

渐进多焦点镜片的逐点定向曲率补偿优化设计

秦琳玲¹ 钱霖² 余景池¹

¹ 苏州大学现代光学技术研究所江苏省先进光学制造技术重点实验室,
教育部/江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006
² 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006

摘要 提出一种利用逐点定向曲率补偿法对渐进多焦点镜片初始模型进行整体优化以减小周边散光区(俗称盲区)的优化设计方法。推导出自由曲面任意方向法曲率的计算公式、确定主曲率和主方向的方法,求出镜片初始模型上各点的曲率差和最大曲率方向、最小曲率方向,通过迭加由不同曲率、不同轴向微小柱面构成的自由曲面,来实现逐点定向曲率补偿,使镜片各点的曲率差适当减小,从而减小散光。给出具体优化步骤和一个优化设计实例,并进行实际加工制作与检测。对比优化前后的光焦度和散光度的面形分布图。结果表明,逐点定向曲率补偿法能有效减小渐进多焦点镜片初始模型的最大散光并明显扩大视远区清晰视觉范围。

关键词 光学设计;渐进多焦点镜片;优化;主曲率;散光

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1122003

Optimization Design for Progressive Addition Lenses by Pointwise Directional Curvature Compensation

Qin Linling¹ Qian Lin² Yu Jingchi¹

¹ Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technology of Jiangsu Province and Key Laboratory of Modern Optical Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

² School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract A global optimizing method using pointwise directional curvature compensation which can reduce the undesirable astigmatism is proposed. The calculation formula of normal curvature at arbitrary direction is deduced and the method is proposed to determine the principal curvature and principal direction. The principal curvature difference and the directions of the maximum and minimum curvature of the initial progressive addition lens are calculated. The optimization method can reduce the astigmatism by adding the freeform surface consisting of micro cylinders with different curvatures and different directions. The optimization algorithm and an example are given. An initial progressive addition lens and an optimized lens by this method are manufactured and tested. Compared with the initial lens, the optimized lens has smaller maximum astigmatism value and larger clear region in the distance-vision zone.

Key words optical design; progressive addition lenses; optimization; principal curvature; astigmatism

OCIS codes 220.3620; 220.3630; 220.4610; 220.1250

1 引 言

渐进多焦点镜片应用自由曲面实现镜片的光焦度连续变化,通过光焦度连续渐进增加的过渡区实现视远区与视近区表面面形与光焦度的自然衔接,

使由远及近不同距离的视野无断裂且能清晰成像,克服人们使用双光镜等在视远区和视近区转换时造成的视野不连续、视像断裂、中距离视物不清、视远区和视近区有明显的可见分界等缺陷。因此,渐进

收稿日期: 2012-04-27; **收到修改稿日期**: 2012-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61078045)和江苏省高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 秦琳玲(1982—),女,博士研究生,主要从事光学设计与加工等方面的研究。E-mail: candy_700@tom.com

导师简介: 余景池(1943—),男,研究员,主要从事光学加工与检测等方面的研究。E-mail: yujc@suda.edu.cn

多焦点镜片越来越受人们的关注,其应用范围日趋广泛,应用前景十分广阔^[1,2]。

理想的渐进多焦点镜片应当满足有效视觉区尽量大、渐进区(或称通道)尽量短且宽和两侧散光变化柔和等要求^[1]。这些要求都需要通过减小散光来实现,因此如何减小渐进多焦点镜片的散光成为当前渐进多焦点眼用镜片设计的关键问题。针对这个问题,国外采用的方法主要有:混合设计法^[3],分片组合补偿优化法^[4]和优化函数法^[5]。这几种方法均为渐进多焦点镜片的不同初始设计方法,设计周期长,但都能达到减小散光的效果。国内除了参考国外采取的方法之外还有子午线屈光度分布法^[6]和平均曲率流法^[7]。子午线屈光度分布法也是一种初始设计方法;平均曲率流法是对初始设计模型进行优化,不改变整体光学性质但能改善局部光学缺陷的优化方法,然而这种局部优化的方法不能保证优化后整个镜片的均匀性。

本文提出一种利用逐点定向曲率补偿法对渐进多焦点镜片初始模型进行整体优化以减小散光的优化设计方法。通过该方法只需已知渐进多焦点镜片初始模型表面的矢高数据,就能有效减小镜片表面的最大散光,明显扩大视远区,且镜片的主要光学参数不变。该方法是对整个镜片进行全面优化,所以优化效果更加理想。

2 渐进多焦点镜片的自由曲面特性

2.1 渐进多焦点镜片的分区示意图和视光学特性

从镜片的远视区开始,经中间的渐进区(或称通道)到近视区,光焦度逐渐变化。如图1所示,1区为视远区;2区为视近区,在30~40 cm的视距条件下,可以满足近用阅读和写作的使用要求;3区是一段自上而下有规律变化的区域,用于看中距离的物体,称为渐进区(也称通道),配戴者由远到近注视的过程中,视线擦过这个区域时,获得的像可以保持形态和大小连续性,使视觉达到生理和心理意义上的满足;4区是周边散光区,当视线移向此区时,会感到物体变形并伴有视觉模糊,变形的程度与渐进多焦点镜片的设计及加光度相关。视远区、渐进区和视近区统称为有效视区^[8]。渐进多焦点镜片由于其光焦度自上而下渐变的特点,表面失去了回转对称性,是一个空间自由曲面。一般而言,初始设计的渐进多焦点镜片存在的问题是周边散光区散光过大,视远区不够开阔。逐点定向曲率补偿法的目标是减小周边散光区并适度增宽视远区清晰范围。

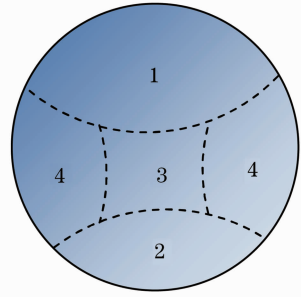


图1 分区示意图

Fig. 1 Schematic of zone division

2.2 镜片的曲面特性

过曲面某点的法线与任一切方向确定的平面为法截面,它与曲面交线(法截线)的曲率称为该点某方向的法曲率。法曲率反映了曲面在一点处沿指定方向的弯曲程度,曲面在每一点存在两个彼此垂直的切方向,使得法曲率在这两个方向分别达到最大值和最小值,这两个切方向称为曲面在该点的主方向,相应的两个法曲率 k_1 和 k_2 称为曲面在该点的主曲率。

渐进多焦点镜片的曲面特性主要用光焦度和散光度这两个参数来分析和评价。渐进多焦点镜片上各点的光焦度为

$$\Phi = 1000(n-1)\mu, \quad (1)$$

式中 n 为镜片的材料折射率, Φ 的单位为D,1 D = 1 m⁻¹。 μ 是主曲率 k_1 和 k_2 的平均数,称为平均曲率。镜片上各点的散光度为

$$\Phi_{ast} = 1000(n-1)\delta, \quad (2)$$

式中 δ 是主曲率 k_1 和 k_2 之间差值的绝对值,称为主曲率差。主曲率的两个主方向相互垂直,规定主曲率差的方向与最小曲率的主方向重合。散光度表示镜片在两个相互垂直的主方向上弯曲程度的不同,眼镜学上规定某一主方向为散光轴向,其垂直方向的光焦度等于散光轴向的光焦度加散光度,散光度可正可负。规定散光度为正,散光轴向为主曲率差方向。

3 优化设计方法

逐点定向曲率补偿法的设计思想是:求出镜片初始模型上各点的曲率差和最大曲率方向、最小曲率方向,通过迭加由不同曲率、不同轴向的微小柱面构成的自由曲面,来实现逐点定向曲率补偿,使镜片各点的曲率差适当减小,从而减小散光。

3.1 主曲率和主方向的确定

导出自由曲面任意方向法曲率的计算公式和确

定主曲率,主方向的方法。在笛卡尔直角坐标系中,设渐进多焦点镜片的表面初始矢高分布为 $z_0(x,y)$,由法截线的曲率计算公式^[9]推导出曲面上各点在各方向上的法曲率为

$$k(x,y,\theta) = \frac{\frac{\partial^2 z_0}{\partial x^2} \cos^2 \theta + 2 \frac{\partial^2 z_0}{\partial x \partial y} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial^2 z_0}{\partial y^2} \sin^2 \theta}{\left[1 + \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial z_0}{\partial y} \sin \theta \right)^2 \right]^{3/2}}, \quad (3)$$

式中 θ 为方向角度,取一个常数。利用(3)式根据镜片初始矢高分布 $z_0(x,y)$ 求得每个方向 θ 对应的 $k(x,y,\theta)$ 值,并比较求出各点最大曲率 $k_{\max}(x,y)$ 和最小曲率 $k_{\min}(x,y)$,即各点的主曲率 k_1 和 k_2 ,以及对应的最大曲率的方向 $\theta_{\max}(x,y)$ 和最小曲率的方向 $\theta_{\min}(x,y)$,即各点的主方向。优化前镜片上各点的主曲率差为

$$\delta_0(x,y) = k_{\max}(x,y) - k_{\min}(x,y), \quad (4)$$

3.2 补偿用自由曲面的构建

为实现逐点定向曲率补偿,构建一个用于补偿的自由曲面 $z_1(x,y)$,该自由曲面是由不同曲率、不同轴向的微小柱面构成,各个微小柱面的曲率为

$$C(x,y) = \delta_0(x,y)/M, \quad (5)$$

式中 $\delta_0(x,y)$ 为优化前各点的主曲率差, M 为20~35的常数。若 M 取小于20的常数,补偿用自由曲面的矢高值 $z_1(x,y)$ 比较大,将改变镜片的主要光学参数;若 M 取大于35的常数,新的自由曲面的矢高值 $z_1(x,y)$ 又太小,不能有效减小散光,达不到优化的效果。补偿用自由曲面的特点是曲面上各微小区域都是一个小柱面,每个小柱面的曲率不同,轴向 θ_i 为求得的各点的最小曲率方向 $\theta_{\min}(x,y)$,得到用于补偿的自由曲面矢高分布公式为

$$z_1(x,y) = \frac{C(x,y)(x \cos \theta_i - y \sin \theta_i)^2}{1 + \sqrt{1 - C^2(x,y)(x \cos \theta_i - y \sin \theta_i)^2}}, \quad (6)$$

将镜片面形优化前的初始矢高分布 $z_0(x,y)$ 与补偿用自由曲面矢高分布 $z_1(x,y)$ 相加,得到优化后的镜片面形矢高分布 $z_1(x,y)$ 。

该方法是在各点加上一个与该点主曲率差相关的微小柱面组成的自由曲面,各个微小柱面的轴向与该点的最小曲率方向一致,有限度地增加最小曲率的曲率,能减小各点的散光。因此,通过逐点定向曲率补偿法优化处理后,不仅减小了散光,提高了视远区清晰视觉范围,而且镜片的主要光学参数不变。同时,该方法对整个镜片进行全面优化,优化效果更加理想。

3.3 优化流程

为了适应铣磨机加工自由曲面时对数据的需求,在用逐点定向补偿最小曲率进行优化时只对镜片面形向量的 z 分量进行处理,即只是改变镜片面形的矢高。优化流程如图2所示。优化过程的最后一步采用曲面主曲率的常用计算公式来计算镜片的光焦度和散光度^[6,9],该公式可以计算曲面的两个主曲率,但不能求出主方向。值得指出的是,采用本文提出的计算主曲率的方法求得的光焦度和散光度,与常用公式的计算结果一致。

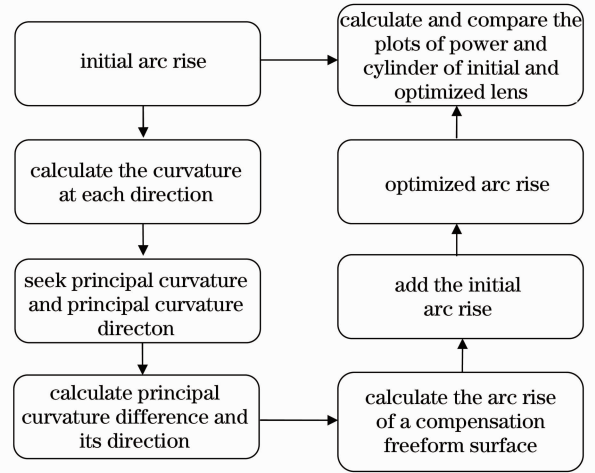


图2 优化过程流程图

Fig. 2 Flow chart of the optimizing process

4 优化实例

4.1 优化设计实例

设计实例采用 Winthrop 方法设计的初始镜片面形,镜片材料折射率为 1.523。该镜片初始模型的视远区光焦度为-2.00 D,加光为 2.0 D, M 取 25。优化前后镜片的光焦度分布如图 3 和图 4 所示。比较图 3 和图 4 可以看出,优化后视远区光焦度为-2.00 D 的等值线比初始设计更趋平坦,视远区的清晰视觉范围明显增大。周边散光区光焦度稍微有些变化,但周边散光区的散光大,轻微的光焦度变化对配戴者的有效视区没有影响。视近区光焦度基本不变。

图 5 是初始模型表面的散光度分布图,最大散光度为 2.25 D,视远区散光度为 0.25 D 的等值线呈 15°向上扩展。图 6 为优化后表面的散光度分布图。比较图 5 和图 6 中散光度分别可以看出,优化后视远区散光度为 0.25 D 的等值线向水平方向扩展,散光度小于 0.25 D 的清晰视觉范围比初始模型明显增大。左侧散光区的最大散光度由原来的

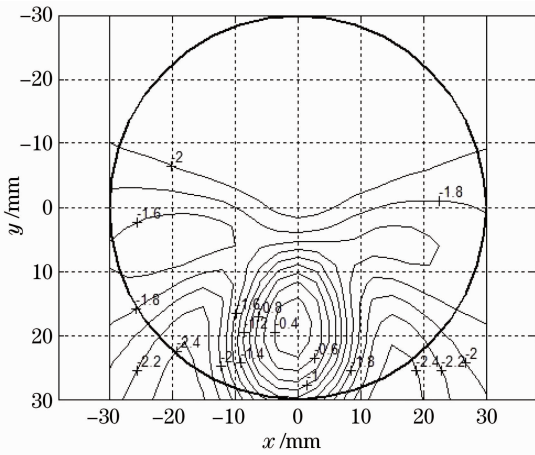


图 3 镜片初始模型光焦度分布图

Fig. 3 Contours of the power of the initial progressive addition lens

2.25 D减小到 2 D,右侧散光区的最大散光度由原来的 2 D减小到 1.75 D。综上所述,优化后渐进多焦点镜片的散光度有所减小,且视远区明显增大。

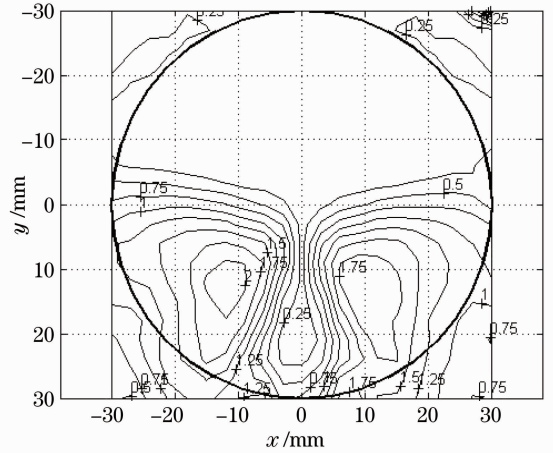


图 6 优化后镜片散光度分布图

Fig. 6 Contours of the astigmatism of the optimized progressive addition lens

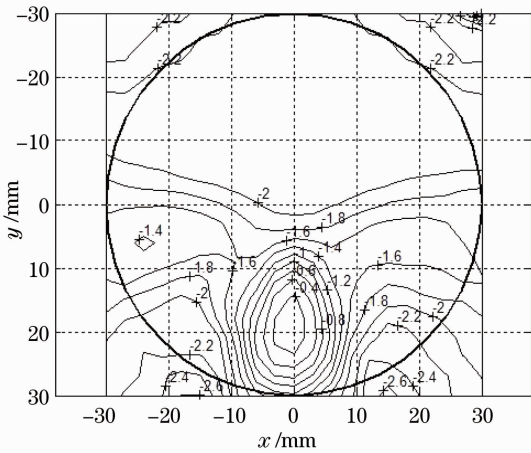


图 4 优化后镜片光焦度分布图

Fig. 4 Contours of the power of the optimized progressive addition lens

4.2 加工实例

将上述设计的镜片用德国 Satisloh 公司的自由曲面数控铣磨机床 VFT-Compact 和数控抛光机床 i-Flex 加工,制成渐进多焦点镜片。用以色列 Rotlex 公司的 Class Plus 面型测量仪测得该镜片的光焦度分布测试图和散光度分布测试图。加工镜片时,选择切削速度 500 mm/s、抛光压力 0.03~0.06 Mpa、抛光视觉 50~100 s,将镜片面形的光焦度和散光度精度控制在 0.1 D 以内^[10]。

图 7 和图 8 分别为镜片初始模型和优化后镜片的光焦度和散光度分布测试图,与图 4~6 对比可以发现实际镜片的测试图与理论设计的光焦度和散光度分布图基本相符。由图 7 可知,镜片初始模型的视远区光焦度为 -2.21 D,附加光焦度为 1.86 D,左侧散光区的最大散光度为 2.21 D,右侧散光区的最大散光度为 2.16 D。由图 8 可知,优化后镜片视远区光焦度为 -2.15 D,附加光焦度为 1.87 D,左侧散光区的最大散光度为 2.16 D,右侧散光区的最大散光度为 1.96 D。与镜片初始模型相比,优化后镜片的左右两侧散光区的最大散光度都有所减小。在纵坐标 $y = -5$ mm 处,散光度小于 0.25 D 的视远区宽度由原来的 20 mm 变成 37 mm,表明优化后镜片的视远区清晰视觉范围有所扩大。阅读区的光焦度和散光度几乎没有变化。优化前后镜片光学参数如表 1 所示。

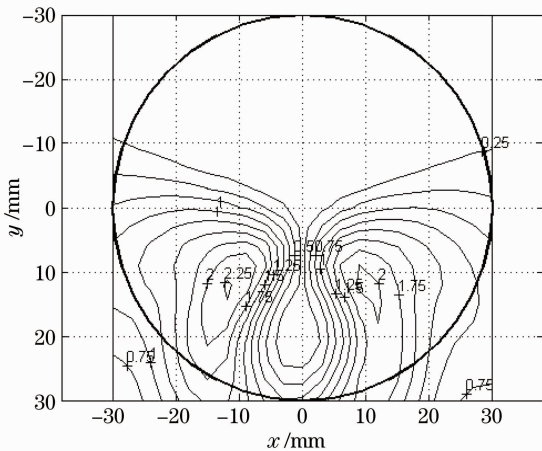


图 5 镜片初始模型散光度分布图

Fig. 5 Contours of the astigmatism of the initial progressive addition lens

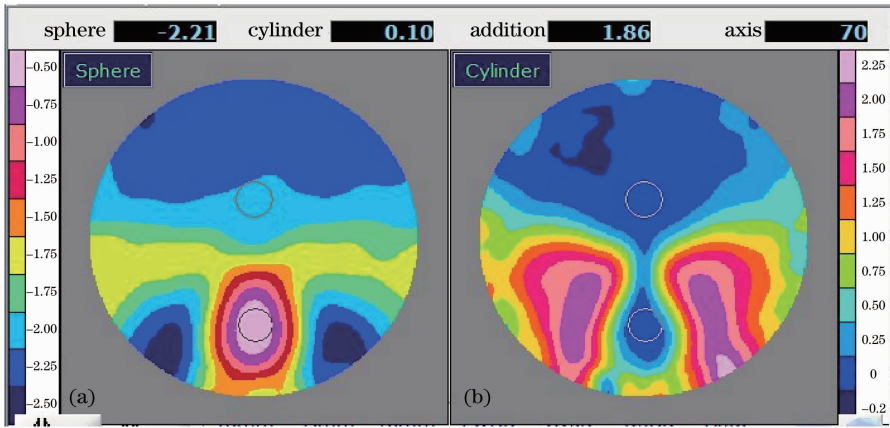


图 7 镜片初始模型的光焦度和散光度分布测试图

Fig. 7 Sphere and cylinder of initial manufactured lens

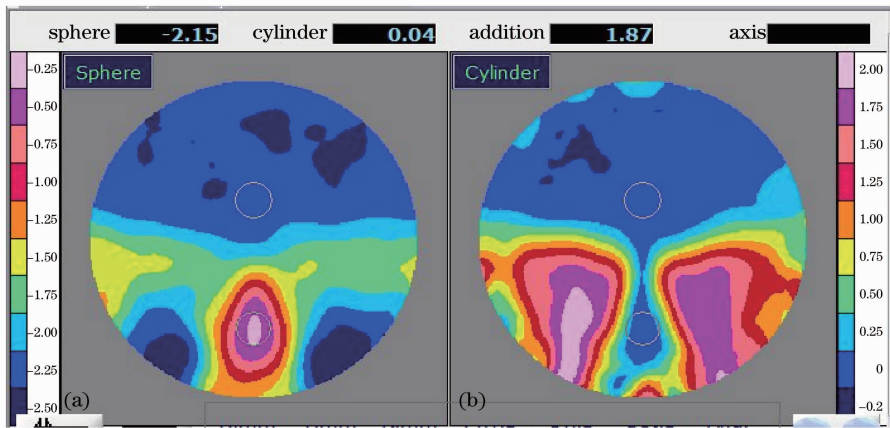


图 8 优化后镜片的光焦度和散光度分布测试图

Fig. 8 Sphere and cylinder of optimized manufactured lens

表 1 优化前后镜片的光学参数

Table 1 Parameters of the initial and optimized lens

	Power of the distance zone /D	Power of the reading zone /D	Width of the distance zone ($\Phi_{ast} < 0.25D$, $y = -5$ mm) /mm	Distance between the astigmatism contour line marked as 0.25D and central horizontal line $x = 20$ mm /mm	Width of the astigmatism zone ($\Phi_{ast} = 2D$, $x = -10$ mm) /mm	Width of the astigmatism zone ($\Phi_{ast} = 1.75D$, $x = 10$ mm) /mm
Initial lens	-2.00	-0.40	33	7	8	25
Optimized lens	-2.00	-0.40	40	3.5	5	12
Initial manufactured lens	-2.21	-0.35	20	14	10	24
Optimized manufactured lens	-2.15	-0.28	37	7	6	14

5 结 论

渐进多焦点镜片的逐点定向曲率补偿优化方法

不仅能够减小镜片表面的最大散光,而且能有效扩大视远区的清晰视觉范围。加工的渐进多焦点镜片

实例进一步说明逐点定向曲率补偿优化方法有效。从上述优化设计步骤和优化实例中可以看出,逐点定向曲率补偿优化方法与初始设计过程和设计方法无关,故逐点定向曲率补偿法适用于任何设计方法设计的渐进多焦点镜片的优化。

参 考 文 献

- 1 Qu Jia, Yao Jin. Spectacle Lenses[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2004. 138
瞿佳,姚进. 眼镜学[M]. 北京:人民卫生出版社, 2004. 138
- 2 D. R. Pope. Progressive addition lenses: history, design, wearer satisfaction and trends[C]. Vision Science and Its Applications, 2000, **35**: 342~357
- 3 E. V. Menezes, J. S. Merritt, W. Kokonaski. Progressive Addition Lenses [P]. US, 6149271. 2000-11-21
- 4 Russel A. Chipman, Patrick John Reardon. Progressive Addition Lenses [P]. US, 6183084. 2001-2-6
- 5 Jing Wang. Design of Progressive Lenses-Mathematical Analysis and Numerical Methods [D]. Eden Prairie: University of Minnesota, 2002. 5~54
- 6 Wu Quanying, Qian Lin, Chen Hao *et al.*. Research on meridian lines design for progressive addition lense [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
- 7 Tang Yunhai, Wu Quanying *et al.*. Optimizing design for progressive addition lenses by mean curvature flow [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0522001
唐运海,吴泉英等. 渐进多焦点眼镜片的平均曲率流优化设计 [J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0522001
- 8 Hu Zhenglin. Practical Study of Progressive Addition Lenses [M]. Beijing: Military Medical Science Press, 2004. 28~36
呼正林. 实用渐进眼镜学[M]. 北京:军事医学科学出版社, 2004. 28~36
- 9 Mei Xiangming, Huang Jingzhi. Differential Geometry [M]. Beijing: People's Education Press, 1981. 66~132
梅向明,黄敬之. 微分几何 [M]. 北京:人民教育出版社,1981. 66~132
- 10 Qin Linling, Yu Jingchi. The process of interior progressive addition lense[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 136~140
秦琳玲,余景池. 内渐进多焦点镜片的加工[J]. 光学技术, 2008, **34**(1): 136~140

栏目编辑: 韩 峰