

doi:10.3788/gzxb20154405.0517001

远视性弱视眼镜中心偏移的像差分析

李新华^{1,2}, 高志山¹, 欧阳永斌²

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 金陵科技学院 视光工程系, 南京 210001)

摘 要: 利用光学设计软件 Zemax 构建了轴长和角膜前表面曲率不同比例的五种 +6.00 m⁻¹ 的远视模型及框架眼镜矫正模型, 分析镜片中心产生偏移时的像差情况. 结果表明: 对于 +6.00 m⁻¹ 的远视性弱视而言, 当镜片中心偏移大于 4 mm 时, 其产生的球差、像散和畸变开始对矫正视力产生影响. 镜片偏移带来的球差在轴性远视所占比例高的模型中表现明显, 而畸变和像散在各种模型中的作用没有明显差异. 在远视性弱视矫正过程中, 需要检测角膜曲率及轴长数据, 分析其在屈光不正形成中所占的比例, 合理选择个性化定制的非球面镜片, 从而保证弱视的治疗效果.

关键词: 医用光学与生物技术; 远视性弱视; 眼镜偏移; 像差; 视觉光学; 成像质量; 光学性能

中图分类号: R778

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)05-0517001-6

Aberration Analysis on the Central Deviation of Corrective Lens on Hyperopic Amblyopia

LI Xin-hua^{1,2}, GAO Zhi-shan¹, OUYANG Yong-bin²

(1 School of Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 Ophthalmic Engineering of Department, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210001, China)

Abstract: The +6.00 m⁻¹ hypermetropia models and correction models were built by changing axial length and corneal curvature of the anterior surface using optical design program Zemax. Based on the correction models, the aberrations which were due to the central deviation of corrective lens were analyzed. For the +6.00 m⁻¹ axial hypermetropia, when the lens offset is more than 4mm, the spherical aberration, astigmatism and distortion are beginning to affect vision. Because of the central deviation of corrective lens, the spherical aberration is obvious in the model which is high percentage of axis changing, while the distortion and astigmatism are no significant difference in various models. These aberrations will reduce the treatment of amblyopia. During the correction of the hyperopic amblyopia, it is necessary to measure the anterior surface radius of cornea and the eye axial length. According to the composition proportion of the refractive error, aspheric lens is designed individually for the hyperopic amblyopia in order to ensure the treatment of amblyopia.

Key words: Medical optics and biotechnology; Hyperopic amblyopia; Central deviation; Aberration; Visual optics; Image quality; Optical properties

OCIS Codes: 170.0170; 330.3790; 330.4060; 330.4060; 330.4460

0 引言

远视是正常视觉发育的必经时期, 在视觉发育过程中如出现视觉系统结构发育异常将导致正视化进程缓慢. 远视程度较高且没有及时准确矫正将可能影响

视网膜功能发育, 从而形成弱视. 弱视是一种发育障碍性疾病, 凡眼部无明显器质性病变, 以功能性因素为主所引起的远视力 ≤ 0.8 且不能矫正者均列为弱视^[1], 其形成与屈光不正特别是远视性屈光不正有关. 高度远视、高度散光是弱视形成的重要因素^[2], 远视引起的弱

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 60678048, 60977008)资助

第一作者: 李新华(1978-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为光学设计与视觉光学. Email: lixinhua@jyt.edu.cn

导师(通讯作者): 高志山(1966-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计、光学测试、眼科医学光学. Email: zhishigao@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2014-11-26; 录用日期: 2015-01-07

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

视占屈光不正性弱视的 83.5%^[3]. 弱视系统尽快发育以治疗弱视^[4]. 只有正常清晰的物像才能不断刺激弱视眼,提升视觉通路和视觉皮层的功能尽快发育并逐渐恢复正常. 正确配戴矫治眼镜对于弱视的治疗至关重要^[4-5]. 弱视儿童配戴远用屈光矫正眼镜后,在精细作业及近距离阅读时会由于镜框下滑、瞳距改变等因素形成偏心注视,导致矫正效果不佳.

在光学系统中,各光学结构的偏位会对成像质量带来较大影响^[6-7],一个面的倾斜或偏心会导致像在垂轴方向上的偏移或引入新的像差^[7]. 在人工晶体植入术中,人工晶体对倾斜和偏心具有极大的敏感性^[8],当人工晶体在眼内倾斜、偏心达到一定值时,会引起高阶像差增加,导致人眼视功能降低^[9]. 人工晶体出色的中央定位和非球面的设计可以达到最佳矫正的视觉效果^[10-11]. 在屈光异常矫正过程中,矫正镜片少量的中心偏位对矫正效果影响不大,但随着镜片度数的增加以及偏移量的增大像差会急剧增加,影响人眼视觉系统的分辨力^[12].

由于远视性弱视多以高度屈光不正为主,因此本文采用光学设计软件 Zemax,以 Navarro^[13]等提出的人眼光学模型作为初始模型,改变轴长和角膜曲率构建+6.00 m⁻¹的远视模型. 通过对该模型增加框架矫正眼镜后分析镜片中心偏移量与各类像差之间的关系,从而为弱视患者合理选择矫正方法提供理论基础.

1 远视性模型的构建

1.1 标准正视模型的选取

1985 年西班牙光学研究机构的 Navarro^[13]等基于

者配戴矫正眼镜不但可以提高视力,还能刺激视觉系 Le Grand 模型基础提出了角膜前表面、晶状体前、后表面用圆锥曲面系数表示的非球面的人眼调节模型. 该模型目前已成为眼科学公认的最接近真实人眼的模型之一,其参量如表 1.

表 1 Navarro 模型眼结构参量
Table 1 Parameter of Navarro eye model

Surface	Surface shape	Radius/mm	Conical surface coefficient	Thickness/mm
Anterior surface of cornea	Conical	7.72	-0.26	0.55
Posterior surface of cornea	Spherical	6.50	0	3.05
Pupil(Aperture surface)	Plane	Infinity	0	0
Anterior surface of lens	Conical	10.2	-3.131 6	4
Posterior surface of lens	Conical	-6.00	-1.0	16.4
Retina(Image surface)	Spherical	-12.00	0	

选择参考波长为 486.1 nm、550 nm、587.5 nm、656.3 nm,其中人眼最敏感的 550 nm 为主波长.

利用文献[13]中提供的屈光介质的折射率数据,进行计算整理,在 Zemax 中选择 Herzberger 公式进行介质折射率计算.

Herzberger 公式为

$$n=A+BL+CL^2+D\lambda^2+E\lambda^4+F\lambda^6 \quad (1)$$

式中 $L=\frac{1}{\lambda^2-0.028}$, E, F 等于 0,其他参量见表 2.

表 2 Herzberger 公式参量
Table 2 Parameter of Herzberger Formula

Parameter Structure	A	B	C	D
Cornea	1.374369701	0.000895858	0.000174281	-0.008402524
Aqueous	1.33600257	0.000872922	0.000179428	-0.009000744
Lens	1.41542086	0.001550854	0.000221638	-0.007287329
Vitreous	1.333143975	0.001272629	0.000135139	-0.00705244

构建的屈光介质的折射率在 550 nm 时,角膜、房水、晶状体、玻璃体的折射率分别为 1.377 4、1.338 8、1.421 8、1.337 4. 该模型眼轴总长度 24 mm,有效焦距为 16.483 7 mm,总屈光力 60.66 m⁻¹.

1.2 远视性人眼模型的构建

在近轴情况下,轴上点发出的光束经光学系统各个球面折射后,光线和光轴的交点与理想像点的位置偏离称为离焦^[14]. 在人眼光学系统中,当接收面视网膜位置和屈光系统成像后的理想像点位置不匹配时会形成近视、远视,即光学上的离焦. 屈光不正是由于像面位置和屈光系统屈光力量的对应关系失衡而形

成,会存在两种情况:1)视网膜的位置向前或者向后移动,即眼轴过长或者过短;2)屈光系统的屈光力量过强或者过弱^[15].

远视是指处在休息状态的眼使平行光线在视网膜后方形成焦点^[15]. 由于眼内屈光介质折射率一般变化不大,因此,本文不讨论折射率变化所带来的屈光异常. 从屈光系统结构状态来说远视眼主要分为轴性远视和曲率性远视^[15]. 轴性远视是指眼的前后轴过短,一般由视网膜位置向前移动所引起^[17]. 曲率性远视是指眼屈光系统中任何屈光体的表面弯曲度较小,曲率性远视多为角膜前表面曲率变化所致^[15]. 因此,在远

视性模型的构建过程中,轴长变化主要改变眼轴后段长度即视网膜的位置,曲率变化主要改变角膜前表面的曲率半径。

本文选择了 550 nm 为主波长,因此存在 -0.0639 mm 的离焦。为了保证初始模型的正视性,在远视性模型构建时,将视网膜位置修正为 16.337 mm。

1.2.1 曲率性远视模型构建

角膜前表面曲率半径变大会引起曲率性远视。当角膜曲率增大而接收像面即视网膜位置不变时,其系统焦距发生变化,形成离焦引起远视性屈光不正。假设光学系统光焦度变化量为 ΔD ,像方焦距为 f_e ,离焦量为 Δf ,则

$$\Delta D = \frac{1}{f_e + \Delta f} - \frac{1}{f_e} \quad (2)$$

式中 ΔD 的单位为 m^{-1} , f_e 和 Δf 单位为 m。

在接收像面位置不变时,基于 Navarro 眼模型的角膜曲率变化所引起的系统焦距变化、离焦量以及光焦度改变如表 3。

表 3 基于 Navarro 模型的角膜曲率变化与屈光不正度关系
Table 3 Result of Refractive error with cornea curvature changing based on Navarro model

Corneal radius/mm	Object focal length/mm	Image focal length/mm	Defocus distance/mm	Refractive error/ m^{-1}
7.720	-16.484	22.046	0.000	-0.000
7.920	-16.793	22.459	0.457	-1.188
8.120	-17.097	22.867	0.908	-2.233
8.320	-17.398	23.268	1.352	-3.157
8.520	-17.694	23.665	1.791	-3.975
8.720	-17.986	24.056	2.223	-4.703
8.920	-18.275	24.441	2.650	-5.352
9.120	-18.559	24.827	3.071	-5.929

1.2.2 轴性远视模型构建

在轴性远视模型构建中,将视网膜位置向前移动,即缩小视网膜与晶状体之间的距离。当屈光系统不变,接收像面即视网膜位置向前移动会引起远视性屈光不正。对应不同的角膜曲率半径,相同的轴长变化所引起

表 4 基于 Navarro 模型轴长变化的屈光不正度

Table 4 Result of refractive error with Navarro eye model axis changing

Corneal radius/mm	Object focal length/mm	Image focal length/mm	Defocus distance/mm	Refractive error/ m^{-1}
7.720	-16.484	22.046	0.000	-0.000
7.720	-16.484	22.046	0.500	-1.345
7.720	-16.484	22.046	1.000	-2.632
7.720	-16.484	22.046	1.500	-3.865
7.720	-16.484	22.046	2.000	-5.046
7.720	-16.484	22.046	2.500	-6.179
7.720	-16.484	22.046	3.000	-7.266
7.720	-16.484	22.046	3.500	-8.312
7.720	-16.484	22.046	4.000	-9.317

的系统光焦度变化不同。以角膜曲率半径为 7.72 mm 的 Navarro 模型为例,轴长变化与光焦度变化量的关系如表 4。

1.2.3 复合性远视模型构建

复合性远视是角膜曲率半径变大和轴长变短共同引起的远视。以屈光不正度为 $+6.00 m^{-1}$ 的远视眼模型为例,按照曲率变化和轴长变化所带来的不同光焦度变化比例选择了五种类型的远视模型。为了数据分析和对比的方便,将全轴性模型和全曲率性模型归为复合性远视模型的两种特殊形式。因此,选择五种远视模型,其中轴长变化所带来的光焦度变化占比分别为 100%、70%、50%、30%、0%。在五种结构中,角膜曲率半径和眼轴长度如表 5。

表 5 $+6.00 m^{-1}$ 远视模型结构参量
Table 5 Parameter of $+6.00 m^{-1}$ -hypermetropia model

Model	Config1 (100% Axial model)	Config2 (70% Axial model)	Config3 (50% Axial model)	Config4 (30% Axial model)	Config5 (100% Curvature model)
Corneal radius/mm	7.720	8.035	8.285	8.580	9.146
Eye model axis/ m^{-1}	21.517	22.08	22.516	23.016	23.937

1.2.4 多种模型在 Zemax 中的实现

为了方便数据分析以及像差对比,在 Zemax 中,利用多重结构构建五种远视模型。五种模型多重结构参量如表 6,其中,CRVT 为角膜前表面曲率,是曲率半径的倒数;THIC 为视网膜位置,是视网膜至晶状体后表面的距离。

表 6 不同远视模型的多重结构参量
Table 6 Multi-configuration parameters of hypermetropia models

Model	Config1 (100% Axial model)	Config2 (70% Axial model)	Config3 (50% Axial model)	Config4 (30% Axial model)	Config5 (100% Curvature model)
CRVT/ mm^{-1}	0.1295	0.1244	0.1207	0.1166	0.1093
THIC/mm	13.917	14.480	14.916	15.416	16.337

1.3 矫正模型构建

在对 $+6.00 m^{-1}$ 的远视进行矫正时,选择框架眼镜镜片折射率为 1.60,阿贝数为 43.9 的镜片材料。选择透镜边缘厚度为 1.2 mm,镜片直径为 60 mm,镜眼距为 12 mm,镜片基弧为 $-4.50 m^{-1}$,则通过计算可得后表面的曲率半径为 133.33 mm。考虑镜片厚度的影响,可以计算出中心厚度为 6.55 mm,前表面的曲率半径为 55.71 mm。通过对矫正模型进行离焦分析,所有模型残留屈光不正度的绝对值均小于 $0.01 m^{-1}$,低于临床矫正意义,如表 7。

表7 矫正模型离焦量与残留屈光不正度
Table 7 Defocusing and residual refractive error of the correction models

Model	Corneal radius/mm	Retinal position/mm	Image focal length/mm	Defocus distance/mm	Refractive error/ m^{-1}
100% Axial model	7.720	13.917	22.046	2.420	-6.000
70% Axial model	8.035	14.480	22.694	2.573	-6.001
50% Axial model	8.285	14.916	23.198	2.695	-6.000
30% Axial model	8.580	15.416	23.783	2.841	-6.001
100% Curvature model	9.146	16.337	24.871	3.124	-6.001

2 镜片中心偏移的像差分析

考虑到人眼成像质量评价的特殊性以及远视性弱视患者的视力需求特点,本文只对初级球差、像散、畸变、Zernike系数进行对比分析.由于本文未涉及精细视力的描述,因此对彗差以及其他高级像差没有列出.临床上一般用光焦度来解释人眼的成像状态,因此对球差和像散用光焦度来描述.

2.1 球差

球差是球面系统特有的像差.在Zemax中,所有工作波长的球差曲线以主波长的像面为计算基准^[19-20],由纵向球差曲线视窗中给出不同视场角的球差值.将系统有效焦距引入进行计算可以得到以光焦度表示的球差值.球差与镜片偏移量关系曲线如图1、图2.

在瞳孔直径为3 mm时,镜片偏移量带来的球差较小,达到8 mm镜片偏移时,各类远视模型的最大球差值为 $0.40 m^{-1}$ 左右.在瞳孔直径达到6 mm时,全轴

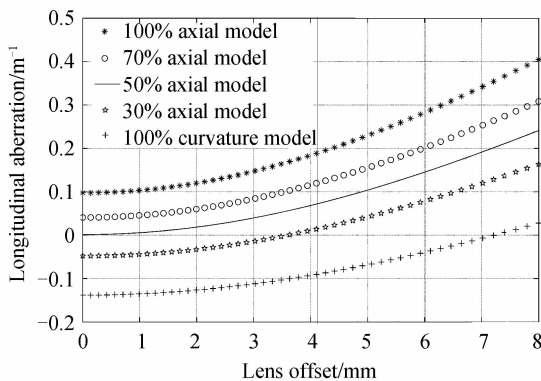


图1 3 mm瞳孔直径球差与镜片偏移量关系曲线图
Fig. 1 Longitudinal Aberration-lens offset relational function(3 mm pupil diameter)

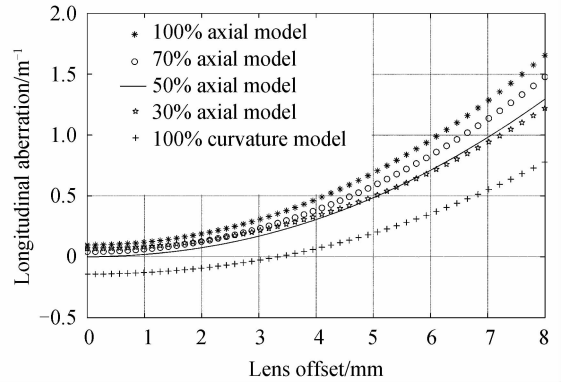


图2 6 mm瞳孔直径球差与镜片偏移量关系曲线图
Fig. 2 Longitudinal Aberration-lens offset relational function(6 mm pupil diameter)

性远视的镜片偏移量为4 mm时,其球差值为 $0.50 m^{-1}$.全曲率性远视镜片偏移量为6.5 mm时,其球差值为 $0.50 m^{-1}$.在瞳孔直径较小的情况下,镜片偏移带来的球差值较小.这表示在明视觉状态下,镜片偏移不会带来明显的球差.但是随着瞳孔直径的增大,球差明显增大,且全轴性远视中体现更加突出.

在各种矫正模型中,随着轴长变化所形成的屈光不正度所占比例增加,其正球差值相应增大.从球差曲线可以看出,在全曲率性模型中,镜片没有偏移的情况下形成负球差,随着镜片偏移带来的正球差值,负球差值将逐步抵消,从而减少了球差.因此,对于全曲率性模型而言,为了降低镜片偏移带来的球差的影响,可以选择对曲率性远视性弱视进行轻微过度矫正,从而降低镜片偏移带来的球差.

2.2 像散

像散是影响清晰度的轴外点单色像差,仅与光学系统的视场有关^[18].随着镜片偏离中心,光束倾斜加大,轴外视场像差开始明显增加.在轴外像差中,像散是对视觉质量影响较大的像差之一.在Zemax中,容易获得子午、弧矢像差数据.将系统有效焦距引入后,可以计算用光焦度表示的像散值,像散与镜片偏移量关系曲线如图3.

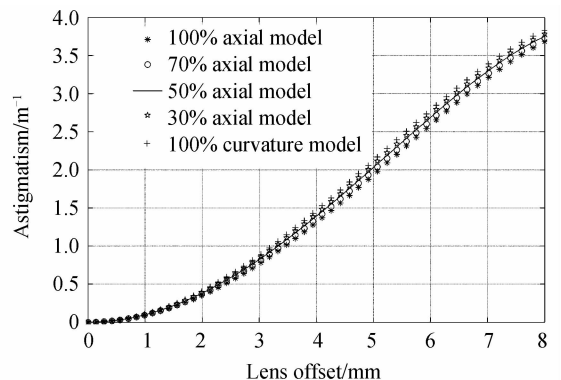


图3 像散与镜片偏移量关系曲线图
Fig. 3 Astigmatism-lens offset relational function

当镜片偏移量达到 4.5 mm 时,各种类型远视的像散量都基本在 1.5 m^{-1} 左右.像散与镜片偏移量关系曲线中可以看出像散值与屈光不正类型无关,只与镜片偏移量有关.因此,为了矫正像散带来的视觉影响,选择合理的注视方式、可靠的眼镜固定方法或者角膜接触镜来进行屈光不正的矫正是降低像散的有效途径.

2.3 畸变

畸变是由于主光线的光路偏离而引起的成像缺陷.畸变不会影响成像清晰度,只会带来成像变形.畸变对视觉系统的影响主要是在双眼畸变不等的情况下无法实现融像,这对远视性弱视的矫正而言将使其放弃视力较差的眼,无法达到矫正屈光不正从而治疗弱视的目的.

光学理论认为,光学系统的畸变引起的图像变形被人眼所觉察的畸变值约为 4%^[14].在所有远视矫正模型中,当镜片偏移量达到 3 mm 时,其畸变值达到 4%.所有矫正模型畸变值基本相当,全曲率模型畸变值略高.镜片偏移量与畸变关系曲线如图 4.

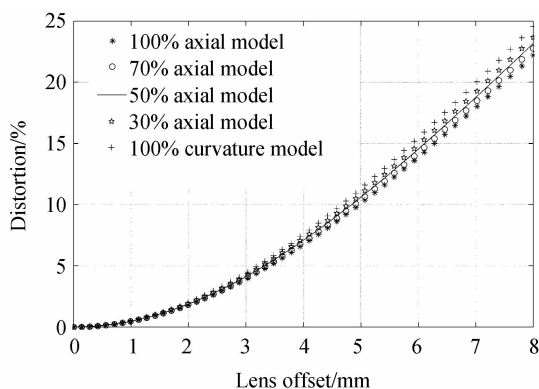


图 4 畸变与镜片偏移量关系曲线图

Fig. 4 Distortion-lens offset relational function

2.4 Zernike 多项式系数

目前最常用的像差数学描述是用 Zernike 多项式.常用的 Zernike 多项式为 7 阶 36 项,其中,1~2 阶为低阶像差,3 阶以上为高阶像差.在瞳孔直径为 3 mm,镜片中心偏移量为 4 mm 时,五种矫正模型的 Zernike 多项式 $Z_1 \sim Z_9$ 项系数及对主光线的整体均方根(Root Mean Square, RMS),如表 8.

由于在配戴眼镜注视过程中,镜片偏移一般只出现在垂直方向,因此在视场中只设置了 Y 方向的视场角.因此,与 X 方向相关的 Z_2, Z_5, Z_8 的系数为 0.在所有矫正模型中,四阶以上多项式系数较小.表示初级球差的 Z_9 较小,这与瞳孔直径较小有关.当瞳孔直径增大到 6 mm 时,初级球差明显增加.在各种矫正模型对比中,全曲率性模型的 Zernike 系数普遍较小,这表明曲率性远视对球面镜片的适应性更高.在对镜片中心偏移进行评估时,选择 Zernike 多项式表示波像差的评

估方法将更简单,但临床上没有光焦度表示的像差直观.整体均方根值随着轴长所占比例减小而逐渐减小,说明曲率性远视具有更好的像差矫正能力.

表 8 不同矫正模型的 Zernike 多项式系数
(镜片中心偏移 4 mm,瞳孔直径 3 mm)

Table 8 Coefficients of hypermetropia correction models
(4 mm lens offset, 3 mm pupil diameter)

Model	Config1 (100% Axial model)	Config2 (70% Axial model)	Config3 (50% Axial model)	Config4 (30% Axial model)	Config5 (100% Curvature model)
Z_1	0.756	0.597	0.478	0.337	0.078
Z_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z_3	0.769	0.658	0.580	0.496	0.359
Z_4	0.485	0.386	0.313	0.226	0.069
Z_5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z_6	-0.725	-0.748	-0.763	-0.777	-0.795
Z_7	0.272	0.232	0.204	0.174	0.125
Z_8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z_9	0.016	0.011	0.008	0.005	-0.001
RMS	1.184	1.084	1.020	0.967	0.876

3 结论

在镜片中心产生偏移时,会产生球差、像散以及畸变等多种像差.对于 $+6.00 \text{ m}^{-1}$ 的远视性弱视而言,在瞳孔直径较小时,其产生的球差量可以忽略.随着瞳孔直径的增加,其球差值明显增加,在瞳孔直径达到 6 mm 时,全轴性远视的镜片偏移量为 4 mm 时,其球差值为 0.50 m^{-1} ;全曲率性远视镜片偏移量为 6.5 mm 时,其球差值为 0.50 m^{-1} .镜片偏移 4 mm 时产生的像散达到 1.5 m^{-1} 左右.当镜片产生的中心偏移达到 3 mm 时,畸变值将达到 4%.对于存在散光的患者,其像差值将会进一步增大.

远视性弱视一般具有较高的远视性屈光不正,一旦出现镜片中心偏移,所产生的像差将严重影响镜片的矫正效果.在不同类型的远视中,轴性远视对镜片偏移量所引起的像差敏感性更高.在远视性弱视的矫正过程中,为了获得良好的矫正效果以达到恢复视功能的目的,需要检测角膜曲率及轴长数据,分析其在屈光不正形成中所占的比例,从而合理选择个性化定制的非球面矫正镜片.

参考文献

- [1] Thenational children's amblyopia and strabismus treatment and study group. definition, classification and evaluation standard of amblyopia[J]. *Chinese Journal of Strabismus & Pediatric Ophthalmology*, 1996, 4(3): 97-97.
全国儿童弱视斜视防治学组.弱视的定义、分类及疗效评价标准[J]. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 1996, 4(3): 97-97.
- [2] XIAO Xin, WANG Ying, LIU Wei-min, et al. Characteristic of refractive state in 6-12-years-old amblyopic children [J]. *Chinese Journal of School Health*, 2013, 33(6): 718-719.

- 肖信,王英,刘伟民,等.弱视学龄儿童屈光状态特征分析[J].中国学校卫生,2013,**33**(6):718-719.
- [3] ZHUO Wen-xuan, SHI Chang-chun, LIN Yu-lei, *et al.* Therapy effect of standard prescription on ametropic amblyopia in hyperopic children[J]. *International Eye Science*, 2014, **14**(6): 1026-1029.
卓文渊,施长春,林余蕾.儿童远视引起的双眼屈光不正性弱视的矫正治疗探讨[J].国际眼科杂志,2014,**14**(6):1026-1029.
- [4] XU Jiang-shan, WANG Hong-wei. Progress of treatment for amblyopia in children[J]. *International Eye Science*, 2013, **13**(2): 302-305.
徐江珊,王宏伟.儿童弱视治疗研究进展[J].国际眼科杂志,2013, **13**(2):302-305.
- [5] ZHANG Jun-Liang. Analysis the relationship of ametropia and amblyopia and strabismus[J]. *Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2013, **22**(6): 602-604.
张军联.屈光不正与弱视、斜视关系分析[J].现代中西医结合杂志,2013, **22**(6):602-604.
- [6] ZHANG Qing, WANG Yuan-yuan, HE Ji-cang, *et al.* Research on measurement of rigid contact lens eccentricity based on reflection[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2010, **27**(2): 421-424.
张晴,王媛媛,贺极苍,等.反射法测量硬性角膜接触镜中心偏的研究[J].生物医学工程学杂志,2010,**27**(2):421-424.
- [7] FAN Xu-wu, CHEN Rong-li, MA Zhen, *et al.* A study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494-496.
樊学武,陈荣利,马臻,等.偏心 and 倾斜光学系统初级象差理论的研究[J].光子学报,2004,**33**(4):494-496.
- [8] EPPIG T, SCHOLZ K, LÖFFLER A, *et al.* Effect of decentration and tilt on the image quality of aspheric intraocular lens designs in a model eye[J]. *Journal Cataract Refract Surgery*, 2009, **35**(6): 1091-1100.
- [9] ZHU Hai-feng, FANG Zhi-liang, LIU Yong-ji. Effect of intraocular lens decentration and tilt on vision performance of human eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 140-144.
朱海丰,方志良,刘永基.人工晶体倾斜与偏心对人眼视功能的影响[J].光子学报,2008,**37**(1):140-144.
- [10] LI Wang, DOUGLAS D K. Effect of decentration of wavefront-corrected intraocular lenses on the higher-order aberrations of the eye[J]. *Arch Ophthalmol*, 2005, **123**: 1226-1230.
- [11] THOMAS K, OLIVER K. Effect of intraocular lens asphericity on quality of vision after cataract removal[J]. *Ophthalmology*, 2009, **116**: 1697-1706.
- [12] LI Ang, ZENG Jun. Relationship between the higher order aberrations and the diopter as well as contrast sensitivity in children with hyperopic amblyopia[J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2010, **10**(5): 880-883.
李昂,曹军.儿童远视合并弱视的阶像差与视觉质量的关系[J].国际眼科杂志,2010,**10**(5): 880-883.
- [13] NAVARRO R, SANTAMARIA J, BESCOS J. Accommodation-depend model of the human eye with aspheric[J]. *Optical Society of America*, 1985, **2**(8): 1273-1281.
- [14] LI Peng-fei, XU Jin-kai, HAN Wen-bo, *et al.* The design and realization of dynamically stabilizing retinal image in human eye aberration wavefront correction setup[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(6): 0611002.
李鹏飞,许金凯,韩文波,等.人眼像差校正仪视网膜动态稳像研究[J].光子学报,2014,**43**(6):0611002.
- [15] 李凤鸣.眼科全书[M].北京:人民卫生出版社,1996.
- [16] FENG Li, LI Jie, ZHANG Hai-jiang, *et al.* Analysis on multi-factors contributing to amblyopia therapeutic efficacy[J]. *Practical Preventive Medicine*, 2011, **18**(10): 1888-1890.
冯丽,李洁,张海江,等.影响弱视儿童视力恢复的多因素分析[J].实用预防医学 2011,**18**(10):1888-1890.
- [17] ZHOU Chang-da, QIN Jian-ying. The study of the diopter, ocular axial length and anterior chamber depth in hyperopic amblyopia[J]. *Chinese Journal of Strabismus & Pediatric Ophthalmology*, 2013, **21**(1): 31-34.
周畅达,秦剑英.远视性弱视患者屈光度数、眼轴长度及前房深度相关性研究[J].中国斜视与小兒眼科杂志,2013,**21**(1): 31-34.
- [18] FANG Li-hua, HE Xing-dao, LI Shu-jing. Counterbalanced relationship between defocus and spherical aberration based on optical quality metrics of human eyes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 110-115.
方利华,何兴道,李淑静.基于人眼光学质量的球差和离焦步长关系研究[J].光子学报,2010,**39**(1):110-115.
- [19] KONG Mei-mei. Research of the crystalline lens model in human eye optical system based on zemax interface technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1222002.
孔梅梅.基于Zemax接口技术的人眼晶状体模型研究.光子学报,2014,**43**(12): 1222002.
- [20] KONG Mei-mei, GAO Zhi-shan, CHEN Lei, *et al.* Corneal model based on human eye optical models[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 707-712.
孔梅梅,高志山,陈磊,等.基于人眼光学模型建立的角膜模型[J].光学精密工程,2009,**17**(4):707-712.