

文章编号 1004-924X(2012)08-1710-08

折反式眼底相机光学系统设计

李 灿^{1,2*}, 宋淑梅¹, 刘 英¹, 李 淳¹, 李小虎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 130039)

摘要:为控制传统眼底相机的杂光和鬼像,设计了一款40°视场、48 mm工作距离的折反式眼底相机光学系统。设计了离轴反射式网膜物镜,引入了自由曲面以校正其离轴像差,成像物镜中采用两个自由曲面对网膜物镜的剩余像差进行校正。建立了一种离焦眼模型,用于优化成像光路,消除人眼像差对成像的影响,同时得到不同视度缺陷眼的成像光路。照明光路中使用3个相邻的环形光阑,减少了眼球光学系统反射的杂光。成像光学系统可在 $-10\sim+10\text{ m}^{-1}$ 调焦,物方各视场分辨率为33 lp/mm,系统畸变小于8.5%;照明光学系统在不产生鬼像的前提下,可均匀照明眼底,照度非均匀性在15%以内。实验表明,引入自由曲面的折反式眼底相机,有效地消除了杂光和鬼像,满足大视场和大工作距离的要求。

关键词:眼底相机;网膜物镜;离轴反射系统;自由曲面;光学设计

中图分类号:TH773 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1710

Design of optical system for catadioptric fundus camera

LI Can^{1,2*}, SONG Shu-mei¹, LIU Ying¹, LI Chun¹, LI Xiao-hu¹, SUN Qiang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 130039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: LC19851125@163.com*

Abstract: To eliminate the scatter light and central ghost in a classical fundus camera, the optical system of a catadioptric fundus camera with a field of view 40° and a working distance of 48 mm was designed. An off-axial reflecting ophthalmic lens with free form surfaces was designed to correct the off-axial aberrations. Two free-form-surfaces were introduced in the imaging objective system to correct the residual off-axial aberrations of the reflective ophthalmic lens. In the optimization of the imaging system, an eye model with varying defocuses was proposed to eliminate the negative effect of eye aberrations as well as to accommodate the eye with different refractive errors. Three adjacent illumination rings were introduced in the illumination part to avoid the undesirable light reflected by the eye optical system. Experiments show that the accommodation range of the system is between -10 m^{-1} and 10 m^{-1} , the resolution at the object plane is 33 lp/mm across the entire field of view, and the maximum

收稿日期:2012-02-29;修订日期:2012-03-14.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z110);国家自然科学基金资助项目(No. 60977001)

distortion is less than 8.5%. Furthermore, the illumination non-uniformity is less than 15% in the conditions without scatter light and central ghost. The designed catadioptric fundus camera with a free-form-surfaces show a satisfactory large field of view and a large working distance, and removes the undesirable scatter light and central ghost greatly.

Key words: fundus camera; ophthalmic lens; oblique reflector system; free-form-surface; optical design

1 引言

眼底相机是一种传统的医疗设备,用于观测、记录人眼视网膜图像。视网膜上分布的大量毛细血管,是人体内唯一能直接观测到的毛细血管,根据这些毛细血管的纹理特征可以进行身份识别。另外,由于早期高血压、糖尿病等全身多种疾病会引起这些微血管形态的变化,因此眼底相机可用于此类疾病的早期诊断,目前已经成为现代医疗诊断的重要组成部分^[1]。

1925年,世界上第一台眼底照相机由德国CARL ZEISS公司试制成功。在过去的80多年里,日本、美国、德国等国家的许多公司对眼底相机的设计进行了大量的改进。比较著名的眼底相机的厂家有CANON、TOPCON、NIKON、OLYMPUS、OPTON、VISUAL PATH等。眼底相机的杂光和鬼像是影响其成像质量的主要因素,我国眼底相机起步较晚,发展较慢,其中一个重要的原因就是受困于眼底相机的杂光问题。

杂光主要源于眼球光学系统和眼底相机网膜物镜对照明光的反射,其他部分的杂散光在设计中不予考虑^[2]。视网膜被照明后反射回来的信息非常弱,尤其是视网膜中间部分的视盘,在520 nm反射率不足0.5%。而晶状体、虹膜和角膜反射光均强于视网膜反射光,其中角膜反射光更是高达2%^[3]。通常,角膜反射光用瞳孔分离的方法来消除,即采用环形照明。环形光源被成像在角膜附近的瞳孔处,从而减少了进入成像光路的角膜反射光^[4]。

由于照明光路和成像光路共用网膜物镜整个孔径,网膜物镜的反射是透射式眼底相机杂光的另一个来源。受限于当今的镀膜工艺水平,宽波段增透膜单面只能达到99%,按3个面计算,反射率达到3%。传统的解决办法是在照明光路中使用挡板即黑点板,将有可能进入成像光路孔径光阑的反射光消除掉。然而黑点板会在眼底图像

的中央部分产生阴影,影响照片的质量^[2]。另外,黑点板位置对杂光的控制非常敏感,因此黑点板的引入也给相机的装调带来难度。为克服透射式网膜物镜所带来的杂光和鬼像问题,目前已经出现了若干反射式结构的网膜物镜设计,然而这些系统均不能提供大视场。佳能公司专利US658 5374B2采用由一个反射镜组成的网膜物镜^[5],该相机的视场不足20°;蔡司公司设计了40°视场的反射式眼底相机,然而满足成像质量要求的相机视场只有28°^[6]。

针对以上的问题,本文构建了反射式自由曲面网膜物镜,设计了一款折反式眼底相机,解决了透射式网膜物镜的杂光问题,同时具有大视场。为了校正反射式网膜物镜的剩余离轴像差,特别是边缘视场像差,在成像镜组中引入2个自由曲面,从而在40°视场区域都满足成像要求。引入一个离焦眼模型,在成像系统的优化中既可补偿人眼像差,又能适配不同视度缺陷的人眼。照明光路中采用3个相邻的环形照明光阑,进一步降低了眼球光学结构带来的杂光。

2 折反式眼底相机的系统设计

2.1 折反式眼底相机的总体结构

眼底相机的基本结构包括成像系统和照明系统两部分,如图1所示。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。考虑到照明的均匀性和杂光的控制,本文采用共轴式照明^[7]。一个环形光源成像到中空反射镜,再经反射式网膜物镜进一步成像到人眼瞳孔处,均匀地照明视网膜。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。成像系统由反射式网膜物镜和成像物镜组成,中空反射镜为孔径光阑,成像镜组中引入2个自由曲面来校正网膜物镜剩余的离轴像差,系统优化时引入离焦眼模型和多重结构。

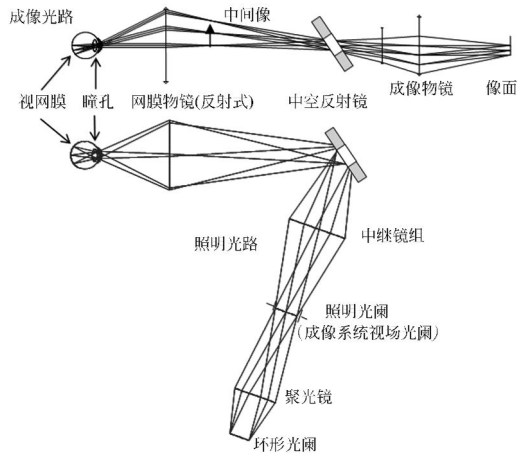


图 1 眼底相机的光学结构

Fig. 1 Optical scheme of fundus camera

2.2 设计指标

最小拍摄瞳孔直径: 4 mm;

设计波长: 486~656 nm;

全视场: 40°眼底;

工作距离: 48 mm;

接收器: 600 万像素, 3.4 cm (4/3 inch) CCD;

屈光不正眼补偿: $-10 \sim 10 \text{ m}^{-1}$;

照明: 观察用卤素光灯、拍照用氙灯;

物方分辨率: 屈光正常眼 45 lp/mm 以上, 即分辨眼底 11 μm 的结构单元; 屈光不正眼 33 lp/mm 以上, 即分辨眼底 15 μm 的结构单元。

2.3 网膜物镜的设计

本文以目前广泛应用于空间遥感领域的大视场、无遮拦、离轴反射式光学系统作为网膜物镜的基本结构。尽管倾斜、离轴光学系统会给装配带来困难, 但它利于大视场光学系统的设计。网膜物镜由两个反射镜组成, 光束入射到倾斜反射面, 除了有旋转对称像差如像散外, 还会引入倾斜像差如彗差和非对称畸变。仅用旋转对称的面型无法很好地校正像差, 需要构建一个倾斜离轴的、自由度扩展为自由曲面的反射式物镜组^[8-10]。

ZEMAX 中扩展多项式自由曲面 (Extended Polynomial) 的描述方程为:

$$Z = \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i E_i(x, y), \quad (1)$$

其中: C 为曲面曲率, k 为二次曲面系数, A_i 为第 i 项扩展多项式系数。扩展多项式可提供更多的自由度来优化系统, 但是在面形优化过程中可能

会导致不合理的形状, 因此需要一个满意的初始结构。设计中以两个球面反射镜为起点, 球面组成的倾斜系统的主要像差是像散, 本文引入超环面来校正像散, 并且两个离轴球面反射镜光焦度的异号也有助于校正像散和彗差。通过合理分配光焦度来保证系统要求的放大率, 控制几何边界条件, 合理布置反射镜的离轴倾斜以保证小的入射角度, 最终得到一个可满足基本要求的初始结构。而后在超环面基底上进行自由曲面优化, 自由曲面子午和弧矢二方向的曲率半径不同, 这样可在两个不同方向上相对独立地校正像差。设计的网膜物镜如图 2 所示, 结果表明, 自由曲面的主镜和次镜可以较好地校正离轴像差, 能够满足工作距离、放大率和结构尺寸的要求。

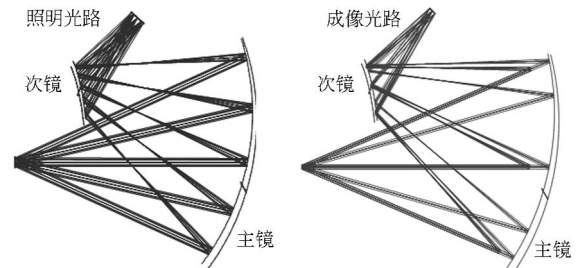


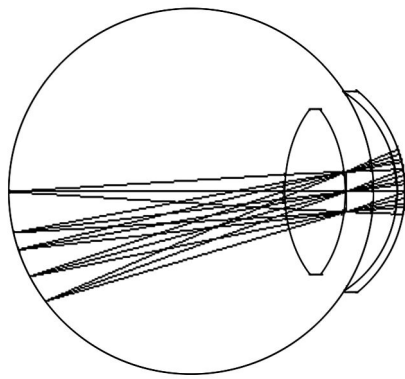
图 2 反射式网膜物镜

Fig. 2 Optical setup of reflecting ophthalmic group

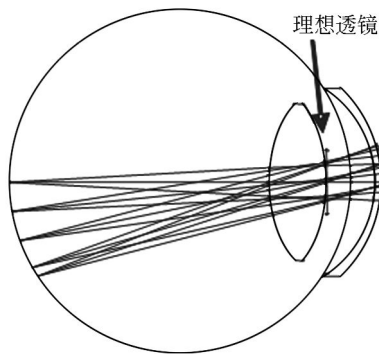
2.4 成像系统设计

眼底相机需要在瞳孔直径 4~6 mm 时进行照明和拍摄眼底图像, 在这个条件下人眼光学结构自身的像差必然对眼底成像产生影响。为了模拟眼底相机使用的真实环境, 在设计中引入了 Gullstrand-Le Grand 普适眼模型, 如图 3(a), 以实现对人眼像差与系统像差的综合校正^[11-13]。为了保证屈光不正人眼的清晰成像, 需在成像光路中引入内调焦系统。在 Gullstrand-Le Grand 眼模型的瞳孔处设置一个理想透镜, 构成如图 3(b) 所示的离焦眼模型以模拟不同屈光度人眼。理想透镜焦距和眼模型焦距之间的关系曲线如图 4 所示。

在所设计网膜物镜的基础上, 成像系统添加了成像物镜和离焦眼模型。为满足后工作距离的要求, 选用一个 5 片镜的反远距系统作为成像镜组的初始结构, 一个弱光焦度负镜作为调焦镜实现眼屈光不正的补偿, 后面的正组结构校正人眼像差和网膜物镜的剩余像差。反射式网膜物镜给



(a)Gullstrand-Le Grand 眼模型
(a) Gullstrand-Le Grand eye model



(b)离焦眼模型
(b) Defocused eye model

图 3 离焦眼模型的结构

Fig. 3 Configuration of defocused eye models

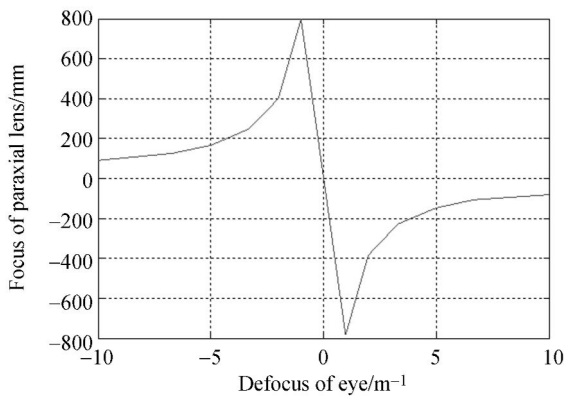


图 4 离焦眼模型数据

Fig. 4 Data of defocused eye model

成像光路带来一定的离轴像差,特别是像散、彗差、畸变,需要在成像镜组中引入两个自由曲面(Extended Polynominal)进行像差的校正,如图 5 所示。此外,眼底相机的大视场决定了垂轴色差

较大,因此采用一个双胶合透镜进行色差的校正,最终得到了满意的折反式眼底成像系统。

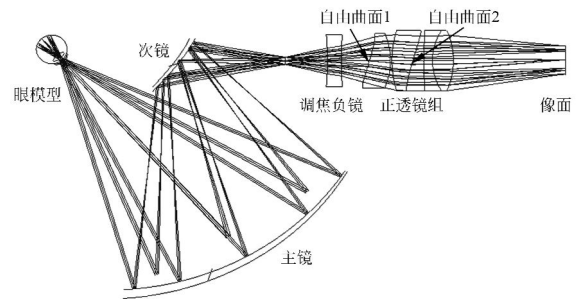


图 5 成像光路

Fig. 5 Observation path

2.5 照明系统设计

照明光路中,中空反射镜处的环形光斑通过网膜物镜在眼瞳处成一个相似的环形像,进而照明眼底。网膜物镜只要保证清晰、无变形的环形光斑成像,即可使照明光路和成像光路在瞳孔处充分分开。在环形光阑与中空反射镜之间的成像,考虑到其对称性,选择视场较小、相对孔径较大的一个双高斯结构。为保证照明光阑作为成像系统的视场光阑,设计采用反向光线追迹,以眼底为物方,照明光阑为像方。然后,保持照明光阑之前的光路不变,以环形光阑 b 为物方,人眼瞳孔为像方,最终完成照明光路的设计,如图 6 所示。

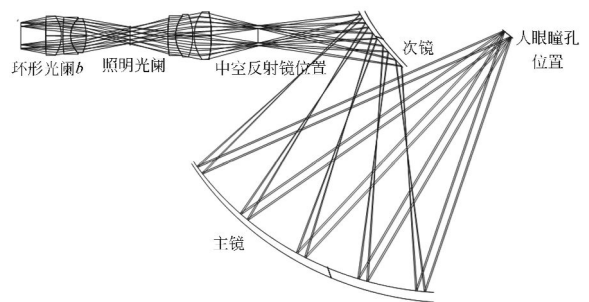
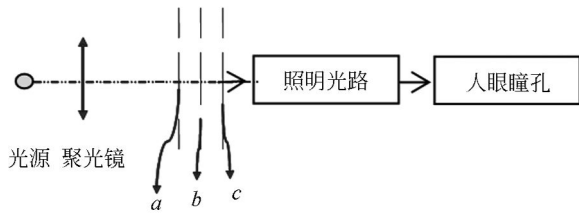


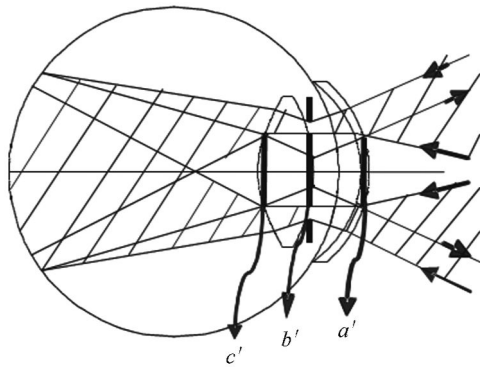
图 6 照明光路

Fig. 6 Illumination path

为了更好地消除人眼光学结构带来的杂光,照明光路设计中采用了 3 个相邻的环形光阑^[14],如图 7(a)所示。 b 光阑和瞳孔共轭, a 光阑和角膜共轭, c 光阑和晶状体后表面共轭,如图 7(b)所示。控制 3 个光阑的大小,可使成像光路和照明光路在眼光学结构各表面处均能很好地分开。



(a) 照明环形光阑
(a) Illumination ring stop



(b) 光阑的共轭面
(b) Conjugate surface of stops

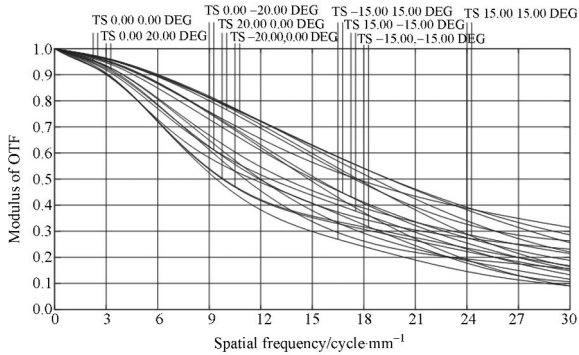
图 7 光阑的共轭关系

Fig. 7 Conjugate relationship of stops

3 设计结果

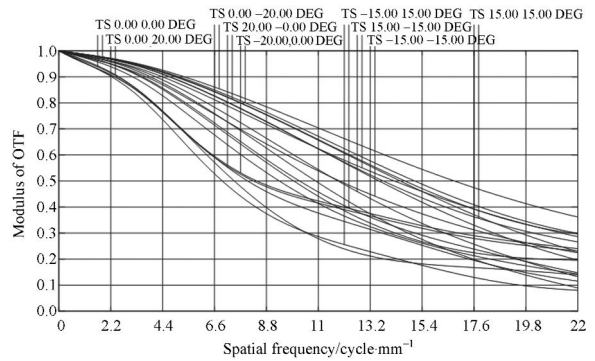
3.1 成像系统

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^[15]。设计要求正常眼成像分辨率达到 45 lp/mm,即眼底分辨 11 μm 的结构单元。眼底成像系统放大倍率为 1.5,所以像面要求 30 lp/mm 的分辨率。同理,非正常眼像面要求 22 lp/mm 的分辨率。图 8 给



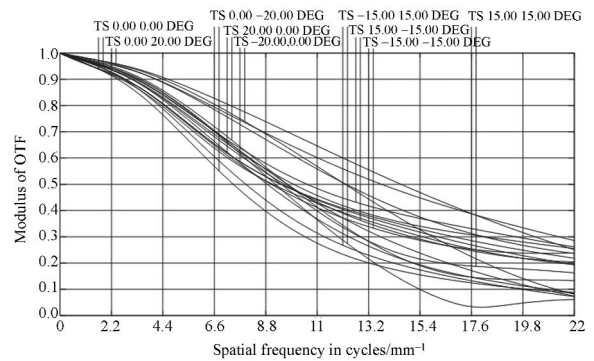
(a) 0 m⁻¹人眼成像的 MTF 曲线图

(a) Curves of MTF of observation system @0 m⁻¹



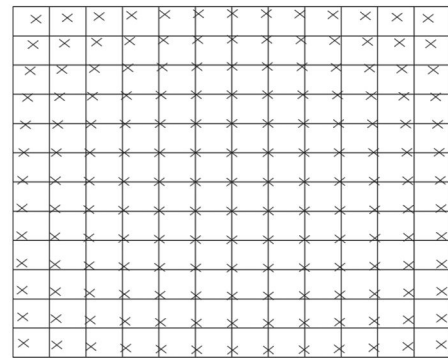
(b) -10 m⁻¹人眼成像的 MTF 曲线图

(b) Curves of MTF of observation system @-10 m⁻¹



(c) 10 m⁻¹人眼成像的 MTF 曲线图

(c) Curves of MTF of observation system @10 m⁻¹



(d) 网格畸变图

(d) Grid distortion

图 8 成像系统像质评价

Fig. 8 Evaluation of observation system

出了成像系统的主要光学特性曲线。图 8(a)为正常人眼成像的 MTF 曲线,可以看出,在 30 lp/mm 处 0 视场 MTF 值达到 0.3,边缘视场也均能在 0.1 以上,可分辨眼底 11 μm 的微小结构。图 8(b)和(c)分别是视度为 -10 m⁻¹和 +10 m⁻¹人眼成像的 MTF 曲线,可以看出,在 22 lp/mm 处,

0 视场 MTF 值达到 0.3,边缘视场也均能在 0.1 左右,可分辨眼底 $15\ \mu\text{m}$ 的微小结构。图 8(d) 代表性地列出了正常人眼成像的网格畸变,为桶形畸变,其值小于 8.5%。

3.2 照明系统设计

图 9 为照明光路的照度分析光路图,可以得到瞳孔处和眼底的照度分布情况,并且从局部放大图中可以清晰地看到,3 个环形光阑 a, b, c 分别阻拦了眼睛角膜、晶状体前表面和晶状体后表面的中央部分杂散光,从而可以避免其中间反射光在成像光路中形成鬼像。

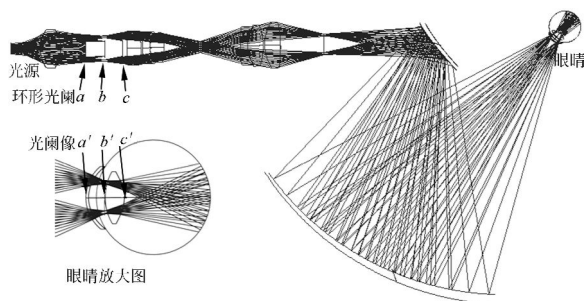


图 9 眼底照度分析光路图

Fig. 9 Optical path of illumination analysis at retina

图 10、11 给出了光源经照明光路在人眼瞳孔处形成的环形像的相对照度分布,其中图 10(a) 给出了相对照度分布,图 10(a~d) 分别为 $+y, -y, +x, -x$ 4 个方向的像面相对照度曲线。可以看出,在环形像内径 $\Phi 3.6\ \text{mm}$ 处边缘非常锐利,瞳孔处成像光路和照明光路可有效地分开,避免了角膜反射光进入成像光路。图 12 给出了光源经照明光路在人眼视网膜上的相对照度分布,由图可知视网膜照度分布的非均匀性在 15% 以内,是完全可以接受的。

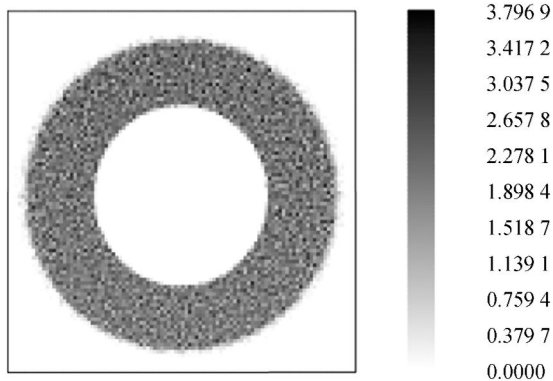
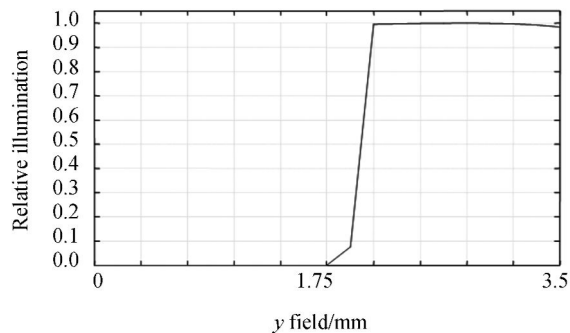


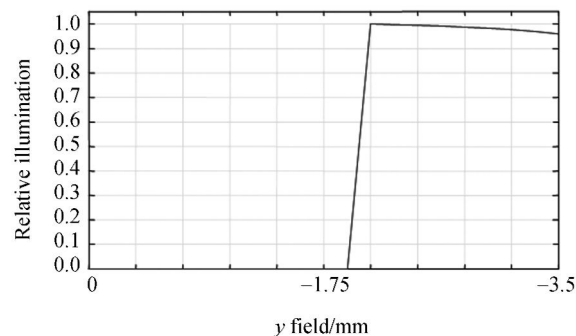
图 10 相对照度分布图

Fig. 10 Distribution of relative illumination



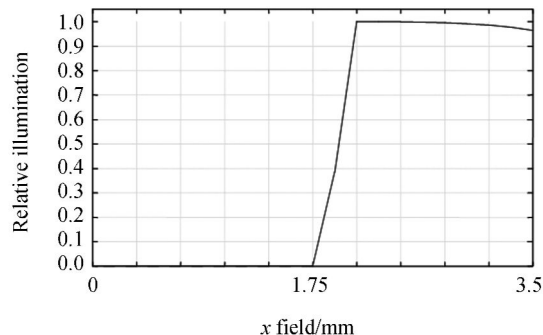
(a) y 方向

(a) y field



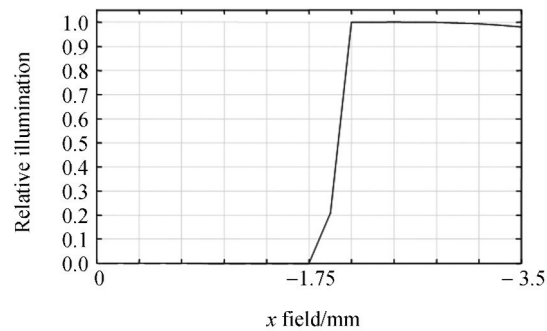
(b) $-y$ 方向

(b) $-y$ field



(c) x 方向

(c) x field

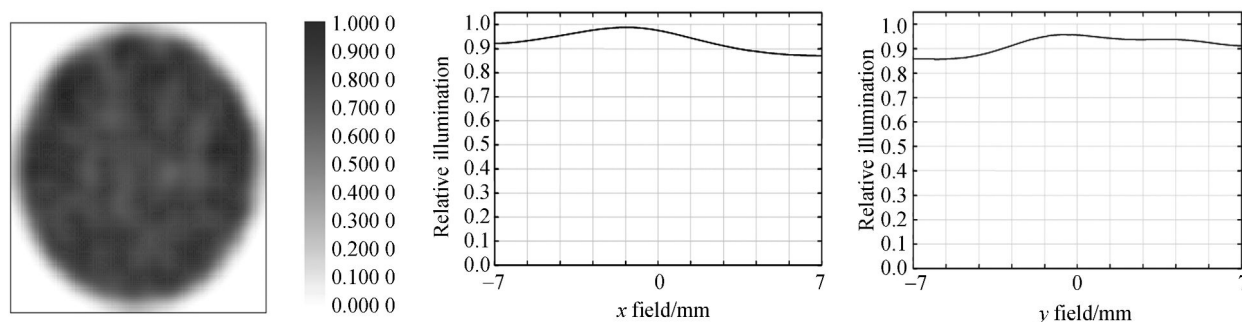


(d) $-x$ 方向

(d) $-x$ field

图 11 瞳孔相对照度曲线

Fig. 11 Curves of relative illumination distribution at pupil



(a)眼底相对照度分布图 (b)眼底 x -scan 相对照度分布曲线 (c)眼底 y -scan 相对照度分布曲线
 (a) Illumination distribution at retina (b) x -scan relative illumination distribution at retina (c) y -scan relative illumination distribution at retina

图 12 眼底相对照度分布

Fig. 12 Relative illumination distribution at retina

4 结 论

本文采用离轴反射式自由曲面网膜物镜,设计出一款 40° 视场、工作距离为 48 mm 的折反式眼底相机的光学系统,实现了眼底大视场清晰成像,可分辨视网膜 $15\ \mu\text{m}$ 以上的微小结构。反射式网膜物镜消除了一般折射式网膜物镜带来的杂光,使系统不再存在中心遮拦和鬼像。然而,离轴反射式系统不可避免地引入离轴像差,在成像镜

组中引入两个自由曲面进行剩余离轴像差的校正,取得了很好的效果。设计构建了一个离焦眼模型,可实现不同视度缺陷眼成像光路的优化,同时消除了人眼像差对系统成像的影响。照明系统的设计采用一组环形光阑,使得照明光束和成像光束在眼球光学结构的各界面处充分分开,大大减少了眼睛自身带来的杂光反射。所设计的离轴反射式自由曲面物镜具有无色差的特点,因此在宽波段系统的设计中优势更加明显。

参考文献:

- apparatus: USA, 6585374B2[P]. 2003-7-1.
- [6] BUCHHEISTER J, MUELLER L. Reflex free double pass objective due to reflective free form surfaces[J]. SPIE, 2008, 7100 (7100N-1): 1-10.
- [7] SHIBATA N, TORII M. Fundus camera: USA, 6654553[P]. 2003-8-1.
- [8] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(3): 508-514.
JIANG Y, SUN Q, GU L SH, et al. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces [J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(3): 508-514. (in Chinese)
- [9] 赵清亮, 郭兵, 杨辉, 等. 金刚石飞切加工微结构表面的表面粗糙度研究[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(10): 2512-2519.
ZHAO Q L, GUO B, YANG H, et al. Surfaces roughness study in diamond fly-cutting of microstructured surface[J]. Opt. Precision Eng., 2009, 17(10): 2512-2519. (in Chinese)
- [5] KAZUHIRO M, UTSUNOMIYA. Ophthalmologic apparatus: USA, 6585374B2[P]. 2003-7-1.
- [1] 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.
LI C, SUN Q, LIU Y, et al. Design of uniform illumination system of fundus camera and its stray light shield [J]. Chinese Optics, 2010, 3(4): 363-368. (in Chinese)
- [2] 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, 2006, 26(2): 139-141.
CUI G H. Control of ghost and scatter light internal camera [J]. Opt. Technique, 2006, (26): 139-141. (in Chinese)
- [3] DELORI F C, PFLIBSEN K P. Spectral reflectance of the human ocular fundus[J]. Applied Optics, 1989, 28(6): 1065-1077.
- [4] DEHOG E, SCHWIEGERLING J. Optimal parameters for retinal illumination and imaging in fundus cameras [J]. Applied Optics, 2008, 47(36): 6769-6777.
- [10] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社,

- 2008.
- ZHANG Y M. *Applied Optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
- [11] 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.
- WANG ZH Q, WANG Y, QUAN W. Design of aspheric FFA camera based on eye model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(7):1511-1519. (in Chinese)
- [12] 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.
- WANG ZH Q, XU Y. Design of digital retina camera based on eye model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(9):1567-1571. (in Chinese)
- [13] MOUROULIS P. *Visual Instrumentation*[M]. New York: McGraw-Hill, 1999: 106-110, 277-280.
- [14] NAOKI I, MAKIHIRO I. Fundus Camera: USA, 2009/0180073A1[P]. 2009-7-16.
- [15] DEHOOG E, SCHWIEGERLING J. Fundus camera systems: a comparative analysis[J]. *Applied Optics*, 2009,48(2):221-228.

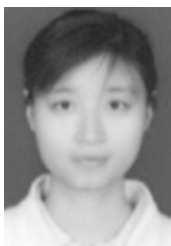
作者简介:



李 灿(1985—),男,山东济宁人,博士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail:LC19851125@163.com



宋淑梅(1963—),女,吉林人,研究员,硕士生导师,主要从事大口径非球面先进加工与检测技术方面的研究。E-mail:smsong@ciomp.ac.cn



刘 英(1980—),女,山东滨州人,博士,助理研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail:liuy613@163.com



李 淳(1982—),男,山东烟台人,硕士,助理研究员,2005年于山东大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学设计、图像处理等方面的研究。E-mail:xlfd-0830@163.com



李小虎(1986—),男,安徽六安人,硕士,实习研究员,2010年于浙江大学获得硕士学位,主要研究领域为光学系统机械结构设计。E-mail:muzixiaoji@yahoo.com.cn

导师简介:



孙 强(1971—),男,黑龙江海伦人,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所博士后出站,现为中科院中科院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心主任,主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。E-mail:sunq@ciomp.ac.cn