

## 高对比度便携式眼底相机

陈隆 林哲凯 郑庚泳 何梓熙 曾亚光 王雪花 韩定安

### High-contrast portable fundus camera

CHEN Long, LIN Zhe-kai, ZHENG Geng-yong, HE Zi-xi, ZENG Ya-guang, WANG Xue-hua, HAN Ding-an

引用本文:

陈隆, 林哲凯, 郑庚泳, 何梓熙, 曾亚光, 王雪花, 韩定安. 高对比度便携式眼底相机[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 299-307. doi: 10.37188/CO.2025-0137

CHEN Long, LIN Zhe-kai, ZHENG Geng-yong, HE Zi-xi, ZENG Ya-guang, WANG Xue-hua, HAN Ding-an. High-contrast portable fundus camera[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 299-307. doi: 10.37188/CO.2025-0137

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0137>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于Philips棱镜3CMOS相机的光学设计及其光谱优化

Optical design and spectral optimization of Philips prism 3CMOS camera

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 648 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0155>

#### 应用于眼底成像的可见光瞳孔定位与对准方法

Visible light pupil localization and alignment method for fundus imaging

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1368 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0065>

#### 红外双波段制冷型变焦Offner型光谱成像系统设计

Design of an infrared dual-band cooled zoom focal Offner-type spectral imaging optical system

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1327 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0080>

#### 基于矢量衍射的光学系统设计与偏振像差补偿

Optical system design and polarization aberration compensation based on vector diffraction

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 839 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0006>

#### 关键参数先验的车载雷达镜头杂散光抑制模型研究

Stray light suppression model of vehicle LiDAR lens based on key parameter priors

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1399 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0074>

#### 分焦平面偏振相机的像素间串扰研究进展

Review of crosstalk between pixels in division of focal plane polarization camera

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 725 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0217>

文章编号 2097-1842(2026)02-0299-09

## 高对比度便携式眼底相机

陈隆, 林哲凯, 郑庚泳, 何梓熙, 曾亚光, 王雪花\*, 韩定安\*  
(佛山大学物理与光电工程学院 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528225)

**摘要:** 针对传统便携式免散瞳眼底相机存在照明与成像光路相互制约、角膜杂散光干扰严重、视网膜不同区域难以同时清晰成像等问题, 本文提出一种新型眼底光学系统设计方案。该方案采用四点光源矩形布局与分区域亮度可调的照明方式, 在 3.2 mm 瞳孔直径下使角膜杂散光较传统方法减少 91.56%, 并可实现视盘与黄斑区域的高对比度同步成像。系统通过照明光路与成像光路分离设计, 结合线栅与液晶叠层偏振技术, 有效抑制了光学表面反射杂光。在 230.4 mm×90 mm 紧凑型结构内同步实现 53°大视场、±20 D 屈光补偿, 及 6 μm 的眼底分辨率。本系统通过单次拍摄人眼即可获得视盘与黄斑细节清晰、对比度优良的视网膜图像。

**关键词:** 便携式眼底相机; 免散瞳成像; 光学设计; 四点光源; 偏振消光

中图分类号: TH773 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0137 CSTR: 32171.14.CO.2025-0137

## High-contrast portable fundus camera

CHEN Long, LIN Zhe-kai, ZHENG Geng-yong, HE Zi-xi, ZENG Ya-guang,  
WANG Xue-hua\*, HAN Ding-an\*

(Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Tech., School of  
Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China)

\* Corresponding author, E-mail: xhwang10000@163.com; handingan@163.com

**Abstract:** To address the inherent limitations of conventional portable non-mydratric fundus cameras, including the mutual constraints between illumination and imaging optical paths, severe interference from corneal stray light, and the difficulty of achieving simultaneous clear imaging of different retinal regions, this paper proposes a novel design system of fundus optical system. The proposed system adopts a four-point rectangular illumination layout combined with regionally adjustable illumination intensity. At a pupil diameter of 3.2 mm, the corneal stray light is reduced by 91.56% compared with traditional approaches, enabling high-contrast synchronous imaging of both the optic disc and macular regions. Furthermore, a separated illumination and imaging optical path architecture is employed. By integrating a wire-grid polarizer with a stacked liquid-crystal polarization scheme, stray light caused by optical surface reflections is effectively suppressed.

收稿日期: 2025-10-29; 修订日期: 2025-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62205060, No. 62075042); 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室(No. 2020B1212030010)资助项目

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62205060, No. 62075042); The Joint Laboratory of Guangdong, Hong Kong and Macao for Intelligent Micro- and Nano-Photonic Technology (No. 2020B1212030010)

Within a compact system envelope of 230.4 mm × 90 mm, the proposed fundus camera simultaneously achieves a wide field of view of 53°, a refractive error compensation range of ±20 D, and a retinal spatial resolution of 6 μm. The proposed system enables the acquisition of high-contrast retinal images with clearly resolved details of both the optic disc and macula in a single-shot capture, demonstrating its suitability for portable non-mydriatric fundus imaging applications.

**Key words:** portable fundus camera; non-mydriatric imaging; optical system design; four-point light source; polarization-based stray light suppression

## 1 引言

眼底摄影是眼科疾病无创诊断与早期筛查的关键技术之一,在糖尿病视网膜病变、青光眼等眼病的检测中具有不可替代的作用<sup>[1-5]</sup>。便携式眼底相机以其便携、易操作的优点,在临床应用中展现出良好的可行性与稳定性<sup>[6]</sup>。

早期的便携式眼底相机多基于台式设备的光路进行简化,常采用环形照明以避免角膜中心反光<sup>[7-9]</sup>。然而,这类方法结构复杂,且对瞳孔直径小于 4 mm 的人群需要药物散瞳,限制了其在基层筛查中的应用。

为了克服上述限制,研究者陆续提出了多种改进方案。例如,采用离轴照明,通过将光源置于成像光轴之外,有效缩小了系统体积<sup>[10-11]</sup>;混合照明则结合离轴与环形照明的优点,进一步优化了均匀性与结构紧凑性<sup>[12]</sup>。然而,上述这些方法在照明-成像光路的空间布局上仍存在局限,且难以在单次拍摄中同时清晰呈现视盘与黄斑,导致图像对比度不足<sup>[13-14]</sup>。近年来,基于图像处理的算法得到广泛研究,但往往难以同时保留高亮与低暗细节,且易引入伪影<sup>[15-17]</sup>。此外,通过采集多曝光图像进行高动态范围合成可以提升对比度<sup>[18-19]</sup>,

但受限于眼动与设备延时,导致实际成功率低,难以满足便携设备对实时性与鲁棒性的要求<sup>[20-21]</sup>。

因此,如何在免散瞳(小瞳孔)条件下,兼顾系统紧凑性、低杂散光与高对比度成像,仍是便携式眼底相机面临的关键挑战。针对这一问题,本文提出一种新型光学系统设计方法:采用四点光源矩形排布结合区域亮度调控,当瞳孔直径在 3.2 mm 以下时可有效抑制角膜杂散光,并实现视盘与黄斑区域的同步高对比度成像;引入线栅<sup>[22-24]</sup>与液晶偏振片叠层结构,在宽光谱范围(400~900 nm)内抑制镜面反射;最终在 230.4 mm(长)×90 mm(高)尺寸内,实现了 35 mm 工作距、53°视场、±20 D 屈光补偿与 6 μm 级眼底分辨能力。该系统单次拍摄即可直接获得细节清晰、对比度优良的视网膜图像,为高性能、高普适的便携式眼底筛查提供了有效解决方案。

## 2 眼底相机系统结构

### 2.1 系统结构原理

本文所述便携式眼底相机的光学结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示,主要包括调焦投影、照明与成像三个光路。

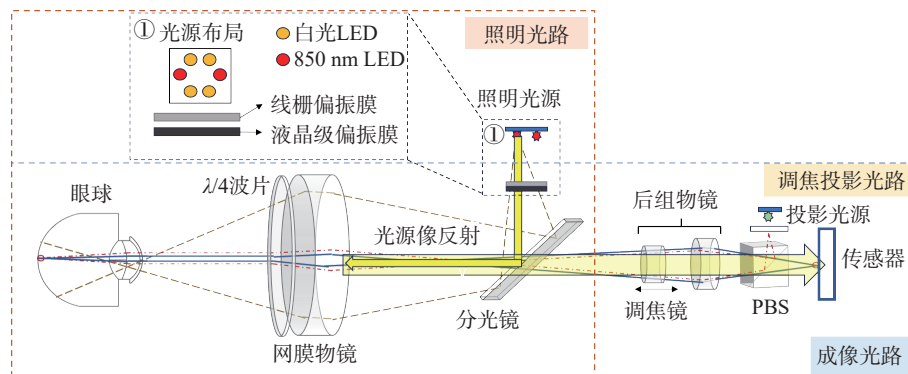


图 1 新型便携式眼底相机系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed portable fundus camera system

调焦投影光路与成像光路共享同一套镜组。投影光源与传感器共轭, 经偏振分光棱镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)发出线偏振光进入成像光路并抵达眼底, 返回的光线再次通过 PBS 后在传感器上成像。该系统利用 PBS 有效阻隔了光学表面的镜面反射, 确保调焦目标像无杂光。通过实时分析传感器上投影目标的像质, 系统可动态调节调焦镜组, 实现 $\pm 20$  D 范围内的屈光补偿。

照明光路与成像光路通过分光镜耦合, 并共享前端的网膜物镜。照明光(含红外与白光)先经过由线栅偏振片与液晶偏振片叠层构成的宽谱起偏器(400~900 nm), 再经分光镜与网膜物镜后会聚于瞳孔, 从而照亮眼底。成像光路中采用 $\lambda/4$ 波片与 PBS 组合, 进一步抑制光学表面反射的杂散光。其中, 红外光用于实时眼位跟踪与对中; 白光则采用四点矩形排布, 该设计针对矩形传感器特性, 将成像窗口优化成直径为 2 mm 的上下横切桶形, 并将四个点光源置于该窗口的上下区域(图 2(a)(彩图见期刊电子版))。

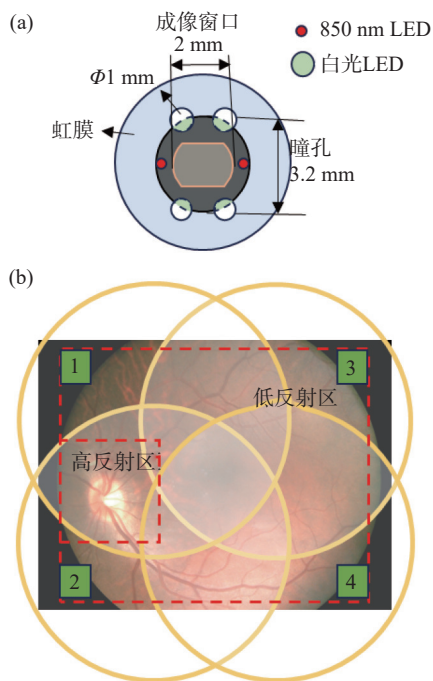


图 2 四点光源排布及其照度分析。(a) 四点光源在瞳孔上的几何排布;(b) 眼底的照明区域示意图

Fig. 2 Four-point light source configuration and illuminance analysis. (a) Geometric arrangement of the four-point light sources on the pupil plane; (b) schematic illustration of the illuminated region on the fundus

该布局在增大照明与成像光路间距、有效抑制角膜杂散光的同时, 确保了在 3.2 mm 小瞳孔下有充足光入射, 且不与红外光路冲突, 实现了红外监控与白光成像同步工作。如图 2(b)(彩图见期刊电子版)所示, 四点照明不仅能覆盖全视场, 还可依据视网膜的反射特性自然分离高、低反射区域。通过独立调控各光源功率, 可在拍摄中动态优化局部照度, 实现自适应区域对比度提升。

最终, 眼底反射的成像光线经网膜物镜与后组成像镜组传递, 在传感器上形成高对比度的视网膜图像。

## 2.2 系统设计指标

系统以瞳孔作为孔径光阑(即成像窗口), 入瞳直径设为 2 mm, 工作距离为 35 mm, 相机视场角设定为  $53^\circ$ , 各视场的调制传递函数(MTF)在 166.67 lp/mm 时大于 0.2, 可分辨全视场眼底  $6 \mu\text{m}$  以上的结构<sup>[25]</sup>。系统具备 $\pm 20$  D 的屈光补偿范围, 选用像元尺寸为  $1.85 \mu\text{m} \times 1.85 \mu\text{m}$  的面阵 CMOS 相机。系统技术指标见表 1。

表 1 眼底相机的设计技术指标

Tab. 1 Design specifications of the fundus camera

技术指标	数值
总长(mm)	$\leq 200$
视场角( $^\circ$ )	$\geq 53$
入瞳直径(mm)	2
工作波长(nm)	436~656/850
调焦度数范围(D)	-20~+20
调制传递函数(MTF) @166.67 lp/mm	$\geq 0.2$

## 2.3 网膜物镜设计

系统采用二次成像架构以保证成像质量。网膜物镜基于 Schematic 眼模型设计, 以瞳孔作为系统光阑, 接收  $53^\circ$  视场内的平行光并形成第一次像<sup>[26]</sup>。设计中需确保中间像的高度不超过物镜通光口径, 其口径可依据公式(1)计算:

$$D = 2L \cdot \tan\left(\frac{\omega}{2}\right), \quad (1)$$

式中,  $L$  为人眼到镜头的工作距离,  $\omega$  为视场角。在本设计中, 工作距离为 35 mm, 计算得到网膜物镜口径为 32.64 mm, 则中间像高度  $y'$  与网膜物镜  $f'$  的关系为公式(2):

$$y' = f' \cdot \tan\left(\frac{\omega}{2}\right). \quad (2)$$

由中间像高度需要小于网膜物镜口径可知,网膜物镜焦距需要小于 32.64 mm。在设计中,初始焦距取 30 mm。利用 Zemax 进行优化。优化结果显示,网膜物镜采用四片式透镜组成(图 3(a))

(彩图见期刊电子版),并在前方放置材料硬度较大的保护玻璃。该结构矫正了除场曲、畸变以外的大部分像差,MTF 曲线各视场质量良好(图 3(b))(彩图见期刊电子版)。

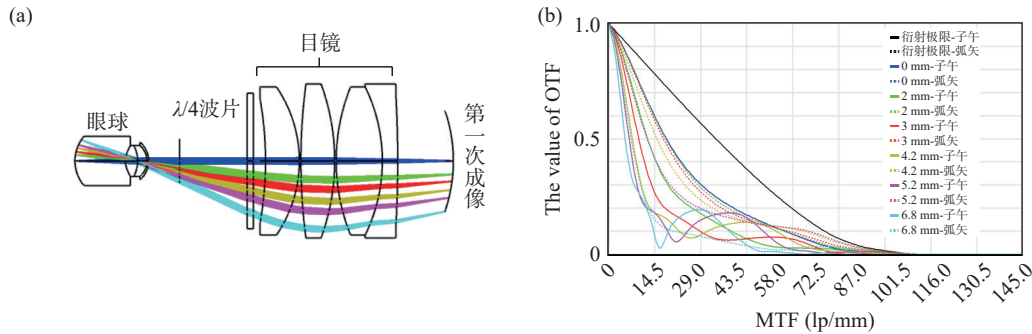


图 3 网膜物镜设计结果。(a) 网膜物镜光路;(b) 网膜物镜 MTF 曲线

Fig. 3 Design of the retinal objective. (a) Optical layout of the retinal objective; (b) MTF curves of the retinal objective

## 2.4 眼底成像光学系统设计

眼底成像光学系统采用二次成像设计。仅靠前端的网膜物镜难以完全补偿人眼及系统自身的色散、场曲和畸变,因此需在网膜物镜后引入后组物镜,对第一次所成的中间像进行像差校正与再次成像,最终使眼底成像于传感器。

在保留网膜物镜基本构型的前提下,对包含后组物镜的完整成像光路进行了系统优化。后组物镜采用对称式双高斯结构,其孔径光阑位于

镜组中心并与瞳孔共轭,可有效校正网膜物镜的残余像差及场曲。该设计保证了可见光与近红外波段具有一致的后工作距,调焦镜组在 $\pm 20$  D 范围内的移动行程控制在 5 mm 以内,系统总长约束在 190 mm 以下。通过在像面前引入偏振分光棱镜,实现了注视目标与成像传感器的光路共轭,从而无需独立设置投影光路。最终优化获得的系统结构如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

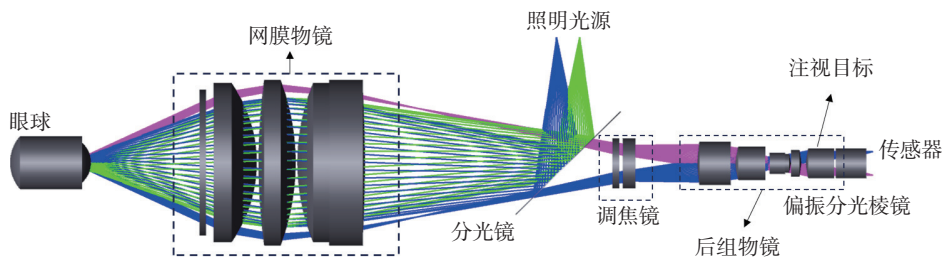


图 4 眼底成像系统设计

Fig. 4 Design of the fundus imaging system

## 3 设计结果及分析

### 3.1 照明结果分析

为评估四点矩形光源布局在 3.2 mm 小瞳孔条件下的照明性能,使用 LightTools 软件对光源排布进行仿真分析。光源设置为 3 mm $\times$ 3 mm 面光源,发散角为 80°,并利用光阑控制光束口径,共追迹 2000 万条光线以统计光场分布,结果如

图 5(彩图见期刊电子版)所示。

图 5(a) 和 5(b) 分别展示了两点对称照明与四点矩形照明在瞳孔处的光斑分布,两光源间距均为 3.2 mm,成像窗口直径均为 2 mm。如图 5(c) 和 5(d) 所示。四点矩形照明的均匀度<sup>[27]</sup>( $U_s=98.58\%$ )高于两点对称照明( $U_s=88.7\%$ ),表现出更优的照明均匀性。

在角膜杂散光抑制方面,两点对称照明在传感器上呈现两个明显反射光斑(图 5(e)),而四点矩

形照明杂散光则显著减少(图 5(f))。采用杂散光抑制率  $B_s$ <sup>[27]</sup> 进行评价, 四点矩形照明的  $B_s$  值为

0.1398, 较两点对称照明( $B_s=0.0118$ )提升 91.56%, 表明其在抑制角膜杂散光方面具有明显优势。

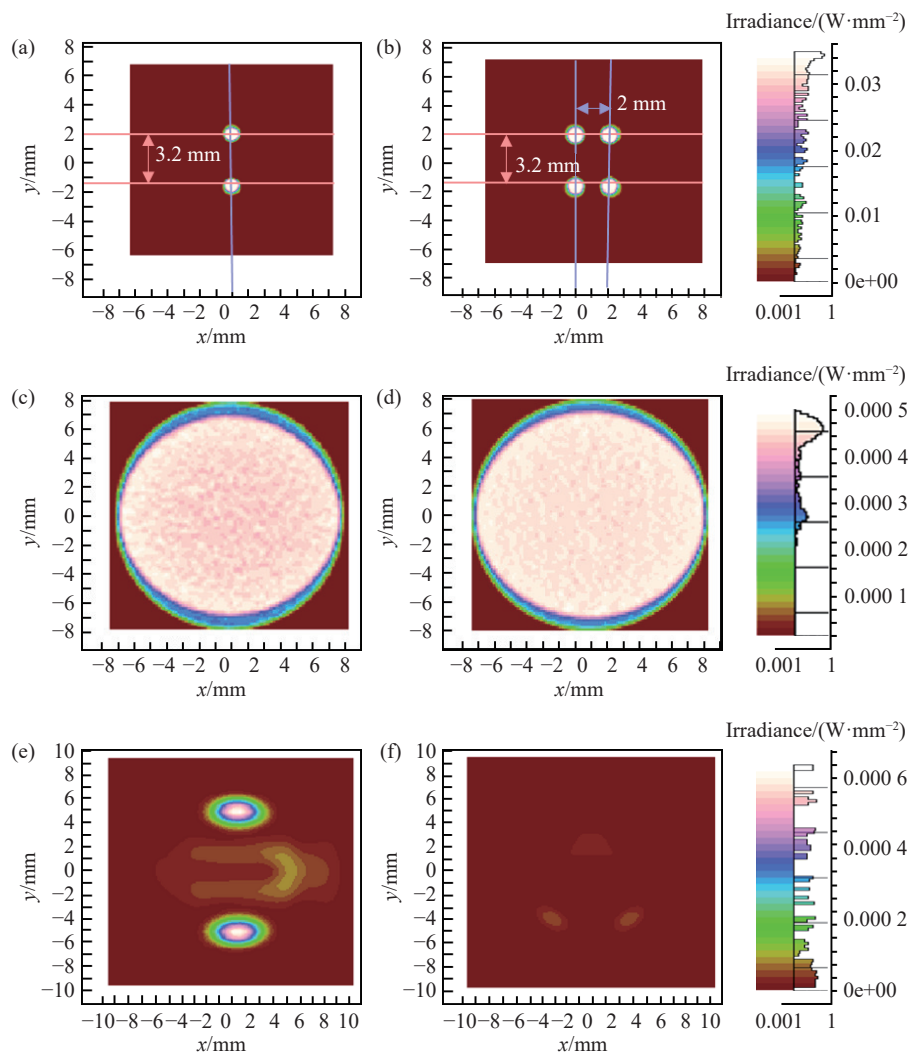


图 5 不同光源布局照明仿真结果对比分析: (a) 两点对称照明瞳孔面光场分布; (b) 四点矩形照明瞳孔面光场分布; (c) 两点对称照明眼底面照度分布; (d) 四点矩形照明眼底面照度分布; (e) 两点对称照明下传感器接收的角膜杂散光分布; (f) 四点矩形照明下传感器接收的角膜杂散光分布

Fig. 5 Comparative analysis of illumination simulation results for different light source configurations. (a) Intensity distribution on the pupil plane under two-point symmetric illumination; (b) intensity distribution on the pupil plane under four-point rectangular illumination; (c) irradiance distribution on the fundus plane under two-point symmetric illumination; (d) irradiance distribution on the fundus plane under four-point rectangular illumination; (e) distribution of corneal stray light received by the sensor under two-point symmetric illumination; (f) distribution of corneal stray light received by the sensor under four-point rectangular illumination

### 3.2 像质评价分析

图 6(a)(彩图见期刊电子版)展示了 0 D 屈光度下, 系统在可见光波段、 $53^\circ$ 全视场范围内的调制传递函数(MTF)曲线。在空间频率 166.67 lp/mm 处, 各视场的光学传递函数(OTF)模值均高于 0.3, 满足视网膜高分辨率成像要求。图 6(b)与 6(c)(彩图见期刊电子版)分别给出了在 $\pm 20$  D 屈

光补偿范围内, 各视场在子午与弧矢方向上于 166.67 lp/mm 处的 OTF 模值。结果显示, 弧矢方向在除边缘视场外的其他视场中模值均优于 0.2, 子午方向在除+20 D 处约为 0.1 外, 其余均保持在 0.2 以上。这表明系统在整个调焦范围内具有良好的像质一致性, 并具备较强的空间频率响应能力。

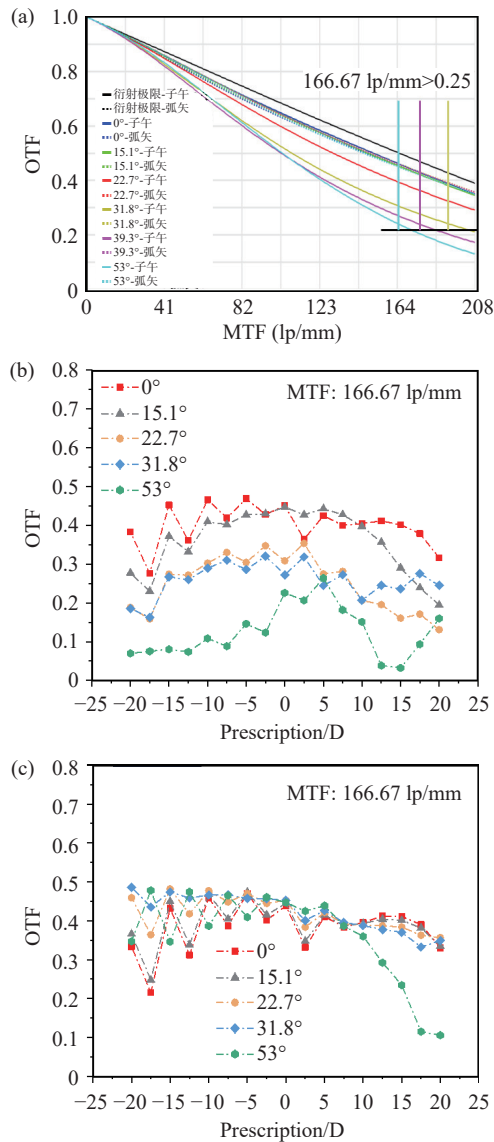


图 6 成像系统像质评价结果。(a) 0 D 下可见光波段的调制传递函数曲线; (b)  $\pm 20$  D 范围内各视场在子午方向上、166.67 lp/mm 处的光学传递函数模值; (c)  $\pm 20$  D 范围内各视场在弧矢方向上、166.67 lp/mm 处的光学传递函数模值

Fig. 6 Image quality evaluation results of the imaging system. (a) MTF curves in the visible wavelength range at 0 D; (b) magnitude of the optical transfer function ( $|OTF|$ ) at 166.67 lp/mm in the tangential direction for different fields within a refractive error range of  $\pm 20$  D; (c) magnitude of the optical transfer function ( $|OTF|$ ) at 166.67 lp/mm in the sagittal direction for different fields within a refractive error range of  $\pm 20$  D

#### 4 人眼实验及结果分析

根据上述光学设计结果, 完成了相应的机械

结构设计, 如图 7 所示。系统在集成工业相机后, 整体尺寸为  $(230.4 \pm 1)$  mm (长)  $\times$   $(90 \pm 1)$  mm (高), 具有显著的紧凑性与便携性。

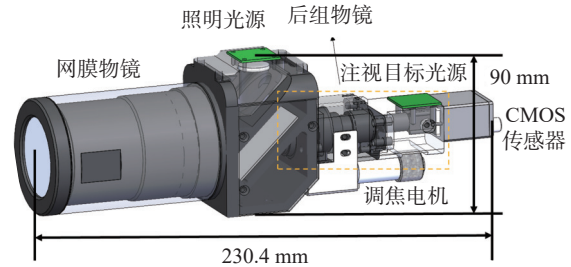


图 7 便携式眼底相机机械装配图

Fig. 7 Mechanical assembly of the portable fundus camera

本研究对工程样机开展了实验研究, 并通过佛山大学伦理审查 (FUME2025022)。实验招募 2 名年轻志愿者 (19 岁,  $-2.00$  D, 瞳孔约 3.5 mm; 22 岁,  $-4.00$  D, 瞳孔约 3.5 mm), 均无眼部疾病史。测试结果如图 8 (彩图见期刊电子版) 所示。

图 8(a) 展示了采用对称两点照明结合单片线栅偏振片的成像效果。结果显示: 该方法虽可部分抑制杂散光, 但图像中心仍残留有明显的光源反射伪影, 影响黄斑区域信息的提取, 且边缘存在畸变, 难以在小瞳孔条件下获得清晰图像。

相比之下, 采用四点照明配合叠层偏振片 (线栅+液晶级) 所获得的图像 (图 8(b)) 中, 黄斑区域无反射伪影, 图像整体清晰且视场覆盖完整, 表明该设计在杂散光抑制与成像质量方面均有显著提升。

经进一步观察发现, 在均匀照明条件下 (图 8(c)), 由于视盘区域反射较强, 黄斑与视盘无法在同一图像中同时清晰呈现, 且血管可见度较低 (参见于图 c1~c3)。通过独立降低左侧光源功率以减弱视盘照度 (图 8(d)), 视盘与黄斑细节均得以清晰显示, 血管对比度也显著提高 (参见于图 d1~d3)。该结果验证了本系统在区域对比度优化与图像信息完整性方面的有效性。

与国内主流便携式眼底相机相比, 如上海鹰瞳 AI-FD16aF<sup>[28]</sup> 与重庆贝奥新视野 Kestrel-300<sup>[29]</sup> 均采用传统单点倾斜照明 (性能对比见表 2)。

市面上的该类设备虽支持散瞳成像, 但受限于其光学架构, 视场角通常不超过  $40^\circ$ , 屈光调节范围仅为  $\pm 15$  D。相比之下, 本文系统在保持更紧凑体积的前提下, 实现了  $53^\circ$  更大视场与  $\pm 20$  D 更宽屈光补偿范围, 整体性能具有一定优势。

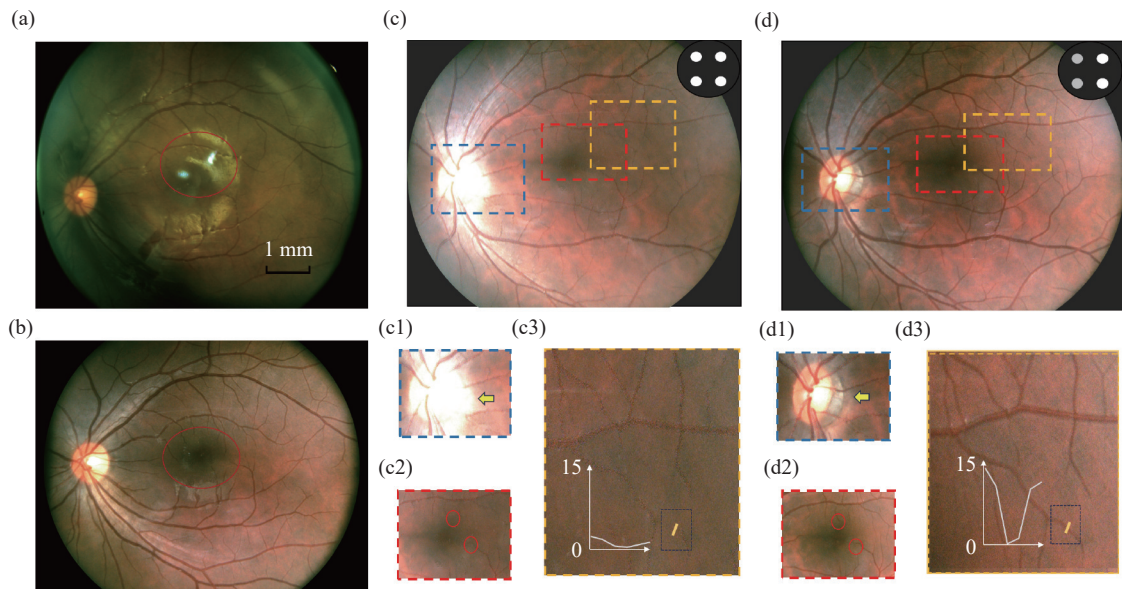


图 8 人眼成像测试结果。(a) 对称两点照明成像、(b) 四点矩形照明成像及 (c) 常规均匀照明的视网膜图像, 其中 (c1) 为视盘区域、(c2) 为黄斑中心凹、(c3) 为血管对比度局部(沿图中黄色截线所示); (d) 为区域调光后的视网膜图像, 其中 (d1) 为视盘区域、(d2) 为黄斑中心凹、(d3) 为血管对比度局部(沿图中黄色截线所示)

Fig. 8 Human eye imaging experiments. Retinal image acquired under (a) two-point symmetric illumination, (b) four-point rectangular illumination, and (c) conventional uniform illumination, with (c1) the optic disc region, (c2) the foveal center, and (c3) a local profile of vascular contrast along the yellow line indicated; (d) retinal image acquired with regionally adjusted illumination, with (d1) the optic disc region, (d2) the foveal center, and (d3) a local profile of vascular contrast along the yellow line indicated

表 2 本系统与国内市面上两款相机的性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters between the proposed system and two commercially available domestic fundus cameras

工作参数	本系统	AI-FD16aF	Kestrel 300
入瞳直径 (mm)	3.2	3.5	3.5
工作距离 (mm)	35±2	-	15±5
分辨率 (lp/mm)	≥80	80	≥60
视场角 (°)	53	40	35
屈光调节范围 (D)	-20~+20	-15~+15	-15~+15
照明方法	四点矩形	单点倾斜照明	单点倾斜照明
尺寸(长×高)(mm×mm)	230×90	280×130	284×145

## 5 结 论

本研究提出了一种基于四点光源排布、叠层偏振结构与二次成像光路的便携式眼底相机系统。该设计在 230.4 mm×90 mm 的紧凑尺寸内, 实现了 53°大视场、±20 D 屈光补偿与 6 μm 级血管分辨能力。实验结果表明, 四点照明在 3.2 mm 瞳孔下可使角膜杂散光较传统两点照明降低 91.56%, 且具备更优的照明均匀性。人眼测试实验进一步验证, 该系统通过区域功率动态调控, 能够在单次拍摄中同步清晰呈现视盘与黄斑细节, 有效提升局部血管对比度。本研究为高性能、小型化免散瞳眼底相机的开发提供了新的技术路径。

## 参考文献:

- [1] SACHDEVA V, VASSENEIX C, HAGE R, *et al.*. Optic nerve head edema among patients presenting to the emergency department[J]. *Neurology*, 2018, 90(5): e373-e379.
- [2] 陈蔚霖, 常军, 赵雪惠, 等. 广域眼底相机光学系统的设计与仿真分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 814-821.  
CHEN W L, CHANG J, ZHAO X H, *et al.*. Optical system design and simulation of a wide-area fundus camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 814-821. (in Chinese).
- [3] LI B, CHEN H, ZHANG B L, *et al.*. Development and evaluation of a deep learning model for the detection of multiple

- fundus diseases based on colour fundus photography[J]. *British Journal of Ophthalmology*, 2022, 106(8): 1079-1086.
- [4] MILEA D, NAJJAR R P, JIANG ZH B, *et al.*. Artificial intelligence to detect papilledema from ocular fundus photographs[J]. *New England Journal of Medicine*, 2020, 382(18): 1687-1695.
- [5] LIU L, LIU Y M, YAN X T, *et al.*. Retinal layer segmentation using gradient feature calculation in OCT[J]. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*, 2024, 17(6): 2450021.
- [6] YAO X CH, SON T, MA J CH. Developing portable widefield fundus camera for teleophthalmology: Technical challenges and potential solutions[J]. *Experimental Biology and Medicine*, 2022, 247(4): 289-299.
- [7] 王晓恒, 薛庆生. 大视场手持式免散瞳眼底照相机光学设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922001.  
WANG X H, XUE Q SH. Optical design of portable Non-Mydriatic Fundus camera with large field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922001. (in Chinese).
- [8] 江剑宇, 杨波, 万新军, 等. 便携式免散瞳带信标眼底相机光学系统[J]. *光学技术*, 2019, 45(2): 240-244.  
JIANG J Y, YANG B, WAN X J, *et al.*. A portable and mydriasis-free fundus optical system with a beacon[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(2): 240-244. (in Chinese).
- [9] HONG Y, ZENG CH M, XIA CH L, *et al.*. Design of automatic focusing fundus camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11780: 117800J.
- [10] 杨皓聿, 任文斌, 常献刚, 等. 一种小型眼底相机: 中国, 202011095592.1 [P]. 2020-12-08.  
YANG H Y, REN W B, CHANG X G, *et al.*. Small fundus camera: CN, 202011095592.1 [P]. 2020-12-08. (in Chinese).
- [11] 牟国强, 陈荡荡, 杨皓聿. 一种用于眼底相机调焦的光学系统及眼底相机: 中国, 202410579696.1 [P]. 2024-07-02.  
MOU G Q, CHEN D D, YANG H Y. Optical system for fundus camera focusing and fundus camera: CN, 202410579696.1 [P]. 2024-07-02. (in Chinese).
- [12] HAFIZ F, CHALAKKAL R J, HONG S C, *et al.*. A new approach to non-mydriatic portable fundus imaging[J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2022, 19(4): 303-314.
- [13] REMINGTON L A. *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 233-252.
- [14] YOUSSEF A A A, GHALWASH A Z, GHONEIM A S. A comparative evaluation of preprocessing methods for automatic detection of retinal anatomy[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Informatics & Systems*, INFOS, 2007: 24-30.
- [15] KOLAR R, ODSTRCILIK J, JAN J, *et al.*. Illumination correction and contrast equalization in colour fundus images[C]. *2011 19th European Signal Processing Conference*, IEEE, 2011: 298-302.
- [16] 盖俊帅, 马玉婷, 张运海, 等. 用于眼底视网膜图像的去雾状杂散光算法[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(8): 1070-1078.  
GAI J S, MA Y T, ZHANG Y H, *et al.*. Dehazing stray light algorithm for fundus retinal image[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(8): 1070-1078. (in Chinese).
- [17] SAHA S K, XIAO D, KANAGASINGAM Y. A novel method for correcting non-uniform/poor illumination of color fundus photographs[J]. *Journal of Digital Imaging*, 2018, 31(4): 553-561.
- [18] ROSSI A, RAHIMI M, SON T, *et al.*. Preserving polarization maintaining photons for enhanced contrast imaging of the retina[J]. *Biomedical Optics Express*, 2023, 14(11): 5932-5945.
- [19] ROSSI A, RAHIMI M, LE D, *et al.*. Portable widefield fundus camera with high dynamic range imaging capability[J]. *Biomedical Optics Express*, 2023, 14(2): 906-917.
- [20] ZAITSEV M, MACLAREN J, HERBST M. Motion artifacts in MRI: a complex problem with many partial solutions[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2015, 42(4): 887-901.
- [21] DUKE D J, KNAST T, THETHY B, *et al.*. A low-cost high-speed CMOS camera for scientific imaging[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(7): 075403.
- [22] 罗敬, 陈兴达, 吕凝睿, 等. 光学系统偏振特性影响抑制方法综述[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(5): 979-1015.  
LUO J, CHEN X D, LV N R, *et al.*. A review of methods for suppressing the influence of polarization characteristics in optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 979-1015. (in Chinese).
- [23] 史浩东, 许家伟, 张健, 等. 强光背景下主动偏振成像方法[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(5): 1075-1086.  
SHI H D, XU J W, ZHANG J, *et al.*. Active polarization imaging method under strong light background[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1075-1086. (in Chinese).
- [24] 邢陈陈, 郑继红, 陈芳芳, 等. 光控取向液晶偏振全息柱透镜的制备及聚焦特性[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 593-601.

- XING CH CH, ZHENG J H, CHEN F F, *et al.*. Preparation and focusing characteristics of polarized holographic photo-alignment liquid crystal cylindrical lenses[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 593-601. (in Chinese).
- [25] International Agency for the Prevention of Blindness. Equipment specifications: Fundus camera for diabetic retinopathy screening: non-mydriatic[R]. London: International Agency for the Prevention of Blindness, 2019.
- [26] 肖志涛, 姜世良, 吴骏, 等. 立体成像眼底相机光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1054-1060.  
XIAO ZH T, LOU SH L, WU J, *et al.*. Design of optical system for stereo imaging fundus camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(5): 1054-1060. (in Chinese).
- [27] LEE S J, YANG K M, LEE K B, *et al.*. Design of illumination system using characterized illuminances for smartphone-based fundus camera[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 168: 107664.
- [28] 长沙鹰瞳健康科技有限公司. AI-FD16aF 眼底相机[EB/OL]. (2022-10-12). [2025-12-04]. <https://www.chem17.com/product/detail/37337180.html>.  
Changsha Eyetong Health Technology Co., Ltd. AI-FD16aF Fundus camera[EB/OL]. (2022-10-12). [2025-12-04]. <https://www.chem17.com/product/detail/37337180.html>. (in Chinese).
- [29] 重庆贝奥新视野医疗设备有限公司. Kestrel 300 眼底照相机[EB/OL]. (2025-05-19). [2025-12-04]. <https://www.lyqbq.com/ydztj/117.html>.  
Chongqing Bio new vision medical equipment Co., Ltd. Kestrel 300 Fundus camera[EB/OL]. (2025-05-19). [2025-12-04]. <https://www.lyqbq.com/ydztj/117.html>. (in Chinese).

#### 作者简介:



王雪花(1987—), 女, 博士, 副教授, 2017年于深圳大学获得博士学位, 主要从事光学成像技术研究。E-mail: [xhwang10000@163.com](mailto:xhwang10000@163.com)



韩定安(1976—), 女, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 2005年于华南师范大学获得博士学位, 主要从事光电检测与生物医学成像研究。E-mail: [handingan@163.com](mailto:handingan@163.com)