

doi: 10.3788/gzxb20174604.0422002

渐进多焦点镜片面形误差与光焦度关系的分析

刘智颖, 田宇, 李丹, 薛常喜, 李闯

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要: 渐进多焦点眼镜片能够同时满足视远与视近的需求, 其应用日益广泛. 本文介绍了渐进多焦点镜片的设计与评价方法, 在此基础上通过对镜片面形方程及球面度方程求解偏微分, 构建了渐进多焦点镜片光焦度分布与面形误差的关系模型. 根据国家标准规定的镜片有效区域实际屈光度与名义值差值小于 $0.1D$ 的要求, 对加光度为 $2.0D(6.0D \sim 8.0D)$ 的渐进面面形误差进行了实例分析. 应用给定的面形误差结果进行实验加工的镜片, 经分析后实验输出的光焦度变化符合所设定的国家标准要求的范围, 进一步验证了面形误差与光焦度分布关系模型的正确性, 为渐进多焦点镜片加工的面形控制精度提供理论依据.

关键词: 渐进多焦点眼镜片; 光焦度分布; 关系模型; 面形误差; 面形方程; 球面度方程; 加光度

中图分类号: O435.1; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0422002-6

Analysis of Relationship between Surface Error and Optical Power of PAL

LIU Zhi-ying, TIAN Yu, LI Dan, XUE Chang-xi, LI Chuang

(Changchun University of Science and Technology, School of Electro-Optical Engineering, Changchun 130022, China)

Abstract: The progressive addition lenses have been widely applied, because its advantages can meet the requirements of distant and near vision at both time. The basic structure, design and evaluation method of progressive addition lenses are introduced in this paper. The relationship between surface error and optical power of progressive addition lenses is analyzed. The relationship equations are derived from the surface equation and sphere equation. Based on the national glasses fabrication standard that the difference between practical optical power and nominal designed value should be less than $0.1D$ during the lens effective area, A progressive addition lenses example with $2.0D$ addition ($6.0D \sim 8.0D$) was designed, evaluated and surface error tolerance analyzed. After fabrication with given surface error, the optical power difference is calculated correspondingly. It is shown that the simulation result is consistent with the solution of relationship equations. The relationship model provides theoretical basis for the surface precision during lens fabrication process.

Key words: Progressive addition lenses; Optical power distribution; Relationship model; Surface error; Surface equation; Spherical power equation; Power addition

OCIS Codes: 220.4610; 220.1000; 330.7326; 350.4800; 240.5770

0 引言

渐进多焦点镜片最初设计是用于老视患者^[1], 近年来, 渐进多焦点镜片也被应用于对青少年近视的延缓和控制^[2-6]. 目前渐进多焦点眼镜片的主要设计方法有 Winthrop 方法、Steele 方法、混合设计法和分片组合补偿优化法^[7-10]. 国内采取的方法主要是 Winthrop 方法, 国外采取的方法主要是混合设计法和分片组合补偿优化法^[9-10].

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11474037)资助

第一作者: 刘智颖(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与检测. Email: lzyc@ccut.edu.cn

收稿日期: 2017-01-06; **录用日期:** 2017-03-13

<http://www.photon.ac.cn>

苏州大学吴泉英提出了一种利用调节主曲率差对平均曲率影响进行渐进多焦点眼镜片优化设计的方法^[9]. 苏州大学唐运海提出的渐进多焦点眼镜片平均曲率流优化设计方法减小镜片表面的最大像散, 扩展视远区清晰视觉范围与增加通道宽度^[10]. 吴泉英用镜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^[11]. 唐运海提出运用遗传算法来寻找渐进多焦点眼镜片最优子午线的设计方案^[12].

国内外渐进多焦点镜片的设计方法和评价方法已经十分成熟, 而渐进多焦点镜片光焦度分布与面形加工精度关系分析却鲜有文献报导. 渐进多焦点镜片面形误差直接影响其光焦度分布, 并且关系佩戴者的舒适程度与清晰度, 并且镜片加工精度与加工速度相互制约, 所以探讨渐进多焦点镜片面形的误差与光焦度之间的关系, 可以为加工精度与加工速度平衡提供理论依据. 本文基于镜片的设计与评价基础, 对镜片光焦度分布与面形误差之间的关系模型进行了推导, 并应用实例进行了渐进镜片的面形误差分析, 通过镜片实例加工实验结果的光焦度输出与设定的国家标准要求范围对比, 验证了本文推导的关系模型的正确性.

1 渐进多焦点镜片的基本结构

渐进多焦点镜片的渐进面主要分为视远区、视近区、中间过渡区与周边散光区几个区域, 其分布如图 1 所示. 位于上方的 BASE 区即视远区, 位于下方的 ADD 区即视近区, 中间的 IC 区为中央过渡区, 两边的 IR 区为像散区^[9].

2 渐进多焦点镜片的设计与评价

2.1 渐进多焦点镜片的设计

在渐进多焦点眼镜片的设计中, 主要有两个影响镜片性能的步骤: 一是子午线曲率变化曲线的设计; 二是镜片面形轮廓线分布的设计^[10].

根据佩戴者的不同需求, 确定镜片的视远点、视近点的位置和加光度数等参数, 对镜片子午线上的屈光度分布进行设计^[11].

渐进多焦点镜片 xy 平面示意图如图 2 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 , P_B 处的曲率半径 r_R , 子午线 MM' 上距中心点 O 距离 u 处的曲率半径 $r(u)$, 按式 (1) 设计子午线.

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

式中 m 为 P_A 点 $u = -L$ 处的第一个非零的

$\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]$ 的阶数, l 为 P_B 点 $u = -L+h$ 处的第一个非零的 $\frac{d^n}{du^n} \left[\frac{1}{r(u)} \right]$ 的阶数. 子午线设计时需满足的准则为: 在视远点 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要高, $r(u)$ 变化曲线需光滑.

子午线曲线确定后, 将子午加光曲线的屈光度分布变换到椭圆加光线上, 使镜片在选择的曲线上都具有与子午线相对应的(依变换形式)光焦度分布^[8]. 求解得到镜片矢高方程为

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

式中 (ξ, η, ζ) 为球面每个位置曲率中心的坐标, $\xi(u) = u - r(u) \sin \theta(u)$, $\zeta(u) = r(u) \cos \theta(u) +$

$\int_0^u \tan \theta(u) du$, $\eta(u) = 0$, $\sin \theta(u) = \int_0^u \frac{du}{r(u)}$, $u = x/ac$. a 为椭圆半长轴, c 为椭圆半焦距, $a =$

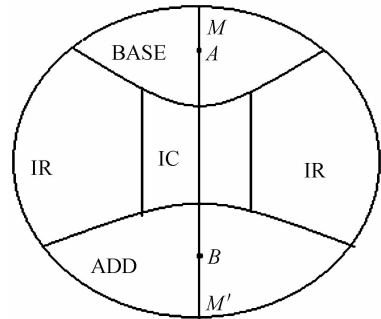


图 1 渐进多焦点镜片的正面投影图
Fig. 1 Front projection drawing of PAL

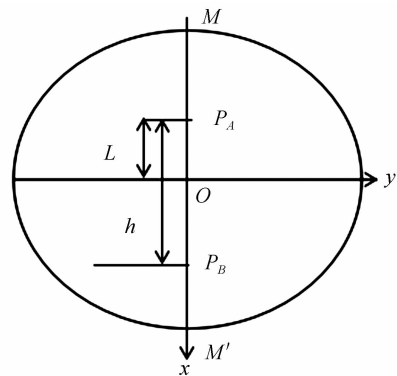


图 2 渐进多焦点镜片的坐标系
Fig. 2 Coordinate of PAL

$$\frac{\sqrt{(x-c)^2+y^2}+\sqrt{(x+c)^2+y^2}}{2}, \begin{cases} c=L, x \leq 0 \\ c=h-L, x > 0 \end{cases}$$

2.2 渐进多焦点镜片的评价

光焦度和像散分布是渐进加光镜片设计的主要评价指标.光焦度用球面度 P 来反映,像散使用柱面度 C 来表示,渐进多焦点眼镜片的光学性能可使用式(3)来评价^[14-15].

$$\begin{cases} P=1000(n-1)\frac{k_1+k_2}{2}=1000(n-1)H \\ C=1000(n-1)|k_1-k_2|=2000(n-1)\sqrt{H^2-K} \end{cases} \quad (3)$$

式中 k_1 和 k_2 为镜片上任一点的正交曲率,满足二次方程,即

$$g^4k^2+g[2pqs-(1+p^2)t-(1+q^2)r]k+(rt-s^2)=0 \quad (4)$$

H 和 K 分别称为该点的平均曲率和 Gauss 曲率,表达式为

$$H=\frac{k_1+k_2}{2}=\frac{(1+p^2)t+(1+q^2)r-2pqs}{2g^3}, K=k_1k_2=\frac{rt-s^2}{g^4}.$$

式中的 p, q, r, s, t 分别为镜片矢高方程(2)的各阶偏导数,即

$$p=\frac{\partial z(x,y)}{\partial x}, q=\frac{\partial z(x,y)}{\partial y}, r=\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial x^2}, s=\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial x\partial y}, t=\frac{\partial^2 z(x,y)}{\partial y^2}, g=\sqrt{1+p^2+q^2} \quad (5)$$

因此可以计算出渐进多焦点眼镜片的屈光度和像散分布,并据此给出评价.

3 渐进多焦点镜片面形的公差分析

3.1 渐进多焦点镜片的公差分析方法

加工误差的存在将导致加工后镜片光焦度的实际值与理论值存在差别,影响视觉清晰度.因此,在加工过程之前对镜片面形进行公差分析,提出合理的加工精度要求变得尤为重要.

首先,根据式(5)中的 p 可得出微小变化量 Δz 与 Δx 之间的关系式为

$$\Delta z=p\Delta x \quad (6)$$

其次,对式(3)中屈光度 P 的方程求偏微分得

$$b=\frac{\partial P}{\partial x} \quad (7)$$

可得出 ΔP 与 Δx 之间的关系式为

$$\Delta P=b\Delta x \quad (8)$$

利用 Δx 的等效替代变换,渐进多焦点镜片光焦度与面形精度矢高之间的关系式为

$$\Delta P=\frac{b}{p}\Delta z \quad (9)$$

根据国家标准中渐进多焦点镜片光焦度变化最大值要求, $\Delta P=0.1D$, 式(9)可变形为

$$\Delta z=\frac{0.1p}{b} \quad (10)$$

将式(6)~(10)代入求解可得到 p 和 b 关于 x, y 的方程.设镜片的尺寸为 D , 则 x, y 的取值范围分别为 $-\frac{D}{2} \sim \frac{D}{2}$. 将 x, y 的具体数值代入式(10)可得到面形矢高在 x 方向上的变化量.运用同样的方法亦可以求到在 y 方向上的偏微分方程和面形矢高变化量.

3.2 实例面形误差分析

本文针对一个光焦度为 $6.0D \sim 8.0D$ 的渐进面形进行了实例面形误差分析.镜片材料为 PMMA, 折射率为 1.491, 有效口径为 60 mm. 其中, $r_D=81.83$ mm, $r_R=61.38$ mm, 加光长度 $h=30$ mm, 远视点和镜片中心的距离 $L=10$ mm, $m=4, l=3$. 多项式(1)的系数分别为 $c_1=0, c_2=0, c_3=0, c_4=15h^{-4}, c_5=-24h^{-5}, c_6=10h^{-6}$. 综合以上各式,绘出球面度和柱面度的曲线.图3和图5是球面度的等高线图和轮廓图.光焦度增加主要在加光区内,光焦度从 $6.0D$ 增加到 $8.0D$.图4和图6是柱面度的等高线图和轮廓图.镜片视近区、视远区以及加光区像散小于 $0.5D$.

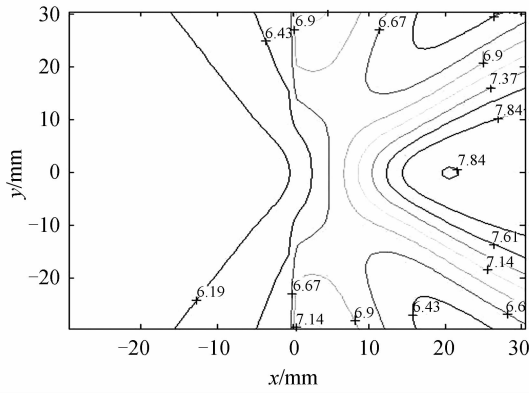


图3 等球面度曲线

Fig. 3 Spherical power contour map

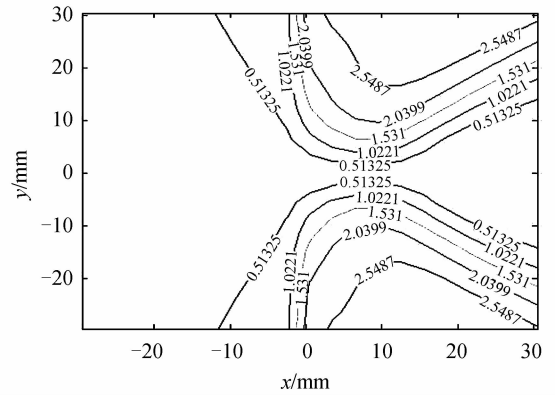


图4 等柱面度曲线

Fig. 4 Cylinder power contour map

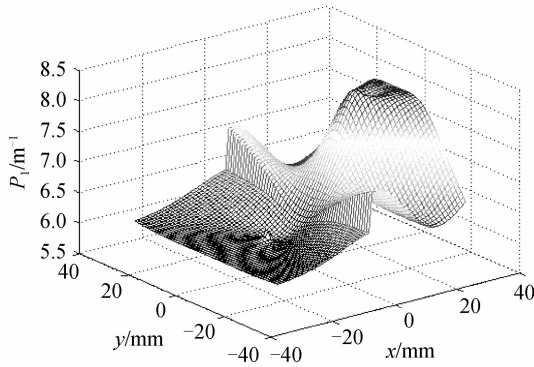


图5 球面度图

Fig. 5 Spherical power

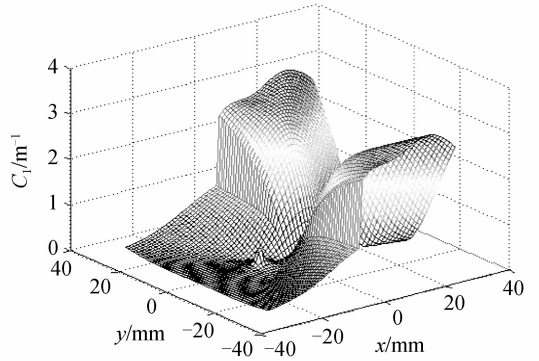


图6 柱面度图

Fig. 6 Cylinder power

3.3 面形误差分析结果

根据镜片光焦度与面形矢高精度关系式(10),间隔 1 mm 取一个点,通过 matlab 计算光焦度分布变化 0.1 D 对应面形矢高的变化量,形成 61×61 的公差数据表格.为了更好地突显镜片加工的敏感区域,将大于 0.1 mm 的数据值用 0.1 mm 代替.得到公差分布图如 7 与图 8 所示,公差敏感区域的位置及数值列于表 1 中,图 7 与图 8 中深色表示矢高变化允许量较大的点,浅色代表矢高变化量较小的点,浅色即面形公差较为严格的点. X 方向上的公差比 Y 方向的公差值小一些,因此,在加工时 X 方向上的加工精度要高,加工时公差值最小约 ± 0.006 mm.

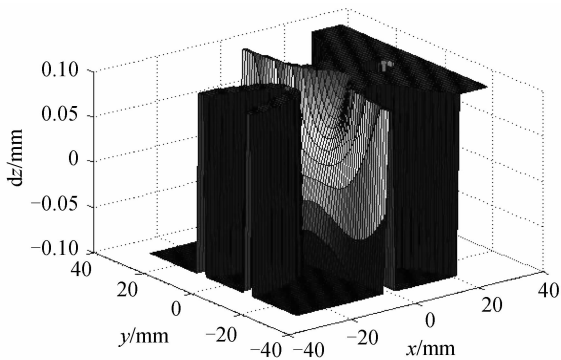


图7 X方向的面形误差分布

Fig. 7 Surface error distribution along with X-direction

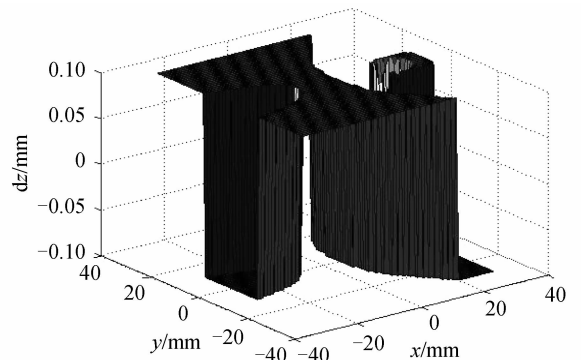


图8 Y方向的面形误差分布

Fig. 8 Surface error distribution along with Y-direction

表 1 敏感位置面形误差数据(单位:mm)

$x \backslash y$	-1.5	-0.5	0.5	1.5	2.5
-2.5	-0.025	-0.007	0.007	0.017	0.027
-1.5	-0.024	-0.007	0.006	0.017	0.025
-0.5	-0.024	-0.007	0.006	0.016	0.025
0.5	-0.024	-0.007	0.006	0.016	0.025
1.5	-0.024	-0.007	0.006	0.017	0.025

3.4 实验验证

为了进一步验证面形误差分析结果的正确性,应用 Nanoform700 ultra 单点金刚石超精密加工设备,在给定的面形误差要求情况下 ± 0.006 mm 对实例镜片进行加工。

调整刀具的高度和 X 方向偏置,保证刀具在加工零件时正好可以在零件的中心,通过非球面轮廓轮廓测量仪检测对刀件的面形可以准确判断刀具是否与旋转轴对准. 镜片粗加工过程中,旋转轴转速为 110r/min,每次的切削量分别为 80 μm ,40 μm ,20 μm ,10 μm ,加工时间为 30 min. 半精加工过程中,旋转轴转速为 75r/min,每次的切削量分别为 8 μm ,6 μm ,加工的时间为 15 min. 精加工过程中,旋转轴转速为 55 r/min,每次的切削量为 2 μm ,加工时间为 30 min. 通过非球面轮廓仪检测镜片面形加工是否合理。

将加工后的镜片面形数据利用 Matlab 拟合后代回光焦度表达式中,求取输出光焦度,并与面形设计数据代入得到的光焦度数据渐进多焦点眼镜的光焦度分布变化输出结果如图 10 所示. 从图 10 中可以看出面形反馈后的输出光焦度变化实验结果表明镜片的光焦度分布变化符合国家标准要求的 0.1D 范围以内,从而验证了所构建的渐进多焦点镜片面形误差与光焦度分布关系模型的正确性。



图 9 实例镜片加工实验
Fig. 9 PAL Example fabrication

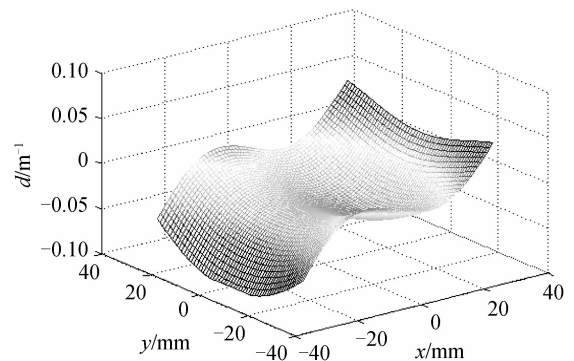


图 10 面形误差 0.006 mm 时光焦度分布变化
Fig. 10 Optical power distribution difference with given surface error

4 结论

本文基于加光曲线变换的设计方法,结合面形矢高方程推导了镜片面形误差与光焦度关系模型,并应用加光度为 2.0D(6.0D~8.0D)的渐进多焦点实例镜片进行面形误差分析,根据分析给定的面形误差进行了实例镜片加工实验,输出的光焦度变化符合设定的国家标准要求的范围,验证了面形误差与光焦度分布关系模型的正确性,从而为渐进多焦点镜片加工精度与速度的确定提供了理论依据。

参考文献

- [1] MEISTER D J, FISHER S W. Progress in the spectacle correction of presbyopia[J]. *part I: Design and Development of Progressive Lenses. Clinical & Experimental Optometry*, 2008, **91**(3): 240-50.
- [2] AN Li, YAN Wen-ping. Effect on teenagers myopic growth when wearing progressive multifocal lens[J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science)*, 2015, **31**(2): 48-50.
安力,阎文平. 配戴渐进多焦点眼镜对近视青少年近视进展的影响[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2015, **31**(2): 48-50.
- [3] ZHAI Zhi-gang. Effect of progressive addition lens for young wearers to adjust and set the vision[J]. *Journal of Hebei North University*, 2012, **28**(3): 88-89.

- 翟志刚. 配戴渐进多焦点镜片对青少年视力调节与集合的影响[J]. 河北北方学院学报, 2012, **28**(3): 88-89.
- [4] DAI Hong-bing, LI Guo-sheng. More focus on youth gradual glasses myopic degree of control[J]. *Chinese and Foreign Medical Research*, 2011, **9**(11): 13-14.
代红兵, 李国生. 渐进多焦点眼镜对青少年近视度数控制的研究[J]. 中外医学研究, 2011, **9**(11): 13-14.
- [5] XU Jun-yan. Observation of the effect of progressive multifocal lenses to control the degree of juvenile myopia[J]. *China Health Standard Management*, 2016, **7**(6): 49-50.
许俊艳. 观察渐进多焦点眼镜控制青少年近视度数的效果[J]. 中国卫生标准管理, 2016, **7**(6): 49-50.
- [6] WANG Hui-juan, DU Jin-fa, CAO Ya-fei, *et al.* Application of progressive multiple lenses to Myopic teenagers[J]. *Journal of He-nan University Technology(Medical Science)*, 2008, **26**(3): 210-211.
王慧娟, 杜进发, 曹亚菲, 等. 渐进多焦点眼镜在青少年近视中的应用[J]. 河南科技大学学报(医学版), 2008, **26**(3): 210-211.
- [7] NI Rui-yao, CHEN Jia-bi, ZHUANG Song-lin. Research on the designing methods of progressive power spectacles[J]. *Optical Instruments*, 2012, **34**(6): 37-41.
倪瑞遥, 陈家璧, 庄松林. 渐变焦眼镜片的设计方法研究[J]. 光学仪器, 2012, **34**(6): 37-41.
- [8] STEELE. Progressive addition power lens[P]. US patent, 6776486 B2. 2002. 08. 09.
- [9] WU Quan-ying, TANG Yun-hai. 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. 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.
- [10] TANG Yun-hai, WU Quan-ying. Optimizing design for progressive addition lens by mean curvature flow[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0522001.
唐运海, 吴泉英. 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.
- [11] WU Quan-ying, QIAN Lin, CHEN Hao, *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.
- [12] TANG Yun-hai, WU Quan-ying. 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. 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.
- [13] XUE Deng-pan, LI Xiang-ning, LI Xiao. Progressive lens design method based on addition power curve transformation [J]. *Optical Technique*, 2012, **38**(2): 146-151.
薛登攀, 李湘宁, 李笑. 基于加光曲线变换的渐进镜片设计方法[J]. 光学技术, 2012, **38**(2): 146-151.
- [14] LI Xiao, SUN Hui, LI Xiang-ning. Evaluation of progressive addition lens[J]. *Optical Instruments*, 2012, **34**(2): 26-30.
李笑, 孙惠, 李湘宁. 渐进多焦点镜片的评价[J]. 光学仪器, 2012, **34**(2): 26-30.
- [15] WEI Jian-jian, WU Feng, SHEN Wei-min. Design and evaluation of progressive addition spectacle lenses[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(3): 350-353.
韦剑剑, 吴锋, 沈为民. 渐变眼镜片的设计与评价[J]. 光学技术, 2003, **29**(3): 350-353.