

# 便携式双波段荧光眼底血管造影仪的光学设计

葛婧菁

(北京空间机电研究所,北京 100190)

**摘要:**基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型设计了一款便携式双波段眼底造影仪的光学结构。考虑人眼光学系统的像差并使用共轴式照明,设计了在主波段 525 和 826 nm 下全视场 200 万像素高清晰成像的光学系统,该系统可实现吲哚菁绿血管造影和荧光眼底血管造影两种方式成像。为了避免角膜中心具有大曲率而引入杂散光,照明系统采用环形光阑、中空反射镜和共轴式照明相结合的方法。为了达到系统的便携性和成像清晰性,在摄影系统中加入两个非球面结构。实验结果表明,本系统具有较大的调节能力,对  $-10\text{ m}^{-1} \sim +8\text{ m}^{-1}$  人眼普遍适用,系统可实现  $30^\circ$  的眼底拍摄,眼底分辨率  $> 108\text{ lp/mm}$ ,畸变  $< 10\%$ ,达到了便携式双波段眼底造影仪的使用要求。

**关键词:**医疗器械;眼底造影;眼模型;非球面

**中图分类号:** TH773; R814.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130602.0223

## Optical design of portable dual-band fluorescence fundus angiography

GE Jing-jing

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

\* Corresponding author, E-mail: gejingjing977@gmail.com

**Abstract:** An optical system of portable fundus angiography in dual-bands is designed based on the Gullstrand-Le Grand eye model. By considering the human vision system and applying the coaxial illumination, the apparatus with 2 mega pixels in all fields of view is designed, which can be used in Fundus Fluorescein Angiography (FFA) and Indocyanine Green Angiography (ICGA) under the wave bands of 525 nm and 826 nm. An annular diaphragm, a hollow mirror and a coaxial illumination are adopted in the illuminating system to avoid the stray light caused by the reflection of the corneal surface. Furthermore, two aspheric surfaces are involved in order to simplify the photographic system. The result shows that with a larger accommodation, this system can adapt to human eyes from  $-10\text{ m}^{-1}$  to  $+8\text{ m}^{-1}$ . With the field of view of  $30^\circ$ , the resolution of the eyeground over  $108\text{ lp/mm}$ , and the distortion value less than  $10\%$  the system can satisfy the requirements as a portable dual-band imaging instrument.

**Key words:** medical equipment; fundus angiography; eye model; aspheric surface

收稿日期:2012-12-15;修订日期:2013-02-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978068)

## 1 引言

荧光眼底血管造影是观察视网膜和脉络膜血管形态及功能变化的一种影像技术方法。自1961年 Alvis 与 Novotny 首次成功记录下眼底视网膜以及脉络膜的整个动态循环过程以来,荧光眼底血管造影术开始广泛应用眼科的临床中。荧光眼底血管造影包括荧光素眼底血管造影(Fundus Fluorescein Angiography, FFA)和吲哚菁绿血管造影(Indocyanine Green Angiography, ICGA/ICG)两种方法<sup>[1-4]</sup>。前者用于眼底视网膜疾病的诊断和鉴别诊断,而后者主要用于脉络膜及视网膜色素上皮疾病,黄斑下新生血管膜以及某些视网膜疾病的鉴别和诊断。由于眼底血管造影主要显示视网膜血管,吲哚菁绿血管造影主要是观察视网膜后层的脉络膜,所以在医学检查过程中,多将这两种造影联合使用,以便全面了解眼底状况,并可深入探讨其发病机理<sup>[5-7]</sup>。

荧光眼底血管造影仪的基本原理是利用造影剂,即可以发出荧光的物质,如荧光素钠或吲哚菁绿,通过注射的方式,使其通过血液循环到达眼底,利用照明系统对其照射,使得造影剂被激发并发出荧光,最后通过摄影系统对整个眼底的视网膜或者其后面的脉络膜部分进行拍摄和记录。当前国际上有许多家制造荧光眼底血管造影仪的企业,例如 Canon 以及 Kwoa 等公司。但是,由于这些造影仪都是大型的台式仪器,被应用在医院的详细诊治工作,而对于一般的小型诊所和个人家庭的病情跟踪,不能达到普及的应用。

此外,以往的荧光眼底血管造影仪都是针对相机本身的摄影相机系统进行各种像差的校正,却忽略了眼睛本身造成的像差影响。但是,眼睛作为整个光学系统的一个重要部分,其工作时带来像差会直接影响造影仪的成像效果<sup>[8-12]</sup>。

本文基于 Gullstrand-Le Grand 眼模型设计了一款便携式双波段眼底造影仪的光学结构。考虑人眼光学系统的像差并使用共轴式照明,实现了在主波段 525 和 826 nm 下的全视场 200 万像素的高清晰成像,系统可实现吲哚菁绿血管造影和

荧光眼底血管造影两种方式成像。为了避免角膜中心具有大曲率而引入的杂散光,照明系统采用环形光阑、中空反射镜和共轴式照明相结合的方法。为了达到系统的便携性和成像清晰性,在摄影系统中加入两个非球面结构。结果表明:本系统具有较大的调节能力,对  $-10 \text{ m}^{-1} \sim +8 \text{ m}^{-1}$  人眼普遍适用,系统可实现  $30^\circ$  的眼底拍摄,眼底分辨率  $> 108 \text{ lp/mm}$ ,畸变  $< 10\%$ 。

## 2 眼底造影仪组成及像质评价

### 2.1 眼底荧光相机的结构

本文所设计的荧光眼底血管造影仪具有荧光素眼底血管造影和吲哚菁绿血管造影两种造影方式。它的光学系统由滤光、照明、摄影和观察瞄准4个部分组成。图1给出了所设计的荧光眼底血管造影仪的光学系统结构示意图,其中系统结构中的激发滤光片和屏障滤光片需要根据眼底血管造影方式的不同而进行更换调整。

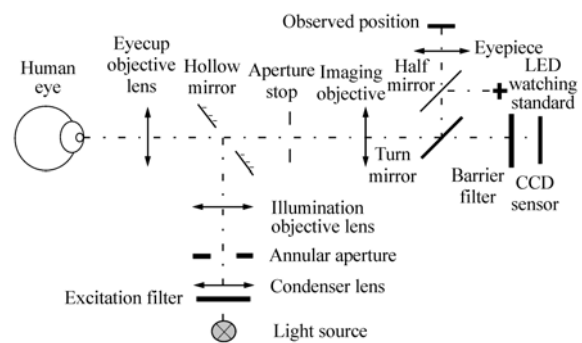


图1 荧光眼底血管造影仪的光学系统示意图

Fig. 1 Optical system diagram of fluorescence fundus angiography

### 2.2 人眼模型结构及像质评价

为了方便仪器操作同时考虑患者的舒适程度,设计时选取人眼瞳孔处于自然状态(瞳孔半径为  $2 \sim 3 \text{ mm}$ ),即在不对人眼进行散瞳处理的情况下进行荧光眼底血管造影。利用光学设计软件 ZEMAX 模拟人眼瞳孔半径在 2 和 3 mm 时的像差影响情况;通过 ZEMAX 软件构建出 Gullstrand-Le Grand 眼模型,并模拟人眼调焦,消除不必要的

像差影响,分析在造影仪的工作波段(500~580 nm和770~880 nm,其中525和826 nm为工作的主波长),瞳孔半径为2和3 mm时的像点弥散斑RMS的半径随波长和视场角的变化情况。具体曲线变化情况由图2给出。其中,图2(a)和(b)分别给出了工作波段在500~580 nm,瞳孔半径为2和3 mm时的弥散斑RMS半径随波长及视

场角的曲线变化情况。图2(c)和(d)分别给出了工作波段在770~880 nm,瞳孔半径为2和3 mm时的弥散斑RMS半径随波长及视场角的变化曲线。图中的虚线由下至上分别表示工作波段的下限波长、主波长和上限波长,实线表示复色光。

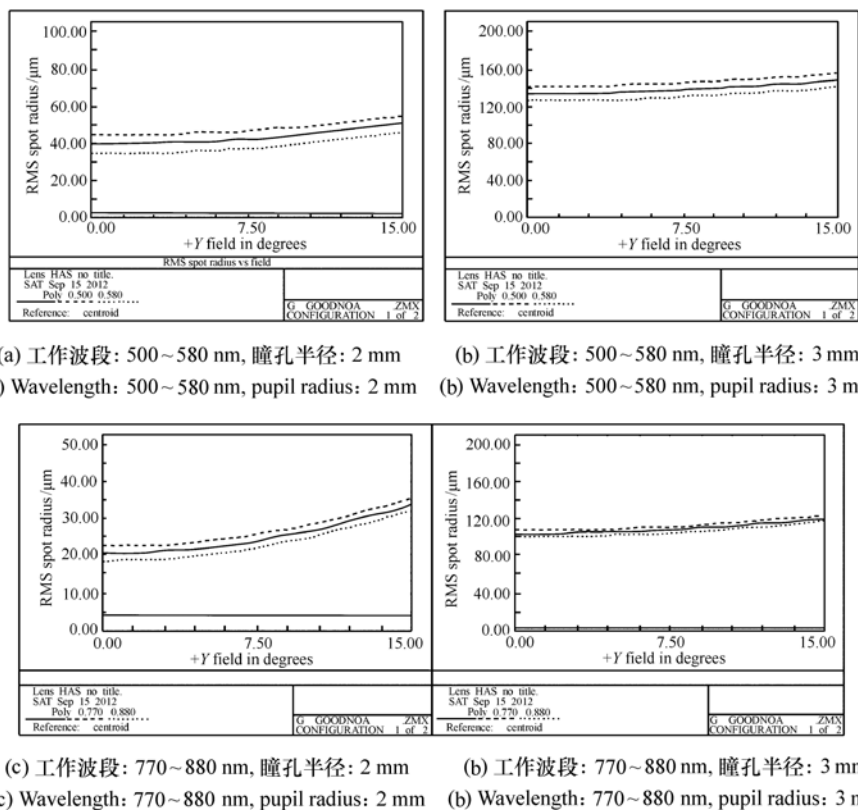


图2 不同瞳孔下的弥散斑RMS半径值随波长和视场变化特性曲线

Fig. 2 Curves of the RMS radius values with the changes of wavelengths and the fields of view under different pupils

从图中可以看出,随着波长和人眼瞳孔大小的增加,其弥散斑RMS半径值都有一定程度的增加。4幅图中的主波长和复色光的RMS半径值相差很小,尤其是图2(a)和图2(b)中的曲线非常明显,说明了由于工作波段极窄并且光谱具有一定的特殊性,所以在本系统的设计中人眼的色差造成的影响并不明显。另外,随着瞳孔半径的增大,其弥散斑RMS半径值在各个视场下均有一定程度的增加。这主要是球差带来的影响,所以

眼睛光学系统的像差对视网膜成像影响不可以忽略,在设计光学系统时需要考虑人眼像差,以提高整体系统的成像质量。

### 3 系统设计

#### 3.1 设计要求

系统设计要求见表1。

表1 系统设计要求

Tab.1 System design parameters

参量	要求
瞳孔直径	4 ~ 6 mm
像分辨率	120 lp/mm
物分辨率	100 lp/mm
系统总长	≤250 mm
视场角	30°
探测器	1.3 cm (1/2 英寸) 的 CCD
照明	医用卤光灯作为照明光源, 氙光灯 作为拍摄光源
工作波长	摄影系统需要满足波段分别在 500 ~ 580 nm 和 770 ~ 880 nm 下的清晰成像
调焦范围	系统可供 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +8 \text{ m}^{-1}$ 的 人眼使用
其他	LCD 显示器动态实时进行监测

### 3.2 滤光系统选择

滤光系统应能对所选波长起作用并使 80% 以上的荧光透过。对于荧光素眼底血管造影, 选用了 Nikon 公司的 B-2A 组合滤光片, 其中心波长分别为 490 和 577 nm, 半波宽分别为 30 和 100 nm, 相互交叉率仅为 0.1%。对于吲哚菁绿血管造影, 选用了上海兆九公司的带通滤光片组合, 其中心波长分别为 760 和 870 nm, 半波宽分别为 50 和 80 nm。两组滤光片在所选波长范围内的光谱透过率都 >80%, 且重叠区域 <1%。

### 3.3 照明系统设计

照明系统采用共轴式照明方式, 即照明系统和摄影系统同轴, 这种设计可以较好地避免因照明而引起的角膜和晶状体的反射光和系统产生的杂散光。照明系统和摄影系统共用一组接目物镜, 因此在设计的过程中, 需要将接目物镜分别放置于两个系统中加以设计考虑。为了使环形光阑在人眼瞳孔处成一个外径 6 mm, 内径为 4 mm 的环形光斑。设计过程中, 采用了光路可逆的设计理念, 对光学系统进行反向设计, 即把眼睛的入瞳作为物方, 环形光阑作为像方, 达到对系统的优化设计。由于照明系统需要在两个波段下, 即荧光素钠和吲哚菁绿的吸收波段下, 都能够正常运行, 这就需要在设计时引入多重结构, 综合考虑优化系统。

通过全局优化系统, 得到了最终的照明系统设计光路。图 3(a) 给出了反向设计的照明系统结构图, 图 3(b) 是加入人眼模型的最终照明系统结构图。

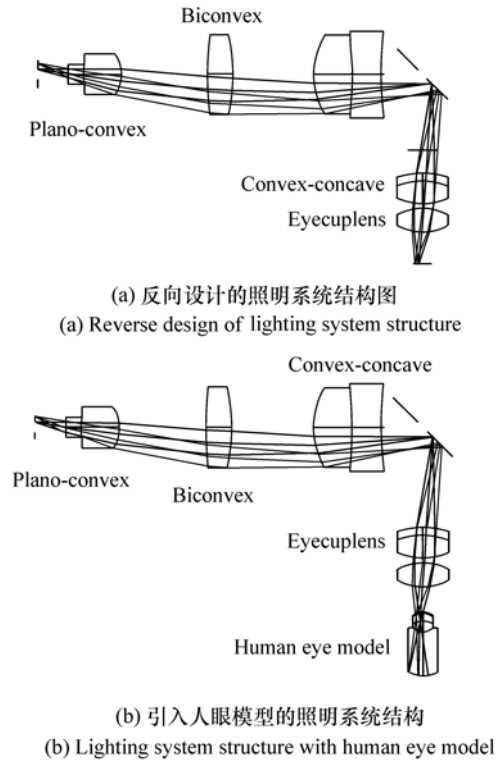


图3 照明系统结构图

Fig. 3 Structure diagrams of lighting systems

### 3.4 摄影系统

摄影系统包括接目物镜和成像物镜两个部分, 并且接目物镜与照明系统公用一组物镜。由于摄影系统和观察瞄准系统是共轭的, 摄影系统的后焦距不能很短。根据系统的需要, 选取反远距为初始设计。考虑到摄影系统同样需要在两个波段, 即荧光素钠和吲哚菁绿的激发波段下达到清晰成像, 同时系统需要对  $-10 \text{ m}^{-1} \sim +8 \text{ m}^{-1}$  的人眼进行清晰成像, 在具体优化时, 同样引入多重结构设计, 并加入了两片非球面结构来保证系统的轻便简单和清晰成像。在设计时需要同时进行两种方式眼底血管造影, 并且需要满足不同屈光状态下的正视眼、近视眼和远视眼的清晰成像, 最终得到了如图 4 所示的摄影系统结构, 图中给出了正视眼在吲哚菁绿血管造影时的摄影系统结构图, 最后一片镜是屏障滤光片。

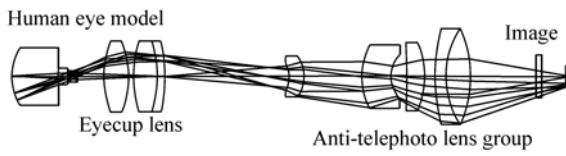


图4 正视眼的摄影系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of emmetropia photography system

### 3.5 观察瞄准系统的设计

观察瞄准系统由3片镜的接目物镜组成,其具体结构图见图5,其中出瞳直径为13 mm,出瞳距离为18 mm。照明系统将医用卤光灯作为照明光源,利用观察瞄准系统对摄影系统进行调焦。由于卤光灯的波长范围和造影剂的激发波长范围不同,需要进行补偿,从而使观察瞄准系统的接收面与摄影系统的成像面 CCD 共轭。

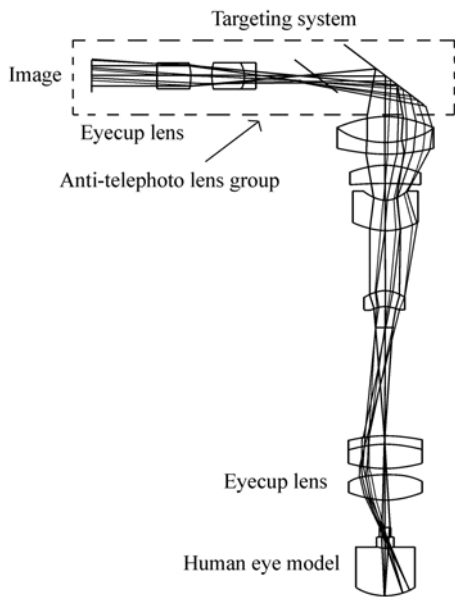


图5 观察瞄准系统的结构设计

Fig. 5 Structural design of targeting system

## 4 设计结果

摄影系统总长为176.9 mm,照明系统水平长度为62.23 mm,垂直高度为149.5 mm,整个光学系统的尺寸可以满足220 mm×60 mm×250 mm。利用软件模拟,镜头质量为168 g,再加上LCD显

示屏400 g,CCD接收器100 g,光源50 g及装配外壳500 g等重量,整个荧光眼底血管造影仪的质量不会超过1.5 kg,达到了便携式的要求。

### 4.1 照明系统分析

本系统为了实现眼底照明的均匀性,照明系统在人眼入射光瞳处形成一个内径为4 mm,外径为6 mm的环形光斑,如图6(a)所示。图6(b)给出了眼底照明光斑,该光斑覆盖了眼底直径为10 mm范围的照明区域。光斑的相对照度曲线由图7给出,其中(a)、(b)、(c)和(d)分别是在+y、-y、+x、-x轴方向的相对照度曲线图。可以看出这几个方向的相对照度曲线几乎相同,可

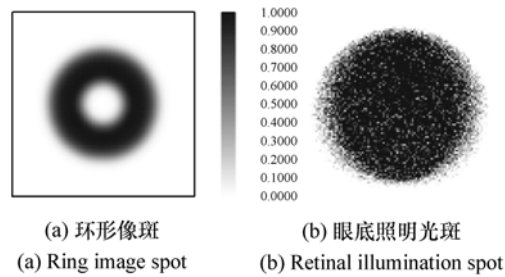


图6 人眼入瞳处的环形像斑及眼底照明光斑  
Fig. 6 Ring image spot at the entrance pupil of human eye and retinal illumination spot

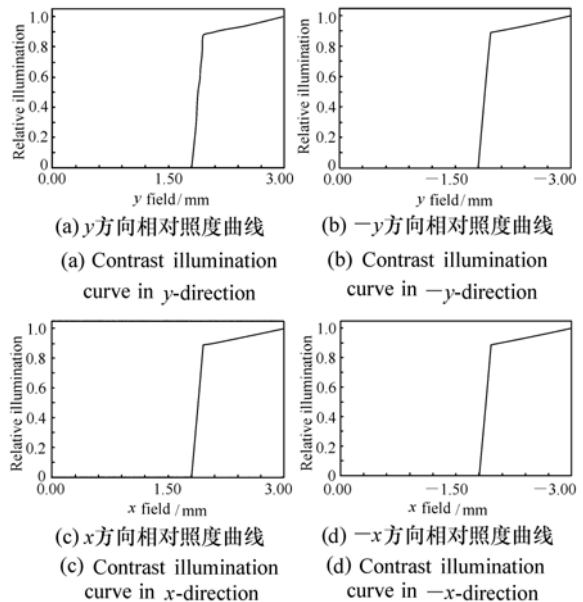


图7 相对照度示意图

Fig. 7 Diagrams of contrast illumination curves

以在入瞳处形成了很好的环形光照,其相对照度均 >90%。

4.2 摄影系统分析

为了保证荧光眼底血管造影的清晰成像,物

面的成像分辨率 > 100 lp/mm,摄影系统的成像分辨率需要达到在 120 lp/mm 上清晰成像。图 8 给出了荧光素眼底血管造影的摄影特性曲线,其中包含正视眼、近视眼和远视眼 3 种状态时的调制

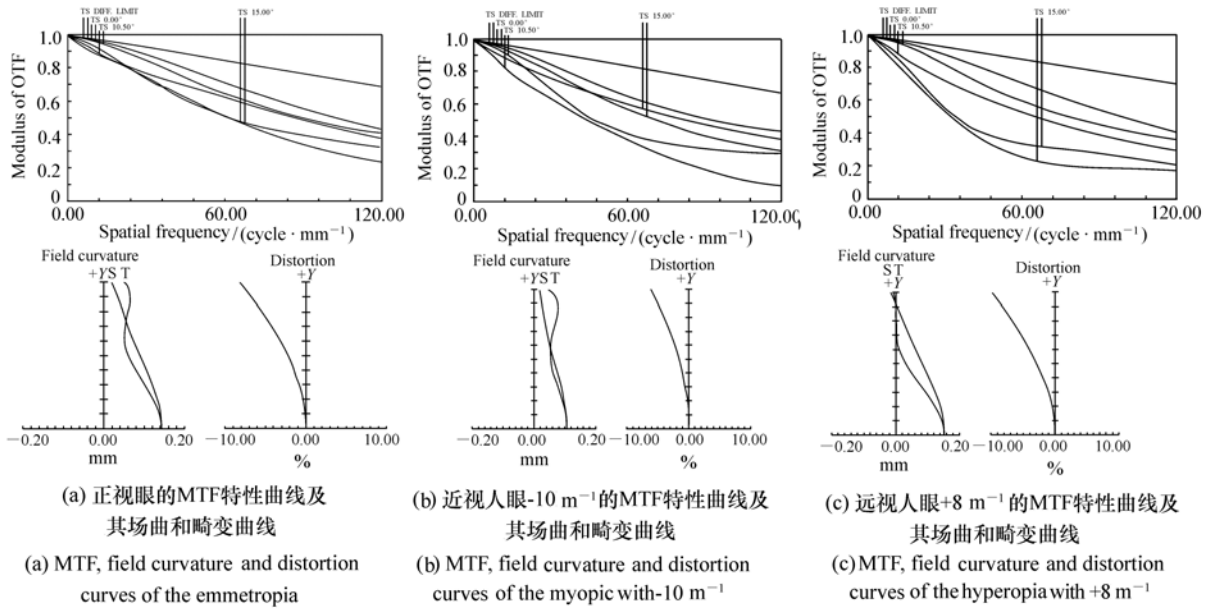


图 8 荧光素眼底血管造影的摄影系统特性曲线

Fig. 8 Characteristic curves of fluorescence fundus fluorescein angiography photography system

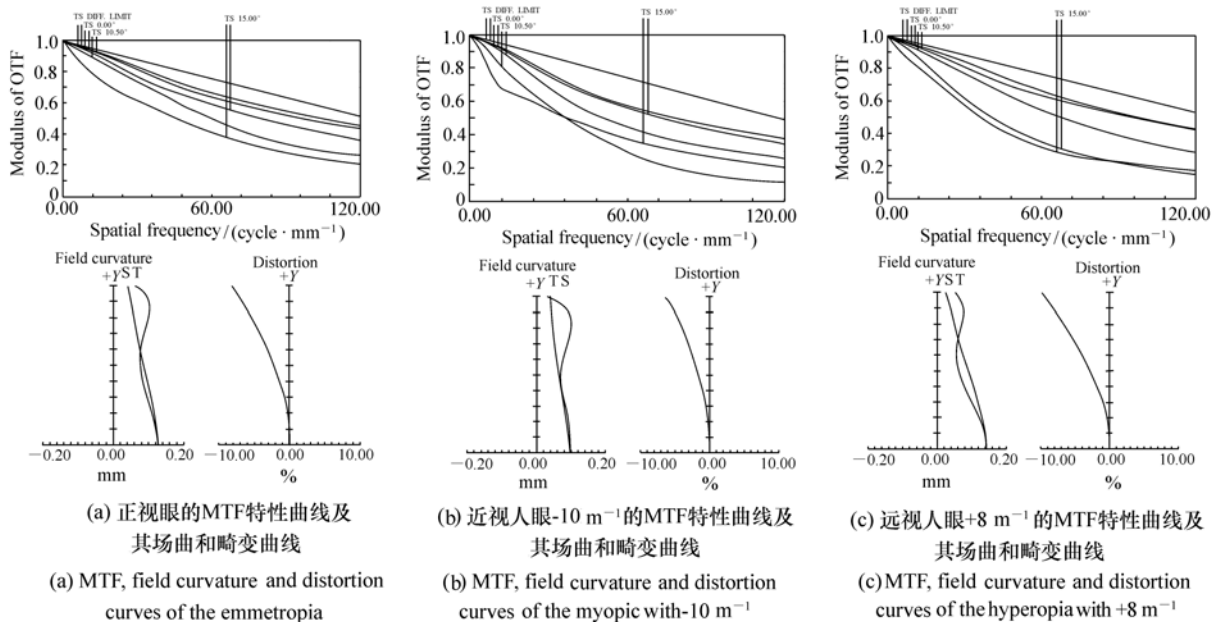


图 9 吲哚菁绿血管造影的摄影系统特性曲线

Fig. 9 Characteristic curves of indocyanine green angiography photography system

传递函数(MTF)特性曲线及其场曲和畸变曲线。图9给出了吲哚菁绿血管造影的摄影特性曲线,其中包含正视眼、近视眼和远视眼3种屈光状态的调制传递函数特性曲线及其场曲和畸变曲线。

从图中可以看出,荧光素眼底血管造影和吲哚菁绿血管造影在0视场下的MTF值很高,在空间频率120 lp/mm时,MTF值都满足探测要求。几种情形下的场曲都被控制在 $-0.2 \sim +0.2$ ,畸变都小于10%。由于便携式的设计需要减少整个系统的复杂化,并保证在 $30^\circ$ 视场下的成像清晰,以及在两个波段下在 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +8 \text{ m}^{-1}$ 间调焦时的清晰成像,所以本系统畸变控制在10%以下。由此可见,这款便携式荧光眼底血管造影仪的成像质量是令人满意的。

## 5 结 论

本文实现了一款便携式双波段的荧光眼底血管造影仪的光学系统设计,考虑人眼光学系统的像差影响而引入了眼模型,并采用共轴式照明结构,实现了荧光素眼底血管造影和吲哚菁绿血管造影两种方式下的全视场200万像素的高清晰成像。另外,为避免角膜中心具有较大的曲率半径特点而产生的杂散光,照明系统采用环形光阑、中空反射镜和共轴式照明相结合的方法;为了达到系统的便携性和成像清晰性,在摄影系统中加入了两个非球面结构。结果表明:本造影仪具有较大的调节能力,对 $-10 \text{ m}^{-1} \sim +8 \text{ m}^{-1}$ 人眼普遍适用,系统可实现 $30^\circ$ 的眼底拍摄,眼底成像分辨率 $>108 \text{ lp/mm}$ ,畸变 $<10\%$ 。满足了便携式双波段的荧光眼底血管造影仪的测量要求。

## 参考文献:

- [1] SU Z, YE P, TENG Y, *et al.*. Adverse reaction in patients with drug allergy history after simultaneous intravenous fundus fluorescein angiography and indocyanine green angiography[J]. *J. Ocul. Pharmacol. Ther.*, 2012, 28(4):410-413.
- [2] YANNUZZI L A, SLAKTER J S, GROSS N E, *et al.*. Indocyanine green angiography-guided photodynamic therapy for treatment of chronic central serous chorioretinopathy: a pilot study[J]. *Retina.*, 2012, 2(32):288-298.
- [3] BAGLIO V, GHARBIYA M, BALACCO-GABRIELI C, *et al.*. Choroidopathy in patients with systemic lupus erythematosus with or without nephropathy[J]. *J Nephrol.*, 2011, 24(4):522-529.
- [4] GHARBIYA M, BOZZONI-PANTALEONI F, AUGELLO F, *et al.*. Indocyanine green angiographic findings in systemic lupus erythematosus choroidopathy[J]. *Am J Ophthalmol.*, 2002, 134(2):286-290.
- [5] 惠延年. 眼科学[M]. 6版. 北京:人民卫生出版社, 2005.  
HUI Y N. *Ophthalmology*[M]. 6th ed. Beijing: People's Health Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [6] 叔仁, 张晓峰. 临床眼底病学[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 1994.  
SHU R, ZHANG X F. *Clinical Fundus School*[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1994. (in Chinese)
- [7] 施玉英. 眼底病[M]. 北京:华夏出版社, 1999.  
SHI Y Y. *Ocular Fundus*[M]. Beijing: China Press, 1999. (in Chinese)
- [8] 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. Eye model-based digital fundus camera design[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1567-1571. (in Chinese)
- [9] 许妍, 王肇圻, 田野. 基于眼模型的折/衍混合眼底相机设计[J]. 光子学报, 2009, 38(5):1122-1125.  
XU Y, WANG ZH Q, TIAN Y. Field based on the eye model of the refractive/diffractive hybrid fundus camera design[J]. *Photon Sinica*, 2009, 38(5):1122-1125. (in Chinese)
- [10] 饶丰. 大焦深人工晶体的设计[J]. 中国光学, 2012, 5(5):485-492.  
RAO F. Design of multi-focus intraocular lenses[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5):485-492. (in Chinese)

- [11] 李蕊,刘永基,王肇圻. 基于个体眼光学结构的波前眼镜设计[J]. 中国光学,2012,5(5):512-519.  
LI R, LIU Y J, WANG ZH Q. Design of wavefront-guided lens based on individual eye optical model[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(5):512-519. (in Chinese)
- [12] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的彩色图像压缩技术[J]. 液晶与显示,2012,7(6):800-807.  
YAO J C. Color image compression technology based on contrast sensitivity characteristics of human vision system[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2012,7(6):800-807. (in Chinese)

作者简介:



葛婧菁(1984—),女,黑龙江绥芬河人,博士,工程师,2011年于南开大学获得博士学位,主要从事光学系统设计和航空相机系统等方面的研究。E-mail:gejingjing977@gmail.com