

文章编号:1002-2082(2019)05-0717-06

水下仿生偏振成像光学系统设计

刘卿卿^{1,2}, 居彩华¹, 明梅¹

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要:在水的光学特性影响下,为了对水下目标进行实时探测,通过研究螳螂虾视觉偏振成像原理,仿照其独特的复眼结构,充分利用分振幅和基于孔径分割技术,设计了一种新型的水下实时偏振成像系统。采用四通道阵列结构和双通道阵列相结合,用圆偏振技术和线偏振技术对水下目标进行实时成像。通过Zemax软件实现该系统设计,系统焦距为35 mm, F 数为4,工作波长为可见光波段486 nm~656 nm,半视场角为 $\pm 2.5^\circ$ 。设计结果表明:MTF >0.7 (@60 lp/mm),系统弥散斑 $<9\ \mu\text{m}$,畸变小于0.5%,可满足成像要求。

关键词:水下成像;仿生视觉;偏振成像;光学设计

中图分类号:TN202;TB853.18

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201940.0501001

Design of underwater bionic polarization imaging optical system

LIU Qingqing^{1,2}, JU Caihua¹, MING Mei¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Under the influence of the optical properties of water, in order to detect underwater targets in real time, by studying the principle of visual polarization imaging of mantis shrimp, mimicking its unique compound eye structure, and using the amplitude and aperture-based segmentation techniques, a new underwater real-time polarization imaging system was designed. The combination of a four-channel array structure and a two-channel array enabled the real-time imaging of underwater targets using circular polarization and linear polarization techniques. The design of the system was realized by ZEMAX software, and the focal length is 35 mm, the F number is 4, the working wavelength is 436 nm~656 nm, and the half angle of view is $\pm 2.5^\circ$. The designed results indicates that MTF >0.7 (@ 60 lp/mm), system dispersed spot $<9\ \mu\text{m}$, distortion is less than 0.5%, which can meet the target requirements.

Key words: underwater imaging; bionic vision; polarization imaging; optical design

引言

近年来,光学成像技术被广泛应用于水下目标探测。实际上,在复杂的水下环境中,很多生物都具有偏振感知能力,这种视觉机制给我们提供了一种可借鉴的技术路线。海洋生物螳螂虾长期

生活在水下环境中,其视觉系统已经进化到能适应复杂多变的水体环境,是世界上最复杂的视觉结构,可以同时识别线偏振光和圆偏振光,其独特的成像方式在低照度、强散射、浑浊的水体环境中成像清晰度高、对比度高,使得螳螂虾能够准确地

收稿日期:2019-01-11; 修回日期:2019-05-20

基金项目:国家自然科学基金(61701244)

作者简介:刘卿卿(1983—),女,博士,讲师,主要从事光学仪器及光电检测方面的研究。E-mail:sherryliuqq@163.com

捕获猎物,躲开天敌^[1-2]。

因此,仿生螳螂虾视觉成像机制的研究日益受到水下探测研究人员的关注。1999年,N. J. Marshall等通过行为实验证明螳螂虾具有线偏振视觉,可以分清2个强度相同但偏振度不同的物体^[3]。2008年,马里兰大学的T. H. Chiou等首次提出了螳螂虾视觉系统拥有区别于其他动物独特的探测和分析圆偏振光的视觉功能^[4]。2014年,华盛顿大学的T. York等从螳螂虾视觉成像系统中得到启发,首次仿照螳螂虾视觉成像技术,从光学系统,处理电路和信号处理算法上对以前的传感器进行改进,制造出了仿生偏振成像相机^[5]。目前,河海大学王慧斌等人对螳螂虾偏振视觉展开了研究,利用螳螂虾视觉成像技术的优势,在水下成像方面取得了很大进步,但其主要研究方向为水下图像处理^[6]。

综上所述,本文旨在设计一种仿生式水下光学系统,通过模仿螳螂虾的复眼结构,设计出了水下分孔径实时偏振成像光学系统,该系统通过孔径分割的方法进行偏振成像,可以同时实现对圆偏振、线偏振、原始图像以及光强度图像的采集。

1 螳螂虾视觉偏振成像原理

1.1 偏振成像原理介绍

斯托克斯矢量法引入4个Stokes参量来描述光波的偏振信息,每个参量的量纲均与光强相同,可以直接被探测器探测^[7]。光波的Stokes参量可以表示为

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 + I_3 \\ I_1 - I_3 \\ I_2 - I_4 \\ I_1 + I_3 - 2I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: I_1, I_2, I_3 和 I_4 分别表示偏振方向为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 的光强度; S_0 代表光的总强度; S_1 代表水平偏振和垂直偏振的强度差; S_2 代表偏振方向在 45° 和 135° 之间的强度差; S_3 代表光的圆偏振分量的强度差。从Stokes参量中可以直接导出偏振光的偏振度 P 和偏振方位角 θ 等物理量:

$$P = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}{S_0^2}} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (3)$$

(2)式偏振度 P 和(3)式偏振角 θ 的图像都是重要的偏振信息源,测量并分析它们的图像特征可以

得到目标信息。最后对 S_0, S_1, S_2, S_3, P 以及 θ 等图像进行多光学信息融合,可提高探测目标的识别率。

1.2 螳螂虾复眼结构

螳螂虾的眼睛属于并列型复眼,其视觉系统具有精密的光学结构,相比于其他动物拥有更多类型的光感受器,可以感知颜色及偏振特性^[8-9],如图1所示。该复眼可以分为3个区域:中央带状区MB(mid-band region),背部的外围区dPR(dorsal peripheral region)以及腹部外围区vPR(ventral peripheral region),其中背部与腹部外围区小眼完成不同方向线偏振光感知,中央带状区小眼完成圆偏振光感知^[10]。此外,该独特的复眼结构在感知色彩时,12种感光细胞独立运作,可以平行处理各波段的光线,具有“光谱调谐”特性,适应于水下不同环境。因此通过模仿螳螂虾复眼结构,完成线偏振、圆偏振以及光谱信息的采集,可以更有效地研究出用于表征目标偏振信号的处理机制,建立一种图像融合和处理方法。

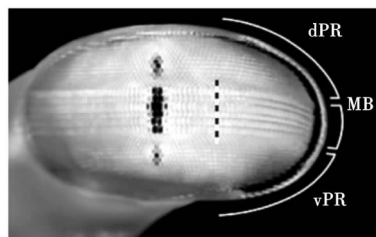


图1 螳螂虾的复眼

Fig. 1 Compound eye of mantis shrimp

2 系统设计

2.1 系统整体结构

考虑到仿生复眼结构紧凑性的实验要求,本系统基于分孔径^[11]和分振幅^[12]相结合的方法进行光学系统的结构设计。该光学系统结构由前共孔径组、无偏振分光棱镜、偏振元件组、分孔径组以及成像探测器CCD组成,系统整体结构如图2所示。

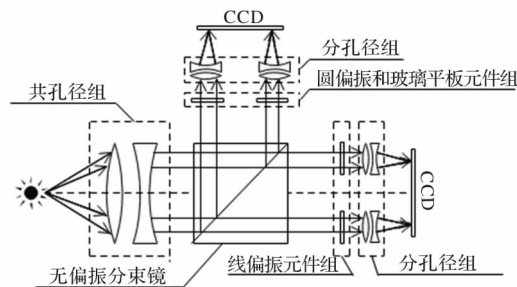


图2 系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of system

本系统利用无偏振分光棱镜将结构分为四通道和两通道的分孔径系统,其中四通道由4个偏心子系统组成,将线偏振片分别置于4个偏心子系统的前面,使得4个通道的分孔径子系统成的像合成在探测器上,完成偏振方向为 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的图像采集;两通道是由2个子系统组成,将圆偏振片和玻璃平板分别置于2个偏心子系统的前面,成像于探测器上,完成圆偏振和光强度图的采集。其中添加玻璃平板的目的是为了使这些偏心子系统具有相同的光学结构,并使这些分孔径子系统对称分布于共孔径组光轴四周,使其具有相同的偏心量。

2.2 系统设计参数

将该光学系统视为理想光学系统,水下光学系统物方介质为水,其折射率 $n_w=1.33$;像方介质为空气,其折射率 $n=1$,如图3所示。

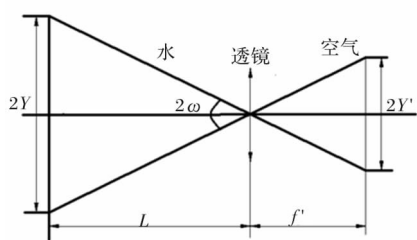


图3 光学参数

Fig.3 Optical parameters

假设物方到理想镜头的成像距离为 L ,在该距离上要看清物高为 $2Y$ 的目标,接收器对角线为 $2y'$ 。则水下物方视场角为 2ω :

$$2\omega = 2\arctan\left(\frac{Y}{L}\right) \quad (4)$$

则探测器对角线长 y' 为

$$y' = -n_w f' \tan \omega \quad (5)$$

由(5)式可以得到镜头像方焦距 f' 为

$$f' = -\frac{y'}{n_w \tan \omega} \quad (6)$$

根据该光学系统的具体要求,确定选用典型1/2英寸的CCD探测器,其最小像元尺寸大小为 $8.3\mu\text{m}$,对角线尺寸为 8mm 。该系统成像要求子孔径通道的图像同时成像于2个CCD上,因此需对CCD靶面进行分割,一幅图像占据CCD对角线的一半,尺寸为 4mm 。由单个像元大小可计算出该CCD奈奎斯特频率为

$$\frac{1}{2 \times \text{CCD 像元大小}} = \frac{1}{2 \times 8.3 \times 10^{-3}} = 60 \text{ lp/mm}$$

根据该光学系统的实验要求,需要设计一个水

下成像物镜,在水下 $2\text{m} \sim 3\text{m}$ 深度处对成像距离为 1m 、大小为 $6\text{cm} \times 6\text{cm}$ 置于水槽中的目标物体进行成像。根据使用条件,并结合图3可知, $2Y=8.48\text{cm}$; $L=1\text{m}$,由(4)式可知, $2\omega=2\arctan(Y/L)=5^\circ$ 。已知成像探测器CCD的对角线长 8mm ,即像高 $2y'=4\text{mm}$,根据(6)式可求得: $f'=35\text{mm}$ 。

至此,该系统物镜的光学参数及系统工作波段、焦距、视场角和 F 数等基本参数如表1所示。

表1 光学系统参数

参数	数值
可见光波段/ μm	0.486~0.656
$F/\#$	4
焦距/mm	35
全视场/ $^\circ$	5

2.3 设计方法

水下物镜需考虑防水设计,典型的防水窗有2种形式:平板型和半球型^[13],其结构如图4所示。从光学设计角度来说,半球型易于控制系统的像差,但半球型防水窗不易于装调,因此本文将选择平板型作为防水窗壳。在设计平板隔水玻璃时,选择材料便宜的BK7玻璃,这种材料具有优良的光谱特性和耐酸性,该玻璃的折射率为1.5168,阿贝数为64.16,平板玻璃对系统像质影响不大,考虑本系统水下工作深度仅为 $2\text{m} \sim 3\text{m}$,取防水窗壳厚度为 5mm ,口径为 40mm 。

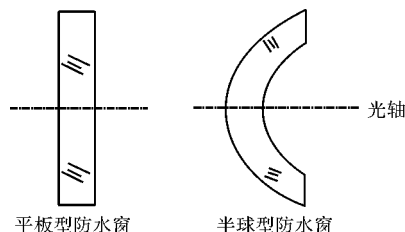


图4 典型防水窗

Fig.4 Typical waterproof window

在满足设计条件的情况下,使用易于加工的球面透镜和常用玻璃材料,以节约成本,因此本系统将全部采用球面镜,其材料均来自中国玻璃库。本系统的光学设计包括3部分,分别是共孔径透镜组、子孔径透镜组和分光棱镜。共孔径组部分在结构简单的三片型物镜基础上进行复杂化并对其进行优化,得到5片单透镜,其结构参数如表2所示。子孔径成像组由2个单透镜组成,其结构参数如表3所示。考虑到加工时间和成本,其中分光棱镜选择常用的 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 立方体分光棱镜,其材料为BK7。

表 2 共孔径组结构参数

Table 2 Common aperture group structure parameters

面	半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	255.7	5.0	H-ZK9
2	−68.8	2.0	
3	−87.1	2.8	F4
4	243.9	16.6	
5	61.7	4.6	H-ZK9
6	−76.8	1.6	
7	−30.1	2.6	ZF2
8	−663.2	1.0	
9	47.3	6.0	H-ZK9
10	−52.0	2.0	

表 3 子孔径组结构参数

Table 3 Subaperture group structure parameters

面	半径/mm	厚度/mm	玻璃
1	9.5	1.6	H-ZK9
2	15.8	0.6	
3	9.3	1.3	H-ZF4
4	6.6	18.7	

系统整体设计过程中,将上述 3 部分组合在一起,并对整体系统进行优化,得到了共孔径偏振成像单通道光学结构,如图 5 所示。六通道渲染光学结构如图 6 所示。

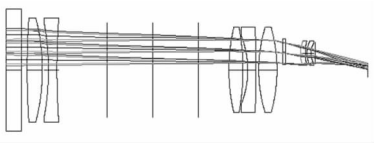


图 5 系统单通道结构

Fig. 5 Single channel structure of system

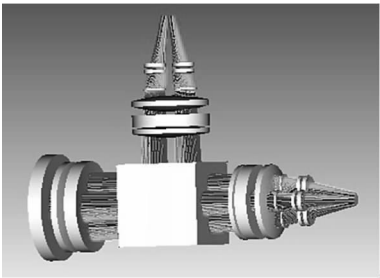


图 6 光学系统渲染图

Fig. 6 Optical system rendering

2.4 像质评价

该光学系统是一个水下探测光学系统,像差及成像质量的评价主要考察光学调制函数(MTF)、几何包围能量、点列斑大小和畸变曲线等等。

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)能充分反映光学系统实际成像质量,反映出光学系统由于衍射和像差所引起的综合效应^[14]。由图 7 可知,在 CCD 响应频率 $N=60\text{ lp/mm}$ 处,各视场 MTF 值均不低于 0.7,满足系统的像质要求。

几何包围能量如图 8 所示,其中横坐标为离点列图质心距离,纵坐标为所占的能量比例。本文选用的 CCD 单个最小像元尺寸为 $8.3\text{ }\mu\text{m}$,光学系统全视场在单个像元尺寸下包围能量比例均大于 90%。图 9 为畸变曲线图,光学系统的最大畸变为 0.5%,完全满足本系统使用要求。

该光学系统在不同视场处的最大弥散斑半径均接近 CCD 探测器的最小像元尺寸 $8.3\text{ }\mu\text{m}$,且一致性好,满足系统使用要求,具体参数如表 4 所示。

表 4 各通道点列斑大小

Table 4 Spot size of each channel point

通道		0 视场	0.5 视场	0.7 视场	0.9 视场	1.0 视场
		0°	1.25°	1.75°	2.25°	2.5°
0°线偏振通道	RMS 半径	3.406	3.298	3.218	3.299	3.496
	GEO 半径	5.849	6.947 4	6.558	7.838	8.783
45°线偏振通道	RMS 半径	3.321	3.043	3.301	3.622	3.646
	GEO 半径	6.736	6.607	6.752	7.258	7.685
90°线偏振通道	RMS 半径	3.302	3.442	3.531	3.831	3.886
	GEO 半径	6.736	6.701	6.547	7.701	8.547
135°线偏振通道	RMS 半径	3.167	3.887	3.591	3.337	3.298
	GEO 半径	6.360	6.063	7.321	7.603	7.833
圆偏振通道	RMS 半径	3.592	3.625	3.481	3.507	3.681
	GEO 半径	6.544	6.651	7.262	8.015	8.481
平板玻璃通道	RMS 半径	3.469	3.566	3.608	3.796	3.582
	GEO 半径	6.467	6.633	7.177	7.844	8.246

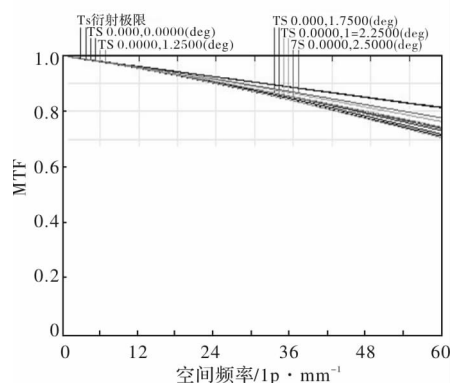


图7 光学系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve of optical system

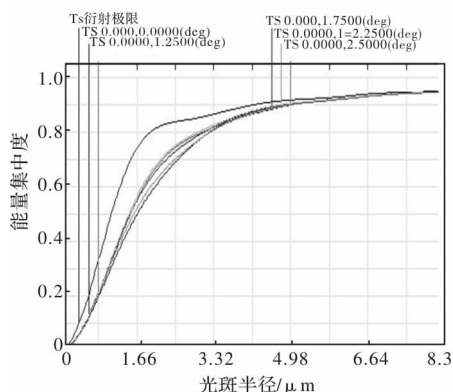


图8 几何包围能量

Fig. 8 Geometric enveloping energy

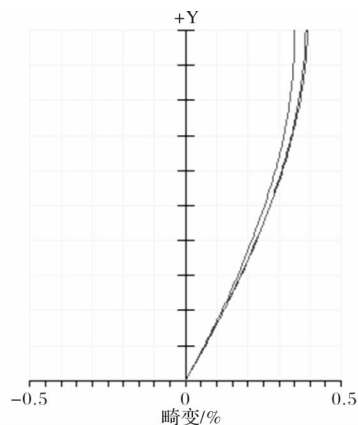


图9 光学系统畸变曲线

Fig. 9 Distortion curve of optical system

3 公差分析

光学系统的公差是光学系统在实际加工和装配中重要的衡量标准,直接影响着光学系统成像性能的好坏,因此合理分配光学元件的公差可以

使光学系统性能达到最佳。本文利用 Zemax 中蒙特卡洛分析法来确定公差,即通过计算全视场下平均像差和单个视场点的像差,得到样本的名义值、最佳值、最差值、平均值和标准值,找出对像差影响较大的参数和公差^[15]。表 5 给出系统公差分配表。

表5 系统公差给定表

Table 5 System tolerance reference table

表面公差		元件公差	
公差项	给定值	公差项	给定值
曲率半径/fri (TRAD)	0.2	X 偏心/mm (TEDX)	0.05
厚度/mm (TTHI)	0.05	Y 偏心/mm (TEDY)	0.05
X 偏心/mm (TSDX)	0.05	X 倾斜/(°) (TIRX)	0.05
Y 偏心/mm (TSDY)	0.05	Y 倾斜/(°) (TIRY)	0.05
X 倾斜/(°) (TIRX)	0.05	表面不规则度(TIRR)	0.2
Y 倾斜/(°) (TIRY)	0.05	折射率 (TIND)	0.001
表面不规则度(TIRR)	0.2	Y 倾斜/(°) (TETY)	0.05
折射率 (TIND)	0.001		

对该光学系统的 6 个通道进行公差分析,对系统进行 300 次蒙特卡洛分析,分析结果如表 6 所示。

表6 公差分析结果

Table 6 Tolerance analysis result

采样率/%	MTF 值
90	0.516
80	0.543
50	0.587
20	0.614
10	0.619

4 结论

本文通过研究螳螂复眼结构,结合分孔径和分振幅的方法设计了一种用于水下多路偏振信息采集的实时偏振成像系统,能够在同一时刻获取探测目标的 4 个角度的线偏振分量强度图、圆偏振分量强度图以及光强度图,通过偏振解算处理即可得到完整的 Stokes 分量图,方便后期对图像的配准和融合。系统主要由两通道和四通道偏心子孔径成像镜头组成,各个通道成像质量良好。通过 MTF 曲线、能量图和畸变曲线图对光学系统进行像质评价,并通过蒙特卡洛分析法进行成像质量的公差分析,结果表明,在探测器响应频率 60 lp/mm 处各视场 MTF 均不低于 0.5,系统结构紧凑,体积小,可以实现对水下目标同时偏振成像。

参考文献:

- [1] KLEINLOGEL S, WHITE A G. The secret world of shrimps: polarization vision at its best[J]. PLoS One, 2008, 3(5): 1-8.
- [2] KLEINLOGEL S, MARSHALL J, HORWOOD J M, et al. Neuroarchitecture of the color and polarization vision system of the stomatopod haptosquilla [J]. J. Comp Neurol, 2003, 467(3): 326-342.
- [3] MARSHALL J, CRONIN T W, SHASHAR N, et al. Behavioural evidence for polarisation vision in stomatopods reveals a potential channel for communication[J]. Curr Biol, 1999, 9(14): 755-758.
- [4] CHIOU H, KLEINLOGELS, CRONIN T, et al. Circular polarization vision in a stomatopod crustacean[J]. Curr Biol, 2008, 18(6): 429-434.
- [5] YORK T, POWELLS B, GAOS K, et al. Bioinspired polarization imaging sensors: from circuits and optics to signal processing algorithms and biomedical applications [J]. IEEE, 2014, 102(10): 1450-1469.
- [6] SHEN Jie, WANG Huibin, CHEN Zhe, et al. Polarization calculation and underwater target detection inspired by biological visual imaging[J]. Sensors & Transducers, 2014, 169(4): 33-41.
- [7] ZHAO Yongqiang, PAN Quan, CHENG Yumei. Remote sensing and application of imaging polarization spectroscopy[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] HORVATH G. Polarized light and polarization vision in animal sciences [M]. Springer: Heidelberg, 2014.
- [9] THOEN H H. Colour vision in mantis shrimps understanding one of the most complex visual systems in the world[D]. Brisbane: Philosophy of the University of Queensland, 2014: 156.
- [10] ZHANG Xu, JIN Weiqi, QIU Su. Researching summary of the mantis shrimp's visual imaging characteristics and bionic technology [J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 89-95.
张旭, 金伟其, 裘溯. 螳螂虾视觉成像的特点及其仿生技术研究综述[J]. 红外技术, 2016, 38(2): 89-95.
- [11] HE Hucheng, JI Yiqun, ZHOU Jiankang, et al. Optical design of decentered aperture-divided polarization imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 279-284
贺虎成, 季轶群, 周建康, 等. 偏心分孔径偏振成像光学系统的设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622005.
- [12] GAO Ming, WANG Chuan, LIU Wei, et al. Design of adaptive optical system for four-channel array polarization imaging [J]. Laser and Infrared, 2016, 46(6): 731-736.
高明, 王川, 刘钧, 等. 四通道阵列偏振成像自适应光学系统设计 [J]. 激光与红外, 2016, 46(6): 731-736.
- [13] ZHAI Xuefeng, DONG Xiaona, CHEN Liangyi, et al. Design of underwater zoom lens [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 416-420.
翟学锋, 董晓娜, 陈良益, 等. 水下变焦镜头的设计 [J]. 应用光学, 2007, 28(4): 416-420
- [14] HUANG Shizhe, TIAN Jiwen, XUE Qingzeng. Optical design of infrared polarization imaging system [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3): 316-320.
黄诗喆, 田继文, 薛庆增. 红外偏振成像系统光学设计[J], 应用光学, 2018, 39(3): 316-320.
- [15] ZHENG Yawei, LI Junna, LI Jianjun, et al. Design of dual-channel infrared collimating projection optic system [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 58-62.
郑雅卫, 李俊娜, 高泽东, 等. 双通道红外准直投影光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 58-62.