

文章编号: 0258-7025(2010)00-0000-06

# 基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪

杨金生<sup>1,2,3</sup> 饶学军<sup>1,2</sup> 饶长辉<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 根据哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)传感器工作的基本原理设计了一种角膜地形图测量仪,并在此基础上建立了一套基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量系统。该系统的工作原理是使用会聚光束照射到角膜的外表面,通过哈特曼-夏克传感器采集包含角膜面形信息的角膜表面反射光,而后通过角膜地形图复原计算获得角膜地形图数据。详细介绍了该仪器用于角膜测量的操作过程,并对该测量仪器的面形复原精度进行了测试。结果显示,与 Zygo 干涉仪的测量结果相比,角膜地形图测量仪复原面形的误差低于  $0.0818 \lambda$  均方根(RMS)。最后使用该仪器实际测量了健康成年人眼角膜,获得了实际角膜地形图的数据。

**关键词** 医用光学;角膜地形图;哈特曼-夏克传感器;自适应光学

**中图分类号** O436;R770.4;TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0826

## A Corneal Topography Based on Hartmann-Shack Sensor

Yang Jinsheng<sup>1,2,3</sup> Rao Xuejun<sup>1,2</sup> Rao Changhui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup> The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A methodology for designing corneal topographer based on Hartmann-Shack sensor is described in this paper. Then, applying this method, an instrument is developed for measurement of corneal topography. In the system, the focus of an objective lens is precisely positioned on cornea's curve center. Wavefront reflected from the surface of cornea can be measured by the H-S sensor which is conjugated to the cornea plane. Then, the surface data of cornea can be acquired by algorithms for reconstructing. The repeatability and precision of the instrument are also validated. And the difference between errors measured by the instrument and those measured by ZYGO interferometer is less than  $0.0818 \lambda$  (RMS). Data of human corneal topography was also measured.

**Key words** medical optics; corneal topography; Hartmann-Shack sensor; adaptive optics

## 1 引言

角膜形状的测量一直是视光学研究中的重点之一,如何准确测出角膜地形图,对于视光学系统的研究和眼外科疾病的诊断与治疗有着重要意义<sup>[1]</sup>。角膜是人眼光学器官的最外面一层,是人眼屈光成像的最重要器官之一,其折射能力约占人眼总折射能力的  $2/3 \sim 3/4$ 。现在开展的眼外科角膜修正术也都是基于这一点,通过准分子激光重塑角膜形状,改变角膜的屈光能力以达到恢复正常视力或者矫正视力的效果。在这类外科手术的过程中不仅需要测量人眼像差的数据,角膜表面形状也是手术中必不可

少的数据之一。目前普遍使用的基于 Placido 盘角膜地形图测量仪,由于中央部分透明区域的存在,使得角膜中央小区域的形状无法测量;另外,它仅能测量沿着 Placido 圆环垂直方向的角膜曲率变化,对于与圆环切向的曲率变化却无能为力<sup>[2]</sup>。

哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)传感器已经在自适应光学、激光光束诊断等领域有广泛的应用<sup>[3~5]</sup>。近年来随着哈特曼-夏克传感器在人眼像差测量上的成功应用,哈特曼-夏克传感器的应用扩展到了眼科光学测量的领域,体现出了哈特曼-夏克传感器在人眼测量上应用的广阔前景<sup>[6~8]</sup>。在人眼

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-08

作者简介: 杨金生(1980—),男,博士研究生,主要从事哈特曼-夏克传感器方面的研究。E-mail: jinsyang@163.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,主要从事自适应方面的研究。E-mail: chr@ioe.ac.cn

像差仪的基础上,探索开发一种新型的基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量系统,为眼科诊断和治疗疾病提供精确可靠的角膜表面信息就成为开展哈特曼-夏克传感器新应用研究的重要课题<sup>[9]</sup>。

## 2 测量方法

### 2.1 哈特曼-夏克传感器的基本工作原理

哈特曼-夏克传感器的基本结构如图 1 所示,通常由微透镜阵列和位于微透镜阵列焦平面上的光电探测器组成<sup>[10]</sup>,大多数情况下光电探测器使用的是电荷耦合器件(CCD)相机。利用微透镜阵列对入射波前进行子孔径分割,每个子孔径内的光信号聚焦在其后的 CCD 上,由 CCD 上的光能分布以及波前复原算法重构出入射波前。整个复原过程包括三步:质心计算、斜率计算、波前复原<sup>[3]</sup>。

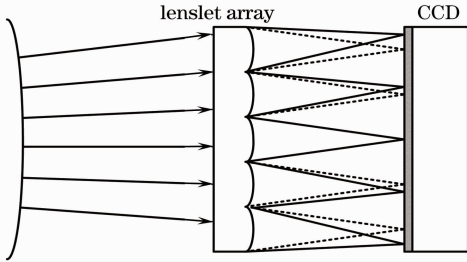


图 1 哈特曼-夏克传感器的基本结构示意图

Fig.1 Basic layout of Hartmann-Shack sensor

#### 2.1.1 质心计算

哈特曼-夏克传感器主要是根据关系式

$$\left\{ \begin{aligned} x_i &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm}} \\ y_i &= \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{nm}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

计算光斑的位置  $(x_i, y_i)$ , 探测全孔径的波面误差信息。每个子孔径焦面的探测区域为  $M \times N$ 。式中  $m = 1 \sim M, n = 1 \sim N$  为子孔径映射到 CCD 光敏靶面上对应的像素区域,  $I_{nm}$  是 CCD 光敏靶面上第  $(n, m)$  个像素接收到的信号,  $x_{nm}, y_{nm}$  分别为第  $(n, m)$  个像素的  $x$  坐标和  $y$  坐标。

#### 2.1.2 斜率计算

入射波前的波前斜率  $g_{xi}, g_{yi}$  为

$$g_{xi} = \frac{\Delta x}{\lambda f} = \frac{x_i - x_0}{\lambda f}, g_{yi} = \frac{\Delta y}{\lambda f} = \frac{y_i - y_0}{\lambda f}, \quad (2)$$

式中  $(x_0, y_0)$  为标定图像的质心位置,  $(x_i, y_i)$  为测

量波前形成图像的质心位置,  $i$  为对应的子孔径序号,  $\lambda$  为使用光波长,  $f$  为微透镜阵列的焦距。

#### 2.1.3 波前复原

哈特曼-夏克传感器最常用的波前复原方法是模式法。模式法中被复原波前  $w(x, y)$  常常用一组泽尼克多项式来描述

$$w(x, y) = a_0 + \sum_{k=1}^K a_k Z_k(x, y), \quad (3)$$

式中  $a_0$  为平均相位波前,  $a_k$  为第  $k$  项泽尼克多项式系数,  $Z_k$  为第  $k$  阶泽尼克多项式,  $K$  是所取的泽尼克多项式的阶数。波前的局部斜率可以表示为

$$\begin{cases} G_x = \frac{\partial w}{\partial x} = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \\ G_y = \frac{\partial w}{\partial y} = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \end{cases}, \quad (4)$$

将(4)式改写为矩阵的形式可以表示为

$$\mathbf{G} = \mathbf{D}\mathbf{A}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{G}$  为斜率矩阵,  $\mathbf{A}$  为泽尼克系数矩阵,  $\mathbf{D}$  为泽尼克多项式的偏导矩阵。(5)式的最小二乘解可以用广义逆  $D^+$  来表示

$$\mathbf{A} = D^+ \mathbf{G}. \quad (6)$$

只要求出  $D^+$ , 就可以解出泽尼克系数  $\mathbf{A}$ , 而后将所得的泽尼克系数代入(3)式, 得到复原波前  $w(x, y)$ 。

### 2.2 哈特曼-夏克传感器角膜地形图测量仪原理

根据生物医学的统计数据,成年人眼角膜外表面的基本形状是平均曲率半径为 7.8 mm 左右的非球面。哈特曼-夏克传感器角膜地形图测量仪的基本测量原理如图 2 所示。平行光经过聚焦透镜聚焦后的会聚光束照射到角膜的外表面上, 并且角膜的平均曲率中心与聚焦透镜的焦点重合, 如果角膜为一个标准的球面, 根据反射定律, 反射光线将按照入

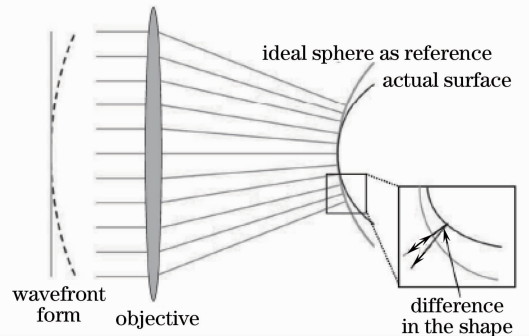


图 2 基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪的基本光学原理

Fig.2 Optical principle behind the corneal elevation measurement using a Hartmann-Shack sensor

射光线的方向原路返回,由于角膜形状并非标准球面,因此,经过角膜反射后的波前的形状发生了改变。而产生此畸变波前的原因恰恰是角膜表面的非球面形性质。用哈特曼-夏克传感器接收和采集畸变波前的信息,形成一个有像差的波前产生的点阵。再利用波前处理机进行质心计算、波前重构可以复原出畸变的波前。角膜的面形信息就包含在畸变的波前信息之中。

根据图 3 简单的几何关系可知,基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪测量角膜的面积与聚焦透镜的数值孔径  $d_{NA}$  密切相关。满足关系式

$$\overline{AB} = 2r_0 \cdot d_{NA}, \quad (7)$$

式中  $\overline{AB}$  为测量角膜区域的直径,  $r_0$  为角膜的平均曲率半径。

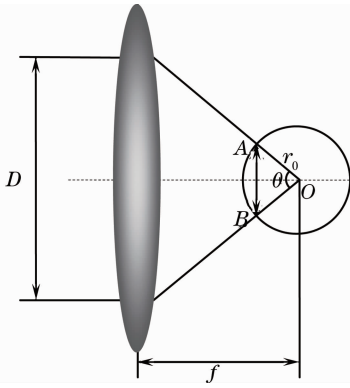


图 3 测量角膜区域与聚焦透镜数值孔径的对应关系

Fig. 3 Geometry of the calculation of the field measured on the cornea

基于原理,设计哈特曼-夏克传感器角膜地形图测量仪的基本结构如图 4 所示。由波长为  $0.78 \mu\text{m}$  的半导体激光器 S1 发出的激光经过由透镜 L1, L2 和针孔 PH1 组成的空间滤波器形成平行光束经过平面反射镜 M1 转折后经分光镜 BS1, BS2, BS3, BS4 到达聚焦物镜 L5。经过 L5 聚焦后照射到角膜的外表面会聚波前被角膜部分反射,反射后的光线反向经过物镜 L5 后穿过分光镜 BS4,经分光镜分束后的透射光经由透镜 L6, L7 组成的缩束系统缩束后被摆放在与角膜外表面共轭的哈特曼-夏克传感器采集,采集完成后将数据传输到波前处理机,经过波前处理复原出被测波前进而得到角膜地形图。其余结构主要完成三个功能。第一,在人眼的视场形成一个点目标像,视目标通道完成该功能,主要由视目标 S2,透镜 L4, BS2, BS4 和物镜 L5 组成;第二,将人眼瞳孔成像在 CCD 相机上,瞳孔成像通道完成该功能,主要由人眼 O,物镜 L5, BS4, BS3, 瞳孔成

像透镜 L8 和成像 CCD 相机 C2 组成;第三,采集人眼角膜后向反射光的一部分形成远场焦斑,用于角膜的精确对准,由点扩散函数 (PSF) 通道来完成该功能,该通道由 CCD 相机 C1, L3, BS1, BS4, L5 和人眼 O 组成。

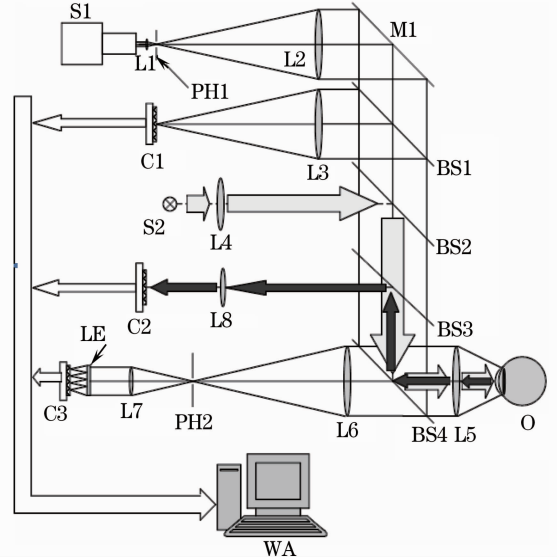


图 4 哈特曼-夏克传感器角膜地形图测量仪结构示意图

Fig. 4 Structure of Hartmann-Shack sensor corneal topography

### 2.3 角膜地形图测量仪的工作步骤

角膜地形图测量仪器中主要器件的情况如下:激光器为波长为  $0.78 \mu\text{m}$  的半导体激光器,聚焦透镜 L5 使用的是 Leica F1.0 照相镜头,其余透镜均为光学像差较小的双胶合透镜。哈特曼-夏克传感器中使用的是子孔径方形排布的微透镜阵列,其基本参数是子孔径数目为  $48 \times 48$ ,子孔径大小为  $0.2 \text{ mm}$ ,焦距为  $4 \text{ mm}$ 。

在工作之前,系统需要先通过标定环节以消除系统的加工及装配误差。理论上,只要在系统的光线出射端放置标准的球面反射镜,使用角膜地形图测量仪内的哈特曼-夏克传感器记录此时的光斑阵列作为系统的面形复原的参考图像,就可以消除系统误差。本仪器标定中使用的是曲率半径  $R = 8.365 \text{ mm}$  的球面反射镜。

角膜地形图测量仪工作时主要的调节过程是将人眼的视轴方向与系统的光轴方向重合,调节完成后,采集角膜反射波前信息,并且将所得信息代入角膜地形图复原程序获得角膜地形图数据。实际操作过程是通过以下几步来完成的:

第一步,将被测者的下巴置于托头架的横梁上,调节托头架的位置,直到被测者的视场里出现视目

标的像。

第二步,以瞳孔成像通道输出的图像为依据,调节被测眼的位置,使瞳孔像处于 CCD 靶面的中央区域。

第三步,由于透镜 L6 和 L7 组成的缩束系统中,焦点位置设置有拦光光阑 PH2,该光阑可以遮挡大部分系统杂散光。当被测物体中心轴与系统的光轴偏差较大时,该光阑同样可以遮挡这部分信号光。所以,根据哈特曼-夏克传感器输出的点阵的情况可以获得更精确的对准。

第四步,由于角膜的横向偏移会导致复原波前中彗差的产生,纵向偏移会导致复原波前中离焦的产生,因此结合 PSF 通道输出的远场焦斑的形状和传感器复原的波前信息,横向调节被测人眼的位置,直到  $x, y$  方向的彗差变得最小,再纵向调节被测人眼的位置,直致离焦变得最小,从而获得最终的精确对准。

第五步,当对准结束后,立即采集传感器输出的点阵图像,完成数据采集过程。

第六步,将采集所得点阵图像代入角膜面形复原程序,获得角膜地形图数据。

## 3 测量结果

### 3.1 模拟角膜测量结果

为了验证角膜地形图测量仪的基本性能,使用该测量仪多次测量两个不同的模拟角膜。模拟角膜是使用 K9 玻璃加工的一个高度为 20 mm,直径为

10 mm 的圆柱,其中的一个端面被加工成球面。1 号模拟角膜球端面的曲率半径为 8.12 mm,2 号模拟角膜的曲率半径为 7.56 mm。这两个模拟角膜在使用之前,面形情况通过 Zygo 干涉仪做过精确的测量。

角膜地形图测量仪的测量精度是通过将角膜地形图测量仪测量所得的结果与干涉仪的测量结果对比获得的。在使用角膜地形图测量仪测量模拟角膜面型的时候,每次测量连续采集 50 帧图像,以 50 帧图像的平均作为最终面形复原计算的图像代入面形复原程序。而后,分别将 1 号和 2 号模拟角膜的测量结果与干涉仪的测量结果进行对比,两个系统的测量结果都去除了离焦像差,最终结果如图 5 所示。图中等高线的间距为  $0.2\lambda$ ,图 5(a)为角膜地形图测量仪测量 1 号模拟角膜的面形情况,图 5(b)为干涉仪测量 1 号模拟角膜的面形情况,图 5(c)为两种不同测量仪器测量结果的偏差,图 5(d)~(f)为 2 号模拟角膜的对应数据。结果显示,1 号模拟角膜分别使用干涉仪和角膜地形图测量仪这两种不同测量方法得到的面形误差的最大峰谷(PV)值分别为  $3.9401\lambda$  和  $3.8986\lambda$ ,均方根(RMS)值分别为  $0.8188\lambda$  和  $0.8167\lambda$ ,两者测量偏差的 PV 值为  $0.4576\lambda$ ,RMS 值为  $0.0818\lambda$ ;2 号模拟角膜使用两种不同测量方法得到的面形误差的 PV 值分别为  $3.3224\lambda$  和  $3.2691\lambda$ ,RMS 分别为  $0.6564\lambda$  和  $0.6290\lambda$ ,两者测量偏差的 PV 值为  $0.4096\lambda$ ,RMS 值  $0.0664\lambda$ 。

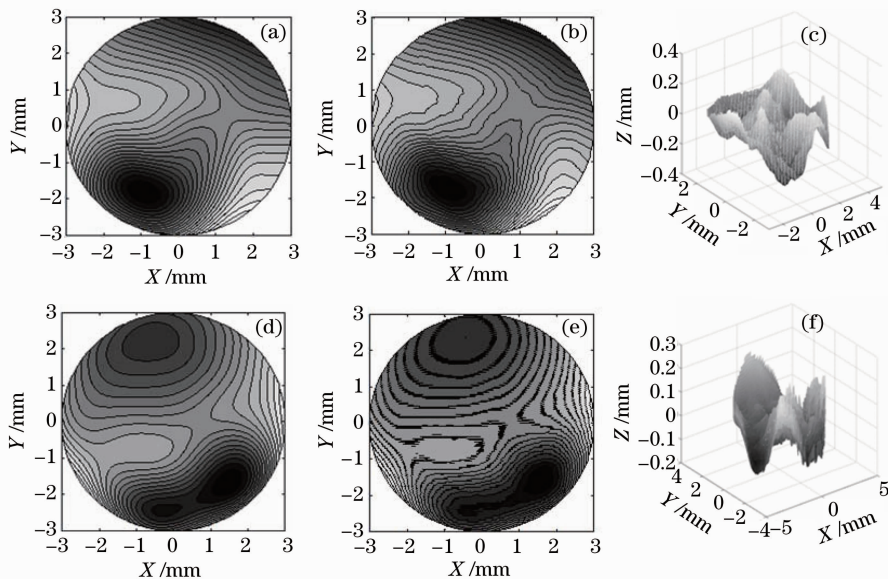


图 5 模拟角膜面形测量结果

Fig. 5 Surface errors of corneal model



### 3.2 实际人眼测量结果

在测量实际人眼过程中,对 LX 的双眼,TJL,YJS 的右眼分别进行了测量。三个人的年龄分别为 25,24 和 29 岁,并且三个人均未做过角膜修正手术和配戴过隐形眼睛。在测量角膜地形图之前,使用哈特曼-夏克人眼像差仪对这 4 只眼的像差情况进行了测量,这 4 只眼睛的屈光和散光的情况为:LX(左眼) $(-3.8/-0.5) \times 16^\circ$ ,LX(右眼) $(-4.6/-0.4) \times 5^\circ$ ,TJL $(-4.9/-1.0) \times 3^\circ$ ,YJS $(-3.4/-1.45) \times 175^\circ$ 。在使用角膜地形图测量仪测量实际

角膜的时候,每次测量连续采集 50 帧图像,从 50 帧图像中挑选出相对稳定并且点阵齐全的 20 帧图像,将这 20 帧图像的平均结果作为面形复原计算的图像代入面形复原程序。在面形复原的结果中去除了离焦像差,最终的测量结果如图 6 所示,图中等高线的间距为  $1\lambda$ 。图 6(a) 为测量 TJL 右眼时传感器输出的点阵情况,图 6(b) 为 LX 左眼的角膜面形,图 6(c) 为 LX 右眼的角膜面形,图 6(d) 和图 6(e) 分别为 TJL 和 YJS 的右眼角膜面形。

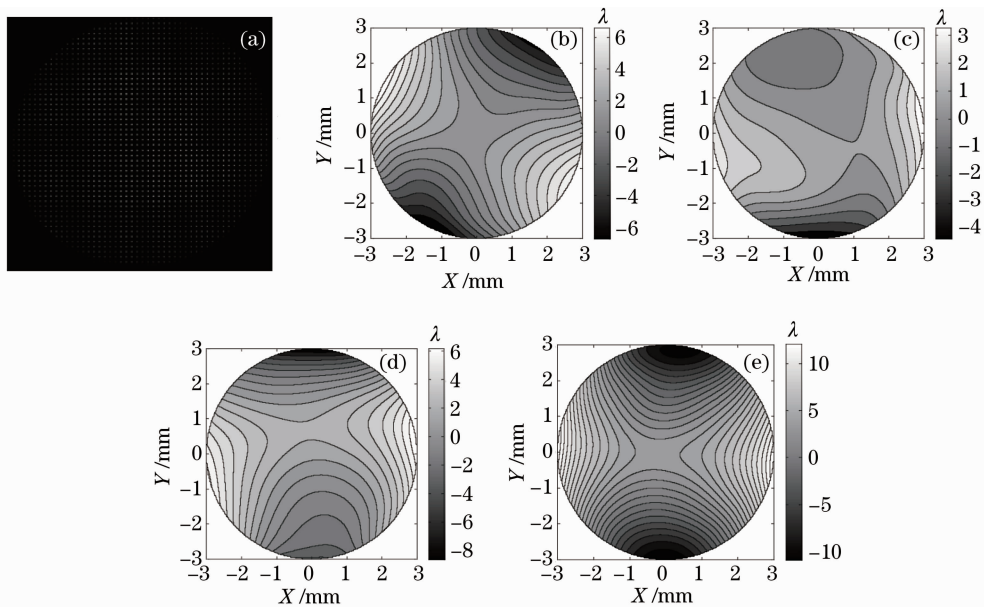


图 6 实测人眼角膜面形的情况

Fig. 6 Surface errors measured across the central 6 mm of the cornea for four subjects

## 4 讨 论

角膜地形图测量仪中,聚焦透镜的像质将对角膜测量的结果产生重要影响,另一个影响测量精度的因素是人眼视轴与系统光轴的对准情况。使用角膜地形图测量仪,对自身的像差进行了测量,测量结果显示系统的主要像差是 PV 值为  $5\lambda$  左右的球差,可以肯定这个像差主要来源于照相镜头 L5。虽然通过球面反射镜的标定可以消除大部分的系统像差,但是系统像差过大仍然会对系统的测量精度产生影响。如果使用像差更小的聚焦透镜代替照相物镜,相信系统的测量精度可以进一步提高。另外,通过对比两次测量同一模拟角膜的结果显示,两次测量结果之间误差的主要像差成分为彗差,这说明两次测量时模拟角膜的轴线没有互相重合,从而导致了离轴像差的存在,这就表明测量仪在使用时光轴对准的精度会对测量精度产生不可忽略的影响。聚焦透镜像质对系统测量精度的影响以及具体如何减

小角膜横向偏移对测量结果的影响都是需要进一步探讨和研究的问题。

## 5 结 论

设计了一种基于哈特曼-夏克传感器的角膜地形图测量仪,并且通过模拟角膜对系统的性能进行了测试。最后,实际测量人眼角膜的面形情况,得到了角膜地形图数据。通过对测量所得模拟角膜的结果与干涉仪的测量结果进行对比发现,角膜地形图测量仪的测量精度达到  $0.064 \mu\text{m}(\text{RMS})$ 。

**致谢** 感谢姜文汉院士对本文的修改,感谢胡昇云、邓继江对实验提供的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 P. Artal, A. Guirao, E. Berrio *et al.*. Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye[J]. *J. Math. Imaging Vision*, 2001, 1: 1~8

- 2 Yobani Mejia-Barbosa, Daniel Malacara-Hernández. A review of methods for measuring corneal topography[J]. *Optometry and Vision Science*, 2001, **78**(4): 240~253
- 3 Shen Feng, Jiang Wenhan. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 666~671  
沈 锋,姜文汉,夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 666~671
- 4 Dan Liu, Hujie Huang, Bingqiang Ren *et al.*. Scanning Hartmann test method and its application to lens aberration measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 725~728
- 5 Hu Xinqi, Yu Xin, Zhao Dazun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating Hartmann-Shack wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1414~1418  
胡新奇,俞 信,赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼-夏克波前传感精度的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1414~1418
- 6 Ling Ning, Zhang Yudong, Rao Xuejun *et al.*. Measurement and correction in time of high order aberrations[C]. *Optics and Optical Engineering—Processing of Congratulation for Wang Daheng Academician's 90 Birthday*, Beijing: Science Press, 2005. 73~89  
凌 宁,张雨东,饶学军 等. 人眼高阶像差的测量和实时校正[C]. *光学与光学工程——庆祝王大珩院士诞辰 90 周年学术论文集*, 北京: 科学出版社, 2005. 73~89
- 7 Chen Zihui, Ling Ning, Rao Xuejun *et al.*. A test of repeatability of human eye aberration measuring instrument with Hartmann sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6): 5~8  
陈志辉,凌 宁,饶学军 等. 人眼像差哈特曼测量仪的重复性测试[J]. *光电工程*, 2004, **31**(6): 5~8
- 8 Liang Junzhong, Bernhard Grimm, Stefan Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 9 Fan Zhou, Xin Hong, Donald T. Miller *et al.*. Validation of a combined corneal topographer and aberrometer based on Shack-Hartmann wave-front sensing[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(5): 683~696
- 10 Daniel R. Neal, James Copland, David Neal. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 148~160