激光与光电子学进展

大视场高分辨率深海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，对光学窗口进行光机集成分析，将面形变化结果以Zernike多项式的形式代入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研究后，光学系统采用机械式负组补偿变焦方式和像方远心设计方案。该系统工作距为5 m，变焦全程F数恒定为3.0，可实现全视场角5.7°～90°范围内可调，10倍连续光学变焦。变焦系统使用三片非球面，系统总长为260 mm。在208 lp/mm处，整个变焦区域内全视场的调制传递函数值均大于0.3，另外系统各变焦位置的最大畸变均小于3%。所提变焦系统结构紧凑，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 O436 **文献标志码** A **DOI**：10.3788/LOP213321

Design of Zoom Optical System for Deep-Sea Detection with Large Field of View and High Resolution

Wang Xuefeng[1,2], Yan Changxiang[1], Wang Xiaodong[1], Gu Zhiyuan[1*]
[1]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *Jinlin, China*;
[2]*Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract A continuous zoom optical system for underwater that has the characteristics of a large field of view, high resolution, and high zoom ratio at the same time is designed to satisfy the needs of deep-sea exploration and achieve higher quality optical imaging in the deep sea. According to the operating deep sea environment, the image quality degradation caused by the extrusion deformation of the optical window caused by deep water pressure was considered, an 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 a Zernike polynomial for optimization. After studying the characteristics of underwater optical aberration and the design method of zoom system, the optical system adopts the mechanical negative group compensation zoom method and image square telecentric design scheme. The system's working distance is 5 m, the F-number of the whole zoom is constant 3.0, and the system can achieve the full field of view of 5.7°-90°, 10 times continuous zoom. The zoom system uses three aspheric surfaces with a total length of 260 mm. At 208 lp/mm, the maximum distortion of each zoom position of the system is <3% and the modulation transfer function values of the entire field of view in the whole zoom area are >0.3. The zoom system features a compact structure, good imaging quality, and a smooth zoom curve, which can accommodate real application demands.

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

1 引 言

党的十八大明确提出要建设“海洋强国”，这样就必须在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

收稿日期：2021-12-23；**修回日期**：2022-01-27；**录用日期**：2022-02-14；**网络首发日期**：2022-02-24
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：*zhiyuangu@gmail.com

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，对实现更高质量的成像具有重要意义。

2007 年，翟学锋等[8]设计了一款变倍比为 1.28，短焦全视场角为 40°的水下连续变焦光学系统；2011 年，卢卫涛等[9]设计一款两档变焦，短焦全视场角为 60°的水下非连续变焦光学系统；2013 年，杜柯等[10]设计了应用于深海探测的两倍连续变焦光学系统，其短焦全视场角为 66°；2017 年，马海宽等[11]设计了一款应用于海洋监测的三挡变焦，短焦全视场角为 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，要么就是非连续变焦，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。2019 年，曲锐等[12]完成了一个短焦全视场角为 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角普遍较小，而且都没有考虑深海水压对水下光窗挤压变形以及对成像质量的影响。

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）深海的折射率不同于普通浅水区，11000 m 处海水的折射率约为 1.339，此处水温约为 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 480～644 nm。

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，深海中的光学系统就需要较小的 F 数来提高像面照度[13]。但是由于海水的散射效应，景深会退化严重，这样太小的 F 数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的稳定。

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

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[14-15]，本文采用了 4096 pixel×2160 pixel 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 2/3 inch（1 inch=2.54 cm），对角线尺寸为 11 mm。短焦半视场角为 45°，该系统工作距离为 5 m，远大于焦距，光学系统的短焦焦距可表示为

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

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

$$f_l=10\times 4.1=41(\mathrm{mm})。\tag{3}$$

长焦处视场为

$$\theta=\arctan\frac{y}{n\times f_l}=\frac{5.5}{1.339\times 41}=5.7^\circ。\tag{4}$$

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 /mm	4.1-41
Diagonal field of view /(°)	5.7-90
Zoom ratio	10
Distortion /%	≤3
Modulation transfer function	>0.3 (@208 lp/mm)
F-number	3.0
Work wavelength /nm	480–644
Working distance /m	5
Working depth /m	11000

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，所以本文选择球罩形状的光窗。本文选用蓝宝石玻璃作为光窗材料，具有优良的光谱特性，以及较好的化学稳定性，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]。

水下工作深度为 11000 m，此处的海水静压可达 120 MPa，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Code V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0.01λ级别。图2为导入到Code V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。

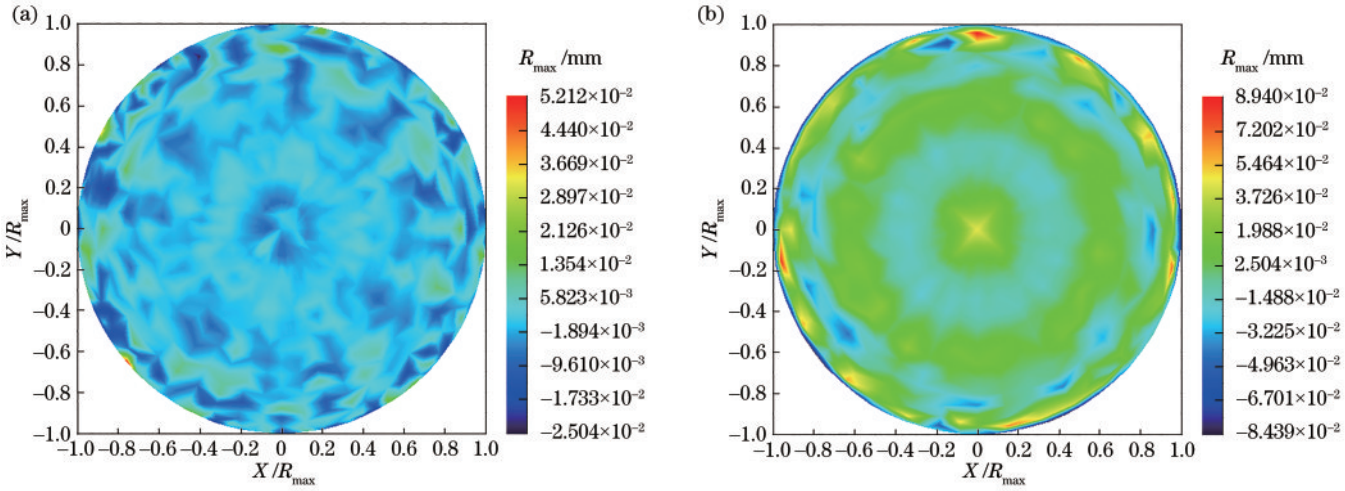

图1　去除刚体位移与标准泽尼克多项式面形后的面形残差。(a)表面1面形拟合残差；(b)表面2面形拟合残差

Fig. 1　Surface residuals after removing rigid body displacement and standard Zernike polynomial surface. (a) Surface fitting residual of surface 1; (b) surface fitting residual of surface 2

(a)
```
1:        60.00000        16.000000        SAPHIR_SPECIAL      100    100
 SPS ZRN:
 SCO/SCC
      ZP1:  6.7744E-05        ZP2: -1.9820E-07        ZP3: -1.5967E-07
  SCC  C2:      100        SCC  C3:      100        SCC  C4:      100
      ZP4:  7.7973E-05        ZP5: -1.5983E-02        ZP6: -1.5144E-05
  SCC  C5:      100        SCC  C6:      100        SCC  C7:      100
      ZP7:  2.5354E-06        ZP8:  1.0908E-05        ZP9:  1.4567E-05
  SCC  C8:      100        SCC  C9:      100        SCC C10:      100
     ZP10:  3.5869E-05       ZP11:  3.0910E-05       ZP12: -9.8288E-06
  SCC C11:      100        SCC C12:      100        SCC C13:      100
     ZP13: -4.2430E-03       ZP14:  8.3503E-06       ZP15:  1.0948E-05
  SCC C14:      100        SCC C15:      100        SCC C16:      100
     ZP16:  2.6846E-05       ZP17: -2.3940E-06       ZP18:  1.5401E-05
  SCC C17:      100        SCC C18:      100        SCC C19:      100
     ZP19:  9.0404E-06       ZP20:  1.0701E-06       ZP21:  9.9899E-06
  SCC C20:      100        SCC C21:      100        SCC C22:      100
     ZP22:  1.9136E-05       ZP23: -2.2036E-05       ZP24: -1.1097E-05
  SCC C23:      100        SCC C24:      100        SCC C25:      100
     ZP25: -9.5514E-04       ZP26: -3.5100E-06       ZP27: -8.5297E-06
  SCC C26:      100        SCC C27:      100        SCC C28:      100
     ZP28:  2.2107E-05       ZP30: -7.7369E-06       ZP31:  2.1662E-06
  SCC C29:      100        SCC C31:      100        SCC C32:      100
     ZP32:  1.0276E-05       ZP33:  8.5225E-06       ZP34:  1.2228E-05
  SCC C33:      100        SCC C34:      100        SCC C35:      100
     ZP35:  1.2728E-05       ZP38: -5.5432E-07       ZP39: -7.4463E-06
  SCC C36:      100        SCC C39:      100        SCC C40:      100
     ZP40: -1.5144E-05       ZP41: -3.2231E-04       ZP42:  1.2214E-05
  SCC C41:      100        SCC C42:      100        SCC C43:      100
     ZP43: -1.1959E-05       ZP44:  5.0979E-06     NRADIUS:  5.3051E+01
  SCC C44:      100        SCC C45:      100        SCC C69:      100
 XDE:0.4786326e-6   YDE:-0.402746e-6   ZDE:    0.027016   DAR
 XDC:     100       YDC:     100       ZDC:     100
 ADE:    0.000015   BDE:   -0.000011   CDE:    0.000003
 ADC:     100       BDC:     100       CDC:     100
```

(b)
```
2:        44.00000        25.430120                          100      0
 SPS ZRN:
 SCO/SCC
      ZP1:  1.4887E-04        ZP2:  1.0578E-06        ZP3: -2.8645E-06
  SCC  C2:      100        SCC  C3:      100        SCC  C4:      100
      ZP4:  1.4249E-04        ZP5: -2.0208E-02        ZP6: -2.3902E-05
  SCC  C5:      100        SCC  C6:      100        SCC  C7:      100
      ZP7: -5.4515E-06        ZP8: -1.8082E-05        ZP9: -3.6930E-06
  SCC  C8:      100        SCC  C9:      100        SCC C10:      100
     ZP10:  6.6620E-05       ZP11:  4.0644E-06       ZP12:  2.8430E-05
  SCC C11:      100        SCC C12:      100        SCC C13:      100
     ZP13: -5.6565E-03       ZP14:  1.0114E-06       ZP15:  4.4459E-05
  SCC C14:      100        SCC C15:      100        SCC C16:      100
     ZP16:  1.3014E-04       ZP17: -1.3345E-05       ZP18: -3.4793E-05
  SCC C17:      100        SCC C18:      100        SCC C19:      100
     ZP19:  1.4105E-05       ZP20: -7.0541E-06       ZP21:  5.9293E-05
  SCC C20:      100        SCC C21:      100        SCC C22:      100
     ZP22:  4.6418E-05       ZP23: -8.7257E-05       ZP24: -7.4726E-06
  SCC C23:      100        SCC C24:      100        SCC C25:      100
     ZP25: -1.0515E-03       ZP26:  2.9566E-07       ZP27:  6.8868E-05
  SCC C26:      100        SCC C27:      100        SCC C28:      100
     ZP28:  7.8878E-05       ZP30:  2.4383E-05       ZP31:  1.0141E-05
  SCC C29:      100        SCC C31:      100        SCC C32:      100
     ZP32: -1.1700E-06       ZP33:  3.1523E-05       ZP34:  4.1291E-06
  SCC C33:      100        SCC C34:      100        SCC C35:      100
     ZP35:  1.7018E-06       ZP38: -1.2297E-05       ZP39: -3.6900E-06
  SCC C36:      100        SCC C39:      100        SCC C40:      100
     ZP40: -5.3869E-05       ZP41: -1.6122E-04       ZP42:  1.1880E-05
  SCC C41:      100        SCC C42:      100        SCC C43:      100
     ZP43:  3.5961E-05       ZP44:  1.0877E-07     NRADIUS:  4.0501E+01
  SCC C44:      100        SCC C45:      100        SCC C69:      100
 XDE:   -0.000001   YDE:0.9545819e-6   ZDE:    0.027181   DAR
 XDC:     100       YDC:     100       ZDC:     100
 ADE:    0.000038   BDE:   -0.000029   CDE:    0.000002
 ADC:     100       BDC:     100       CDC:     100
```

图2　由标准泽尼克多项式表示的镜面面形。(a)表面1的面形；(b)表面2的面形

Fig. 2　Specular surface shape represented by standard Zernike polynomials. (a) Surface shape of surface 1; (b) surface shape of surface 2

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]进行优化。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，当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。

由于短焦视场较大，畸变较大，所以选用反射远镜

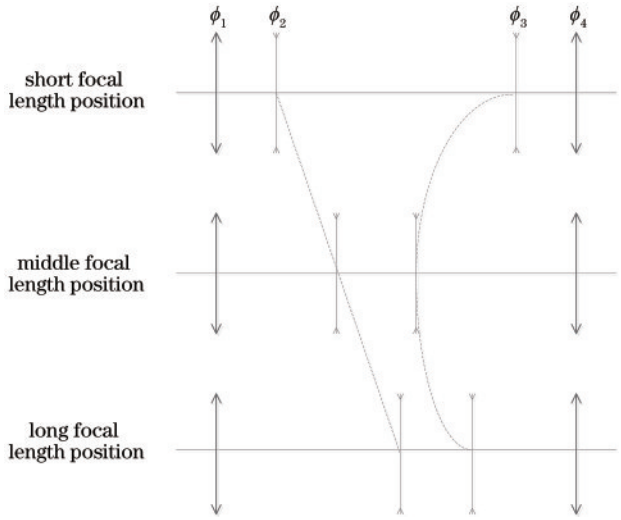

图 3 机械负组补偿变焦光学系统

Fig. 3 Mechanical negative group compensated zoom optical system

组[25]进行设计。反射远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

$$E = KE_0 \cos^4 w \ , \tag{5}$$

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 4.1、9、13、18、23、32、41 mm。在短焦视场角达到 90°时，系统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，可以较好地平衡轴外和轴上像差。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，所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，还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。图 4(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；第 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；第 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校正。

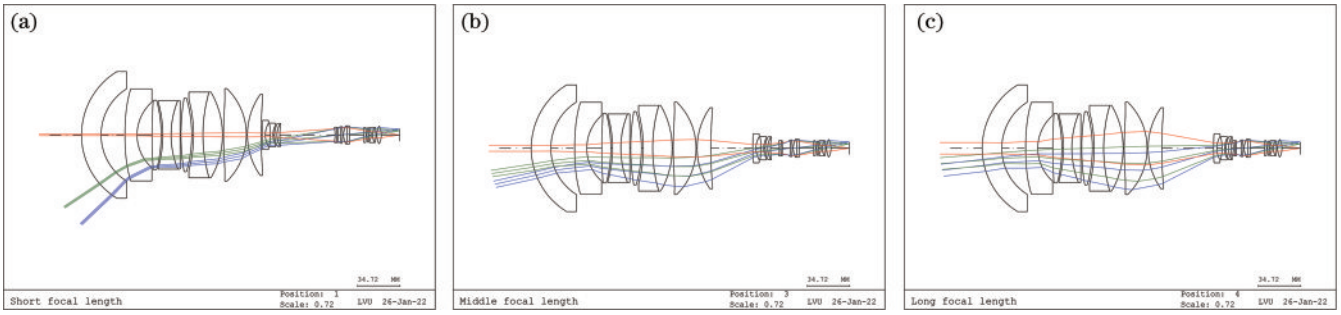

图 4 变焦光学系统结构图。(a)短焦；(b)中焦；(c)长焦

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

光学调制传递函数(MTF)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的奈奎斯特频率(208 lp/mm)处的 MTF 值均大于 0.3。

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

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。

3.2 凸轮曲线拟合

Code V 有一项功能为“变焦凸轮设计”，即通过设定 CAM 步数和参量值线性步进量，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，得到变倍组与补偿

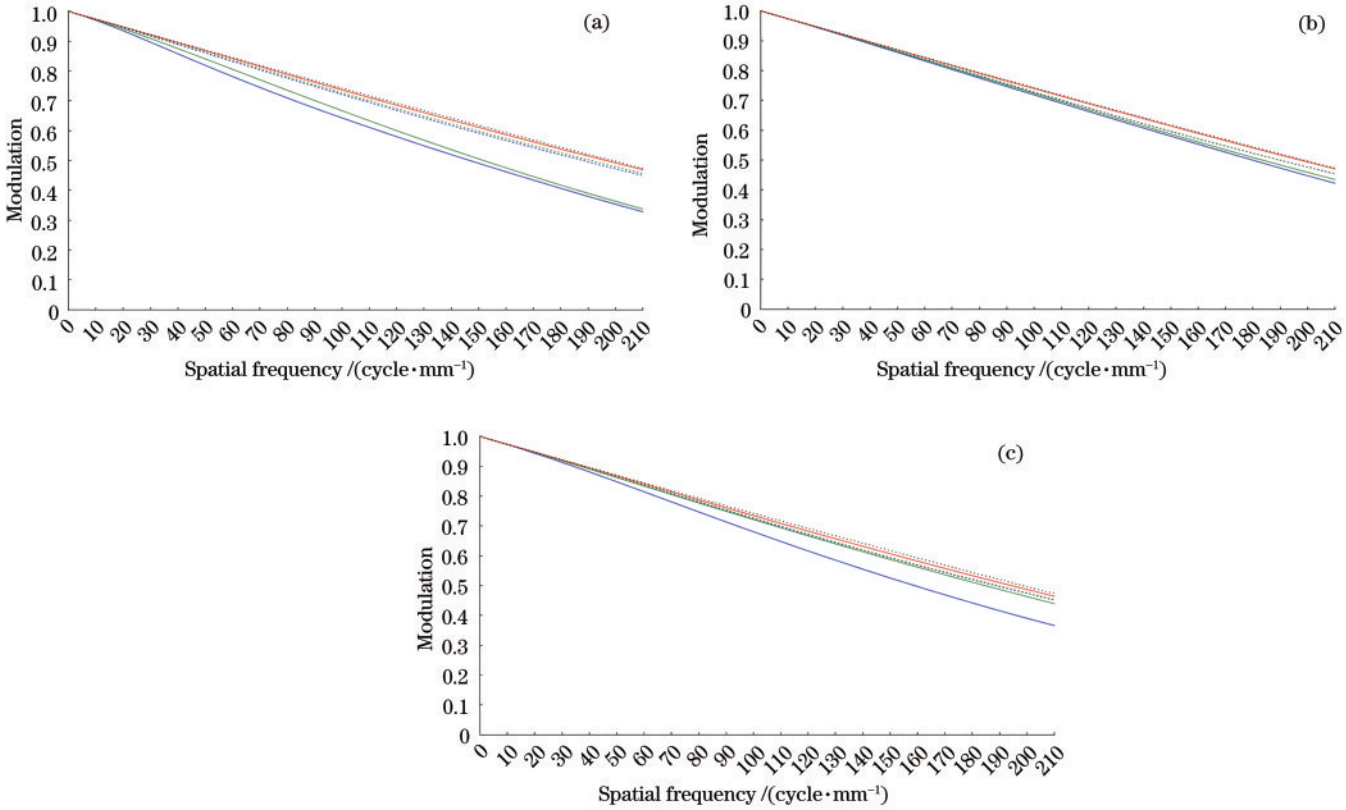

图 5 变焦系统的调制传递函数。(a)短焦;(b)中焦;(c)长焦

Fig. 5 MTF of zoom system. (a)Short focal length; (b) middle focal length; (c) long focal length

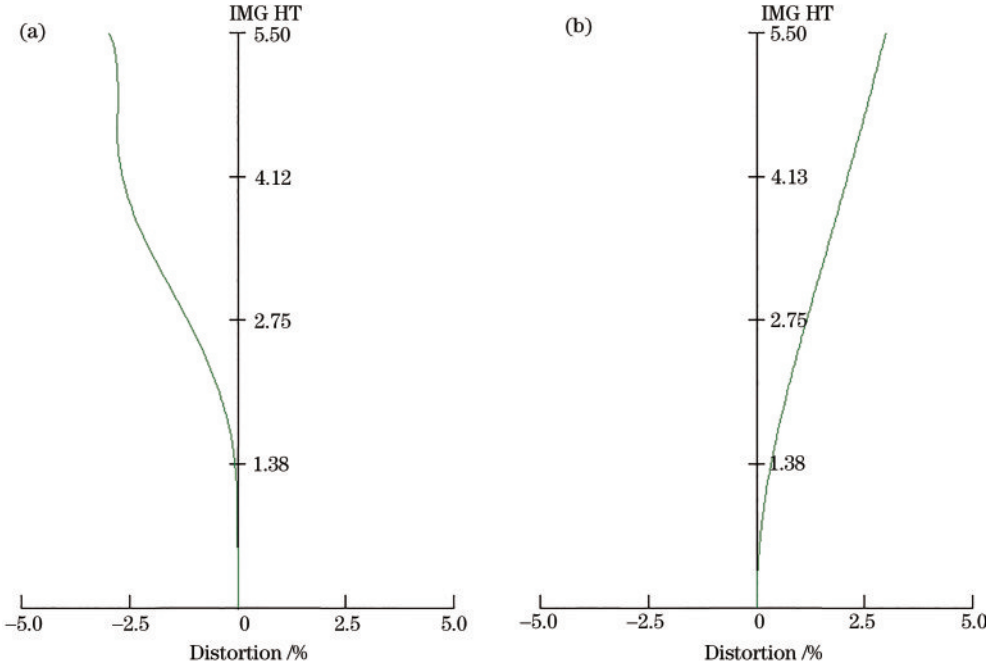

图 6 变焦光学系统畸变。(a)短焦 ;(b)中焦

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

组的运动轨迹,图 8 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。

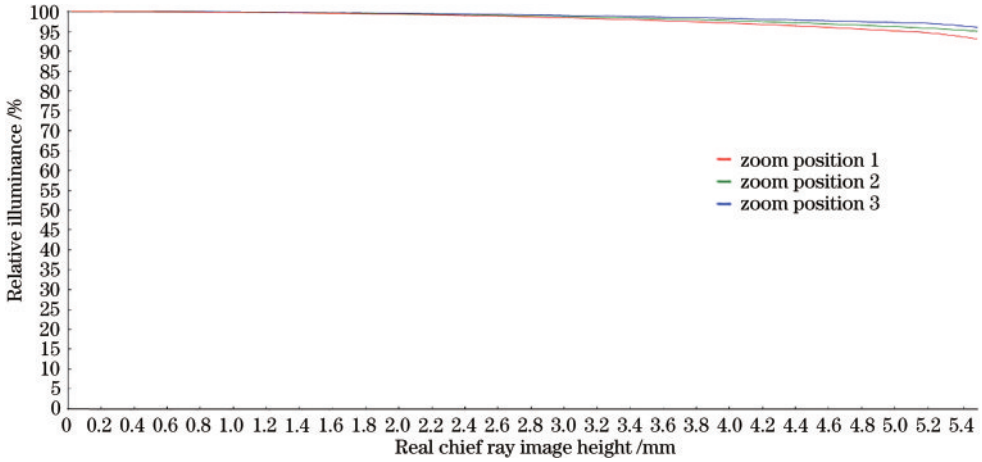

图7 变焦光学系统相对照度曲线图

Fig. 7 Relative illuminance curve of zoom optical system

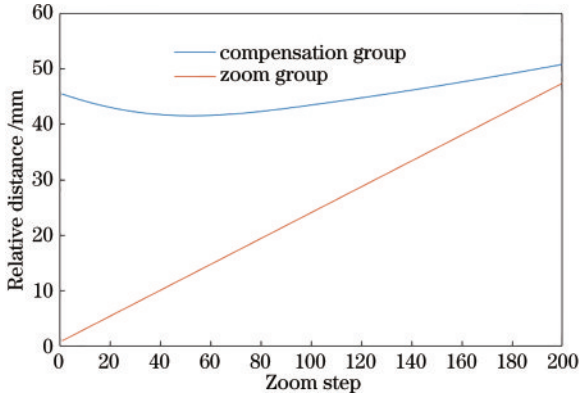

图8 变焦光学系统凸轮曲线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cam curve 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，结合机械负组补偿的结构形式，计算了光学参数，并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，该系统在分辨率、变倍比、视场方面都有很大提高。该系统仅使用了7种材料，实现了全视场角5.7°～90°范围内可调，10倍连续光学变焦功能。在奈奎斯特频率208 lp/mm处，全视场MTF值大于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] 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 C D, Li C, Zhang J H, et al. Optical design of the lens for underwater imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 1998, 6(5): 5-11.

[2] 谢正茂，董晓娜，何俊华. 水下微光摄影物镜的设计和研究[J]. 应用光学，2009，30(1): 6-10.
Xie Z M, Dong X N, He J H. Design of underwater low light photographic objective[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 6-10.

[3] 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.
Jiang Y, Quan X Q, Du J, 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.

[4] Jaffe J, Moore K, McLean J, et al. Underwater optical imaging: status and prospects[J]. Oceanography, 2001, 14(3): 64-75.

[5] 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.
Jin W Q, Wang X, Cao F M, et al. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (Ⅱ)[J]. Infrared Technology, 2011, 33(3): 125-132.

[6] 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.

[7] 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.
Shen Z J, Lin H F, Cao Y Q. 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.

[8] 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.
Zhai X F, Dong X N, Wang G F, et al. Design of underwater zoom lens[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 416-420.

[9] 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.

Lu W T, He J H, Yan Y D. Underwater switch-zoom optical system with middle angle and large relative aperture[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(16): 3675-3678.

[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): 092201.
Du K, Cheng X M, Hao Q. Design of optical zoom system for deep-sea detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 092201.

[11] 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.
Ma H K, Cao X, Chu D Z, et al. Design of underwater zoom lens for marine monitoring[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100101.

[12] 曲锐, 武力, 杨洪涛, 等. 一种水下大视场连续变焦光学系统: CN110109237A[P]. 2019-08-09.
Qu R, Wu L, Yang H t, et al. A kind of underwater WFOV zoom lens: CN110109237A[P]. 2019-08-09.

[13] 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.
Zhong X, Zhang Y, Jin G. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322004.

[14] Pegau W S, Gray D, Zaneveld J R V. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: dependence on temperature and salinity[J]. Applied Optics, 1997, 36(24): 6035-6046.

[15] 孙传东, 陈良益, 高立民, 张建生, 卢笛. 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.
Sun C D, Chen L Y, Gao L M, et al. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(4): 39-46.

[16] Menna F, Nocerino E, Fassi F, et al. Geometric and optic characterization of a hemispherical dome port for underwater photogrammetry[J]. Sensors, 2016, 16(1): 48.

[17] Menna F, Nocerino E, Remondino F. Optical aberrations in underwater photogrammetry with flat and hemispherical dome ports[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10332: 1033205.

[18] 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, 11(1): 33-36.
Xiong Z Q, Deng G X. Application of window glass in underwater optical imaging system[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2003, 11(1): 33-36.

[19] 凯斯·B·道尔, 维克托·L·基恩伯格, 格雷戈里·J·迈克尔斯. 光机集成分析[M]. 连华东, 王小勇, 徐鹏, 译. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2015: 52-54.
Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. Integrated optomechanical analysis[M]. Lian H D, Wang X Y, Xu P, Transl. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 52-54.

[20] Coronato P A, Juergens R C. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5176: 128-136.

[21] 鄢静舟, 雷凡, 周必方, 等. 用Zernike多项式进行波面拟合的几种算法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(5): 119-128.
Yan J Z, Lei F, Zhou B F, et al. Algorithms for wavefront fitting using Zernike polynomial[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 119-128.

[22] 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.
Lu Q, Ji Y Q, Shen W M. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2674-2679.

[23] 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, 26(1): 34-38.
Jin F X, Jin H J. Structural style's the best select device of vari-focus lens[J]. Optical Instruments, 2004, 26(1): 34-38.

[24] 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.
Tao C K. Design of zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988: 49-153.

[25] 张继艳, 黄元庆, 熊飞兵, 等. 短焦距超广角镜头的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102202.
Zhang J Y, Huang Y Q, Xiong F B, et al. Optical lens design with short-focus and ultra-wide FOV[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102202.

[26] 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]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 1114005.
Deng Q, Li S H. Design of high-resolution image square telecentric continuous zoom projection lens based on TIR prism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 1114005.