

基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计

唐运海¹ 吴泉英^{1*} 陈晓翌² 张皓¹ 吴宇龙¹

(¹ 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009; ² 苏州苏大明世光学股份有限公司, 江苏 苏州 215028)

摘要 根据遗传算法不依赖于具体优化目标且稳健性强的特点, 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。基于子午线平滑方程, 用二进制字符串(染色体)表示渐进多焦点眼用镜片子午线曲率变化曲线多项式系数。运用罚函数法和线性加权法将渐进多焦点镜片的光焦度和散光度多目标规划化成单目标函数。根据目标函数进行选择、交叉和变异, 产生新一代染色体种群, 循环搜索渐进多焦点镜片子午线最优系数。最后通过两个优化实例并加工成镜片样品进行测试分析, 结果表明设计结果与实际测试结果基本相符。

关键词 光学设计; 渐进多焦点镜片; 子午线; 遗传算法; 散光度; 光焦度

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0922005

Optimization Design of the Meridian Line of Progressive Addition Lenses Based on Genetic Algorithm

Tang Yunhai¹ Wu Quanying¹ Chen Xiaoyi² Zhang Hao¹ Wu Yulong¹

(¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)
² Soochow Mason Optics Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215028, China)

Abstract As the genetic algorithm is robust and independent of the specific optimization objectives, a method is presented that the best design of meridian line of progressive addition lenses is found through genetic algorithm. The polynomial coefficients of the meridian line are represented by binary character strings(chromosome) based on the smoothing equation. The multiple objectives of the power and astigmatism of the progressive addition lens are transformed into a single objective function through punish function and linear combination method. Selection, crossover and mutation operations are processed on the chromosomes to produce new generation population according to the objective evaluation function. The processing is repeated to find the best polynomial coefficients of the meridian line. Two optimizing examples are implemented and the optimized progressive addition lens is manufactured and tested. The results demonstrate that two optimized designs and the practical manufactured progressive addition lenses consist with each other.

Key words optical design; progressive addition lenses; meridian lines; genetic algorithm; astigmatism; power

OCIS codes 220.3620; 220.3630; 220.4610; 220.1250

1 引言

渐进多焦点镜片具有渐变变化的光焦度, 能够满足人们看清远处和近处物体的需求。其设计主要分两个阶段: 前期设计^[1-7]和后期优化设计^[8-9]。在渐进多焦点镜片的前期设计中, 主要有两个影响镜片性能的设计步骤: 一是子午线曲率变化曲线的设计^[1-4], 二是轮廓线分布设计^[5-7]。子午线曲率

变化曲线由其多项式系数决定, 轮廓线由拉普拉斯方程及其边界条件决定。子午线曲率变化曲线和轮廓线相互配合才能得到性能优良的渐进多焦点镜片。针对于某一种轮廓线分布, 由不同子午线曲率变化曲线计算出的渐进多焦点镜片具有不同光焦度和散光度分布。由于轮廓线可根据其边界条件进行多种变化, 如何快速寻找合理的子午线曲率多项式

收稿日期: 2014-04-23; **收到修改稿日期**: 2014-05-13

基金项目: 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013031)、苏州市应用基础研究计划(SYG201323)、苏州市重点实验室项目(SZS201202)

作者简介: 唐运海(1974-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事光学设计与制造方面的研究。E-mail: tyhgfx@163.com

* **通信联系人**。E-mail: wqcyh@sina.com

系数,配合给定的轮廓线分布,以得到满足不同使用要求的渐进多焦点镜片表面面型,是当前渐进多焦点镜片设计的关键之一。

遗传算法(GA)是近年来迅速发展起来的一种全局搜索优化算法,其基本思想是基于达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说。该算法由密执安大学教授 Holland 及其学生于 1975 年创建^[10]。遗传算法把问题的解用二进制字符串——“染色体”表示。在执行遗传算法之前,给出一群“染色体”,即初始种群,然后把这些“染色体”置于问题的“环境”中,按照适者生存的原则,从中选择较适应环境的“染色体”进行复制,再通过交叉,变异过程产生更适应环境的新一代“染色体”种群。这样一代一代地进化,最后收敛到最适应环境的一个“染色体”上,它就是问题的最优解。

近年来,国内外对遗传算法研究主要在其用于复杂系统参数的优化搜索,如:Krishnil 等^[11]用遗传算法搜索低雷诺数涡轮叶片设计参数;Li 等^[12]用于液晶显示器(LCD)导光板设计参数优化搜索;Jelvani 等^[13]用于搜索二氧化碳激光器的中气体比例参数的优化;Chen 等^[14]用来搜索电动汽车或混合动力汽车电池在线状态的评估参数。本文阐述了将遗传算法与渐进多焦点镜片设计相结合,循环搜索得到具有最优子午线曲率变化曲线的渐进多焦点镜片的方案,并对设计实例进行分析讨论。

2 渐进多焦点镜片的设计原理

2.1 渐进多焦点镜片的基本结构

渐进多焦点镜片的主要特征为:在镜片上方的视远区和下方的视近区(阅读区)光焦度基本固定,无明显像差存在。视远区和视近区之间有光焦度连续变化的过渡区域,称为渐变通道(如图 1 所示)。视远区、视近区和渐变通道称为有效视觉区;其余区域称为散光区。

评价渐进多焦点镜片的优劣主要包括以下方

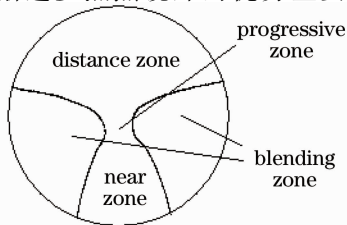


图 1 渐进多焦点镜片表面区域划分示意图

Fig. 1 Schematic plot of the progressive addition lens with zones labels

面:1)视远区和视近区面积大小;2)像差的类型和大小;3)渐变通道的长度和视觉可用宽度。不同设计的镜片具有不同的特点,有效视觉区域(可用区域)和散光区域(不可用区域)之间存在一定程度的妥协和折中处理方案。

2.2 渐进多焦点镜片的设计

渐进多焦点镜片的子午线 MM' 为脐线,如图 2 所示,在直角坐标系 xyz 中,坐标面 xoy 和镜片表面相切于几何中心点 O ,图中 x 轴正方向竖直向下, y 轴正方向垂直于纸面指向纸背, z 轴正方向水平向右。以下所述长度单位皆为 mm。 A 为镜片上视远参考点, B 为镜片上视近参考点,沿 x 轴向下 A 点到 B 点的连线,称之为子午线,长度为 h 。视远参考点 A 处的曲率半径为 r_D ;视近参考点 B 处的曲率半径为 r_R 。 $q(\xi, 0, \zeta)$ 是曲率中心, $m m'$ 为子午线 MM' 的渐屈线,设子午线 MM' 上各点曲率半径的变化函数^[15] 为 $r(u)$:

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

式中 L 为 A 到镜片中心点 O 之间的距离, h 为在子午线上点 A 到点 B 的垂直距离。在 A 处 $1/r(u) = 1/r_D$,在 B 处 $1/r(u) = 1/r_R$,有子午线平滑方程组^[15]

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

式中 m 为子午线多项式系数中第一个非零项的次数, l 为子午线多项式系数中非零项的个数。

解该方程组得出系数 c_n ,从而计算出沿渐进多焦点镜片子午线曲率变化曲线。渐进多焦点镜片子午线上光焦度随 u 变化函数

$$M(u) = \frac{n-1}{r(u)} \times 10^3. \quad (3)$$

渐进表面上的任意点 (x, y) 总存在一个圆柱面

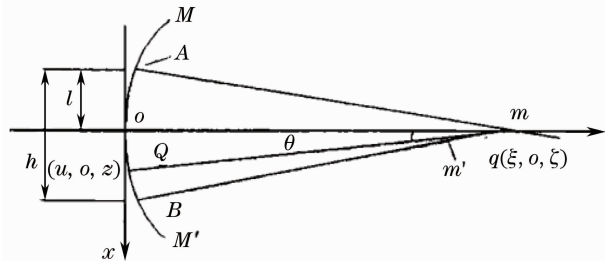


图 2 渐进多焦点镜片子午线曲率半径分布示意图

Fig. 2 Schematic plot of the curvature radius of the meridian line

和渐进表面相交,构成渐进表面的轮廓线 $u(x, y)$ 。由于该轮廓线必须平滑渐变,则它须满足拉普拉斯方程^[15]

$$u_{xx} + u_{yy} = 0. \quad (4)$$

根据不同的边界条件采用解析方法或数值方法可以解出不同的轮廓线分布 $u(x, y)$ ^[1-5,7]。每一种轮廓线分布都需要配合与其相适应的子午线曲率变化曲线,故每一种轮廓线都需要寻找最优的子午线曲率变化曲线。设计好轮廓线和相应的子午线曲率变化曲线后,根据(1)式计算出镜片的渐进表面曲率半径分布,然后根据基本几何方法^[15]计算出渐进多焦点镜片的表面矢高 $z(x, y)$ 。

3 运用遗传算法对渐进多焦点镜片子午线寻优设计

3.1 遗传算法与渐进多焦点镜片设计相结合

结合遗传算法和渐进多焦点镜片设计的特点,根据经验设定或用随机函数产生二进制字符串作为初始染色体,该染色体由字符 0 和 1 组成 8~30 位的字符串,其中如果第 n 位为 0,代表子午线曲率变化曲线多项式中第 n 次方系数 c_n 为 0,如果是 1,代表该项系数为非零。20~40 个染色体构成遗传算法的一代个体种群。代入(2)式解出 c_n ,结合设定的轮廓线分布 $u(x, y)$,进而计算出第一代渐进多焦点镜片的矢高数据群。

根据微分几何基础知识求出渐进表面的主曲率半径 R_1 和 R_2 ,镜片上各点光焦度 Φ_p 和散光度 Φ_{ast} 为

$$\Phi_p = \frac{n-1}{2} \left| \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right|, \quad (5)$$

$$\Phi_{ast} = (n-1) \left| \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right|. \quad (6)$$

光焦度和散光度的单位都为 D, 1 D=1 m⁻¹。

基于渐进多焦点镜片的评价标准,设置考察目标如下:1)渐进表面上最大散光度的值,用 Φ_1 表示,其理想值设为 $\Phi_1^* = P_A - P_B$,其中 P_A 和 P_B 分别为渐进多焦点镜片视远区参考点和视近区参考点处的光焦度。2)渐变通道上各点的散光度值,用 Φ_2 表示。3)视远区各点散光度值,用 Φ_3 表示。4)视近区各点散光度值,用 Φ_4 表示。因渐变通道、视远区和视近区上的散光度越小越好,故它们的理想值 Φ_2^* 、 Φ_3^* 和 Φ_4^* 都为 0 D。5)视远区各点光焦度值,

用 Φ_5 表示,其理想值 Φ_5^* 为视远区参考点光焦度 P_A 。6)视近区各点光焦度值,用 Φ_6 表示,其理想值 Φ_6^* 为视近区参考点光焦度 P_B 。7)通道上各点光焦度值,用 Φ_7 表示,其理想值为 $\Phi_7^* = P_A + \frac{P_B - P_A}{h}(x+l)$,该理想值为从视远区参考点到视近区参考点光焦度的线性函数。

分别计算上述 7 项目标各点的平均值,如果渐进表面上上述各项中有一项平均值与理想值偏差太大,则表明该镜片不合格。故将线性加权法和罚函数法相结合^[10],把上述 7 项考察规划转化为单目标函数,即:

$$F = \begin{cases} \sum_{i=1}^7 \alpha_i \bar{\Phi}_i, & \max(\bar{\Phi}_i) \leq B_i \\ P \cdot \max(\bar{\Phi}_i), & \max(\bar{\Phi}_i) > B_i \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, 7$, 为上述项目编号。 α_i 为加权系数。 P 为惩罚系数,一般设为一个较大的数。 B_i 为项目偏差平均值的限制参数,用来控制进化方向。对于光焦度来说其偏差应该小于 0.12 D,散光度应该小于 0.25 D,根据遗传算法进化要求,取其 4 至 8 倍的值作为在进化过程中限制参数 B_i 。 $\bar{\Phi}_i$ 为考察项目与理想值偏差的平均值:

$$\bar{\Phi}_i = \begin{cases} \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} (\Phi_n - \Phi_n^*), & i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{N_i} \sum_{n=1}^{N_i} |(\Phi_n - \Phi_n^*)|, & i = 5, 6, 7 \end{cases} \quad (8)$$

Φ_i 为上述项目的考察值, Φ_i^* 为上述项目的理想值, N_i 为每一项考察区域中各个点的个数,其中 $i = 5 \sim 7$ 时,考察的是光焦度,而对于光焦度,不管是正偏离还是负偏离都违背设计宗旨,故其偏离值要取绝对值。目标函数值越小则表明该镜片越接近理想渐进多焦点镜片。

如果达不到进化结束条件,则将目标函数值转化为遗传算法中的适应度值,再进行选择、交叉和变异操作进化为下一代染色体种群,进而计算出下一代染色体种群的目标函数值,循环操作直至目标函数符合设计要求或者进化代数超过限制值。本渐进多焦点镜片的遗传算法寻优方案基本流程如图 3 所示。流程中的初始化种群可采用随机函数和经验值相结合的方式,即一部分染色体根据经验人为设定,其余染色体由随机函数产生。

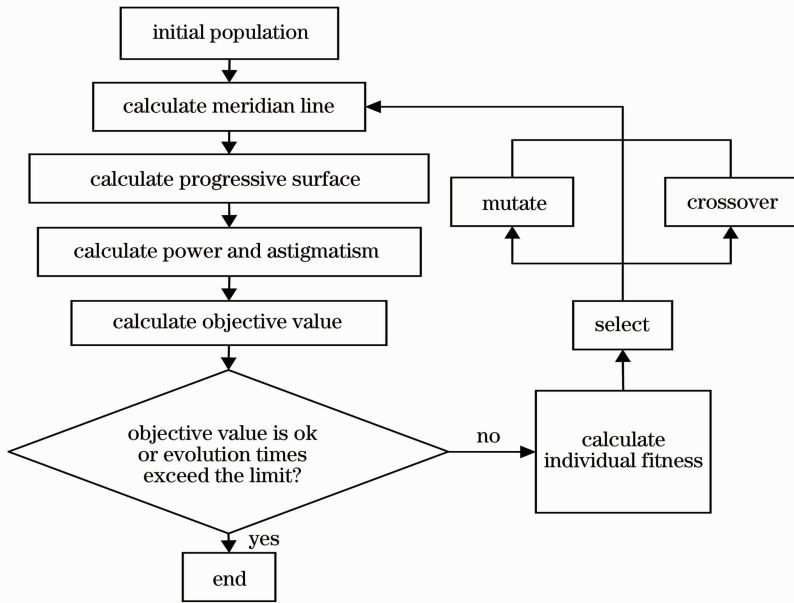


图 3 基于遗传算法的渐进多焦点镜片寻优设计流程图

Fig. 3 Flow chart of the optimizing design process based on genetic algorithm

3.2 优化设计实例及分析

3.2.1 实例 1

本实例中镜片直径 $\varphi=72\text{ mm}$, 视远区光焦度 P_A 为 2 D , 视近区光焦度 P_B 为 0 D , 设计镜片后表面的光焦度加光量为 -2 D . 渐变通道长度 $h=34\text{ mm}$, 视远参考点 A 到镜片中心点 O 之间的距离 $l=17\text{ mm}$. 镜片材料折射率为 1.604 .

用随机函数产生 40 个二进制染色体作为初始染色体群, 目标函数中各个项目的理想值和权重如表 1 所示. 根据理想渐进多焦点镜片的特征确定视远区、视近区和通道区域大小和位置. 设定惩罚系数 P 为 30, 项目偏差平均值的所有限制参数 B_i 都取 0.7 D , 计算每个染色体对应的目标函数值.

表 1 目标函数评价项目的理想值和相应权重表

Table 1 Ideal value and weight of the objective function

Item	Ideal value (f^*)	Weight (α)
Maximum astigmatism /D	2	0.1
Astigmatism of the distance zone /D	0	6
Astigmatism of the reading zone /D	0	2
Astigmatism of the corridor zone /D	0	2
Power of the distance zone /D	2	1
Power of the reading zone /D	0	2
Power of the corridor zone /D	—	1

将目标函数值小于 3.4 或者最大进化代数大于 40 作为进化终止条件, 进化过程中目标函数值变化如图 4 所示, 进化过程结束于第 40 代, 其目标函数值为 3.417. 从中可以看出: 最优个体的目标函数值呈

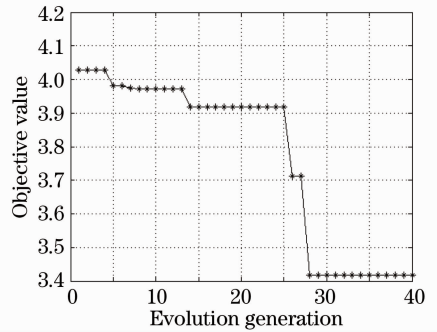


图 4 遗传算法进化过程目标函数值

Fig. 4 Objective function value of evolution process for genetic algorithm

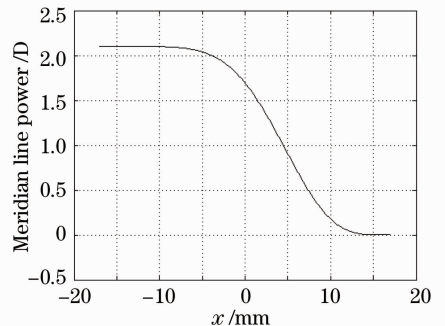


图 5 寻优得到的子午线光焦度变化曲线

Fig. 5 Power changing curve on meridian line by optimizing

阶段性下降, 说明在种群中有些交叉和变异操作并没有产生更优秀的个体, 即有些进化代的目标函数值维持不变, 如图 4 中从 15~25 代和 28~40 代, 由此可知在进行遗传算法寻优时进化代数的设置值不能太

小。第 40 代的子午线光焦度变化曲线如图 5 所示。视远区和视近区光焦度都有一部分区域光焦度保持不变,有利于相应区域产生较小的散光度。

进化过程中的第 3 和第 40 代种群中最优染色体个体分别为: 00010010010100 和 00000010110101。图 6 是本实例中第 3 代和第 40 代设计镜片上各个部分考查量与目标值的差异图,L11 和 L12 分别代表第 3 代和第 40 代设计镜片,max_dev_C 表示镜片最大散光度偏差,m_dev_C 表示散光度偏差量平均

值,m_dev_D 表示光焦度偏移量平均值。由于表 1 中视远区散光度权重比视近区散光度权重,视远区散光度与理想值偏差的平均值对目标函数值的下降起决定作用,故从图 6 可以看出:视远区散光度和光焦度与其理想值偏差平均值明显小于视近区偏差平均值。第 40 代镜片(L12)与第 3 代镜片(L11)相比,视远区散光度和光焦度与理想值偏差的平均值明显下降,而因此付出的代价是视近区散光度和光焦度与其理想值偏差平均值略有增大。

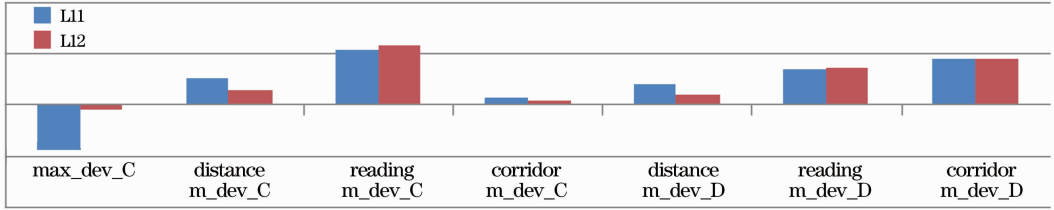


图 6 渐进镜片 L11 和 L12 上各个部分考查量与目标值的差异图

Fig. 6 Histogram graph of mean deviation from the ideal value of the progressive lens L11 and L12

采用前表面光焦度为 2D 的胚料,将第 2 代和第 40 代镜片数据作为后表面输入计算机数控(CNC)雕刻机铣磨并用复曲面精磨精抛机进行抛光,制备出样品镜片。前表面为凸面,后表面为从视远区 2 D 到视近区 0 D 的渐进多焦点的凹面,前表面提供正光焦度,后表面提供负光焦度,故渐进多焦点眼用镜片的光焦度为两个表面光焦度之和,即视远区为 0 D,视近区为 2 D。该样品镜片用以色列 Free Form Verifier(FFV)测试光焦度和散光度,其性能

参数如图 7、图 8 和表 2 所示。设计时规定的视远参考点是子午线光焦度变化曲线的起点,图中的视远区和视近区参考点都根据镜片实际光焦度和散光度分布作了适当调整。两个镜片上散光度小于 0.25 D 的区域都贯通视远区和视近区,加光量能够达到设计要求。第 3 代和第 40 代样品镜片相比,视远区和视近区散光度小于 0.25 D 的区域分别扩大了 16.6% 和 52.4%,说明遗传算法能够逐步优化渐进多焦点镜片的光学性能。

表 2 第 3 代和第 40 代样品镜片参数

Table 2 Parameters of the 3rd and the 40th generation manufactured lenses

	Maximum astigmatism /D	Power of the distance zone /D	Power of the reading zone /D	Area of the distance zone ($\Phi_{ast} < 0.25 D$) /mm ²	Area of the reading zone ($\Phi_{ast} < 0.25 D$) /mm ²
3 rd generation lens	1.61	0.08	1.96	92.2	25.0
40 th generation lens	1.91	0.11	2.00	107.5	38.1
Lens in instance 2	1.93	0.10	2.01	77.3	57.4

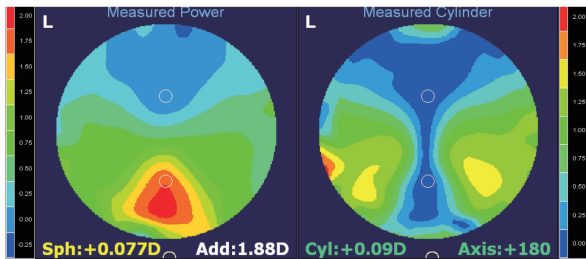


图 7 第 3 代样品镜片光焦度和散光度测试图

Fig. 7 Power and astigmatism of the 3rd generation manufactured lens

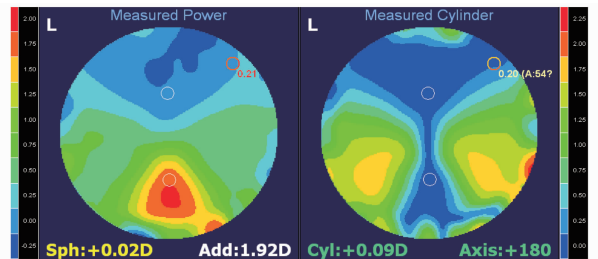


图 8 第 40 代样品镜片光焦度和散光度测试图

Fig. 8 Power and astigmatism of the 40th generation manufactured lens

3.2.2 实例 2

本实例中大部分设计参数同实例 1,有所变化

的是将表 1 中的视远区散光度权重改为 2,视近区散光度权重修改为 6。视近区散光度权重比视远区

散光度权重大,视近区散光度与理想值偏差的平均值对目标函数值的下降起决定作用。这样将引导遗传算法搜索得到视近区清晰视觉范围较大的渐进多焦点镜片。

将目标函数值小于 3.5 或者最大进化代数大于 40 作为进化终止条件,程序进化到第 25 代,目标函数值为 3.465,达到了目标函数阈值,进化结束。

采用同实例 1 中相同的胚料和方法制备出样品镜片,最终寻优设计出的样品镜片性能参数如图 9 和表 2 所示。最大散光度和加光量都符合设计要求,本实例中最终设计镜片与实例 1 中第 40 代镜片相比,视远区散光度小于 0.25 D 的范围变小,而视近区扩大了 50.6%,这表明在目标函数中增大视近区散光度与理想值偏差的权重能够增大渐进多焦点镜片视近区清晰视觉范围。

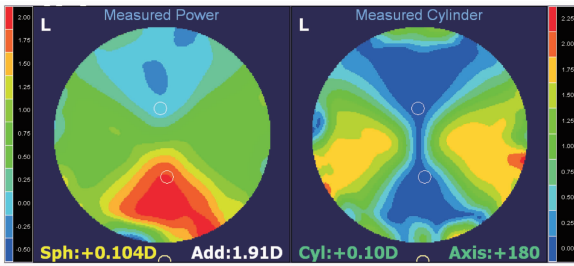


图 9 第 25 代样品镜片的光焦度和散光度测试图

Fig. 9 Power and astigmatism of the 25th generation manufactured lens

4 误差分析

利用 FFV 数据模拟功能和与测量数据对比的功能。将实例 1 中第 3 代、第 40 代和实例 2 中的优化设计数据进行模拟并与相应加后的测量数据进行对比。相应镜片设计数据的光焦度与加工后测量点的光焦度绝对偏差平均值分别为:0.0409 D、0.0751 D 和 0.0975 D;相应测量点的散光度偏差平均值分别为:0.0055 D、0.0136 D 和 0.0269 D。上述三个镜片的设计结果与加工后镜片的测量结果对比可知:光焦度偏差不超过 0.1 D,散光度不超过 0.03 D。造成该偏差的因素主要为镜片铣磨误差和抛光过程中产生的误差。

5 结 论

根据渐进多焦点镜片子午线曲率平滑方程,用二进制字符串(染色体)表示子午线曲率变化曲线多项式系数。运用罚函数法和线性加权法将渐进多焦点镜片的光焦度和散光度的考察项目规划化成单目

标函数。用遗传算法搜寻得到渐进多焦点镜片子午线曲率变化曲线最优系数。通过优化实例分析得出:优化设计结果与实际制备样品测试结果基本相符;在用遗传算法进行渐进多焦点镜片子午线寻优进化过程中,最优个体评价函数值呈阶段性下降;在本遗传算法寻优进化过程中渐进多焦点镜片的光焦度和散光度都能得到改善;调整目标函数中某些考察项的权重能够得到具有相应特点的渐进多焦点镜片。用普通个人电脑,实例 1 和实例 2 优化所用时间均在 2 h 以内,与人工寻找子午线曲率变化多项式系数相比,本优化方法节省了人力,同时由于遗传算法的随机搜索特性,能够启发和帮助设计者找到渐进多焦点眼用镜片的最佳参数。

参 考 文 献

- 1 Wei Jianjian, Wu Feng, Shen Weimin. Design and evaluation of progressive addition spectacle lenses [J]. Optical Technique, 2003, 29(3): 1002-1582.
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): 1002-1582.
- 2 Wu Quanying, Qian Lin, Chen Hao, *et al.*. Design methods of progressive addition lenses[J]. Laser Journal, 2009, 30(6): 0253-2743.
吴泉英,钱 霖,陈 浩,等. 渐进多焦点镜片的设计方法[J]. 激光杂志, 2009, 30(6): 0253-2743.
- 3 Wu Quanying, 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. 渐进多焦点眼用镜片的子午线设计研究[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3186-3191.
- 4 Xue Dengpan, Li Xiangning, 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.
- 5 Wu Quanying, Tang Yunhai, Chen Xiaoyi, *et al.*. A Kind of Design for Progressive Addition Lenses [P]. China Patent, CN: 201310206036.0, 2013-05-29.
吴泉英,唐运海,陈晓翌,等. 一种渐进多焦点眼用镜片的设计方法 [P]. 中国专利, 201310206037.5, 2013-05-29.
- 6 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. A Kind of Progressive Addition Lenses with Fixed Length of Intermediate Portion [P]. China Patent, CN: 201310206036.0, 2013-05-29.
唐运海,吴泉英,陈晓翌,等. 一种固定通道长度的渐进多焦点镜片 [P]. 中国专利, 201310206036.0, 2013-05-29.
- 7 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. A Kind Method of Manufacturing Progressive Addition Lenses [P]. China Patent, CN: 201310206035.6, 2013-05-29.
唐运海,吴泉英,陈晓翌,等. 一种渐进多焦点眼用镜片及其制备方法 [P]. 中国专利, 201310206035.6, 2013-05-29.
- 8 Tang Yunhai, Wu Quanying, Qian Lin, *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,钱 霖,等. 渐进多焦点眼用镜片的平均曲率流优化设计 [J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0522001.
- 9 Tang Yunhai, Wu Quanying, Qian Lin, *et al.*. Design and optimization of the main curvature difference for progressive addition lenses [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0622001.

- 吴泉英,唐运海,钱霖,等. 渐进多焦点眼用镜片的主曲率差优化设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0622001.
- 10 Lei Yingjie, Zhang Shanwen, Li Jiwu, *et al.*. Application of MATLAB Genetic Algorithm Toolbox [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. 96-97.
- 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005. 96-97.
- 11 Krishnil R Ram, Sunil Lal, M Rafiuddin Ahmed. Low Reynolds number airfoil optimization for wind turbine applications using genetic algorithm [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5(5): 052007.
- 12 Li Chen-Jung, Fang Yi-Chin, Cheng Ming-Chia. Study of optimization of an LCD light guide plate with neural network and genetic algorithm[J]. Opt Express, 2009, 17(12): 10177-10188.
- 13 S Jelvani, A M Koushki. Optimization of gas pressures ratio in a fast-axial-flow CO₂ laser with genetic algorithm[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(16): 1421-1424.
- 14 Chen Zheng, Chris Mi Chunting, Fu Yuhong, *et al.*. Online battery state of health estimation based on genetic algorithm for electric and hybrid vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240(15): 184-192.
- 15 J T Winthrop. Progressive Power Ophthalmic Lenses [P]. US4861153, 1989-08-29

栏目编辑: 韩峰