

干眼症检测仪宽波段成像系统设计

刘航¹, 付威威², 李曼丽³, 徐乾智¹, 罗春华¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022;

2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 医学影像室, 苏州 215163;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 质量检验与测试技术中心, 长春 130033)

摘要: 现有的基于Placido盘的干眼症检测仪仅能对某一很窄的波段范围进行图像采集, 而后通过数字图像处理以及软件算法进行人眼泪膜破裂时间的测量, 判断是否患有干眼症。为了采集到更显著的图像, 提出了宽波段成像系统的设计, 针对物高为12 mm的眼部区域在整个可见光以及近红外波段都能进行清晰成像, 为后续图像处理提供更具特点的图像资源。选取最合适的初始结构, 对其进行整体优化, 设计完成的物镜在空间频率为90 lp/mm处, 所有视场的调制传递函数均大于0.2, 系统畸变小于0.5%, 场曲控制在0.2 mm以内。可以清晰的采集到人眼泪膜上通过可见光或近红外光照射的Placido环投影的图像, 为医生提供可靠依据, 对干眼症的检测和诊断具有重要的现实意义。

关键词: 光学设计; Placido盘; 干眼症; 宽波段

中图分类号: TH733

文献标志码: A

文章编号: 1672-9870(2020)01-0007-06

Design of Wide-band Imaging System for Detecting Instrument for Dry Eye

LIU Hang¹, FU Wei-wei², LI Man-li³, XU Qian-zhi¹, LUO Chun-hua¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2. Medical Imaging Department, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Suzhou 215163;

3. Quality Inspection and Testing Technology Center, Fine Mechanics and Physics,

Changchun Institute of Optics, Changchun 130033)

Abstract: At present, detecting instrument for dry eye based on Placido disk can only capture images in a narrow band range; and then the tear film rupture time can be measured by digital image processing and software algorithm to determine whether or not a person suffers from dry eye disease. In order to capture more remarkable images, in this paper, a wide band imaging system is proposed which can clearly image the eye region with the height of 12 mm in the whole visible and near infrared band. It provides more characteristic image resources for subsequent image processing. The most suitable initial structure is selected and optimized as a whole. At the spatial frequency of 90 lp/mm, the modulation transfer function of all the field of view is greater than 0.2; and the system distortion is less than 0.5%. The field curvature is controlled within 0.2 mm. The images projected by visible or near-infrared Placido ring on the human tear film can be clearly collected, which provides a reliable basis for doctors. There is important practical significance for the detection and diagnosis of dry eye disease.

Key words: optical design; Placido disc; dry eye; wide-band

收稿日期: 2019-03-20

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2016684)

作者简介: 刘航(1993-), 男, 硕士研究生, E-mail: liuhang9307@163.com

通讯作者: 罗春华(1963-), 女, 副教授, E-mail: Lch@cust.edu.cn

干眼症(xerophthalmia)别称角结膜干燥症或者泪液功能不全综合征,是一种眼部或全身多方面因素(如视功能障碍、眼部损伤、糖尿病等)所引起的泪腺低分泌而导致泪膜异常、眼表上皮干变的常见眼科疾病,多发于40~50岁女性,我国的干眼症患病率在21%~30%之间。干眼症的临床初始症状包括眼睛干涩易疲劳、视力模糊、异物感、烧灼感、发痒、畏光、惧风、烟尘环境下眼部不适等多种症状。以上症状随病情进一步发展而加重,最终导致角膜溃疡甚至失明,严重影响患者工作和生活。引起干眼症的主要原因是眼表泪膜的异常破裂,正常眼泪膜破裂时间为10~45 s,而干眼症者其破裂时间一般低于10 s^[1-3]。医生根据泪膜破裂的时间诊断患者是否患有干眼症,因此能精确地检测出泪膜的破裂时间对于干眼症的检测及后续治疗提供重要依据。

目前检验干眼症的有效方法分为传统的侵入性泪膜破裂时间检测(Invasive Tear Break-up Time,简称IBUT)^[4]和现代的非侵入式光学相干断层扫描技术(Optical Coherence Tomography,简称OCT)^[5]。前者具有变异性大、重复率低、易受外界影响的缺陷,后者结构复杂、不便携带且依赖进口价格高昂。

本设计对现有的基于Placido盘的非侵入式干眼症检测仪的成像系统,进行了改进,为配合泪膜破裂时间的图像算法,设计了可见光与近红外宽波段成像系统,可以完成可见光及近红外光图像的采集。根据仪器需求,确定系统参量,选取最适合的初始结构,利用ZEMAX软件对焦距进行放缩,规范视场及孔径,设计出满足于现有感光元件的尺寸且成像清晰的物镜,优化完成的物镜可以得到良好的成像质量,并且具有低成本,结构简单等优点。

1 设计原理及思路

干眼症检测仪检测原理如图1所示。首先放置在Placido盘后面的LED灯板发出光,将透

过带有半透明圆环的Placido盘后投影到人眼表面的泪膜上,然后投射光经过泪膜反射后,通过Placido盘中心圆孔后侧的成像物镜,将泪膜表面上的投射图形成像在感光芯片上,并传输至电脑端,对图像进行处理分析。当人眼表面泪膜无破裂时,探测器采集到明暗相间且完整的同心圆环;当人眼表面泪膜破裂时,探测器采集到的明暗相间的圆环会随泪膜的破裂呈现出不同程度的扭曲或缺失^[6]。根据探测器采集到的图像,经过干眼判断算法进行处理,即可得出泪膜的破裂时间,进而判断被测者泪膜破裂时间是否正常。

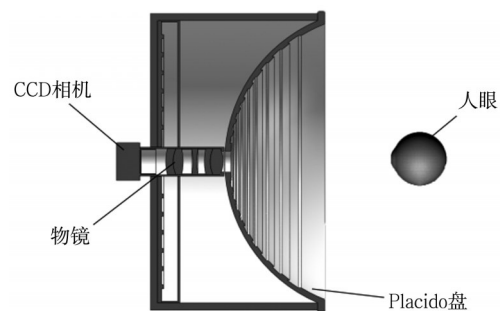


图1 干眼症检测仪系统结构及原理图

亚洲成年人一般泪膜水平径约为11 mm,垂直径约为10 mm,平均曲率半径约为7.8 mm,厚度约为6~10 μm ,我国人眼虹膜的直径约为11.4 mm。为了使干眼检测具有普适性,成像系统半视场物高设置为12 mm^[7]。考虑到,被检测眼要在Placido盘前且距离Placido盘中心有一定距离,因此工作距离的选取要适中。设计中根据实际需求,最终选取工作距离为85 mm的镜头,同时能够保证半径为7.8 mm的泪膜可以清晰的成像在接收器上,便于后续算法对采集到的图像进行处理^[8]。成像系统的孔径光阑等于或略小于Placido盘中心的圆孔,根据已制备的适用于我国人民的Placido盘,其中心圆孔直径为10 mm,因此确定成像系统是一个小相对孔径、小视场、宽波段的光学系统。考虑到相机的尺寸及装调,规定物像共轭距为136 mm。为了采集更多信息,干眼检测仪的照明光源采用可见光和近红外光两种照明方式,工作波长为486 nm、

588 nm、656 nm、840 nm、850 nm、860 nm,其中可见光波段主波长为588 nm,近红外波段主波长为850 nm。光学系统基础参数如表1所示。

表1 光学系统基础参数

项目	数值
工作距离/mm	85
系统共轭距/mm	136
工作波长/nm	486~656,840~860
物高/mm	12

2 成像光学系统设计

2.1 成像系统参数要求

采用Basler公司ML500-35uc型相机,具体感光芯片参数如表2所示。

表2 感光芯片参数

感光芯片类型	CMOS
感光芯片尺寸/mm	8.4×7.1
水平/垂直像素尺寸/ μm	5.6×5.6

为使泪膜图像信息全部被感光芯片接收,定义像高为6 mm,小于感光芯片尺寸。根据表2像元尺寸大小,由奈奎斯特采样定律,可计算出本系统的截止频率约为90 lp/mm。

$$f_c = \frac{1}{2s} \quad (1)$$

式中, f_c 为空间截止频率; s 为感光芯片像元尺寸。

根据物高为12 mm,像高为6 mm,可根据垂轴放大率公式(2),求得垂轴放大率为-0.5。

$$\beta = \frac{y'}{y} \quad (2)$$

式中, y' 为像高; y 为物高。

根据系统共轭距、垂轴放大率以及高斯公式(3),求得系统焦距为30 mm。

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} \quad (3)$$

式中, f' 为系统焦距; l' 为像距; l 为物距。具体的成像光学系统设计参数如表3所示。

本设计的预期指标在空间截止频率处所有视场调制传递函数(MTF)大于0.2,且接近衍射极限,其他像差控制合理,镜片选用国内厂家生

产的玻璃材料制成的球面镜,镜片数不大于5片,结构合理易于加工。

表3 光学系统设计参数

项目	数值
入瞳直径/mm	6
像高/mm	6
垂轴放大率	-0.5
系统焦距/mm	30
空间截止频率/(lp/mm)	90

2.2 成像系统设计优化

成像物镜的性能由视场角(2ω)、相对孔径($\frac{D}{f'}$)和焦距(f')这三个光学特性参数决定。成像物镜的三个光学特性参数是相互关联、相互制约的,它们共同决定了成像物镜的光学性能。可用经验公式(4)来表示三个光学性能参数之间的关系。对于成像物镜 $C_m \leq 0.24$,则认为该系统是合理的,本系统的 C_m 值为0.02。可以对其进行设计及优化,达到预期设计指标。

$$C_m = \frac{D}{f'} \tan \omega \sqrt{\frac{f'}{100}} \quad (4)$$

现有的成像物镜种类很多,不难发现,无论何种形式的成像物镜,其中总有少数几个透镜是起决定性作用的。这些起决定作用的元件就是成像物镜的基础结构,这些基础结构并不复杂,并且种类有限,掌握这些基础结构的性质和把它们复杂化的方法,是设计成像物镜的关键,并且根据不同设计要求,创造出最合适的结构^[9]。对于本系统可利用正、负分离的薄透镜,负透镜在前构成的半部对称结构。这种物镜是使用最广泛,同时它也是能校正全部像差的一种最简单的结构。查阅相关的光学设计手册和国内外镜头专利,寻找到一款改进型三分离物镜作为本系统的初始结构^[10-11]。

由于所设计的成像系统是小视场,小相对孔径系统,因此应保证其轴上部分有良好的像质。在校正像差过程中,将光焦度分解为多个元件,可以减小每个表面的入射角有利于轴外

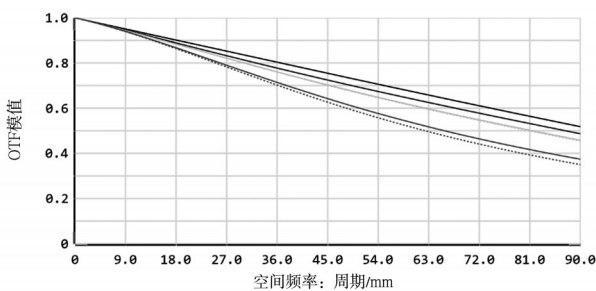
像差的校正;正负透镜胶合可以校正球差;采用不同色散不同折射率的玻璃组合可以校正色差。利用ZEMAX软件,建立默认评价函数,设置适当的镜头约束条件,选取国产玻璃作为替换材料,以及合理的控制像差和MTF的操作数进行系统优化。优化后的光学系统如图2所示。



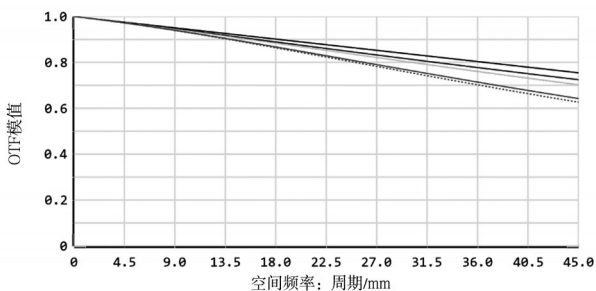
图2 优化设计后的二维结构图

2.3 优化设计结果分析

成像系统的调制传递函数曲线如图3所示。一般来说,高频部分反应物体的细节传递情况,中频部分反应物体的层次传递情况,而低频部分反应物体的轮廓传递情况^[12]。如图3(a)所示,可见光波段MTF在高频90 lp/mm处所有视场均大于0.3,如图3(b)所示,可见光波段MTF在中频45 lp/mm处所有视场均大于0.6;如图4(a)所示,近红外波段MTF在高频90 lp/mm处所有视场均大于0.2,如图4(b)所示,近红外波段MTF在中频处所有视场均大于0.5。满足设计要求。

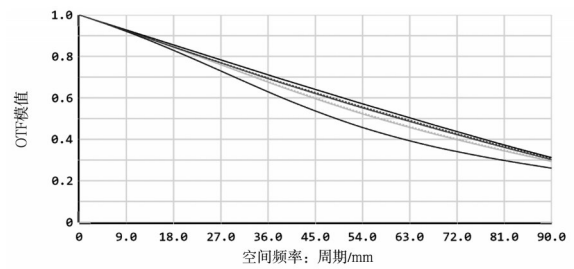


(a)可见光波段高频MTF图

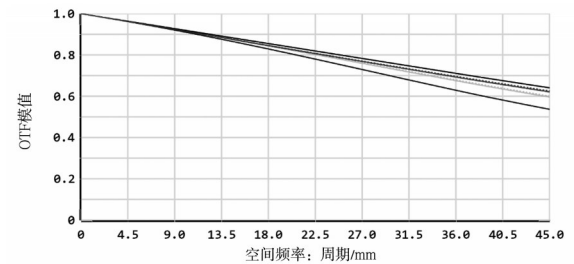


(b)可见光波段中频MTF图

图3 可见光波段系统MTF曲线



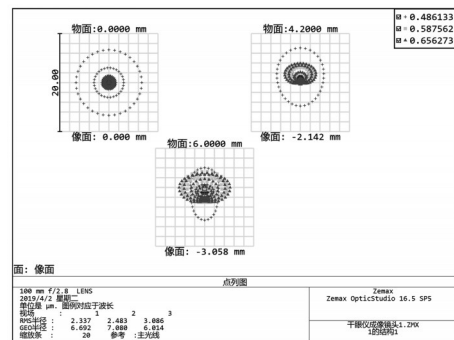
(a)近红外波段高频MTF图



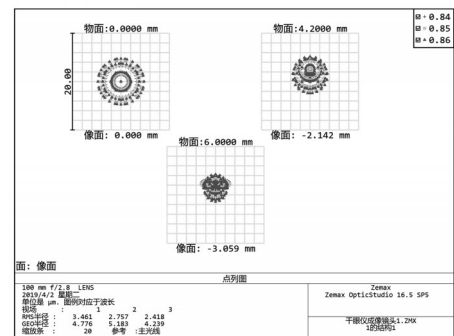
(b)近红外波段中频MTF图

图4 近红外波段系统MTF曲线

成像系统的点列图如图5所示。点列图是通过像方光线的集中程度来研究系统的成像质量。可见光波段最大弥散斑均方根直径出现在全视场,其值为6.172 μm;红外光波段最大弥散斑均方根直径出现在轴上视场,其值为6.922 μm。



(a)可见光波段光斑点列图



(b)近红外波段光斑点列图

图5 光斑点列图

成像系统的场曲、畸变曲线和垂轴色差曲线分别如图6和图7所示。从图6中可以看出系统

的整个视场场曲不大于0.2 mm, 相对畸变小于0.5%, 从图6可以看出系统的垂轴色差均小于1 μm , 能够满足设计需求。

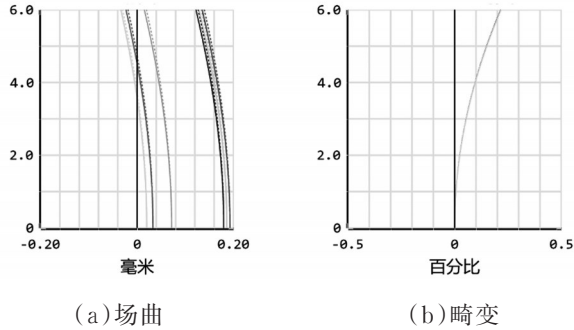


图6 场曲、畸变曲线

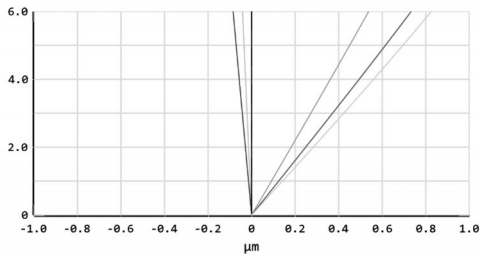


图7 垂轴色差曲线

3 公差及实验分析

优化设计完成后, 对镜头进行公差分析。在公差分析前, 根据工厂现有的样板表, 对透镜进行样板嵌套, 以减少透镜加工成本。样板嵌套完成后, 将所有变量改为固定, 并且将评价函数编辑器中有关位置和厚度的操作数删除, 公差设置如表4所示。

表4 公差设置表

项目	指标	项目	指标
表面公差	-	元件公差	-
曲率半径/mm	0.03	X 偏心/mm	0.02
厚度/mm	0.02	Y 偏心/mm	0.02
X 偏心/mm	0.02	倾斜 X 轴/(°)	0.02
Y 偏心/mm	0.02	倾斜 Y 轴/(°)	0.02
倾斜 X 轴/(°)	0.01	折射率公差	-
倾斜 Y 轴/(°)	0.01	折射率	0.001
S+A 不规则度/mm	0.01	阿贝数/%	1

选择几何平均MTF作为评价函数, MTF的频率为90 lp/mm, 选择模式为灵敏度分析法, 进行20次蒙特卡洛运算。图8为蒙特卡洛分析后

的调制传递函数的叠加图。表5为蒙特卡洛模拟实际加工装调时, MTF在90 lp/mm处数值大小的概率统计表。分析结果表明在实际加工及装调过程中至少有80%的调制传递函数值在90 lp/mm处大于0.201, 能够达到制造加工要求, 可以对其进行生产。

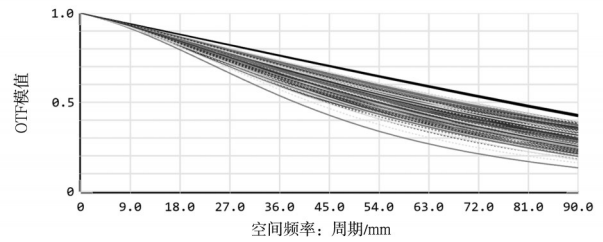


图8 蒙特卡洛分析后的MTF叠加图

表5 MTF(90 lp/mm处)蒙特卡洛统计值

概率/%	数值
90	>0.189
80	>0.201
50	>0.213
20	>0.242
10	>0.250

将成像系统加工装调后, 与Placido盘组合安装, 模拟机如图9所示。对组合好的模拟机进行测试, 实验采用可见光与近红外光对人眼泪膜进行照射, 采集到的图像如图10所示。图10(a)是在可见光波段下拍摄的泪膜图像, 图10(b)是在近红外波段拍摄的泪膜图像。两幅图像均可清晰地拍摄到人眼泪膜的Placido盘的投射图。根据两幅图像可以看出不同波段范围图像的细节显示不同, 为后续图像处理及软件算法提供可靠依据。

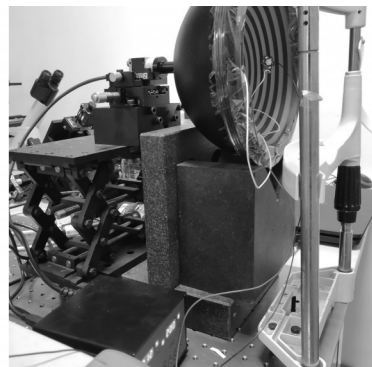
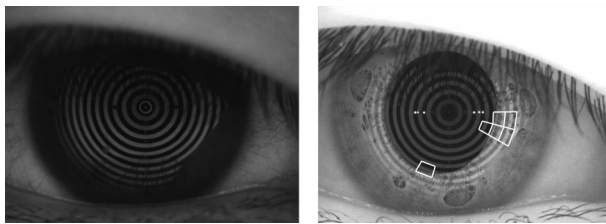


图9 干眼症检测仪模拟机



(a)可见光波段泪膜图像 (b)近红外波段泪膜图像

图10 实验效果图

4 结论

根据Placido盘的原理,利用现有检测设备以及ZEMAX软件设计出针对可见光波段以及近红外波段均能清晰成像的宽波段光学系统,实现了对不同波长状况下人眼泪膜图像的采集,解决了以往干眼检测系统仅能对单一波长成像的问题。实验结果表明,在全视场90 lp/mm处调制传递函数大于0.2,达到了良好的成像效果。该系统对现有干眼检测仪的工作波段范围进行了扩展,对干眼症的检测与诊断具有现实意义。由于设计要求可见光波段与近红外波段共用同一探测器,同时还要考虑到泪膜的曲率等问题,因此加大了镜头的设计难度,在弥散斑尺寸控制上,还有待于对结构进一步优化。

参考文献

- [1] Cifuentes M, Del P B, Verakellet C. Pilocarpine and artificial saliva for the treatment of xerostomia and xerophthalmia of Sjögren's Syndrome: A double blind control trial [J]. *Brit J Dermatol*, 2018, 22(1): 8697-9245.
- [2] 张正,李银花,丁亚丽,等.干眼症的发病机制及治疗现状[J]. *中华眼科医学杂志(电子版)*, 2014, 4(2): 44-46.
- [3] 宋云,赵敏.基础泪液分泌实验I泪膜破裂时间检测的影响因素[J]. *中国实用眼科杂志*, 2008, 26(11): 1196-1198.
- [4] 蓝倩倩,满平仪,曾思明.泪膜稳定性检测方法的研究概况[J]. *中国临床新医学*, 2016, 9(2): 175-178.
- [5] 延艳妮,魏文斌,汪东生.眼科光学相干断层扫描技术的新进展[J]. *中华眼科医学杂志(电子版)*, 2013, 3(1): 38-40.
- [6] 朱海龙,冯大伟,付威威.干眼症检测仪照明和成像系统的设计及实现[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(2): 68-71.
- [7] 杨金生,饶学军,饶长辉.基于哈德曼-夏克传感器的角膜地形图仪[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 826-831.
- [8] 隋成华,沃圣杰,高楠,等.基于Placido盘的角膜地形图仪成像系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 231-237.
- [9] 萧泽新.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2014: 113-118.
- [10] Mihara, S. Compact camera lens system with a short overall length [P]. U.S. Patent 4443069, 1984-04-17.
- [11] Doi G H. Rear stop type lens system [P]. U.S. Patent 4298252, 1981-11-03.
- [12] 吉紫娟,包佳祺,刘祥彪.ZEMAX光学系统设计实训教程[M].武汉:华中科技大学出版社,2018: 52-56.