

# 激光与光电子学进展

## 偏心摄影视力筛查设备光学系统设计

刘春华<sup>1,2</sup>, 赵楠<sup>1\*</sup>, 柴松均<sup>1</sup>, 余毅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了消除偏心摄影验光设备测量人眼屈光度的误差,使拍摄的人眼照片更清晰,对偏心摄影视力筛查设备的成像光学系统进行了设计。该镜头工作距离为 1000 mm,总长为 51.4554 mm,系统焦距为 46.7 mm, $F$  数为 2.8。通过优化设计后该系统的最大畸变小于 0.3%,很好地校正了球差、场曲和畸变。该偏心摄影成像光学系统结构具有简单、紧凑,且成像质量良好等特点,可以满足偏心摄影验光设备的成像要求。

**关键词** 光学设计; 偏心摄影验光; 屈光状态; 暗区高度

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1322002

### Design of Optical System for Eccentric Photography Sight Detecting Device

Liu Chunhua<sup>1,2</sup>, Zhao Nan<sup>1\*</sup>, Chai Songjun<sup>1</sup>, Yu Yi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fine Instrument and Equipment Research & Development Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To achieve the purpose of reducing errors in the measurement of the refraction of the human eye by eccentric photographic optometry and to produce clearer photographs of the human eyes, the imaging system of the device was designed. The working distance of the lens is 1000 mm, the focal length of the system is 46.7 mm, the total length is 51.4554 mm, and the  $F$ -number is 2.8. After optimization, the maximum optical system distortion is not greater than 0.3%, and the spherical aberration, field curvature, and distortion are well corrected. The imaging lens has the characteristics of simple, compact, and fine quality, which accords the demand of eccentric photographic optometry equipment.

**Key words** optical design; eccentric photographic optometry; refractive status; dark area height

## 1 引言

近年来,屈光不正群体的比例有所增加,随着近视的发生率大幅度上升,也出现了许多视力矫正方法<sup>[1]</sup>。但对于视力保护而言,更重要的是尽早检查青少年和儿童的屈光状态。有时用主观验光法来检测患者屈光状态的结果并不十分准确,因为这种方法主要根据被检测者的反馈来确定患者的屈光状态和病变程度,不适合年龄较小的青少年儿童。客观验光法是利用光学仪器来测量屈光度,检测结果误差较小,因此也更适合用来检测低龄儿童或有表达障碍群体的视力情况。偏心摄影验光法作为客观验光检查方法之一,因其验光

时间短、便携度高等优点,目前在社会上应用较为广泛。

Kaakinen<sup>[2-3]</sup>在 1979 年提出了一种使用 35 mm 照相机和安装在镜头外围的闪光装置同时拍摄角膜和眼底反射的方法,称为偏心摄影验光法。使用偏心摄影设备验光时,由于设备与患者保持一定的距离,不用固定住被检测者头部,因而不需要患者的密切配合,检测过程十分简单、迅速。偏心摄影验光法的优点是在一张照片中瞬间记录了大量的眼睛屈光状态信息。但因为拍摄盲区的存在,导致这种方法测量出的人眼屈光状态误差较大,并且价格昂贵。在这之后,Roorda 等<sup>[4]</sup>、Wesemann 等<sup>[5]</sup>、Kusel 等<sup>[6]</sup>都对此方法做过许多改进研究,但是都没有很好地解决误差较大的问题。

收稿日期: 2021-06-25; 修回日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675506)

通信作者: \*zhaonan@ciomp.ac.cn

1990年,瞿佳等<sup>[7]</sup>为了提高偏心摄影验光设备的屈光度检测精确度,在摄影镜头中央以及上方分别设置两个大小相同且互相平行的裂隙。这种方法扩大了偏心摄影验光法的屈光度检测范围,弥补了因有盲区存在而测量不准确的缺点<sup>[8-9]</sup>。

2005年,叶宏伟等<sup>[10-11]</sup>改进了公式,进一步缩小计算误差,并且对拍摄到的眼瞳像进行了照度变化模拟计算。但是仍然存在一些问题,即拍摄的眼瞳图像的亮暗分布是逐渐变化的,并没有明确的分界线<sup>[12]</sup>。如果暗区高度的测量存在误差,那么也会影响计算结果的准确性。2007年,郑奋等<sup>[13]</sup>针对这一问题,设计了双光路系统,同时拍摄两幅人眼瞳孔的图像。第一幅拍摄记录人眼眼瞳亮暗分布的屈光度信息,第二幅用来拍摄记录眼瞳的直径以及位置信息。

偏心摄影验光法是由拍摄到的亮暗分布不同的照片来计算推断被检查者的屈光状态。所以,让摄影镜头拍摄出更清晰的瞳孔照片也尤为重要。虽然很多学者在偏心摄影验光设备的工作原理上做了许多研究,

但是在光学成像系统的优化设计上作出的改进很少。2019年,李京蔓<sup>[14]</sup>使用Zemax光学软件设计了一款偏心摄影视力光学镜头,其调制传递函数(MTF)大于0.5,光学畸变为0.43。需要指出的是,其镜头的MTF值和光学畸变都还有优化空间。本文首先介绍了光学原理,并针对以上两个问题对成像光学系统进行了设计,选择了更加环保的光学材料,可以满足视力筛查设备的成像需求。

## 2 原理分析

偏心摄影验光法是一种根据拍摄因人眼屈光度不同表现出不同光影的照片来判断人眼屈光状态的方法。如图1所示,以近视眼为例,接收器、成像镜头与人眼三者共轴,光源在接收器上方。一束光从偏心照明光源发出,经过人眼的折射,因为被检者为近视眼,光线在视网膜上未能会聚一点,而是形成了一个圆形的弥散斑。光线再次经过玻璃体和晶状体的折射由眼瞳射出<sup>[15]</sup>,最终被接收器接收。

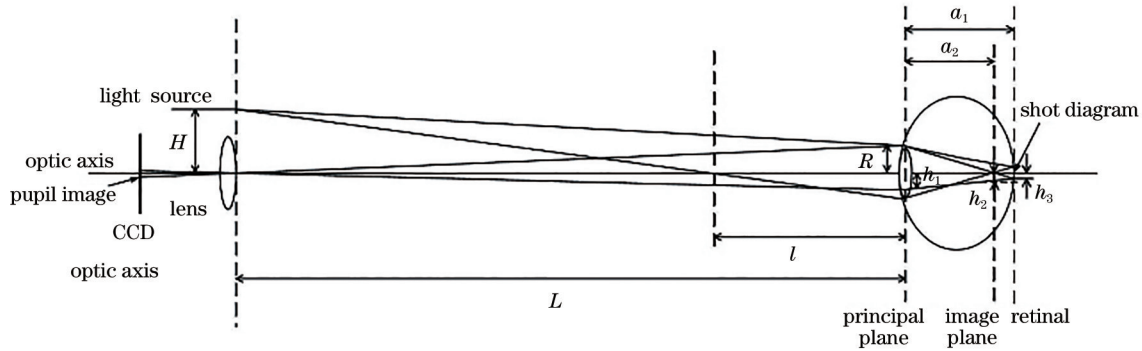


图1 系统光路图

Fig. 1 System light path diagram

将图1所示的系统考虑为理想光学系统,忽略照明光源裂隙,可推导屈光度D的计算公式,其中F为眼睛焦距,L为接收器到瞳孔之间的距离,l为远点面到瞳孔之间的距离,H为照明光源偏心距离。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a_2} - \frac{1}{L}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_2}, \quad (2)$$

$$\frac{h_2}{a_2} = -\frac{H}{L}, \quad (3)$$

$$\frac{h_3}{r} = \frac{a_3 - a_2}{L}, \quad (4)$$

$$\frac{h_1 - h_2}{a_2} = -\frac{h_1 - h_3}{a_3}. \quad (5)$$

由上述公式可得:

$$h_1 = r - \frac{H}{DL}, \quad (6)$$

$$D = \frac{H}{L(h_1 - r)}. \quad (7)$$

当被检测人眼不存在屈光度异常时,光线在视网膜上交于一点后按原路返回并且不会进入接收器内,此时拍摄的眼瞳像全部为暗区。当被检测人眼为近视眼时,部分光线被接收器接收,此时拍摄的照片分为明暗两部分且亮区位于眼瞳上方,暗区位于眼瞳下方。当拍摄到具有亮暗渐变变化的人眼眼瞳照片后,可通过传统图像处理方法提取出暗区高度。亮区与暗区的高度比例因被测人眼的屈光度不同而变化,其中暗区高度可表示为

$$b = |r - h_1|, \quad (8)$$

$$D = \frac{H}{bL}. \quad (9)$$

由式(9)可以得出,屈光度D的值取决于照明光源偏心距离以及暗区高度。在实际测量过程中L=1000 mm,H=2 mm。

## 3 光学设计

### 3.1 设计指标

偏心摄影视力筛查设备作为一台非接触式的人眼

屈光度检测仪器,最佳的测量距离为 800~1200 mm,可以使被检测者避免过度紧张,双眼放松,测量结果更加准确。设置镜头的工作距离为 1000 mm。对偏心摄影光学镜头来说,对 0.6 奈奎斯特频率处的 MTF 值较为关注,要求 0.8 视场处的 MTF 值大于 0.6。由于偏心摄影视力筛查设备有自带光源,且在近红外光 850 nm 处成像质量更佳,因此采用 850 nm 单色光作为设计波长。该光学系统的设计指标如表 1 所示。

表 1 设计参数  
Table 1 Design parameters

Item	Specification
Work distance /mm	1000
Optical distortion /%	<0.3
MTF	>0.6
Central wavelength /nm	850
Field of view angle /( $^{\circ}$ )	<9
F-number	2.8
Focal length /mm	47.6

### 3.2 初始结构的选择

该光学结构由 6 组镜片组成,如图 2 所示:第 1、2、5、6 片镜片选用的材料为 HZK9B;第 3 和第 4 片镜片选用的材料为 HQF3,在 852.1 nm 波长时,材料 HZK9B 和材料 HQF3 折射率和阿贝数分别为  $n_1 = 1.61164$ ,  $n_2 = 1.56392$ , 以及  $v_{d1} = 60.34$ ,  $v_{d2} = 41.50$ 。这两种材料都具有重量轻和透光性好等特点,并且在满足设计要求的前提下,价格相对更低,有效降低了加工成本。

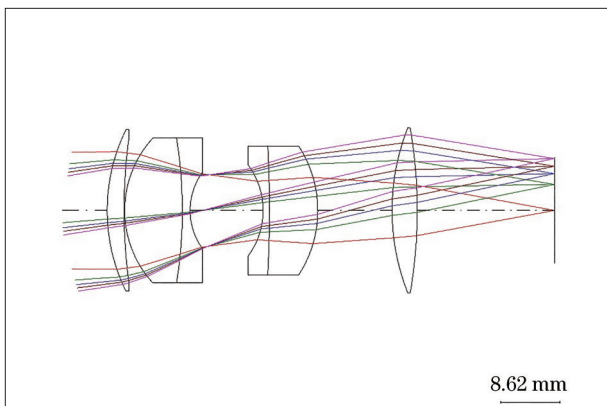


图 2 初始结构镜头图  
Fig. 2 Initial structural shot diagram

图 3 为初始结构镜头在各个视场下的 MTF 曲线。像元尺寸为  $4.8 \mu\text{m}$ ,近红外探测器尺寸为 1/2 inch (1 inch=2.54 cm),则奈奎斯特空间频率  $N = 1/2 \sigma = 104 \text{ lp/mm}$ 。因此取 105 lp/mm 处的 MTF 曲线作为像质评判标准。可以看出,中心视场和全视场下的 MTF 值较低,0.707 视场略好,但仍未满足设计指标。

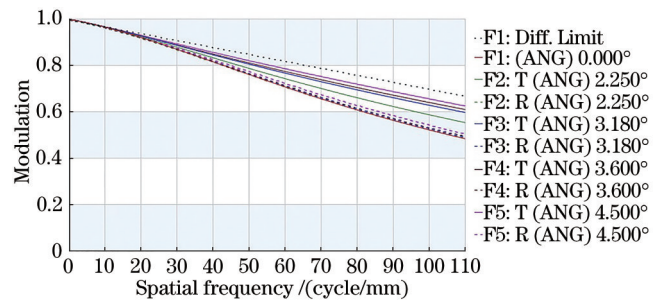


图 3 初始结构的 MTF 曲线  
Fig. 3 MTF curves of initial structure

### 3.3 优化设计

在处理非线性方程组时,强行求解所得到的解误差会很大,可以利用阻尼最小二乘选取法恰当选取阻尼因子来进行处理,防止评价函数背离极小值,进一步提高收敛速度,减少计算时间。评价函数表达式为

$$\phi(x) = \sum_{i=1}^m u_i f_i^2(x) + P \sum_{j=1}^n I_j (\Delta x_j)^2, \quad (10)$$

式中:  $\sum_{i=1}^m u_i f_i^2(x) = \phi(x)$  是原评价函数;  $f_i(x)$  表示需要优化的像差;  $m$  表示像差种类的数值;  $u_i$  表示权重因子;  $P$  和  $I_j$  均表示阻尼因子;  $\Delta x_j$  表示步长。由式(10)可知,当阻尼因子  $P$  和  $I_j$  逐渐增大时,步长  $\Delta x$  逐渐减小。建立默认的评价函数,并通过添加合适的评价函数进行优化,初次优化时设置的评价函数如下:1) 根据设计要求,在自动化设计中控制系统后截距在 20.5667 mm 以内;2) 为了满足实际加工与安装要求,需要限制边界条件,设定镜片的中心厚度小于 10 mm,边缘厚度大于 2 mm。

## 4 设计结果

经过一系列设计优化后,得到的偏心视力筛查设备镜头结构如图 4 所示,该光学结构的入瞳直径为 17 mm,系统总长度为 51.4554 mm。

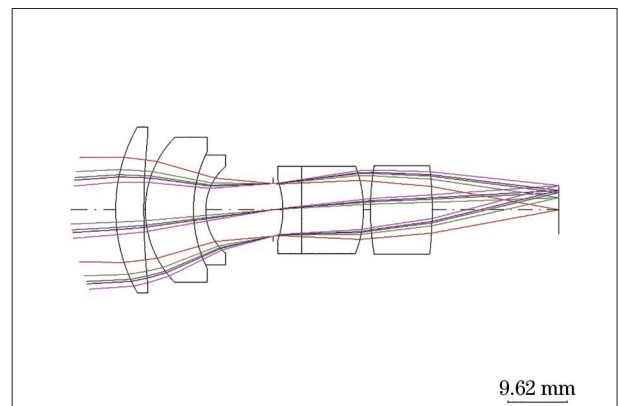


图 4 优化后的镜头结构图  
Fig. 4 Structure of lens after optimization



### 4.1 MTF 曲线

从图 5 可以看出,偏心摄影验光成像系统在 0.707 视场子午方向上的 MTF 值与弧矢方向上的 MTF 值曲线非常接近,说明镜头的色散和色差控制得很好。MTF 曲线较为平滑,说明光学结构几乎不存在像场弯

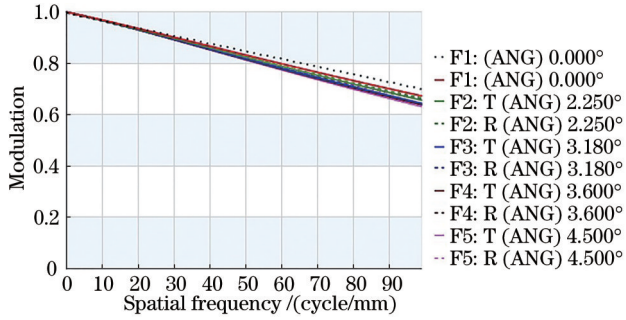


图 5 优化后的镜头 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of lens after optimization

曲,边缘和中心的成像差距很小,全视场处 MTF 值大于 0.6,表明镜头符合预设要求。

### 4.2 场曲与光学畸变

场曲不影响最终成像的清晰度,但整个像平面会变成形成一个曲面。从图 6 可以看出,该光学系统的像散值最大为 0.03,半视场畸变值为  $-0.0386\%$ ,0.707 视场畸变值为  $-0.0759\%$ ,全视场畸变值为  $-0.15\%$ ,均优于设计指标。

### 4.3 点列图

如果光学系统存在像差,则光线不再会聚一点,而是散落在理想像点附近。点列图中各个点的位置距离越相近,则说明光学系统的成像质量越高<sup>[16]</sup>。如图 7 所示,点列图在各个视场内的均方根(RMS)值最大不超过  $4\ \mu\text{m}$ ,均小于像素单元,符合成像要求。

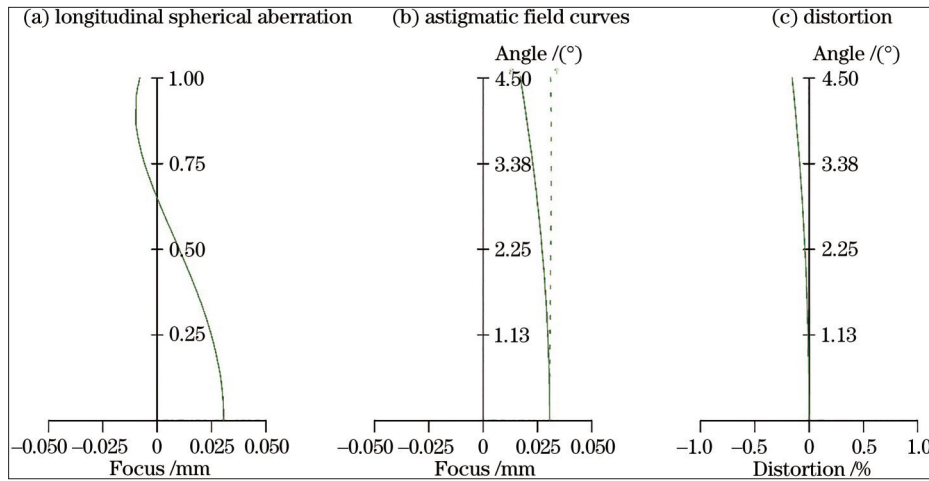


图 6 优化后的镜头场曲与光学畸变

Fig. 6 Field curvature and optical distortion of lens after optimization

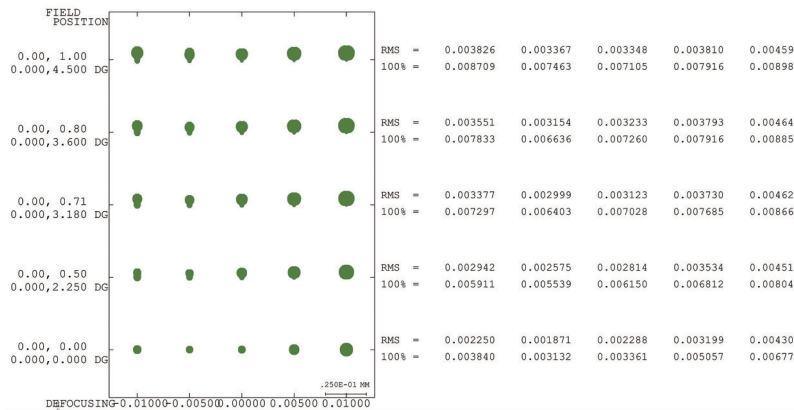


图 7 优化后的镜头点列图

Fig. 7 Spot diagram of lens after optimization

## 5 公差分析

光学镜头除了需要达到预设的设计参数之外,还需进行公差分析,以便于进行实际生产制造。本文光

学系统的部分公差参数设置如下:半径增量为 0.3 mm,厚度增量为 0.02 mm,矢高增量为 0.05 mm,偏心公差为 0.02,折射率增量为 0.001。公差分析结果如图 8 所示。

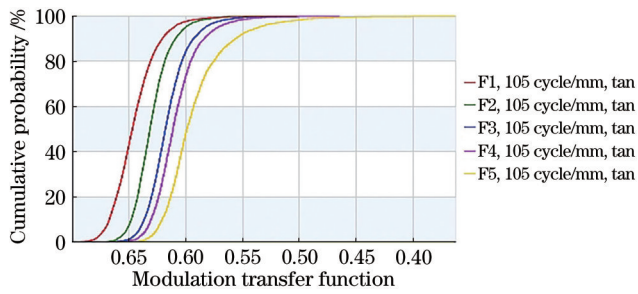


图 8 公差分析

Fig. 8 Tolerance analysis

## 6 结 论

借助光学系统设计软件,从偏心视力检测技术指标的实际需求出发,本文设计了一款偏心摄影验光设备的成像系统。此光学系统具有畸变小、分辨率高的优点, $F$ 数为 2.8,焦距为 47.6 mm,优化后光学畸变小于 0.3%,各个视场的弥散斑半径小于  $4\ \mu\text{m}$ ,全视场调制传递函数优于 0.6。设计结果均可满足设计要求并且可以获得良好的像质,具有一定的工程参考价值。公差分析结果表明,此镜头适合用于加工生产。

## 参 考 文 献

- [1] 边亚燕,刘永基,刘宝凯,等.控制近视进展并矫正近视散光的隐形眼镜[J].光学学报,2020,40(4):0422001.  
Bian Y Y, Liu Y J, Liu B K, et al. Contact lens for controlling myopia progression and correcting myopia and astigmatism[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0422001.
- [2] Kaakinen K. A simple method for screening of children with strabismus, anisometropia or ametropia by simultaneous photography of the corneal and the fundus reflexes[J]. Acta Ophthalmologica, 1979, 57(2): 161-171.
- [3] Kaakinen K, Tommila V. A clinical study on the detection of strabismus, anisometropia or ametropia of children by simultaneous photography of the corneal and the fundus reflexes[J]. Acta Ophthalmologica, 1979, 57(4): 600-611.
- [4] Roorda A, Campbell M C W, Bobier W R. Slope-based eccentric photorefraction: theoretical analysis of different light source configurations and effects of ocular aberrations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(10): 2547-2556.
- [5] Wesemann W, Norcia A M, Allen D. Theory of eccentric photorefraction (photoretinoscopy): astigmatic eyes[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(12): 2038-2047.
- [6] Kusel R, Oechsner U, Wesemann W, et al. Light-intensity distribution in eccentric photorefraction crescents[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 1998, 15(6): 1500-1511.
- [7] 瞿佳,王光霁.双裂隙偏心摄影验光仪及其光学原理[J].中国医疗器械杂志,1990,14(1):14-17,25.  
Qu J, Wang G J. Double-slits eccentric photorefractometer and its optical principle[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 1990, 14(1): 14-17, 25.
- [8] 郭小爱,张涛,陈家璧,等.双裂隙摄影验光方法的计算机模拟[J].光电子·激光,2001,12(10):1043-1047.  
Guo X A, Zhang T, Chen J B, et al. Computer simulation of double-slit eccentric photorefraction[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2001, 12(10): 1043-1047.
- [9] 郭小爱,张涛,陈家璧,等.双裂隙摄影验光仪盲区研究[J].光学仪器,2001,23(4):25-31.  
Guo X A, Zhang T, Chen J B, et al. A discussion about dead zone of double-slits eccentric photorefractor[J]. Optical Instruments, 2001, 23(4): 25-31.
- [10] 叶宏伟,李湘宁,陈杰,等.红外偏心摄影验光仪的研究[J].光学仪器,2005,27(6):80-84.  
Ye H W, Li X N, Chen J, et al. Study on infrared eccentric photorefractor[J]. Optical Instruments, 2005, 27(6): 80-84.
- [11] 薛烽,李湘宁.一种基于图像处理的屈光度测量方法[J].光电工程,2009,36(8):62-66,74.  
Xue F, Li X N. Diopter measurement based on pupil images processing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(8): 62-66, 74.
- [12] 许陇云,陈家璧,李湘宁.偏心摄影验光法测量屈光度的不确定度分析[J].上海理工大学学报,2002,24(2):175-178.  
Xu L Y, Chen J B, Li X N. Analysis of uncertainty in diopter measurement with eccentric photorefraction[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2002, 24(2): 175-178.
- [13] 郑奋,周琴.双裂隙偏心摄影验光仪研究[J].医疗卫生装备,2007,28(4):14-16.  
Zheng F, Zhou Q. Research of double-cranny eccentric photorefraction device[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2007, 28(4): 14-16.
- [14] 李京蔓.偏心摄影视力筛查仪的设计与研究[D].长春:长春理工大学,2019:8-12.  
Li J M. Design and research of eccentric photographic vision screening instrument[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 8-12.
- [15] 张鹏飞,张廷玮,宋维业,等.从小鼠视网膜多种成像方式探讨眼科光学成像技术进展[J].中国激光,2020,47(2):0207003.  
Zhang P F, Zhang T W, Song W Y, et al. Review of advances in ophthalmic optical imaging technologies from several mouse retinal imaging methods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207003.
- [16] 李加慧,谭奋利,曾晨欣,等.宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计[J].光学学报,2021,41(2):0222001.  
Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.