

手持式眼底相机光学系统设计

李 灿^{1,2} 宋淑梅¹ 李 淳¹ 刘 英¹ 孙 强¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 提出一种新型眼底成像系统, 结构更加简单、紧凑。系统的成像和调焦投影光路共用调焦镜, 调焦投影光路完全嵌入到照明光路。调焦投影光路不再专设照明组件, 避免了投影目标和调焦镜之间的机械联动结构。并且充分利用了网膜物镜系统的空间。利用 LED 光源窄带宽的优势, 瞄准和拍照过程共用一个电荷耦合器件相机。采用新的光学结构, 设计了一款视场 30°、工作距离 30 mm 的眼底相机光学系统, 眼光焦度补偿范围 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +5 \text{ m}^{-1}$, 物方各视场分辨率为 45 line/mm, 畸变小于 5%。

关键词 光学设计; 眼底相机; 调焦镜; 网膜物镜; 调焦投影系统光路

中图分类号 TH773 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0922003

Optical System Design of Portable Fundus Camera

Li Can^{1,2} Song Shumei¹ Li Chun¹ Liu Ying¹ Sun Qiang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A portable fundus camera is designed to make the optical system more simple and compact comparing with the classical system. The photographing system and the focus target projection optical system are using a common focusing lens, so that the focus target projection optical system can be arranged completely in the illumination system. In the focus target projection system a special illumination system is not required any longer, and a focus link mechanism between the projective target and the focusing lens is avoided. Focusing lens fully utilizes the space of the retina object lens system. Taking advantage of narrow bandwidth of light source, observation system and photographing system share the common charge coupled device. A new type of fundus camera is designed with the field of view of 30°, the free working distance of 30 mm. The accommodation ranges between -10 m^{-1} and $+5 \text{ m}^{-1}$. The resolution at the object plane of 45 line/mm across the entire field of view, and the maximum distortion is less than 5%.

Key words optical design; fundus camera; focusing lens; ophthalmic lens; optical path of focus target projection system

OCIS codes 120.4570; 220.2740; 220.2945

1 引 言

眼底相机是一种传统的医疗设备, 用以观测、记录人眼视网膜图像。视网膜上分布着人体内唯一能直接观测到的毛细血管, 这些微血管形态的变化可用于高

血压、糖尿病等多种疾病的早期诊断, 已成为现代医疗诊断的重要手段。世界上第一台眼底相机是由德国 CARL ZEISS 公司于 1925 年试制成功的。随后 CANON、TOPCON、NIKON、OLYMPUS、OPTON、

收稿日期: 2012-03-09; 收到修改稿日期: 2012-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(60977001)和吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金项目(2011CJT0004)资助课题。

作者简介: 李 灿(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: lc19851125@163.com

导师简介: 孙 强(1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

VISUAL PATH 等这些日本、美国和德国的公司对眼底相机的设计进行了大量的改进^[1]。我国起步较晚,发展较慢,其中一个重要原因就是受制于其复杂的光学结构。考虑到活体视网膜拍摄,照明和成像过程必须同时进行以保证人眼安全,并且为提高受检者的舒适度,免散瞳眼底相机通常是医疗场所的首选。免散瞳眼底相机光学系统设计的关键为选择合适的成像光源,合理布置照明和成像光路的空间位置来消除影响成像质量的角膜反射光,利用黑点板消除照明光束和网膜物镜作用所形成的鬼像,采用内调焦方式对眼光焦度不正进行补偿,除此之外还需要考虑人眼定位和瞄准系统的设计^[2~4]。

针对以上问题,本文提出一种新的眼底成像光学结构,体积更加紧凑,结构更加简单。近红外瞄准和可见光拍照共用一个电荷耦合器件(CCD)相机,系统调焦投影光路可以完全嵌入到照明光路中,系统调焦可充分利用网膜物镜系统的空间。

2 系统结构及设计原理

眼底相机的基本结构包括成像系统、照明系统和调焦投影系统三部分,照明系统完成对视网膜的

照明,成像系统将视网膜成像在探测器上,调焦投影光路辅助准确快捷地确定调焦位置^[5~7]。考虑到照明的均匀性和对杂光的控制,采用共轭式环形照明。照明光路中光阑与眼底共轭,既可提高眼底照明均匀性,也可作为成像系统的视场光阑控制视网膜视场的大小。成像光路由网膜物镜、成像物镜和调焦镜组成,中空反射镜为孔径光阑。调焦投影光路中投影目标在近红外波段下与眼底共轭,辅助瞄准和调焦过程。

只要能够证明弱光焦度的调焦镜对照明光路的影响小到可以忽略,调焦镜即可由成像镜组移至网膜物镜,图1为传统结构和新型结构的对比。新型结构中,调焦投影光路可以完全嵌入到照明光路中,避免了投影目标和调焦镜之间的机械联动结构。调焦镜位于孔径光阑之前,系统调焦可充分利用网膜物镜系统的空间,成像物镜系统可以变短,结构更加紧凑。新型结构中调焦镜的中间反射光会带来杂散光,采用窄带双波段成像可以大大提高调焦镜的增透效果,结合黑点板的使用共同消除网膜物镜和调焦镜的杂散光和鬼像。

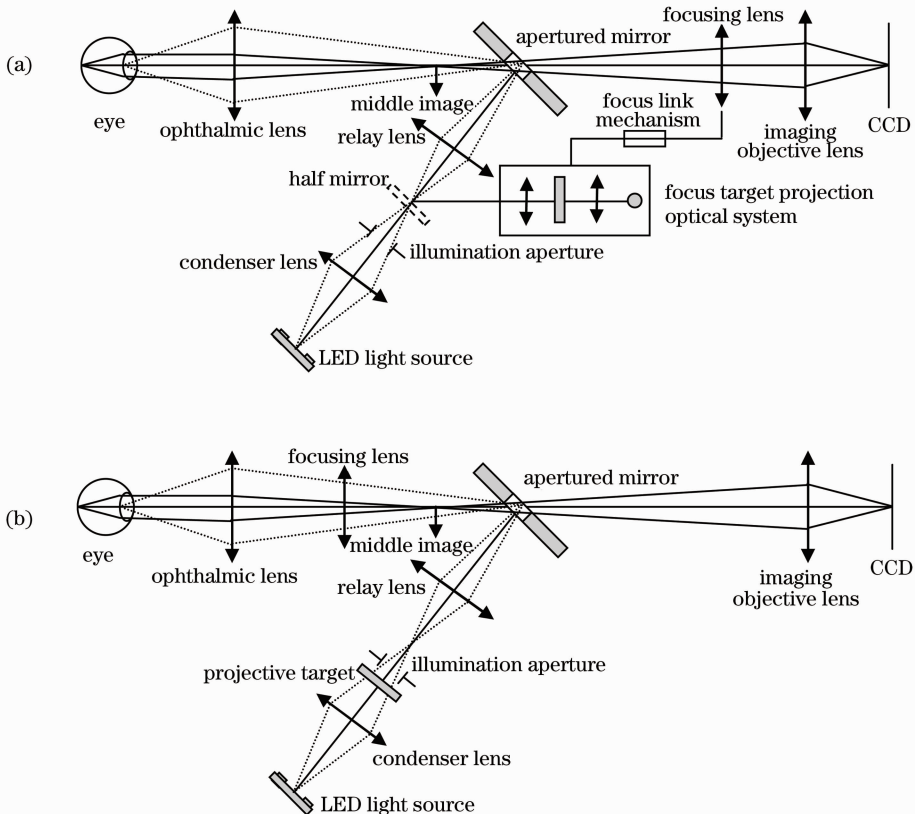


图1 (a)传统结构和(b)新型结构眼底成像光学系统原理

Fig. 1 Principle of fundus oculi imaging optical system of (a) classical structure and (b) the proposed one

3 光学系统设计过程

3.1 技术指标

在相同的设计指标要求下,分别采用传统结构和新型结构设计两款眼底相机光学系统,并从成像光路、照明光路和调焦投影光路三方面对两种结构进行对比分析。

最小拍摄瞳孔直径为 4 mm;设计波长为 (850 ± 25) nm 和 (525 ± 25) nm;全视场为眼底 30° ;工作距离为 28 mm;接收器为 $752 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$, $1/3 \text{ inch}$ ($1 \text{ inch} = 0.0254 \text{ m}$) CCD;屈光不正眼补偿为 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +5 \text{ m}^{-1}$;观察用 850 nm 的发光二极管(LED),拍照用 525 nm 的 LED;分辨率在物方大

于 45 line/mm,即可分辨眼底 $11 \mu\text{m}$ 的结构单元。

3.2 网膜物镜设计

网膜物镜作为成像和照明光路的公共部分,设计要综合考虑两光路的要求,是搭建系统总体结构的基础。在成像光路中,中空反射镜的中孔作为孔径光阑,网膜物镜保证人眼瞳孔与中空反射镜较为完善地共轭,降低人眼像差的影响;在照明光路中,保证中空反射镜处的环形光斑成像到人眼瞳孔处,均匀地照明视网膜目标区域。中空反射镜将照明光路和成像光路分开,可减少网膜物镜和调焦镜的中间反射光等其它杂散光进入成像光路降低成像质量,如图 2(b)所示。

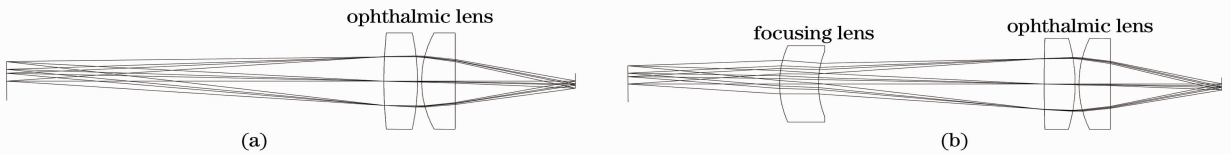


图 2 (a)传统结构和(b)新型结构的网膜物镜结构

Fig. 2 Ophthalmic lens structure of (a) classical structure and (b) the proposed one

按理想系统计算^[8],网膜物镜要求垂轴放大倍率 β 为 -0.3 ,工作距离 l' 为 30 mm,

$$\alpha = \beta^2 = l'/l, \quad (1)$$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_1}, \quad (2)$$

式中 α 为轴向放大率, β 为垂轴放大率, l 为物距, l' 为像距。由(1)式和(2)式计算焦距 $f_1 = 25.85 \text{ mm}$ 。该窄波段的系统色差较小,球差较大,采用两个单片透镜优化设计得到传统的网膜物镜结构,如图 2(a)所示。将调焦镜加入上述传统结构,与网膜物镜的距离 $d = 60 \text{ mm}$,调焦镜焦距 $f_2 = 10f_1$,

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2, \quad (3)$$

式中 Φ_1 为调焦镜为光焦度, Φ_2 为网膜物镜光焦度, Φ 为总的光焦度。由(3)式计算总焦距 $f = 33.68 \text{ mm}$ 。

在保证调焦镜光焦度不变的情况下,优化得到新型网膜物镜,其中弯月形的调焦镜对球差和彗差的校正起到良好的作用,如图 2(b)所示。

3.3 成像光路设计

保持网膜物镜结构不变,在此基础上继续搭建成像光路。传统和新型结构虽有差别,但在优化过程中像差校正和光焦度分配基本相同。设计结合 Gullstrand-Le Grand 离焦眼模型,实现对人眼像差与系统像差的综合校正^[9~11]。为保证系统对孔径光阑的对称性,成像镜组依然使用两个正透镜平衡校正垂轴像差。后组选用双胶合透镜校正轴向色差,保证双波段系统的后工作距离相同。尽管双波段放大率稍有不同,但瞄准和拍照过程可以通过同一个 CCD 来接收视网膜像。

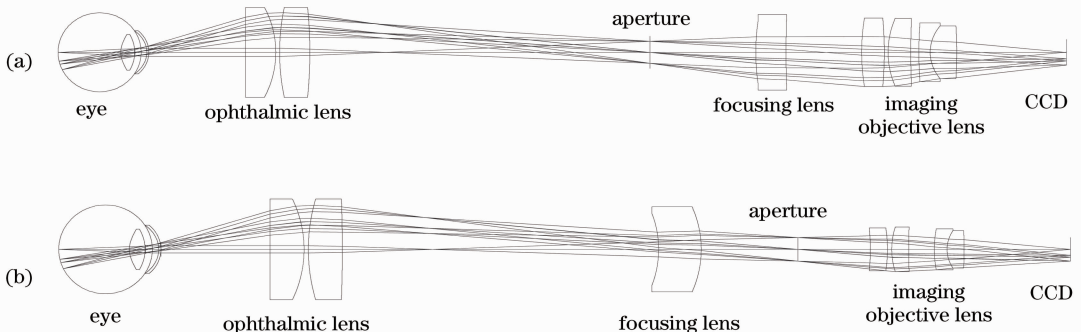


图 3 (a)传统结构和(b)新型结构的成像光路

Fig. 3 Imaging optical path of (a) classical structure and (b) the proposed one

最终优化得到两种结构的设计结果如图 3 所示,在光学性能相似的情况下,新型结构的成像光路总长度由传统的 217 mm 缩短至 188 mm,减少了 13.4%。新型结构中,22 mm 调焦距离保证了成像光路 $-10\text{ m}^{-1}\sim+5\text{ m}^{-1}$ 的视度补偿。调焦过程中网膜物镜焦距变化仅有 $\pm 1.5\text{ mm}$,人眼瞳孔处的光阑像仅有 $\pm 0.2\text{ mm}$ 的位置变化,相对 4~6 mm 的人眼瞳孔可以忽略其影响。

3.4 照明光路设计

在网膜物镜的基础上,照明光路还需要完成 LED 光源到中空反射镜的成像。该部分光路相对

孔径较大,主要像差依然为球差和彗差,设计选择相对孔径较大的双高斯系统作为初始结构。综合考虑 LED 的窄波段和该系统的对称性,前后组均使用 3 片单正透镜,结合网膜物镜共同优化得到最终的照明光路。另外,系统设计为物方远心光路,可提高 LED 能量利用率。光路采用 LED 环形阵列照明,3 个近红外 LED 用于瞄准过程,3 个可见光 LED 用于拍摄过程。设计采用多重结构同时优化双波段的光学系统,两种 LED 的工作距离不同,图 4 中仅表示出了可见照明光路。

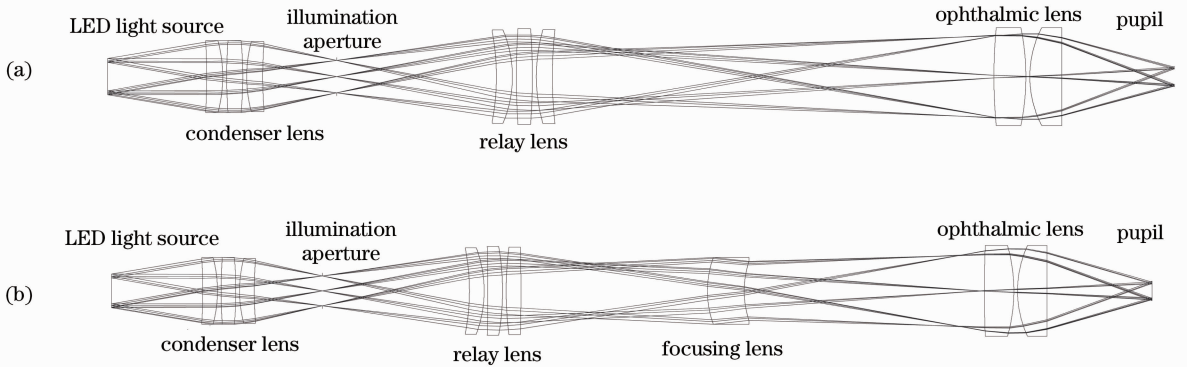


图 4 (a)传统结构和(b)新型结构的照明光路

Fig. 4 Illumination optical path of (a) classical structure and (b) the proposed one

照明光路像质要求不高,只需保证瞳孔处能得到边缘清晰、无变形的环形光斑,有效抑制角膜反射光产生的杂散光。调焦过程中网膜物镜焦距变化仅有 $\pm 1.5\text{ mm}$,保证环形光斑像的前后移动范围在允许的焦深内,就能满足照明光路要求。调焦过程中瞳孔处环形光斑大小变化仅有 $\pm 0.1\text{ mm}$,对眼底照明产生的影响可以忽略。

3.5 调焦投影光路设计

调焦投影光路利用近红外光将分划板投影到眼底,通过判断投影像的分辨率、对比度和放大倍率等来准确地确定调焦位置^[12,13]。传统调焦投影光路在网膜物镜基础上必须专设中继镜组和光源,通过

前后移动分划板来补偿人眼光焦度,如图 5(a)所示。新型结构还须综合考虑照明光路和调焦投影光路的结构,利用前组照明中继镜组的 3 个单透镜保证在整个调焦过程中分划板和眼底始终共轭,如图 5(b)所示。确定照明中继镜组的结构之后,要通过前组的照明聚光镜组 3 片透镜来重新优化照明光路,如图 4(b)所示。

图 5(b)的新型结构,成像光路和调焦投影光路共用调焦镜,调焦投影光路完全嵌入到照明光路中,避免了投影目标和调焦镜之间的机械联动结构以及二者相对位置的标定。设计采用多重结构同时优化双波段的投影系统,可见光下照明光阑和眼底共轭,

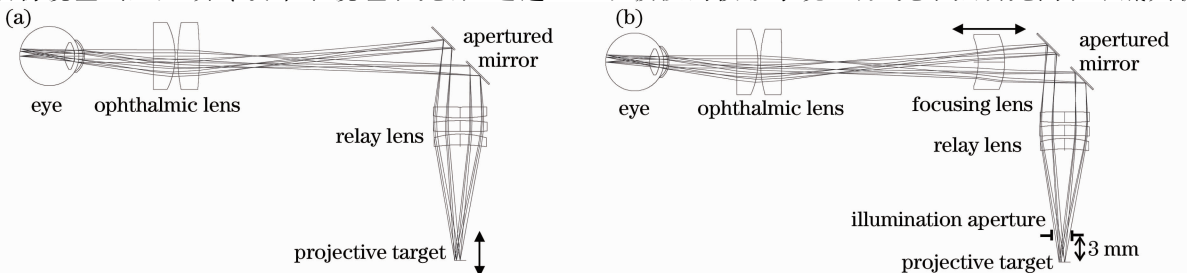


图 5 (a)传统结构和(b)新型结构和调焦投影光路

Fig. 5 Optical path of focus target projection system of (a) classical structure and (b) the proposed one

近红外波段下投影目标位于照明光阑后 3 mm 的位置。可见光拍照时提高了眼底照明的均匀性,且调焦投影光路不再需要专设照明组件。

和体积上具有优势。图 6 中为这种新型眼底相机的光学结构设计结果,光学软件 LightTools 的建模结构不仅可以方便准确地得到眼底照明分布情况,而且可以清晰地表示各个位置的共轭关系。

4 设计结果和像质评价

通过比较分析,新型眼底成像光学系统在结构

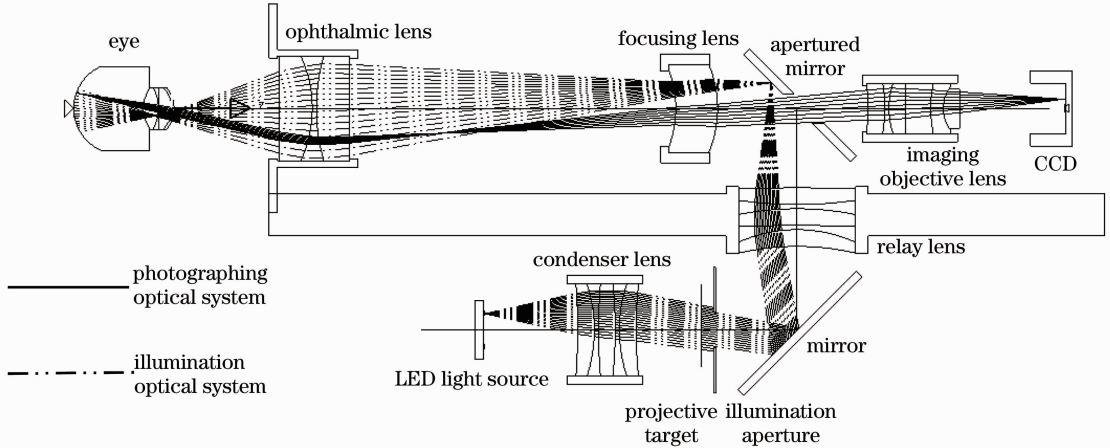


图 6 新型眼底相机光学系统

Fig. 6 Optical system of the new fundus camera

4.1 成像光路

为了保证眼底成像的普适性,成像质量的评价以屈光正常眼为主,兼顾非正常眼^[14]。设计要求分辨率达到 45 line/mm,即眼底分辨 11 μm 的结构单

元。眼底成像系统放大倍率为 0.6,所以像面要求 75 line/mm 的分辨率。图 7(a)和(b)分别为正常人眼在可见光波段和近红外波段的光学传递函数曲线。调焦过程中系统的场曲和畸变变化很小,

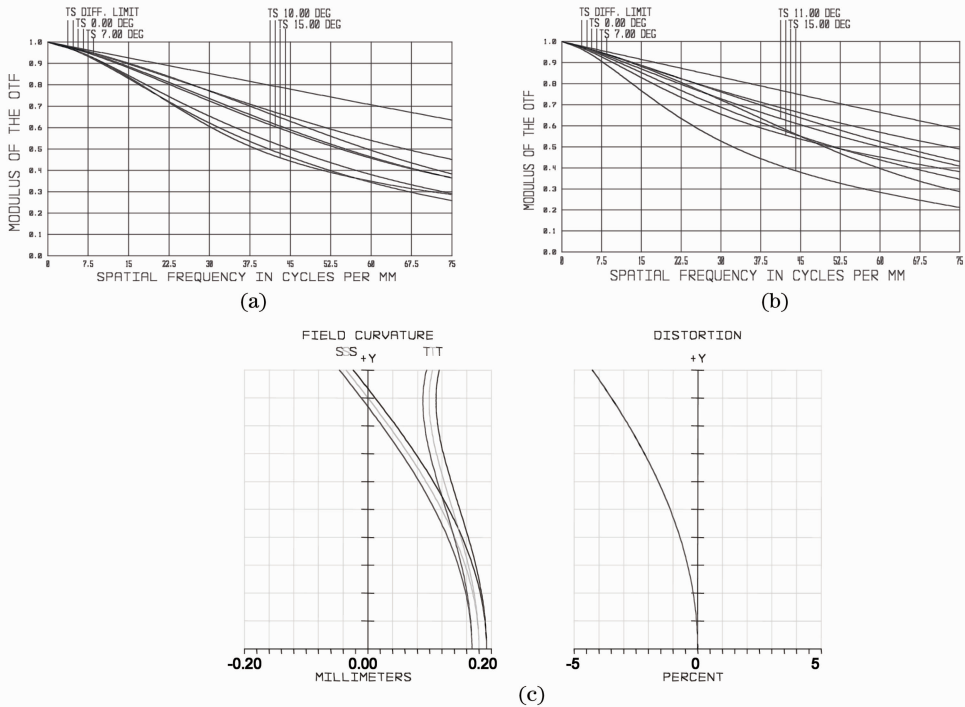


图 7 正常人眼成像光学特性曲线。(a)可见光波段 MTF 曲线;(b)近红外波段 MTF 曲线;(c)场曲和畸变曲线
Fig. 7 Imaging optical characteristic curves of normal eye. (a) MTF curves at visible wavelength; (b) MTF curves at infrared wavelength; (c) field curvature and distortion curves

图 7(c) 代表性地列出了可见光下正常人眼成像系统的畸变和场曲曲线, 畸变保持在 5% 之内, 场曲小于 0.2 mm。图 8 为可见和近红外波段下光焦度补偿情况, 横坐标为 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +5 \text{ m}^{-1}$ 光焦度补偿

范围, 纵坐标为平均调制传递函数(MTF)的变化曲线, 其中不同类型的曲线分别代表不同视场的平均 MTF。非正常眼成像的 MTF 虽然有所下降, 但除少数边缘视场外, 对比度基本都集中于 0.25 以上。

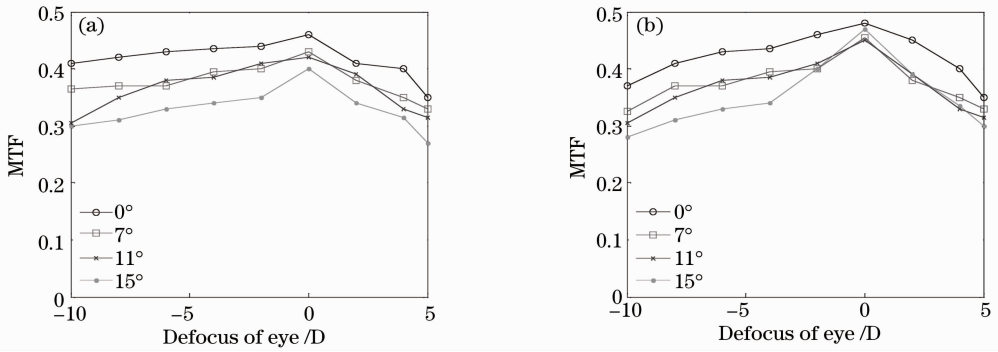


图 8 光焦度补偿。(a)可见光波段;(b)近红外波段

Fig. 8 Defocus accommodations. (a) Visible wavelength; (b) near-infrared wavelength

4.2 照明光路

图 9(a) 为 LightTools 软件的光线追迹结果, 局部放大图清晰地给出眼模型处光线分布, 在整个调焦过程中角膜反射光均不会进入成像光路而影响眼底成像质量^[15]。图 9(b) 给出了瞳孔处的能量分布情况,

可以看出瞳孔处环形光斑边缘清晰, 并且调焦过程中环形光斑内外直径均在 3.4~5.7 mm 范围内, 满足免散瞳照相 6 mm 瞳孔大小的要求。图 9(c) 给出了眼底的能量分布曲线, 非均匀性小于 15%。

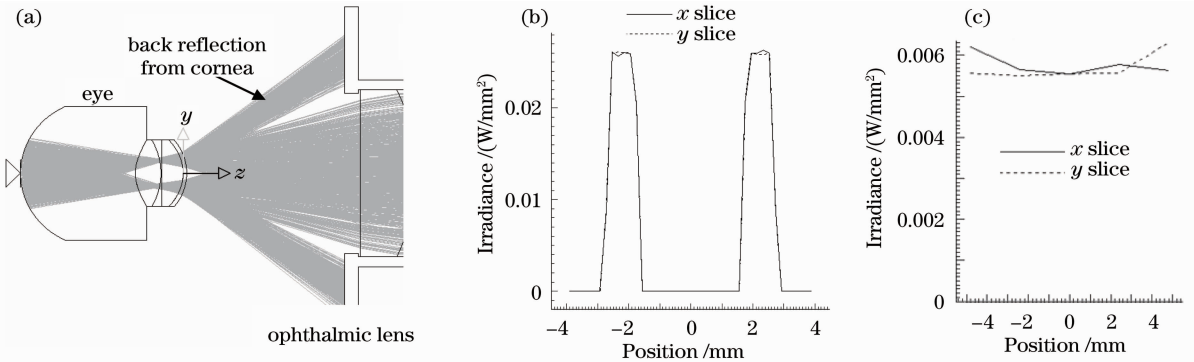


图 9 照明系统最终评价。(a)光线追迹;(b)眼瞳处照明分布;(c)眼底照明分布

Fig. 9 Final evaluation of illumination system. (a) Ray trace; (b) illumination distribution at the pupil of eye; (c) illumination distribution at the retina

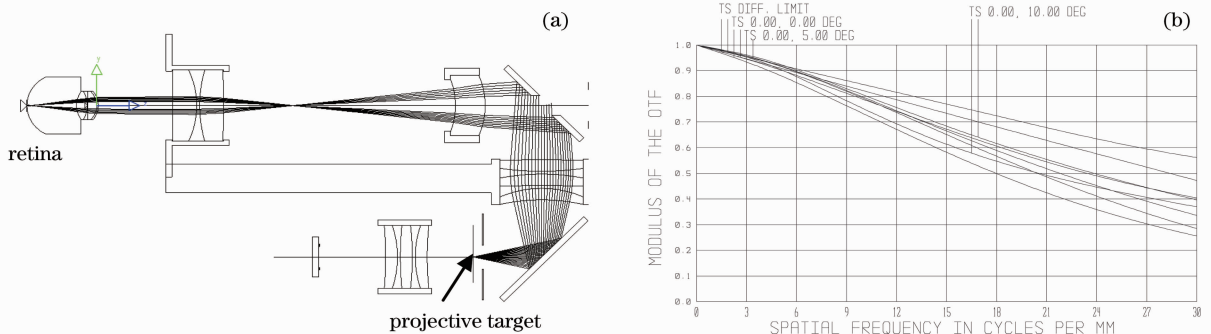


图 10 调焦投影系统最终评价。(a)光线追迹;(b)MTF 曲线

Fig. 10 Final evaluation of focus target projection system. (a) Ray trace; (b) MTF curves

4.3 调焦投影光路

图 10 为 LightTools 软件的追迹结果清晰表达出投影目标和眼底的共轭关系。眼底分辨率要求 45 line/mm, 投影光路的放大倍率约为 0.65, 所以投影目标分辨率要求为 30 line/mm^[16]。本设计中选用暗背景分辨率板作为投影目标, 具有 3 组分别为 10、20、30 line/mm 的刻线, 瞄准过程中可以通过观察投影目标的分辨率来迅速确定调焦位置。图 10(b) 代表性地给出了 Zemax 软件正常眼结构投影光路的 MTF 曲线, 在分辨率 30 line/mm 处调制度在 0.2 以上。

5 结 论

采用一种新型光学结构, 设计了一款视场为 30°、工作距离为 30 mm 的眼底相机光学系统, 可分辨视网膜 11 μm 以上的微小结构, 眼光焦度补偿范围 -10 m⁻¹ ~ +5 m⁻¹, 满足眼底成像光学系统的要求。相比传统眼底相机结构, 调焦镜由成像物镜移至网膜物镜系统, 系统结构更加简单、紧凑。系统的调焦充分利用了网膜物镜系统的空间, 成像物镜变短。系统的成像光路和调焦投影光路共用一个调焦镜, 调焦投影光路完全嵌入到照明光路中。调焦投影光路不再需要专设照明组件, 避免了投影目标和调焦镜之间的机械联动结构以及二者相对位置的标定。由于 LED 光源窄带宽的优势, 瞄准和拍照过程共用一个 CCD 相机, 进一步简化了整个系统的结构。

参 考 文 献

- 1 Li Chun, Sun Qiang, Liu Ying *et al.*. Design of uniform illumination system of fundus camera and its stray light shield [J]. *Chinese J. Optics & Applied Optics*, 2010, **3**(4): 363~368
李 淳, 孙 强, 刘 英等. 眼底相机的均匀照明及消杂光干扰设计[J]. *中国光学*, 2010, **3**(4): 363~368
- 2 Wang Zhaoqi, Xu Yan. Design of digital retina camera based on eye model [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(9): 1567~1571
王肇圻, 许 妍. 基于眼模型的数字眼底相机设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1567~1571

- 3 Wang Zhaoqi, Wang Yao, Quan Wei. Design of aspheric FFA camera based on eye model[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(7): 1511~1519
王肇圻, 王 尧, 全 薇. 基于眼模型的非球面眼底荧光相机的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(7): 1511~1519
- 4 E. DeHoog, J. Schwiegerling. Optimal parameters for retinal illumination and imaging in fundus cameras [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(36): 6769~6777
- 5 N. Ickawa, M. Isikawa. Fundus Camera [P]. USA, 2009/0180073 A1. 2009-07-16
- 6 Manabu Wada, Shigeaki Ono, Tanaka. Fundus Camera [P]. USA, 2010/0214535 A1. 2010-08-26
- 7 N. Shibata, M. Torii. Fundus Camera [P]. USA, 6654553, 2003-08-01
- 8 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 29~71
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 29~71
- 9 Wang Yang, Wang Zhaoqi, Liu Min *et al.*. Study on wavefront aberrations of human eyes at wide field of view based on individual eye model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1727~1733
王 杨, 王肇圻, 刘 铭等. 基于个性化人眼模型的大视场波像差特性的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1727~1733
- 10 Wang Yao, Wang Zhaoqi, Zhang Mei. Design of a portable FFA camera based on the eye model [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 855~859
王 尧, 王肇圻, 张 梅. 基于眼模型的便携式眼底荧光相机的设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 503~511
- 11 Ling Nin, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. A small adaptive optical imaging system for cells of living human retina [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1153~1158
凌 宁, 张雨东, 饶学军等. 用于活体人眼视网膜观察的自适应光学成像系统[J]. *光子学报*, 2004, **24**(9): 1153~1158
- 12 Zhang Yunhai, Zhao Gaina, Zhang Zhonghua *et al.*. Accurate focusing of non-mydiatic fundus camera [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2009, **17**(5): 1014~1019
张运海, 赵改娜, 张中华等. 免散瞳眼底照相机的精密调焦[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1014~1019
- 13 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
陆 强, 季轶群, 沈为民. 大相对口径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 14 Edward DeHoog, James Schwiegerling. Fundus camera systems: a comparative analysis [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(2): 221~228
- 15 Cui Guihua. Control of ghost and scatter light internal camera [J]. *Opt. Technique*, 2000, **26**(2): 139~141
崔桂华. 眼底照相机光学系统中杂光和鬼像的控制[J]. *光电技术*, 2000, **26**(2): 139~141
- 16 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Optical assessment of a projection lens design for head-mounted projective displays in visual space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 730~735
赵顺龙, 王肇圻. 投影式头盔物镜设计在视空间的性能评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 730~735

栏目编辑: 韩 峰