第5卷 第5期
2012年10月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 5 No. 5
Oct. 2012

文章编号 1674-2915(2012)05-0512-08

基于个体眼光学结构的波前眼镜设计

李 蕊,刘永基*,王肇圻
(南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

摘要:提出一种在个体眼光学结构基础上根据波前数据设计波前眼镜的新方法。建立了个性化的眼光学结构,并将眼球和镜片视为统一的镜-眼光学系统,用光学设计的优化方法给出镜片的结构数据,并分析了 ±7°视场和眼球旋转 ±20°时,该镜-眼系统的成像情况。与波前拟合的方法相比,该方法设计的波前眼镜离焦差为(-0.057 ±0.015) m^{-1},像散差为(0.015 ±0.013) m^{-1},散光轴位差为(0.100 ±0.316)°。镜-眼系统的矫正视力均大于1.25,其中8只被试眼的视力可达1.5以上。10只被试眼在转动 ±20°情形下的0°视场成像相比于直视的情况均略有下降,而7°视场的成像质量相比于直视的情况下降则更为明显。由该方法给出的验光结果客观可信,可用于对佩戴波前眼镜后人眼的视觉质量的预先评估。

关 键 词:光学设计;波前像差;波前眼镜;视觉矫正
中图分类号:TH703; R778.2 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20120505.0512

Design of wavefront-guided lens based on individual eye optical model

LI Rui, LIU Yong-ji*, WANG Zhao-qi

(*Key Laboratory of Optical Information Technology Science of the Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Tianjin University, Tianjin* 300071, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yjliu@nankai.edu.cn*

Abstract: A new method to design a wavefront-guided lens is proposed based on an individual eye optical model. The individual eye model is constructed, then by regarding the eyeball and the wavefront-guided lens as a single system. For the lens-eye system, the surface profiles of the lens are determined by optimizing the lens design. In addition, the visual performance of the lens-eye system is analyzed for both ±7° field of view and ±20° rotation of the eyeball. In comparison with the results from wavefront fitting, the prescription difference in defocus, astigmatism and in the axis of astigmatism are (-0.057 ±0.015) m^{-1}, (0.015 ±0.013) m^{-1}, (0.100 ±0.316)°, respectively. Furthermore, the visual acuity of the lens-eye system is above 1.25 because of the correction of the wavefront-guided lens. The visual acuity for the eight eyes is as high as 1.5. For a field of view of 0°, the performance for the eye without rotation is better than that of eyes with a rotation of 20°. However, for a field of view of 7°, the performance for eyes without rotation is much better than that

收稿日期:2012-06-21;**修订日期**:2012-08-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978068, No. 11104149); 天津市科技支撑计划重点资助项目(No. 10ZCKFGX18800); 中央高校基本科研业务费资助项目

of eyes with a rotation of ±20°. Experiments show that the prescription of the wavefront-guided lens from the new method is objective and reliable and it is possible to predict the visual quality of the eye with the wavefront-guided lens.

Key words: optical design; wavefront aberration; wavefront-guided lens; visual correction

1　引　言

屈光不正(离焦和像散)是人类常见的视力问题。早在13至19世纪，球面和柱面透镜即被用于人眼离焦和像散的矫正，但是，对人眼视力产生影响的像差不仅仅是离焦和像散，其他高阶像差对人眼的视力也存在着影响。可长期以来，对人眼视力的改善，一直停留在矫正离焦和像散这两种低阶像差的水平上[1]，造成这种局面的一个重要原因就是人眼的高阶像差很难精确测量。目前，基于 Harttman-Shack 的人眼波前像差测量技术[2]的出现及其临床的应用和发展，为根据客观精确的波前数据验光配镜进而矫正高阶像差提供了可能。

国外的研究者将波前技术应用于验光配镜起步较早。在 Liang[2]的文章中提出，可根据波前像差的第二阶计算出人眼的等效球/柱镜屈光度，此方法的局限性是既没有考虑到高阶像差的影响，也没有考虑到镜眼间距所带来的屈光度的变化，因而不够准确[3]。Thibos 等人[4-6]提出了采用低阶和高阶像差的 Zernike 系数来计算配镜处方的方法(称为波前验光)，较之于传统的主观验光方法，其结果更加客观和准确，屈光度可精确到 $0.1\ m^{-1}$。Ophtahonix 公司根据2~6阶像差波前数据拟合出矫正屈光不正眼所需的最优球柱镜处方，并设计了相应的 iZon 波前眼镜。临床测试表明[7]，佩戴 iZon 波前眼镜后，其视觉效果较传统眼镜有明显改善。目前，国内对于根据波前像差数据确定验光配镜处方的研究还处于空白。

本文提出了以个体化眼光学结构为基础、用光学设计的方法确定球柱型波前眼镜的新方法。以该方法设计的球柱面镜处方精度高，不需主观受试者的参与；另外，采用该方法可以事先预测视觉效果，并可用于分析眼睛在不同视场以及转动视物情形下的成像情况，这对于临床眼镜的验配具有重要的参考和应用价值。

2　个体眼光学结构的构建

随机选取50只被试眼，采用 Hartmann-Shack 波前像差仪对其眼波前像差进行测量，且每只个体眼均被重复测量3次取平均值。被试者年龄范围在18~35岁，测量时瞳孔直径均在暗室条件下自然放大至5 mm以上。离焦为 $-2 \sim -8\ m^{-1}$，像散为 $0 \sim -2.5\ m^{-1}$，所有被试者除屈光不正外无其它眼科疾病。由于在明视觉条件下，正常人眼瞳孔直径约为3~4 mm，因此，首先将测量得到的波前像差数据用 MATLAB 软件编程计算，转换成明视条件(瞳孔直径取为3.4 mm)时的波前像差，用于后面的计算工作。

基础眼模型的初始结构选用 Liou[8]的标准眼模型。为了使晶状体曲率半径的变化较为符合实际人眼调节时的情况，在晶状体前表面处设置一片弯月薄透镜，对于正常人眼，其前后表面的结构参数与 Liou 眼模型中晶状体前表面的相应参数一致，而折射率与 Gullstrand-Le Grand[9]眼模型中晶状体折射率数值一致。经过验证，此薄透镜的加入并未改变原 Liou 眼模型的像差数值。

表1为该基础眼模型的结构参数，其中，Grad 表示晶状体的折射率为梯度折射率[8]形式，并且被一虚拟面分为两部分，前半部分用 GradA 表示，后半部分用 GradP 表示，其表达式形式相同：

$$\mathrm{GradA/P} = n_0 + n_{r2} r^2 + n_{z1} z + n_{z2} z^2, \quad (1)$$

式中：r 为沿径向的距离，z 为沿光轴的距离。GradA 中 $n_0 = 1.368$，$n_{r2} = -0.001\ 978$，$n_{z1} = 0.049\ 057$，$n_{z2} = -0.015\ 427$；GradP 中 $n_0 = 1.407$，$n_{r2} = -0.001\ 978$，$n_{z1} = 0$，$n_{z2} = -0.006\ 605$。

表1　基础眼模型结构参数

Tab.1　Parameters of fundamental eye model

折射面	曲率半径/mm	二次曲面系数	厚度/mm	折射率(550 nm)	阿贝数
角膜前表面	7.77	−0.18	0.50	1.376	61.7
角膜后表面	6.40	−0.60	3.16	1.336	55.1
瞳孔	∞	0	0	1.336	55.1
弯月镜前表面	12.40	−0.94	1×10^{-6}	1.420	49.8
弯月镜后表面	12.40	−0.94	0	1.336	55.1
晶状体前表面	12.40	−0.94	1.59	GradA	60.3~66.8
虚拟面	∞	−	2.43	GradP	
晶状体后表面	−8.10	+0.96	16.19	1.336	55.1
视网膜	−12.0	0	−	−	−

本文的被试眼均属于轴性和屈光性近视混合类型,其晶状体前表面曲率和玻璃体深度相比于正常值均有不同程度的变形。首先,以被试眼的波前像差数据作为优化的目标值,优化弯月镜的曲率半径以及玻璃体深度,从而将波前像差中的离焦部分转移至晶体曲率的变化,部分转移至眼轴长度的变化。而后以 ZEMAX 中 Zernike Fringe Sag 多项式定义角膜前表面的面型,以承担波前像差中的像散和高阶像差[10],其表达式为:

$$z = z_0 + \frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-c^2(x^2+y^2)}} + \sum_{i=1}^{N} A_i Z_i(x,y) \quad , \tag{2}$$

式中:z_0是常数,c 是角膜前表面基准球面的曲率(mm^{-1}),求和项中 $Z_i(x,y)$表示 Zernike 多项式的第 i 项,A_i为相应项的系数,N 为所选用的项数。设定多项式的系数为变量,经过优化,波前像差值收敛至目标值,个体眼模型构成。眼模型的波前像差与实际人眼的波前像差一致。

3　球-柱型眼镜的设计

根据临床上常用的眼镜片的结构特征和几何尺寸,本文设计的镜片中心厚度为 2 mm,光学区直径为 30 mm,材料选用折射率为 1.60,阿贝数为 36 的树脂。将镜片的内表面设计为环曲面型,用于同时矫正离焦和像散,外表面设计为球面型。设计时,根据不同屈光度的个体眼,赋予球面一定曲率[11]。

环曲面的表达式为:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1+\sqrt{1-(1+k_x)c_x^2x^2-(1+k_y)c_y^2y^2}} \quad , \tag{3}$$

式中:x,y 为垂直于光轴的平面坐标,z 沿光轴方向,c_x, c_y 分别是 x, y 方向的基准球面曲率(mm^{-1}),k_x,k_y分别是 x,y 方向的锥面度,设计中将其取值为 0。

球面的表达式为:

$$z = \frac{c_b(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-c_b^2(x^2+y^2)}} \quad , \tag{4}$$

式中,c_b是球面的曲率,即镜片的基弧。

一般镜片的后顶点距离约为 12 ~ 14 mm,以不触及睫毛为限,本研究取值为 13 mm。瞳孔直径设置为 3.4 mm,对应于明视觉条件。

传统验光方法设计的镜片是基于人眼在直视时的像差特点进行矫正的,因此,将环曲面两正交方向的曲率半径以及此面绕光轴旋转的角度(对应于散光轴位角)设置为优化变量,将系统的波长设定为 550 nm,视场设为 0°。经过优化,矫正被试眼在直视 0°视场视力的球-柱型镜片设计完成。根据镜片结构可计算得到屈光度:

$$P_1 = (n_{\mathrm{glass}}-1)\left(\frac{1}{R_{\mathrm{base}}} - \frac{1}{R_1} + \frac{d(n_{\mathrm{glass}}-1)}{R_{\mathrm{base}}R_1 n_{\mathrm{glass}}}\right) \quad , \tag{5}$$

$$P_2 = (n_{\mathrm{glass}}-1)\left(\frac{1}{R_{\mathrm{base}}} - \frac{1}{R_2} + \frac{d(n_{\mathrm{glass}}-1)}{R_{\mathrm{base}}R_2 n_{\mathrm{glass}}}\right) \quad , \tag{6}$$

式中:P_1 和 P_2 分别表示环曲面两正交方向的屈光力,单位为 m^{-1},n_{glass} 表示镜片的折射率,R_{base} 表示镜片前表面的曲率半径,d 表示镜片的中心厚度,单位均为 m。规定球度 P_s(Sphere)为 P_1,则柱度 P_c(Cylinder)即为:P_2-P_1[11]。

4　结果与分析

表 2 给出了设计得到的 10 只被试眼的等效球度 F_s、柱度 F_c、散光轴位角 Axis 以及镜片的基弧 F_{base}。

表 2　10 只被试眼的波前球-柱镜屈光度数

Tab. 2　Refractive powers of the spectacles for ten eyes

	F_{base}/m^{-1}	F_s/m^{-1}	F_c/m^{-1}	Axis/(°)
1	5.5	−2.25	−0.40	125
2	5.0	−3.84	−0.48	172
3	4.5	−3.69	−0.81	170
4	4.5	−4.52	−0.22	166
5	4.0	−4.64	−1.16	171
6	4.5	−4.36	−0.27	50
7	4.0	−5.92	−0.07	57
8	3.0	−6.80	−0.60	156
9	3.0	−7.18	−0.72	33
10	3.0	−7.54	−0.71	24

按照 William[7] 介绍的方法进行建模,计算 10 只被试眼的屈光度数。运用最小二乘法找到球镜和柱镜的最优化组合,使得其波相差能够最大限度抵消人眼实际的波前像差。结果见表 3,表中各物理量的意义与表 2 中相同。

比较表 3 和表 2 所得的结果,离焦差别为 $(-0.057\pm0.015)\ m^{-1}$,像散差别为 $(0.015\pm0.013)\ m^{-1}$,散光轴位差别为 $(0.100\pm0.316)°$。从而证实了运用本方法设计眼镜结果的可靠性。然而,由于本文的工作运用了个体眼光学结构,因此所得到的结构较 William 的结果更符合实际情况。

表 3　Wiliam 方法得出的 10 只被试眼的屈光度数

Tab. 3　Refractive powers of spectacles from William′s method for ten eyes

	F_s/m^{-1}	F_c/m^{-1}	Axis/(°)
1	−2.22	−0.40	125
2	−3.79	−0.49	172
3	−3.64	−0.83	170
4	−4.47	−0.23	166
5	−4.59	−1.19	171
6	−4.31	−0.27	50
7	−5.86	−0.07	56
8	−6.73	−0.62	156
9	−7.10	−0.75	33
10	−7.46	−0.74	24

为了评价人眼佩戴该波前眼镜的后的视觉效果,选 MTF 和视力作为评价标准。

表 4 列出了 10 只被试眼在戴镜后直视时的 0°视场MTF数值(子午和弧矢方向MTF的平均

表 4　直视时 10 只被试眼镜-眼系统的 MTF 值

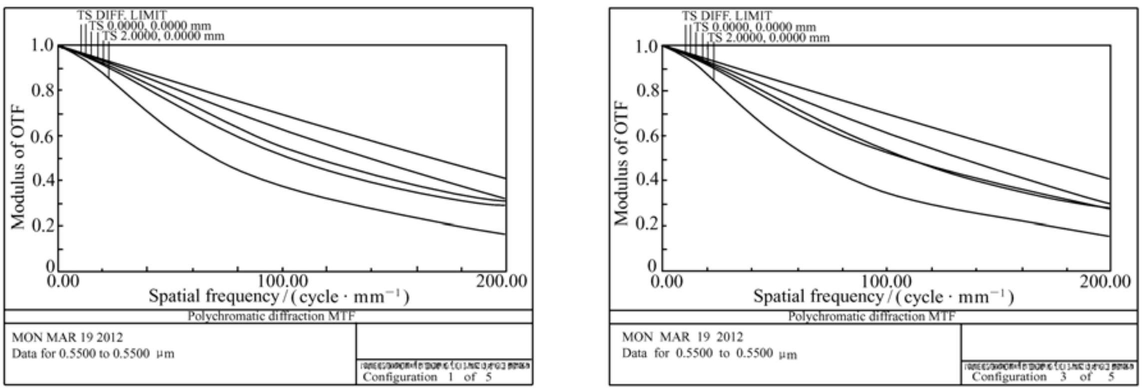
Tab. 4　MTF values at 0° field of view for ten eyes without rotation

序号	空间频率/(cycles·mm⁻¹)				
	40	80	100	125	150
1	0.843 8	0.669 2	0.590 4	0.504 9	0.432 2
2	0.834 2	0.672 7	0.602 8	0.528 1	0.464 5
3	0.817 4	0.650 9	0.582 7	0.512 0	0.453 2
4	0.792 5	0.599 0	0.518 7	0.437 5	0.377 0
5	0.759 1	0.530 2	0.444 0	0.365 7	0.315 2
6	0.763 6	0.555 3	0.475 4	0.399 2	0.346 5
7	0.830 3	0.653 0	0.577 9	0.499 2	0.433 6
8	0.738 9	0.503 5	0.424 7	0.356 7	0.312 6
9	0.837 3	0.661 1	0.581 7	0.494 5	0.420 2
10	0.815 8	0.645 4	0.574 1	0.499 2	0.438 5

值),鉴于空间有限,这里仅给出几个典型空间频率处的曲线数值。由表4可以看出,经过本文设计的球-柱镜片的矫正,10只被试眼中2号眼的MTF最高,在空间频率125和150 cycle/mm处其MTF分别为0.53和0.46;8号眼的MTF最低,在空间频率125和150 cycle/mm处其MTF分别为0.36和0.31。

在前期的研究中,对正常人眼的空间像调制度(AIM)进行了临床测量,并作出了有统计意义的结果[12-13]。AIM曲线与MTF曲线的交点对应于人眼的视锐度(VA)。正常人眼的视锐度1.25,对应于在空间频率125 cycle/mm处AIM值为0.27;视锐度1.50,对应于在空间频率150 cycle/mm处AIM值为0.35。可见上述被试眼经球-柱镜的矫正后视力均可大于1.25,除了5号和8号眼,其他被试眼的视力均达1.5以上。

由于人眼视物时有一定的清晰成像视场,一般对应于±7°,相当于注视电视机以及电脑显示器的视场范围。此外,人眼在视物时会根据不同方向的物体适当转动眼球注视,因此,可在已设计好的镜-眼系统中,加上视场的设置,以及眼模型的转动设置,用以分析设计完成的球-柱镜在不同角度和视场的成像质量。分析表明,这些眼可以分为3类,图1~3分别为具有代表性的3只镜-眼系统在直视((a)图)和水平转动20°((b)图)时,每一子结构下的0°(TS 0.000 0,0.000 0 mm)

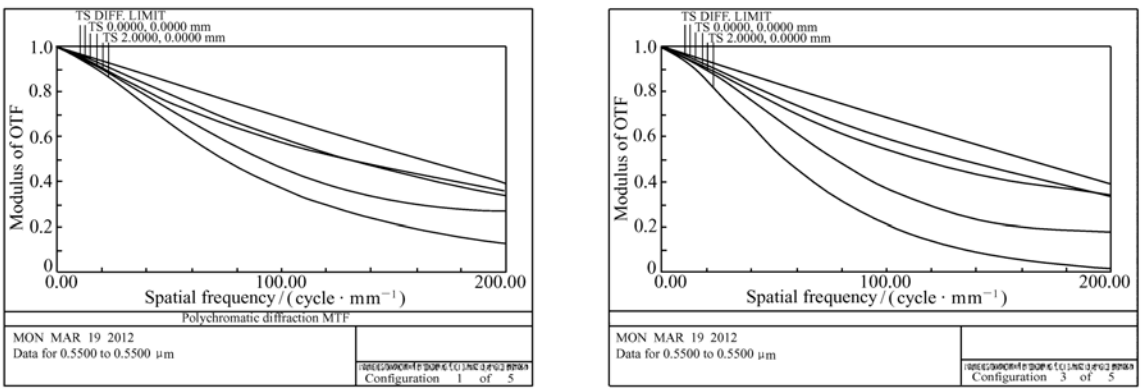


(a) 直视
(a) 0° rotation of eyeball

(b) 转动20°
(b) 20° rotation of eyeball

图1 被试眼1镜-眼系统MTF

Fig. 1 MTF for tested eye #1

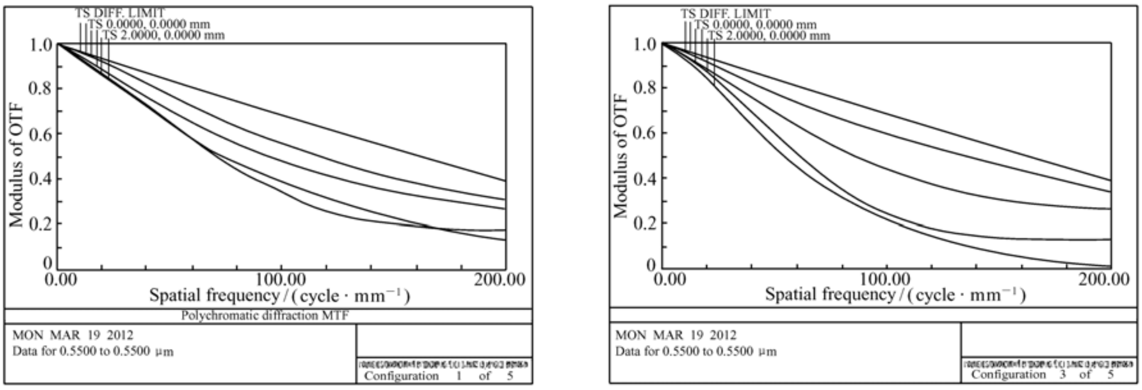


(a) 直视
(a) 0° rotation of eyeball

(b) 转动20°
(b) 20° rotation of eyeball

图2 被试眼3镜-眼系统MTF

Fig. 2 MTF for tested eye #3



(a) 直视
(a) 0° rotation of eyeball

(b) 转动20°
(b) 20° rotation of eyeball

图 3　被试眼 4 镜-眼系统 MTF

Fig. 3　MTF for tested eye #4

和 7°视场(TS 2.000 0,0.000 0 mm)的 MTF,其中,T 表示子午方向,S 表示弧矢方向。

第一类镜-眼系统为被试眼 1,2 和 10。图 1 给出了被试眼 1 镜-眼系统的 MTF。由表 4 和图 1 可以看出,经过本文设计的球-柱镜片的矫正,被试眼在直视 0°和 7°视场的成像质量均较为理想,0°视场的 MTF 几乎接近于衍射极限,在空间频率 125 cycle/mm 处其 MTF 值均在 0.49 以上,150 cycle/mm处其 MTF 值均在 0.43 以上,对于 7°视场,在空间频率 125 cycle/mm 处其 MTF 值均在 0.37 以上,150 cycle/mm 处其 MTF 值均在 0.31 以上;第二类镜-眼系统为被试眼 3,7 和 9,图 2 给出了被试眼 3 镜-眼系统的 MTF。在直视 0°视场的MTF也可达到较高水平且接近于衍射极限,在空间频率 125 cycle/mm 处其 MTF 值均在 0.49 以上,150 cycle/mm 处其 MTF 值均在 0.42 以上,直视 7°视场的 MTF 数值略低,在空间频率 125 cycle/mm 处 MTF 值均在 0.25 以上,150 cycle/mm处其 MTF 值均在 0.21 以上;第三类镜-眼系统为被试眼 4,5,6 和 8,图 3 给出了被试眼 4 镜-眼系统的 MTF。无论直视 0°视场还是 7°视场的像差均未被球-柱镜矫正完全,对于 0°视场,在空间频率 150 cycle/mm 处,MTF 最高值为被试眼 4 的 0.38,最低值为被试眼 8 的 0.31;对于 7°视场,在空间频率 150 cycle/mm 处,MTF 最高值为被试眼 6 的 0.23,最低值为被试眼 8 的 0.17。同时计算结果表明,10 只被试眼在转动 20°情形下的0°视场成像相比于直视的情况均略

表 5　10 只被试眼的像差 RMS 值

Tab. 5　Deformation RMS values for ten tested eyes　　(μm)

序号	Hi RMS	As RMS	CT RMS	Sph RMS
1	0.033 2	0.128 5	0.023 8	0.002 0
2	0.031 1	0.165 8	0.027 1	0.012 4
3	0.037 5	0.293 6	0.026 5	0.016 9
4	0.054 8	0.091 0	0.046 3	0.022 1
5	0.052 2	0.377 0	0.039 7	0.030 5
6	0.049 0	0.089 3	0.032 0	0.035 2
7	0.038 6	0.036 0	0.032 4	0.013 0
8	0.078 5	0.205 1	0.076 4	0.005 5
9	0.041 2	0.232 0	0.039 5	0.010 4
10	0.031 3	0.226 8	0.025 3	0.015 3

有下降,而7°视场的成像质量相比于直视情况的下降则更为明显。

为了分析矫正效果差异的原因,表5列出了10只被试眼在瞳孔直径为3.4 mm时波前像差的RMS数值,其中,Hi RMS表示$C_6 \sim C_{27}$项高阶像差的RMS值,As RMS表示C_3和C_5项像散的RMS值,CT RMS表示$C_6 \sim C_9$项彗差和三叶草类像差的RMS值,Sph RMS表示C_{12}项球差的RMS值。分别由下式计算得到:

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\sum (C_m)^2}\ , \tag{7}$$

式中,C_m为用Zernike多项式表示的波前像差的系数,单位为μm。

由表5中像差的RMS数据可见,8号眼的高阶像差最大,为0.078 5 μm,2号眼的最小,为0.031 1 μm;5号眼的像散最大,为0.377 0 μm,7号眼的最小,为0.036 0 μm;8号眼的彗差-三叶草类像差最大,为0.076 4 μm,1号眼的最小,为0.023 8 μm;6号眼的球差最大,为0.035 2 μm,1号眼的最小,为0.002 0 μm。

结合表5和图1~3可见,对于高阶像差较低,且像散值也不是很高的被试眼,如1,2,3,7,9和10号眼,本文设计的球-柱型镜片的矫正是较为有效的;对于高阶像差较高,尤其是彗差三叶草类像差以及球差在其中占较高比例的被试眼,比如4,5,6和8号眼,球-柱型镜片对其矫正不够充分,需要进一步借助其它面型消除高阶像差的影响。

根据对所测量的50只人眼波前像差建模研究发现,明视觉下,36只眼经过本文设计的球-柱型镜片矫正后成像质量得到了明显改善,球-柱矫正对14只眼的视觉质量不能完全改善,需要进一步借助其它面型镜片的矫正。

5 结 论

本文提出了基于个体化眼光学结构设计波前眼镜的新方法,由该方法给出的验光配镜处方结果可信。设计计算结果表明,用该方法给出的球柱面镜均能达到1.25的矫正视力,但是如果人眼的高阶像差较高,尤其是彗差三叶草类像差以及球差在其中占较高比例时,球-柱型镜片对其矫正不够充分,需要进一步借助其它面型消除高阶像差的影响。由于此方法是建立在客观测量的波前像差基础上,不需受试者的主观参与,计算结果客观。另外,利用建眼模型的方式设计镜片,还可用于分析眼睛在不同视场以及转动视物情形下的成像情况,因此对于临床眼镜的验配具有视觉质量预测的参考价值。

参考文献:

[1] RUBIN M L. Spectacles:past, present and future[J]. *Surv Ophthalmol.*,1986,30(5):321-327.

[2] LIANG J Z,GRIMM H,GOELZ S,*et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*,1994,11(7):1949-1957.

[3] THIBOS L N,HONG X,BRANDLEY A. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations[J]. *J. Vis.*,2004,4(4):329-351.

[4] ATCHISON D A,SCOTT D H,CHARMAN W N. Hartmann-Shack technique and refraction across the horizontal visual field[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*,2003,20(6):965-973.

[5] SALMON T O,THIBOS L N. Videokeratoscope-line-of-sight misalignment and its effect on measurements of corneal and internal ocular aberrations[J]. *J. Opt. Soc . Am. A.*,2002,20(1):657-669.

[6] THIBOS L N,WHEELER W,HORNER D. Power vectors:an application of Fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error[J]. *Optom. Vis. Sci.*,1997,74(6):367-375.

[7] WILLIAM H S,JANET P. Clinical investigation into the vision performance provided by the zon spectacle lens system[J]. *Rev. Optom.*,2008,10(15):1-15.

[8] LIOU H,BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *J. Opt. Soc. Am.*,1997,14(8):1684-1695.

[9] GARNER L F,SMITH G. Changes in equivalent and gradient refractive index of the crystalline lens with accommodation

[J]. *Optom. Vis. Sci.*,1997,74(2):114-119.

[10] WANG W,WA ZH Q,WANG Y,*et al.*. Wave-front aberrations of cornea and crystalline lens[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2006,23(3):607-609.

[11] 瞿佳,姚进.眼镜学[M].北京:人民卫生出版社,2004:58-62.
QU J,YAO J. *Spectacles*[M]. Beijing:People's Medical Publishing House,2004:58-62.(in Chinese)

[12] GE J J,W ZH Q,WANG Y,*et al.*. Characteristics and new measurement method of NCSFs of individual color mechanisms of human vision[J]. *Chin. Phys. Lett.*,2010,27(5):054201(1-4).

[13] 王之江,顾培森.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社,2007:618-620.
WANG ZH J,GU P S. *Handbook for Practical Optical Techniques*[M]. Beijing:Chine Medicine Press,2007:618-620(in Chinese)

作者简介:李　蕊(1983—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事眼视光学等方面的研究。E-mail:lruislt@126.com
刘永基(1977—),女,河北昌黎人,讲师,主要从事眼视光学等方面的研究。E-mail:yjliu@nankai.edu.cn
王肇圻(1944—),男,山东牟平人,研究员,博士生导师,主要从事眼视光学、衍射光学和光学信息等方面的研究。E-mail:wangzq@nankai.edu.cn