



矫正眼高阶像差的非球面眼镜的设计方法

李蕊^{①②}, 王肇圻^{①②*}, 刘永基^{①②}, 母国光^{①②}

① 南开大学现代光学研究所, 天津 300071;

② 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071

* E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2011-10-08; 接受日期: 2011-12-19

国家自然科学基金(批准号: 60978068, 11104149)和天津市科技支撑计划重点项目(批准号: 10ZCKFGX18800)资助

摘要 针对人眼高阶像差的眼镜矫正问题, 提出了一种根据人眼波前像差数据的非球面眼镜的设计方法, 将眼球和镜片视为统一的镜-眼光学系统建模, 用光学设计的优化方法给出镜片的结构数据. 不同于传统的视力表验光标准, 本文的设计目标考虑了实际视物的 2 个特征: (1) 眼球视物须有一定的转动角度, 在戴镜的情况下设定为 $\pm 20^\circ$; (2) 视物时特别是注视屏幕显示时须有一个清晰成像的较大视场, 设定为 $\pm 7^\circ$. 建立个体眼模型作为镜-眼系统的基础, 首先改进 Liou 眼模型, 在晶状体前密接一个弯月镜; 然后将实际人眼的离焦量转移至弯月镜的前表面, 将像散和其他高阶像差转移至角膜前表面. 临床测量了 50 只人眼的波前像差, 建模分析发现: 明视觉下有 36 只眼在球-柱镜矫正后已达理想; 10 只眼在球-柱镜矫正后未达理想, 进一步的非球面矫正效果明显; 4 只眼在球-柱镜矫正后未达理想, 进一步非球面镜矫正也未有效果. 本文对其中典型的 6 只眼的像差特点进行了分析和镜片设计, 结果表明: 非球面矫正的效果取决于人眼像差的特征, 对于像散大和球差大的人眼, 非球面矫正有明显的效果, 矫正效果特别体现在大视场的 MTF 的大幅度提高上. 矫正效果最明显的一只眼, 在 40, 80, 100, 125 和 150 cycles/mm 空间频率处, MTF 值分别提高了 18.87%, 38.34%, 44.36%, 51.29% 和 57.32%.

关键词
眼波前像差
非球面镜
光学设计
视觉矫正

1 引言

眼镜是以矫正眼球的屈光不正而诞生的一种光学器件, 传统上眼镜的处方是由主观验光法给出矫正离焦和散光(像散)的球度和柱度^[1-3]. 由于人眼屈光系统的复杂性, 除了存在离焦和像散这样的低阶像差外, 还存在球差、彗差和其他各种非规则的高阶像差, 它们也是限制视力的重要因素. 随着眼波前像差测量技术^[4]的出现, 矫正眼高阶像差成为可能. 2007 年, Ophthonix 公司推出了 iZon 框架眼镜^[5], 它

通过对人眼波前像差的第 2~6 阶进行拟合, 得到镜片平面处矫正人眼屈光不正的最优球-柱镜度数, 获得了较传统眼镜更好的视觉效果. iZon 框架眼镜虽然引入了人眼波前像差技术, 但是它不考虑眼高阶像差诸如球差、彗差、高阶像散、三叶草等对视觉的影响. 然而已有的研究成果表明: 对于某些人眼, 高阶像差对视觉的影响是不能忽视的^[6]. 2002 年, 美国专利^[7]推出了一种矫正眼高阶像差的框架眼镜的设计思想: 基于测量的直视 0° 视场的波前像差数据, 在镜片中央 1° 视场区域内, 用自由曲面面型补偿眼高阶像差,

而其他区域有2种方案, 一是仍保持为球-柱面型, 二是针对眼球旋转不同角度, 确定不同的 MTF 目标值和加权重, 连同直视的情形, 用自由曲面型进行整个镜片的优化, 有权重地补偿各个角度的高阶像差. 这个设计思想的缺陷是: 第一种方案, 眼镜的中央区域和其他区域有光学不连续的衔接, 不可避免地产生视物时的断点; 另外高阶像差的矫正是根据 0° 视场的波前数据, 它对较大视场例如 $\pm 7^\circ$ 视场无效, 矫正了 0° 视场高阶像差的眼镜, 对于 $\pm 7^\circ$ 视场是失配的, 这不满足一个较大视场清晰成像的视物要求, 甚至带来严重的负面影响. 第二种方案, 虽然不存在两个区域不连续衔接的问题, 然而眼球各个旋转角度下波前像差的补偿, 仍然是根据 0° 视场的测量数据, 仍然不能解决包括较大视场的同时清晰成像的问题. 迄今没有关于此专利的实施或者具体矫正实例的报导.

在框架眼镜的设计中应该把眼球和眼镜看作是一个统一的光学系统, 这个系统有2个特点: 其一是直视时要有个视物清晰的视场, 一般情况下要求总视角为 $\pm 7^\circ$, 比如看影视或计算机屏幕时的情形. 其二是眼睛视物需要转动, 通常转动角度可以达到 $\pm 20^\circ$ 或稍大(由于眼肌的限制, 若角度更大, 人就会转动头部去注视), 由于眼镜是不转动的, 致使眼球转动时其光轴与眼镜片的光轴不再重合. 传统的球-柱眼镜的设计, 由于不考虑高阶像差的影响, 或者是高阶像差的影响很小, 人工验光给出的球柱度数, 虽然是基于直视 0° 视场的情况, 但是我们的研究表明, 这个矫正同样适合直视 $\pm 7^\circ$ 视场和眼球 $\pm 20^\circ$ 转动的情况. 然而对于高阶像差不能忽略的人眼, 情况就不同了, 适合于直视 0° 视场的球-柱矫正, 不能保证在较大视场下的清晰成像. 为了模拟人眼的视物和成像状态, 需要建立符合人眼实际生理解剖数据和光学特性的眼模型. 从1851年第一个眼模型^[8]的提出至今, 已有多种示意眼模型, 其中较为普遍应用的是采用4个球面折射面描述的Gullstrand-Le Grand眼模型^[9]和由4个非球面折射面和渐变折射率晶状体构成的Liou^[10]的眼模型, 而1997年提出的Liou的眼模型是公认的最为符合实际人眼光学特性的眼模型.

在框架眼镜的设计中, 非球面镜片已经走向市场. 迄今的非球面镜片, 都是以改善镜片自身的物理性能和光学性能为目的的. 文献[11]设计了在 $\pm 30^\circ$ 全视场内消镜片斜向像散等像差的非球面镜片. 文献

[12]将非球面镜片的相对畸变、像散、光顺性和减薄量等因素列入到优化设计中. 专利CN1412604A^[13]用非球面设计了一种基弧屈光力较小的镜片, 镜片厚度明显减薄且镜片的边缘光学性能得到了改善. 上述文献中的非球面镜片设计, 均未涉及针对个体人眼高阶像差的矫正问题.

本文测量了50只人眼的波前像差, 首先对高阶像差的影响进行了统计分析, 选择出球-柱镜矫正之后, 尚需要更进一步矫正的测试眼. 然后进行个体人眼建模和非球面镜片优化设计, 基于Liou的模型眼, 结合测量的人眼波前像差数据, 将离焦引入至晶状体, 散光和高阶像差引入至角膜, 建立起个体眼模型; 把眼球和眼镜片看作是一个整体光学系统, 并考虑人眼的转动和清晰视物的视场要求, 进行非球面眼镜的优化设计, 以消除个体眼高阶像差的影响, 提高视力矫正的水平.

2 实验方法

本文采用光学设计软件ZEMAX进行眼光学系统的构建和优化, 波长设定为人眼最为敏感的550 nm. 近视眼根据解剖特性分为轴性近视和屈光性近视, 后者中的曲率性近视更为常见, 大多数是由晶状体调节过度所形成的, 本文选用的6只眼, 均属于轴性近视和屈光性近视同时存在的情形, 并且以屈光性近视为主. 因此在建个体眼模型时, 我们把实际人眼的离焦量转移至晶状体前表面.

2.1 个体眼模型的建立

Liou的模型眼是根据实际获取的高精度的眼球生理结构参数建立起来的, 在结构和光学特性上与生理眼球具有较高的相似性. 然而我们在模拟中发现, 其晶状体在调焦时曲率半径变化过大, 不符合实际人眼的情况. 而Gullstrand-Le Grand模型眼的晶状体在调焦时曲率半径的变化符合实际人眼的情况^[14,15].

综合考虑Liou和Gullstrand-Le Grand模型眼的特性, 我们在Liou的模型眼结构的基础上, 在晶状体前表面处加设一片弯月薄透镜, 对于在Liou的模型眼结构的基础上, 在晶状体前表面处加设一片弯月薄透镜, 对于正常人眼, 其前后表面的曲率半径及二次曲面常数取Liou模型眼晶状体前表面的相应参数, 而折射率采用Gullstrand-Le Grand模型眼中晶状

体折射率数值. 经过验证, 与 Liou 模型眼相比, 此薄透镜的加入并未改变整个眼模型的像差. 基本眼模型构建完成后, 对应于每只眼的离焦量即是通过优化此弯月薄透镜前表面的曲率半径实现的. 将眼模型的瞳孔直径选定为 3.4 mm, 通过优化眼轴长度使得此眼模型聚焦良好. 图 1 为这种基本眼模型的结构示意图, 表 1 列出了其结构参数, 表中的 Grad 表示晶状体的折射率为梯度折射率^[10], 将其分为前后两部分, 前半部分用 GradA 表示, 后半部分用 GradP 表示, 两部分间以虚拟面分隔. 其折射率表达式相同, 为:

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

其中, r 为沿径向的距离, z 为沿光轴的距离. GradA 中 $n_0=1.368$, $n_{r2}=-0.001978$, $n_{z1}=0.049057$, $n_{z2}=-0.015427$; GradP 中 $n_0=1.407$, $n_{r2}=-0.001978$, $n_{z1}=0$, $n_{z2}=-0.006605$.

构建个体眼模型的主要思路是在上述基本眼模型的初始结构基础上, 引入对应于不同人眼的波前像差数据的角膜面型以及晶状体前表面的曲率半径. 由波前像差仪测量人眼的实际像差, 由于其给出的是 6~7 mm 瞳径下的像差数据, 因此需要用

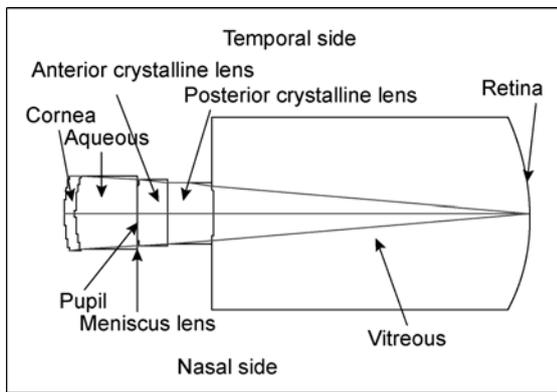


图 1 基本眼模型的结构

表 1 基本眼模型结构参数

Surface	Radius (mm)	Conic constant	Thickness (mm)	Refractive index (550 nm)	Abbe number
Cornea	7.77	-0.18	0.50	1.376	61.7
Aqueous	6.40	-0.60	3.16	1.336	55.1
Pupil	Infinity	0	0	1.336	55.1
Meniscus lens	12.40	-0.94	1×10^{-6}	1.420	49.8
Aqueous	12.40	-0.94	0	1.336	55.1
Anterior crystalline lens	12.40	-0.94	1.59	GradA	60.3
Posterior crystalline lens	Infinity	-	2.43	GradP	~66.8
Vitreous	-8.10	+0.96	16.19	1.336	55.1
Retina	-12.0	0	-	-	-

MATLAB 编程将测得的像差数据转换为 3.4 mm 瞳径下对应的像差数据, 然后将像差数据输入到眼模型的优化函数“ZERN”中作为目标值进行建模设计. 首先优化晶状体前表面处的弯月镜的曲率半径, 使得整个眼模型的离焦与实际像差数据中的离焦相符合. 然后将眼的像散和其他高阶像差数据转移到角膜前表面上, 即用 ZEMAX 中的 Zernike Fringe Sag 面型来表示角膜的前表面, 对其形状进行优化, 使系统的每一项 Zernike 多项式的像差与优化函数中的目标值 (3.4 mm 瞳径时人眼的波前像差数值) 一致, 评价函数收敛至目标值后角膜形状被确定. 这里把实际人眼的像散和其他高阶像差转移到角膜前表面, 是基于我们前期对人眼波前像差特性研究的统计结果^[16]. 角膜是人眼屈光系统的最主要组分, 角膜前表面承担了全眼屈光度的三分之二以上, 而全眼的像散和其他高阶像差的 80% 以上来源于角膜前表面. Zernike Fringe Sag 面型表示为^[17]:

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

式中, x, y 表示坐标系, z 代表沿光轴方向, z_0 是常数, c_{cor} 是角膜前表面基准球面的曲率 (mm^{-1}), 求和项中 $Z_i(x, y)$ 代表 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. 优化过程中, 我们采用 ZEMAX 软件自带的评价函数, 未添加外部扩展程序, 优化之前设定变量、操作数的目标值以及相应的权重, 经 ZEMAX 的“Automatic”迭代后, 优化函数收敛至目标值.

2.2 非球面波前眼镜的设计

本文所指的非球面是能够用含有非球面系数的高次多项式来表示的面型. 眼镜的前表面设计为非球面, 后表面设计为环曲面, 环曲面的作用是同时矫

正离焦和散光. 镜片的中心厚度取值 2 mm, 光学区直径为 30 mm, 材料为树脂. 一般树脂镜片的折射率在 1.49~1.74 之间, 本文选取镜片折射率为 1.60, 阿贝数 36. 非球面采用 ZEMAX 中的偶次非球面型 (Even Asphere), 表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} + a_4r^4 + a_6r^6 + a_8r^8 + a_{10}r^{10} + a_{12}r^{12} + a_{14}r^{14} + a_{16}r^{16}, \quad (3)$$

式中, z 为表面某处的矢高, c 表示非球面顶点的曲率, $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 表示离开光轴的径向距离, $a^4, a^6, a^8, a^{10}, a^{12}, a^{14}, a^{16}$ 为非球面高次项系数. 相比于(2)式, (3)式表示的面型是由中心到边缘曲率半径连续变化的, 具有旋转对称性. 环曲面采用 ZEMAX 中的复合曲面型 (Biconic), 表达式为^[17, 18]:

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)c_x^2 x^2 - (1 + k_y)c_y^2 y^2}}, \quad (4)$$

式中, c_x, c_y 分别是 x, y 方向的基准球面曲率, k_x, k_y 分别是 x, y 方向的锥面度, 设计中将其取值为 0.

设计过程如下.

1) 在个体眼模型的基础上建立眼镜片光学系统. 由文献[1], 为获得最佳矫正视力, 镜片的后顶点距离应尽量小, 约为 12~14 mm, 以不触及睫毛为限, 本文取为 13 mm. 瞳孔直径设置为 3.4 mm, 对应于明视觉条件.

2) 将镜片前表面设置为球面面型, 并为其选择一定屈光力的基弧作为镜片前表面的顶点曲率, 后表面设置为环曲面面型, 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)设为优化变量, 为被试眼在直视 0°视场下设计球-柱型镜片进行矫正. 此情况对应于传统镜片的矫正.

3) 为考虑眼球在视物时的转动因素, 将镜-眼系

统设置为多重结构^[19], 即设置眼球分别在水平和垂直方向转动 -20°, -10°, 0°, 10°和 20°九个子结构. 转动中心设置在眼镜片后顶点 27 mm 处. 为保证眼睛在每一转动角度下的一定视场范围内能够清晰视物, 我们在每一结构下设置 0°和 ±7°两个视场. 图 2 给出了眼球在 x 方向旋转的镜-眼光学系统的结构示意图, 这里仅示出直视、转动 10°和 20°的情形, 其他情况与此类似.

4) 将镜片前表面设置为非球面面型, 将 $a_4 \sim a_{16}$ 的非球面高次项系数设置为变量, 用于矫正以像散和球差为主的像差^[11], 在优化函数中, 对每一结构的每一视场分配权重, 合理加大直视结构下的权重, 以及每一结构下 0°视场的权重, 对整个系统进行优化. 实际上, 设置非球面高次项为 $a_4 \sim a_{12}$ 的优化结果也能满意, MTF 曲线并无明显的改变.

5) 优化完毕, 得到成像质量良好的镜-眼光学系统, 符合个体眼视物特征的非球面波前眼镜的结构参数即被确定.

3 实验结果

随机选取了 50 只近视眼的实测波前像差数据进行分析, 在瞳孔直径为 3.4 mm 时, 离焦屈光范围为 -1 D 至 -8 D, 散光范围为 -0.2 D 至 -2 D. 经过在 ZEMAX 中建模分析发现, 其中 36 只眼用球-柱镜进行矫正即能达到良好的视觉效果, 无需非球面镜片的进一步矫正; 10 只眼球-柱矫正尚未达到理想, 经过非球面镜片进一步矫正后, 其成像质量得到明显改善; 有 4 只眼, 由于其彗差、三叶草类的高阶像差占总像差比重较大, 球-柱矫正未达到理想, 进一步的非球面镜片矫正也未得到改善. 鉴于篇幅有限, 本文仅选取其中的 6 只眼进行详细的分析. 这 6 只眼在

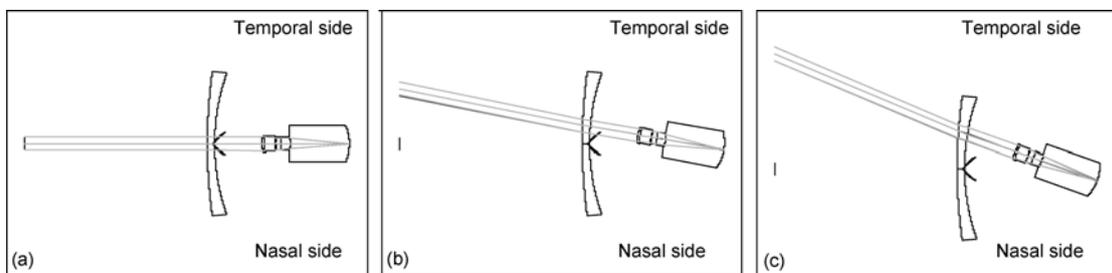


图 2 镜-眼系统的直视和转动的结构示意图
(a) 直视; (b) 转动 10°; (c) 转动 20°

瞳孔直径为 3.4 mm 时的前几项 Zernike 波前像差数据如表 2 所示. 其中, C_3 和 C_5 分别是倾斜像散和 45° 像散, C_4 是离焦, C_6 和 C_9 分别是倾斜三叶草和水平三叶草, C_7 和 C_8 分别是垂直彗差和水平彗差, C_{10} 和 C_{14} 分别是倾斜四叶草和四叶草, C_{11} 和 C_{13} 分别是倾斜二阶像散和 45° 二阶像散, C_{12} 是球差. C_0 , C_1 和 C_2 项分别是常数项和倾斜项, 未在此表中列出.

将波前像差数据输入至基本眼模型中(其结构参数见表 1), 先优化密接晶状体前表面的弯月镜的曲率半径, 再优化用 Zernike Fringe Sag 形式表示的角膜面型, 从而将眼波前像差中的离焦转移到晶状体(弯月镜), 像散和其他高阶像差转移到角膜, 从而得到个体眼模型, 其晶状体以及角膜的结构参数列于表 3. 本研究采用的 Zernike 系数为 29 项, 这里仅示出 $A_4 \sim A_{13}$ 项.

由设计方法中的步骤(2), 结合眼睛的波前像差数据优化得到被试眼在直视 0° 视场下的球-柱镜片结

构, 即为传统眼镜的情况. 由其结构可计算出镜片屈光度, 即已知环曲面两正交方向的曲率半径 R_1 和 R_2 , 可由下式得到屈光度:

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

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

式中, P_1 和 P_2 分别表示相应方向的屈光度, 单位为 diopter, D, 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. 将 P_1 定为球度 $P_s(\text{Sphere})$, 这样柱度 $P_c(\text{Cylinder})$ 即为: $P_2 - P_1$ ^[1]. 6 只眼的球-柱镜片屈光度列于表 4, 表中的 Axis 表示散光轴位角, 由 ZEMAX 中环曲面绕光轴旋转的角度给出.

在直视 0° 视场情况下, 用球-柱镜矫正后, 加上

表 2 6 只眼的波前像差数据

Unit (μm)	Eye number						
	1	2	3	4	5	6	
Zernike coefficients	C_3	-0.0785	0.1493	-0.0079	-0.1690	0.2753	0.1061
	C_4	3.4569	3.4516	2.8870	3.7770	2.2534	2.6140
	C_5	-0.1113	-0.1406	-0.6787	-0.4930	-0.4364	-0.3618
	C_6	0.0007	0.0485	0.0324	-0.0055	0.0327	-0.0265
	C_7	0.0222	-0.0278	0.0224	0.0237	0.0145	0.0060
	C_8	-0.0076	0.0375	-0.0110	-0.0132	-0.0343	-0.0236
	C_9	0.0295	0.0362	-0.0258	0.0040	-0.0270	-0.0169
	C_{10}	0.0038	0.0073	-0.0067	0.0064	-0.0143	-0.0090
	C_{11}	0.0026	-0.0007	0.0034	0.0053	-0.0076	-0.0006
	C_{12}	0.0107	0.0055	0.0187	0.0110	0.0229	0.0305
	C_{13}	-0.0048	-0.0094	0.0015	0.0021	0.0036	-0.0013
	C_{14}	0.0085	0.0121	-0.0036	-0.0039	-0.0083	-0.0109

表 3 个体眼模型的相关结构参数

Unit (mm)	Eye number						
	1	2	3	4	5	6	
Crystalline lens radius	5.57	5.57	6.13	5.29	6.90	6.44	
Corneal zernike coefficients ($\times 10^{-4}$)	A_4	0.02	0.0066	-0.02	0.0032	0.0038	0.04
	A_5	-7.27	-9.20	-44.28	-32.17	-28.47	-23.60
	A_6	-5.11	9.74	-0.51	-11.01	17.94	6.92
	A_7	-0.58	2.85	-0.85	-1.00	-2.61	-1.80
	A_8	1.69	-2.11	1.70	1.79	1.11	0.45
	A_9	0.80	0.49	1.05	0.97	1.05	1.65
	A_{10}	2.23	2.74	-1.96	0.30	-2.05	-1.28
	A_{11}	0.06	3.66	2.46	-0.41	2.48	-1.99
	A_{12}	-0.45	-0.84	-0.09	0.02	0.17	-0.22
	A_{13}	0.20	-0.01	0.29	0.39	-0.56	-0.02

眼球转动多重结构, 并在每一结构下加上 $\pm 7^\circ$ 视场, 而后按设计过程(4)进行被试眼的非球面镜片矫正. 表 5 列出了 1~6 号眼非球面镜片的结构参数.

非球面镜片的设计效果, 可从镜-眼系统的 MTF 特性曲线上比较直观地评判. 图 3~6 给出了 6 只眼中具有典型意义的 4 只眼, 1 号、2 号、4 号和 6 号眼, 非

表 4 直视 0° 视场时 6 只被试眼的镜片屈光度数

	Eye number					
	1	2	3	4	5	6
P_s (D)	-6.90	-6.80	-4.79	-7.01	-3.67	-4.64
P_c (D)	-0.41	-0.60	-2.06	-1.69	-1.55	-1.16
Axis ($^\circ$)	19.39	155.94	0.09	9.74	163.46	171.43

表 5 被试眼 1~6 非球面镜片的结构参数

	1	2	3	4	5	6
P_{base}	3.00 D	3.00 D	4.00 D	3.00 D	4.50 D	4.00 D
P_s	-6.95 D	-6.80 D	-4.83 D	-7.08 D	-3.63 D	-4.68 D
P_c	-0.32 D	-0.52 D	-1.96 D	-1.57 D	-1.50 D	-1.05 D
Axis	25.84°	153.87°	0.56°	10.37°	162.58°	170.85°
a_4	-1.82×10^{-7}	-3.00×10^{-6}	-3.00×10^{-6}	-5.21×10^{-7}	-6.00×10^{-6}	-7.00×10^{-6}
a_6	-2.69×10^{-9}	6.29×10^{-8}	6.77×10^{-8}	1.50×10^{-9}	2.01×10^{-7}	3.08×10^{-7}
a_8	-5.20×10^{-12}	6.73×10^{-10}	-5.41×10^{-10}	-1.97×10^{-11}	-2.91×10^{-9}	-6.38×10^{-9}
a_{10}	1.06×10^{-13}	-3.84×10^{-11}	2.45×10^{-13}	5.02×10^{-14}	1.78×10^{-11}	6.98×10^{-11}
a_{12}	7.37×10^{-16}	4.90×10^{-13}	9.75×10^{-15}	9.59×10^{-16}	-8.68×10^{-15}	-4.14×10^{-13}
a_{14}	9.21×10^{-19}	-2.64×10^{-15}	2.56×10^{-17}	6.74×10^{-19}	-3.46×10^{-16}	1.25×10^{-15}
a_{16}	-3.29×10^{-20}	5.26×10^{-18}	-2.60×10^{-19}	-2.79×10^{-20}	1.03×10^{-18}	-1.50×10^{-18}

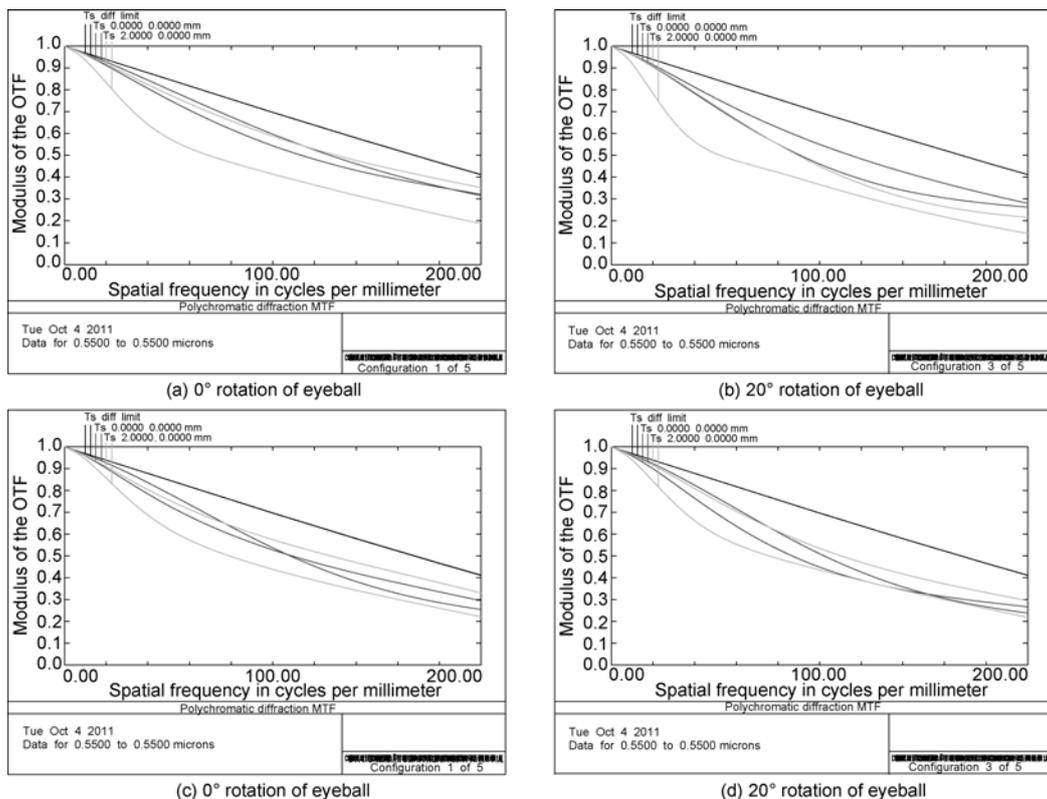


图 3 被试眼 1 的镜片矫正结果, (a)~(b): 球-柱镜; (c)~(d): 球-柱镜+非球面镜

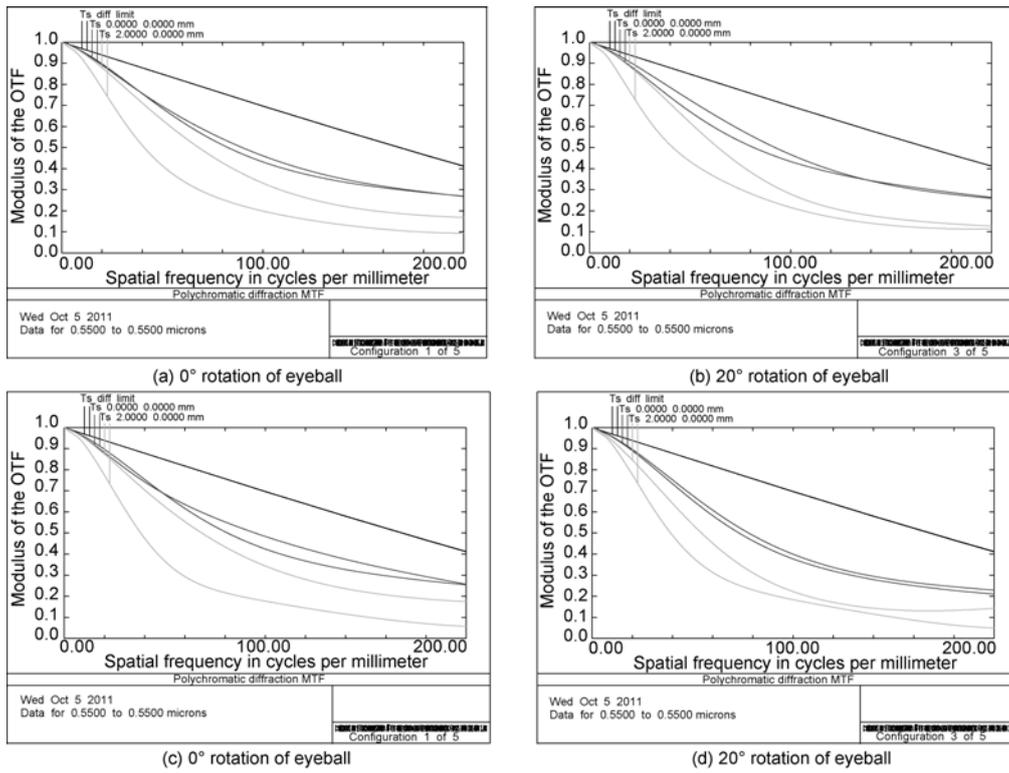


图4 被试眼2的镜片矫正结果, (a)~(b): 球-柱镜; (c)~(d): 球-柱镜+非球面镜

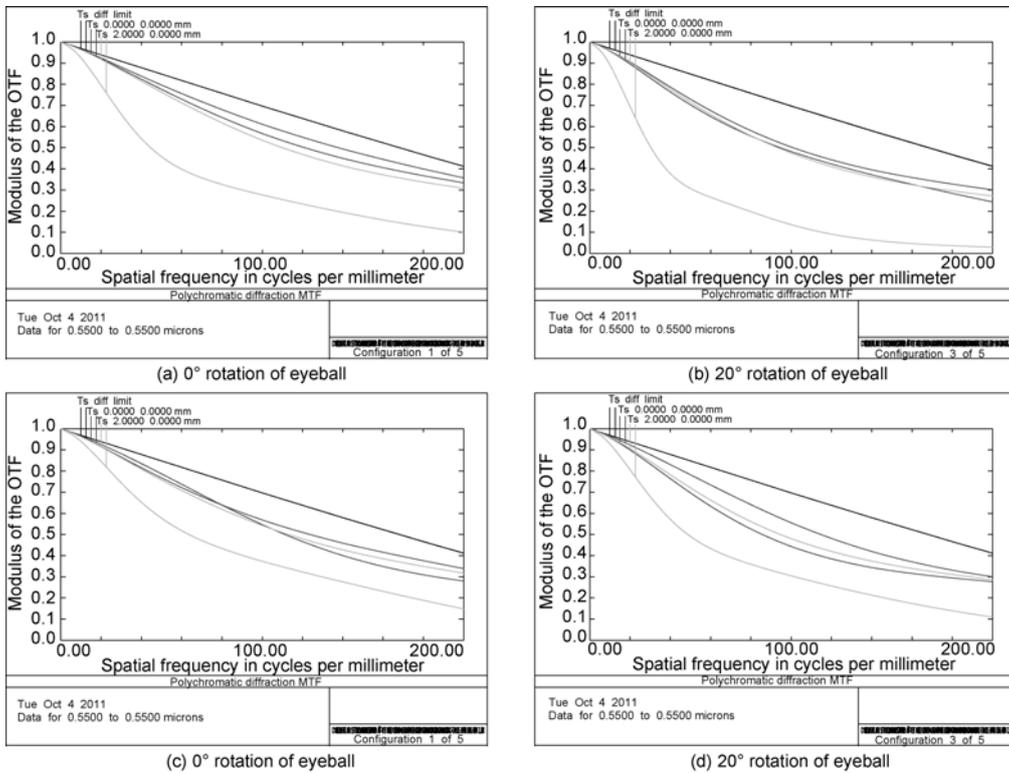


图5 被试眼4的镜片矫正结果, (a)~(b): 球-柱镜; (c)~(d): 球-柱镜+非球面镜

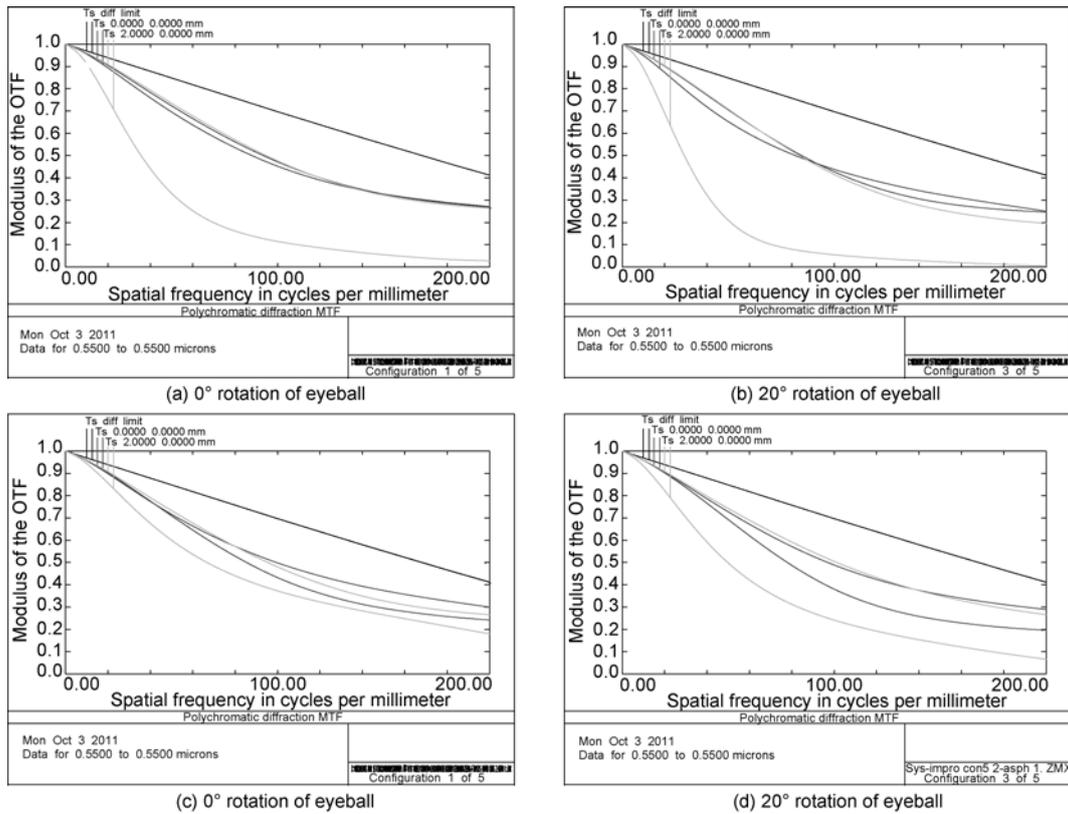


图 6 被试眼 6 的镜片矫正结果, (a)~(c): 球-柱镜; (d)~(f): 球-柱镜+非球面镜

球面镜片矫正前后的 MTF 曲线, 图中蓝色曲线表示 0°视场, 绿色曲线表示 7°视场, T 表示子午方向, S 表示弧矢方向. 其中(a)~(b)为非球面矫正前的情形, (a)为直视的情形, (b)为转动 20°的情形. (c)~(d) 为非球面矫正后的 MTF, (c)为直视的情形, (d) 为转动 20°的情形. 可以看出, 被试眼 1 经球-柱矫正即能达到很好的成像质量, 无需进一步的非球面矫正. 被试眼 2 经球-柱矫正未能达到理想, 进一步的非球面矫正也未能取得明显的改观. 被试眼 4 和 6 经球-柱矫正均未能达到理想, 而进一步的非球面矫正后, MTF 改善明显, 特别是 7°视场下 MTF 有较大的提升.

为了数值上说明非球面矫正的效果, 表 6 和 7 列出了被试眼在仅球-柱矫正和球-柱矫正+非球面矫正后, 5 个典型的频率下的 MTF 数值(子午和弧矢方向 MTF 的平均值), 表 6 是直视 0°视场下的情形, 表 7 是直视 7°视场下的情形. 在前期的研究中, 我们对人眼的空间像调制度(AIM)或神经对比敏感度函数(NCSF)进行了临床测量, 给出了有统计意义的结果^[20, 21]. AIM 曲线与 MTF 曲线的交点对应于人眼的

视锐度(VA). 对于正常人眼, 空间频率 125 cycles/mm 处, 对应视锐度 1.25, 此时 AIM 值为 0.27; 空间频率 150 cycles/mm 处, 对应视锐度 1.5, 此时 AIM 值为 0.35. 直视 0°视场和 7°视场 MTF 对应的视锐度可以给出非球面矫正效果的定量表达. 从表 7 可以看出, 被试眼 3, 4, 5, 6 经非球面矫正后, 直视 7°视场的 MTF 有较大的改善. 对应于空间频率 40, 80, 100, 125 和 150 cycles/mm, 被试眼 3 的 MTF 分别提高了 12.43%, 32.14%, 41.77%, 53.74%和 62.53%; 被试眼 4 的 MTF 分别提高了 7.68%, 11.57%, 12.76%, 14.71%和 16.10%; 被试眼 5 的 MTF 分别提高了 7.39%, 8.72%, 14.11%, 22.77%和 30.52%; 被试眼 6 的 MTF 分别提高了 18.87%, 38.34%, 44.36%, 51.29%和 57.32%. 非球面矫正后, 7°视场下, 被试眼 3 的视锐度接近 1.25, 而被试眼 4, 5, 6 均超过 1.25. 0°视场下, 无论是仅球-柱矫正, 还是进一步的非球面矫正, 都能达到或接近 1.5 的视锐度.

另外, 根据镜-眼系统点斑的 RMS 值, 可以计算得到相应的屈光度数. 根据点斑和轴向离焦的关联, 以

表6 直视0°视场下镜-眼系统的MTF值

Eye number	Spectacle type	Spatial frequency (cycles/mm)				
		40	80	100	125	150
1	Sphero-cylindrical	0.8256	0.6476	0.5704	0.4885	0.4210
	Aspheric	0.8101	0.6154	0.5325	0.4459	0.3763
2	Sphero-cylindrical	0.7565	0.5268	0.4464	0.3751	0.3272
	Aspheric	0.7482	0.5292	0.4539	0.3841	0.3319
3	Sphero-cylindrical	0.7951	0.5817	0.4933	0.4034	0.3356
	Aspheric	0.7888	0.5668	0.4781	0.3912	0.3269
4	Sphero-cylindrical	0.8310	0.6616	0.5890	0.5121	0.4477
	Aspheric	0.8255	0.6393	0.5578	0.4728	0.4051
5	Sphero-cylindrical	0.7657	0.5447	0.4595	0.3780	0.3203
	Aspheric	0.7498	0.5353	0.4605	0.3904	0.3384
6	Sphero-cylindrical	0.7709	0.5481	0.4619	0.3814	0.3273
	Aspheric	0.7746	0.5502	0.4651	0.3873	0.3344

表7 直视7°视场下镜-眼系统的MTF值

Eye number	Spectacle type	Spatial frequency (cycles/mm)				
		40	80	100	125	150
1	Sphero-cylindrical	0.7332	0.5626	0.5009	0.4335	0.3738
	Aspheric	0.7456	0.5679	0.5067	0.4422	0.3844
2	Sphero-cylindrical	0.6113	0.3405	0.2651	0.2032	0.1645
	Aspheric	0.5895	0.3256	0.2604	0.2019	0.1610
3	Sphero-cylindrical	0.6354	0.3311	0.2377	0.1576	0.1089
	Aspheric	0.7144	0.4375	0.3370	0.2423	0.1770
4	Sphero-cylindrical	0.6786	0.4720	0.4061	0.3385	0.2838
	Aspheric	0.7307	0.5266	0.4579	0.3883	0.3295
5	Sphero-cylindrical	0.6143	0.3912	0.3069	0.2271	0.1730
	Aspheric	0.6597	0.4253	0.3502	0.2788	0.2258
6	Sphero-cylindrical	0.6168	0.3657	0.2953	0.2322	0.1884
	Aspheric	0.7332	0.5059	0.4263	0.3513	0.2964

及牛顿公式, 点斑对应的屈光度 F_p (单位: diopter, D) 为:

$$F_p = -\frac{2r}{(d+2r)f}, \quad (7)$$

式中, r 表示点斑的 RMS 半径, f 表示系统的物方焦距, d 表示系统通光孔径的直径, 单位均为 m. 表 8 列出了被试 6 只眼, 经非球面矫正后, 在直视 0° 和 7° 视场下点斑的 RMS 值和相应的屈光度数. 可以看出, 即使是 7° 视场下, 被试眼 3, 4, 5, 6 的点斑均在 0.25D 以下, 这是通常配镜的标准精度.

4 分析和讨论

那么, 是什么原因使得非球面镜片对不同被试眼的矫正效果不同? 为了回答这个问题, 我们具体分析和比较了 6 只被试眼的像差特点. 图 7 给出了 6 只被试眼的 $C_3, C_5, C_7, C_8, C_6, C_9, C_{12}$ 项的 RMS 图示, 其中 astigmatism 1, 2 分别表示 C_3, C_5 ; coma 1, 2 分别

表示 C_7, C_8 ; trefoil 1, 2 分别表示 C_6, C_9 ; sphere 表示 C_{12} , 不同颜色代表不同的个体眼. 表 9 列出了 6 只眼波前像差的 RMS 值, Hi RMS 表示 C_6 ~ 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 ~ 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. RMS 值由下式计算得到:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum (C_m)^2}, \quad (8)$$

式中, C_m 为用 Zernike 多项式表示的波前像差的每一项的系数, 单位为 μm . 结合图 7 和表 9, 我们把 6 只被试眼的像差特点分为 5 种情况.

1) 高阶像差较小, 像散也较小的眼睛, 如 1 号眼. 其像散的 RMS 为 $0.1362 \mu\text{m}$, 在 6 只被试眼中为最小; 高阶像差 RMS 为 $0.0407 \mu\text{m}$, 仅比 4 号眼的稍大. 对比图 3(a)~(b) 和图 3 (c)~(d) 可知, 此眼用球-柱镜矫正已能达到较好的成像, 非球面矫正并无必要.

表 8 非球面镜-眼系统的 RMS 半径和等效屈光度直视

		Eye number					
		1	2	3	4	5	6
RMS (μm)	0° field	4.134	6.285	4.624	3.829	6.184	5.309
	7° field	6.848	11.084	5.830	6.465	6.983	6.042
F_p (D)	0° field	-0.1465	-0.2226	-0.1638	-0.1357	-0.2190	-0.1880
	7° field	-0.2424	-0.3919	-0.2065	-0.2289	-0.2472	-0.2140

表 9 高阶像差和总像差的 RMS 值

Eye number	1	2	3	4	5	6
Hi RMS	0.0407	0.0785	0.0526	0.0315	0.0637	0.0522
As RMS	0.1362	0.2051	0.6788	0.5212	0.5160	0.3770
CT RMS	0.0378	0.0764	0.0484	0.0280	0.0565	0.0397
Sph RMS	0.0107	0.0055	0.0187	0.0110	0.0229	0.0305

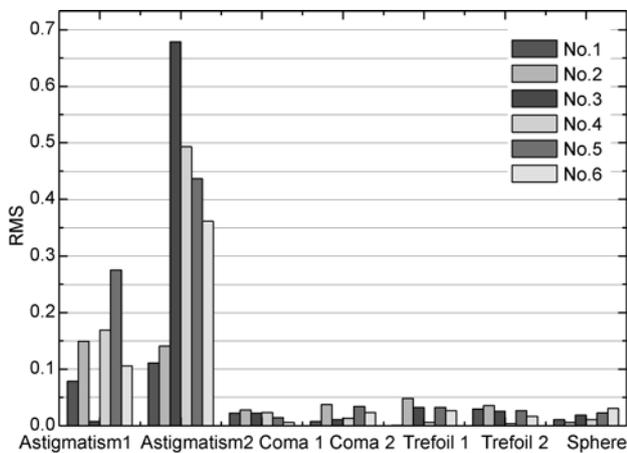


图 7 各项 Zernike 像差的 RMS 值

2) 高阶像差较小, 但像散较大的眼睛, 如 4 号眼. 其像散 RMS 为 $0.5212 \mu\text{m}$, 仅小于 3 号眼; 高阶像差 RMS 为 $0.0315 \mu\text{m}$, 在 6 只眼中为最小值. 对比图 5(a)~(b)和图 5(c)~(d)可知, 此眼球-柱镜矫正后, 直视 $\pm 7^\circ$ 视场的 MTF 仍较低, 需要做进一步的矫正, 借助非球面技术, 可以得到优良的矫正效果.

3) 高阶像差中彗差和三叶草类的像差较高的情况, 如 2 号眼. 其像散的 RMS 仅比 1 号眼稍大, 为 $0.2051 \mu\text{m}$; 而高阶像差的 RMS 值为 $0.0785 \mu\text{m}$, 是 6 只眼中最大值, 特别是其中彗差和三叶草类的 RMS 值为 $0.0764 \mu\text{m}$, 是高阶像差中的主要份额. 对比图 4(a)~(b)和图 4(c)~(d)可知, 此眼仅球-柱镜矫正的效果不理想, 而进一步的非球面矫正也没有取得明显的效果. 具有此类像差特点的眼可望用自由曲面面型进行矫正, 我们下一步的工作即是针对此问题展

开的.

4) 高阶像差较大, 像散值也较大的眼睛, 如 3, 5 号眼. 3 号眼像散的 RMS 为 $0.6788 \mu\text{m}$, 在 6 只眼中为最大值; 5 号眼像散的 RMS 为 $0.5160 \mu\text{m}$, 而与 4 号眼相当. 由表 6 和 7 中相应数据可知, 球-柱镜矫正后, 尚需非球面镜的进一步矫正, 而且非球面矫正有较好的效果.

5) 像散较大, 球差也较大, 如 6 号眼. 其像散的 RMS 为 $0.3770 \mu\text{m}$, 高阶像差中球差的 RMS 为 $0.0305 \mu\text{m}$, 在被试眼中为最大, 而彗差和三叶草类 RMS 为 $0.0397 \mu\text{m}$, 与 1 号眼相当. 为了分析球差对 MTF 的影响, 我们将该眼的球差设置为 0, 而后做球-柱矫正, 得到的 MTF 如图 8 所示. 比较相对应的图 6(a)可知: 消球差使得直视 0° 视场的 MTF 改善明显, 也使得 7° 视场弧矢方向的 MTF 明显提升. 对比图 6(a)~(b)和图 6(c)~(d)可知, 对此眼的非球面矫正有很

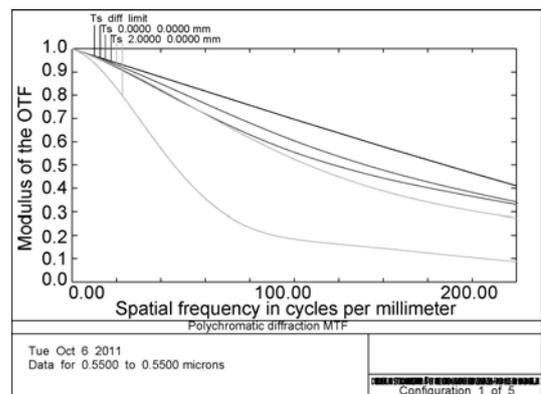


图 8 设定球差为 0 和球-柱矫正, 被试眼 6 镜-眼系统的 MTF

好的效果,表明:在一定程度上,非球面不仅可以消除像散所带来的影响,也可以消除球差所带来的影响。

5 结论

本文提出,在眼镜片的验配中,需要同时考虑眼球视物时的转动以及特定的清晰视物的视场范围,而后根据人眼实际的波前像差数据构建了个体眼模型,用以设计一种可矫正人眼高阶像差的非球面镜片。将镜片与眼睛视为统一的镜-眼光学系统,镜片的处方根据系统优化的镜片结构得到。对明视觉下

人眼的波前像差特点进行了统计分析,发现:对于大多数人眼,高阶像差和像散值较小,球-柱镜片矫正可以满足。对于高阶像差较小但是像散较大的人眼,需要进一步的矫正,非球面镜片可获得更好的矫正视力。对于高阶像差中的彗差和三叶草一类的像差较大的眼睛,非球面镜片矫正效果不明显。对于像散较大、球差较大的眼睛,非球面镜片矫正最为有效。

本文镜片设计中所采用的数据是测量的波前像差数据,具有客观和准确的特点。相比于传统眼镜的设计,本文的非球面眼镜片为特定的人群(像散大、球差大)提供了更好的视觉矫正处方,同时为临床眼镜的验配提供了一种新的方法—光学设计配镜的方法。

参考文献

- 1 瞿佳,姚进. 眼镜学. 北京: 人民卫生出版社, 2004. 8-18, 61, 220-221
- 2 Rubin M L. Spectacles: Past, present and future. *Surv Ophthalmol*, 1986, 30 (5): 321-327
- 3 Helmholtz H. Helmholtz's Treatise on Physiological Optics. New York: Optical Society of America, 1924
- 4 Liang J Z, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11): 2873-2882
- 5 Bally I L. Clinical investigation into the vision performance provided by the iZon spectacle lens system. *Rev Optom*, 2008, 10(15): 1-15
- 6 Catania L. Wavefront diagnosis: The future of vision and eyecare. In: Presentation at 107th Annual Optometric Association Congress 2004, Orlando, July 22-25, 2004
- 7 Abitbol B, Jerusalem I L. Aberration Correction Spectacle Lens. United States Patent Application Publication. No. US 2002/0196412 A1, Dec. 26, 2002
- 8 Blaker J W. Toward an adaptive model of the human eye. *J Opt Soc Am A*, 1980, 70(2): 220-223
- 9 Gullstrand A. Appendices II and IV in Helmholtz's handbuch der physiologischen optik. 1909, 1: 301-358, 382-415
- 10 Liou H L, Brennan N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(8): 1684-1695
- 11 沈为民, 薛鸣球. 非球面眼镜片的像差分析和设计. *光学学报*, 2002, 22(6): 743-748
- 12 任建锋, 徐光华, 余景池. 高次非球面眼镜片设计. *光学技术*, 2006, 32(6): 906-908, 911
- 13 郭培基, 余景池. 非球面眼镜片. 发明专利 CN 1412604A, 2002. 4, 23
- 14 Garner L F, Smith G. Changes in equivalent and gradient refractive index of the crystalline lens with accommodation. *Optom Vis Sci*, 1997, 74(2): 114-119
- 15 Koretz J F, Cook C A, Kaufman P L. Aging of the human lens: Changes in lens shape upon accommodation and with accommodative loss. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(1): 144-151
- 16 Wang W, Wang Z Q, Wang Y, et al. Wave-front aberrations of cornea and crystalline lens. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(3): 607-609
- 17 ZEMAX Optical Design Program User's Guide, 2005. 283
- 18 张以谟. 应用光学. 北京: 电子工业出版社, 2008. 472-474
- 19 Chen R S, Chen D C, Chen B Y, et al. Systematic design of myopic ophthalmic lens. *Asian J Arts Sci*, 2010, 1(1): 83-95
- 20 Wang W, Wang Z Q, Wang Y, et al. Measurements of AIM for visible wavelength based on individual eye model. *Chin Phys Lett*, 2006, 23(12): 3263-3266
- 21 Ge J J, Wang Z Q, Wang Y, et al. Characteristics and new measurement method of NCSFs of individual color mechanisms of human vision. *Chin Phys Lett*, 2010, 27(5): 054201