

## 基于镜眼联合模型的单光镜片设计及制造

许崇祥 张中祥 燕卫江 苏宇锋 贾志刚

### Design and manufacturing of single vision lens based on lens-eye joint model

XU Chongxiang, ZHANG Zhongxiang, YAN Weijiang, SU Yufeng, JIA Zhigang

引用本文:

许崇祥, 张中祥, 燕卫江, 等. 基于镜眼联合模型的单光镜片设计及制造[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 177–183. DOI: 10.5768/JAO202445.0105001

XU Chongxiang, ZHANG Zhongxiang, YAN Weijiang, et al. Design and manufacturing of single vision lens based on lens-eye joint model[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 177–183. DOI: 10.5768/JAO202445.0105001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0105001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于透镜畸变效应的仿人眼扫描系统设计

Design of retina-like scanning system based on distortion effect of lens

应用光学. 2021, 42(3): 418–422 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301007>

#### 双波段CCTV鱼眼镜头光学系统设计

Optical system design of dual band CCTV fish-eye lens

应用光学. 2021, 42(6): 1006–1010 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0601009>

#### 通用型数字鱼眼镜头检测系统的设计

Design of universal digital fish-eye lens testing system

应用光学. 2018, 39(2): 169–173 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0201002>

#### 基于4k分辨率小型投影机的鱼眼镜头设计

Fisheye lens design based on small-sized projector with 4k resolution

应用光学. 2020, 41(5): 1060–1066 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0505002>

#### 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计

Aspheric optimization design of fisheye lens optical system

应用光学. 2019, 40(5): 863–870 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505001>

#### 低畸变宽工作距机器视觉镜头光学设计

Low distortion wide working distance machine vision optical lens design

应用光学. 2020, 41(5): 924–928 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0177-07

# 基于镜眼联合模型的单光镜片设计及制造

许崇祥, 张中祥, 燕卫江, 苏宇锋, 贾志刚

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对现有单光镜片存在人眼实际感受屈光力不恒定的问题, 提出了一种基于镜眼联合模型的单光镜片设计方法。将人眼视角变化与对应的镜片使用区域相匹配, 以角膜表面人眼实际感受到的屈光度保持恒定为基础, 对镜片表面的屈光度进行重新计算, 最终获得镜片表面的屈光度分布及相应的面形数据。基于所提设计方法, 以角膜表面实际感受到的屈光度 $-6.00$  D 为例, 生成面形数据进行镜片加工, 并对加工后的镜片面形及屈光度进行了测量和评价。测试结果表明: 加工镜片的中心屈光度为 $-6.30$  D, 且呈中心向边缘渐变趋势, 屈光度最大误差小于 $\pm 0.23$  D, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 镜片设计; 镜眼联合模型; 镜片加工; 人眼视角; 空间坐标变化

中图分类号: TN202; TH74

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0105001

## Design and manufacturing of single vision lens based on lens-eye joint model

XU Chongxiang, ZHANG Zhongxiang, YAN Weijiang, SU Yufeng, JIA Zhigang

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The commonly-used single vision lens has the problem of variational refractive power when it is worn and actually perceived. Response to this problem, a new design method based on lens-eye joint model for single vision lens was proposed. According to the new design method, the variational visual angles were matched to different areas of lens, and the constant perceived diopter on the corneal surface was set as precondition. The diopter on the lens surface was recomputed, and finally the diopter distribution and the corresponding surface shape data were obtained. Based on the proposed design method, the diopter of  $-6.00$  D actually felt on the corneal surface was taken as an example to generate surface shape data for lens manufacturing, and the surface shape and diopter of the manufactured lens were measured and evaluated. The test results show that the central diopter of the manufactured lens is  $-6.30$  D, the diopter values gradually vary from the center to the edge of the manufactured lens, and the maximum diopter error is smaller than  $\pm 0.23$  D, which verifies the effectiveness of the proposed designed method.

**Key words:** lens design; lens-eye joint model; lens processing; human visual angles; spatial coordinate change

## 引言

人的感觉器官对外界信息的获取约 80% 来自于视觉<sup>[1]</sup>。健康的视觉是良好生活、学习、交流的保证。近年来, 随着电子产品的普及, 无论是青少年还是成年人, 每天长时间面对各种发光显示设

备, 引发多种眼部疾病<sup>[2]</sup>。特别是以近视、散光为代表的屈光不正已成为青少年普遍面对的健康问题。各种屈光不正矫正技术有着广阔的应用市场<sup>[3]</sup>。目前, 常见的屈光不正矫正方法有: 框架眼镜、角膜接触镜及激光角膜手术等。其中长时间佩戴角

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-27

基金项目: NSFC-河南联合基金项目 (U1904169)

作者简介: 许崇祥 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事视光学、精密加工研究。E-mail: [xcx20061223@163.com](mailto:xcx20061223@163.com)

通信作者: 贾志刚 (1984—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事精密/超精密加工技术、视光学等研究。

E-mail: [jiazhigang@zhu.edu.cn](mailto:jiazhigang@zhu.edu.cn)

膜接触镜会因摩擦角膜导致眼部感染,从而引发炎症,且镜片本身为消耗品,使用成本较高。激光角膜手术存在手术费用昂贵,对角膜的磨切去除造成不可逆的损害,同时可能引起一些长期的后遗症,如眼睛干涩、高阶像差增加等不被人们轻易接受<sup>[4]</sup>。相比而言,框架眼镜具有方便、经济、可逆、无副作用等优点,是目前最为普遍应用的矫正方法。

佩戴式框架眼镜有诸多优点的同时,也存在若干不足之处有待改进。1) 传统镜片一旦加工完成,其矫正能力就固定不变,而人眼受到光照环境、心理因素的影响,其像差是时刻变化的,这会造成某些时刻镜片矫正能力不足或过量,造成用眼不适。解决办法在于开发具有动态矫正能力的镜片<sup>[5]</sup>。2) 目前的镜片仅能矫正低阶像差,随着像差测量技术的发展,对人眼全像差的补偿可达到超视力的效果成为未来发展趋势<sup>[6]</sup>。3) 对于普遍应用的单光镜片,佩戴状态不同视角下,人眼实际感受到的矫正能力并不均一<sup>[7]</sup>,其原因在于镜片设计时没有考虑到眼球旋转带来的视角变化问题。造成的结果是,虽然镜片的不同区域在焦度计下测得的屈光度数恒定不变,但在佩戴时,人眼实际感受到的屈光力是变化的。这种屈光能力的变化在某些情况下,比如暗光环境下,在视角较大时存在明显的像差矫正不足,从而带来视觉模糊。随着人们对视力精准化的追求和镜片设计理念的发展,越来越多的镜片优化设计方案被提出。李念宁采用多目标优化遗传算法<sup>[8]</sup>设计了单光非球面眼镜片,利用算法随机生成多组前弯和非球面系数,通过光线追迹计算像差大小,使设计的眼镜片降低了像散和畸变。BARBERO S<sup>[9]</sup>提出了一种基于径向折射率梯度(radial refractive gradient, RRG)镜片的设计方法来减少镜片周边区域离焦现象,并通过实验验证了方法的可行性。张海平<sup>[10]</sup>将非球面方程应用到多焦点镜片,利用连续变化的曲率来调节镜片光焦度分布和减小像散。但是,目前的镜片设计方法并没有考虑人眼实际佩戴时的视角变化问题。

针对上述第三个问题,本文通过建立镜眼联合模型,充分考虑在人眼旋转时,应用镜片的不同区域及相对应的不同入射光线角度变化的问题,对传统单光镜片设计方法进行了改进,实现在佩戴时不同视角下,人眼实际感受到的矫正力保持恒

定。基于镜眼联合模型,生成镜片面形数据,在数控机床上实现镜片的加工制造<sup>[11-13]</sup>,并对加工后的镜片面形及屈光度进行了测量,初步验证了模型的有效性。

## 1 基于镜眼联合模型的单光镜片设计

镜眼联合模型侧视图如图1所示。图1中镜片放置在人眼角膜前, $O$ 为眼球旋转中心, $O'$ 为镜片后表面中心,物体发出的入射光经镜片折射后,通过角膜,汇聚在视网膜黄斑中心凹处。平视时,光轴与视轴重合,穿过镜片中心、角膜前表面中心及眼球旋转中心<sup>[14]</sup>。当眼球旋转或视角变化时,入射光线与镜片表面夹角随之变化,从镜片前表面到角膜前表面的光程也随之改变,这样会带来镜片矫正能力的改变。因此,需要改变不同视角下的镜片面形,以保证光程恒定,最终使人眼实际感受到的镜片矫正屈光力恒定。假设镜片前表面为基弧,则需要在镜眼联合模型基础上,考虑视角变化,设计出镜片后表面面形,通过面形的变化,调节因视角改变而引起的光程差异,使人眼实际感受到的镜片屈光力保持恒定。

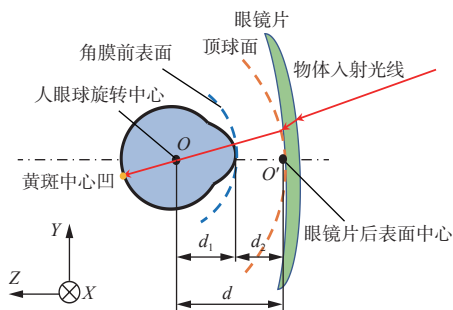


图1 佩戴状态下的镜眼联合模型

Fig. 1 Lens-eye joint model in wearing state

图1中, $d$ 为镜片后表面中心 $O'$ 到眼球旋转中心 $O$ 的距离; $d_1$ 为眼球旋转中心与角膜前表面中心的距离<sup>[15]</sup>; $d_2$ 为角膜前表面中心与镜片后表面中心 $O'$ 的距离, $d = d_1 + d_2$ 。以镜眼联合模型为基础建立坐标系,如图2所示。以人眼球旋转中心为原点建立世界坐标系 $O-XYZ$ ,以镜片后表面几何中心 $O'$ 为原点建立镜片坐标系 $O'-X_1Y_1Z_1$ 。 $X$ 轴方向表示水平视角,右为正, $Y$ 轴方向表示垂直视角,上为正, $Z$ 轴正向指向人眼视网膜。当人眼通过镜片观察物体时,视轴所在的直线必然会与镜片平面相交,交点为 $(x_l, y_l, z_l)$ ,即为不同视角下镜片表面使用点的坐标。

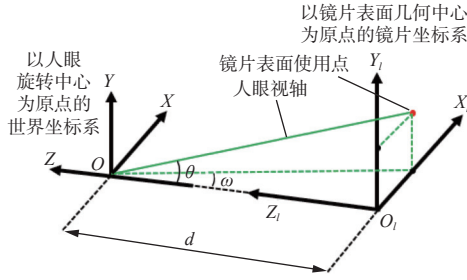


图2 镜眼联合模型坐标系

Fig. 2 Coordinate system of lens-eye joint model

从图2推导出镜片坐标系中镜片表面使用点与世界坐标系下视轴的视场角对应关系:

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{y_l}{d} \\ \omega = \arctan \frac{x_l}{d} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为人眼垂直视角;  $\omega$  为人眼水平视角。根据人眼视轴视角( $\theta, \omega$ )可求出人眼视轴所在直线的方向向量为

$$L = (L_x \quad L_y \quad L_z) = (-\cos\theta \cdot \sin\omega \quad \sin\theta \quad -\cos\theta \cdot \cos\omega)$$

假设某视轴所在直线过点  $M(m_x, m_y, m_z)$  时, 则视轴所在直线参数方程为

$$\begin{cases} u = m_x + t \cdot L_x \\ v = m_y + t \cdot L_y \\ w = m_z + t \cdot L_z \end{cases} \quad (2)$$

式中  $t$  为人眼视轴所在直线方程的参数变量。

显然人眼视轴所在直线经过人眼转动中心  $O$ , 即为  $M(0, 0, 0)$  时, 人眼视轴所在直线参数方程为

$$\begin{cases} u = -t \cdot \cos\theta \cdot \sin\omega \\ v = t \cdot \sin\theta \\ w = -t \cdot \cos\theta \cdot \cos\omega \end{cases} \quad (3)$$

对于镜片表面所在的平面 (假设视轴与镜片后表面交点为中心的微小区域为平面), 由该平面上任意 3 个不重合的点, 可求出 2 个不平行的向量  $N_1, N_2$ , 通过向量的叉乘求出该平面的法向量  $P(P_x, P_y, P_z)$ 。假设眼镜片平面过点  $N(n_x, n_y, n_z)$ , 则镜片平面的点法式方程为

$$P_x(x - n_x) + P_y(y - n_y) + P_z(z - n_z) = 0 \quad (4)$$

在世界坐标系  $O-XYZ$  下, 以视场角为旋转角度( $\theta, \omega$ )的人眼视轴的直线参数方程 (3) 与镜片表面的平面方程 (4) 的交点 ( $u = x, v = y, w = z$ ), 就是人眼不同视角观察物体时通过镜片表面时的使用点, 通过设计每个使用点的屈光度, 就可以得到整个眼镜片后表面的屈光度分布图, 从而计算出整个眼镜片的面形数据。

不同视角下镜片平面使用点的坐标一定满足视轴所在直线参数方程和镜片平面点法式方程, 联立式 (3) 和式 (4) 得出:

$$t = \frac{P_x \cdot (n_x - m_x) + P_y \cdot (n_y - m_y) + P_z \cdot (n_z - m_z)}{P_x \cdot L_x + P_y \cdot L_y + P_z \cdot L_z} \quad (5)$$

根据人眼实际观察状态可知, 上式分母必不为零, 即视轴所在直线与镜片平面方程必有交点, 求出参数变量  $t$  后, 带入视轴直线参数方程 (3), 即可求出不同视角下镜片平面使用点的坐标 ( $x_l, y_l, z_l$ )。

根据空间坐标变换原理<sup>[6]</sup>, 图2中世界坐标系  $O-XYZ$  与镜片坐标系  $O_l-X_lY_lZ_l$  的变换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{bmatrix} + Q \quad (6)$$

式中: 旋转矩阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

平移矩阵  $Q$  为

$$Q = (0 \quad 0 \quad -d)^T$$

通过空间坐标变换原理, 求出在世界坐标系  $O-XYZ$  下, 不同视角镜片平面使用点的坐标 ( $x, y, z$ )。然后求交点距人眼旋转中心  $O$  的距离  $p$ :

$$p = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (7)$$

再求出镜片平面使用点与人眼角膜前表面的距离  $p_1$ :

$$p_1 = p - d_l \quad (8)$$

最后, 根据所提出的设计原理计算眼镜片的面形数据。为了在任意视角时, 人眼角膜前表面上实际获得的镜片屈光度  $F_{JM}$  恒定不变, 根据计算等效屈光度计算公式<sup>[17]</sup>可推导出, 镜片平面上使用点的屈光度  $F_J$  为

$$F_J = \frac{F_{JM}}{1 + p_1 \cdot F_{JM}} \quad (9)$$

式中:  $F_{JM}$  为人眼在角膜前表面上获得的屈光度补偿值。

假设以镜片前表面作为基弧, 通过改变镜片后表面屈光度来改变镜片整体的屈光度, 则根据单光眼镜片设计原理, 可求出镜片后表面的屈光度  $F_H$  为

$$F_H = F_J - F_Q \quad (10)$$

式中  $F_Q$  为眼镜片前表面的屈光度。

通过眼镜片曲率半径计算公式, 可求出后表面的曲率半径  $r_H$  为



$$r_H = \frac{1-n}{F_H} \quad (11)$$

式中  $n$  为镜片材料的折射率。

利用式 (11) 即可获得基于镜眼联合模型所设计的眼镜片的表面面形。

## 2 镜片设计

基于上述镜眼联合模型的镜片设计方法,编写相应的 Matlab 计算程序,以角膜表面实际感受到的屈光度  $F_{JM} = -6.00$  D 为例,计算出镜片的理论屈光度  $F_J$  的分布图,如图 3 所示。图 3 中,  $d$  取平均值 27 mm,  $d_1$  取平均值 14 mm,所设计的镜片直径为 70 mm,对应最大视角  $\pm 52^\circ$ 。图 3 给出了视角从  $0^\circ \sim 25^\circ$  时对应镜片表面屈光度分布图,该视角范围满足实际佩戴的需求。当视角更大时,人会转动头部,使视角在舒适范围内,同时镜片的边缘区域也会被切割,以适配眼镜框架。

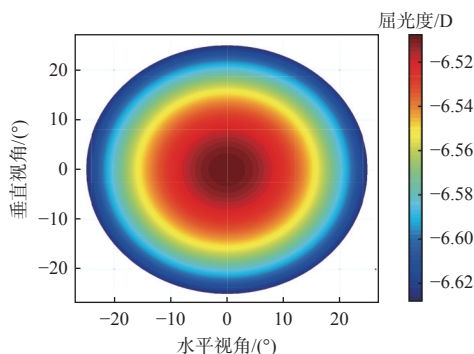


图3 镜片表面屈光度分布图

Fig. 3 Diopter distribution diagram of lens surface

从图 3 可以看出,为了实现人眼在不同视角观察时镜片都可以提供恒定的屈光度补偿,在设计镜片时要保证镜片表面上的屈光度分布呈连续渐变变化。这是因为在模拟实际佩戴状态下,测量单光球面镜片表面屈光度时,测量的顶球面与人眼旋转中心的距离会随着视场角的变化而逐渐变化,所以实际佩戴单光眼镜片时,人眼在不同视角下使用单光镜片的不同区域观察时,单光镜片提供的屈光度补偿是变化的。通过本文提出的镜眼联合模型的设计方法,计算出来的镜片表面屈光度数据,从中心点向四周边缘区域呈现连续变化并且逐渐增加的趋势。这样可以补偿传统单光球面眼镜片在佩戴状态下,人眼角膜处实际感受到的屈光度从中心点向边缘区域连续逐渐减少的不足。理论计算出的镜片表面屈光度分布呈同心圆

且数值从中心向边缘区域逐渐变大。这种渐变速度随着设计镜片中心处屈光度的不同而变化,设计镜片中心处屈光度越大,渐变速度越快。

假设镜片前表面为基弧,取  $F_0 = +2.50$  D,由公式 (10) 及公式 (11) 可得镜片表面的面形变化,呈现中心对称形式,如图 4 所示。

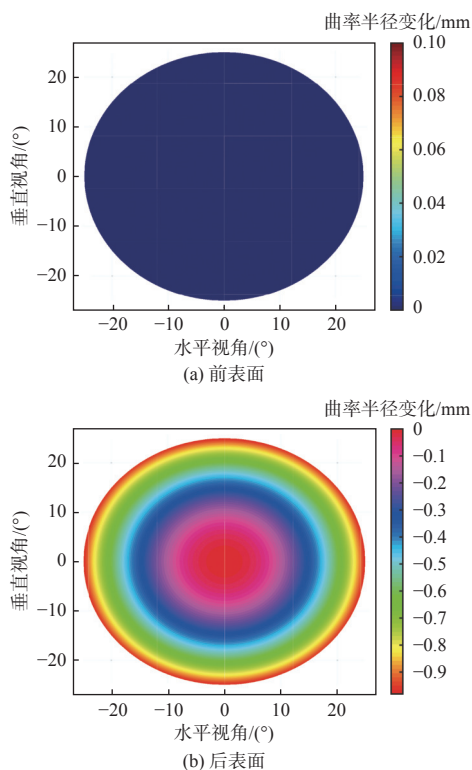


图4 镜片表面曲率半径变化图

Fig. 4 Diagram of curvature radius variation of lens surface

## 3 镜片的加工及测量

将图 4 中数据导入数控机床,机床能够实现横向及纵向  $0.1 \mu\text{m}$  的位移精度,  $1''$  的旋转精度,可满足本文设计镜片微米级加工精度的要求。选择前表面  $F_0 = +2.50$  D 为基弧的镜片毛坯进行镜片加工,并对其后表面对应视角  $\pm 25^\circ$  内的区域进行切削和抛光处理,得到加工后的镜片如图 5 所示。设计加工镜片的标称尺寸  $d_n = 70$  mm,实际加工出的未切割镜片直径有效尺寸为 69.9 mm,镜片直径使用尺寸为 69.8 mm,允差值为 0.1 mm,符合镜片尺寸的允差<sup>[1]</sup>。

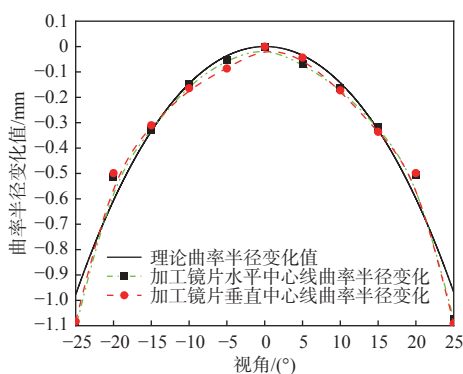
由于镜片的设计及加工的旋转对称性,对加工后的镜片后表面的水平及垂直中心线进行了测量,相应的面形变化及与理论计算值的差值如图 6 所示。从图 6 可以看出,受加工精度的影响,在加



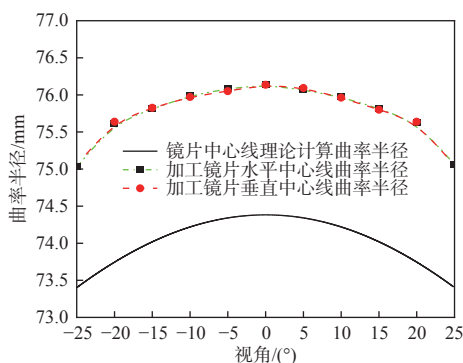
图5 加工镜片实物图

Fig. 5 Physical drawing of manufactured lens

工的镜片边缘区域出现了较大的误差, 中心区域的加工误差较小, 曲率半径变化值最大为 1.1 mm, 能满足加工面形变化要求。



(a) 镜片面形变化



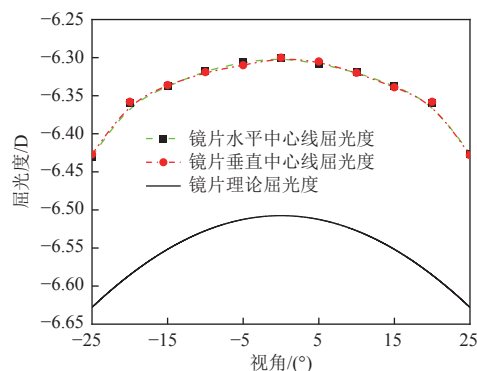
(b) 镜片曲率半径分布

图6 镜片面形数据图

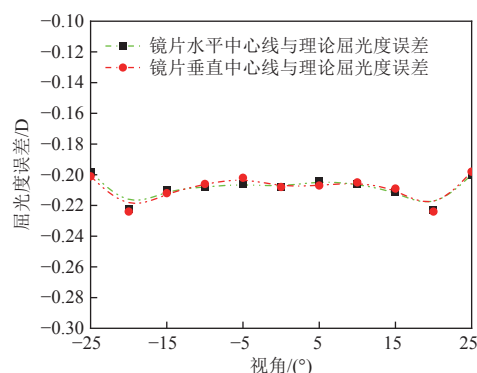
Fig. 6 Surface data diagram of manufactured lens

使用焦度计对镜片水平中心线及垂直中心线上的屈光度进行测量<sup>[18]</sup>, 测量结果如图7所示。从图7可以看出, 镜片屈光度呈中心向边缘渐近变大趋势, 与理论设计相符。受加工精度的影响, 在镜片边缘区域呈现较大的误差, 但整体屈光度及其变化趋势与理论计算相符, 满足设计要求。镜片后表面屈光度为-6.30 D, 屈光度误差值最大为

0.23 D, 镜片加工误差满足镜片设计误差 0.25 D。后续工作将采用更高精度的加工设备对镜片进行加工, 使镜片表面屈光度误差小于 0.12 D。同时希望出现一种适合该种镜片的加工方法, 以期改善误差值。



(a) 镜片屈光度分布



(b) 镜片屈光度误差

图7 镜片屈光度分布与误差

Fig. 7 Diopter distribution and error of manufactured lens

## 4 结论

本文提出了一种基于镜眼联合模型的单光镜片的设计方法。根据所建模型, 假定人眼视角变化使用镜片不同区域时, 到达人眼角膜前表面的有效屈光度保持恒定, 从而对现有的镜片设计进行优化, 重新求解出镜片不同区域屈光度的分布, 最终获得镜片的面形变化数据。将面形数据导入数控机床, 对镜片毛坯进行加工, 制作出人眼实际可感受到屈光度恒定的单光镜片。使用自动焦度计对加工后的镜片屈光度进行测量, 测量结果表明, 屈光度分布呈现从镜片中心向镜片四周渐变趋势, 与理论计算一致, 初步验证了所建模型及设计方法的有效性。在佩戴时, 能够使人眼实际感受到该镜片不同区域的矫正效果保持恒定。受加工方法及加工精度的影响, 所加工的镜片存在一

定的面形误差,进而引起了屈光度与理论设计值的偏差。下一步将对加工方法进行优化,选用更高精度的加工机床,同时将开发一套主客观评价方法,对实际佩戴时镜片提供给人眼角膜的屈光度补偿值进行量化评价。同时基于本文提出的镜眼联合模型,测量镜片视场角  $10^\circ$  以内的圆形和  $10^\circ \sim 25^\circ$  的点扩散函数 PSF,利用计算成像方法<sup>[19]</sup>对镜片成像质量进行检测,并根据测量结果进一步改进镜片的成像质量。

我国是眼镜制造大国,而非制造强国,国外厂商掌握着高附加值的镜片设计及制造市场。本文所提出的基于镜眼联合模型的镜片设计及制造方法,有助于提高我国高端镜片的生产水平及市场占有率。

#### 参考文献:

- [1] 瞿佳. 眼镜学[M]. 3版. 北京: 人民卫生出版社, 2017: 11-13.  
QU Jia. Ophthalmology [M]. 3rd ed. Beijing: People's Health Press, 2017: 11-13.
- [2] 李玲, 张红. 儿童青少年眼健康管理研究进展[J]. 中国儿童保健杂志, 2022(4): 413-416.  
LI Ling, ZHANG Hong. Current status of eye health management in children and adolescents[J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2022(4): 413-416.
- [3] 秦雯, 赵同领, 陈科, 等. 大学生对近视性屈光不正矫正方法的选择[J]. 现代医药卫生, 2016, 32(14): 2120-2122.  
QIN Wen, ZHAO Tongling, CHEN Ke, et al. College students' choices of myopic ametropia correction methods[J]. Journal of Modern Medicine & Health, 2016, 32(14): 2120-2122.
- [4] 王雁, 马娇楠. 屈光手术未来发展方向及趋势[J]. 中华实验眼科杂志, 2021, 39(12): 1025-1030.  
WANG Yan, MA Jiaonan. Future developments and trends in refractive surgery[J]. Chinese Journal of Experimental Ophthalmology, 2021, 39(12): 1025-1030.
- [5] MOMPEÁN J, ARAGÓN J L, ARTAL P. Portable device for presbyopia correction with optoelectronic lenses driven by pupil response[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-9.
- [6] JIA Z G, XU K, FANG F Z. Measurement of spectacle lenses using wavefront aberration in real view condition[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 22125-22139.
- [7] JIA Z G, XU K, FANG F Z. Effective wavefront aberration measurement of spectacle lenses in as-worn status[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(4): 045202.
- [8] 李念宁, 项华中, 高健东, 等. 基于遗传算法的非球面眼镜片设计[J]. 光学仪器, 2021, 43(3): 36-44.  
LI Nianning, XIANG Huazhong, GAO Jiandong, et al. Design and application of aspheric ophthalmic lens based on genetic algorithm[J]. Optical Instruments, 2021, 43(3): 36-44.
- [9] BARBERO S, FARIA-RIBEIRO M. Foveal vision power errors induced by spectacle lenses designed to correct peripheral refractive errors[J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 2018, 38(3): 317-325.
- [10] 张海平, 唐运海, 张慧星, 等. 基于非球面方程的渐进多焦点眼镜片优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 264-270.  
ZHANG Haiping, TANG Yunhai, ZHANG Huixing, et al. Optimal design of progressive addition lenses based on aspherical formula[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 264-270.
- [11] KONG L B, CHEUNG C F, TO S, et al. A theoretical and experimental investigation of design and slow tool servo machining of freeform progressive addition lenses (PALs) for optometric applications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1/2/3/4): 33-40.
- [12] 袁吕军, 陈韬. 高次非球面的工艺技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 335-342.  
YUAN Lyujun, CHEN Tao. Manufacturing technology for high order aspheric surface[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 335-342.
- [13] FENG Haihua, XIA Risheng, LI Yiyu, et al. Fabrication of freeform progressive addition lenses using a self-developed long stroke fast tool servo[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9/10/11/12): 3799-3806.
- [14] WU Quanying, TANG Yunhai, Chen Xiaoyi, et al. Method for evaluating ophthalmic lens based on Eye-Lens-Object optical system[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37274-37285.
- [15] 徐恺. 基于波前像差的自由曲面眼镜片测量方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
XU Kai. Study on measurement of freeform spectacle

- lenses based on wavefront aberration[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [ 16 ] YU J, HUA F, JIANG W. Distortion evaluation method for the progressive addition lens-eye system[J]. [Optics Communications](#), 2019, 445: 204-210.
- [ 17 ] 任建锋. 非球面眼镜片设计与加工[D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
- REN Jianfeng. Design and manufacture the aspherical spectacle lens[D]. Suzhou: Soochow University, 2006.
- [ 18 ] 刘晨. 焦度计综述[J]. 应用光学, 2004, 25(1): 55-57.
- LIU Chen. Lensometer[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(1): 55-57.
- [ 19 ] 纪轶男, 李海峰, 刘旭. 大视场单镜片计算成像系统图像分割学习方法[J]. 光电工程, 2022, 49(5): 16-25.
- JI Yinan, LI Haifen, LIU Xu. Image segmentation learning method for large field single lens computational imaging system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(5): 16-25.