

文章编号: 0253-2239(2008)10-1977-06

基于个体眼光学结构的角膜与晶状体的像差补偿

刘 铭¹ 王肇圻¹ 王 雁² 赵堪兴²

(¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(²天津眼科医院屈光手术中心, 天津 300020)

摘要 研究角膜对晶状体波前像差的影响对现行的个性化视觉矫正手术有一定的参考价值。运用光学设计软件 Zemax, 根据个体人眼的角膜地形图、眼内各部分轴向间距和全眼波前像差数据, 为 22 只人眼构建了个体眼光学结构。基于个体眼光学结构和衍射光学理论计算了眼内、外不同位置处的波前, 获得了角膜对晶状体波前像差的影响。结果表明, 角膜和晶状体像差存在补偿和叠加两种关系。大多数眼睛, 角膜对晶状体像差有一定补偿作用。总体像散的均方根(RMS)值比晶状体像散的 RMS 值减小 0.08~1.48 μm , 相当于 10.1%~77.5%。总体高阶像差的 RMS 值比晶状体高阶像差的 RMS 值减小了 0.06~0.85 μm , 相当于 3.8%~79.4%, 平均减小了 50.7%。其中, 球差和彗差的 Zernike 系数绝对值总体比晶状体分别减小了 0.02~0.60 μm 和 0.01~0.39 μm , 相当于 4.3%~98.4% 和 2.5%~91.4%。

关键词 医用光学与生物技术; 视觉光学; 波前像差; 个体眼光学结构

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082810.1977

Aberrations Compensation of Cornea and Crystalline Lens Based on Individual Eye Model

Liu Ming¹ Wang Zhaoqi¹ Wang Yan² Zhao Kanxing²

(¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)
(²*Refractive Surgery Center, Tianjin Eye Hospital, Tianjin 300020, China*)

Abstract It is valuable for the actual customized vision correction to study the influence of cornea on the wavefront aberrations of crystalline lens. Using optical design software Zemax, individual eye model has been constructed for 22 human eyes with measured individual cornea data, eyeball depth and wave-front aberrations. Based on the constructed individual eye model and diffraction propagation theory, wave-front on different planes inside and outside human eye is calculated, and therefore the influence of cornea on the wave-front aberrations of crystalline lens is obtained. It is shown that the combination between cornea aberrations and crystalline lens aberrations can be either compensatory or additive. The combinations are compensatory for most eyes. The root-mean-square(RMS) value of total astigmatism is less than that of crystalline lens astigmatism. The compensatory values are from 0.08 μm to 1.48 μm (from 10.1% to 77.5%). The RMS value of total higher-order wave-front aberrations is less than that of crystalline lens higher-order aberrations. The compensatory values are from 0.06 μm to 0.85 μm (from 3.8% to 79.4%, 50.7% on average). The compensatory values for sphere aberration and coma aberration are from 0.02 μm to 0.60 μm (4.3%~98.4%) and from 0.01 μm to 0.39 μm (2.5%~91.4%), respectively.

Key words medical optics and biotechnology; visual optics; wavefront aberrations; individual eye model

收稿日期: 2007-12-02; 收到修改稿日期: 2008-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60438030, 60777011)、教育部博士点基金资助课题(20050055002)和中国博士后基金(20060390167)资助课题。

作者简介: 刘 铭(1979—), 女, 博士研究生, 主要从事视觉光学方面的研究。

E-mail: mingtt@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 王肇圻(1944—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光学处理方面的研究。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

1 引 言

适用于临床的个性化视觉矫正技术^[1,2],如个性化激光角膜手术^[3,4]、个性化角膜接触镜^[5]、框架眼镜和相位板^[6,7],是在距离眼睛的不同位置处对高阶像差进行矫正的。要获得正确的矫正数据,不仅需要全眼的波前像差、角膜地形图和眼轴长度数据,还需要参考眼睛在矫正位置处的波前数据。晶状体和角膜是人眼高阶像差的主要来源^[8],研究角膜与晶状体像差的补偿关系,也可对现行的个性化视觉矫正技术提供一定的参考。

He J C 等人分别采用角膜地形图系统和心理物理光线追迹技术测量了角膜前表面像差及全眼波前像差,根据这些测量结果计算了人眼内部光学系统的波前像差^[9]。王伟等人通过裂隙扫描式角膜地形图系统 (orbscan II, Bausch & Lomb) 和 Hartmann-Shack 人眼波像差仪测量了角膜和全眼的波前像差^[10]。他们不仅测量了角膜前表面的波前像差,而且还测量了角膜后表面的波前像差,从而把角膜作为人眼的一个屈光元件独立出来。通过比较角膜和全眼的波前像差获得晶状体的波前像差。这种方法是通过比较角膜和全眼的波前像差,获得了人眼内部光学系统或晶状体对角膜前表面这个位置处的波前像差的贡献。

本文根据对个体人眼测量得到的角膜地形图、眼内各部分轴向间距和全眼波前像差数据构建了个体眼光学结构。基于衍射光学理论计算由视网膜上

一点发出的、由内向外传播的单色球面波到达眼内、外任意平面的波前,特别是晶状体前、后表面和角膜前、后表面的波前。通过比较角膜前、后表面的波前,获得了 22 只个体人眼的角膜对晶状体波前像差影响的一般规律。

2 测量方法

2.1 测量对象

在天津眼科医院屈光手术中心随机选取准备接受手术治疗的屈光不正患者 16 人(22 只眼),其中 10 人(62.5%)为女性,6 人(37.5%)为男性。被测者年龄在 19~24 岁之间,眼睛近视范围为 -6.5~-1.0D(人工验光),散光范围为 -0.25~-2.0D(人工验光)。所有患者身体状况良好,除屈光不正外,均无其他眼科疾病。

2.2 个体眼光学结构的构建

采用 Orbscan II 型角膜地形图仪测量角膜地形图。采用医用 BMF-200 A/B 超声波测厚仪测量眼内各部分介质轴向厚度,对每只眼睛测量 10 次取平均值。采用哈特曼-夏克波前传感器测量人眼波前像差,被测者的瞳孔在暗室条件下自然放大,未使用散瞳,对每只眼睛测量 3 次取平均值。表 1 给出波前像差和眼内各部分介质轴向厚度测量值的平均值和标准差,其中波前像差的测量值是指均方根值 (Root Mean Square, RMS)。

表 1 波前像差和眼内各部分介质轴向厚度

Table 1 Wavefront aberrations and eye's axial lengths

Eye number	Wavefront aberrations / μm		Axial length/mm			
	Total aberration	High-order aberrations	Cornea	AC	Lens	Vitreous body
1	7.658±0.105	0.634±0.075	0.52±0.05	3.49±0.16	3.61±0.06	18.95±0.08
2	6.081±0.160	0.859±0.051	0.50±0.04	3.64±0.14	3.52±0.11	18.83±0.16
3	6.655±0.139	1.520±0.010	0.49±0.08	3.47±0.15	4.06±0.06	17.82±0.14
4	5.543±0.081	0.369±0.006	0.54±0.04	3.32±0.11	3.52±0.10	17.71±0.17
5	6.514±0.067	0.382±0.006	0.55±0.04	3.31±0.05	3.42±0.06	17.96±0.05
6	5.498±0.061	0.446±0.035	0.46±0.05	3.17±0.04	3.55±0.05	17.09±0.06
7	4.593±0.061	0.543±0.040	0.46±0.06	3.14±0.03	3.54±0.04	16.72±0.07
8	7.128±0.025	0.238±0.006	0.52±0.03	3.69±0.15	3.46±0.18	18.83±0.16
9	6.727±0.032	0.475±0.020	0.53±0.05	3.12±0.04	4.06±0.09	18.84±0.10
10	2.147±0.040	0.416±0.006	0.59±0.04	3.65±0.05	3.57±0.07	16.91±0.04
11	2.380±0.047	0.552±0.006	0.58±0.04	3.64±0.05	3.60±0.05	16.75±0.10
12	4.219±0.051	0.233±0.001	0.52±0.08	3.59±0.17	3.67±0.18	18.77±0.23
13	4.480±0.021	0.322±0.010	0.58±0.04	3.52±0.18	3.54±0.17	18.81±0.19
14	9.637±0.015	0.223±0.006	0.58±0.02	3.07±0.07	3.53±0.03	18.99±0.20

(续表)

Eye number	Wavefront aberrations / μm		Axial length/mm			
	Total aberration	High-order aberrations	Cornea	AC	Lens	Vitreous body
15	6.757 \pm 0.058	0.220 \pm 0.010	0.47 \pm 0.05	3.60 \pm 0.03	3.89 \pm 0.02	18.52 \pm 0.16
16	9.227 \pm 0.032	0.812 \pm 0.010	0.53 \pm 0.04	2.93 \pm 0.04	3.37 \pm 0.08	19.01 \pm 0.15
17	4.770 \pm 0.035	0.930 \pm 0.006	0.61 \pm 0.07	3.37 \pm 0.02	3.36 \pm 0.02	18.10 \pm 0.13
18	5.868 \pm 0.060	0.721 \pm 0.001	0.49 \pm 0.03	3.25 \pm 0.04	3.44 \pm 0.05	18.16 \pm 0.17
19	12.016 \pm 0.012	0.391 \pm 0.012	0.53 \pm 0.06	3.66 \pm 0.08	3.51 \pm 0.07	20.24 \pm 0.15
20	3.480 \pm 0.038	0.275 \pm 0.021	0.46 \pm 0.04	2.99 \pm 0.09	3.78 \pm 0.10	18.90 \pm 0.11
21	5.744 \pm 0.031	0.624 \pm 0.006	0.57 \pm 0.05	3.58 \pm 0.10	3.91 \pm 0.10	19.19 \pm 0.14
22	6.301 \pm 0.015	0.481 \pm 0.035	0.61 \pm 0.06	2.87 \pm 0.04	3.88 \pm 0.06	18.87 \pm 0.16

由角膜地形图、眼内各部分轴向间距和全眼波前像差对 22 只人眼构建了个体眼光学结构^[11,12]。

2.3 眼内波前传播的计算

利用所构建的个体眼光学结构和衍射光学原理,计算由视网膜上一点发出的单色球面波,在晶状体前、后表面和角膜前、后表面的波前。

如图 1 所示,人眼光学系统主要由两部分组成,即晶状体和角膜。由视网膜上一点发出的球面波经过人眼光学系统到达角膜前表面的过程,可分为四个阶段:1)由视网膜上一点发出的球面波经过玻璃体到达晶状体后表面 π_0 的过程,相当于球面波在均匀介质中的传播;2)波面由晶状体后表面 π_0 到达其前表面 π_1 的过程相当于经过一个特定结构的相位板;3)波面由晶状体前表面 π_1 到达角膜后表面 π_2 的过程(即波面通过前房的过程),相当于波面在均匀介质中的传播。由于前房距离太短(与瞳孔直

径同一量级),因此波面的传播过程由衍射的角谱理论(具有和基尔霍夫衍射理论同等的价值)描写^[13]。
4)波面由角膜后表面 π_2 到达角膜前表面 π_3 的过程相当于经过另一个特定结构的相位板。

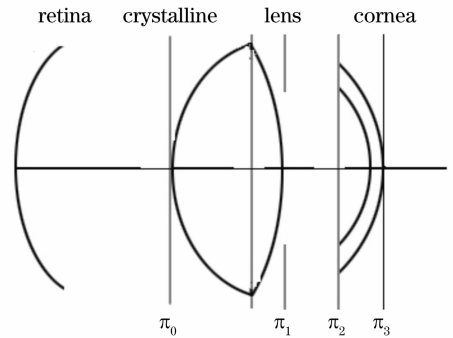


图 1 个体眼光学结构

Fig. 1 Layout of individual eye model
平面 π_0 上光场的复振幅分布为

$$u_0(x_0, y_0) = \frac{A}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (d_v/n_v)^2}} \exp(ik \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (d_v/n_v)^2}) \quad (1)$$

其中 d_v 为玻璃体的轴上厚度, n_v 为玻璃体的折射率。

晶状体对入射波面的相位变换作用,即晶状体的复振幅透过率为

$$t_1(x_0, y_0) = \exp\{i2\pi[d_{110} \cdot n_v + d_{120} \cdot n_a + d_{11}(x_0, y_0)(n_1 - n_v) + d_{12}(x_0, y_0)(n_1 - n_a)]\} \quad (2)$$

其中, d_{110} 、 d_{120} 分别为晶状体前、后半部分的轴上厚度; $d_{11}(x_0, y_0)$ 、 $d_{12}(x_0, y_0)$ 分别为晶状体前、后半部分在 (x_0, y_0) 点的厚度; n_1 、 n_a 分别为晶状体和前房的折射率。

由于人眼瞳孔的限制作用,平面 π_1 上光场的复振幅分布为

$$u_1(x_1, y_1) = u_0(x_0, y_0) \cdot t_1(x_0, y_0) \cdot p(x_1, y_1) \quad (3)$$

其中瞳函数为

$$p(x_1, y_1) = \begin{cases} 1, & \text{in pupil} \\ 0. & \text{out pupil} \end{cases}$$

由衍射的角谱理论可知,平面 π_2 上光场的复振幅分布为

$$u_2(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U(\xi, \eta) \exp[i \frac{2\pi n_a}{\lambda} z \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}] \exp[i2\pi(x_2\xi + y_2\eta)] d\xi d\eta \quad (4)$$

其中 $U(\xi, \eta)$ 为平面 π_1 上光场的复振幅分布的傅里叶变换。

角膜对入射波面的相位变换作用,即角膜的复振幅透过率为

$$t_c(x_2, y_2) = \exp\{i2\pi[d_{c1}(x_2, y_2) \cdot n_a + (d_{c2}(x_2, y_2) - d_{c1}(x_2, y_2)) \cdot n_c + (d_c(x_2, y_2) - d_{c2}(x_2, y_2)) \cdot n_0]\} \quad (5)$$

其中 $d_c(x_2, y_2)$ 、 $d_{c1}(x_2, y_2)$ 、 $d_{c2}(x_2, y_2)$ 分别为平面 π_2 、角膜后表面、角膜前表面到平面 π_1 的距离。 n_c 、 n_0 分别为角膜和空气的折射率。

平面 π_3 上光场的复振幅分布为

$$u_3(x_3, y_3) = u_2(x_2, y_2) \cdot t_c(x_2, y_2). \quad (6)$$

由复振幅的相位因子使用反正切函数解出来的相位值,都是包裹相位值,其值在 $[-\pi, \pi]$ 之间。要获得真实相位值,就需要进行相位去包裹处理。相位去包裹可通过行列逐点算法来实现^[14]。这一算法是根据相位去包裹原始意图得到的,即最终得到的去包裹相位应该是连续的。算法基本步骤如下:

1) 选取包裹相位的某一行,依次比较这一列中相邻两个点的相位值,当两值之差超过某一阈值时,则对第二个点的相位加上或减去 2π ,直到这一列的所有点都去完包裹。

2) 以第一步中选定的列为基准,沿着每一行,用同法逐点去包裹,这样就可得到全场的真实相位。

由去包裹相位可得到波前。角膜和晶状体各承担了眼睛的一部分屈光度,两者为相互叠加的关系。本文通过比较角膜后表面 π_2 和角膜前表面 π_3 的波前,来分析角膜对晶状体波前像差的影响。

3 结果分析

像散包括 45° 像散(Z_3)和 90° 像散(Z_5),像散总

的 $V_{\text{RMS1}} = \sqrt{C_3^2 + C_5^2}$,其中, C_3 和 C_5 为第 3 项和第 5 项 Zernike 多项式的系数。图 2(a)给出了 22 只眼睛在平面 π_2 和平面 π_3 的像散值,其中, x 轴为眼睛序号, y 轴为相应 RMS 值。有 5 只眼睛(占 22.73%),平面 π_3 的像散值大于平面 π_2 的像散值,即角膜和晶状体的像散相互叠加。其中,第 7 只眼睛像散的叠加量最大,平面 π_2 上的像散为 $0.20 \mu\text{m}$,平面 π_3 上的像散值为 $1.39 \mu\text{m}$,增加了 $1.19 \mu\text{m}$,相当于 595.0%;第 6 只眼睛像散的叠加量最小,平面 π_2 上的像散为 $0.70 \mu\text{m}$,平面 π_3 上的像散值为 $0.87 \mu\text{m}$,增加了 $0.17 \mu\text{m}$,相当于 24.29%。另外 17 只眼睛(占 77.27%),平面 π_3 的像散值小于平面 π_2 的像散值,即角膜与晶状体像散相互补偿。其中,第 17 只眼睛的补偿量最大,面 π_2 上的像散为 $1.91 \mu\text{m}$,平面 π_3 上的像散值为 $0.43 \mu\text{m}$,减小了 $1.48 \mu\text{m}$,相当于 77.49%;第 5 只眼睛补偿量最小,平面 π_2 上的像散为 $0.79 \mu\text{m}$,平面 π_3 上的像散值为 $0.71 \mu\text{m}$,减小了 $0.08 \mu\text{m}$,相当于 10.13%。可以看出,角膜对全眼的像散有较大的影响。

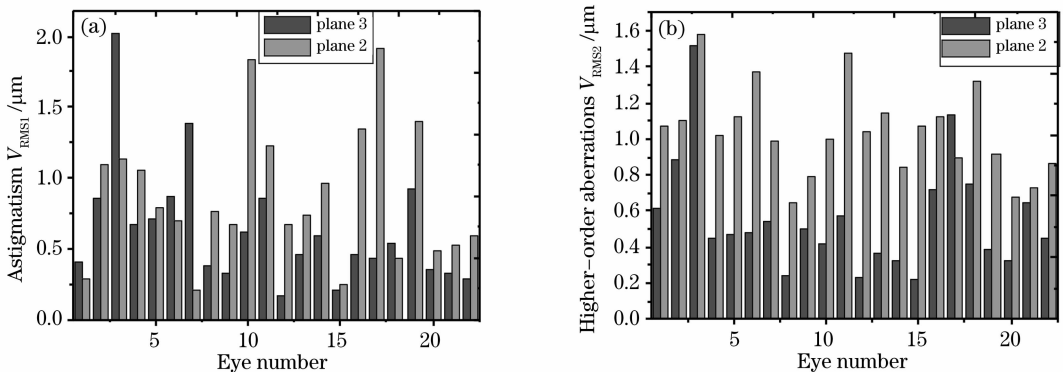


图 2 平面 π_2 和平面 π_3 的像散值(a),高阶像差 RMS 值(b)

Fig. 2 RMS values of astigmatism (a) and high-order aberrations (b) on the plane π_2 and plane π_3

人眼的高阶像差是指除去离焦和像散外的其它像差总称。高阶像差的其 $V_{\text{RMS2}} = \sqrt{\sum_n C_n^2}$ 中, C_n 为第 n 项 Zernike 多项式的系数。图 2(b)给出了 22 只眼睛在平面 π_2 和平面 π_3 的高阶像差值。其中, x 轴为眼睛序号, y 轴为相应 RMS 值。有 21 只(占

95.45%)眼睛,平面 π_3 比平面 π_2 的高阶像差小,即角膜与晶状体的高阶像差相互补偿。平面 π_3 的高阶像差值比平面 π_2 的高阶像差值小 3.80%~79.44%。其中,第 3 只眼睛,平面 π_2 的高阶像差为 $1.58 \mu\text{m}$,平面 π_3 的高阶像差为 $1.52 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的高阶像差减小了 3.80%;第 15 只眼

睛,平面 π_2 的高阶像差为 $1.07 \mu\text{m}$,平面 π_3 的高阶像差为 $0.22 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的高阶像差减小了 79.44%。只有 1 只眼睛(第 17 只眼睛,占 4.55%),平面 π_3 比平面 π_2 的高阶像差大 25.56%,即角膜和晶状体的高阶像差相互叠加,使得总体的高阶像差增加。

对于高阶像差中的单项进行分析,可以采用有正负号的 Zernike 系数来表示该单项波前像差。在两个波前的比较中,有正负号变化的情况表示像差之间的过补偿。第四阶球差是人眼高阶像差中重要的单项,图 3(a)给出了 22 只眼睛在平面 π_2 和平面 π_3 的球差值,其中, x 轴为眼睛序号, y 轴为相应的 Zernike 系数。有 14 只眼睛(占 63.64%),平面 π_2

与平面 π_3 的球差符号相反;有 8 只眼睛(占 36.36%),平面 π_2 与平面 π_3 的球差符号相同。从 Zernike 系数的绝对值来看,有 2 只眼睛(占 9.09%),平面 π_3 的球差大于平面 π_2 的球差,即角膜与晶状体的球差相互叠加,使得总体的球差增加;另外 20 只眼睛(占 90.91%),平面 π_3 的球差小于平面 π_2 的球差,即角膜与晶状体球差相互补偿,其补偿的结果使总体球差减小 4.26%~98.36%。其中,第 18 只眼睛,平面 π_2 的球差为 $0.47 \mu\text{m}$,平面 π_3 的球差为 $0.45 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的球差减小了 4.26%;第 12 只眼睛,平面 π_2 的球差为 $0.61 \mu\text{m}$,平面 π_3 的球差为 $0.01 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的球差减小了 98.36%。

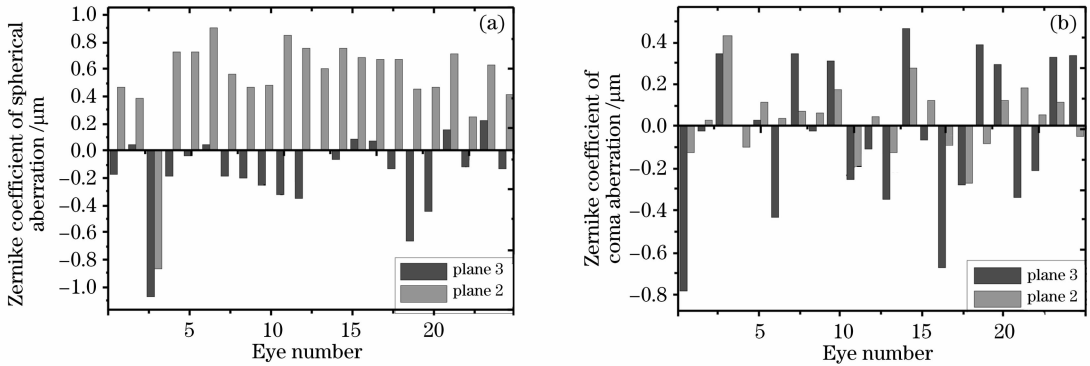


图 3 平面 π_2 和平面 π_3 球差(a)和垂轴彗差(b)的 Zernike 系数

Fig. 3 Zernike coefficients of sphere aberrations (a) and coma aberrations on the plane π_2 and plane π_3

图 3(b)给出了 22 只眼睛在平面 π_2 和平面 π_3 的垂轴彗差值,其中, x 轴为眼睛序号, y 轴为相应的 Zernike 系数。有 10 只眼睛(占 45.45%),平面 π_2 和平面 π_3 的彗差符号相反;有 12 只眼睛(占 54.55%),平面 π_2 与平面 π_3 的彗差符号相同。从 Zernike 系数的绝对值来看,有 6 只眼睛(27.27%),平面 π_3 的球差大于平面 π_2 的球差,即角膜和晶状体的彗差相互叠加,使总体的彗差增加;另外 16 只眼睛(占 72.73%),平面 π_3 的彗差小于平面 π_2 的彗差,即角膜与晶状体彗差相互补偿,其补偿的结果是使总体的垂轴彗差减小了 2.51%~91.38%。其中,第 16 只眼睛,平面 π_2 的彗差为 $0.28 \mu\text{m}$,平面 π_3 的彗差为 $0.27 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的彗差减小了 2.51%;第 6 只眼睛,平面 π_2 的彗差为 $0.43 \mu\text{m}$,平面 π_3 的彗差为 $0.04 \mu\text{m}$,平面 π_3 比平面 π_2 的彗差减小了 91.38%。

睛不同位置处的波前,通过角膜前、后表面波前的比较,分析了角膜与晶状体像差的补偿关系。结果表明,角膜和晶状体像差存在补偿和叠加两种关系。角膜对全眼像散有较大的影响,大多数眼睛角膜与晶状体像差为相互补偿关系。大多数眼睛,角膜和晶状体的高阶像差表现出相互补偿的关系,尤其是球差和彗差。

利用衍射光学原理,计算得到角膜前平面 π_3 上的波前。对于角膜接触镜的设计,角膜前平面 π_3 上的波前更是为其提供了重要的参考信息。另外,框架眼镜和相位板均是在距离角膜顶点特定位置处对波前像差进行矫正的,利用衍射光学原理,可以对角膜前平面 π_3 后续空间中任意位置处的波前进行计算,从而为框架眼镜和相位板的设计提供必要的工程数据。

参 考 文 献

1 J. Liang, D. R. Williams, D. Miller, Supernormal vision and high resolution imaging through adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**:2884~2892

4 结 论

运用个体眼光学结构和衍射光学原理计算了眼

- 2 Xue Lixia, Rao Xuejun, Wang Cheng *et al.*. Higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):893~897
薛丽霞, 饶学军, 王成等. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统 [J], *光学学报*, 2007, **27**(5): 893~897
- 3 MacRae S. Supernormal vision, hypervision, and customized corneal ablation [J]. *J. Cataract Refract Surg.*, 2000, **26**: 154~157
- 4 Hu Jun-tao, Liu Xiang, Zhang Guo-yong *et al.*. A real-time energy meter for medical excimer laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12):1732~1735
胡俊涛, 刘翔, 张国勇等. 眼科准分子激光实时监控能量计 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1732~1735
- 5 Holger H. Dietze, Michael J. Cox, Correcting ocular spherical aberration with soft contact lenses [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(4):473~485
- 6 Rafael Navarro, Esther Moreno-Barriuso, Salvador Bará, Phase plates for wave-aberration compensation in the human eye [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(4):236~238
- 7 Allen Y. Yi, Thomas W. Raasch, Design and fabrication of a freeform phase plate for high-order ocular aberration correction [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(32):6869~6876
- 8 Pablo A, Guirao A. Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1713~1715
- 9 He J C, Gwiazda J, Thorn F *et al.*. Wave-front aberrations in the anterior corneal surface and the whole eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**:1155~1163
- 10 Wang Wei, Wang Zhaoqi, Wang Yan *et al.*. Wave-front aberrations of cornea and crystalline lens [J]. *Chin. Phys Lett.*, 2006, **23**(3):607~609
- 11 Huanqing Guo, Zhaoqi Wang, Qiuling Zhao, *et al.*, Individual eye model based on wavefront aberration [J]. *Optik*, 2005, **116**(1):80~85
- 12 Wang Yang, Wang Zhaoqi, Liu Ming *et al.*. Study on wavefront aberrations of human eyes at wide field of view based on individual eye model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1727~1733 (in Chinese)
王杨, 王肇圻, 刘铭等. 基于个性化人眼模型的大视场波像差特性的研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1727~1733
- 13 Jorge Pérez, David Mas, Carlos Illueca *et al.*. Complete algorithm for the calculation light patterns inside the ocular media [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, **52**(8):1161~1176
- 14 Wang Jun, Zhao Jian-lin, Fan Qi *et al.*. A novel synthetical method for phase unwrapping [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6):795~799
王军, 赵建林, 范琦等. 相位图去包裹的一种新的综合方法 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):795~799