

文章编号: 1002-1582(2026)03-0273-06

偏心摄影原理视力筛查仪校准用模拟眼设计

侯蕊*, 曹竹, 侯志强, 龚玲凯, 赵智慧, 管西娟
(上海市计量测试技术研究院有限公司, 上海 200234)

摘 要: 为检测基于偏心摄影原理的视力筛查仪筛查结果的准确性, 基于几何光学和人眼成像原理, 设计了一种用于测量视力筛查仪的多层模拟眼。模拟眼采用角膜房水-晶状体-玻璃体-视网膜的四层仿生光学结构, 由光学玻璃胶合而成, 相邻两层间相对折射率差在1%以内, 屈光度测量范围为 $-7\text{m}^{-1} \sim +7\text{m}^{-1}$, 误差在 $\pm 0.10\text{m}^{-1}$ 以内, 采用Zemax对模拟眼进行分析验证显示, 模拟眼中心视场有较高光学质量, 像差结构稳定对称性好, 弥散斑尺寸与人眼模型相关系数为0.97, 像差水平与人眼相近。

关 键 词: 视力筛查; 偏心摄影法; 模拟眼; 屈光度

中图分类号: TB9

文献标识码: A

Design of simulated eye for calibration of vision screening instrument based on eccentric photography principle

HOU Rui*, CAO Zhu, HOU Zhiqiang, GONG Lingkai, ZHAO Zhihui, GUAN Xijuan
(Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology Co., Ltd, Shanghai 200234, China)

Abstract: In order to test the accuracy of the screening results of the vision screening instrument based on the principle of eccentric photography, a multi-layer simulated eye is designed based on the principle of geometric optics and human eye imaging. The simulated eye is composed of corneal aqueous humor simulation layer, crystalline lens simulation layer, vitreous simulation layer and retinal simulation layer, which is glued by the optical glass. The relative refractive index difference between the adjacent two layers is less than 1%, and the dioptre measurement range is $-7\text{m}^{-1} \sim +7\text{m}^{-1}$, and the error is within $\pm 0.10\text{m}^{-1}$. Zemax is used to perform ray tracing analysis on the simulated eye. The central field of view of the simulated eye has high optical quality, and the aberration structure is stable and symmetrical. The correlation coefficient between the simulated eye blur spot size and the human eye model is 0.97, and the aberration level is similar to that of the human eye.

Keywords: vision screening; eccentric photography principle; simulated eye; dioptre

0 引 言

在公共卫生服务领域, 青少年儿童眼健康管理被列为近视源头防控的核心环节, 屈光发育档案的建立, 近视筛查工作的推进都是重要的近视防控工作。在近视低龄化的趋势下, 相较于需睫状肌麻痹、需高配合度的检影验光和电脑验光设备, 视力筛查仪因操作便捷、不需要儿童主观配合这些特点, 被广泛应用于学校、医疗机构的视

力筛查工作。

2022年1月, 美国斜视与小儿眼科协会(AAPOS)发布了最新版的《儿童视力筛查指南》, 指南指出视力筛查仪可作为视力筛查设备, 可以检测特定目标水平的弱视风险因素和有临床意义的屈光不正^[1]。目前, 尚无通用的视力筛查仪校准的相关技术规范和方法, 国内视力筛查仪的医疗器械注册主要参考YY 0673-2008《眼科仪器验光仪》标准, 要求厂家提供数据准确性验证方法及依据, 以及

收稿日期: 2026-01-06; 收到修改稿日期: 2026-03-02

基金项目: 上海市市场监督管理局科技项目(2024-13)

作者简介: 侯蕊(1988—), 女, 工程师, 硕士, 从事为医用光学仪器的校准方法。

*通讯作者: hour@simt.com.cn

相应的验证报告，其测量的准确性一般通过与验光仪比对来衡量。国内外诸多学者使用视力筛查仪和主观或客观验光的测量结果进行比对，验证视力筛查仪测量的可靠性：美国学者 Mae Millicent 博士^[2]根据更新后的 2021 年 AAPOS 视力筛查委员会指南，评估 Spot 视力筛查仪在儿童视力筛查验证中的性能，经与散瞳验光结果进行对比，Spot 对于近视、远视、散光、屈光参差均展现出良好的预测性能，其敏感度为 0.88，特异度为 0.78；巴西学者 Daniela Lima de Jesus 等^[3]通过比较视力筛查仪屈光测量结果与主观临床验光结果来评估伟伦公司视力筛查设备的准确性，两种方法之间的差异具有统计学意义，基于视力筛查仪操作的简单和便捷性，支持使用其作为估计屈光的辅助方法；中国多个学者^[4-7]等分别使用不同品牌视力筛查仪和自动电脑验光仪对儿童的屈光度进行测量，并使用统计学软件进行统计，结果显示二者在屈光度测量结果上有显著差异，且有很好的正相关性和一致性。

在眼视光学领域，建立个性化人眼光学模型，是研究人眼成像状态的常用手段^[12,13]，20 世纪初瑞典眼科专家 Gullstrand 提出的精密模型眼是在眼视光学领域应用最广泛的人眼光学模型^[14,15]，他使用 6 个球折射面来表示人眼的光学系统。在模拟眼研制方面，王莉茹^[8]等研制了国际标准 ISO 10342-2010 《Ophthalmic instruments-Eye refractometers》推荐的平凸透镜作为检定电脑验光仪的模拟眼，并建立了验光仪顶焦度计量基准，可为电脑验光仪的检校提供精确的屈光度值；德国 Colicchia^[9]等研制了展示人眼光学系统功能的液体模拟眼，可直观展示近视和远视眼状态，但对屈光力没有定量的控制，仅用于学生学习；王一乔^[10]等针对偏心摄影视力筛查仪研制了液体模拟眼，通过控制螺距的位移来改变液体模拟眼的长度，实现不同屈光度的模拟，但在实际调节活塞圈数时会产生一定的屈光度误差，且需考虑液体模拟眼的稳定性。

基于偏心摄影验光原理的视力筛查仪，其测量原理核心在于通过分析相机拍摄到的视网膜反射光在瞳孔区的弥散斑图像来计算屈光不正，因此视力筛查仪用模拟眼既需具有精准屈光度，还需具有与人眼相似的结构和像差水平。

针对基于偏心摄影原理的视力筛查仪，本文首先分析了其测量原理，然后通过模拟真实人眼结构，设计了多层仿生模拟眼，利用 Zemax 仿真软件对模拟眼的像差水平进行了分析，最后通过量值溯源和实验验证所研制模拟眼的准确性与可靠性。

1 偏心摄影视力筛查仪的测量原理

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^[11]。系统的光路图如图 1 所示，以近视眼为例，远点距离为 d ，接收器、成像镜头与人眼三者共轴，光源在成像镜头接收器上方。在筛查过程中，红外光从偏心光源发出，经由瞳孔 (P_1P_3) 进入人眼。对于正视眼，入射光线聚焦于视网膜上，并沿原路返回至偏心光源，没有光线进入成像镜头，因此眼瞳图像呈现全暗。对于近视眼，视网膜散射的弥散斑的像聚焦在远点面上，为 R_1R_3 ，成像镜头能接收到的像范围是 R_2R_4 ，照明光路中以反射光线 P_3R_3 为界将成像镜头接收到的眼瞳图像分为明暗两部分，其中 R_2R_3 为亮区， R_3R_4 为暗区，高度为 b 。对于远视眼，其眼瞳图像与近视眼相反。

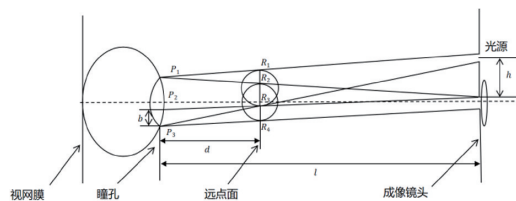


图 1 偏心摄影验光原理图

屈光不正时，成像镜头拍摄的眼瞳图像为有亮暗的圆斑。此时，眼睛屈光度为

$$\Phi = -\frac{1}{d} \quad (1)$$

式中， Φ 为屈光度， d 为眼睛远点的距离。

根据三角形相似原理

$$\frac{b}{d} = \frac{h}{l-d} \quad (2)$$

式中， b 为瞳孔暗区的高度； h 为光源中心与相机镜头边缘之间的距离； l 为眼瞳到摄像机的距离。

由式 (1) (2) 可得

$$\Phi = -\frac{b+h}{bl} \quad (3)$$

通过分析测量成像镜头拍摄到的眼瞳像的暗区高度，系统拍摄距离，以及偏心摄影系统的结构参数，即可测量出眼睛的屈光度。根据偏心摄影验光的测量原理，在视力筛查仪系统结构参数固定时，模拟眼需要提供不同的远点面和反射光斑，筛查仪才会测量到屈光度，因此，模拟眼在设计时需要有精准的屈光度和弥散斑。

2 视力筛查仪模拟眼的设计

人眼是一个复杂又精密的光学系统，从外至

内由角膜、房水、晶状体、玻璃体等结构,各结构的基本参数如表1所示。

表1 人眼各部分结构参数

结构	前表面曲率半径 r/mm	厚度/ mm	折射率 n
角膜	7.80	0.55	1.377
房水	6.50	3.05	1.337
晶状体	10.20	4.00	1.420
玻璃体	-6.00	16.60	1.337

考虑加工和胶合的精度问题,本文简化了人眼模型,设计了包含角膜房水模拟层、晶状体模拟层、玻璃体模拟层、视网膜模拟层的多层模拟眼,如图2所示。

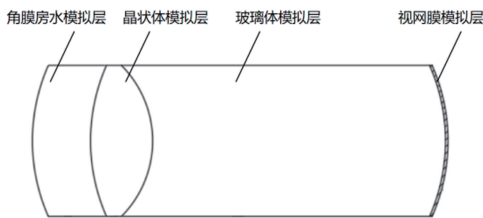


图2 模拟眼结构

模拟眼的参数主要包括各层模拟材料的折射率、前后表面的曲率半径以及层厚度。根据真实人眼相邻组织间的低反射特性,模拟眼相邻两层材料的相对折射率与人眼相对折射率需一致。以E谱线处的折射率为基准,选择K9玻璃模拟角膜房水和玻璃体,ZPK玻璃模拟晶状体。人眼和模拟眼相邻两层间相对折射率差如表2所示,差值仅0.1%。

表2 人眼和模拟眼相邻材料折射率差

结构	折射率		相邻材料折射率差(%)		
	人眼	模拟眼	人眼	模拟眼	模拟眼与人眼差值
角膜房水	1.337	1.519	/	/	/
晶状体	1.420	1.620	6.2	6.3	0.1
玻璃体	1.337	1.519	5.9	6.0	0.1

由于模拟眼材料的折射率相对人眼发生了改变,设计时透镜之间的厚度和间隔与人眼结构相同,为保证模拟眼系统的像差特性变化不大,每个折射面的屈光度不发生改变,需根据透镜的顶焦度公式,计算模拟眼的前表面曲率半径

$$r^* = r \times \frac{n_{\text{后}}^* - n_{\text{前}}^*}{n_{\text{后}} - n_{\text{前}}} \tag{4}$$

式中, r^* 和 n^* 为模拟眼各层前表面曲率半径和折射率; r 和 n 为人眼前表面曲率半径和折射率,前后是指所计算的折射面前后材料的折射率。具体参数计算后如表3所示。

表3 模拟眼各层曲率半径

结构	前表面曲率半径/ mm	
	人眼 r	模拟眼 r^*
角膜房水	7.80	12.01
晶状体	10.20	12.48
玻璃体	-6.00	-7.34

人眼屈光异常时,主要原因有眼轴过长或过短、角膜屈光力过强或不足、角膜曲率不均等,模拟眼在研制时,通过模拟角膜屈光力的变化即角膜模拟层前表面曲率半径的变化来实现不同屈光状态的模拟。视力筛查仪主要用于儿童的屈光度和弱视筛查,测量范围较验光仪小很多,一般在 $(-9 \sim +7) \text{ m}^{-1}$ 之间,因此,统筹机型测量范围,并且结合实际筛查人员的测量需求,模拟眼可模拟眼睛屈光度测量范围为 $(-7 \sim +7) \text{ m}^{-1}$ 。首先确定屈光力为 0 m^{-1} (即0D,正视眼)模拟眼的参数,采用光线追迹的方法沿正向光路,从左至右追迹一条平行于光轴的近轴光线,其光路示意图如图3所示。

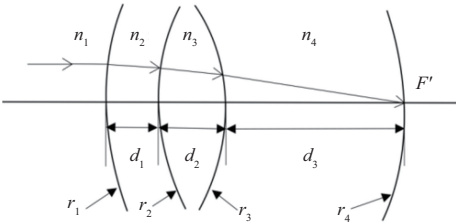


图3 0D模拟眼的光路示意图

根据单个折射球面的成像公式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \tag{5}$$

式中, l 为物距, l' 为像距, n' 为像方折射率, n 为物方折射率; r 为折射球面的曲率半径。

对三个透镜从左向右进行像距 l' 的计算,初始物距 l 为无穷大。图3中, $n_1=1.00$, $n_2=1.519$, $n_3=1.620$, $n_4=1.519$; $d_1=3.60 \text{ mm}$, $d_2=4.00 \text{ mm}$; $r_1=12.00 \text{ mm}$, $r_2=12.48 \text{ mm}$, $r_3=-7.34 \text{ mm}$, $r_4=-12.5 \text{ mm}$,在正视眼时,光束的焦点落在玻璃体模拟层的后表面,根据式(5)逐面计算,像距0D模拟眼的厚度 $d_3=19.16 \text{ mm}$ 。模拟眼的厚度固定不再改变,通过改变角膜房水模拟层的曲率半径来实现不同屈光度的模拟。

为提供精准人眼的视力矫正屈光度,不同屈光度标称值的模拟眼屈光能力需要与眼镜片顶焦度可进行换算

$$\Delta D = \Delta \phi (1 + 0.001a) \tag{6}$$

式中, ΔD 为模拟眼屈光能力; $\Delta \phi$ 为要模拟的眼镜镜片顶焦度; a 眼镜片后顶点到人眼的距离,约

定为12mm^[8]。

在计算 $(-7\sim+7)\text{ m}^{-1}$ 屈光度标称值对应的角膜模拟层前表面曲率半径时,按照图3从由右向左根据式(5)依次计算光学系统的角膜模拟层的像距,光学系统的像距即为标称屈光度对应的远点距离。不同屈光度标称值的模拟眼前表面的曲率半径见表4。

表4 $(-7\sim+7)\text{ m}^{-1}$ 屈光度标称值对应的角膜曲率半径值

模拟眼屈光度 标称值 $\Delta\varphi/(\text{m}^{-1})$	模拟眼屈光能力 $\Delta D/(\text{m}^{-1})$	模拟眼角膜房水层前表 面的曲率半径/mm
7	7.64	14.58
5	5.32	13.68
2.5	2.58	12.76
0	0.00	12.00
-2.5	-2.43	11.36
-5	-4.72	10.82
-7	-6.46	10.44

3 Zemax对模拟眼性能评估

Zemax作为光学设计重要软件,具有界面简洁、易操作的特点^[16],采用Zemax软件对模拟眼进行性能评估和验证:首先根据0D模拟眼多层的曲率半径、折射率、厚度以及色散系数参数,对模拟眼进行建模;然后设置预设参数^[17],入瞳直径设置为4mm,参考实际人眼清晰感光区域 $(5\sim8)^{\circ}$,最大视场为 16° ,视场参数设置为 $0^{\circ}、\pm 8^{\circ}$,波长参数设置为830nm;光线传播图如图4,在视场角为 16° 的范围内无明显像差,平行光经过模拟眼会聚于模拟视网膜上。模拟眼的离焦点列图如图5:中心视场的RMS半径 $(0.750\mu\text{m})$ 远小于艾利斑半径 $(5.755\mu\text{m})$,良好的中心像质确保了模拟眼的重复性和精度;三个视场在离焦过程中变化平滑,模拟眼具有简单稳定的系统像差结构; $\pm 8^{\circ}$ 视场的数据几乎一致,球镜模拟眼系统关于光轴具有良好的对称性,可以减少装调误差。

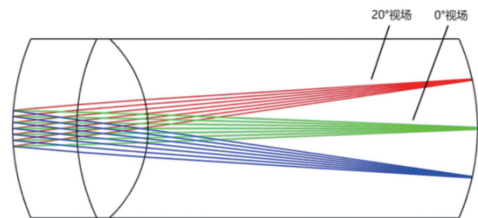


图4 0D模拟眼Zemax光线追迹图

使用Zemax软件分析人眼模型、视力筛查仪模拟眼以及验光仪模拟眼3种模拟眼在 0° 视场处入瞳直径 $(2\sim6)\text{ mm}$ 时对应的弥散斑半径,评估视力筛查仪模拟眼的像差水平与人眼的一致性。其

中人眼模型参数采用表1的数据,视力筛查仪模拟眼是本文研制的3层结构的模拟眼,验光仪模拟眼为单层平凸模拟眼。使用Zemax软件分析中的标准点列图,获取各个模型的弥散斑半径,分析结果如图6所示。

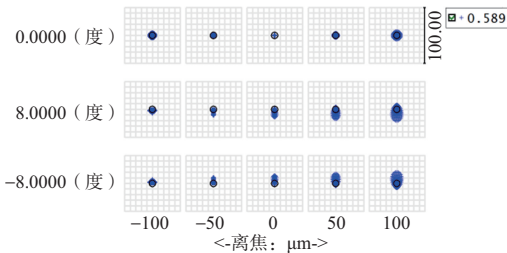


图5 0D模拟眼离焦点列图

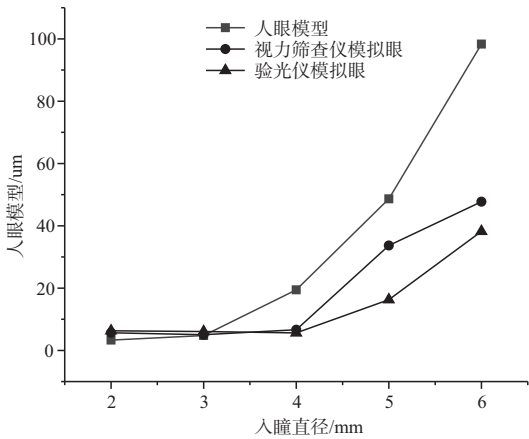


图6 不同人眼模型下的弥散斑半径

分别计算两种模拟眼在不同入瞳直径时与人眼模型的相关系数

$$\text{Correl}(X_j, Y) = \frac{\sum(x_{ji} - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_{ji} - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

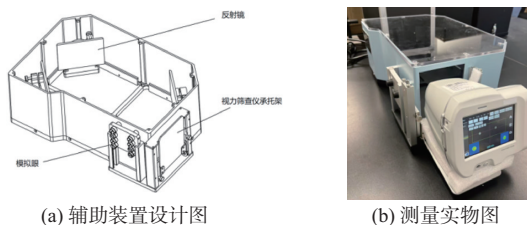
式中: $i=1\sim 5$ 为测量的入瞳直径数量; $j=1\sim 2$,代表视力筛查仪模拟眼和验光仪模拟眼;经计算:视力筛查仪模拟眼与人眼模型的相关系数为0.97,验光仪模拟眼与人眼模型的相关系数为0.87,视力筛查仪模拟眼像差水平与人眼模型更相近。

模拟眼屈光度的准确性通过对各层材料的参数进行有效溯源来保证,主要包括镜片的前后表面曲率和厚度,根据溯源证书屈光度示值误差控制在 $\pm 0.10\text{ m}^{-1}$ 。

4 视力筛查仪校准实验

视力筛查仪的工作距离基本在1米,测量时需手持,且会发出声光吸引人眼主动去注视,但在测量模拟眼时,需主动去对准模拟眼,较远的工作距离导致操作不稳,无法获取瞳孔图像等情况。针对上述情况,本文研制了通过反射光路减少测量距离的辅助校准装置,在测量时将模拟眼装配

在专用套筒内,将套筒安装在辅助校准装置侧面视窗上,视力筛查仪放置在正面视窗,其发出的红外线经过3次反射,被侧面的模拟眼接收和反射。两只模拟眼之间的距离设置为55mm,模拟瞳距,辅助装置设计图和测量实物图如图7。



(a) 辅助装置设计图

(b) 测量实物图

图7 辅助装置设计图和测量实物图

对此视力筛查仪测量数据如图8所示。

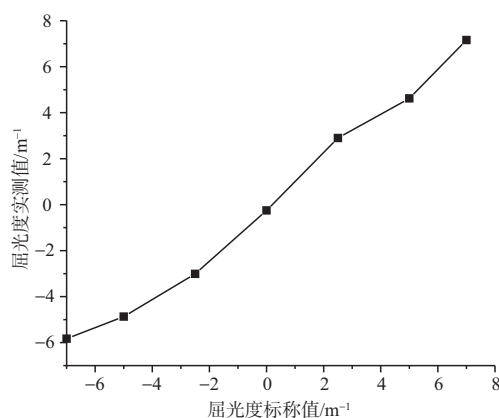


图8 视力筛查仪实测数据图

在 $-7\text{m}^{-1}\sim+7\text{m}^{-1}$ 屈光度范围内,此视力筛查仪最大示值误差出现 -7m^{-1} ,为 1.17m^{-1} ,其他屈光度点误差均在 $\pm 0.5\text{m}^{-1}$ 以内。使用辅助校准装置可以较好地提高对准精度和测量稳定性,但是在测量过程中,因为机器与模拟眼的测量角度问题,经常出现较大的柱镜度,导致需要重复测量。且在 -7m^{-1} 时,属于此机器的最大测量范围处,瞳孔图像的暗区范围小,测量时易出现较大误差。

5 总结

本文根据人眼结构,针对传统校准使用的单一透镜或简单组合透镜模型,采用角膜房水-晶状体-玻璃体-视网膜的四层仿生光学结构,精确复现了人眼光轴方向的屈光介质分布,研制了多层视力筛查仪校准用模拟眼。模拟眼可提供精准的屈光度和一定的人眼像差,这使得筛查仪在检测时面临的图像质量挑战与面对真实人眼时高度一致,从而能更全面地验证其成像算法和测量算法的鲁棒性。模拟眼可提供较大的测量范围,相较于余验光仪比对式的评估,校准方法更客观和直接。针对视力筛查仪测量距离远,测量模式为手持式,测量重复性欠佳的现状等问题,研制了辅助校准

装置,在将视力筛查仪和模拟眼均相对固定的前提下进行测量,提高了测量稳定性。因模拟眼反射的弥散斑形状、强度和质量,是视力筛查仪能否完成测量的关键条件,因此模拟眼的视网膜模拟部件的材质、颜色和光学性质有一定要求,其通用性有待提高。

参考文献:

- [1] 黄丹,颜琪,竺慧,等.2021年AAPOS《儿童视力筛查指南》解读[J].中华实验眼科杂志,2023,41(4):388—391.
Huang Dan, Yan Qi, Zhu Hui, et al. An interpretation of AAPOS uniform guidelines for instrument-based pediatric vision screen validation 2021[J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2023, 41(4): 388—391.
- [2] Peterseim M M W, Trivedi R H, Monahan S R, et al. Effectiveness of the Spot Vision Screener using updated 2021 AAPOS guidelines[J]. Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, 2023, 27(1): 24. e1—24. e7
- [3] de Jesus D L, Villela F F, Orlandin L F, et al. Comparison between refraction measured by Spot Vision Screening TM and subjective clinical refractometry[J]. Clinics, 2016, 71(2): 69—72.
- [4] 刘雨佳,尚建慇,瞿小妹.自然瞳孔下V100视力筛查仪与睫状肌麻痹后电脑验光屈光检查结果的对比研究[J].中国眼耳鼻喉科杂志,2025,25(2):123—129.
Liu Yujia, Shang Jianmin, Qu Xiaomei. Comparative study on the results of V100 vision screener under natural pupil conditions and autorefractor after cycloplegia[J]. Chinese Journal of Ophthalmology and Otorhinolaryngology, 2025, 25(2): 123—129.
- [5] 章敏,徐武平,蔡苏博,等. Spot视力筛查仪和自动电脑验光仪测量学龄前儿童屈光结果比较[J].国际眼科杂志,2025,25(9):1537—1540.
Zhang Min, Xu Wuping, Cai Subo, et al. Comparison refractive of the preschool measurements in children between Spot vision screener and autorefractor[J]. International Eye Science, 2025, 25(9): 1537—1540.
- [6] 李影,廖娅,刘一如,等. Spot双目视力筛查仪和自动电脑验光仪在近视筛查中结果的比较[J].中华眼视光学与视觉科学杂志,2021,23(1):54—58.
Ying Li, Ya Liao, Yiru Liu, et al. Comparison of the results between the spot photoscreener and auto refractometer in the screen of myopia[J]. Chinese Journal of Optometry Ophthalmology and Visual Science, 2021, 23(1): 54—58.
- [7] 李江,姜志武,唐剑波. Spot视力筛查仪与睫状肌麻痹检验光屈光检查结果的比较[J].中华眼视光学与视觉科学杂志,2023,25(8):607—611.
Li Jiang, Lou Zhiwu, Tang Jianbo. Comparative study on the results of spot vision screening instrument and ciliary muscle paralysis optometry[J]. Chinese Journal of Optometry Ophthalmology and Visual Science, 2023, 25(8): 607—611.
- [8] Rayamajhi A, Helmer M, Hetz M, et al. The human eye: From Gullstrand's eye model to ray tracing today[J]. Lux Junior, 2021, 15: 201—209.
- [9] Atchison D A, Thibos L N. Optical models of the human eye

- [J]. Clinical and Experimental Optometry, 2016, 99(2): 99—106.
- [10] 赵秋玲, 王肇沂, 张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用[J]. 光子学报, 2002(11): 1409—1412.
Zhao Qiuling, Wang Zhaoyi, Zhang Chunshu. The actions aspheric surfaces and gradient-index on optical image of the eye [J]. Acta Photonica Sinica, 2002(11): 1409—1412.
- [11] 孔梅梅, 高志山, 陈磊, 等. 人眼光学模型的研究与发展[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 370—373.
Kong Meimei, Gao Zhishan, Chen Lei, et al. Research and development of the optical model of human eyes[J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 370—373.
- [12] 王莉茹, 马振亚. 验光机用客观式模拟眼的研制及国际比对[J]. 计量学报, 2001, 22(1): 23—28.
Wang Liru, Ma Zhenya. Development and international comparison of objective simulated eye for optometry[J]. Acta Metrologica Sinica, 2001, 22(1): 23—28.
- [13] Colicchia G, Wiesner H, Waltner C, et al. A model of the human eye[J]. The Physics Teacher, 2008, 46(9): 528—531.
- [14] 王一乔, 付强, 郁红漪. 偏心摄影视力筛选仪球镜检测用可调式液体模拟眼设计[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(2): 140—144.
Wang Yiqiao, Fu Qiang, Yu Hongyi. Design of adjustable liquid simulated eye for spherical power detection of eccentric photographic vision screening instrument[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2023, 47(2): 140—144.
- [15] 刘春华, 赵楠, 柴松均, 等. 偏心摄影视力筛查设备光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1322002-1-5.
Liu Chunhua, Zhao Nan, Chai Songjun, et al. Design of optical system for eccentric photography sight detecting device[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1322002-1-5.
- [16] 黄幼萍, 陈小钢, 张昊, 等. 基于Zemax的大视场水下成像光学系统设计[J]. 光学技术, 2023, 49(01): 5—10.
Huang Youping, Chen Xiaogang, Zhang Hao, et al. Design of underwater imaging optical system with large field-of-view based on Zemax[J]. Optical Technique, 2023, 49(01): 5—10.
- [17] 郁道银, 谭恒英. 工程光学[M], 北京: 机械工业出版社, 2005: 130.
Yu Daoyin, Tan Hengying. Optical engineering[M], Beijing: China Machine Press, 2005: 130.