

激光与光电子学进展

基于非球面方程的渐进多焦点眼用镜片 优化设计

张海平^{1,2}, 唐运海^{1*}, 张慧星^{1,2}, 陈晓翌^{2,3}

¹江苏省微纳热流技术与能源应用重点实验室, 苏州科技大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009;

²江苏省研究生工作站苏州苏大明世光学股份有限公司, 江苏 苏州 215007;

³苏州明世光学科技有限公司, 江苏 苏州 215007

摘要 针对近视转老花人群特点, 提出渐进多焦点眼用镜片(PAL)的优化设计方法。该方法中渐进多焦点表面矢高表达式为非球面公式, 用连续变化的曲率调整元来调节光焦度和像散分布, 该曲率调整元采用高斯函数多项式形式。分别用球面和非球面矢高表达式设计附加光焦度为 1.5 D 的 PAL 作对比。设计结果中给出了光焦度和像散分布, 并采用以色列 ROTLEX 公司的自由曲面检测仪仿真验证。结果表明, 优化设计的 PAL 的装配中心周边光焦度环状增加, 镜片最大像散不超过 1.25 D, 即镜片最大像散不超过附加光焦度的 83%。装配中心所在水平线的上部区域内, 像散均小于 0.5 D。视近区光焦度稳定带的长度接近 20 mm。该 PAL 视远区光焦度环状增加, 有利于缓解近视眼的视疲劳; 镜片最大像散明显减小, 易于被近视转老花且初次佩戴 PAL 的客户接受。

关键词 光学设计; 渐进多焦点眼用镜片; 近视; 老花

中图分类号 TH74 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0322001

Optimal Design of Progressive Addition Lenses Based on Aspherical Formula

Zhang Haiping^{1,2}, Tang Yunhai^{1*}, Zhang Huixing^{1,2}, Chen Xiaoyi^{2,3}

¹Jiangsu Key Laboratory of Micro and Nano Heat Fluid Flow Technology and Energy Application, School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China;

²Graduate Practice Station, Suzhou Mason Optical Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215007, China;

³Suzhou Mason Optical Technology Ltd., Suzhou, Jiangsu 215007, China

Abstract An optimized method for the design of progressive addition lens (PAL) is proposed in this study, aiming at the characteristics of the population that experiences a transition from myopia to presbyopia. The height expression of the surface of the PAL is proposed based on an aspherical formula, and a continuously varying conic coefficient is used to adjust the optical power and astigmatism distribution. Two PALs with an additional power of 1.5 dioptres were designed for comparison, using the spherical height and the aspheric height expression, respectively. The optical power and astigmatism distribution are given in the design results, and the free form verifier (FFV) of ROTLEX Ltd. in Israel is used to verify the results obtained via simulation. The results show that the optical power around the assembly centre of the optimized PAL annularly increases. The maximum astigmatism distribution of the lens does not exceed 1.25 dioptres, thereby not exceeding 83% of the additional power. In the

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-08; 录用日期: 2021-05-16

基金项目: 江苏省“十三五”重点学科建设基金项目(20168765)、国家自然科学基金(61875145, 11804243)

通信作者: *tyhgfx@163.com

area above the assembly centre, the astigmatism at any position is less than 0.5 dioptres. The length of the power stabilization zone in the near zone is approximately 20 mm. The optical power of the distance zone of the optimized PAL is annularly increased, which is beneficial to alleviate the asthenopia of myopia. The maximum astigmatism of the lens is considerably reduced, which is easily accepted by customers whose defect in vision has changed from myopia to presbyopia and wear PALs for the first time.

Key words optical design; progressive addition lens; myopia; presbyopia

1 引言

当前,自由曲面成像光学系统设计与检测方法研究具有巨大的发展潜力^[1-2]。目视系统中的眼镜片设计包括隐形眼镜设计^[3]和框架镜片设计。其中渐进多焦点眼镜片(PAL)具有连续渐变的光焦度,是中老年人老视眼(老花眼)患者解决一副眼镜看远、中和近距离物体问题的一种主要手段。渐进多焦点眼镜片的设计方法有直接设计方法^[4-6]和间接设计方法^[7-9]。近几年,直接设计方法的优化设计有:对子午线的优化设计^[10],对轮廓线的优化设计^[11-12]和减小像差优化设计^[13]。间接设计方法方面有采用变分差分法设计渐进多焦点眼镜片^[14]。直接设计和间接设计方法都出现了针对镜片佩戴者特征的个性化设计^[15-16]。佩戴渐进多焦点眼镜片对人们工作生活的影响的研究也相继展开^[17-18]。

现有渐进多焦点眼镜片的渐进表面的视远区大致为球面,而视近区纵向光焦度稳定带一般较短。对于近视转老花,初次佩戴渐进多焦点眼镜片人群而言,现有渐进多焦点眼镜片存在两方面的不足:一方面,根据 Minkwitz 定理^[19-20],像散向通道两侧的递增速率是子午线光焦度变化率的两倍。传统渐进多焦点眼镜片为了获得较大的视远区和较短的渐变通道,像散最大值为附加光焦度的 90% 以上,有时甚至大于附加光焦度^[6,9],而初次佩戴渐进多焦点眼镜片的人群对像散比较敏感,过大的像散将导致配镜投诉率提高或满意度降低。另一方面,为了减小渐进多焦点眼镜片像散,有的镜片在视近区的纵向稳定带小于 10 mm^[16],较短的纵向稳定带容易造成配镜者长期阅读时视觉效果相对不稳定,对于大框架眼镜来说该现象尤其明显,人眼难以适应该缺点带来的不适感。要改善上述两点不足,需要对镜片光焦度进行局部微调,间接设计方法难以对目标函数进行平滑微调,并且直接设计方法的优化设计参数又不够多。

针对上述问题,鉴于近视眼转老花,初次戴渐进多焦点眼镜片人群的眼睛仍然具有一定的调

节能能力,本文提出一种渐进多焦点眼镜片优化设计方法,进一步改善该人群的佩戴体验,使渐进多焦点眼镜片更具有产业上的利用价值。

2 设计方法与步骤

渐进多焦点眼镜片表面按使用功能可划分为视远区、视近区、渐变通道和周边像散区 4 部分(图 1)。视远区、视近区和渐变通道统称为有效视觉区。图中点 A 和点 B 分别为视远区参考点和视近区参考点,连接点 A 和点 B 的曲线称为渐进多焦点眼镜片的子午线。渐进多焦点眼镜片的装配中心(FT)位于镜片几何中心上部 4~5 mm 处。本文基于渐进多焦点眼镜片的直接设计方法,将渐进表面的矢高表达式改为非球面表达式,其曲率调整元为连续渐变函数,确保镜片不会出现光焦度跳变而引入较大的像散。

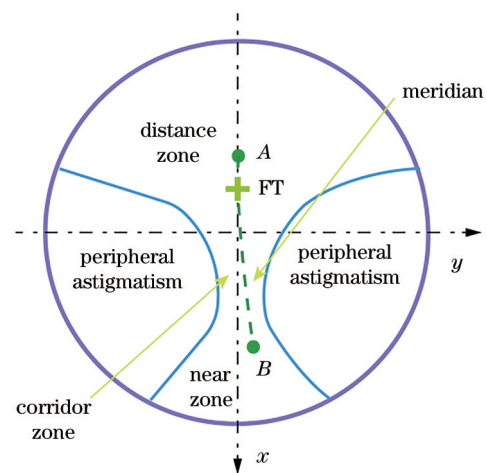


图 1 渐进多焦点眼镜片功能区示意图

Fig. 1 Schematic of functional zones of progressive addition lenses

2.1 直接设计方法的一般步骤

在如图 1 所示的坐标系中, z 轴垂直纸面向外。渐进多焦点眼镜片的直接设计步骤包括:子午线光焦度设计,轮廓线设计,曲率中心设计和镜片表面矢高表达式(图 2)。

为了不产生过大像散,子午线光焦度变化必须

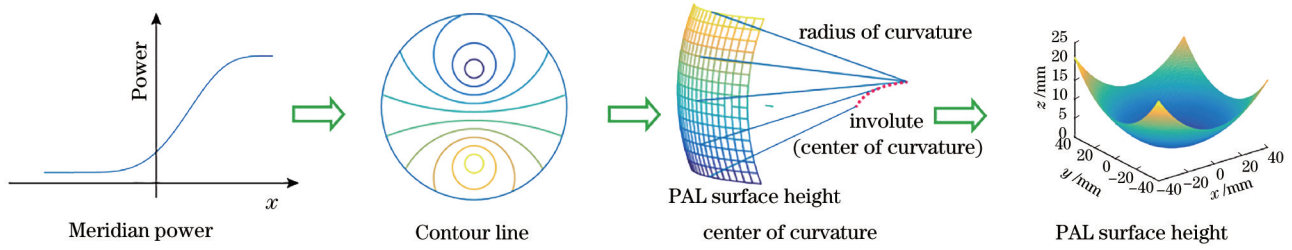


图 2 直接设计方法流程图

Fig. 2 Flow chart of direct design method

连续且光滑,尤其在端点处的变化必须更加平缓,可以要求其至少 $1 \sim n (n > 2)$ 阶导数的值为零^[21]。

子午线光焦度通过轮廓线扩展到整个镜片。每条轮廓线上的光焦度只有一个确定值。从视远区参考点到视近区参考点,子午线与每条轮廓线只有一个交点。在该交点处轮廓线上光焦度的值与子午线相同。

渐进多焦点眼用镜片表面上各点的曲率半径为

$$r = \frac{n-1}{P}, \quad (1)$$

式中: n 为镜片的折射率; P 为该点处的光焦度。渐进表面的曲率中心 (x, η, z) 为渐进表面的渐屈线^[21]。

有了曲率半径分布和曲率中心 (x, η, z) , 传统设计方法中, 渐进表面的矢高由球面公式得到,

$$z_0(x, y) = \zeta - \sqrt{r^2 - [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]}. \quad (2)$$

2.2 表面矢高的优化设计

现有文献中, 表面矢高表达式是球面公式, 在曲率半径和曲率中心确定后, 渐进多焦点眼用镜片便没有了进一步优化空间。将渐进表面矢高表达式改为非球面表达式则可以实现局部调整光焦度和像散的目标。曲率调整元 k' 为高斯函数多项式, 以确保其连续平滑变化。

$$z(x, y) = \zeta - \sqrt{r^2 - (1 + k')[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]}, \quad (3)$$

其中,

$$k' = k_0 \sum_{i=1}^N m_i \exp\left[-\frac{(x - x_i)^2 + y^2}{\sigma_i^2}\right], \quad (4)$$

式中: k_0 为曲率调整元的最大值, 为避免光焦度改变过大, 其值一般小于 0.1; N 为高斯函数多项式的项数; m_i 为每个高斯函数幅度调整系数; σ_i 表征高斯函数半宽度; x_i 确定每个高斯函数的位置。

下面讨论(3)式对曲率的调节作用。(3)式和

(2)式移项平方并相减后得

$$(\zeta - z)^2 = (\zeta - z_0)^2 - k'[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]. \quad (5)$$

分别对(5)式求 x 的一阶和二阶偏导得

$$(\zeta - z) \frac{\partial z}{\partial x} = (\zeta - z_0) \frac{\partial z_0}{\partial x} + k'(x - \xi), \quad (6)$$

$$-\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + (\zeta - z) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\left(\frac{\partial z_0}{\partial x}\right)^2 + (\zeta - z_0) \frac{\partial^2 z_0}{\partial x^2} + k'. \quad (7)$$

在坐标原点附近, 曲率较小时, (7)式中

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx 0, \frac{\partial z_0}{\partial x} \approx 0 \text{ 并且 } (\zeta - z) \approx (\zeta - z_0), \text{ 因此有}$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \approx \frac{\partial^2 z_0}{\partial x^2} + \frac{k'}{(\zeta - z_0)}. \quad (8)$$

根据(2)式可知, $(\zeta - z_0) > 0$, 又因 $k' > 0$, 所以(3)式可以使曲面在 x 方向上曲率变大。同理(3)式也可以使曲面在 y 方向上曲率变大。即与(2)式相比, 非球面(3)式可以增加曲面的曲率, 曲率增大值与曲率调整元 k' 正相关。

由于总的附加光焦度量不变, 即从视远区到视近区总的曲率变化率不变, 调整(4)式的参数可以使曲面在视远区曲率环状递增, 在渐变通道处的曲率变化量就会变小, 而渐变通道长度不变, 从而减小了曲率在渐变通道处 x 方向上的变化率 $\frac{\partial c}{\partial x}$ 。

根据 Minkwitz 定理, 镜片子午线两侧的像散与子午线光焦度的关系表示为^[19]

$$\lim_{y \rightarrow 0} \frac{\partial A}{\partial y} = 2 \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (9)$$

式中: A 为像散; c 为曲面子午线上在该点处的曲率。(9)式说明在子午线附近镜片的像散的增速与曲面曲率在子午线方向上的变化率成正比。 $\frac{\partial c}{\partial x}$ 减小镜片像散必然变小。

由于近视转老花, 初次佩戴渐进多焦点眼用镜片的人群的眼睛一般具有一定的调节能力, 但是对

镜片像散又特别敏感。将视远区变为非球面,从配镜中心开始,光焦度环状增加,从而减缓渐变通道处光焦度梯度,进而可以减小镜片像散。同样,也可以减缓在视近区光焦度梯度,从而减小视近区的像散,扩大清晰视觉范围。

3 设计结果与仿真分析

根据配镜者的需求,设计一个视远区光焦度为 -2.0 D ,附加光焦度为 1.5 D 的内渐进多焦点眼用

镜片。镜片材料折射率 $n=1.56$, 镜片口径 $\Phi=80\text{ mm}$, 渐变通道长度 15 mm 。镜片前表面采用光焦度为 4.0 D 的球面,因而后表面的视远区光焦度需 -6.0 D 。根据文献[4]设计子午线,采用文献[11]中介绍的方法设计轮廓线,根据文献[21]介绍的方法设计渐进多焦点眼镜片表面的曲率半径 r 分布和曲率中心坐标 (x, η, z) 后,首先采用(2)式计算渐进多焦点眼镜片后表面矢高。根据微分几何计算渐进表面的光焦度和像散分布如图3所示。

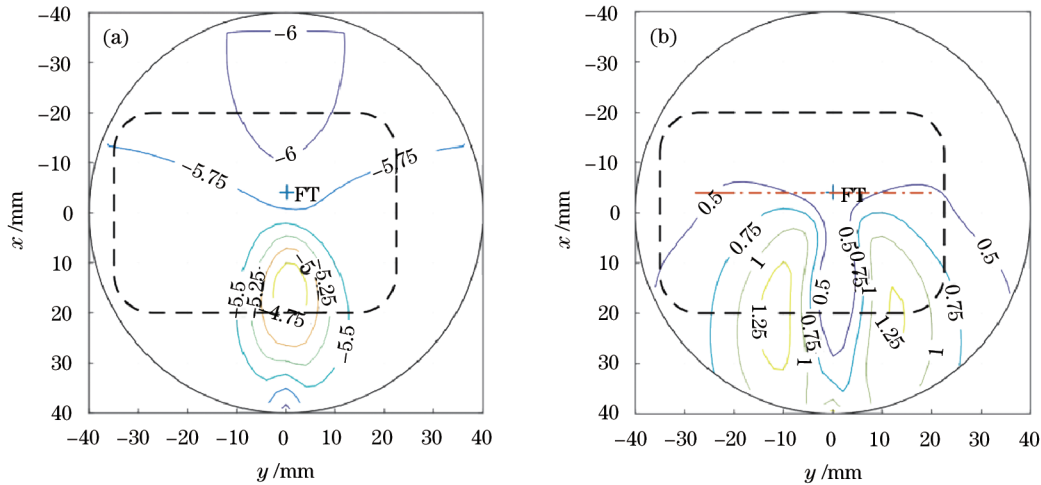


图3 优化前的渐进多焦点眼用镜片后表面等值线图。(a)光焦度;(b)像散

Fig. 3 Contour maps of back surface of PAL before optimization. (a) Power; (b) astigmatism

图3中渐进多焦点眼用镜片的整个视远区光焦度均为 -6.0 D ,而视近区的光焦度呈峰状分布,纵向稳定区域较短。镜片上最大像散为 1.45 D ,占附加光焦度的 97% 。视近区像散小于 0.5 D 的区域最大宽度不足 8 mm 。

为了优化渐进多焦点眼用镜片的视远区光焦度,并且减小视近区的像散,(4)式中高斯函数由3部分组成,即 $N=3$,通过尝试得到(4)式中 $k_0=0.08$,其他参数的值如表1所示。曲率调整元分布如图4所示。

表1 曲率调整元表达式中的参数

Table 1 Parameters in curvature adjustment element expression

i	m_i	σ_i / mm	x_i / mm
1	1.0	17.3	-5
2	0.5	19.0	27
3	0.3	27.4	50

采用非球面(3)式计算得到的渐进多焦点眼用镜片表面的光焦度和像散分布如图5所示。(4)式中曲率调整元 k' 在视远区有一个最高峰,使得到的渐

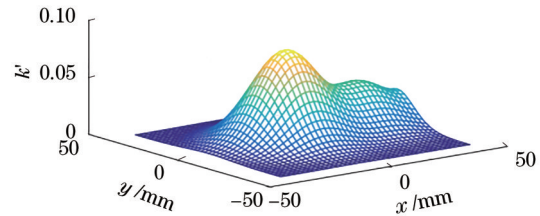


图4 曲率调整元分布的三维网图

Fig. 4 A three-dimensional diagram of curvature adjustment element distribution

进多焦点眼用镜片在视远区光焦度环状增加; k' 在视近区有一个平缓的次峰,使渐进多焦点眼用镜片的视近区光焦度稳定增加。同时,曲率调整元 k' 对视远区和视近区以外的区域的光焦度也具有调节作用,能够减缓该区域内的光焦度变化梯度,从而减小像散。

图5(b)镜片视远区内,装配中心水平线以上,像散均低于 0.5 D 。以镜片几何中心上下各 20 mm ,水平鼻侧 22.5 mm ,颞侧 35 mm ,即图中虚线构成的圆角矩形范围内最大像散不超过 1.25 D ,即镜片最大像散不超过附加光焦度的 83% 。视近

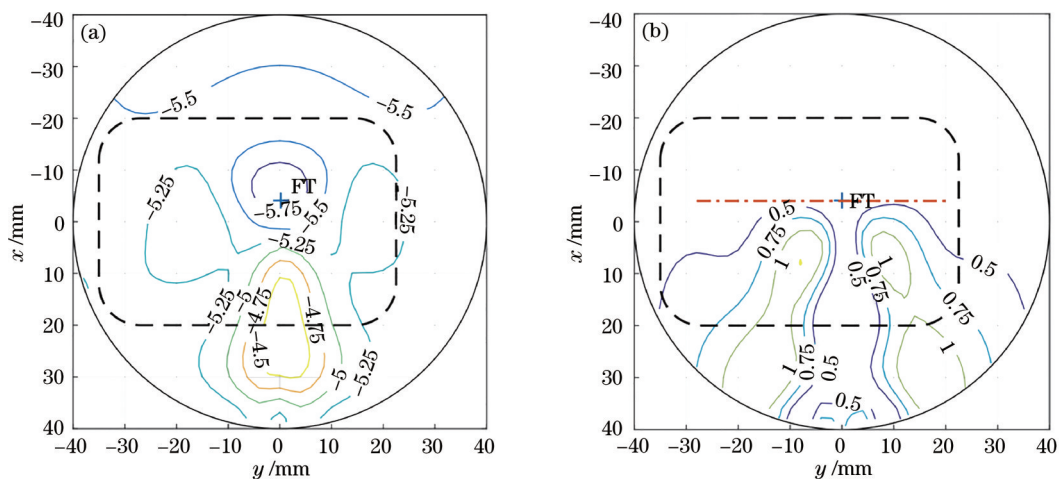


图 5 优化后的渐进多焦点眼镜片后表面等值线图。(a)光焦度;(b)像散

Fig. 5 Contour maps of back surface of PAL after optimization. (a) Power; (b) astigmatism

区有近 20 mm 的光焦度稳定带(参见图 6)。从图 5 中可以看出,在该稳定带处,像散小于 0.5 D 区域的横向最大宽度为 10 mm。

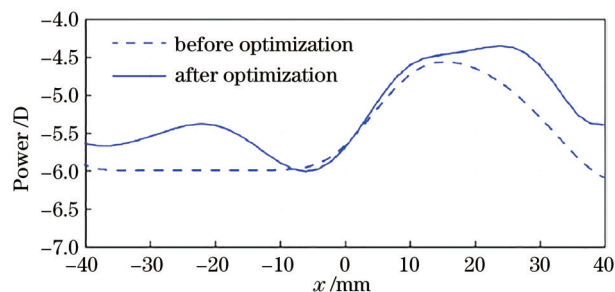


图 6 优化前和优化后子午线光焦度分布曲线

Fig. 6 Meridian power distribution curves before and after optimization

将初始设计的和优化后的渐进多焦点眼镜片矢高、厚度、前表面曲率半径和折射率数据导入到以色列 ROTLEX 公司的自由曲面面型检测软件 (Free Form Verifier) 中,利用其仿真功能生成光焦度和像散分布如图 7 和图 8 所示。由于前表面球面像差的影响,仿真结果与根据微分几何计算的光焦度和像散分布略有不同。从图中比较可知:优化前后的渐进多焦点眼镜片视远区光焦度(Sph)和附加光焦度(Add)相差很小,但是优化设计的镜片光焦度在视远区呈环状递增,在视近区光焦度稳定带明显拉长。优化前镜片最大像散为 1.44 D,优化后最大像散为 1.12 D,减小了 0.32 D。图中虚线为像散为 0.5 D 的等值线,视近区像散小于 0.5 D 的区域宽度明显增加。

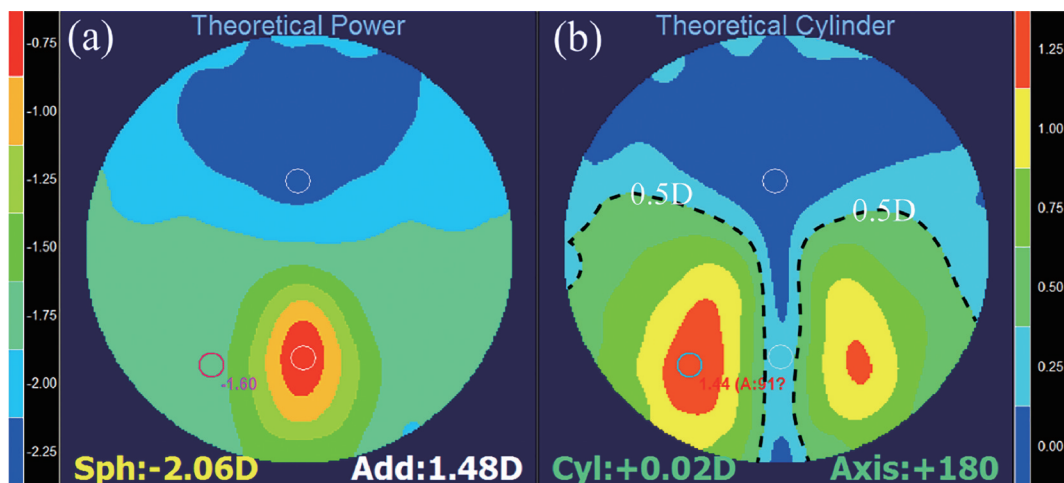


图 7 优化前的渐进多焦点眼镜片的 FFV 仿真分布。(a)光焦度;(b)像散

Fig. 7 FFV simulation distributions of PAL before optimization. (a) Power; (b) astigmatism

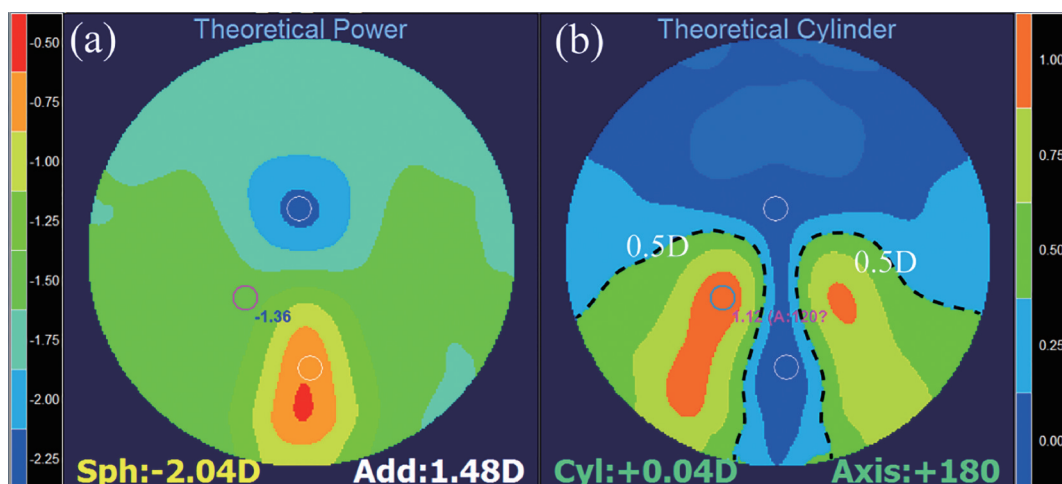


图 8 优化后的渐进多焦点眼镜片的 FFV 仿真分布。(a)光焦度;(b)像散

Fig. 8 FFV simulation distributions of PAL after optimization. (a) Power; (b) astigmatism

4 结 论

本文提出的优化设计方法能够增大渐进多焦点眼镜片设计的灵活性,减小像散并扩大镜片的有效视觉区范围。本文方法优化设计的渐进多焦点眼镜片具有如下特点:1) 带有光焦度环状增加的视远区,有利于缓解近视眼睛的视疲劳;2) 镜片的最大像散相对优化前明显减小;3) 在视近区能形成光焦度稳定区,大幅度降低长期阅读时由于光焦度不稳定造成的用眼疲劳感。该镜片有利于提高近视转老花,初次佩戴渐进多焦点眼镜片人群的适应度。

参 考 文 献

- [1] Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0108001.
杨通, 段瓔哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001.
- [2] Zhu R H, Sun Y, Shen H. Progress and prospect of optical freeform surface measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0112001.
朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112001.
- [3] Bian Y Y, Liu Y J, Liu B K, et al. Contact lens for controlling myopia progression and correcting myopia and astigmatism[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0422001.
边亚燕, 刘永基, 刘宝凯, 等. 控制近视进展并矫正
- 近视散光的隐形眼镜[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0422001.
- [4] Wu Q Y, Qian L, Chen H, et al. Research on meridian lines design for progressive addition lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3186-3191.
吴泉英, 钱霖, 陈浩, 等. 渐进多焦点眼镜片的子午线设计研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3186-3191.
- [5] Xiang H Z, Zhu T F, Wei Y F, et al. Design for multi-optical-axis progressive addition spectacle lenses[J]. Optical Technique, 2015, 41(4): 355-359.
项华中, 朱天凤, 魏叶飞, 等. 多光轴渐进变焦眼镜设计[J]. 光学技术, 2015, 41(4): 355-359.
- [6] Wei J J, Wu F, Shen W M. Design and evaluation of progressive addition spectacle lenses[J]. Optical Technology, 2003, 29(3): 350-353.
韦剑剑, 吴锋, 沈为民. 渐变眼镜片的设计及评价[J]. 光学技术, 2003, 29(3): 350-353.
- [7] Loos J, Greiner G, Seidel H P. A variational approach to progressive lens design[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(8): 595-602.
- [8] Wang J, Santosa F. A numerical method for progressive lens design[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2004, 14(4): 619-640.
- [9] Xiang H Z, Zhang L, Gao J D, et al. Weight distributions of spherical and cylindrical power deviations for designing freeform progressive addition lenses[J]. Optics Communications, 2021, 484: 126662.
- [10] Tang Y H, Wu Q Y, Chen X Y, et al. Optimization design of the meridian line of progressive addition lenses based on genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922005.

- 唐运海, 吴泉英, 陈晓翌, 等. 基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922005.
- [11] Zhang H, Tang Y H, Wu Q Y, et al. Contour line optimization design of progressive addition lenses based on Laplace equation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017(11): 112201.
张皓, 唐运海, 吴泉英, 等. 基于拉普拉斯方程的渐进多焦点眼镜片轮廓线优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 112201.
- [12] Tang Y H, Wu Q Y, Chen X Y, et al. A personalized design for progressive addition lenses[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28100-28111.
- [13] Wu Q Y, Tang Y H, Qian L, et al. Design and optimization of main curvature difference for progressive addition lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0622001.
吴泉英, 唐运海, 钱霖, 等. 渐进多焦点眼镜片的主曲率差优化设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0622001.
- [14] Jiang W, Bao W Z, Tang Q L, et al. A variational-difference numerical method for designing progressive-addition lenses[J]. Computer-Aided Design, 2014, 48: 17-27.
- [15] Tang Y H, Wu Q Y, Qian L, et al. Design of personalized progressive addition lenses[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2638-2644.
唐运海, 吴泉英, 钱霖, 等. 渐进多焦点眼镜片的个性化设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2638-2644.
- [16] Li Y Y, Huang W, Feng H H, et al. Customized design and efficient machining of astigmatism-minimized progressive addition lens[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(11): 113302.
- [17] Kee C S, Leung T W, Kan K H, et al. Effects of progressive addition lens wear on digital work in pre-presbyopes[J]. Optometry and Vision Science, 2018, 95(5): 457-467.
- [18] Mawatari G, Uchida S, Nao-I N. Base curve of progressive addition lenses influences clear vision and stereopsis area[J]. Clinical Optometry, 2020, 12: 223-230.
- [19] Sheedy J E, Campbell C, King-Smith E, et al. Progressive powered lenses: the Minkwitz theorem [J]. Optometry and Vision Science, 2005, 82(10): 916-922.
- [20] Esser G, Becken W, Altheimer H, et al. Generalization of the Minkwitz theorem to nonumbilical lines of symmetrical surfaces[J]. Journal of the Optical Society of America, 2017, 34(3): 441-448.
- [21] Winthrop J T. Progressive addition spectacle lens: US4861153[P]. 1989-08-29.