

人眼实际观察状态下的自由曲面眼镜片的透射波前像差测量

徐恺, 贾志刚, 房丰洲

天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室
天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072

摘要 基于人眼-镜片联合模型提出了一种实际观察状态下测量自由曲面镜片波前像差的方法,该方法不同于焦度计及现有的哈特曼-夏克波前像差传感器测量眼镜片后表面波前像差的方法。阐述了一种在实际观察状态下眼镜片顶球面上的波前像差测量方法的原理。基于该原理设计、研制了相应的测量装置,并使用该测量装置自动扫描测量得到眼镜片顶球面上的波前像差和配戴者屈光度参数。实验结果验证了该测量装置可以实现模拟实际观察状态下自由曲面镜片波前像差的测量,有助于评价自由曲面镜片的成像质量和加工质量,以及指导镜片的设计和优化。

关键词 测量;自由曲面镜片;实际观察情况;波前像差;配戴者屈光度

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0212001

Measurement of Transmission Wavefront Aberration of Freeform Spectacle Lenses in Real Viewing Condition of Human Eye

Xu Kai, Jia Zhigang, Fang Fengzhou

Centre of MicroNano Manufacturing Technology, State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A wavefront aberration measurement method for freeform spectacle lenses in real viewing condition is proposed based on the human eye-spectacle lens model. The method is different from the existing focimeter and the Hartmann-Shack wavefront aberration measurement method in which the wavefront aberration on the back surface of spectacle lenses is measured. The principle of wavefront aberration measurement for spectacle lenses on its vertex sphere in real viewing condition is demonstrated. Based on the principle, the corresponding experimental measurement apparatus is designed and built. Experiments of scanning and measuring spectacle lenses are carried out to obtain the wavefront aberration and wearer power on the vertex sphere. The measurement results verify that wavefront aberration measurement for freeform spectacle lenses in real viewing condition can be achieved by the proposed method. The findings assist in evaluating the manufacturing and image qualities of freeform spectacle lenses. The results also guide design and optimization of the lenses.

Key words measurement; freeform spectacle lens; real viewing condition; wavefront aberration; wearer power

OCIS codes 120.4570; 220.3630; 330.4460; 220.1010

1 引 言

人眼是一个精密的成像系统,但受生理因素的影响,存在着各种成像缺陷,并导致不同的眼部疾

病,如屈光不正、白内障、青光眼等。因此,出现了多种矫正手段用于补偿人眼的成像缺陷,如配戴式眼镜、接触镜、内置人工晶体、激光原位角膜磨镶术等。其中,配戴式眼镜相较于其他矫正手段,具有方便、

收稿日期: 2017-08-07; 收到修改稿日期: 2017-09-27

基金项目: 国家 973 计划(2016YB1102200)、国家自然科学基金(51320105009,61635008,91423101)、国家引智计划“111”项目(B07014)

作者简介: 徐恺(1992—),男,硕士研究生,主要从事自由曲面测量方面的研究。E-mail: kaixu@tju.edu.cn

导师简介: 房丰洲(1963—),男,博士,教授,主要从事光学自由曲面加工、超精密加工技术及装备、微纳制造等方面的研究。E-mail: fzfang@tju.edu.cn(通信联系人)

安全、经济的优点。人眼波前像差检测技术的出现和发展,为实现视网膜成像零像差的超视力效果提供了可能^[1]。而以渐进多焦点镜片为代表的兼具轻薄外观及多视力矫正功能等优点的自由曲面镜片的广泛应用,对现有的眼镜片检测方法及技术提出了新的要求和挑战。

对于传统的球面镜片和非球面镜片,一般采用焦度计方法进行测量,测量结果包括球镜度、棱镜度、柱镜度及轴向,以此来评价镜片的成像质量^[2]。但焦度计方法存在不足,主要分为两点:1)焦度计的点测量方式无法实现区域面测量,对于目前流行的具有自由曲面的渐进多焦点镜片,由于其渐变区内屈光度连续渐进变化,焦度计的点测量方式无法实现对渐进多焦点镜片的充分测量和评价;2)随着对人眼成像缺陷的逐步认识,人眼不仅存在离焦和像散等低阶像差,还同时存在彗差、三叶草差、球差等高阶像差。在某些特定条件如暗光环境下,高阶像差同样对人眼成像质量起着不可忽视的影响^[3]。而焦度计无法实现对高阶像差的测量。目前,基于哈特曼-夏克原理的自动波前像差仪(如蔡司公司的*i.Profiler* 验光仪)可准确地测量人眼本身存在的各项像差,从而提供了利用自由曲面眼镜片实现人眼全像差补偿的可能并最终实现零像差(衍射极限的)超视力的成像效果。因此,对于眼镜片的检测,不仅需要实现屈光度参数的测量,还需要具有对高阶像差进行测量的能力,从而可以更为准确和全面地对自由曲面眼镜片进行测量与评价^[4-5]。

目前,国内外研究人员对于测量自由曲面眼镜片提出了不同的见解。Bourdoncle 等^[6]与 Arroyo 等^[7]均强调了区别于焦度计的测量方法,应当考虑对基于镜片-人眼联合模型的镜片顶球面上的配戴者屈光度参数进行测量。他们的研究仅从理论上说明了该原理的重要性,其测量结果为镜片后表面上的屈光度,再根据光线追迹法可近似计算出配戴者屈光度。Zhou 等^[8]、Villegas 等^[9]等及禹静的研究^[10]都强调了测量自由曲面镜片应模拟人眼实际观察状态,三项研究均搭建了相应的测量装置。他们的工作相同之处在于使用哈特曼-夏克波前像差传感器分区域测量渐进多焦点镜片,得到每个测量子区域的波前像差。测量光路的光源与哈特曼-夏克波前像差传感器都是以光轴为中心轴固定放置,唯一运动部件为镜片,通过运动台控制镜片姿态实现对镜片不同区域的测量。其不足在于若将眼球和入射光的旋转运动依据相对运动关系原理转换为镜

片的运动以实现镜片不同区域的测量,必须严格设置镜片的旋转中心位于模拟实际观察状态下人眼眼球的旋转中心。而通过镜片的旋转和位移来改变镜片的位置和姿态会造成测量面与顶球面不统一。此外,在测量镜片不同子区域时,实际观察状态下入射光线以不同角度倾斜射入镜片,若只移动镜片来模拟实际观察状态,在光源固定且平行于光轴方向入射的情况下,镜片的姿态控制将十分复杂,入射光线进入镜片的角度及在镜片内的传播轨迹很难保证符合实际观察状态。因此,虽然目前国内外研究人员对于测量自由曲面眼镜片进行了相关的阐述与讨论,但对于设计测量光路、研制测量装置时如何保证测量结果为精确地模拟实际观察状态下镜片顶球面上的配戴者波前像差参数缺少相关研究,无法满足目前对于测量和评价眼镜片特别是自由曲面镜片成像质量的要求。

本文提出了一种实际观察状态下自由曲面眼镜片的透射波前像差测量方法。首先详细介绍了实际观察状态下眼镜片透射波前像差的测量原理与测量装置的研制。其次,详细阐述了测量流程。最后,分别对单光球面镜片及具有自由曲面的渐进多焦点镜片进行了测量实验,通过实验测量结果与焦度计测量结果对比的一致性,证明了所提出方法的有效性。通过对测量结果进行分析,验证了通过该实验装置可实现模拟实际观察状态下测量自由曲面镜片顶球面处的波前像差,测量结果将有助于测量、评价自由曲面镜片的加工及成像质量。

2 实际观察状态下眼镜片的波前像差测量原理

2.1 实际观察状态下镜片-人眼联合模型

焦度计方法在测量镜片时光线传播方向与实际观察状态存在不同,如图 1 所示。图 1(a)为目前常用的焦点在轴上式(FOA)焦度计^[11],在测量镜片不同区域时测量光束的焦点保持在焦度计的光轴上,测量结果为入射光线在镜片后表面的交点 A 处的焦距的倒数;图 1(b)为人眼实际观察状态下的光线传播情况,顶球面定义为过镜片后表面顶点的假想球面,其半径为实际观察状态下人眼第一眼位时眼球旋转中心与镜片后表面顶点的距离^[12]。对入射光线与顶球面的交点[图 1(b)中点 D]处的透射波前进行测量,可获得顶球面上的波前像差,即人眼实际观察状态下的配戴者焦度或配戴者波前像差^[13]。由于同时考虑到人眼视角的变化和不同视角下所对

应镜片的不同子区域,以及镜片不同子区域所对应入射光线入射角度的不同,所以相较于镜片后表面的测量结果,顶球面上的测量结果更符合实际观察状态下对镜片成像质量评价的要求^[14]。而由图 1(b)可以看出,模拟人眼实际观察状态下测得的眼镜片顶球面处的结果,与焦度计方法测得的镜片后表面处的结果存在差异。其原因在于:1)在测量镜片除几何中心点以外的区域时,入射光线倾斜照射到镜片,镜片不同子区域处所对应的入射光的姿态不同;2)顶球面与镜片后表面间的距离随视角扩大而增加;3)光线在镜片内传播距离不同引起测量点处 BC 与 BA 间光程的不同;4)人眼实际观察状态下的入射光 BC 引入倾斜像散^[7]。

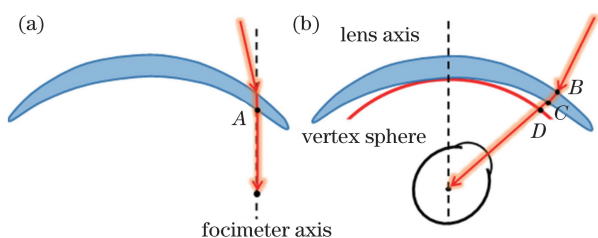


图 1 (a)焦度计测量原理;(b)实际观察状态下测量原理
Fig. 1 (a) Measurement principle of focimeter;
(b) measurement principle in real viewing condition

实际观察状态下镜片-人眼联合模型如图 2 所示。 d_1 为人眼第一眼位时镜片后表面顶点与眼球旋转中心的距离,该参数通常由配镜处方提供。实际观察状态下,人眼在不同视角(绕 X 轴的俯仰角和绕 Y 轴的偏摆角)下观察位于不同方向的物体时,入射光线以不同角度射入镜片,在镜片内倾斜传播,由角膜进入眼球并最终成像于视网膜。因此以不同视角观察时,光线在镜片内的传播方向及距离不同,从镜片后表面到人眼角膜前表面间的光程不同,造成在不同视角观察下使用眼镜片相应子区域所获得

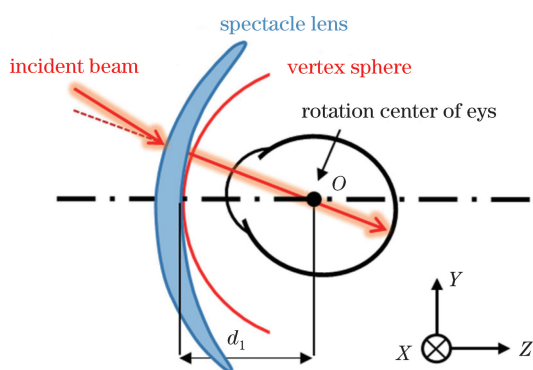


图 2 实际观察状态下镜片-人眼联合模型图
Fig. 2 Spectacle lens-eye combined model in real viewing condition

的像差补偿不同。

顶球面在镜片后表面顶点处与镜片后表面重合,在该点测得的结果为镜片补偿人眼平视状态下所需要的像差,即距离人眼旋转中心距离为 d_1 时镜片所应提供的像差补偿。因此,测量以人眼旋转中心为球心, d_1 为半径的顶球面上的波前像差,既考虑了不同视角观察时光程不同的情况,又统一了不同视角观察所需要的像差补偿,满足模拟实际观察状态下结合人眼测量镜片的要求。在顶球面上测得的结果即为配戴者屈光度或配戴者波前像差。

基于实际观察状态下镜片-人眼联合模型,提出了一种针对实际观察状态下自由曲面眼镜片的透射波前像差测量的方法。其理念在于:使用哈特曼-夏克波前像差传感器测量眼镜片,得到其顶球面上配戴者波前像差与配戴者屈光度;测量方式为分区域自动扫描,得到精确的区域面测量结果;测量面为顶球面,保证顶球面的半径为实际观察状态下镜片后表面顶点与人眼眼球旋转中心的距离;在测量镜片不同子区域时,镜片固定不动,而哈特曼-夏克波前像差传感器通过两自由度的旋转,指向镜片相应的测量子区域,哈特曼-夏克波前像差传感器的旋转中心模拟人眼眼球旋转中心;同时入射光源随着哈特曼-夏克波前像差传感器的旋转做相应的两自由度位移和两自由度旋转,以实现其姿态符合实际观察状态下光线进入镜片的轨迹。

2.2 实验测量装置

针对 2.1 节提出的实际观察状态下眼镜片透射波前像差测量的原理,设计与研制了实验测量装置,其系统原理如图 3 所示,包括光源模块、镜片模块和传感器模块。

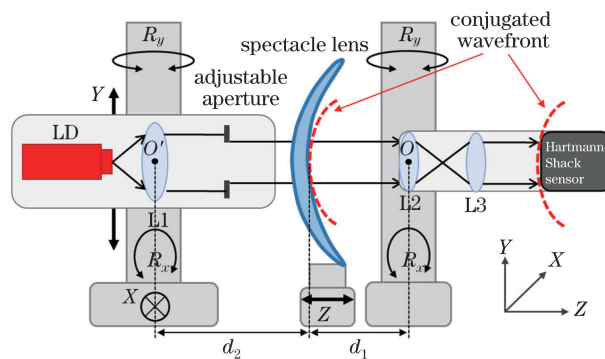


图 3 实验测量装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of experimental measurement equipment

光源模块包括激光二极管(LD)、准直镜 L1、可变光阑和 4 轴高精运动平台。由 LD 发出的光

源,通过准直镜 L1 后变为平面波,其中 LD 与准直镜 L1 之间的距离可进行微调,使 LD 位于准直镜 L1 焦点处,经准直镜 L1 的出射光为波前像差极小的平行光,通过对哈特曼-夏克波前像差传感器的校准操作,消除入射光本身的波前像差;由准直镜 L1 出射的平行光经过可调光阑调节测量光束的光斑直径;LD、准直镜 L1 和可变光阑封装为一个整体,固定在 4 轴高精运动平台上,可实现 X 方向和 Y 方向的位移以及绕 X 轴和绕 Y 轴的旋转 R_x 和 R_y ,且旋转中心位于准直镜 L1 径向中心处,保证 LD、准直镜 L1 和可变光阑作为一个整体实现 4 自由度的运动,用于控制入射光的姿态,模拟实际观察状态下扫描测量镜片不同子区域时光线照射到镜片的轨迹。

镜片模块包括沿 Z 轴手动位移台和固定在其上的 U 型夹具。U 型夹具用于夹持固定被测镜片;沿 Z 轴手动位移台用于改变镜片后表面顶点与传感器模块旋转中心的距离,即模拟实际观察状态下镜片后表面顶点与人眼眼球旋转中心的距离。该距离根据配镜处方设置。

传感器模块包括两个焦距相同的透镜 L2 和 L3、哈特曼-夏克波前像差传感器和两轴高精运动平台。其中两个透镜的间距为其焦距的两倍,以构成光学 $4f$ 系统,而哈特曼-夏克波前像差传感器的测量面位于透镜 L3 的后焦点处,镜片后表面顶点位于透镜 L2 的前焦点处,即哈特曼-夏克波前像差传感器的测量面与透镜 L2 的前焦平面共轭;透镜 L2、L3 和哈特曼-夏克波前像差传感器封装为一个整体,固定到两轴高精运动平台上,实现绕 X 轴和绕 Y 轴的旋转,保证了哈特曼-夏克波前像差传感器的旋转测量面即为顶球面,获得顶球面上的波前像差和配戴者屈光度参数。

测量装置的运动精度通过三光束干涉仪(SIOS SP 2000-TR)和激光测距传感器(Optex CD5-L25A)标定。测量结果如表 1 所示。其中测量绝对位移精度和重复位移精度时,旋转轴和位移轴的测量步长分别为 $360''$ 和 $500 \mu\text{m}$,大于测量装置实际扫描运动时单次运动步长。表 1 所示为所测得 4 个位移轴

表 1 测量装置的运动精度

Table 1 Motion accuracy of measuring equipment

Parameter	Rotation / (")	Translation / μm
Resolution	15	1
Absolute accuracy	36	15
Repeatability	18	2

和两个旋转轴最差的运动精度,满足装置设计时的精度要求,验证了测量装置的可靠性。

3 实 验

3.1 实验测量流程

实验的测量流程如图 4 所示。

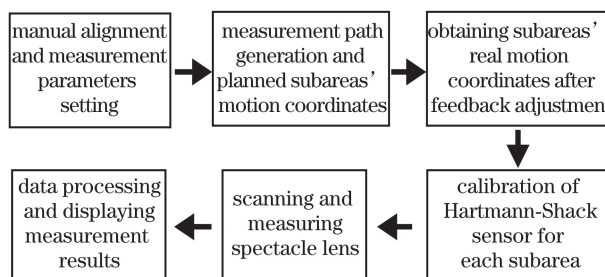


图 4 测量流程图

Fig. 4 Measurement flowchart

步骤 1: 调节各模块的相对位置,以保证光轴对齐,此时哈特曼-夏克波前像差传感器接收到的光为波前像差近似为零的平行光,且入射光斑中心位于哈特曼-夏克波前像差传感器电荷耦合器件(CCD)的中心位置;根据配镜处方调节镜片在 Z 方向的位置以保证镜片后表面顶点与二轴运动平台旋转中心的距离为实际观察状态下镜片表面后表面顶点与人眼眼球旋转中心的距离,在本次实验中该参数设为 27 mm;设置 6 个运动轴的运动参数;设置传感器的参数。

步骤 2: 设置镜片测量范围、测量光斑直径、相邻测量点的间隔以及生成所有测量点的坐标和规划测量路径。镜片测量点如图 5 所示,以两种坐标显示,一是以测量点在镜片后表面的二维坐标 (x, y) 显示(默认镜片后表面近似为平面),但相应坐标显示的结果代表测量光束通过镜片后表面上相应点后在顶球面处测得的结果;二是以哈特曼-夏克波前像

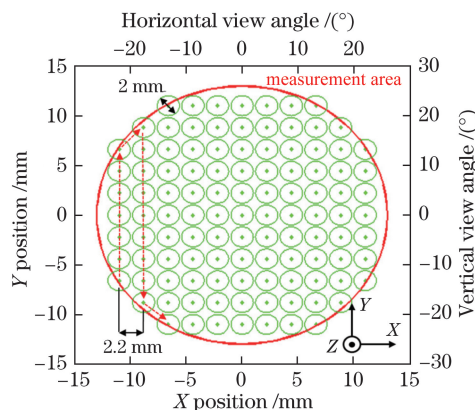


图 5 镜片测量点及路径规划

Fig. 5 Measuring points of lens and route planning

差传感器在每个测量点相应的俯仰角和偏摆角为坐标 (ρ, ω) 显示结果,模拟不同视角下实际观察状态下顶球面处的波前像差。测量设置中生成的测量点在镜片后表面的二维坐标可转换为哈特曼-夏克波前像差传感器的旋转角:

$$\begin{cases} \rho = \arctan \frac{y}{d_1} \\ \omega = \arctan \frac{x}{d_1} \end{cases}, \quad (1)$$

本研究的测量结果皆按上述两种坐标方式显示。

针对每一个测量点生成相应的运动轴理论位置坐标,如图6所示。哈特曼-夏克波前像差传感器绕X轴和绕Y轴的旋转角度 (ρ, ω) 由(1)式计算可得;光源4自由度的运动可表示为:

$$\begin{cases} \rho' = \rho \\ \omega' = \omega \\ x' = (d_1 + d_2) \cdot \tan \omega' \\ y' = (d_1 + d_2) \cdot \tan \rho' \end{cases}, \quad (2)$$

式中 d_2 为4轴运动平台旋转中心与镜片后表面顶点的距离, ρ' 、 ω' 、 x' 、 y' 分别为光源绕X轴和绕Y轴的旋转角度以及X方向和Y方向的位移量。

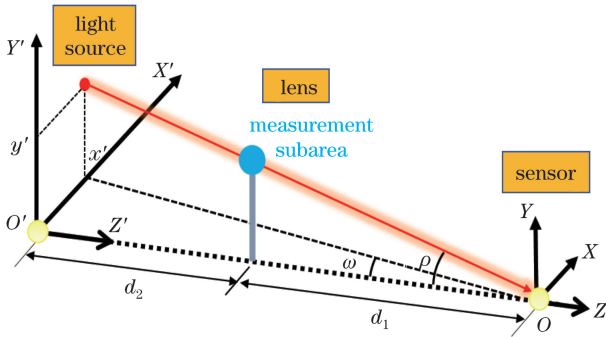


图6 各模块相对坐标示意图

Fig. 6 Relative coordinates diagram of each module

步骤3: 无镜片状态下,所有运动轴按照步骤2中生成的理论位置坐标运动,由于运动误差以及装置本身的系统误差,无法保证在每个测量子区域内入射光斑中心均照射在哈特曼-夏克波前像差传感器CCD中心位置,因此需要对此位置偏差进行调节。根据入射光斑在CCD上的坐标反馈微调光源绕X轴和绕Y轴的旋转角度以及X方向和Y方向的位移量,直至光斑中心与CCD中心坐标的偏差低于预设阈值时,认为光源、镜片测量点与哈特曼-夏克波前像差传感器处于共线状态,结束当前子区域的反馈调节,保存此时各运动轴的实际运动坐标。

步骤4: 在每个测量子区域,入射光线及哈特

曼-夏克波前像差传感器的姿态均不相同,有必要对哈特曼-夏克波前像差传感器进行校准,保存各测量子区域相应的哈特曼-夏克波前像差传感器的参考波前。图7为在没有镜片的状态下,对各测量点标定后测量的结果,在每一个测量点处波前像差的峰谷(PV)值均不大于 $0.05 \mu\text{m}$,说明通过步骤3的反馈调节和步骤4的标定后,有效地消除了系统误差,可以精确地测量仅由镜片引起的顶球面处的波前像差。

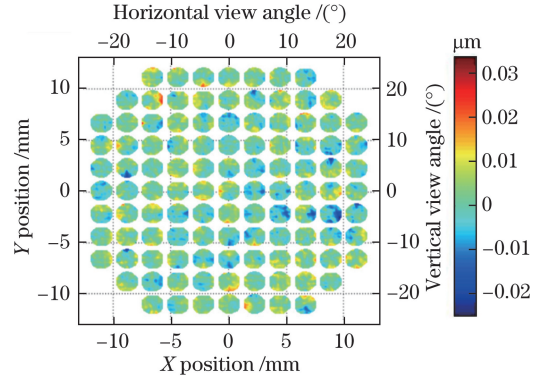


图7 无镜片状态下波前像差分布

Fig. 7 Wavefront aberration distribution without lens

步骤5: 放入待测镜片,运动轴按照步骤3生成的各测量点相应的实际运动位置运动,在每一测量点加载步骤4保存的该点参考波前,测得当前位置的仅由镜片引入的波前像差,完成镜片分区域扫描测量。

步骤6: 对测量数据进行处理及显示测量结果。

3.2 测量结果

实验测量了单光球面镜片和具有自由曲面的渐进多焦点镜片。其中单光球面镜片的参数为球镜度-2.50 D、柱镜度-0.00 D、折射率1.551,渐进多焦点镜片的参数为远用度数-1.50 D、下加光3.00 D、折射率1.553。测量瞳孔直径设为2 mm,相邻测量点间隔为2.2 mm,测量区域半径为13 mm,对应的视角即哈特曼-夏克波前像差传感器的旋转角 (22°) ,测量点共109个,测量区域虽只近似占实际半径为30 mm的毛坯镜片的一半,但该测量区域已足够覆盖配戴镜片的常用区域。

对测量得到的数据进行处理,所测波前像差可用泽尼克多项式展开:

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^k C_i Z_i(x, y), \quad (3)$$

式中 C_i 为第 i 项泽尼克多项式的系数。由(3)式可以得到影响眼镜片成像质量的各单项像差,包括低

阶像差(离焦和像散)和高阶像差(主要有球差、彗差和三叶草差等)^[15]。

代表低阶像差的离焦和像散的泽尼克系数转换为传统验光配方中的球镜度度数 S 和柱镜度度数 C ^[16]：

$$\begin{cases} S = \frac{4\sqrt{3}}{R^2} C_5 \\ C = \frac{-2\sqrt{6}}{R^2} \sqrt{C_4^2 + C_6^2} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 R 为瞳孔半径, C_4 、 C_5 、 C_6 分别代表泽尼克多项式中 Z_2^{-2} 、 Z_2^0 和 Z_2^2 项的系数。通过对波前像差的泽尼克多项式展开,可以得到各项像差以及传统验光配方中的屈光度参数。

利用 MATLAB 对测量结果进行插值和平滑处理,得到测量结果如图 8~13 所示。其中图 8~10 分别为单光球面镜片的波前像差分布、配戴者球镜度分布和配戴者柱镜度分布,图 11~13 分别为渐进多焦点镜片的波前像差分布、配戴者球镜度分布和配戴者柱镜度分布。

3.2.1 单光球面镜片

实验之前,先用两款不同型号商业焦度计(Nidek LM-990A 和 Topcon CL-100)对单光球面镜片进行测量,从镜片中心到边缘不同径向选取了数十个不同测量点,测得的球镜度为 $-2.50 \text{ D} \pm 0.02 \text{ D}$,柱镜度为 $-0.00 \text{ D} \pm 0.02 \text{ D}$,与其标称值具有良好的一致性。测量结果说明该单光球面镜片符合其设计及加工质量要求,并符合焦度计测量标准。

如图 8 所示,单光球面镜片每一处测量点的波前像差均呈现明显的离焦形状,由于该镜片柱镜度为 -0.00 D ,即存在的主要像差为离焦。图 9 所示镜片中心区域的球镜度为 $-2.50 \text{ D} \pm 0.01 \text{ D}$,与焦度计测量值相同,证明了该检测方法和检测装置的有效

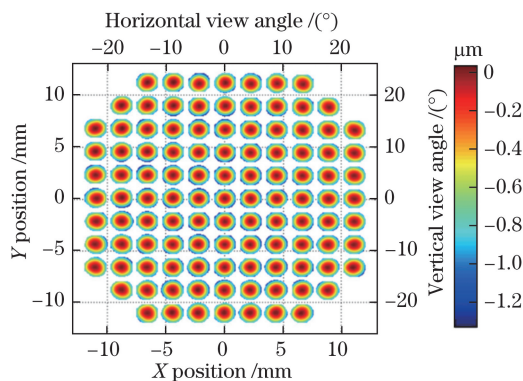


图 8 单光球面镜片波前像差分布

Fig. 8 Wavefront aberration distribution of spherical lens

性和精确性。而屈光度由中心点向边缘逐渐变小,这与焦度计测量的结果不同。用商用焦度计测量镜片不同区域得到的屈光度均为球镜度 $-2.50 \text{ D} \pm 0.02 \text{ D}$ 、柱镜度 $-0.00 \text{ D} \pm 0.20 \text{ D}$ 。

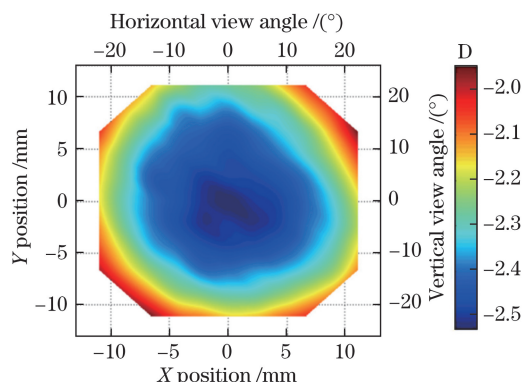


图 9 单光球面镜片球镜度分布

Fig. 9 Spherical power distribution of spherical lens

根据 2.1 节实际观察状态下眼镜片波前像差测量的分析可知,焦度计测量的是镜片后表面的屈光度,仅在镜片后表面顶点处与实际观察状态下测量结果相同。但在测量单光球面镜片非中心区域时,模拟离轴斜视观察状态,光源入射方向随着测量点的偏移而改变,测量光束倾斜照射到镜片,在镜片内传播的距离发生变化,引入倾斜像散并逐渐增大,因此与焦度计的测量结果存在差异。另外,图 9 的测量结果呈现明显的同心圆形状,这与实际相符,因为单光球面镜片是中心回转对称,且镜片测量区域内的测量点也是中心对称分布,但测量结果并不呈完美的同心圆形状,说明装置运动存在误差,或镜片本身存在加工误差。图 10 所示的柱镜度分布也近似呈现同心圆形状,随着测量点远离几何中心,数值减少,但最小不超过 -0.25 D 。

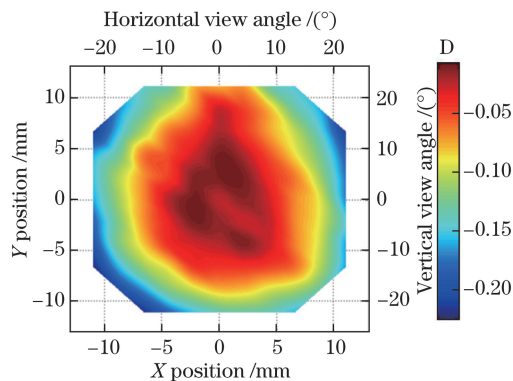


图 10 单光球面镜片柱镜度分布

Fig. 10 Cylindrical power distribution of spherical lens

图 9 与图 10 的测量结果直观地说明了焦度计测量的屈光度参数与实际观察状态下测量的配戴者

焦度的区别。在实际佩戴上单光镜片后,人眼在不同视角下使用镜片不同区域观察时,镜片提供的像差补偿反而是变化的。焦度计仅可以评价镜片本身的质量,无法结合人眼-镜片模型测量实际配戴镜片观察状态下的配戴者焦度。单光球面镜片的测量结果验证了该检测方法和测量装置的可行性和精确性,可使用该装置测量自由曲面镜片顶球面处的波前像差。

3.2.2 渐进多焦点镜片

如图 11 所示,具有自由曲面的渐进多焦点镜片在视远区和视近区呈现明显的相反离焦形状,即视远区为负透镜波前,视近区为正透镜波前。渐变区特征不明显,因为该区域屈光度从视远区度数连续渐进变化到视近区度数。左右周边区呈现明显的像散形状,这与实际相符,渐进多焦点镜片的设计原则要求将大部分的像散分布到周边区;图 12 所示的球镜度分布符合镜片实际设计情况,视远区和视近区分别用于补偿远视和近视需要的像差,而渐变区内屈光度连续渐进变化,连接视远区和视近区。此外,虽然镜片设计、生产时保证视远区与视近区的屈光度为一固定值,但如图 12 所示模拟实际观察状态下测得的视远区与视近区屈光度渐进变化,区域内不同视角观察时镜片提供的像差补偿不唯一,这与目前国内外自由曲面眼镜片的测量结果存在差异;图 13 所示的柱镜度分布同样符合实际情况,像散基本分布在周边区,而其余区域柱镜度接近 0.00 D。

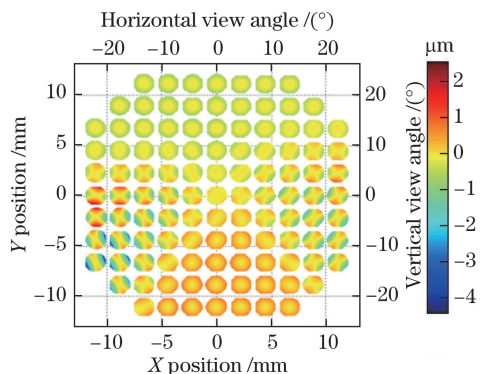


图 11 渐进多焦点镜片波前像差分布
Fig. 11 Wavefront aberration distribution of progressive additional lens

测量结果说明实验测量装置可实现自动扫描测量眼镜片得到区域面结果,可精确测量自由曲面镜片顶球面上的波前像差和配戴者屈光度参数,验证了实际观察状态下眼镜片的波前像差测量的可靠性。

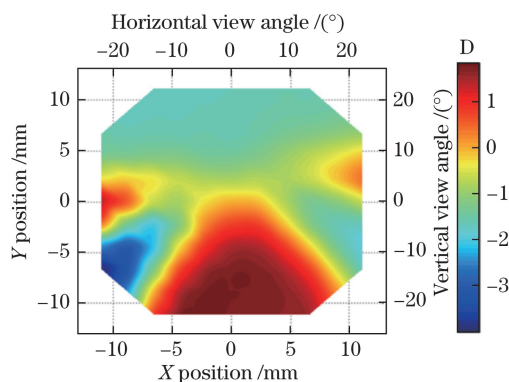


图 12 渐进多焦点镜片球镜度分布
Fig. 12 Spherical power distribution of progressive additional lens

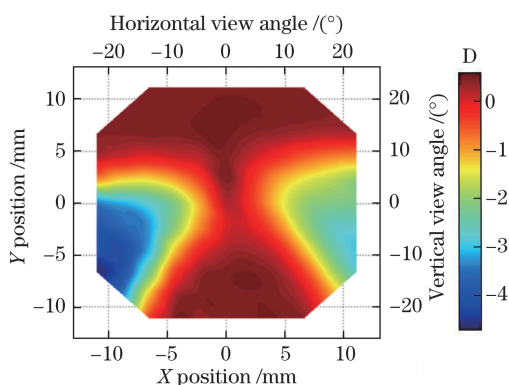


图 13 渐进多焦点镜片柱镜度分布
Fig. 13 Cylindrical power distribution of progressive additional lens

4 结 论

针对自由曲面镜片的测量与评价,结合人眼-镜片联合模型提出了实际观察状态下自由曲面镜片的透射波前像差测量方法;基于该方法的原理设计并研制了测量装置的硬件部分和软件模块;利用该套装置测量了单光球面镜片和具有自由曲面的渐进多焦点镜片。实验结果表明该装置可以精确测得实际观察状态下眼镜片的波前像差,通过自动扫描测量方式得到镜片顶球面处的波前像差和配戴者屈光度参数。该实际观察状态下眼镜片的透射波前像差测量方法可用于测量以及评价自由曲面镜片的加工及成像质量,用于指导镜片的设计与优化。

所述测量装置通过精密手动位移台的微分头读数保证 d_1 的控制精度在 0.025 mm 级别, d_1 的设置误差势必引起最终测量结果的误差。 d_1 的 1 mm 设置误差会引起约 0.025 D 的屈光度测量误差,当然,测量屈光度误差值会随着所测镜片本身屈光度的增大而呈非线性的显著增大。因而,二者之间的具体

关系还有待进一步的深入研究。此关系对镜片的设计、测量、评价、适配等具有重要的意义,计划在后续工作中进行探讨。

参 考 文 献

- [1] Yang Y R, Dai Y. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0333001.
杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网膜像质的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0333001.
- [2] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Optics and optical instrument-focimeters: GB/T 17341—1998[S]. Beijing: China Standard Press, 1998: 652-654.
国家质量技术监督局. 光学和光学仪器 焦度计: GB/T 17341—1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 652-654.
- [3] Llorente L, Diaz-Santana L, Lara-Saucedo D, *et al.* Aberrations of the human eye in visible and near infrared illumination[J]. *Optometry & Vision Science*, 2003, 80(1): 26-35.
- [4] Fang F Z, Yu J, Qiu Z J. Measurement and evaluation of freeform spectacle lenses—part I[J]. *MAFO*, 2014, 10(3): 16-19.
- [5] Fang F Z, Yu J, Qiu Z J. Measurement and evaluation of freeform spectacle lenses—part II[J]. *MAFO*, 2014, 11(4): 34-40.
- [6] Bourdoncle B, Chauveau J P, Mercier J L. Traps in displaying optical performances of a progressive-addition lens[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(19): 3586-3593.
- [7] Arroyo R, Crespo D, Alonso J. Scoring of progressive power lenses by means of user power maps[J]. *Optometry & Vision Science*, 2012, 89(4): E489-501.
- [8] Zhou C Q, Wang W C, Yang K, *et al.* Measurement and comparison of the optical performance of an ophthalmic lens based on a Hartmann-Shack wavefront sensor in real viewing conditions[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): 6434-6441.
- [9] Villegas E A, Artal P. Spatially resolved wavefront aberrations of ophthalmic progressive-power lenses in normal viewing conditions[J]. *Optometry & Vision Science*, 2003, 80(2): 106-114.
- [10] Yu J. Study on evaluation method of freeform spectacle lenses[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 61-74.
禹静. 自由曲面镜片评价方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2015: 61-74.
- [11] International Organization for Standardization. Ophthalmic optics-uncut finished spectacle lenses—part 2: specifications for progressive power lenses: ISO 8980-2: 2004[S]. 2004.
- [12] The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Ophthalmic optics-terminology: GB/T 26397—2011[S]. Beijing: China Standard Press, 2011: 41-42.
国家质量技术监督局. 眼科光学 术语: GB/T 26397—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 41-42.
- [13] International Organization for Standardization. Ophthalmic optics-spectacle lenses-vocabulary: ISO 13666: 2012[S]. 2012.
- [14] Vargas J, Gómez-Pedrero J A, Alonso J, *et al.* Deflectometric method for the measurement of user power for ophthalmic lenses[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(27): 5125-5132.
- [15] Yu J, Fang F Z, Qiu Z J. Aberrations measurement of freeform spectacle lenses based on Hartmann wavefront technology[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 986-994.
- [16] Li L, Raasch T W, Allen Y Y. Simulation and measurement of optical aberrations of injection molded progressive addition lenses[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(24): 6022-6029.