

doi: 10.3788/gzxb20174607.0722001

数码裂隙灯显微镜光学系统的设计与实现

隋成华^{1,2,3}, 沃圣杰^{1,2,3}, 高楠⁴, 徐丹阳^{1,2,3}, 韩勇浩^{1,2,3}, 杜春年^{1,2,3}

(1 浙江工业大学 光学与光电子研究中心, 杭州 310023)

(2 浙江工业大学 生物与医学物理信息技术协同创新中心, 杭州 310023)

(3 浙江工业大学 理学院, 杭州 310023)

(4 浙江工业大学 计算机学院, 杭州 310023)

摘 要:利用光学设计软件 Zemax 设计了一套具有 $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ 与 $40\times$ 放大倍率的五档式数码裂隙灯显微镜光学系统。在传统体视裂隙灯显微镜光学系统结构的基础上将数码型裂隙灯显微镜划分为共用前置物镜、伽利略望远镜、摄影物镜三部分, 用平行式伽利略望远镜系统结构来改变倍率。研究了共用前置物镜、伽利略望远镜及摄影物镜的光学特性与技术指标要求, 选取了合适的透镜类型。在共轴时拥有良好的成像质量基础上, 将光学系统过渡到非共轴情况, 再进行优化。优化后除 $40\times$ 时衍射极限较低外, 在 $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ 情况下系统调制传递函数曲线值在空间频率为 115 lp/mm 处基本大于 0.2 , 点列图显示不同倍率下的弥散斑大小均基本小于艾里斑。该光学系统具有良好的成像效果, 且整体结构简单, 易加工, 成本低, 其性能很好地满足了整机要求。

关键词:显微镜; 光学设计; 共用前置物镜; 望远镜; 摄影物镜

中图分类号: O435.2; O435.1; R778 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2017)07-0722001-9

Design and Implementation of Digital Slit-lamp Microscope Optical System

SUI Cheng-hua^{1,2,3}, WO Sheng-jie^{1,2,3}, GAO Nan⁴, XU Dan-yang^{1,2,3},

HAN Yong-hao^{1,2,3}, DU Chun-nian^{1,2,3}

(1 Center for Optics & Optoelectronics Research (COOR), Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(2 Collaborative Innovation Center for Information Technology in Biological and Medical Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(3 College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

(4 College of Computer, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A set of $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ and $40\times$ magnifications of digital slit-lamp microscope optical system is designed with Zemax. The optical system structure of traditional stereo slit-lamp microscope is analyzed, on its basis, the digital slit-lamp is divided into shared front-objective, Galileo telescope and photographic lens, using parallel Galileo telescope system structure to change rate. The optical properties and the technical indicators of shared front-objective, Galileo telescope and photographic lens are discussed, and the appropriate type of the lens is selected. Under the good imaging quality foundation in coaxial situation, the optical system is carried out the transition to non-coaxial and optimized. The modulation transfer function curve values are mainly greater than 0.2 at the position of 115 lp/mm in $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ except the low diffraction limit at $40\times$, and the spot diagram shows that the spot size in different magnifications are substantially less than the Airy disk. The lens has a good imaging effect with simple structure, easy processing and low cost.

Key words: Microscopes; Optical design; Shared front-objective; Optical telescopes; Photographic lens

基金项目: 2016 年浙江省教育厅一般科研项目(自然科学类)(No. Y201636360)资助

第一作者: 隋成华(1956-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为新型光电信息处理系统的开发及应用. Email: suich@zjut.edu.cn

收稿日期: 2017-01-11; 录用日期: 2017-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 220.4830; 220.3620; 110.0180; 110.2970; 120.3620

0 引言

裂隙灯显微镜主要用于眼部检查,是眼科较为频繁使用的一种光学设备.通过裂隙灯显微镜可以清楚地观察到眼部外观、眼角膜、房水、玻璃体及晶状体,同时可以确定病变的位置,性质,大小及深度^[1].裂隙灯最早于1911年由瑞典眼科医师 Gullstrend 发明,1920年 Vogt 加以改进,目前世界各国的裂隙灯显微镜都采用 Vogt 基本原理^[2].1965年, Littamm 制成照相裂隙灯显微镜,使其成为集照相、摄影于一体的仪器.随着近几年计算机技术及图像处理技术的发展,又涌现出了一大批装有 CCD 成像装置的裂隙灯,其好处是避免了医生长时间用肉眼观察导致的视觉疲劳,且后期数据管理更加方便^[3].

目前,国外研究起步相对较早,获得了较多的成果.1970年, Waltman 等用裂隙灯结合荧光光度计来测量眼部的生理学结构^[4].1993年, Adolf 等提出了结合裂隙灯与激光多普勒干涉仪来测量眼轴长度^[5].2000年, Hans 等提出了裂隙灯适配光学相干断层扫描成像技术(Optical Coherence Tomography, OCT)来测量眼前节结构^[6].德国蔡司研制的 VISULAS 系列激光裂隙灯,不仅可以用来诊断,也可以用来治疗,例如视网膜激光光凝术,虹膜切开术等^[1].我国于1967年试制成功裂隙灯显微镜,并投入生产,现在国产裂隙灯显微镜已被广泛使用,其中一些配备了专业的单反相机,能清晰地拍摄到角膜、巩膜、前房、虹膜及晶体等.但是,目前主要存在的问题是在40×时,显微镜的景深较小,视场亮度不高等.

本文参考目前国外主流产品,利用 Zemax 对裂隙灯显微镜的光学系统进行了设计,采用平行式伽利略望远镜变倍系统,具有6×,10×,16×,25×及40×五档放大倍数.对病灶定位时采用低倍放大率,而对细节检测时采用高倍放大率,在五种放大倍数情况下,整体上照片显示清晰,分辨率较高,色彩还原良好,成像质量佳,符合临床诊断的要求.

1 原理

裂隙灯显微镜采用了普通暗视场生物显微镜的光学原理,将具有高亮度的裂隙强光成一定角度照射眼睛的某一透明介质部位,可获得该透明组织的“光学切片”,切片中包含的微小质点会产生散射效应,此时,通过显微镜观察就可看见被检组织的细节^[7].因此裂隙灯显微镜的照明系统,要求产生一个亮度高、照明均匀、裂隙清晰且宽度可调的照明效果.本文采用柯拉照明方式,其特征是由聚光镜与投射镜组成,光源经聚光镜成像在投射镜,裂隙通过投射镜成像在被检部位,投射镜直径较小,这样既可以减少镜片像差,又可以增加成像景深,裂隙的宽度通过光圈的变化达到非连续变化效果或螺旋形光阑达到连续变化效果,在照明光路中还可放置镀不同膜层的滤光片,根据检查需要发出不同颜色的裂隙光,目前使用的裂隙灯光源一般都是卤素灯泡,其亮度较高,在裂隙灯图像记录或其他特殊检查时非常有必要.传统的体视裂隙灯显微镜一般以人眼观察为主,需要人工记录病况,存在着许多局限性;而数码裂隙灯显微镜,配备了 CCD 图像采集功能与图像处理功能,具有实时显示和记录检查功能,拥有快速、定量、明确等特点,受到人们青睐^[8].

常用的裂隙灯显微镜光学系统结构如图1,其结合了体视裂隙灯显微镜与数码裂隙灯显微镜.主要由柯拉照明系统、共用前置物镜、伽利略望远镜、摄影物镜、镜筒透镜及目镜组成,其中照明系统安放在滑台上,根据裂隙灯和显微镜的焦距以及对焦位置可观察到眼内不同的位置,以此来判断病变,而伽利略系统被放置在变倍鼓轮中,通过旋转鼓轮可将其旋转180°,两组伽利略望远镜系统可产生四组放大倍数,鼓轮置空时,提供第五种放大倍数.

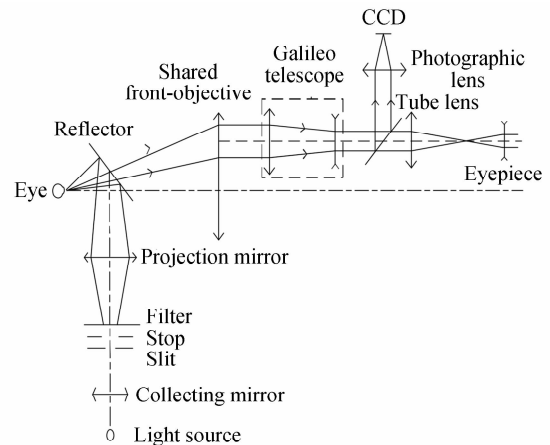


图1 常用裂隙灯显微镜光学系统结构图
Fig.1 The optical system structure of common slit-lamp microscope

2 光学系统结构分析

在体视裂隙灯显微镜中,一般采用无限远校正光学系统,即共用前置物镜与镜筒透镜一起配合使用,其特点是物镜出射的光路是平行光,好处是可在光路中加入任意多的光学部件而不影响成像质量,或者可以修改工作距离^[9].图1中的共用前置物镜,伽利略望远镜,镜筒透镜共同构成了组合显微镜物镜,根据被观察物体 y 及在目镜物方焦面的共轭像 y_0' ,设组合显微物镜的垂轴放大率为 $\beta_{组}$,则有关系

$$\beta_{组} = (-f'_{镜筒}/f'_0) \times \beta_{变} = y'_0/y \quad (1)$$

对应的视场角为

$$\tan \omega = y/(f'_0) \quad (2)$$

式中, f'_0 为共用前置物镜焦距, $f'_{镜筒}$ 为镜筒透镜的焦距, $\beta_{变}$ 为伽利略望远镜的垂轴放大倍率,其与视觉放大率 $\Gamma_{变}$ 为倒数关系.从式(1)中可以看出,像高 y_0' 保持不变,当 $\beta_{组}$ 变小时, y 变大,即观察范围大;反之,则范围小.伽利略望远镜系统的特点是平行光进入,平行光出射,其视觉放大率 $\Gamma_{变}$ 表示为

$$\Gamma_{变} = -f'_1/f'_2 = D_1/D_2 = \tan \omega'/\tan \omega \quad (3)$$

式中, f'_1, f'_2 分别为伽利略望远镜物镜及目镜的焦距, D_1, D_2 为伽利略望远镜物镜及目镜的入瞳与出瞳, ω 为物镜视场角, ω' 为目镜视场角^[10].从式(3)可以看出,当 $|\Gamma_{变}| > 1$ 时, $D_1 > D_2$,物镜的直径大于目镜的直径,即高倍时物镜为孔径光阑;当 $|\Gamma_{变}| < 1$ 时, $D_1 < D_2$,即低倍时目镜为孔径光阑,且伽利略系统的入瞳即为共用前置物镜的出瞳,因此在变倍过程中共用前置物镜的孔径光阑位置和相对孔径是不断变化的,倍数不同时,出瞳大小也不固定^[11].

参考市面上裂隙灯实际应用的要求,基准放大倍率为旋转鼓轮置空时,即空档为 $16\times$,此时伽利略望远镜系统不在光路系统中, $\Gamma_{变} = 1$,裂隙灯的总放大倍率 $\Gamma_{总}$ 为

$$\Gamma_{总} = (-f'_{镜筒}/f'_0) \times \Gamma_{变} \times \Gamma_{目} \quad (4)$$

式中, $\Gamma_{目}$ 为目镜的视觉放大率,本文取 $12.5\times$, $\Gamma_{总} = 16\times$ 时,可算出

$$-f'_{镜筒}/f'_0 = 1.28 \quad (5)$$

式(4)变化为

$$\Gamma_{总} = 1.28 \times \Gamma_{变} \times \Gamma_{目} \quad (6)$$

由式(6)可推出,当 $\Gamma_{总} = 40\times$ 时, $\Gamma_{变} = 2.5\times$;当 $\Gamma_{总} = 25\times$ 时, $\Gamma_{变} = 1.56\times$.将伽利略望远镜系统旋转 180° ,此时放大倍率为 $1/\Gamma_{变}$,分别为 $0.4\times$ 和 $0.625\times$,代入到式(6)中,得到 $\Gamma_{总}$ 分别为 $6.4\times$ 和 $10\times$,与设计指标 $6\times, 10\times$ 相接近,其相应的 $\Gamma_{变}$ 值,如表1所示.

表1 伽利略望远镜放大倍率
Table 1 The magnification of Galileo telescope system

$\Gamma_{总}$	$\Gamma_{变}$
$40\times$	$2.5\times$
$25\times$	$1.56\times$
$16\times$	$1\times$
$10\times$	$0.625\times$
$6\times$	$0.4\times$

3 光学系统外形尺寸计算

常用裂隙灯显微镜目镜放大倍数的为 $\Gamma_{目} = 12.5\times$,根据目镜视觉放大率公式

$$\Gamma_{目} = 250/f'_{目} \quad (7)$$

式中, $f'_{目}$ 为目镜焦距,可得 $f'_{目} = 20\text{ mm}$,为了与目镜能进行良好的衔接,共用前置物镜的像方线视场大小一般为 $20\text{ mm} \sim 23\text{ mm}$,本文采用 20 mm 作为视阑直径^[12].根据式(1),在 $2y'_0 = 20\text{ mm}$ 的情况下,可得到对应的物方视场直径为 $40\text{ mm}(6\times), 24\text{ mm}(10\times), 16\text{ mm}(16\times), 10\text{ mm}(25\times), 6\text{ mm}(40\times)$.为了便于检查者进行操作,裂隙灯显微镜的工作距离应保持在一定范围,即前置物镜距离眼睛不能过小也不能过大,一般都选择在 $95 \sim 115\text{ mm}$ 之间,本文所选择距离为 115 mm ,即在将前置物镜当做是薄透镜情况下,其焦距为 $f'_0 = 115\text{ mm}$.共用前置物镜的实际通光孔径 $D_{共}$ 取 44 mm ,根据式(1), $\beta_{变}$ 取最小为 $0.4\times$,此时计算得 $y =$

19.5 mm, 再将 y 代入式(2)中, 可得到共用前置物镜的视场角为 $2\omega_{\max} = 19.2^\circ$, 所以共用前置物镜设计指标如表 2 所示.

表 2 共用前置物镜光学特性参数

Table 2 The optical parameters of shared front-objective

Parameters	Value
f'_0	115 mm
$2\omega_{\max}$	19.2°
$D_{\text{共}}$	44 mm
Relative aperture	1/2.61

伽利略望远镜的物镜与目镜之间的距离一般为 30 mm, 则可得

$$f'_1 + f'_2 = 30 \quad (8)$$

由于伽利略望远镜物镜的最大孔径为共用前置物镜的一半, 即 $D_{\text{物}} = 22$ mm, 且共用前置物镜出射的为平行光, 因此伽利略望远镜物镜的视场角 ω 即为前置物镜视场角, 当 $\beta_{\text{变}} = 1.6 \times$ 时, $f'_1 = 50$ mm, $f'_2 = -80$ mm, 代入式(1)可得 $y = 4.9$ mm, 再根据式(2)、(3), 得到 $2\omega = 4.6^\circ$, $2\omega' = 7.4^\circ$; 同理, 当 $\beta_{\text{变}} = 2.5 \times$ 时, $f'_1 = -25$ mm, $f'_2 = 50$ mm, $y = 3.1$ mm, 得到 $2\omega = 3.0^\circ$, $2\omega' = 7.4^\circ$. 表 3 为伽利略望远镜物镜与目镜的设计指标.

表 3 伽利略望远镜物镜与目镜的设计指标

Table 3 The design index of objective and eyepiece in Galileo telescope

Parameters	$\beta_{\text{变}} = 1.6 \times$	$\beta_{\text{变}} = 2.5 \times$
f'_1	50 mm	-25 mm
f'_2	-80 mm	50 mm
2ω	4.6°	3.0°
$2\omega'$	7.4°	7.4°
Relative aperture	1/3.63	1/2.27

为了使摄影物镜观察时的放大倍数与目镜相同, 存在等式关系^[9]

$$2y'_0 / \left(\frac{f'_{\text{筒}}}{f'_0} \times \Gamma_{\text{变}} \right) = l / \left(\frac{f'_{\text{摄}}}{f'_0} \times \Gamma_{\text{变}} \right) \quad (9)$$

式中, $f'_{\text{摄}}$ 为摄影物镜的焦距, l 为 CCD 靶面长边. 设计中采用彩色 1/2.5 英寸的 CCD, 有效像素为 2592×1944 , 像元尺寸 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 靶面尺寸为 $5.7 \text{ mm} \times 4.3 \text{ mm}$, 因此 $l = 5.7$ mm, 计算可得 $f'_{\text{摄}} = 43.8$ mm. 摄影物镜的视场角的正切为

$$\tan \omega_{\text{摄}} = h / f'_{\text{摄}} \quad (10)$$

式中, h 为 CCD 靶面对角线的一半, 求出 $2\omega_{\text{摄}} = 9.3^\circ$. 摄影物镜的分辨率是以焦面上每毫米中能分辨开的黑白相间的条纹数来表征的, 根据对无穷远二点可能被理想系统分辨开的最小分辨角公式, 在摄影物镜焦平面上能分开的两条纹之间的距离为^[13]

$$\sigma = \frac{1.22\lambda}{D_{\text{摄}} / f'_{\text{摄}}} \quad (11)$$

式中, $D_{\text{摄}}$ 为摄影物镜的通光孔径, 当 λ 取 $0.55 \mu\text{m}$ 时, 摄影物镜的分辨率为

$$N = \frac{1}{\sigma} = 1475 \frac{D_{\text{摄}}}{f'_{\text{摄}}} \quad (12)$$

令 σ 为像元尺寸大小, 代入到式(12), 解得摄影物镜的相对孔径为 1/3.24, 同时根据奈奎斯特定律, 像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ 的 CCD 彩色分辨率为 $1/(2 \times 2 \times 2.2) \times 1000 = 113$ lp/mm.

表 4 摄影物镜设计指标

Table 4 The design index of photographic lens

Parameters	Value
$f'_{\text{摄}}$	43.8 mm
$2\omega_{\text{摄}}$	9.3°
Relative aperture	1/3.24

4 光学系统的选取与优化设计

共用前置物镜一般的结构有单-双、双-单、双-双与三分离,三分离结构由于装调比较困难,用的相对较少,而双-双结构由于相对多了一片镜片,选择合适的玻璃后可以校正球差、轴向色差与彗差,且相对孔径较大,因此优先选择双-双结构的共用前置物镜^[14]。

常用的望远物镜类型有摄远物镜、三分离物镜、双胶合物镜与双分离物镜等,其中摄远物镜视场角较大,可校正球差、彗差、场曲等,但相对孔径较小;三分离物镜有较小的色球差及高级孔径像差,但装配难,光能损失大;双胶合物镜结构简单,可校正球差、彗差、轴向色差等,适合于短焦距、相对孔径不大的场合中使用;双分离物镜适用于大口径情况下,可校正球差、正弦差等,但光能损失较大,因此优先选取双胶合物镜作为伽利略望远物镜的初始结构,同样,目镜也只需双胶合结构便能满足要求^[15]。

符合摄影物镜指标的结构类型较多,本文采用简单的双胶合透镜^[16]。

首先将裂隙灯显微镜的光学系统看作共轴系统,当倍率发生变化时,共用前置物镜的视场及相对孔径不断发生变化,低倍时视场最大,相对孔径最小;高倍时视场最小,相对孔径最大。为了兼顾倍数不同时的成像质量,可以利用 Zemax 中的多重结构来控制每档成像质量,在每档结构中定义各光阑位置与相对孔径大小。同时为了满足各档放大倍数的要求,选择在评价函数中使用操作数 EFLY 来控制每部分的焦距;使用 TRAY、RAGC、等操作数的结合来控制球差;光线经过共用前置物镜与伽利略望远镜后为平行光线,这里采用操作数 RAED 来控制不同孔径下出射光线的平行度;此外,给出玻璃中心厚度、边缘厚度、折射率、阿贝数等边界条件,并将各透镜的表面曲率半径、间隔、玻璃材料等设置为变量,确定好评价参数后对其进行优化,在获得良好的共轴成像质量下,再将其过渡到非共轴情况。

一般的裂隙灯显微镜都为偏心型非共轴系统,即共用前置物镜的光轴为主光轴,而后面伽利略系统、镜筒透镜及目镜的光轴均偏离主光轴,其优点是观察物体时立体感强,成像清晰宽阔,但是会引入新的像差(球差除外),即像差除了共轴光学系统的视场函数外,还会引入新的视场函数,如慧差引入新的跟视场有关的慧差,像散引入新的跟视场有关的像散,因此非共轴光学系统的像差与视场密不可分。若将图1中的弧矢面看作 X-Y 平面,则图 2 中沿 Y 轴上下对称分布的物点对光学系统不再对称,各点成像质量不同,而沿 X 轴分布的物点尚保持对称性^[10]。为保证整个视场图像清晰,应同时选取 +Y, -Y 轴上的物点进行像差校正,而不能与传统共轴系统那样只选取 +Y 方向上几个点。本文选取(0,0),(0,0.5),(0,1.0),(0,-0.5),(0,-1.0)及(-1.0,0),(-0.7,0)这 7 个相对孔径位置来进行像差校正。

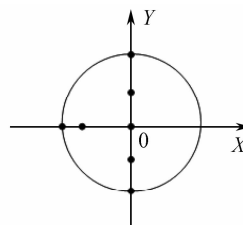


图 2 视场内物点分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of point distribution in the field

将伽利略望远镜与摄影物镜沿 Y 轴平移 12.5 mm,在视场中设置渐晕,添加新的操作数来控制跟视场有关的彗差、像散,经过一系列的优化之后,最终的数码裂隙灯显微镜的非共轴光学系统结构如图 3,共用前

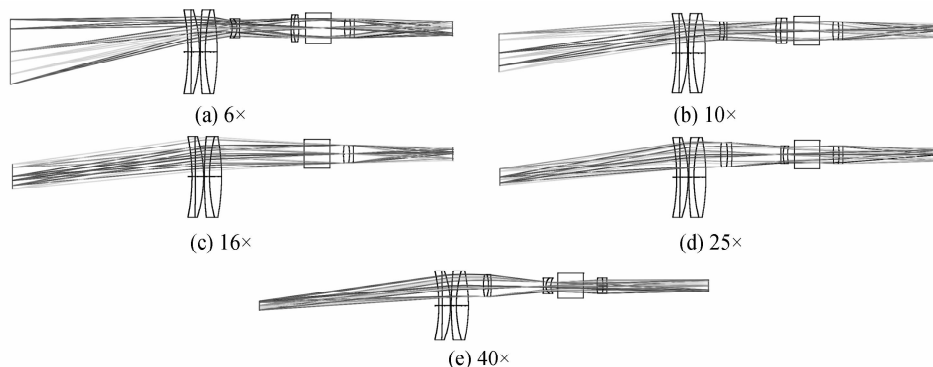


图 3 五档裂隙灯显微镜非共轴光学系统

Fig. 3 The optical structure of 5 magnifications of slit-lamp microscope

置物镜为双-双结构,双胶合玻璃组合为常用的 F2-ZK6 与 ZF3-K9,伽利略望远系统及摄影物镜都为双胶合透镜,玻璃组合都为 ZF2-K9.

图 4 为在五种放大倍数下对应的调制传递函数曲线图,可以看出,在基准倍率 16×时,位于空间频率 115 lp/mm 的全视场调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)值均大于 0.3,接近衍射极限;而在 6×,10×情况下,全视场的 MTF 值在 115 lp/mm 处约为 0.2,0.5 视场的 MTF 值在 0.3 以上;在 25×情况下,全视场的 MTF 值在 115 lp/mm 处处于 0.1~0.2 之间,0.5 视场的子午方向 MTF 值为 0.12,弧矢方向 MTF 值为 0.4,两者之间相差较大,说明还存在像散;40×时,全视场的子午方向 MTF 值下降明显,约为 0.15,衍射极限也不高.

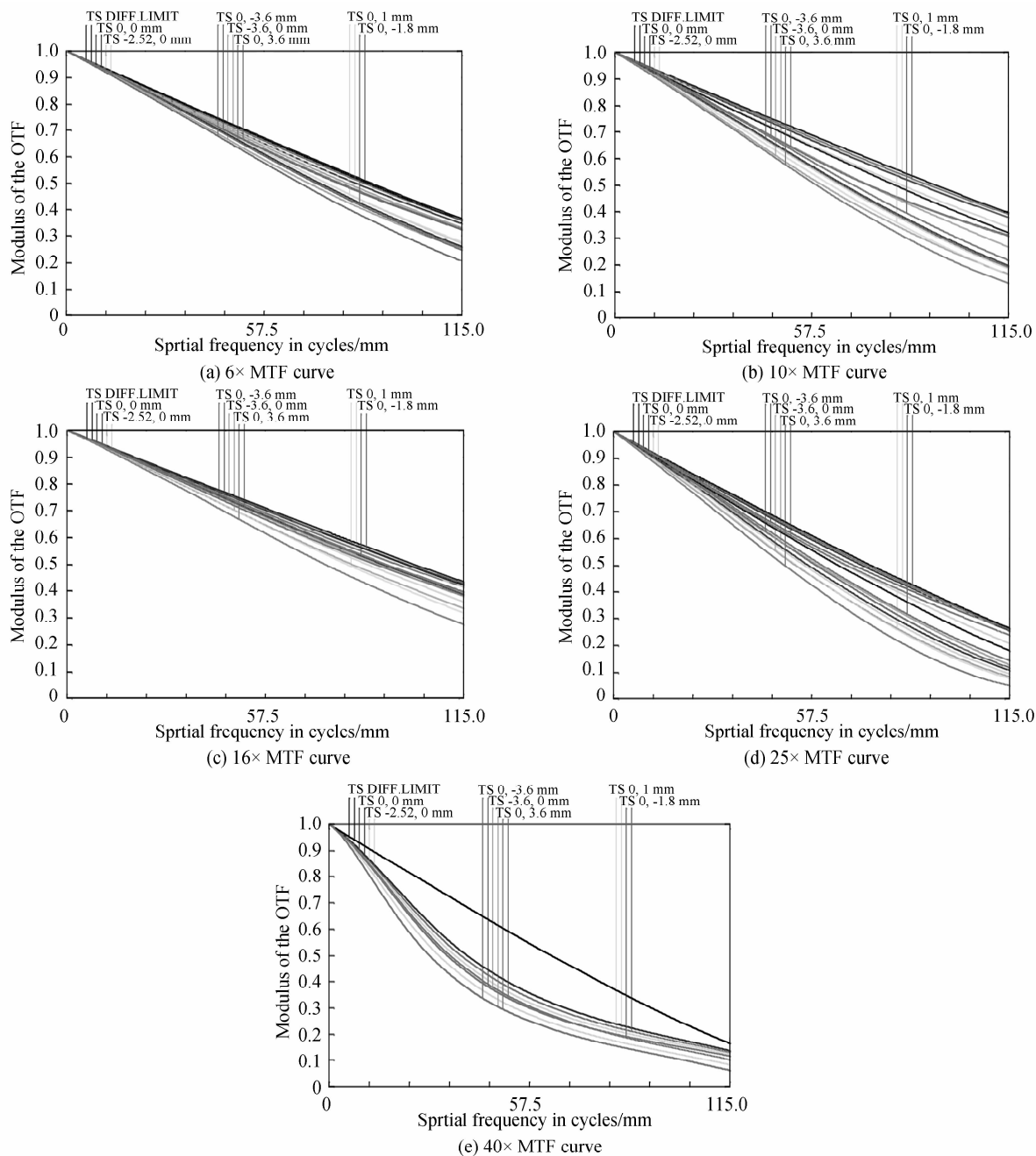


图 4 非共轴情况下 MTF 曲线图

Fig. 4 The MTF curve in non-coaxial

图 5 与表 5 为相应的在不同视场不同倍数下点列图和 RMS 值,其点的分布密集程度代表了像的能量分布,从图上和表上可以看出,不同倍率下的弥散斑大小基本上小于艾里斑,最大均方根半径分别为 2.562 μm ,2.457 μm ,2.951 μm ,4.281 μm ,9.948 μm ,对像质的影响在可接收范围内.

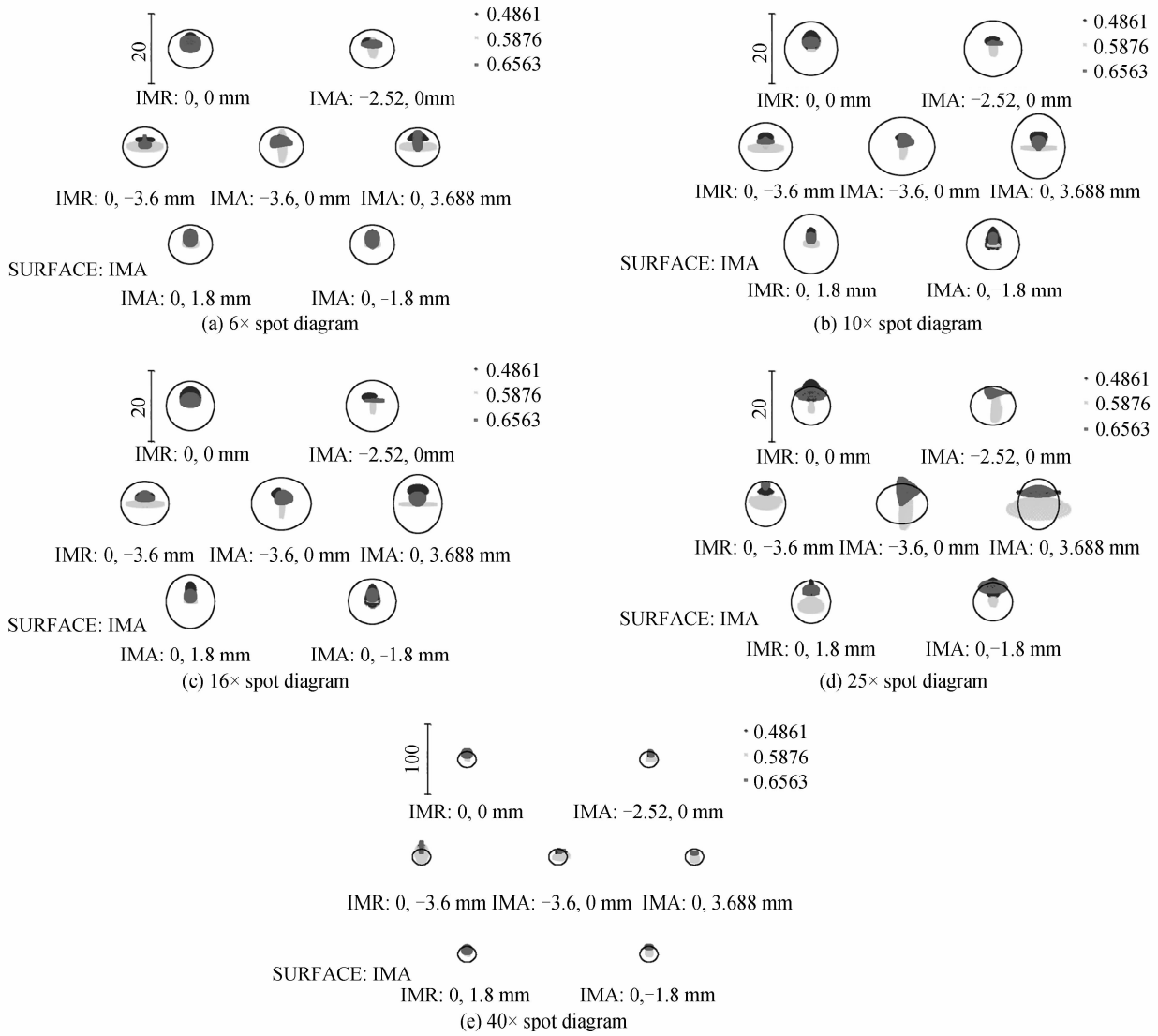


图5 非共轴情况下点列图

Fig. 5 The spot diagram in non-coaxial

表5 点列图中 RMS 值/ μm

Table 5 RMS values in spot diagram / μm

Field	6×	10×	16×	25×	40×
(0,0)	2.097	2.194	2.243	3.654	6.951
(0,1.8)	1.989	2.138	2.306	3.396	6.305
(0,3.6)	2.562	2.457	2.951	4.281	5.415
(0,-1.8)	1.860	1.995	1.912	3.574	7.386
(0,-3.6)	1.976	2.201	2.251	3.616	9.948
(-3.6,0)	2.271	2.256	2.427	3.960	7.615
(-2.52,0)	1.979	2.093	2.133	3.524	6.907

5 实验结果

将设计好的成像系统装配于如图 6 所示的整机系统上,调节光带的水平位置,其中心应在调焦棒中间位置,转动光源角度,拍摄人眼的效果如图 7 所示.可以看到,在合适的光源角度下,放大倍数为 6 \times ,10 \times ,16 \times 与 25 \times 的照片显示清晰,分辨率较高,色彩还原良好,而在 40 \times 的情况下视场亮度较低,但是总体而言,图像质量佳,符合临床诊断的要求.

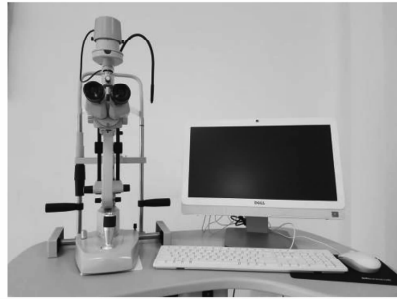


图6 整机系统

Fig. 6 The whole machine system

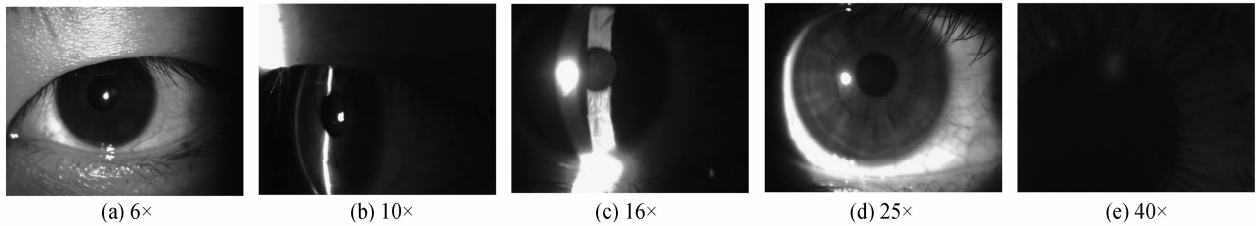


图7 不同倍率下实际拍摄效果

Fig. 7 The actual shooting effect of different magnifications

图8为 $40\times$ 情况下,使用数码裂隙灯拍摄国标分辨率板A5型图案情况,其分辨率范围为 $50\sim 200\text{ lp/mm}$,共有25个单元,每个单元均由等间距的横竖线条和斜线条排列而成.从图8可以看出,在第11个单元时,能看清楚四个方向上的线条,而在之后的第12、13个单元等,只能看清部分方向的线条,总体而言,分辨率较高.

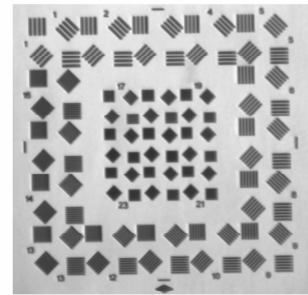


图8 不同倍率下实际拍摄效果

Fig. 8 Shooting effect of GB A5 resolution board

6 结论

利用光学设计软件Zemax设计了一套具有 $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ 与 $40\times$ 放大倍数的五档式数码裂隙灯显微镜光学系统.在分析传统体视裂隙灯显微镜的光学系统结构基础上,将数码型裂隙灯显微镜划分为共用前置物镜、伽利略望远镜、摄影物镜三部分.同时,研究了共用前置物镜、伽利略望远镜及摄影物镜的光学特性与技术指标要求,在选取了合适的透镜类型后,利用Zemax进行共轴系统优化,待成像质量良好后,将其过渡到非共轴情况,再进行优化.优化后显示在 $6\times$, $10\times$, $16\times$, $25\times$ 情况下系统MTF曲线值在空间频率为 115 lp/mm 处大于0.2, $40\times$ 时衍射极限较低.点列图显示不同倍率下的弥散斑大小基本小于艾里斑,最大均方根半径分别为 $2.562\ \mu\text{m}$, $2.457\ \mu\text{m}$, $2.951\ \mu\text{m}$, $4.281\ \mu\text{m}$, $9.948\ \mu\text{m}$,对像质的影响在可接收范围.实测结果表明,在五种放大倍数情况下,整体上照片显示清晰,分辨率较高,色彩还原良好,成像质量佳,符合临床诊断的要求.

参考文献

- [1] 吕帆. 眼视光器械学[M]. 2版. 北京:人民卫生出版社,2004:12-20.
- [2] 元吴慧. 裂隙灯显微镜及其在视光学中的应用[J]. 中国眼镜科技杂志,2013,(07):134-137.
- [3] CHEN De-qing, YE Feng-ming, LIN Zi-wen, *et al.* Design of digital imaging system for slit lamp microscope[J]. *Instrument Today*, 2014, **201**(103): 12.
陈德清,叶丰铭,林子文,等. 裂隙灯显微镜数位成像系统设计[J]. 科仪新知,2014,**201**(103):12.
- [4] WALTMAN S R, KAUFMAN H E. A new objective slit lamp fluorophotometer[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1970, **9**(4): 247-249.
- [5] ADOLF F F, HAI C, CHRISTOPH K H. Slit lamp laser doppler interferometer[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1993, **13**(4): 447-452.
- [6] HANS HOERAUF, CHRISTOPHER WIRBELAUER, CHRISTIAN SCHOLZ, *et al.* Slit-lamp-adapted optical coherence tomography of the anterior segment [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2000, **238**(1): 8-18.

- [7] WEI Bao-guo, SHEN Bo, WANG Wei-xing, *et al.* A slit-lamp-based eye image acquisition and processing system[J]. *Measurement & Control Technology*, 2001, **20**(1): 9-12.
卫卫国,沈波,王兴伟,等. 基于裂隙灯的外眼图像采集与处理系统[J]. 测控技术,2001,**20**(1):9-12.
- [8] CAI Yi-heng, SHEN Lan-sun. Design for slit-lamp microscope based on digital imaging system[J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, **23**(5): 48-56.
蔡轶珩,沈兰荪. 裂隙灯生物显微镜数字化成像系统设计[J]. 测控技术,2004,**23**(5):48-56.
- [9] HUANG You-ping. Optical design of microscopic imaging system for digital slit-lamp[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.
黄幼萍. 数码裂隙灯显微镜成像光学系统设计[D]. 福州:福建师范大学,2015.
- [10] LI Shi-xian, AN Lian-sheng. Design of a shared front-objective in a novel zoom stereoscopic microscope[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1996, **16**(3): 273-279.
李士贤,安连生. 连续变倍体视显微镜共用前置物镜的设计[J]. 北京理工大学学报,1996,**16**(3):273-279.
- [11] 王吉章. 光栏在连续变倍显微镜设计中的作用[J]. 光学技术,1986,(04):001.
- [12] XU Li-feng. Optical design of high-magnification zoom stereo microscope objective [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2012.
许利峰. 大变倍比连续变焦距提示显微镜物镜设计[D]. 长春:中国科学院大学,2012.
- [13] LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng. Geometrical optics, Aberrations, and Optic design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 220-221.
李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,2007:220-221.
- [14] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988.
- [15] LIU Ai-min, GAO Li-min, XIAO Mao-sen, *et al.* Integrated measurement system with Galileo telescope combined with cylindrical lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(11): 1112002.
刘爱敏,高立民,肖茂森,等. 伽利略望远镜与柱面镜组合式长焦综合测量系统[J]. 光子学报,2016,**45**(11):1112002.
- [16] XIE Zheng-mao, DONG Xiao-na, CHEN Liang-yi, *et al.* Design for special underwater photography objective lens with wide angle and large relative aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 891-895.
谢正茂,董晓娜,陈良益,等. 大视场大相对孔径水下专用摄影物镜的设计[J]. 光子学报,2009,**38**(4):891-895.