

doi:10.3788/gzxb20184705.0511002

人眼入射波前像差和出射波前像差的差异

张伊¹, 刘永基¹, 边亚燕¹, 王雁², 林列¹

(1 南开大学 光电信息技术科学教育部重点实验室, 南开大学现代光学所, 天津 300071)

(2 天津市眼科医院, 天津市眼科学与视觉科学重点实验室, 天津 300020)

摘 要:利用临床采集的人眼波前像差、角膜地形图和眼轴数据,在光学软件 Zemax 中构建了 60 只个性化眼模型,得出在瞳孔直径为 6 mm 和 3 mm 时的入射波前像差和出射波前像差.在 6 mm 瞳孔下,入射波前像差大小为 3.753 μm ,出射波前像差大小为 3.074 μm ,差异有统计学意义(显著性值 <0.05).其中,入射波前像差和出射波前像差的离焦项差异大小为 1.131 μm ,约占总差异的 82%.入射波前像差和出射波前像差的球差项差异大小为 0.185 μm ,约占总体差异的 13%.6 mm 瞳孔下,除去高阶像差项,出射波前像差和入射波前像差的离焦项、像散项、彗差项和球差项均具有统计学差异性.而在 3 mm 瞳孔下,入射波前像差为 0.804 μm ,出射波前像差为 0.732 μm ,两者具有统计学差异性(显著性值 <0.05).入射波前像差和出射波前像差的离焦项差异大小为 0.133 μm ,约占总体差异的 80%.除去像散项,出射波前像差和入射波前像差的离焦项、彗差项、球差项和高阶像差项均具有统计学差异性.研究表明,无论在大瞳孔还是在小瞳孔下,人眼的入射波前像差和出射波前像差均具有统计学差异性.

关键词:人眼波前像差;个性化眼模型;Zemax;Hartmann-Shack 像差仪;离焦;像散;彗差;球差;高阶像差

中图分类号:O435.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)05-0511002-8

Difference of Ingoing and Outgoing Wavefront Aberration of Human Eye

ZHANG Yi¹, LIU Yong-ji¹, BIAN Ya-yan¹, WANG Yan², LIN Lie¹

(1 Key Laboratory of Optical Information Science & Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

(2 Tianjin Eye Hospital, Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin 300020, China)

Abstract: Based on the clinical available wavefront aberrations of human eye, corneal topography and axial data, 60 individualized eye models were constructed in the optical software Zemax, with which the ingoing wavefront aberrations and outgoing wavefront aberrations under the pupil diameter of 6 mm and of 3 mm were obtained. When the pupil diameter is 6 mm, the ingoing wavefront aberrations and outgoing wavefront aberrations are 3.753 μm and 3.074 μm , respectively, showing a statistically significant difference($p<0.05$). The difference of defocus between the ingoing wavefront aberrations and outgoing wavefront aberrations is 1.131 μm , which is accounting for 82% of the whole difference. The difference of spherical aberration between the ingoing wavefront aberrations and outgoing wavefront aberrations is 0.185 μm , which contributes 13% of the total difference. Except for higher-order aberrations, the differences in defocus, astigmatism, coma and spherical aberration are statistically different in 6 mm pupil. When the pupil diameter is 3 mm, the ingoing wavefront aberrations and the outgoing wavefront aberrations are 0.804 μm and 0.732 μm , respectively, which difference is statistically

基金项目:国家自然科学基金(No. 11474172), 光学信息技术科学教育部重点实验室(南开大学)开放基金, 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者:张伊(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为视光学. Email: 1979807640@qq.com

导 师:林列(1963-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为生物医学光子学, 光电材料、器件与光学传感等. Email: linlie@nankai.edu.cn

通讯作者:刘永基(1977-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为眼视光学、光学设计等. Email: yjliu@nankai.edu.cn

收稿日期:2017-11-27; **录用日期:**2018-02-06

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

significant ($p < 0.05$). The difference in defocus is $0.133 \mu\text{m}$, which is accounting for 80% of the total difference. Except for astigmatism, difference in defocus, coma, spherical aberration and higher-order aberrations are statistically different. The results of this study show that the difference between the ingoing wavefront aberrations and the outgoing wavefront aberrations of the human eye is statistically significant, both for large pupil and for small pupil.

Key words: Wavefront aberration of the eye; Personalized eye model; Zemax; Hartmann-Shack aberrometer; Defocus; Astigmatism; Coma; Spherical aberration; Higher-order aberrations

OCIS Codes: 110.0110; 220.1010; 330.7326; 330.7327; 220.2740; 170.4470

0 引言

入射波前像差和出射波前像差的比较,对于人工晶体的设计、个性化角膜屈光手术以及波前眼视光技术,具有重要理论意义和临床价值.在测量角膜像差和人眼总体像差时,应明确所测量的角膜像差是入射波前像差还是出射波前像差.无论在眼视光临床还是在眼科学的基础研究领域,眼波前像差仪已成为眼科重要的测量设备.现有的波前像差仪按照测量时光线是进入人眼还是离开人眼可分为入射型波前像差仪和出射型波前像差仪^[1-2].入射型波前像差仪,其测量光束进入人眼经过人眼屈光系统到达视网膜,对应的波前像差称作入射波前像差.入射型像差仪的典型代表为主观像差仪^[3-4],但这种像差仪需要被测者参与,其测量结果具有主观性.出射型波前像差仪,测量光束从视网膜反射经过人眼屈光系统射出人眼,对应的波前像差称为出射波前像差.出射型波前像差仪的典型代表是基于 Hartmann-Shack 波前传感器的像差仪.1994 年梁俊忠^[5]首次提出利用 Hartmann-Shack 波前传感器测量人眼波前像差,指出在人眼入瞳(虹膜经人眼晶状体所成的像)处测量的像差与在人眼出瞳(虹膜经角膜所成的像)处测量的像差是等同的,即入射波前像差和出射波前像差相等.针对这个问题,相关的研究工作相继被报道.

MORENO-BARRIUSO E 等^[6]对 Hartmann-Shack 像差仪和空间分辨折射仪进行了像差测量的比对研究,结果表明两种像差仪的测量结果相同;RODRIGUEZ P 等^[7]报道了采用 Zywave(Hartmann-Shack 像差仪)和双激光波长的光线追迹型像差仪对 5 只普通近视眼的测量结果,结论是对于低度近视人眼,两种像差仪的测试结果近似;THIBOS L N 等^[8]采用 Hartmann-Shack 像差仪和基于 Scheiner 原理的像差仪对 2 只眼进行了像差测量和比对,结论是两种技术测量的波前像差存在差异;汤欣等^[9]对 Hartmann-Shack 像差仪和空间分辨折射仪的测量结果进行了比较,结果表明两种像差仪测量结果存在差异;CADE F 等^[10]比较了 Hartmann-Shack 像差仪和入射波前像差仪,结论是两种像差仪所测量的某些像差项具有统计学差异性;HAO Jing 等^[11]比较了 Hartmann-Shack 像差仪和入射波前像差仪的测量结果,结论是两种像差仪所测量的高阶像差存在差异.

上述研究主要的不足在于,入射波前像差数据由主观像差仪获得,因此波前像差数据不可避免地受到主观因素的影响.更为优化的方案是得到人眼的入射波前像差和出射波前像差的客观数据,并直接比较.对于真正的人眼来说,很难去客观地不依赖于被测者而直接测量入射波前像差,而借助于个性化人眼模型,则可以有效地解决上述问题,直接得到客观的入射波前像差数据.个性化眼模型^[12]已经在人眼像差的研究领域获得了广泛的应用^[13-14],可用于研究色差^[15]、大视场像差^[16]、人眼调节时的像差^[17].因此,本文采用构建眼模型的方式,得到人眼入射波前像差数据和出射波前像差的客观数据,并对其进行比较分析,以研究人眼入射波前像差与出射波前像差是否等同的问题.

1 个性化眼模型的构建

于天津市眼科医院采集了 60 只人眼的眼轴数据、角膜面型数据和波前像差数据.60 只人眼数据来自于天津眼科医院准分子激光原位磨镶术(Laser-assisted in Situ Keratomileusis, LASIK)矫正近视和散光的 30 位患者.患者年龄在 18~45 岁之间,无眼部疾病,全部在 2013 年 2 月至 12 月进行的手术.手术采用 500 kHz 飞秒激光系统,激光能量为 11~120 nJ.术后 6 个月视力开始维持稳定.采集了手术一年后的复查数据,包括眼轴、波前像差、角膜地形图.眼轴长度包括角膜厚度、前房深度、晶状体厚度和玻璃体厚度.角膜厚度和角膜地形图由 Pentacam 三维眼前节分析仪(Oculus, 德国)获得,前房深度、晶状体厚度和玻璃体厚度由 Ultrasonic A/B Scanner(MEDA Co., 中国)超声测厚仪获得.波前像差由基于 Hartmann-Shack 原理的

Wavescan(VISX, 美国)获得.

本课题组的郭欢庆等^[15-17-18]报道了在 Zemax 环境下建立个性化眼模型的方法,该法实际上默认了入射波前像差与出射波前像差相等.为了研究入射波前像差和出射波前像差的差别,本文对个性化眼模型的构建方法进行了改进.根据 Hartmann-Shack 像差仪测量的出射波前像差的特点,首先构建了出射型的个性化眼模型^[19].以 Gullstrand-Le Grand 眼模型的数据构建从视网膜到角膜的出射型标准眼模型,结构参数见表 1,视场角为 0° ,波长为 780 nm.

表 1 出射型标准眼模型参数
Table 1 Parameters of the outgoing standard eye model

Surface type	Radius/mm	Thickness/mm	Refractive index	Abbe number	Semi-diameter/mm
Retina	12.5	17.3	1.336 0	52.8	3.0
Posterior lens	6.0	4.0	1.420 0	49.8	3.2
Anterior lens	-10.2	0.0	1.337 4	52.8	3.3
Pupil	Infinity	3.05	1.337 4	52.8	3.125
Posteriorcornea	-6.5	0.55	1.337 1	55.8	3.4
Anterior cornea	-7.8	0.0	--	--	3.5

采集的角膜地形图数据经 Matlab 和 1stopt 处理之后,再输入到 Zemax 的眼模型中.Zemax 中角膜面型数学表达式为

$$z = \frac{x^2 + y^2}{R + \sqrt{R^2 - (x^2 + y^2)}} + \sum A_i Z_i(x, y) \quad (1)$$

式中, z 为角膜实际高度, x, y 是角膜相对应高度的位置;等式右侧第一部分是标准球面表达式, R 为曲率半径,第二部分为泽尼克多项式之和,其中 Z_i 是第 i 阶泽尼克多项式, A_i 为第 i 阶泽尼克多项式系数.

眼模型中的晶状体通过在 Zemax 中优化得到.首先将实验测量的波前数据进行处理,以便能直接输入 Zemax 中^[18].其次,在眼模型后面设置一个焦距为 f 的理想透镜,理想透镜到眼模型出瞳的距离为 $2f$,这样的设计是为了保证出瞳直径不变.最后,将测量得到的波前像差设为优化目标,优化晶状体.晶状体的优化分为两步:1)优化晶状体前后表面的曲率半径和非球面系数,并保证这些数据符合生理学结果;2)对晶状体的前表面进行了更为细致的优化,即选择了 Zernike Standard Sag 面型进行细优化,进而确定晶状体的参数.优化后眼模型的波前像差具有和测量的波前像差相同的数值,与临床结果完全对应.此眼模型被称为出射型眼模型,它的波前像差称为出射波前像差.出射型个性化眼模型建立完成后,在 Zemax 中将整个模型调转方向,得到入射型个性化眼模型,其给出的波前像差称为入射波前像差.

利用采集的人眼相关数据,建立了出射型眼模型和入射型眼模型,如图 1 和 2.由于人眼对 550 nm 的光最为敏感,所以在构建完出射型眼模型和入射型眼模型之后,将波长改为 550 nm,并得到相应的以 Zernike 多项式表示的波前像差数据.另外,由于建模时瞳孔大小与测量像差时瞳孔大小一致,一般大于等于 6 mm.为了统一比较,将瞳孔直径改为 6 mm,首先分析暗视觉下的波前像差情形.而后将眼模型的瞳孔直径改为 3 mm,进一步研究明视觉下小瞳孔的情形.

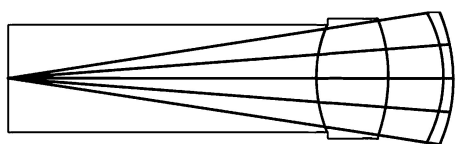


图 1 出射型个性化人眼模型结构图(光线向右侧传播)
Fig.1 Structure of the outgoing personalized eye model
(the light traveling to the right)

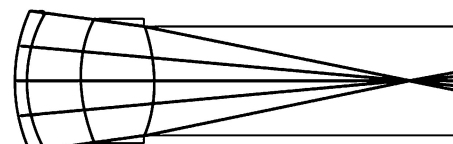


图 2 入射型个性化人眼模型结构图(光线向右侧传播)
Fig.2 Structure of the ingoing personalized eye model
(the light traveling to the right)

根据临床采集的数据,构建了 60 只眼模型.眼模型的构建在 Zemax(ZEMAX-EE 2009 专业版,ZEMAX Development Corporation)软件中完成,统计分析用 SPSS19.0(IBM SPSS Statistic 19)软件完成.

2 结果分析与对比

2.1 结果分析

对于 60 份角膜地形图数据,用式(1)通过 Matlab 和 1stopt 软件将角膜面型拟合成 Zernike Standard Sag 面型.所有角膜面型的拟合精度都小于 $1 \mu\text{m}$.个性化眼模型的像差优化目标是优化后眼模型的波前像差具有和测量的波前像差相同的数值.统计分析了眼模型的优化精度,其精度值都小于 $0.02 \mu\text{m}$.

每只眼模型的各项像差(离焦、像散、彗差、球差和高阶像差)大小可表示为

$$Z_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum Z_m} \quad (2)$$

式中, Z_m 为用 Zernike 多项式表示的波前像差的各项系数,单位为 μm .其中,离焦项是 z_4 ,像散项是 z_3, z_5 ,彗差项是 z_7, z_8 ,球差项(Spherical Aberration, SA)是 z_{12} ,高阶像差项(Higher-order Aberration, HOA)是二阶像散项 z_{11}, z_{13} 以及 $z_{14} - z_{28}$.

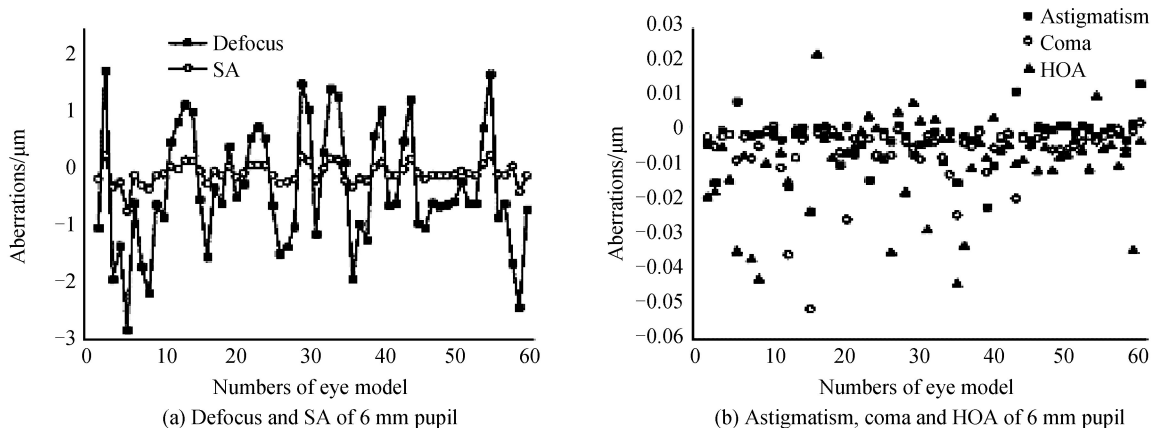
首先给出了两个瞳孔下 60 只人眼入射波前像差与出射波前像差的离焦项、像散项、彗差项、球差项和高阶像差项以及它们差值的统计平均值($\bar{x} \pm SD$),并用配对 t 检验法分析了入射波前像差与出射波前像差统计学差异情况.其中,表 2 中的差值表示的是出射波前像差-入射波前像差.由表 2 知,除去 6 mm 瞳孔下的高阶像差项和 3 mm 瞳孔下的像散项之外,不同瞳孔下入射波前像差与出射波前像差的各项差异均具有统计学意义.

表 2 不同瞳孔人眼模型入射波前像差与出射波前像差统计(单位: μm)

Table 2 Statistics of outgoing wavefront aberrations and ingoing wavefront aberrations with different pupils(unit: μm)

	Parameters	Average of outgoing	Average of ingoing	Difference	P value
6 mm	Defocus	1.425 ± 0.930	1.764 ± 1.417	-0.339 ± 1.088	0.019
	Astigmatism	0.443 ± 0.390	0.446 ± 0.389	-0.002 ± 0.007	0.013
	Coma	0.339 ± 0.148	0.347 ± 0.152	-0.005 ± 0.009	<0.05
	SA	0.077 ± 0.123	0.135 ± 0.204	-0.057 ± 0.177	0.015
	HOA	0.230 ± 0.386	0.230 ± 0.401	0.001 ± 0.037	0.893
3 mm	Defocus	0.253 ± 0.259	0.295 ± 0.340	-0.042 ± 0.127	0.013
	Astigmatism	0.114 ± 0.082	0.114 ± 0.081	-0.000 ± 0.003	0.341
	Coma	0.053 ± 0.025	0.054 ± 0.025	-0.001 ± 0.002	0.004
	SA	0.033 ± 0.083	0.039 ± 0.063	-0.007 ± 0.024	0.033
	HOA	0.033 ± 0.121	0.033 ± 0.120	0.001 ± 0.001	<0.05

为了了解每只眼模型各项像差,进一步给出了 6 mm 和 3 mm 瞳孔下,每个个体眼模型入射波前像差和出射波前像差中离焦项、球差项、像散项、彗差项和高阶像差项的差异情况,如图 3.差值大小表示出射波前像差-入射波前像差.由图可知,不论大瞳孔还是小瞳孔,入射波前像差与出射波前像差的离焦项差异最大,其次是球差项,然后是高阶像差项,像散项和彗差项差异都较小.相比于 6 mm 瞳孔,3 mm 瞳孔下的入射波前像差与出射波前像差差异较小.对于 60 只眼模型,不论瞳孔大小,约有 40 只眼模型(占 67%)的入射波前像差的离焦项大于出射波前像差的离焦项,约有 20 只人眼模型(占 33%)则表现为出射波前像差的离焦项



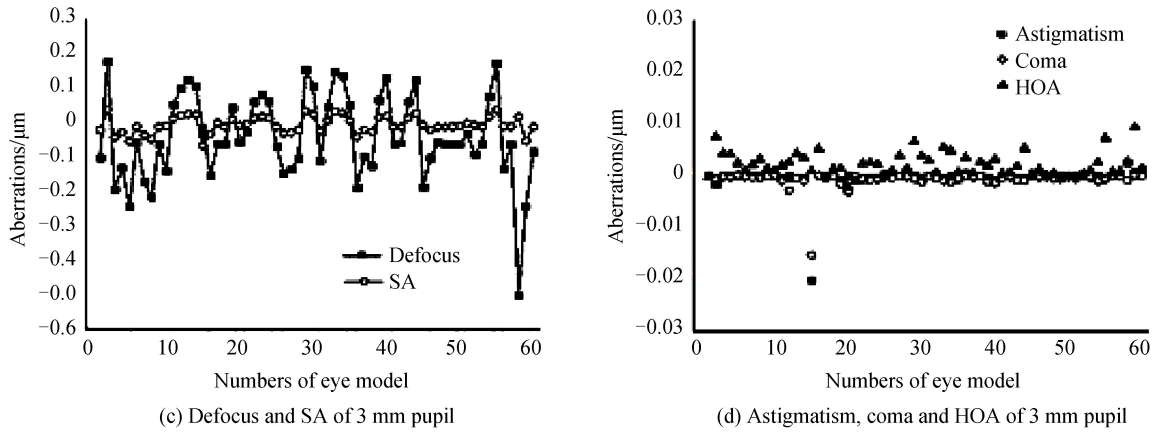


图3 不同瞳孔下60只眼模型入射波前像差与出射波前像差差异

Fig.3 Difference between outgoing wavefront aberrations and ingoing wavefront aberrations of 60 eye models

大于入射波前像差的离焦项。

由于离焦和像散与临床验光有关,为了与临床数据匹配,将以微米为单位的离焦项(z_4)和像散项(z_3 、 z_5)换算成以屈光度为单位的数值.离焦和像散的换算公式^[20]为

$$M = \frac{4\sqrt{3} \times z_4 \times \lambda}{r^2} \quad (3)$$

$$J = \frac{2\sqrt{6} \times \sqrt{z_3^2 + z_5^2} \times \lambda}{r^2} \quad (4)$$

式中, M 、 J 分别为以屈光度为单位的离焦和像散值, z_3 、 z_4 、 z_5 是 Zernike 系数.表3给出了不同瞳孔下,以屈光度为单位的入射波前像差和出射波前像差中的离焦项和像散项统计数据.表中的差值表示为出射方向的离焦项或像散项-入射方向的离焦项或像散项。

由表3可以看到,6 mm 瞳孔下入射波前像差的离焦项统计平均值是出射波前像差离焦项的1.24倍,入射波前像差的像散项统计平均值近似等同于出射波前像差的像散统计平均值,且均具有统计学差异性.3 mm 瞳孔下,入射波前像差的离焦项统计平均值比出射波前像差的离焦项大0.129 D,具有统计学差异性;入射波前像差的像散项统计平均值与出射波前像差的像散统计平均值不具有统计学差异性(显著性值 $p > 0.05$).

表3 以屈光度为单位的离焦和像散统计(单位:D)

Table 3 Defocus and astigmatism statistics in units of diopters (unit: diopter D)

Pupil diameter	Aberrations	Average of outgoing	Average of ingoing	Difference
6 mm pupil	Defocus	1.097±0.716	1.358±1.091	-0.261±0.838
	Astigmatism	0.241±0.212	0.243±0.212	-0.002±0.005
3 mm pupil	Defocus	0.779±0.799	0.908±1.048	-0.129±0.391
	Astigmatism	0.062±0.044	0.062±0.044	-0.000±0.002

为了能客观知道并比较入射波前像差与出射波前像差,给出了不同瞳孔下,60只眼模型入射波前像差和出射波前像差中各项像差的均方根值(Root mean square, RMS_{mean})以及它们的差值,如表4.其中差值表示为:60只眼模型,每只眼模型的入射波前像差和出射波前像差中各项像差作差,之后再对60只眼模型每项像差的差值求均方根.值得注意的是,该处的 RMS_{mean} 值是针对于总体的60只人眼模型.由于每只人眼模型产生的各项像差中有正有负,所以采用 RMS_{mean} 值来表示60只眼模型中各项像差的一个平均数值大小,公式为

$$RMS_{mean} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_{59}^2 + x_{60}^2}{60}} \quad (5)$$

式中, x_N ($N=1,2,\dots,60$)表示60只人眼模型中第 N 只眼模型产生的某项像差。

表 4 60 只眼模型入射波前像差与出射波前像差中的各项像差均方根 RMS_{mean} 值(单位: μm)
 Table 4 Outgoing wavefront aberrations and ingoing wavefront aberrations RMS_{mean} value of 60 eye models(unit: μm)

	6 mm pupil			3 mm pupil		
	Outgoing	Ingoing	Difference	Outgoing	Ingoing	Difference
Defocus	1.697	2.255	1.131	0.361	0.448	0.133
Astigmatism	0.416	0.417	0.010	0.099	0.099	0.004
Coma	0.370	0.379	0.015	0.058	0.059	0.003
SA	0.144	0.243	0.185	0.089	0.074	0.025
HOA	0.447	0.459	0.037	0.125	0.124	0.001
Sum	3.074	3.753	1.378	0.732	0.804	0.166

由表可知,不论是瞳孔还是小瞳孔,入射波前像差都大于出射波前像差.而且对于入射波前像差和出射波前像差来说,离焦项都占主要部分,超过总像差的 50%,其次为高阶像差项,然后像散项,球差项所占比例最小.对于 6 mm 瞳孔,入射波前像差与出射波前像差存在明显差异.其中,入射波前像差与出射波前像差的离焦项之差为 $1.131 \mu m$,约占总体差异的 82%,球差项差异为 $0.185 \mu m$,约占总体差异的 13%.入射波前像差和出射波前像差的像散项、彗差项和高阶像差项的差异则较小.而对于 3 mm 瞳孔,入射波前像差与出射波前像差的离焦项之差为 $0.133 \mu m$,约占总体差异的 80%.表 4 表明,相比于 6 mm 瞳孔,3 mm 瞳孔下入射波前像差与出射波前像差之间的差异较小.

2.2 与现有研究的对比

现有的多项研究比较了出射型像差仪和入射型像差仪的测量结果.文献[8]中,在 5.6 mm 瞳孔下, Hartmann-Shack 像差仪和入射像差仪这两种测量技术下的波前差异 RMS_{mean} 值分别为 $0.32 \mu m$ 和 $0.11 \mu m$ (除去离焦项和像散项),其中球差占据这种差异的主要部分.本文的模拟结果也表明,除去离焦和像散后,球差占差异的主要部分.且 6 mm 瞳孔下除去离焦项和像散项后,入射波前像差与出射波前像差的 RMS_{mean} 差异平均值为 $0.237 \mu m$,与他们的报道结果接近.文献[6]中显示在 6.6 mm 瞳孔直径下,其中一只人眼的入射波前像差与出射波前像差的离焦项(z_4)差异接近 $1 \mu m$,另一只人眼入射波前像差与出射波前像差的离焦项(z_4)之差约为 $0.5 \mu m$.这与本文的模拟结论 6 mm 瞳孔下,入射波前像差与出射波前像差的离焦项有 $1.131 \mu m$ 的差异接近.文献[21]中的实验结果表明入射波前像差和出射波前像差并不是完全相同的,其中,入射波前像差和出射波前像差的离焦项(z_4)差异约为 $0.5 \mu m$;文献[9]中出射像差仪和入射像差仪测量结果表明,5 mm 瞳孔下,Zernike 系数 z_3 、 z_4 、 z_6 、 z_{11} 、 z_{12} 、 z_{20} 项差异具有统计学意义,其余 Zernike 系数均无统计学意义.这与本文中入射波前像差与出射波前像差的离焦项(z_4)和球差项(z_{12})差异存在统计学意义的结论一致.以上文献报道均显示入射波前像差和出射波前像差存在差异,且有的人眼入射波前像差大于出射波前像差,有的人眼则相反,与本文模拟结果接近.而文献[7]中,在 6.5 mm 瞳孔下,除去离焦项和像散项(z_3 、 z_4 、 z_5),对于低度近视人眼出射像差仪与入射像差仪的测量结果接近,与本文的结论相反.

现有文献报道中有一些与本文数据不完全相符,这是由于这些研究大多通过主观像差仪得到入射波前像差,结果有一定主观因素存在,且不同的像差仪器之间的设备误差也较难控制.另外,不同文献所报道的不同像差仪测量像差时所用的波长不一样,且他们在测量像差时的瞳孔大小也不同.本文利用人眼模型,克服了主观像差仪带来的主观因素的干扰,统一了波长和瞳孔直径,从理论上分析了 60 只人眼模型入射波前像差和出射波前像差,且统计结果表明入射波前像差和出射波前像差存在统计学差异性.对于 6 mm 瞳孔,入射波前像差和出射波前像差存在明显差异;而对于 3 mm 瞳孔,入射波前像差和出射波前像差差异很小.

理想情况下,光线进入人眼,经过屈光系统,所有光线会聚于视网膜上一点.但实际上,由于像差的存在,进入人眼的光线并不能会聚到视网膜上.主观像差仪所测量的入射波前像差是光线进入人眼实际成像时所产生的像差.Hartmann-Shack 像差仪测量像差时的基本原理是:在视网膜上的一点光源,经过人眼屈光系统射出人眼时产生的像差与人眼实际成像时产生的像差一致.图 4 是主观像差仪和 Hartmann-Shack 像差仪测量像差时的示意图.图中实线表示主观像差仪的测量过程,虚线表示 Hartmann-Shack 像差仪的测量过程.其中 F' 为视网膜与光轴的交点.由图知,只有在理想情况下,即点 A 与 F' 重合时,光线进入人眼的光路才可等同于光线从人眼射出时的光路.但是由于人眼有像差存在,导致 Hartmann-Shack 像差仪的测量光路与主观

像差仪的测量光路不同,所以两个过程中所测量的波前像差是不一样的,即入射波前像差与出射波前像差存在差异.且瞳孔越大,人眼所产生的像差也越大,即点 A 与 F' 的距离越大,像差仪所测量的入射波前像差与出射波前像差的差异也就越大.

研究结果初步表明,在人工晶体设计和个性化角膜屈光手术中测量角膜像差和人眼总体像差时,用入射波前像差作为指导更为准确.

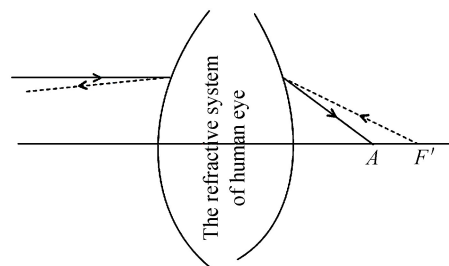


图4 理论分析光路

Fig.4 Optical path of theoretical analysis

3 结论

本文改进了以往眼模型构建方法中存在的不足,根据实测的 60 只人眼结构数据和波前像差数据构建了个性化眼模型,得到人眼出射波前像差和入射波前像差的客观数据,并对其进行了比较.分析结果表明:不论瞳孔大小,人眼的入射波前像差和出射波前像差均存在差异,且有超过 50% 的眼模型的入射波前像差大于出射波前像差,其余的眼模型存在相反的情况.离焦项是出射波前像差与入射波前像差存在差异的主要因素,球差次之.6 mm 瞳孔下,出射波前像差与入射波前像差的离焦项统计平均值之差为 $0.339 \mu\text{m}$,球差项的统计平均值差异为 $0.057 \mu\text{m}$.除去高阶像差项,出射波前像差和入射波前像差的离焦项、彗差项、球差项均具有统计学差异性.3 mm 瞳孔下,出射波前像差与入射波前像差的离焦项统计平均值之差为 $0.042 \mu\text{m}$,球差项的统计平均值差异为 $0.007 \mu\text{m}$.除去像散项,出射波前像差和入射波前像差的离焦项、彗差项、球差项和高阶像差均具有统计学差异性.

参考文献

- [1] ROZEMA J J, VAN DYCK D E M, TASSIGNON M J. Clinical comparison of 6 aberrations. Part1: Technical specifications[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2005, **31**(6): 1114-1127.
- [2] CERVINO A, HOSKING S L, MONTES-MICO R. Clinical ocular wavefront analyzers[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2007, **23**(6): 603-616.
- [3] HOWLAND B, HOWLAND H C. Subjective measurement of high order aberrations of the eye[J].*Science*, 1976, **193** (4253): 580-582.
- [4] BURNS SA. The spatially resolved refractometer[J].*Journal of Refractive Surgery*, 2000, **16**(5):S566-569.
- [5] LIANG Jun-zhong, GRIMM B, GOELZ S, et al. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, **11**(7): 1949-1957.
- [6] MORENO-BARRIUSO E, MARCOS S, NAVARRO R. Comparing laser ray tracing, the spatially resolved refractometer, and the Hartmann-Shacksensor to measure the ocular wave aberration[J].*Optometry and Vision Science*, 2001, **78**(3): 152-156.
- [7] RODRIGUEZ P, NAVARRO R, GONZALEZ L. Accuracy and reproducibility of Zywave, Tracey, and experimental Aberrometers[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2004, **20**(6): 810-817.
- [8] SALMON T O, THIBOS L N, BRADLEY A. Comparison of the eye's wave-front aberration measured psychophysically and with the Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 1998, **15**(9): 2457-2465.
- [9] TANG Xin, ZHU Yan-xia. Comparison of different wavefront aberrometers for measuring the wavefront aberrations of eyes with intraocular lenses[J]. *Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology*, 2009, **11**(2): 102-106.
汤欣,朱彦霞.不同原理波前像差仪测量人工晶状体眼像差的比较[J]. *眼视光学杂志*, 2009, **11**(2): 102-106.
- [10] CADE F, CRUZAT A, PASCHALIS E I, et al. Analysis of four aberrometers for evaluating lower and higher order aberrations[J]. *Plos One*, 2013, **8**(1): e54990.
- [11] HAO Jing, LI Lin, TIAN Fang, et al. Comparison of two types of visual quality analyzer for the measurement of high order aberrations[J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2016, **9**(2): 292-297.
- [12] ATCHISON D A, THIBOS L N. Optical models of the human eye[J].*Clinical and Experimental Optometry*, 2016, **99**(2): 99-106.
- [13] ESCUDERO-SANZ I, NAVARRO R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 1999, **16**(8): 1881-1891.
- [14] NAVARRO R, GONZALEA L, HERNANDEZ-MATAMOROS J L. On the prediction of optical aberrations by personalized eye models[J]. *Optometry and Vision Science*, 2006, **83**(6): 371-381 .
- [15] LIU Ming, WANG Zhao-qi, WANG Yan, et al. The study of wavelength-dependent wavefront aberrations based on

- individual eye model[J]. *Optik*, 2008, **119**(8): 383-387.
- [16] LOU Qi-qi, WANG Zhao-qi, WANG Yan, *et al.* Investigation of aberration characteristics of eyes at a peripheral visual field by individual eye model[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(25): 7490-7493.
- [17] WANG Yang, WANG Zhao-qi, GUO Huan-qing, *et al.* Wavefront aberrations in the accommodated human eye based on individual eye model[J]. *Optik*, 2007, **118**(6): 271-277.
- [18] GUO Huan-qing, WANG Zhao-qi, ZHAO Qiu-ling, *et al.* Individual eye model based on wavefront aberration[J]. *Optik*, 2004, **116**(2): 80-85.
- [19] POLANS J, TAEKEN B, MCNABB R P, *et al.* Wide-field optical model of the human eye with asymmetrically tilted and decentered lens that reproduces measured ocular aberrations[J]. *Optica*, 2015, **2**(2): 124-134.
- [20] ATCHISON D A, GUO H Q, CHARMAN W N. Blur limits for defocus, astigmatism and trefoil[J]. *Vision Research*, 2009, **49**(19): 2393-2403.
- [21] MORENO-BARRIUSO E, NAVARRO R. Laser ray tracing versus Hartmann-Shack sensor for measuring optical aberrations in the human eye[J]. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision*, 2000, **17**(6): 974-985.