

## 利用水下平行光管测量水下相机成像分辨率

丁 喆<sup>1,2</sup>, 吴国俊<sup>1,2\*</sup>, 吴亚凤<sup>1</sup>, 封 斐<sup>1,2</sup>, 刘 博<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 水下光学成像是重要的水下探测方式。现有水下相机成像检测方法受到水体本身以及测量方法的影响, 难以准确进行成像分辨率检测。提出了基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测技术, 通过在水中产生平行光束, 直接对水下相机成像分辨率进行检测。通过仿真得出: 水下平行光管在水中可见光和空气中单波长的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 基本一致。利用这一结论, 提出了水下平行光管空气中装调检测的方法。针对实验室所研制的一款水下相机开展实验测试, 其在水中可见光与空气中 635 nm 光源照明条件下的分辨率相同。实验结果表明, 所提出的基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测方法可有效消除水体对分辨率测量的影响, 实现水下相机成像分辨率的准确测量。

**关键词:** 水下光学; 分辨率测量; 水下平行光管; 水下相机; 色差

**中图分类号:** TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220397

## Measurement of underwater camera imaging resolution using underwater collimator

Ding Zhe<sup>1,2</sup>, Wu Guojun<sup>1,2\*</sup>, Wu Yafeng<sup>1</sup>, Feng Fei<sup>1,2</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Underwater optical imaging is an important underwater measurement method. The existing underwater camera imaging resolution measurement method is affected by the water body and the measurement method, and it is difficult to accurately measure the imaging resolution. The underwater camera imaging resolution measurement technology based on an underwater collimator is proposed to directly measure the underwater camera imaging resolution by generating parallel light beams in the water. Through simulation, the modulation transfer function (MTF) of the underwater collimator in visible light in water and single wavelength in the air are basically the same. In conclusion, a method for adjusting the underwater collimator in the air is proposed. The experimental test is carried out for an underwater camera developed in the laboratory, and its resolution under the condition of visible light in water and a 635 nm light source in the air is the same. The experimental results show that the proposed underwater camera imaging resolution measurement method based on the underwater collimator can effectively eliminate the influence of water on the measurement and realize the accurate measurement of the underwater camera imaging resolution.

收稿日期: 2022-06-08; 修订日期: 2022-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41927805)

作者简介: 丁喆, 女, 硕士生, 主要研究方向为水下成像。

导师(通讯作者)简介: 吴国俊, 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为流场光学测量技术及水下光学传感技术。

**Key words:** underwater optics; resolution measurement; underwater collimator; underwater camera; chromatic aberration

## 0 引言

水下成像能够直观有效地反映海洋环境,广泛应用于海洋环境观测、水下目标探测、水下工程作业及水下考古等领域<sup>[1-4]</sup>。水下光学成像普遍存在成像质量退化问题<sup>[5]</sup>,限制了其应用效果。影响水下成像质量的因素主要分为两类:一类是水下相机自身的成像质量<sup>[6-9]</sup>;另一类是水体本身的固有光学性质对水下成像质量的影响<sup>[10-12]</sup>。由于水体与空气光学性质的差异,不能用空气中的成像质量来直接替代水下成像质量,因此,需要研究水下成像质量的检测方法。

现有的水下光学成像质量检测方法主要有两种:一种是通过空气检测加理论仿真的方法来间接评估水下相机在水中的成像质量,LAVEST J M 等人给出了在空气中进行水下相机标定的公式<sup>[13]</sup>,以此推算水下相机的焦距、视场以及畸变等指标;另一种是将水下相机放置在实验水池中,并在镜头不同物距放置鉴别率板图案,观察相机拍摄的鉴别率板图案<sup>[14-15]</sup>。

通过空气中检测加理论仿真的方法来间接评估水下相机在水中的成像质量,存在两点问题:一是无法得到水下相机在实际水下环境中的成像质量;二是受到实际加工装配误差的影响,带来无法避免的仿真模型误差。因此,该方法的检测结果可靠性难以保证。

将水下相机放置在实验水池中,观察相机拍摄的不同物距处的鉴别率板图案的水下相机成像质量检

测方法,存在两点问题:一是该方法需要准确测量水下相机的物距大小,水下相机的物距测量准确性难以保证,影响了检测准确性;二是该方法受到水体本身的影响,最终得到的结果是水体本身和水下相机共同导致的成像结果。

针对现有水下相机成像质量检测方法存在的问题,构建了基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测方法。通过构建水下专用平行光管,产生水中基准平行光束,实现在水下环境中直接进行水下相机的成像质量检测。该方法具有如下优点:避免仿真模型误差对检测结果的影响,保证测量结果可靠准确;无需准确测量水下相机的物距大小,降低水下操作难度;能够避免水体本身对于水下成像分辨率的影响,得到准确的水下相机成像分辨率。

## 1 基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测原理

分辨率作为成像分辨率的评价方式具有指标单一、便于测量等优势,是光学相机的主要评价指标<sup>[16]</sup>。

基于水下平行光管的水下成像分辨率检测原理如图 1 所示,左侧为测量基准的水下平行光管,右侧为水下待测相机,两者均置于水中,且间距尽可能小。

调节水下平行光管光轴与水下相机光轴重合,控制水下相机拍摄水下平行光管鉴别率板。利用公式(1)计算待测水下相机成像分辨率<sup>[17]</sup>:

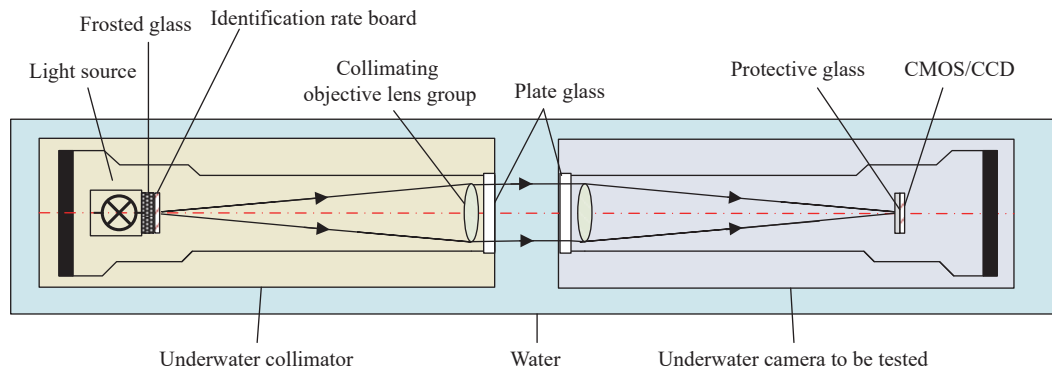


图 1 水下相机分辨率检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of underwater camera resolution measurement

$$N = N_0 f_0 / f_c \quad (1)$$

式中:  $N_0$  为水下相机可分辨的鉴别率板线对数;  $N$  为水下相机成像分辨率线对数;  $f_0$  为水下平行光管焦距;  $f_c$  为水下相机物镜焦距。

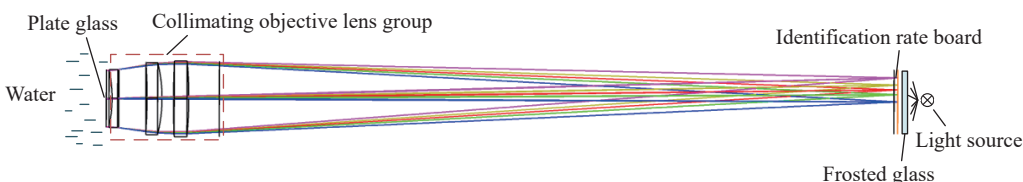


图 2 水下平行光管系统光路

Fig.2 Optical path of underwater collimator system

水下平行光管的前端为针对水体折射率设计的准直物镜组以及平板窗口, 后端为鉴别率板和照明组件。光源发出的光经过毛玻璃匀光后, 照明鉴别率板, 再经过准直物镜组、平板窗口后在水中形成平行光。

鉴别率板选用美标鉴别率板 USAF1951, 如图 3 所示。

美标鉴别率板 USAF1951 每 1 mm 的线对数如表 1

## 2 水下平行光管的构建

### 2.1 水下平行光管光路构建

水下平行光管光学系统如图 2 所示, 系统由光源、毛玻璃、鉴别率板、准直物镜组和平板窗口组成。

表 1 USAF1951 线对数 (单位: lp/mm)

Tab.1 USAF1951 line pair count (Unit: lp/mm)

Element	Group number						
	0	1	2	3	4	5	6
1	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.00	64.00
2	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.00	71.80
3	1.26	2.52	5.04	10.10	20.16	40.30	80.60
4	1.41	2.83	5.66	11.30	22.62	45.30	90.50
5	1.59	3.17	6.35	12.70	25.39	50.80	102.00
6	1.78	3.56	7.13	14.30	28.51	57.00	114.00

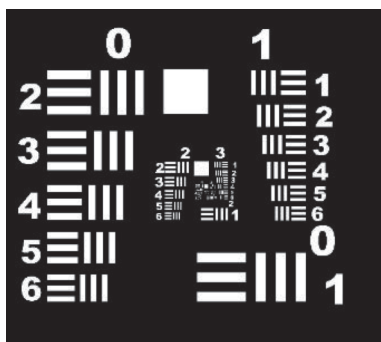


图 3 USAF1951  $\Phi 30 \times 3$  mm 负片

Fig.3 USAF1951  $\Phi 30 \times 3$  mm negative film

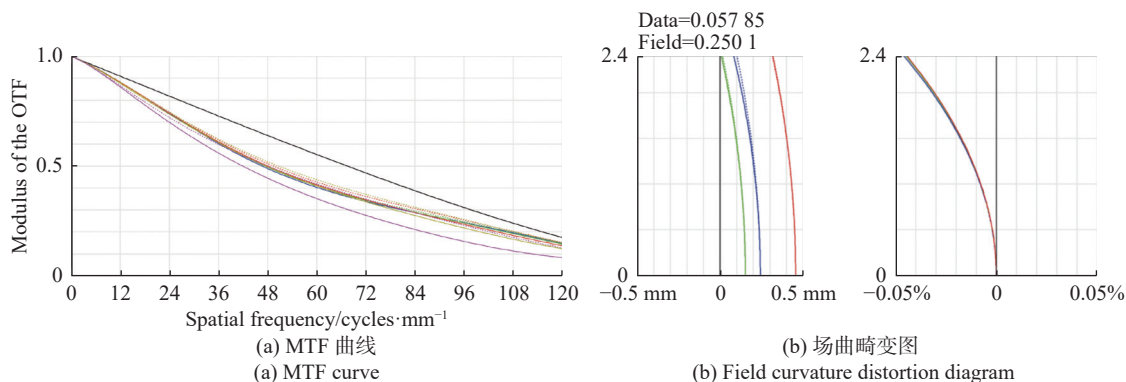


图 4 水下平行光管像差曲线

Fig.4 Underwater collimator aberration curve

图 4(a)、(b) 分别为水下平行光管的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线图、场曲畸变曲线图。全视场分辨率可达到 120 lp/mm 以上, 准直光学系统最大畸变为 0.0447%。球差、色差等各类像差得到很好校正, 满足水下光学系统检测的需求。

### 2.3 水下平行光管的装调与检测

水下平行光管作为水下相机成像检测的标准仪器, 需要确保其本身出射光的准直性。由于水下平行光管工作于水中, 无法采用常用的平行光管装调方法<sup>[18-20]</sup>。

水下平行光管在水中和空气中的像差曲线如图 5

所示。首先分析水下平行光管在水中和空气中的像质差异。图 5(a)、(b) 分别为水下平行光管在水中和空气中的 MTF 曲线。将水下平行光管置于空气中时, 成像质量会发生严重的衰减。这是由于色差的影响, 不同波长的光经过准直物镜组会聚后焦点位于沿轴的不同位置。

进一步分析水下平行光管在水中可见光和空气中单色光的像质差异。如图 6(a)~(d) 分别为水下平行光管在水中可见光照明、空气中 635 nm 光源照明、空气中 532 nm 光源照明和空气中 470 nm 光源照明在同样焦面位置的 MTF 曲线。

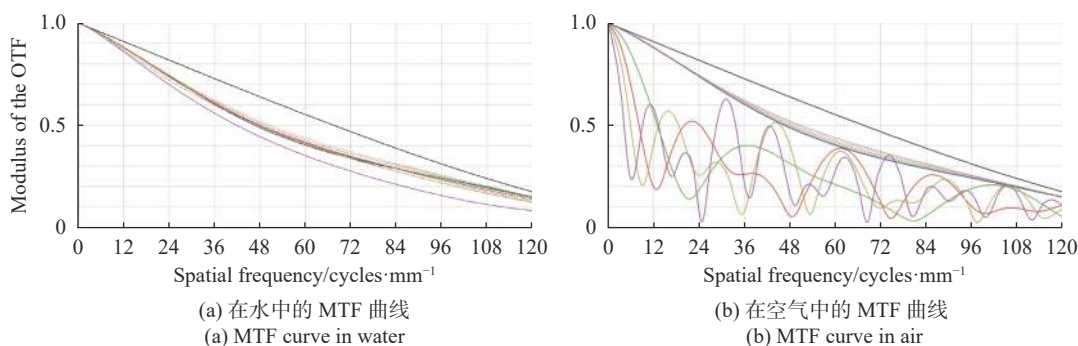


图 5 水下平行光管在水中和空气中的像差曲线

Fig.5 Underwater collimator aberration curve in water and air

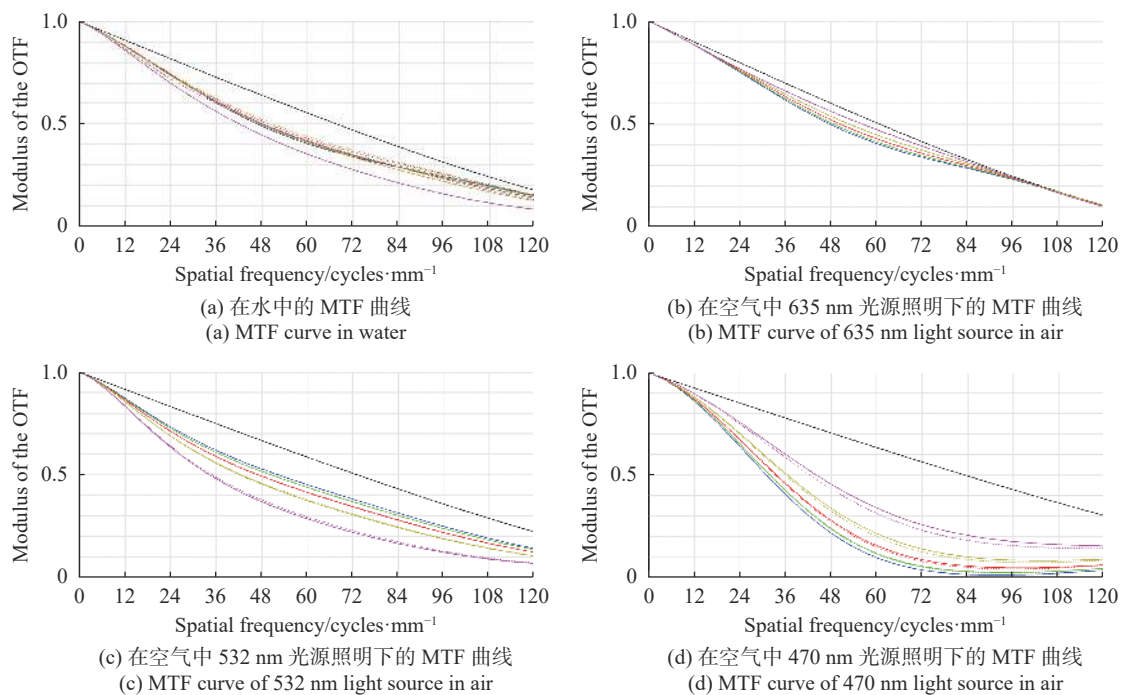


图 6 水下平行光管在不同波长下的 MTF 曲线

Fig.6 Underwater collimator MTF curve at different wavelength

对比发现,水下平行光管在空气中 635 nm 光源照明下的 MTF 曲线与水中可见光照明的 MTF 曲线基本一致。说明可以采用单波长的照明条件,在空气中进行水下平行光管的装调。选用波长为 635 nm 的红色激光光源,使用型号为威尔特 T3A 的经纬仪调节确定水下平行光管最佳焦面位置。

据此,在空气中采用标准传递法完成水下平行光管装调、检测<sup>[21]</sup>。在空气中 635 nm 光源照明条件下,使用经过严密校准的焦距 1200 mm 的平行光管对水下平行光管进行检测。水下平行光管可清晰辨认的鉴别率板单元对应线对数达到 120 lp/mm,说明水下平行光管具备良好的成像分辨率检测能力。

### 3 水下相机成像分辨率检测实验及分析

针对实验室所研制的一款水下相机开展实验验证。由仿真分析可知,其在水中可见光光源和空气中 635 nm 光源的 MTF 曲线同样具有良好吻合性。采用上述两种光源分别于水下和空气中进行该水下相机分辨率检测。实验装置如图 7 所示。

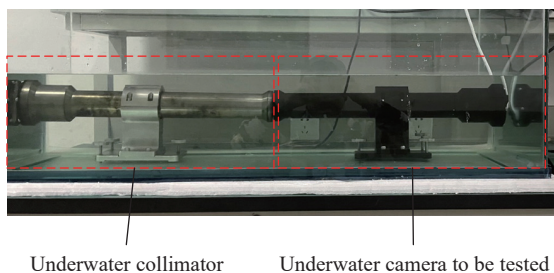


图 7 实验装置图

Fig.7 Experimental setup

调节水下平行光管光轴与水下相机相对位置,使水下平行光管鉴别率板成像于水下相机中心视场。其中,进行水中的实验时,水下平行光管与水下相机紧贴放置,以消除水体散射对于水下相机成像分辨率检测的影响。水下平行光管检测水下相机成像分辨率的结果如图 8 所示。

图 8(a)、(c) 分别为水中和空气中的检测结果图;图 8(b)、(d) 分别为 (a)、(c) 的局部放大图。利用提出的基于水下平行光管的水下相机成像质量检测方法,分别在水中可见光和空气中 635 nm 光源照明条件下进行实验,水下相机的成像分辨率检测结果具有

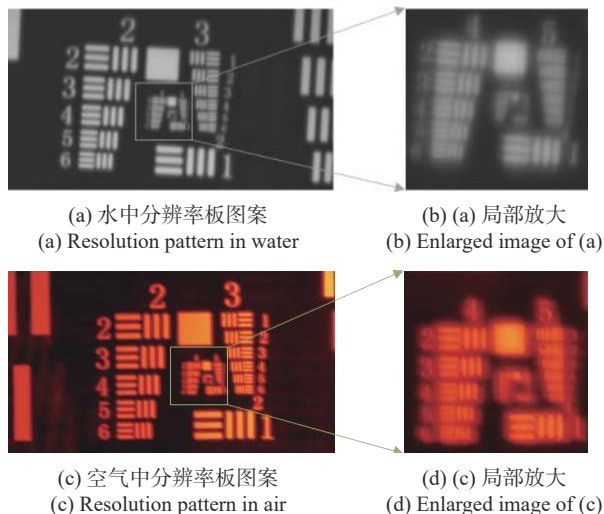


图 8 检测结果

Fig.8 Detection results

一致性,均可清晰分辨五组 1 号元素,对应分辨率为 32.00 lp/mm。由此可见,采用水下平行光管可以准确的进行水下相机成像分辨率检测。

### 4 结论

提出基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测技术,并构建了基准仪器。该方法可以有效消除水体对测量的影响,实现水下相机成像分辨率的准确测量。

针对水下平行光管的准直物镜组,采用无限远柯克物镜结构与平板窗口结合进行光学结构的设计优化,准直光学系统的全视场分辨率可达 120 lp/mm 以上。

针对水下平行光管无法直接在空气中进行装调的问题给出解决方法:水下平行光管在水中可见光和空气中 635 nm 光源照明条件,在同样焦面位置具有相同的分辨率,因此可将水下平行光管的装调检测过程引入空气。利用经纬仪确定水下平行光管最佳焦面位置,通过标准传递法检测水下平行光管可清晰辨认的鉴别率板单元线对数达到 120 lp/mm。

针对实验室所研制的一款水下相机开展实验测试,其在水中可见光与空气中 635 nm 光源照明条件下的分辨率相同,验证了提出的基于水下平行光管的水下相机成像分辨率检测方法能够准确地在水下环境中进行水下相机成像分辨率检测。



## 参考文献:

- [1] Jin 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. (in Chinese)
- [2] Jaffe J S. Underwater optical imaging: The past, the present, and the prospects [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(3): 683-700.
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] Lu H, Li Y, Zhang Y, et al. Underwater optical image processing: A comprehensive review [J]. *Mobile Networks & Applications*, 2017, 22(6): 1204-1211.
- [5] Lin Mingxing, Dai Chenggang, Dong Xue, et al. Survey of underwater image processing technology [J]. *Measurement & Control Technology*, 2020, 39(8): 7-20. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] Hu Ling, Wang Xia, Yan Bo, et al. Analysis of underwater range-gated imaging system MTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3262-3269. (in Chinese)
- [9] Xie Zhengmao, Dong Xiaona, Cheng 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. (in Chinese)
- [10] Hakim A H, McCormick N J. Ocean optics estimation for absorption, backscattering, and phase function parameters [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(6): 931-938.
- [11] Zhao Xinwei, Jin Tao, Chi Hao, et al. Modeling and simulation of the background light in underwater imaging under different illumination conditions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(10): 104201. (in Chinese)
- [12] Liu Fei, Sun Shaojie, Han Pingli, et al. Development of underwater polarization imaging technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0600001. (in Chinese)
- [13] Lavest J M, Rives G, Lapresté J T. Underwater camera calibration [C]/European Conference on Computer Vision, Computer Vision — ECCV 2000, 2000: 654-668.
- [14] Hou Pan. Design of measurement objective for underwater docking of spacecraft [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [15] Qu Rui, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, et al. Design of underwater large field of view zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200468. (in Chinese)
- [16] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [17] 贾玉润. 大学物理实验[M]. 上海: 复旦大学出版, 1987.
- [18] He Xu, Wu Guodong. Procedure to improve alignment accuracy of collimator reticle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0912001. (in Chinese)
- [19] 张斌. 检测测绘仪器用平行光管的安装与调校[J]. *中国标准化*, 2018(18): 161-162.
- [20] Shen Yingguang, Wu Xuewen, Wang Lulu, et al. Application of collimator in surveying and mapping instruments calibration [J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2019, 35(2): 62-65. (in Chinese)
- [21] Yang Zuze. The new method and principle of calibration collimator [J]. *Surveying and Mapping Sichuan*, 1997(1): 17-20. (in Chinese)