

· 光学设计 ·

用于水下微光监控系统的成像系统设计

董 会, 温亚楠, 朱建鑫, 孔倩倩

(青岛市光电工程技术研究院, 山东 青岛 266019)

摘要: 为了改善水下微光环境下成像效果, 提高水下视频的清晰度和灵敏度, 设计了用于水下的微光成像光学系统。采用像增强组件增大水下监控系统的灵敏度, 同时配合大相对孔径和大视场角的光学物镜及照明光源。基于反望远结构, 通过优化玻璃组合采用10片玻璃设计了一个相对孔径为1/2, 水下视场角为50°的水下监控用成像物镜, 经过质量评价后表明, 该光学系统成像质量较好, MTF在65 lp/mm时对比度达0.5以上, 各项性能指标能够满足目前水下监控的需求。

关键词: 应用光学; 水下微光监控; 光学设计; 像增强器

中图分类号: TN942.2; TB853.18

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0025-03

Design of Imaging Optical System for underwater Low Light Level Monitoring System

DONG Hui, WEN Ya-nan, ZHU Jian-xin, KONG Qian-qian

(Qingdao Academy for Opto-Electronics Engineering, Qingdao 266019, China)

Abstract: An underwater low light imaging optical system is designed to improve imaging effect, resolution and sensitivity of underwater video. Image intensifier assembly is used to increase the sensitivity of underwater monitoring system. Optical lens and illumination light sources with large relative aperture and large field of view (FOV) angle are used at the same time. An underwater low light level monitoring imaging objective with 1/2 relative aperture and 50° underwater FOV angle is designed with 10 optical elements through optimization combination based on inverse telephoto structure. Quality assessments show that the optical system has an excellent imaging quality, modulation transfer function (MTF) is better than 0.5 at 65 lp/mm, and all the specifications meet the requirements of underwater low light level monitoring.

Key words: applied optics; underwater low light level monitoring; optical design; image intensifier

水下微光成像技术在水下安防监控、海洋工程质量检测、水产养殖观察、船舶检测、水下打捞等方面具有极其广阔的应用前景和经济效益^[1-3]。由于海水的吸收衰减, 水下能见度较低。即使是比较纯净的海水, 在超过一定深度后, 水下也是处于微光状态或无光状态。因此, 必须采用合适的技术手段提高成像质量, 实现对水下目标的监控成像。文中采用了微光像增强技术提高光电成像系统灵敏度, 通过像增强器、光锥、电荷耦合器件(charge-coupled

device, CCD)耦合的方法, 提高目标成像的亮度。因此前方的光学镜头成像在像增强器的入射面上而非直接成像CCD靶面上。根据以上技术要求, 设计大视场大相对孔径的成像光学系统。

1 水下微光监控系统

1.1 水下环境影响

水的衰减是由吸收和散射引起的, 光在水中传

收稿日期: 2016-05-20

基金项目: 青岛市战略性新兴产业培育计划项目(14-9-1-1-hy)

作者简介: 董会(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事光学设计工作; 温亚楠(1981-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事光学信息处理方面工作。

输时的能量按指数规律衰减^[4]。单色平行光束的照度可用简单的指数方程来描述,即设 I_0 是某水层的光量,传输了 L 路程后的光量 I 为

$$I = I_0 e^{-cL} \quad (1)$$

式中, c 为体积衰减系数,表示光传输 1 m 距离后光能量衰减的对数值(自然对数),单位是 m^{-1} ^[5]。一般来说,海水在 $0.48 \sim 0.57 \mu\text{m}$ 的蓝绿光存在一个“水窗口”,即在此波段衰减最小,但是水对光能的吸收也足以使光强每米衰减百分之四。除了水对光的吸收特性之外,水对光的另外一个重要特性是散射。散射会缩短成像距离,降低成像的对比度^[4]。因此,在水下成像时,必需借助水下辅助照明设备才能实现水下目标的清晰成像。

1.2 微光像增强组件

采用了像增强器、光锥与 CCD 耦合的方式实现弱信号的增强。利用光纤光锥,将经过像增强器输出的图像耦合到 CCD 的光敏面上,实现微光摄像和高分辨率成像,在设计和采用光纤光锥时,考虑尽可能的收集从像增强器输出的光子能量,并且以最小的像差投影到 CCD 的光敏面上,光锥的前端需要与像增强器的输出端匹配,后端需要与 CCD 光敏面匹配^[6],如图 1 所示。

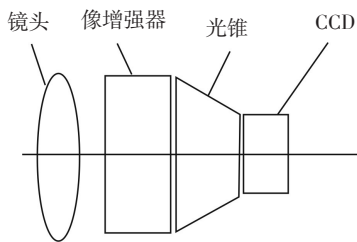


图1 像增强组件

光锥与 CCD 耦合时,光锥的小端面要按照 CCD 的有效工作面积的大小。在超净室中通过机械或化学等方法去除 CCD 的石英玻璃保护窗,再与 CCD 靶面紧密接触。同时,要保证光锥端面有较好的平行度和光圈数,耦合以后能够清晰地成像^[7]。

1.3 水下照明方案

采用绿光发光二极管(light-emitting diode, LED)(520 nm~530 nm)的光学“水窗口”照明,可实现光源和光电传感器件的最佳匹配,提高系统光学接

收和光电转换效率,实现水下成像效果的合理优化。光源与镜头匹配方案:当镜头角度大于光源角度时,将产生手电筒效应;当镜头角度小于光源角度时,将浪费光源;当镜头角度比光源角度小一点点时,镜头和光源得到有效地利用。

2 水下微光监控光学系统设计

2.1 技术要求

设计一个以像增强器入射面为接收面的水下微光镜头,像增强器采用 PHOTONIS 公司的 XD-4 型号,入射面尺寸为直径 18 mm,CCD 选择 watec-902h2 型号低照度探测器。成像物镜的具体技术要求如表 1 所示。

表1 光学系统技术要求

参数	指标
相对孔径	1/2
焦距	12 mm
水下视场角	50°
像元尺寸	8.5 μm
光谱范围	0.5~0.6 μm
畸变	<5%
传递函数	>0.5@65 lp/mm

由以上参数指标可知,该光学系统为大视场大相对孔径成像物镜,在像差理论中,对于大视场大相对孔径物镜,光学系统的各种高级像差比如高级球差、高级彗差等校正比较困难。因此在合理选择初始结构的同时,适当将系统结构复杂化,便于校正高级像差,得到较好的成像质量。

2.2 设计结果

水下监控物镜系统物方介质为海水而非空气,因此光学系统前需安装耐压密封平板玻璃窗,该玻璃窗为光学系统第一面,参与成像及像差校正。选择石英玻璃作为玻璃窗材料,主要是因为石英玻璃成本较低,同时具有优良的光谱特性和化学稳定性。

由于反望远结构可同时实现大视场大相对孔径,同时又具有较长的后工作距离,便于在像面处安装像增强器,因此作为首选初始结构,根据校正

像差的需求,将初始结构进行了适当的复杂化,共10片镜片(包括平板水密玻璃窗),如图2所示。在前负组中包含两个负透镜,将大角度的入射光线经过前组后变成小角度入射光线。后正组基本选择一个对称式的结构,可以较好地控制彗差、场曲等像差。光阑位于后正组中间。

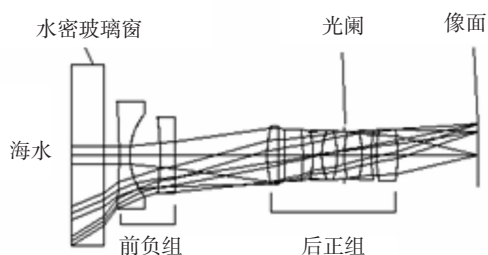


图2 光学系统结构图

设计结果:焦距12 mm,相对孔径为1/2,水下全视场角50°,玻璃窗厚度为10 mm,口径为45 mm,整个物镜系统总长度126 mm,后工作距为25 mm,像高为18 mm。

2.3 质量评价

以光学传递函数MTF为标准进行系统质量评价,光学传递函数是一种比较全面客观的评价方法,高频部分反映了物体细节的传递能力,低频部分反映了物体轮廓的传递能力。像增强器的极限分辨率为65 lp/mm,同时CCD最小像元尺寸 a 为8.5 μm ,CCD的极限分辨率为59 lp/mm,像增强器的分辨率略大于CCD的分辨率,这是比较合理的。MTF曲线如图3所示。当奈奎斯特频率为65 lp/mm时,所有视场MTF值均达到0.5以上,成像效果较好。能量包络曲线图如图4所示。

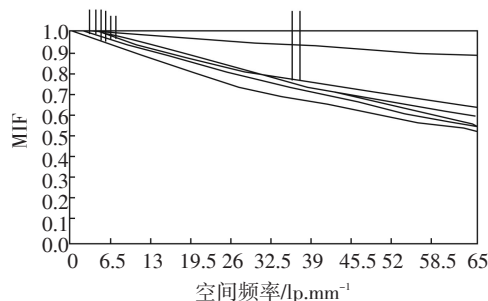


图3 光学传递函数

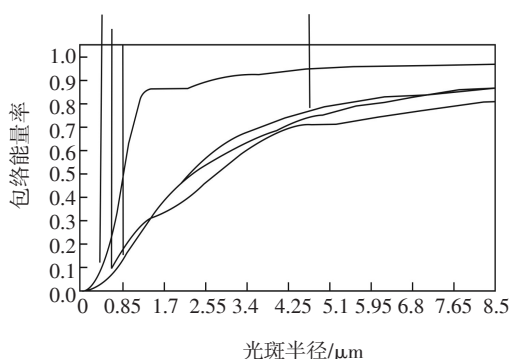


图4 能量包络曲线

由图中可以看出,在8.5 μm 为半径的圆内,所有视场所包含能量达到80%以上。畸变图如图5所示。

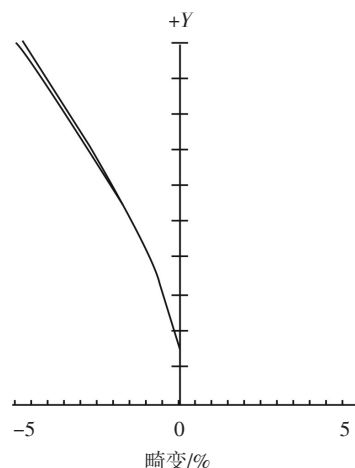


图5 畸变曲线

全视场畸变为-4.84%,此时,肉眼观察边缘视场,可看到畸变所导致的轻微像面弯曲,但是是可以接受的,达到技术指标要求。

3 结论

基于反望远结构,设计了大视场大相对孔径水下监控物镜光学系统,在光学系统之后通过像增强组件增大水下监控的灵敏度,同时配合照明光源,可使得水下成像效果大大改善。质量评价结果表明,该光学系统成像质量较好,适用于水下监控、海洋工程质量检测、水产养殖观察、船舶检测、水下打捞等方面。

(下转第36页)

- Communications, 2007, 277: 390-396.
- [8] Vysotsky D V, Elkin N N, Napartovich A P. Selection of optical modes in multichannel fibre lasers[J]. Quantum Electronics, 2006, 36: 73-75.
- [9] Talbo H F. Facts relating to optical science[J]. Phiios Mag, 1836, 9: 40-41.
- [10] Leger J R. Lateral mode control of an AlGaAs laser array in a Talbot cavity[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55: 334-336.
- [11] Zhu X, Scholzgen A, Li H. Single-transverse-mode output from a fiber laser based on multimode interference[J]. Opt Lett, 2008, 33: 908-910.

(上接第12页)

- [2] Stern A, Javidi B. Random projections imaging with extended space-bandwidth product[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(3):315-320.
- [3] Marcia R F, Willett R M. Compressive coded aperture super-resolution image reconstruction[J]. Proc. of IEEE, 2008.
- [4] Pitsianis N P, Brady D J, Sun X. Sensor-layer image compression based on the quantized cosine transform[J]. SPIE Visual Information Processing, 2005.
- [5] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging[J]. IEEE Radar Conference, 2007:128-133
- [6] David Brady, Kerkil Choi, Daniel Marks, et al. Compressive holography[J]. Optics Express, 2009, 17:13040-13049.
- [7] Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging[J]. Magn. Reson. Med., 2007, 58(6):1182-1195.
- [8] Lu Y, Zhang X, Douraghy A, et al. Source reconstruction for spectrally-resolved bioluminescence tomography with sparse a priori information[J]. Opt. Express, 2009, 17(10): 8062-8080.
- [9] Bobin J, Starck J-L, Ottensamer R. Compressed sensing in astronomy[J]. IEEE, 2008, 2(5):718-726.
- [10] Albert C, Fannjiang, Thomas Strohmmer, et al. Compressed remote sensing of sparse objects[J]. Imaging Sciences, 2005, 3(3):595-618.

(上接第27页)

参考文献

- [1] Woods A J, Penrose J D. The development of a compact underwater stereoscopic video camera[J]. SPIE, 1997, 3012:92-95.
- [2] Trimble G M. Area reconnaissance, object relocation and classification using cooperating autonomous underwater vehicles[J]. SPIE, 1999, 3711:195-202.
- [3] Kubota S, Shimada H. High-speed photography of underwater sympathetic detonation of explosives[J]. SPIE, 2001, 4183:760-770.
- [4] Evans C, Doshir. Tale of two underwater lenses[J]. SPIE, 1991, 1537:203-214.
- [5] 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.
- [6] 王耀祥,田维坚,黄琨,等.光锥与CCD耦合效率的理论分析[J].光子学报,2004,33(3):318-320.
- [7] 王志社,陈树越,曾光宇,等.便携式数字X射线光锥耦合CCD成像系统研究[J].传感器与微系统,2007,26(9):26-28.
- [8] 郭远华,侯晓荣.针对椒盐噪声的开关模糊滤波器[J].计算机应用,2012,32(5):1293-1295,1334.
- [9] 黄光亚,曾水玲,张书真,等.基于三维轴距的图像去噪算法[J].电子与信息学报,2015,37(3):552-559.
- [10] 王贵君,杨永强.基于高概率椒盐噪声的模糊滤波器在图像恢复中的算法设计[J].电子学报,2015(1):24-29.