

# 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合 调焦系统\*

赵秋玲 王肇圻 全 薇 孙 强 母国光

(南开大学、天津大学联合研究院,南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

**摘 要** 设计了一个折/衍混合多色调焦系统,可用于哈特曼波前传感器测量不同波长下人眼的波像差. 系统由两片折射透镜和一个二元衍射面构成,焦距调整范围为  $-200 \sim 200$  mm. 系统性能达到衍射受限,在  $0.488 \sim 0.655 \mu\text{m}$  波长范围内,焦点色位移小于  $3 \mu\text{m}$ . 整个系统结构简单、紧凑,同哈特曼波前传感器相匹配,可用于普通人群眼波像差的测量.

**关键词** 哈特曼传感器;人眼波像差;折/衍混合;调焦系统

**中图分类号** **文献标识码** A

## 0 引言

在人类的长期进化过程中,眼睛得到了很大的发展. 生理解剖学和生物实验研究表明:人眼的光学系统是一个由非球面和梯度折射率变化的复杂光学系统<sup>[1]</sup>. 作为整体,人眼经长期进化已趋于完善. 然而作为个体的人眼并非理想的光学系统,个体人眼除受衍射极限和视锥细胞结构限制了它的分辨极限外,还因个体罹致的像差使其视力与人类整体的理想视力有很大的差距. 人眼波像差的测量对眼外科视力矫正手术、拓展人类视觉潜能方面具有极其重要的意义. 迄今,用于人眼波像差测量的方法有多种,大致可分为基于干涉理论的测量和基于光路追迹的测量<sup>[2,3]</sup>. 由于眼稳定性和参考平面的难以实现,用干涉理论测量像差在生理光学中难以应用. 现在测量像差的主要方法是以光路追迹理论为基础,间接测量波前相位. 二十世纪90年代德国海德堡大学的 Josef F. Bille 博士和梁俊忠博士提出用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器测量人眼波像差的技术,人眼的像差以 Zernike 项的形式较详细地表达出来,并结合自适应光学的应用,揭示了人眼高级像差对视力的严重影响<sup>[4-6]</sup>. 哈特曼传感器采用的是通过测量波前斜率,再经过适当的波前重构算法来完成波前测量,整个系统结构简单、紧凑,比干涉仪具有更强的对环境适应性.

梁俊忠等人利用 Hartman-Shack 波前传感器测量了正常人眼的像差并应用自适应光学技术矫正人眼的初级像差和高级像差,他们的研究表明通过对

高级像差的矫正,可以使人眼的高空间频率物的反差灵敏度函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)提高6倍<sup>[7]</sup>,由于研究采用的是单色光,所以只涉及单色像差;但 Yoon 和 William 使用白光对人眼进行测试时,发现矫正高级像差后的人眼高空间频率物的 CSF 只能提高2倍<sup>[8]</sup>,这是由于使用白光时,存在的色差阻碍了人眼视力的提高. 显然如果同时矫正单色像差和色差,人眼视觉将会得到更好的改善,因此测量不同波长下人眼的波像差亦具有极为重要的意义. 而目前用哈特曼传感器对人眼波像差的研究均基于单色波长. 若配置一个复消色差的调焦系统,采用多色光源,哈特曼传感器也可用来测量人眼的波色差. 基于这种需要,本文设计了一种用于复色哈特曼传感器人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统,调焦系统仅含有两个折射透镜和一个二元衍射面,采用普通玻璃,结构简单,性能良好,调整范围为  $-500$  度到  $+500$  度,可用于普通人群眼波色差的测量.

## 1 折/衍混合调焦系统设计

用哈特曼波前传感器测量人眼波像差的系统结构如图1,哈特曼传感器主要由微透镜阵列和 CCD 构成,  $M_1$  为反射镜,  $M_2$  为半透半反镜,调焦系统位于待测人眼和哈特曼传感器之间. 其基本原理是使一激光束聚焦在人眼视网膜上形成像点,该像点经过人眼屈光介质反射出的光束由微透镜阵列成像,该微透镜阵列将入射波前分割成子波前阵列,通过测量各个子波前的相位斜率,经波前重构算法重构出实际波前,从而可以得到人眼的各种像差. 由于不同的非正常视力的人眼存在不同程度的离焦(近视或远视),这将导致从光源出射的平行光束不能成像在视网膜上,从而使反射到微透镜阵列上的光强变弱,信噪比降低,不能准确地得到待测波前信息.

\*天津市科技公关重点项目和教育部南开大学、天津大学科技合作基金资助项目

Tel: 022-23508332 Email: zqlsd@eyou.com

收稿日期:2003-04-24

若通过调焦系统来补偿不同人眼存在的离焦, 便可使人射光束在视网膜上聚焦成像, 从而对不同的个体眼, 均可获得到较高的信噪比, 同时由调焦系统可以得到待测人眼被补偿的离焦量. 因此该调焦系统对于哈特曼传感器测量人眼波像差具有非常重要的意义.

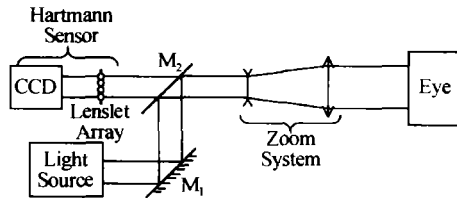


图 1 用哈特曼传感器测量人眼波像差的系统结构  
Fig. 1 The system structure for measurement of wavefront aberrations of the human eye by using a Hartmann sensor

对系统的设计参量做如下考虑: 根据哈特曼传感器的光束口径来设计调焦系统的入射光束口径; 一般人眼在暗视觉时的光瞳约为 8 mm 左右, 因此设计该调焦系统的出射光束口径最大为 8 mm, 以确保从人眼视网膜反射的光束可同哈特曼传感器内的微透镜阵列相匹配; 波长选取 0.488 μm, 0.514 μm, 0.655 μm; 为满足 -500 度到 +500 度的人眼视力调整范围, 焦长变化范围应在 -200 ~ 200 mm.

利用 ZEMAX 光学设计软件, 首先加入两片折射透镜, 选用普通 K9 玻璃, 设计单色调焦系统. 为缩小镜筒长度, 前组选用负透镜. 为确保在调焦过程中系统出射光束口径最大为 8 mm, 在准直光路情况下, 合理设定两折射透镜间隔, 使出射光束口径约为 6.5 mm. 加入理想透镜, 优化各面曲率校正球差. 若将仅由两片折射透镜构成的变焦系统用于多色情况, 则存在较大的色差和色球差. 在传统的光学设计中, 为校正色差, 一般采用双胶合透镜, 这将不可避免地增加系统的复杂程度. 在现代光学设计中, 二元光学元件因为其独特的色散特性, 已表现出折射元件不可替代的优势<sup>[9,10]</sup>. 二元元件具有大的负向色散特性, 可同折射元件组合构成消色差系统; 而且二元元件是直接制作在折射透镜上的浮雕结构, 可有效地简化系统结构, 减轻重量. 为此考虑在系统中加入二元面来校正色差.

## 2 设计结果和讨论

优化后系统的结构如图 2 所示, 正透镜的前表面为二元衍射面, 筒长为 60 mm, 焦长从 -200 ~ 200 mm 范围内变化时, 后组移动距离为 32 mm. 其中 (a) 是光束准直出射时的结构, (b)、(c) 分别表示焦距为 -200 mm 和 +200 mm 时的结构. 图 3 给出了光束准直情况下折射系统和加入二元面系统的焦点色位

移情况. 由图 3(a) 可知, 未加二元面时系统的最大

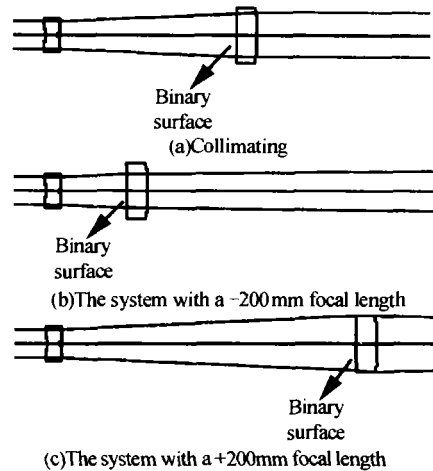


图 2 用于哈特曼人眼波像差测量的调焦系统结构  
Fig. 2 The zoom system for measurement of wavefront aberrations of the human eye by using a Hartmann Sensor

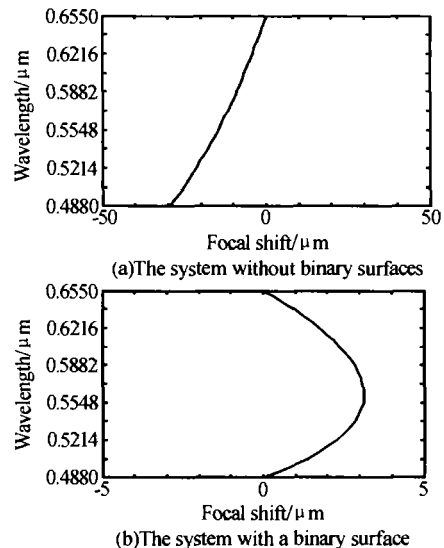


图 3 准直系统的焦点色位移  
Fig. 3 The chromatic focal shift of the collimation system

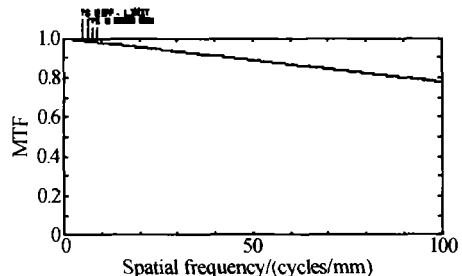


图 4 准直系统的调制传递函数曲线  
Fig. 4 The modulation transfer function (MTF) of the collimation system

系统中采用的二元衍射面为旋转对称结构, 其相位函数一般可以表示为

$$\varphi(r) = A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + \dots \quad (1)$$

式中系数  $A_1$  为二次相位系数, 决定该二元面的近轴光焦度, 可用于校正系统色差;  $A_2$ 、 $A_3$  等为非球面系数, 可用于校正系统单色像差. 由于该系统用于准直光入射, 不存在轴外像差, 所以在优化中仅取  $A_1$  来校正系统的色差和色球差. 该二元面的环带周期数随径向坐标的变化关系为

$$-2\pi n = A_1 r^2 \quad (2)$$

式中  $n$  为周期数, 第  $n$  个周期的径向线宽可以表示为

$$\Delta_n = r_n - r_{n-1} = (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \sqrt{-2\pi/A_1} \quad (3)$$

可以看出随表面径向坐标的增加, 周期线宽  $\Delta$  是减小的, 即越靠近孔径边缘, 环带线宽越小, 线频率越大. 因此孔径边缘处的线宽决定了该二元面的最小特征尺寸, 从而决定了该二元面对制作工艺的要求.

图5给出了二元衍射面的面型参量曲线. 其中曲线  $a$  表示线频率随元件径向坐标的变化, 曲线  $b$  表示相位随元件径向坐标的变化. 由曲线  $a$  可知, 在孔径边缘处的线频率为 1.84 periods/mm, 对应最小线宽为 543  $\mu\text{m}$ . 当选择每周期的刻蚀台阶数为 8 时, 对应衍射效率为 95%, 此时二元面的最小特征尺寸为 67.9  $\mu\text{m}$ . 这样的面型根据目前的技术是完全可以制作的.

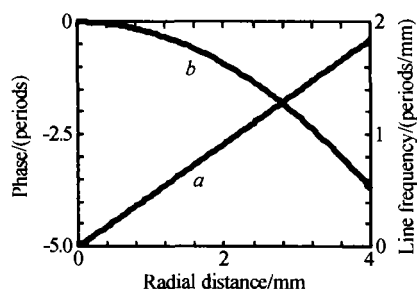


图5 二元衍射面的线频率( $a$ )和相位( $b$ )随元件径向坐标的变化

Fig. 5 The line frequency ( $a$ ) and phase ( $b$ ) of the binary surface vs. the aperture

### 3 结论

基于利用哈特曼波前传感器测量不同波长下人眼波像差的需要, 设计了折/衍混合多色调焦系统. 该系统置于哈特曼传感器和人眼之间, 在对有不同程度的近视或远视的非正常眼进行测量时, 通过该

系统的调焦, 使测试光束均能聚焦在视网膜上, 从而对不同的个体眼, 均可获得较高的信噪比. 该调焦系统由两片折射透镜和一个二元衍射面构成, 采用普通 K9 玻璃. 焦长变化范围为  $-200 \sim 200$  mm, 可用于离焦在  $-500$  度到  $+500$  度范围内的非正常眼. 准直情况下, 系统性能达到衍射受限; 在  $0.488 \sim 0.655$   $\mu\text{m}$  波长范围内, 焦点的色位移小于 3  $\mu\text{m}$ . 整个系统结构简单、紧凑, 可以很好地同哈特曼波前传感器相匹配.

### 参考文献

- 1 赵秋玲, 王肇圻, 张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用. 光子学报, 2002, **31**(11): 1409 ~ 1412  
Zhao Q L, Wang Z Q, Zhang C S. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1409 ~ 1412
- 2 Howland H C, Howland B. A Subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am*, 1977, **67**(11): 1508 ~ 1518
- 3 Southwell W H. Wavefront estimation from wave-front slope measurements. *J Opt Soc Am*, 1980, **70**(8): 998 ~ 1006
- 4 Liang Junzhong, Grimm B, Goelz S, et al. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of Hartmann-Shack wave-front sensor. *J Opt Soc Am (A)*, 1994, **11**(7): 1949 ~ 1957
- 5 Liang Junzhong, Westheimer W. Optical performance of human eyes derived from double-pass measurements. *J Opt Soc Am (A)*, 1995, **12**(7): 1411 ~ 1416
- 6 Liang Junzhong, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am (A)*, 1997, **14**(11): 2873 ~ 2883
- 7 Liang Junzhong, Williams D R, Miller T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am (A)*, 1997, **14**(11): 2884 ~ 2892
- 8 O'Brien T. Six-month results of the multi-center wavefront LASIK trial. ASCRS 2002, Philadelphia, Pennsylvania
- 9 Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design. *Appl Opt*, 1995, **34**(14): 2452 ~ 2461
- 10 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等著. 二元光学. 北京: 国防工业出版社, 1998. 181 ~ 210  
Jin G F, Yan Y B, Wu M X, et al. *Binary Optics*. Beijing: Defence and Industry Press, 1998. 181 ~ 210

## Refractive/diffractive Zoom System for Measurement of Wave Aberrations of the Human Eye with the Use of a Polychrome Hartmann Wave-front Sensor

Zhao Qiuling, Wang Zhaoqi, Quan Wei, Sun qiang, Mu Guoguang

*United Academy of Nankai University and Tianjin University, Institute of Modern Optics, Nankai University,*

*The Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071*

Received date:2003-04-24

**Abstract** For need of measurement of wavefront aberrations of the human eye by using a Hartmann wave-front sensor in different wavelength, one hybrid refractive/diffractive polychrome zoom system was designed. The system consists of two refractive lenses and one binary optical surface, and the focal length can be adjusted from -200 mm to 200 mm. In collimation, the chromatic focal shift is less than 3  $\mu\text{m}$  in wavelength range between 0.488  $\mu\text{m}$  and 0.655  $\mu\text{m}$ , with the diffractive limited performance. With simple and compact structure, the zoom system can be used in general crowd for measurement of wave aberrations of the human eye in different wavelength.

**Keywords** Hartmann sensor; Wave aberration of the human eye; Refractive/diffractive; Zoom system



**Zhao Qiuling** was born in 1976, received her B. S. degree from Jinan University in 1998 and her M. S. degree from Qufu Normal University in 2001. At present, she is a doctor student in the Institute of Modern Optics, Nankai University. Her research interests include eye optics, binary optics, and optical design.