

文章编号: 0253-2239(2009)11-3186-06

渐进多焦点眼用镜片的子午线设计研究

吴泉英^{1,2,4,5} 钱霖^{3,5} 陈浩^{2,4} 王媛媛^{2,4} 余景池^{2,4,5}

¹ 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009; ² 温州医学院眼视光学院, 浙江 温州 325027
³ 苏州大学物理科学与技术学院光电系, 江苏 苏州 215006
⁴ 浙江省眼视光学和视觉科学省部共建国家重点实验室培育基地, 浙江 温州 325027
⁵ 苏州大学江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 介绍渐进多焦点眼用镜片的构造, 论述镜片的设计思想, 阐述渐进多焦点眼用片子午线设计的基本原理, 构建子午线多项式, 给出子午线设计需满足的准则。在子午线设计的基础上, 设计渐进多焦点眼用镜片等屈光度轮廓线, 确定镜片面形, 并求出镜片平均球面度与像散。比较 3 种不同子午线设计的渐进多焦点眼用镜片, 并进行实际加工与检测。研究表明, 子午线设计是渐进多焦点眼用镜片设计的关键之一, 不同的子午线屈光度分布, 对应的渐进多焦点眼用镜片的球面度、像散以及畸变等差别较大。依据实际设计与检测结果, 给出适用于不同个性化需求的渐进多焦点眼用片子午线屈光度分布的规律。

关键词 光学器件; 眼用镜片; 渐进多焦点; 子午线; 球面度; 像散; 畸变

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092911.3186

Research on Meridian Lines Design for Progressive Addition Lenses

Wu Quanying^{1,2,4,5} Qian Lin^{3,5} Chen Hao^{2,4} Wang Yuanyuan^{2,4} Yu Jingchi^{2,4,5}

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China
² School of Optometry and Ophthalmology, Wenzhou Medical College, Wenzhou, Zhejiang 325027, China
³ School of Physics Science and Technology, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China
⁴ Key Laboratory of Vision Science, Ministry of Health, Wenzhou, Zhejiang 325027, China
⁵ Key Laboratory of Modern Optical Technology, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract The construction of progressive addition lenses is introduced, and the designing idea of lenses is also illustrated. The principle of designing meridional power laws for progressive addition lenses is expounded based on polynomial, and the criterion of designing meridional power laws is given out. On the basis of designing meridional power laws, the isopower contours are designed in order to determine the surfaces of progressive addition lenses. The mean surface power and the constant surface astigmatism are calculated. Three kinds of progressive addition lenses which are designed based on different meridional power laws are compared, and the lenses are manufactured and tested. It is shown that designing meridional power law is an important aspect of designing progressive addition lenses. There is much difference of the surface power, the surface astigmatism and the distortion corresponding to different meridional power laws. The rules of meridional power laws are given out to satisfy with individual demands according to the practical design and the testing results of progressive addition lenses.

Key words optical devices; lenses; progressive addition; meridian line; surface power; astigmatism; distortion

收稿日期: 2009-01-13; 收到修改稿日期: 2009-02-15

基金项目: 浙江省科技计划项目(2007C21148)和浙江省眼视光学和视觉科学重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地开放课题资助课题。

作者简介: 吴泉英(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事光学设计和图像信息处理等方面的研究。

E-mail: wqycyh@tom.com

1 引言

渐进多焦点眼用镜片应用自由曲面实现镜片的光焦度连续变化,通过屈光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屈光度的自然衔接,使由远及近不同距离的视野无断裂而能清晰成像,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,影响使用者的美观等缺陷。因此,渐进多焦点眼用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^[1~3]。渐进多焦点眼用镜片的设计是其研制的关键问题之一,本文从渐进多焦点眼用镜片使用需求及个性化设计等方面给出镜片设计的方法,重点阐述镜片子午线设计在渐进多焦点镜片研制中的作用,并进行实例分析。

2 设计思想

2.1 渐进多焦点眼用镜片构造

渐进多焦点眼用镜片表面分为视远区、视近区、中间过渡区和像散区,如图 1 所示。视远区 A:位于渐进多焦点镜片上半部分的宽阔区域,在人眼处于放松平视状态下矫正视远能力,提供清晰、宽阔的视野。视近区 C:对于大多数渐进多焦点镜片,视近区位于视远参考圈中心下方约 10~18mm,具体位置因渐进镜片使用类型、设计方法以及校正老视程度、人眼瞳距和用眼习惯等的不同而有相应的差异。中间过渡区 B:连接视远区和视近区的中间区域,也是渐进镜片区别于双光镜的主要特征区域。渐进加光区的长度、宽度和加光量以及加光量变化梯度即渐进度限定了配戴者眼睛的活动范围,直接决定了人眼对渐进加光镜片的适应性。图 2 所示的是渐进多焦点镜片不同区域所对应的可看清物体的距离范围。像散区 D1, D2 是除了视远区、视近区和中间过渡区之外,像差无法满足人眼正常视觉要求的镜片

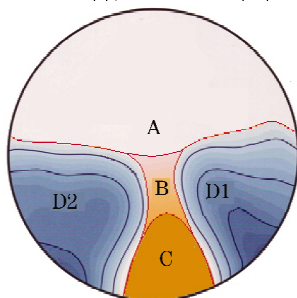


图 1 渐进多焦点镜片分区

Fig. 1 Areas of progressive addition lenses

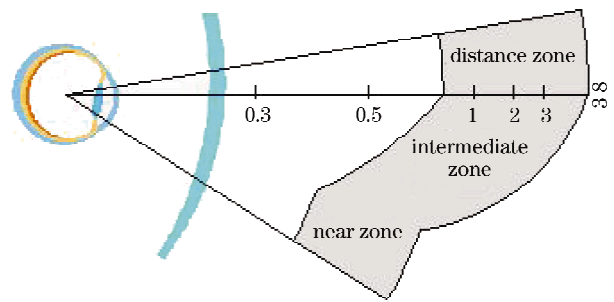


图 2 渐进多焦点镜片区域与对应视距

Fig. 2 Distances corresponding to different areas surrounding area^[4~6]。

渐进多焦点眼用镜片实际可用的视远区、视近区和中间过渡区称为有效视觉区域,通常设计镜片时要求有效区域内镜片实际屈光度与名义值的差值小于 0.12 屈光度。镜片像散区边缘像散最大值小于加光量,两侧像散区像散超过 0.5 屈光度时其像散变化梯度应小于最大像散变化梯度 P_{MC} , $P_{MC} = k_{max} \cdot A$, A 为加光量, k_{max} 为常数系数,一般取 0.165 mm^{-1} ^[4]。中间过渡区的宽度因不同的设计而异,通常过渡区像散小于 0.25 屈光度的区域宽度为 4~5 mm,对适用于不同有效视觉区域的渐进多焦点眼用镜片,其使用区长度、中间过渡区的宽度和加光量要求不同,常用的中近用镜片有效视觉区域为 45 cm~400 m 之间,加光量 2.25~0.75 屈光度,使用区长度 20 mm。最佳视觉范围为 50~80 cm 的渐进多焦点眼用镜片,其视近区域更为广阔,只有近用测度点,无远用测度点,加光量为 0.5~1.5 屈光度,配镜中心到视近点距离为 11~18mm。

2.2 子午线设计

根据镜片配戴者个性化设计要求,确定镜片视远点和视近点位置、视远点屈光度、镜片加光度等参数,首先设计沿渐进多焦点镜片子午线的屈光度分布。

渐进多焦点镜片 xy 平面示意图如图 3 所示, MM' 为镜片的子午线, P_A 为视远点, P_B 为视近点。 P_A 处的曲率半径 r_D , 视近点 P_B 处的曲率半径 r_R , 子午线 MM' 上距中心 O 点距离 u 处的曲率半径 $r(u)$, 按下式设计子午线^[7]。

$$\frac{1}{r(u)} = \frac{1}{r_D} + \left(\frac{1}{r_R} - \frac{1}{r_D} \right) \sum_{n=m}^{m+l-1} c_n (u+L)^n, \quad (1)$$

其中 m 为 P_A 点 $u = -L$ 处第一个非零的 $\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]$ 的阶数, l 为 P_B 点 $u = h-L$ 处第一个非零的 $\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]$ 的阶数。子午线设计时需满足的准则为:在视远点

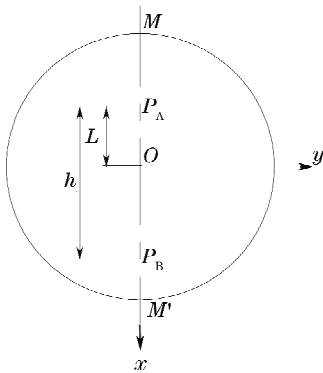


图 3 渐进多焦点镜片 xy 平面示意图

Fig. 3 View in vertical elevation (xy) of progressive addition lens

P_A 和视近点 P_B 两处曲率变化缓慢,即出现第一个非零的高阶微分导数的阶数需要高, $r(u)$ 变化曲线需光滑。由边界条件

$$\begin{cases} r(u)_{u=-L} = r_D \\ r(u)_{u=h-L} = r_R \end{cases}$$

可得

$$\sum_{n=m}^{m+l-1} c_n h^n = 1$$

m 为多项式(1)的最低阶数。由 P_B 点 l 为 $u = h - L$

处第一个非零的 $\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]$ 的阶数可得

$$\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]_{u=h-L} = 0$$

式中 $n = 1, 2, \dots, l - 1$

$$\begin{cases} \sum_{n=m}^{m+l-1} c_n h^n = 1 \\ \frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]_{u=h-L} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

根据(2)式可得线性方程组增广矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ m & m+1 & \dots & m+l-1 & 0 \\ m(m-1) & (m+1)m & \dots & (m+l-1)(m+l-2) & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m(m-1)\dots(m-l+2) & \dots & \dots & (m+l-1)\dots(m+1) & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由矩阵(3)式可以求解出多项式(1)的系数 c_n , 由(1)式得出沿渐进多焦点眼用镜片子午线屈光度变化曲线图。子午线曲线确定后,再构建镜片的整个表面面形。

多项式在 P_A 点处第一个高阶微分导数非零阶数 m 和在 P_B 点处第一个高阶导数非零阶数 l 决定了子午线屈光度变化形态。

2.3 渐进多焦点眼用镜片表面面形构造

设计镜片上与子午线正交的等屈光度轮廓线,根据 2.2 节设计的子午线屈光度变化曲线,初步规定镜片上每一点的屈光度,然后根据微分几何的基本规则求出各点矢高,即确定镜片表面面形。

首先选择与子午线正交的轮廓线曲线形式,轮廓线上曲率与正交点处曲率相等。轮廓线曲线可以是直线、抛物线或双曲线,也可以是分别以视远点和视近点为中心的圆或椭圆。轮廓线曲线形式的选择必须与镜片配戴者个性化设计要求相匹配。本文采用双曲线簇作为轮廓线。然后根据微分几何基本规则计算出镜片上各点矢高^[8]

$$z = z(x, y) = \zeta - [r(u)^2 - (x - \xi)^2 - (y - \eta)^2]^{1/2}, \quad (4)$$

(4)式中 (ξ, η, ζ) 为球面每个位置曲率中心坐标。其中

$$\xi(u) = u - r(u) \sin \theta(u),$$

$$\zeta(u) = r(u) \cos \theta(u) + \int_0^u \tan \theta(u) du,$$

$$\eta(u) = 0, \quad \sin \theta(u) = \int_0^u \frac{du}{r(u)}.$$

2.4 由设计出的面形求得镜片平均球面度和像散
镜片上各点矢高求得后,相应点的最大和最小曲率半径 R_1 和 R_2 满足二次方程

$$\begin{aligned} & (\tau t - s^2)R^2 + g[2pqs - (1 + p^2)t - \\ & (1 + q^2)r]R + g^4 = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y},$$

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y},$$

$$t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \quad g = \sqrt{1 + p^2 + q^2}.$$

由(5)式求出 R_1 和 R_2 , 计算镜片上各点平均球

面度和像散。平均球面度 $D = \frac{n-1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ ，像散 $C = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$ ， R_1 和 R_2 的单位为 m。

3 不同子午线设计的渐进多焦点镜片

3.1 镜片设计参数与加工检测结果

为了比较不同子午线屈光度分布对渐进多焦点镜片的屈光度和像散分布的影响，选择同一镜片参数来进行设计：视远点镜片度数 100 度，视远与视近点之间加光度数为 150 度，镜片通道长度 $h=21$ mm，视远点 P_A 与镜片中心 O 点的间距 $L=7$ mm。镜片直径 60 mm，折射率 $n=1.499$ 。

设计子午线屈光度变化曲线如图 4(a) 所示的渐进多焦点镜片。依据渐进表面面形构建方法，得到等屈光度轮廓线图 4(b)，平均球面度图 4(c) 和像散分布图 4(d)。

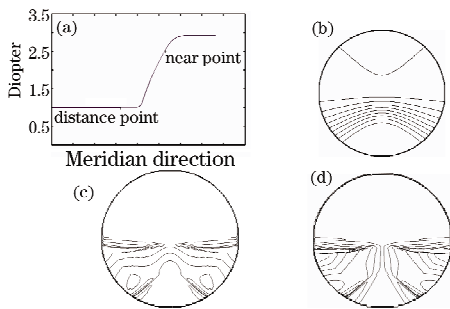
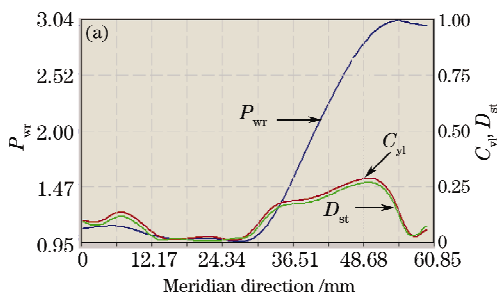


图 4 渐进多焦点眼用镜片屈光度(a)，等屈光度轮廓线(b)，平均球面度(c)和像散图(d)。

Fig. 4 (a) Power laws, (b) isopower contours, (c) contours of constant mean surface power, (d) contours of constant surface astigmatism of progressive addition lens

从设计图可见，子午线屈光度在视远区为常数，平均屈光度图示镜片上方的视远区屈光度不变。子午线屈光度在视近点以下区域逐渐增加，然后趋于常数，视近区屈光度渐趋不变。设计显示的像散分



布图中，镜片上方宽阔的视远区、中间过渡区和视近区不存在像散，镜片下半部的两侧存在像散，越往镜片外侧像散越大。

使用德国 LOH 公司 Satislon VFT 机床加工设计的渐进多焦点镜片，并用 Rotlex Class Plus 镜片参数测试仪测量镜片的屈光度和像散等。由加工后镜片测试的球面度和像散分布图如图 5 所示，镜片视远区在一个宽阔的范围内屈光度均为 100 度，从视远点至视近点屈光度逐渐增加，视近点屈光度近似 250 度，加光度为 146 度，开阔的视远区、中间过渡区与视近区像散小于 0.25 屈光度，镜片下半部两侧像散由中间至边缘递增，像散最大值达 3 屈光度。图 6(a) 为沿镜片子午线方向屈光度、像散和畸变变化曲线，由曲线图可知，沿镜片子午线方向屈光度在视远区基本保持不变，由视远点起至视近区屈光度逐渐增加，屈光度变化与设计的子午线相吻合，像散与畸变均很小。图 6(b) 为镜片下半部距镜片中心 13 mm 处沿水平方向屈光度、像散和畸变变化曲线，镜片中心位置屈光度较大，像散最小，往镜片两侧像散和畸变增大，两侧的像散和畸变呈对称分布。由实际加工的镜片测试结果可见，实际加工的渐进多焦点镜片参数与设计结果一致，达到设计要求的加光、像散和畸变的要求，因此下文中只对测量图进行比较。

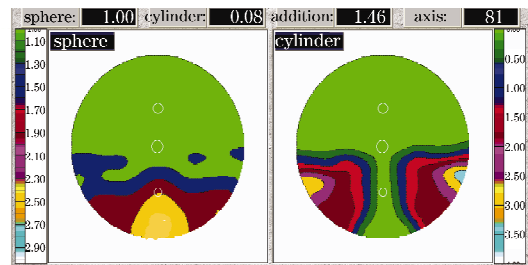


图 5 子午线 1 设计加工的镜片平均球面度和像散分布图

Fig. 5 Sphere and cylinder of manufactured lens corresponding to the meridian line x

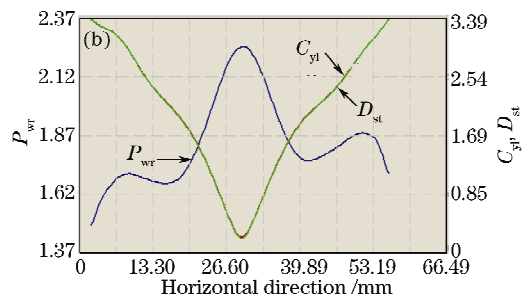


图 6 子午线方向(a)和水平方向(b)镜片屈光度 P_{wt} 、像散 C_{yt} 和畸变 D_{st} 曲线。

Fig. 6 Curve of the power (P_{wt}), cylinder (C_{yt}) and distortion (D_{st}) of manufactured lens corresponding to the meridian line x (a) and to horizontal direction y (b)

3.2 三种子午线屈光度分布设计实例比较

采用 3.1 节所描述的镜片参数,分别设计的 3 种不同的子午线屈光度分布如图 7 所示。3 种子午线在视远点和视近点有相同的屈光度值。子午线 1 即是图 4(a)表示的子午线屈光度分布;子午线 3 的屈光度呈线性变化;子午线 2 的屈光度分布介于子午线 1 和子午线 3 之间。在视远点和视近点之间子午线 2 的屈光度几乎为线性变化,与子午线 3 相同,在视远点和视近点之外屈光度缓慢趋于稳定值。子午线 1 的屈光度在镜片的上半部保持不变,直到镜片中心才陡然增加。与子午线 1 相比,子午线 2 在视远点之外较慢地趋于稳定值,且屈光度值较小,在视近点之后则较快地趋于一个较小的屈光度值。子午线 3 则是在整个子午线上无稳定的屈光度值。

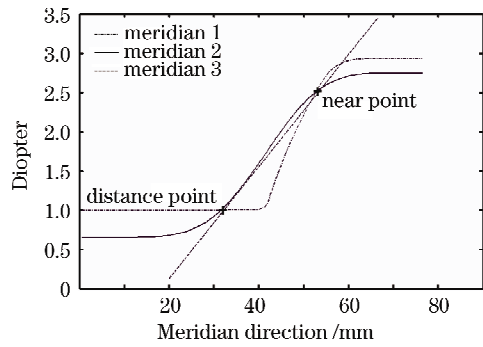


图 7 三种子午线屈光度变化图

Fig. 7 Power curves for three kinds of the meridian line

由此三种子午线设计、加工的镜片测试结果分别如图 5 和图 8 所示。由图可见,尽管镜片的设计参数一样,但不同的子午线屈光度分布,镜片的球面度和像散分布形态差别甚大。

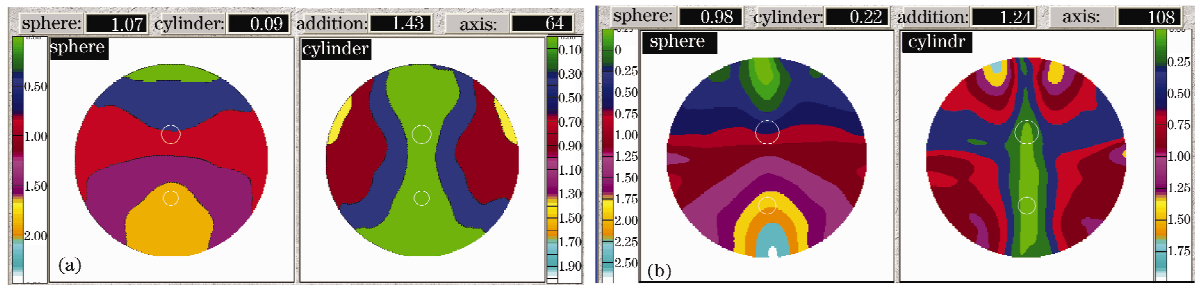


图 8 两种子午线设计加工的镜片平均球面度和像散分布图。(a)对应于子午线 2;(b)对应于子午线 3

Fig. 8 Sphere and cylinder of manufactured lens corresponding to (a) the meridian line 2 and (b) the meridian line 3

子午线 1 屈光度变化陡然,设计制作出来的镜片拥有开阔的、具有同一屈光度、像散小的视远区。子午线 2 屈光度变化较平缓,设计制作的镜片无开阔的、具有同一屈光度的视远区,而在视远点之外平均球面度还有约 0.5 屈光度的下降;其视远点附近只在一个较小的范围内像散小于 0.25 屈光度。但两者相比而言,由子午线 2 设计加工的镜片拥有较宽的通道和较开阔的球面度稳定、像散小的视近区,其两侧的像散也较小,最大像散 1.3 屈光度。子午线 3 屈光度线性变化,制作的镜片在视远、视近区域

内球面度自上到下逐渐增加,平均球面度在视远点以外有约 1 屈光度的下降,在视近点以外继续增加约 0.6 屈光度,整个镜片上不存在一个球面度均匀的区域,也不存在像散值小于 0.25 屈光度的视远、视近区,完全不适合作为渐进多焦点镜片使用。

图 9(a),(b)和(c)是子午线 1,2 和 3 对应的三个镜片测试获得的畸变图。子午线 1 设计的镜片在视远区基本无畸变,两侧像散区畸变较大,如图 9(a)所示。子午线 2 设计的视远与像散区均有些畸变,但总的来说畸变不大,而在两侧像散区则畸

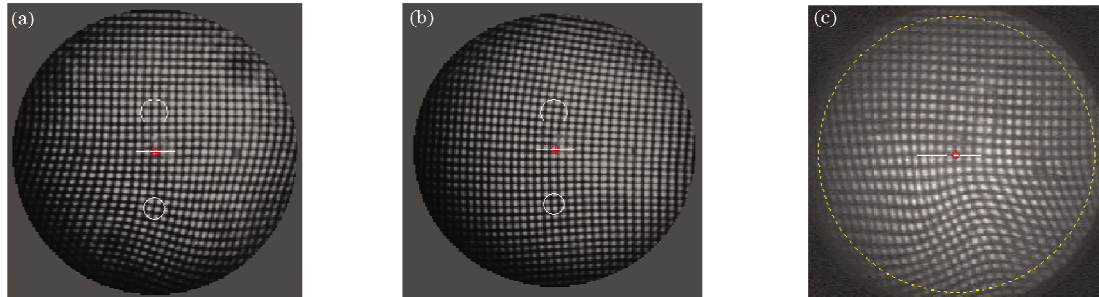


图 9 渐进多焦点镜片测试畸变图(a)子午线 1;(b)子午线 2 和(c)子午线 3

Fig. 9 Distortion of manufactured lenses corresponding to design. (a)meridian1;(b)meridian2 and (c)meridian3

变较小,如图 9(b)。子午线 3 设计的镜片畸变明显,特别在视近区畸变达到了扭曲的程度,如图 9(c)。可见,镜片的畸变与镜片像散分布直接相关,即与镜片设计时子午线屈光度变化形态有关。

对三种不同子午线设计的镜片分析可知,若子午线上的屈光度在视远区较长距离内保持不变,沿着子午线向镜片下方伸展又突然变化且变化快的设计,可制作视远区开阔但两侧像散较大的渐进多焦点镜片,适用于视远为主兼顾视近使用;若子午线上的屈光度变化较缓慢,又能在视近和视远区的一段距离内保持稳定的屈光度值,其设计制作的镜片有开阔度基本相当的视近和视远区,两侧像散较小,适用于中近距离兼顾助视使用;若子午线上的屈光度值呈线性变化,无屈光度值稳定的区间,其制作的镜片不存在能够供眼视的视近视远区域,不适合作为眼视镜片使用。

4 结 论

渐进多焦点眼用镜片的子午线设计是渐进多焦点眼用镜片研制的关键之一。本文根据渐进多焦点眼用镜片的构造,论述了镜片设计的思想与方法,从渐进镜片子午线设计入手,应用高次多项式与渐进多焦点镜片需满足的准则,求解镜片子午线方程,用双曲线方程求得等屈光度轮廓线,根据微分几何学原理求出镜片各点的矢高,在已知矢高的前提下,求出镜片各点对应的最大和最小曲率半径,由此求出

镜片的平均球面度和像散。给出三种不同子午线屈光度分布,并对三种子午线设计的渐进多焦点眼用镜片进行实际加工与检测,获得镜片平均球面度、像散以及畸变分布图,比较三种设计对应的镜片测试结果。测试结果表明,实际镜片测试结果与设计结果相一致,镜片参数、平均屈光度及像散等符合设计要求。子午线屈光度变化对渐进多焦点眼用镜片设计结果影响较大,不同的子午线设计可分别对应于不同个性化视觉要求的配戴者。

参 考 文 献

- 1 D. Meister, ABOM Lens Talk. Fundamentals of Progressive Addition Lens Design, SOLA Technical Marketing Vol. 26, No. 13, 1998
- 2 J. E. Sheedy, Markus Buri, I. L. Bailey *et al.*. Optics of progressive addition lenses [J]. *American J. Optometry and Physiological Optics*, 1987, 64(2): 90~99
- 3 D. R. Pope. Progressive addition lenses: history, design, wearer satisfaction and trends[C]. *Vision Science and Its Applications*, 2000, 35: 342~357
- 4 C. Harsigny, C. Miede, J. P. Chauveau *et al.*. Progressive multifocal ophthalmic lens[P]. US 5488442, [P/DL], 1996
- 5 J. T. Winthrop. Hard/soft superposition progressive lens design [P]. US, 5726734, [P/DL], 1998
- 6 J. T. Winthrop. Progressive power spectacle lenses [P]. US, 5123752, [P/DL], 1992
- 7 J. T. Winthrop. Progressive power ophthalmic lenses [P]. US Patent number 4861153, Aug. 29, 1989
- 8 Mei Xianming, Huang Jingzhi. *Differential Geometry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998
梅向明, 黄敬之. 微分几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998