

## 海洋浮游生物显微光学成像系统设计\*

马海宽<sup>1,2</sup>, 张述伟<sup>1,2</sup>, 吴 宁<sup>1,2</sup>, 褚东志<sup>1,2</sup>, 曹 焯<sup>1,2</sup>, 孔祥峰<sup>1,2</sup>,  
马 然<sup>1,2</sup>, 刘凤庆<sup>1,2</sup>

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋监测仪器装备技术重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘 要:** 为满足海洋浮游生物的观测, 设计了大相对孔径、水下浮游生物观测专用变焦显微光学系统。该系统利用 Zemax 软件实现, 物距模拟海水介质, 采用平面水密隔窗, 设计像面尺寸为  $8.8\text{ mm} \times 6.6\text{ mm}$  CCD 感光板, 显微成像系统倍率变化范围为  $1.0 \sim 4.0$ 。变倍过程中数值孔径为  $0.15$ , 物方线视场范围为  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \sim 2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 。最大视场下, 奈奎斯特频率  $50\text{ lp/mm}$  处近轴视场和  $1$  视场的光学传递函数值均大于  $0.4$ ; 成像系统的畸变控制在  $3\%$  以内。该显微成像系统结构简单, 可以满足较小尺寸的浮游生物成像, 为浮游生物的分析及浮游生物种群的研究提供技术支持。

**关键词:** 海洋光学; 水下显微成像; 海洋浮游生物

**中图分类号:** O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)01-0035-04

## Design of Micro-optical Imaging System for Marine Plankton

MA Haikuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuwei<sup>1,2</sup>, WU Ning<sup>1,2</sup>, CHU Dongzhi<sup>1,2</sup>, CAO Xuan<sup>1,2</sup>,  
KONG Xiangfeng<sup>1,2</sup>, MA Ran<sup>1,2</sup>, LIU Fengqing<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao Shandong 266100, CHN*; 2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology, Qingdao Shandong 266100, CHN*)

**Abstract:** Marine plankton imaging technology plays an important role in the study of Marine ecosystem, and has great significance to fishery production and basic research of Marine science. In order to adapt to the observation of Marine plankton, a zoom micro-optical system with large relative aperture made for underwater plankton observation was designed. The imaging environment simulated seawater medium and this system was designed by Zemax software. The system used a  $8.8\text{ mm} \times 6.6\text{ mm}$  CCD camera, and the imaging system multiplier were 1, 2, 4, respectively. The numerical aperture remains  $0.15$  during the process of changing times. The field of view was  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \sim 2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ . At the maximum field of view, the optical transfer function (MTF) of near-axial field of view and  $1$  field of view at Nyquist frequency  $50\text{ lp/mm}$  was both greater than  $0.4$ , and the distortion of the

收稿日期: 2019-08-10

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400800); 山东省自然科学基金(ZR2018PD010); 山东省自然科学基金(ZR2019BD044)

作者简介: 马海宽(1989—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为光学传感器设计; (E-mail: dzmahaikuan@163.com)

张述伟(1986—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为海洋化学仪器研发;

吴 宁(1986—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为海洋传感器光电检测研发。

imaging system was controlled within 3%. The microscopic imaging system structure is simple, and can satisfy the plankton imaging of small size, providing the analysis of the plankton and phytoplankton population research with technical support.

**Key words:** ocean optics; underwater micro-imaging; marine plankton

## 引 言

浮游生物在研究海洋生态学中扮演着重要的角色,对渔业生产及海洋科学理论基础研究具有重要的现实意义<sup>[1-2]</sup>。目前,针对于海洋浮游生物的研究手段,主要以人工采集、实验室观察分析为主,这种方法易受时效、海况及人力的影响,不能满足现代化海洋发展的要求<sup>[3-4]</sup>。随着光学成像技术的发展,先进的显微放大光学成像技术在海洋浮游生物的研究领域占据了一席之地<sup>[5]</sup>。由于海水具有特定的光学特性,空气中的成像系统在海水中进行成像时,易受海水折射率、散射率及盐度的影响,造成成像系统的相差和视场变化,严重影响成像质量<sup>[6]</sup>。为实现海洋浮游生物的清晰成像,设计水下显微光学成像系统十分必要。

目前,应用于水下的显微放大镜头大部分为显微成像系统直接添加防水罩来完成水下放大成像。由于海水的特殊性质,其作为光传输介质时与空气有很大的区别,单纯的空气中的显微物镜在海水中使用时会使像质变差,产生严重的色差和畸变<sup>[7-8]</sup>。同时,显微物镜应用于观察小尺寸浮游生物时,成像物距和景深较小,不易改变显微放大倍率。

文章采用轴向移动三档变焦形式,设计了针对观测海洋浮游生物的变焦显微成像系统。变倍过程中数值孔径保持为 0.15,物方线视场范围为  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \sim 2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ,可以满足  $10 \sim 100\ \mu\text{m}$  大小的浮游生物成像,既可大范围内观察浮游生物群体,同时可以对成像的局部浮游生物进行分析。成像系统工作距离为 63 mm,具有合理的距离安装防水窗口。

## 1 海水对浮游生物光学成像的影响分析

光在海水中进行传输过程的衰减与光波长有关,光在海水传输过程的能量与传输距离呈指数衰减,光衰减主要包括海水的吸收衰减和散射衰减。

海水吸收所造成的辐射能量损失为:  $d\phi = -a\phi dr$ , 吸收系数  $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda)$ , 其中  $a_w(\lambda)$ 、 $a_y(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$  分别为水分子、黄色物质和盐类对光的吸收系数,  $\lambda$  为波长<sup>[9-10]</sup>。散射所引起的辐射能量损失为:  $d\phi = -b\phi dr$ , 散射系数  $b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_d(\lambda)$ , 其中  $b_w(\lambda)$ 、 $b_d(\lambda)$  分别为水分子、盐类散射的散射系数<sup>[9-10]</sup>。海水对光具有选择性吸收作用,在环境光照射状态下,随着拍摄距离的增加,成像质量迅速下降<sup>[11]</sup>。因此,在浮游生物成像系统设计过程中,需要合理控制成像距离,并采用适用海水的成像系统。

## 2 浮游生物显微成像系统设计

### 2.1 成像系统参数设定

本设计系统针对海水中  $10 \sim 100\ \mu\text{m}$  浮游生物成像,显微放大成像系统设定 4 倍、2 倍和 1 倍三档变倍系统。光电成像器件采用高信噪比、低照度、高像素,成像靶面大小为  $1.69\text{ cm}$  CCD 成像器件,像元尺寸  $10\ \mu\text{m}$ 。变倍过程中数值孔径( $NA$ )为 0.15,其数值孔径公式为:

$$NA = n_1 \sin U \quad (1)$$

式中  $n_1$  是海水的折射率。由于海水的折射率大于空气的折射率,海水中工作的显微成像系统数值孔径  $NA$  大于空气中的成像系统。在不同放大倍率下,成像系统物方线视场范围为  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \sim 2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ,可以保证成像视场内浮游生物数量。成像系统物距保持为 63 mm,便于安装 3 mm 厚的密封窗口玻璃。

显微放大成像系统在进行浮游生物成像过程中,需要有合理的成像景深,才能完成浮游生物的清晰成像。成像系统景深公式为:

$$\Delta L = \frac{n\delta}{\beta} \cdot NA \quad (2)$$

其中  $n$  为海水折射率,  $\beta$  为垂轴放大率,  $\delta$  为像面弥散圈允许直径,  $NA$  为数值孔径<sup>[12]</sup>。不同放大倍率下,景深大小满足成像要求。

### 2.2 成像系统结构设计

为满足海水中浮游生物的实时观测和分析,研究设计了适用于水下的浮游生物显微放大成像专用镜头。采用Zemax软件完成成像系统的设计,本设计既需要保证变倍过程成像区域的一致性,同时还要满足成像质量的要求。为满足成像系统的要求,该系统将海水厚度设计成60 mm,隔水窗口厚度为3 mm,数值孔径NA为0.15,三档成像放大倍数为4倍、2倍和1倍。物方大视场成像区域为8 mm×6 mm,最小视场成像区域为2 mm×1.5 mm。三档变倍成像结构如图1所示。

光学系统含有8个镜片,其中4片双胶合透镜

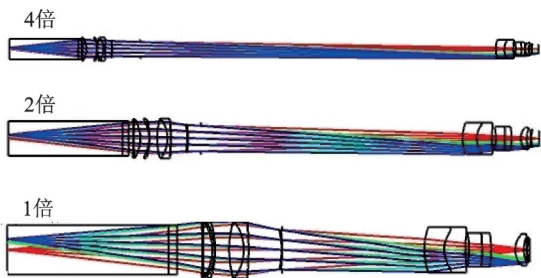


图1 光学系统结构图

Fig.1 Optical system layout

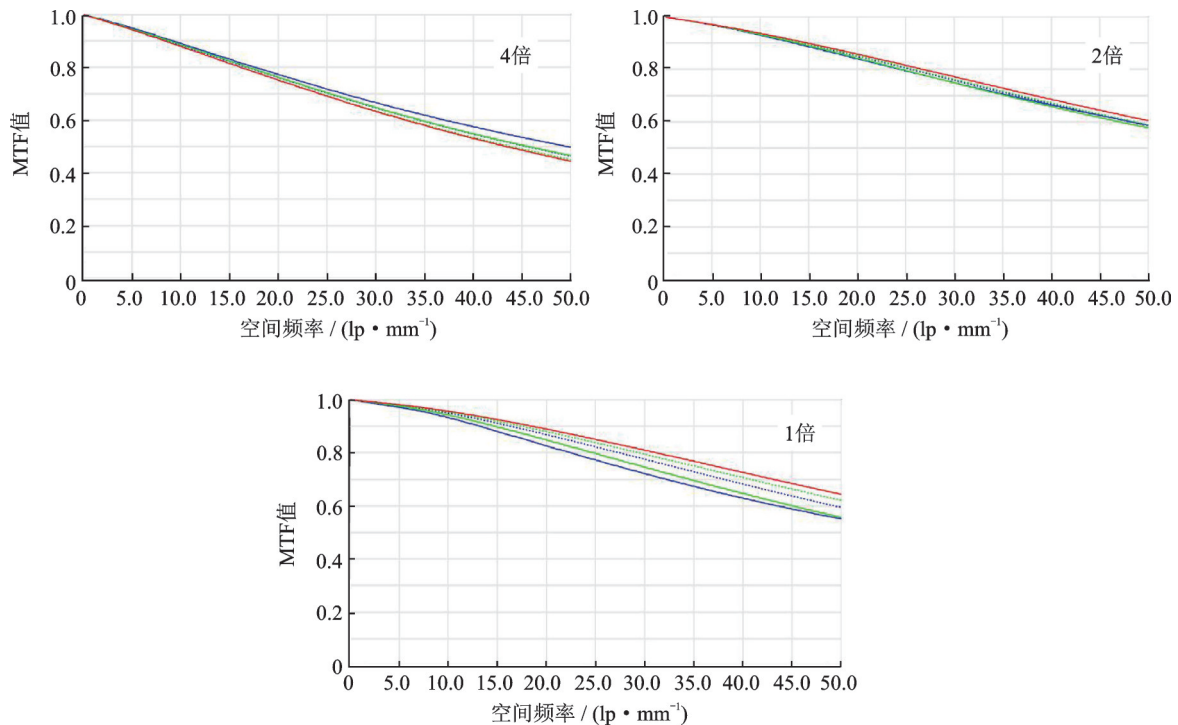


图2 光学系统传递函数

Fig.2 MTF diagram of optical system

场曲曲线是表示从像面到理想像面的距离关于视场坐标的函数,畸变是反映实际成像主光线高度与参考光线高度偏差。图3(a)、图3(b)、图3(c)

(LAFN7与BALKN3、N-BK7与F4、SF1与N-LAK7、SSKN5与N-BK7)和2片非球面透镜(K3和SK51)可以有效地消除部分色差和球差。隔水窗口采用厚度3 mm,材质为N-BK7的平行窗口。光阑位于镜头前后固定组之间,系统总长为340 mm。

### 2.3 成像系统像质评价

光学成像系统的性能指标,可以采用不同频率下的光学调制传递函数(MTF)、场曲畸变曲线和点列图来表征成像效果<sup>[13]</sup>。MTF是评价光学系统成像效果的主要形式<sup>[13]</sup>,它与光学成像系统存在的像差和衍射有关,可以客观地评价光学系统的成像效果。光学成像系统奈奎斯特频率 $N=1/2d$ ( $d$ 为CCD像元尺寸), $N$ 值为50 lp/mm,三档倍率的各视场MTF如图所示。图2(a)为4倍镜头的MTF,奈奎斯特频率 $N=50$  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2(b)为2倍放大镜头的MTF,各视场MTF值均可达0.8。图2(c)为1倍放大镜头下的MTF,在 $N=50$  lp/mm时,各视场MTF均值均在0.8以上。

分别为不同放大倍数下的场曲和畸变图,不同放大倍数下的各视场,畸变控制在3%以内,畸变变化较小,场曲控制在成像的合理范围。

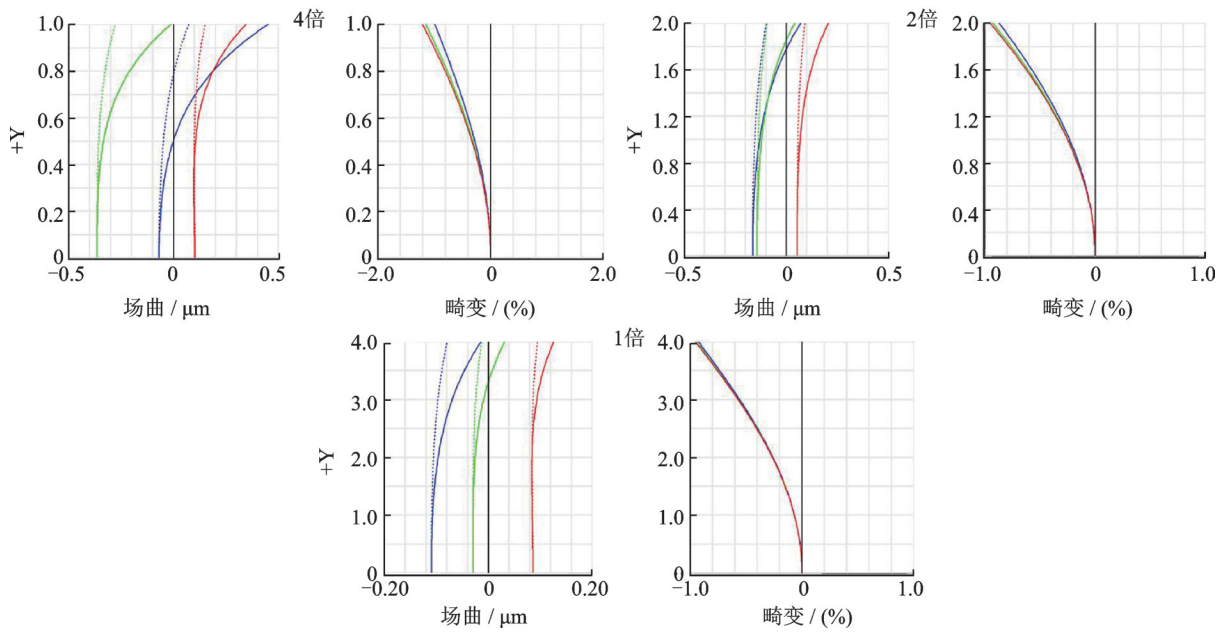


图 3 光学系统场曲和畸变

Fig.3 Field curvature and distortion of optical system

实际光学系统成像过程会存在像差,光线经成像镜头会汇聚成一定范围的弥散斑,形成的弥散斑可通过点列图进行分析。图 4 为不同放大倍数下

的点列图,各放大倍数下的最大均方根弥散斑半径分别为 14.2 μm、11.6 μm 和 12 μm,满足成像要求。

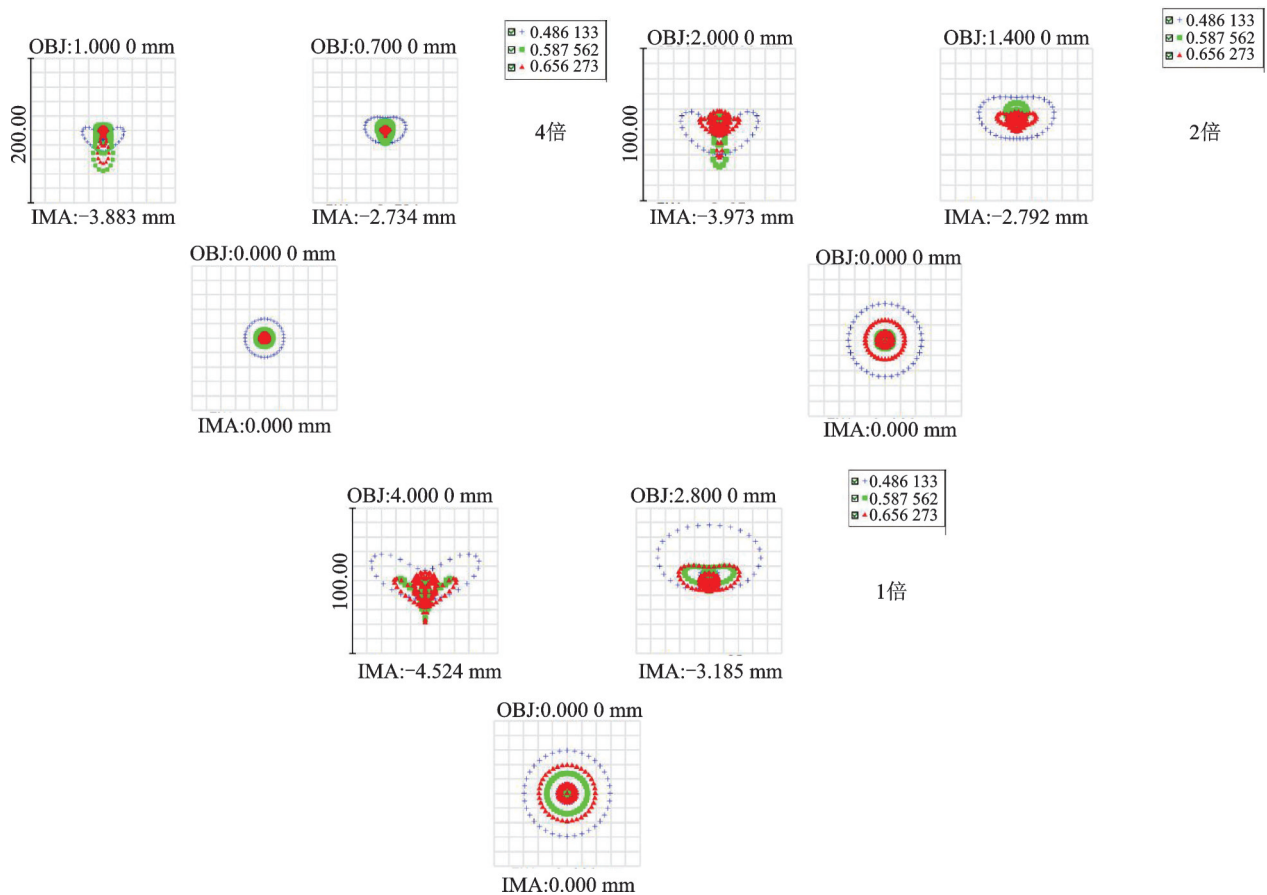


图 4 光学系统点列图

Fig.4 Point column diagram of optical system

(下转第 43 页)