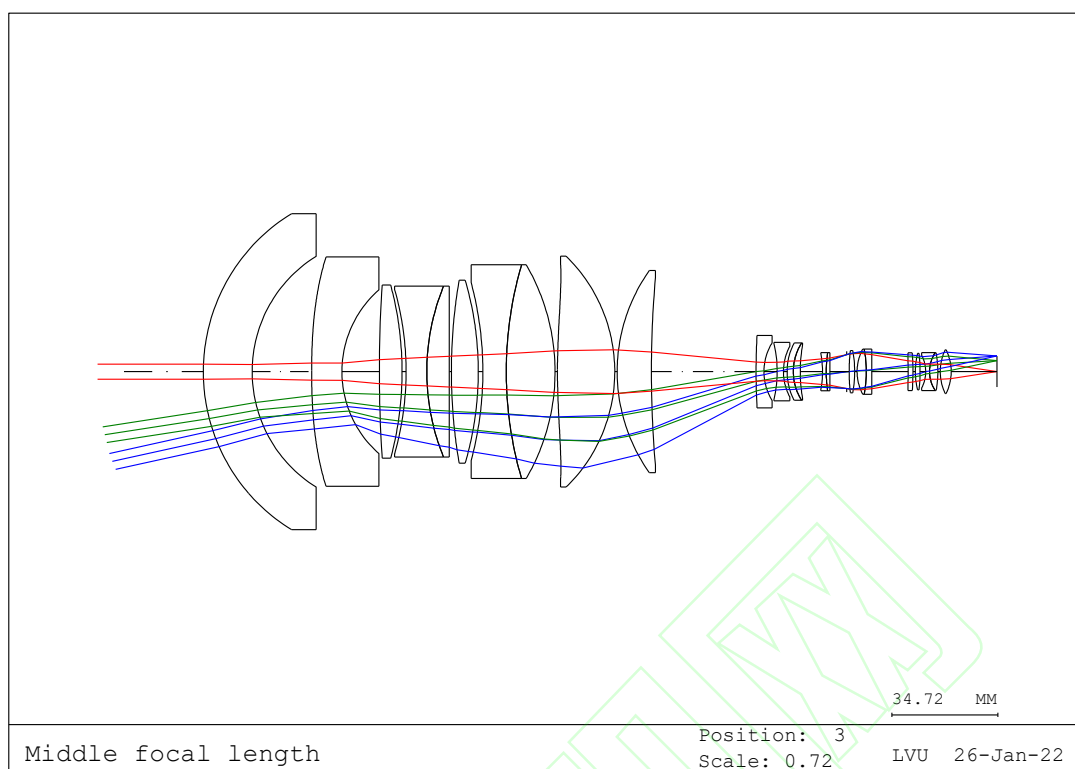
由轴外点的照度公式可知：像面照度随着像方视场角的四次方而衰减。为提高边缘视场照度，系统在优化过程中要控制主光线在像面的入射角度，以此来形成像方远心光路^[26]。

由于系统变倍比较大，为了在连续的焦距范围内更好地得到高分辨率成像，将系统分为7个组态，焦距分别为4.1mm、9mm、13mm、18mm、23mm、32mm、41mm。系统在短焦达到90°，属于大视场光学系统，其轴外像差和高级像差都比较大。为了校正高级像差，在优化过程中引入了三个高次非球面^[27]，较好地平衡了轴外和轴上像差。第3片、第10片和第17片透镜的前表面均为非球面。采用多片CAF2、FK、PK系列的超低色散玻璃和多组双胶合透镜搭配来校正色差，使用的超低色散玻璃具有低折射率、高阿贝数，其独特的色散特性可以有效解决系统色散问题。而双胶合镜组不仅可以减少系统镜组数量，简化整体结构，而且有利于校正球差和色差。同时增大前固定组的焦距，可以有效地减小系

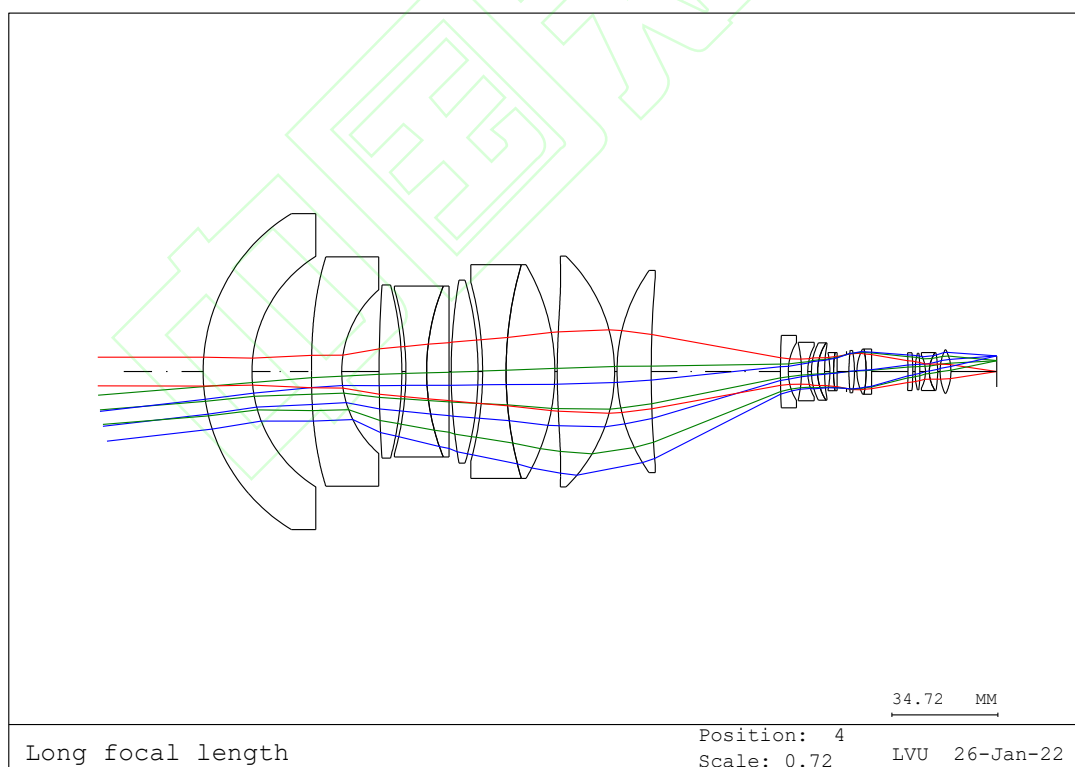
统的二级光谱。在优化过程中也采用 CODE V 自带的玻璃专家再结合自己编写的优化命令进行反复优化迭代，更换不同的材料搭配，最终，得到满足指标的变焦光学系统。最后优化结果如图 4 所示 (a) ~ (c) 分别对应变焦系统的短焦、中焦和长焦位置。图中第 1~10 片透镜为正光焦度的前固定组，该组元口径较大镜片较厚并且起到第一时间调校光路的作用，11~14 片透镜为变倍组，通过移动位置来实现变焦系统倍率的改变，变倍组为负光焦度，负光焦度容易实现大的变焦范围，缩短运动行程。15~16 片透镜为补偿组，也为负光焦度，按照一定的曲线规律做非线性运动来补偿变倍组移动所引起的像面变化。第 17~24 片透镜为正光焦度的后固定组，采用由冕牌玻璃与火石玻璃搭配的双胶合结构形式来进行残余像差的矫正。



(a)



(b)



(c)

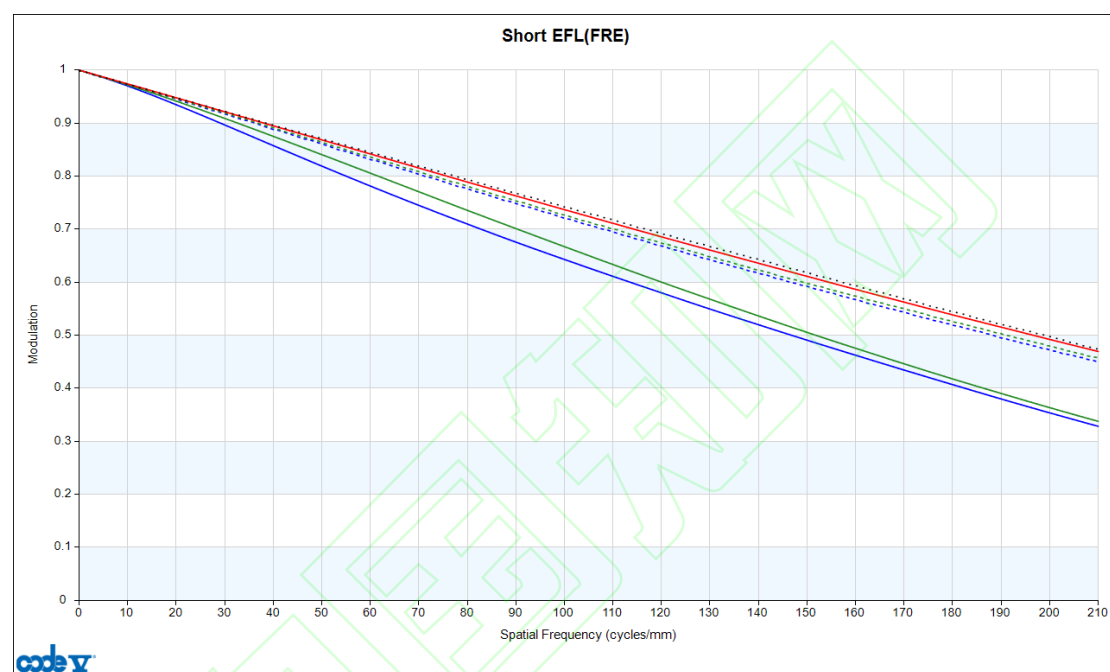
图4 变焦光学系统结构图。(a) 短焦；(b) 中焦；(c) 长焦

Fig. 4 Structure of zoom optical system. (a)Short focal length (b) Middle focal length (c)Long focal length

3 分析与讨论

3.1 像质评价

11000m 深海环境温度为 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ ，图中仿真结果结果均为 2° 。光学传递函数能够整体衡量光学系统成像质量，是光学系统的主要评价指标。图 5 是变焦系统的 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 (208 lp/mm) 处的 MTF 值均大于 0.3。



(a)

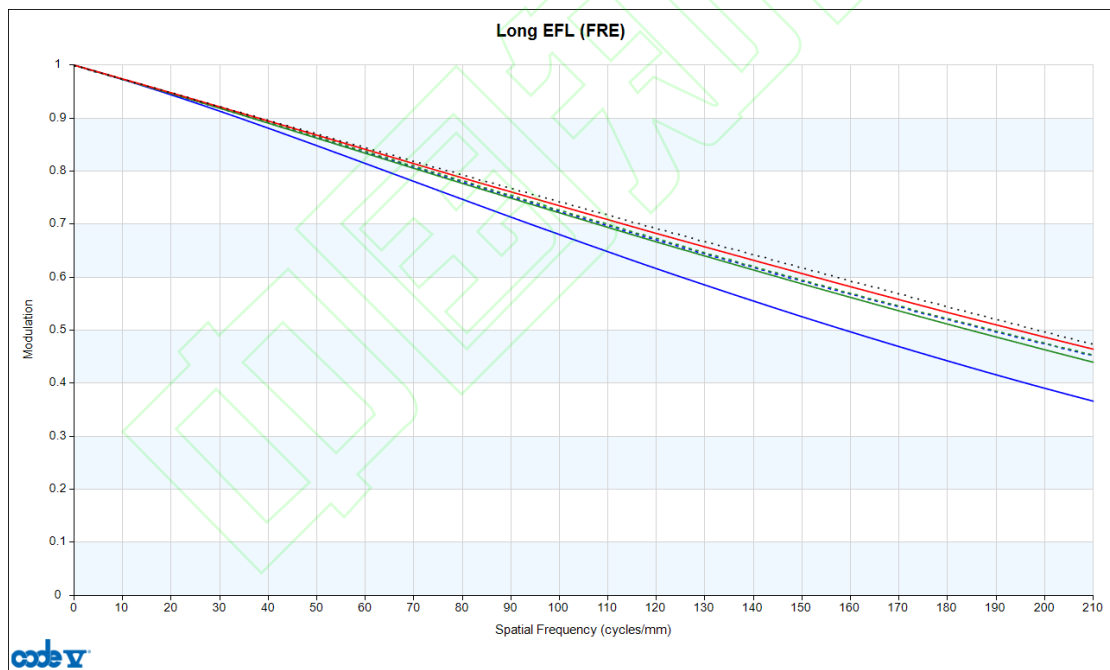
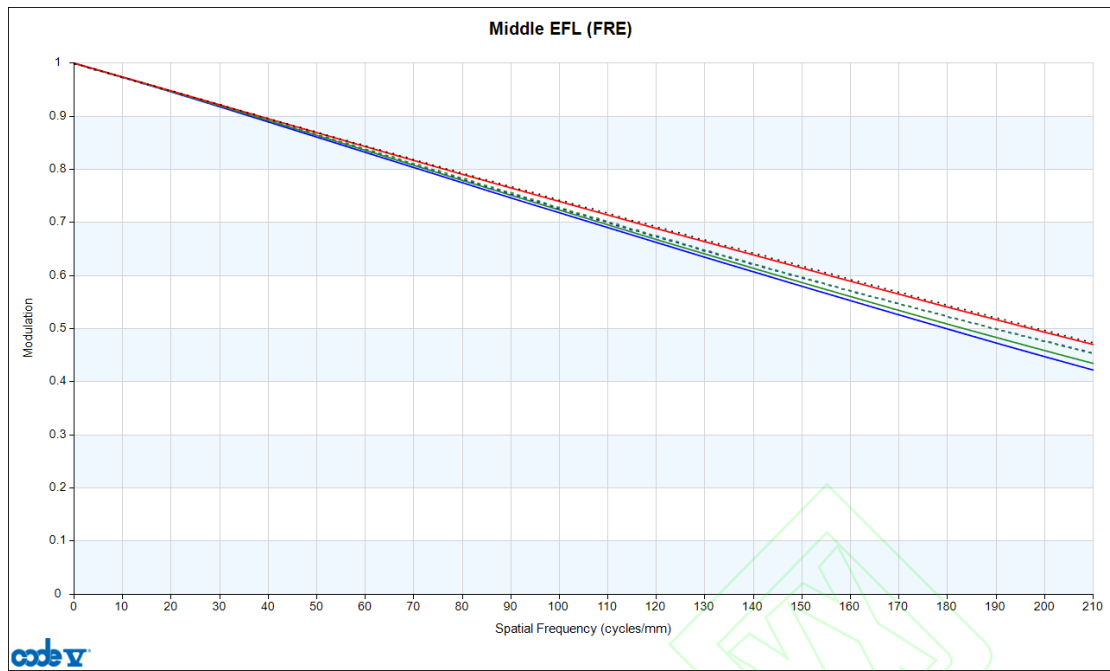


图5 变焦系统光学传递函数。(a) 短焦；(b) 中焦；(c) 长焦

Fig.5 MTF of zoom system

(a)Short focal length ;(b) Middle focal length; (c)Long focal length

光学系统的畸变如图 6 所示。在短焦和中焦下的畸变值最大，但都小于 3%，满足指标要求。

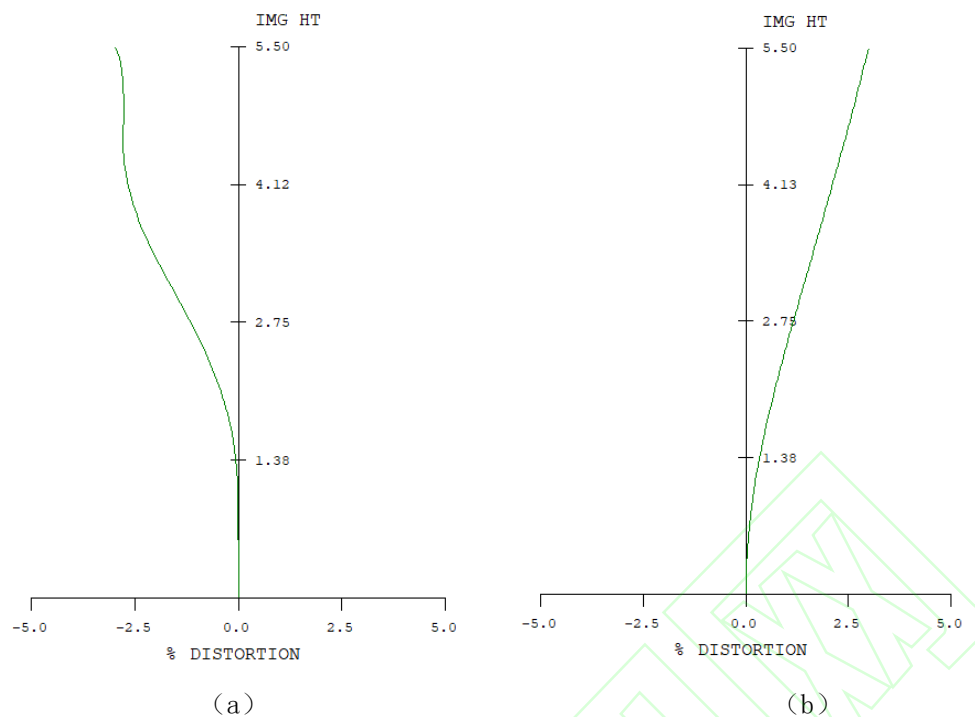


图6 变焦光学系统畸变。(a) 短焦；(b) 中焦

Fig. 6 Distortion of zoom optical system. (a) Short focal length; (b) Middle focal length

由图 7 可知像面边缘照度都大于 92%，系统像面照度均匀性好，满足应用要求。

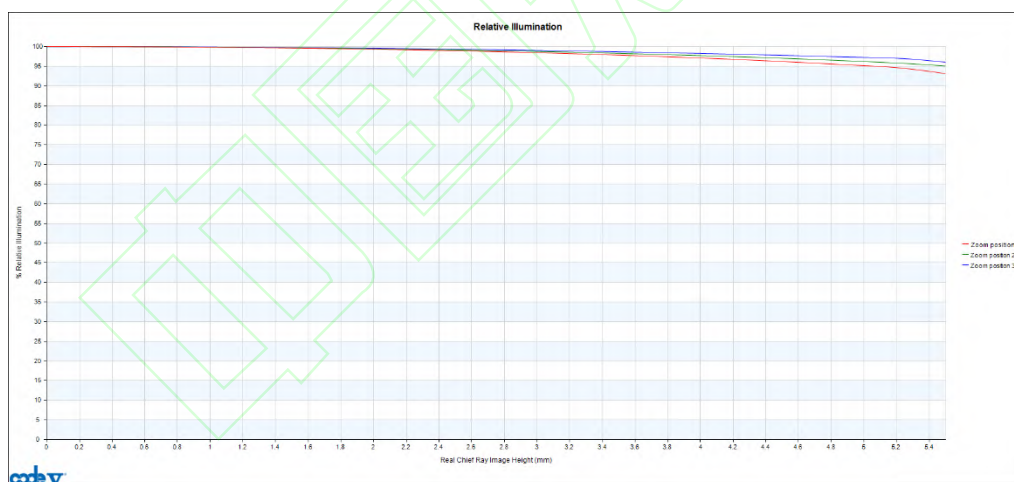


图7变焦光学系统相对照度曲线图

Fig. 7 Relative illuminance curve of zoom optical system

3.2 凸轮曲线拟合

codev 有一项功能为“变焦凸轮设计”，该功能通过设定 CAM 步数，参量值线性步进量，使变倍组做线性运动，可得到一系列的组元间隔数值，再运用 MATLAB 进行变焦曲线拟合，可得到变倍组与补偿组的运动轨迹，图8 即为完成优化的变焦系统凸轮曲线示意图，

图中横坐标为变倍步长，纵坐标为变倍组和补偿组与前固定组距离。可以看出，变焦曲线平滑，可有效避免系统在变焦运动过程中出现卡滞现象。

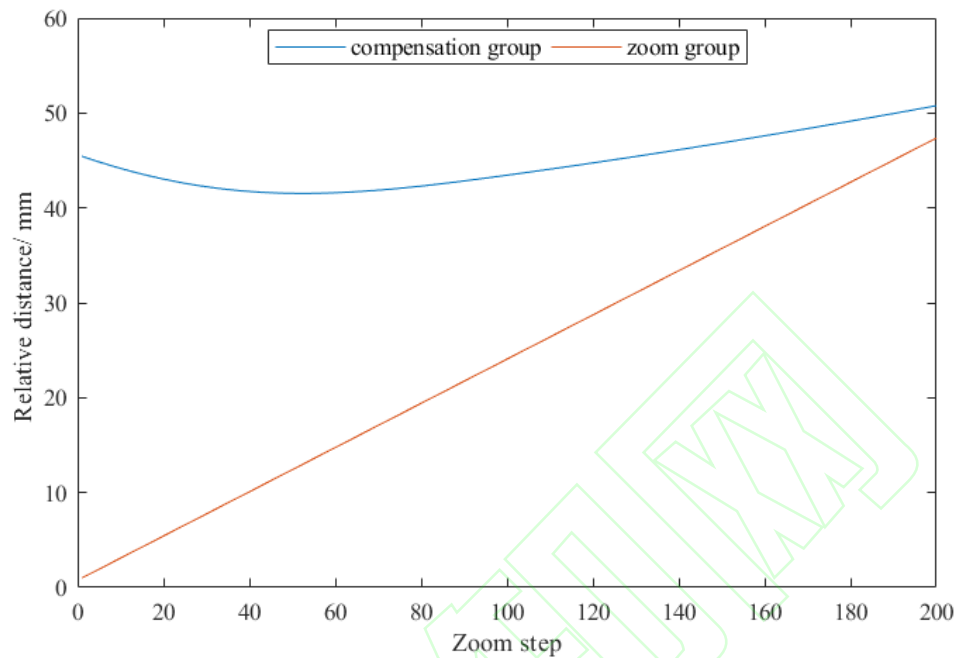


图8变焦光学系统凸轮曲线示意图
Fig. 8CAM curve diagram of zoom optical system

4 结 论

本文总结了现有水下系统的不足，通过选取合理的初始结构，采用了机械负组补偿的结构形式，计算光学参数，对变焦系统进行像质设计与优化，相比以往水下变焦光学系统在分辨率、变倍比、视场都有很大提高。该系统仅使用了 7 种材料，实现了全视场 $5.7^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，10 倍的连续变焦功能。在奈奎斯特频率 208lp/mm 处全视场大于 0.3，可作为深海探测 4K 相机的变焦镜头。本文采用光机集成分析的方法研究静水压对光学窗口的光学特性的影响，并在此基础上对光学系统进行优化，有效提高了光学系统的成像质量，同时变焦曲线平滑，变焦过程相面照度均匀，结构紧凑，该系统在深海探测、海洋开发、海底资源勘探等领域拥有广泛的应用前景。

参考文献

[1] 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.
- [2] 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. Zhai Xuefeng, Dong Xiaona, Wang Guofu, et al. Design of underwater zoom lens[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.
- [3] Jiang Yang, Quan Xiangqian, Du Jie, et al. Design of deep-sea optical imaging system with wide field of view and ultra-high resolution [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(11): 2289-2295.
姜洋, 全向前, 杜杰, 等. 全海深大视场超高清光学系统设计[J].光学精密工程. 2019, 27(11): 2289-2295.
- [4] Jaffe JS, Moore KD, McLean J, Strand MP. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. Oceanography. 2001, 14(3): 66-76.
- [5] in Weiqi, Wang Xia, Cao Fengmei, et al. Review of Underwater Opto-electrical Imaging Technology and Equipment (II)[J]. Infrared Technology, 2011, 33(3): 125-132.
金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展 (下) [J]. 红外技术, 2011, 33(3): 125-132
- [6] Quan Xiangqian, Chen Xiangzi, Quan Yongqian, et al. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 153-165.
全向前, 陈祥子, 全永前, 李晨. 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
- [7] Zhijuan Shen, Haifeng Lin, Yiqing Cao. Design of Zoom Lens System with Movable Components Including Large Aperture and with Ultra-Wide Field of View[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0708001
沈志娟, 林海峰, 曹一青. 多组元全动型大孔径及超大视场变焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0708001
- [8] Zhai Xuefeng, Dong Xiaona, Wang Guofu, et al. Design of underwater zoom lens[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.
- [9] Lu Weitao, He Junhua, Yan Yadong, et al. Underwater switch-zoom optical system with middle angel and largre relative aperture[J]. Science Technology and Engineering, 2011,11(16):3675-3678
卢卫涛, 何俊华, 闫亚东. 中等视场相对孔径水下档变焦学系统[J]. 科学技术工程, 2011,11(16): 3675-3678.
- [10] Du Ke, Cheng Xuemin, Hao Qun. Design of Optical Zoom System for Deep-Sea Detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 092201.
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):092201.
- [11] Ma Haikuan, Cao Xuan, Chu Dongzhi, et al. Design of Underwater Zoom Lens for Marine Monitoring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100101.
马海宽, 曹煊, 褚东志, 等. 应用于海洋监测的水下变焦镜头设计 [J]. 激光与光电子学进

展. 2017, 54(10): 100101.

- [12] Qu Rui, Wu Li, Yang Hongtao, etc. A kind of underwater WFOV zoom lens[P]. CN 110109237A.
曲锐, 武力, 杨洪涛, 等. 一种水下大视场连续变焦光学系统[P]. CN 110109237A.
- [13] 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.
- [14] Sun Chuandong, Chen Liangyi, Gao Limin, et al. Water optical properties and their effect on underwater imaging[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.
- [15] Zhong Xing, Zhang Yuan, Jin Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322004.
钟兴, 张元, 金光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322004.
- [16] Menna F, Nocerino E, Fassi F, Remondino F. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry. Sensors. 2016, 16(1):48.
- [17] Menna F, Nocerino E, Remondino F. Optical aberrations in underwater photogrammetry with flat and hemispherical dome ports [C]. SPIE, 2017, 10332, p. 1033205.
- [18] Xiong Zhiqi, Deng Guoxin. Applications of glass windows in underwater optics[J]. Mine warfare and ship self-defence, 2003, 000(1):37-40.
熊志奇, 邓国新. 壳窗玻璃在水下光学成像系统中的应用[J]. 水雷战与舰船防护, 2003, 000(1):37-40.
- [19] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Interated optomechanical analysis[M]. Lian H D, Wang X Y, Xu P, et al, Transl. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015:52-54.
凯斯·B·道尔, 维克托·L·基恩伯格, 格雷戈里·J·迈克尔. 光机集成分析 [M] 连华东, 王小勇, 徐鹏, 等, 译. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2015:52—54.
- [20] Coronato P, Juergens R. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[C]. SPIE, 2003, 5176: 128-136.
- [21] Yan Jingzhou, Lei Fan, Zhou Bifang. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 7(5): 119-128.
焉静舟, 雷凡, 周必方. 用 Zernike 多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学精密工程, 1997, 7(5): 119-128.
- [22] Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optical 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.
- [23] Jin Fengxi, Jin Hujie, The best choice of the form of zoom lens[J]. Optical Instrument, 2004(1): 34-38.
金逢锡, 金虎杰. 变焦镜头结构形式的最佳选择方法[J]. 光学仪器, 2004(1): 34-38.
- [24] Tao Chunkan. Zoom lens design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988:49-153.
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988:49-153.
- [25] Zhang Jiyan, Huang Yuanqing, Xiong Feibing et al. Optical lens design with short-focus and ultra-wide FOV[J]. Chinese Laser, 2013, 50:102202-1-5.

- 张继艳,黄元庆,熊飞兵,等.短焦距超广角镜头的光学设计[J].中光,2013,50:102202-1-5
- [26] Deng Qiang¹, Li Shenghui. Design of high-resolution image square telecentric continuouszoom projection lens based on TIR prism[J]
邓强,李升.辉高分辨率像方远心连续变焦投影镜头的设计[J]
- [27] Jinlin Liu, feihong Yu. Descriptions of Rotationally Symmetric Aspheres and Analysis of Their Characteristics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0922001
刘锦琳, 余飞鸿. 旋转对称非球面表述及其特点分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0922001

