

文章编号: 0253-2239(2006)11-1727-7

基于个性化人眼模型的大视场波像差特性的研究*

王 杨¹ 王肇圻¹ 刘 铭¹ 王 雁² 左 彤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: 大视场波前像差对人眼光学系统的影响不容忽视。运用 Zemax 光学设计软件分别为 8 只正常人眼构建了个性化的人眼模型, 该人眼模型由实际测量的人眼波前像差数据、角膜地形数据及眼内各部分轴向间距数据优化得来, 与个体人眼具有相同的光学特性。在此基础上, 分析了人眼颞侧方向 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° 视场的离轴像差随视场角的变化趋势, 得出边缘视觉比中央视觉质量差主要来源于像散与彗差。四阶以上的高阶像差随着视场角的改变, 变化不大。将个性化人眼模型计算得到的大视场波前像差值与用哈特曼-夏克 (Hartmann-Shack) 波前传感器实际测量得到的人眼像差值相比较, 两者结果相吻合。

关键词: 医用光学与生物技术; 视觉光学; 大视场波前像差; 个性化人眼模型

中图分类号: O435 文献标识码: A

Study on Wavefront Aberrations of Human Eyes at Wide Field of View Based on Individual Eye Model

Wang Yang¹ Wang Zhaoqi¹ Liu Ming¹ Wang Yan² Zuo Tong²

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

Abstract: The influence of aberrations at wide field of view on the optical system of human eyes cannot be neglected. The optical design software Zemax is used to construct the individual eye models for eight normal eyes. The individual eye model, which is optimized from actual wavefront aberrations measurement data, cornea parameter data and eye's axial lengths data, has the same optical characteristics with the actual eye. The variation trend of off-axis aberrations at temporal angles of vision (0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°) with the field of view is analyzed based on individual eye model. The peripheral optical quality is poorer than the central optical quality and the oblique astigmatism and coma are the chief factors. Aberrations above the 4th order do not show an obvious variation with the angles of vision. The aberrations at wide field of view calculated from the individual eye model are in good agreement with those measured with a Hartmann-Shack wavefront sensor.

Key words: medical optics and biotechnology; visual optics; wavefront aberrations at wide field of view; individual eye model

1 引 言

随着波前像差测量技术的发展, 改善人眼的视觉质量逐渐成为世界范围内的研究热点。许多文献报道了零度视场条件下波前像差对人眼成像质量的影响^[1~4]。人眼的视网膜上的视杆细胞在距中央凹

20° 的视场角处密度最大, 在 50°~60° 视场角处, 视杆细胞密度下降到一半。为了更好地理解边缘视觉对人眼视觉质量的影响, 测量与分析大视场波前像差具有重要的意义。

Rafael Navarro^[4] 采用光线追迹法测量了 4 只

* 国家自然科学基金重点项目(60438030)、教育部南开大学天津大学合作基金项目和天津市科技攻关项目(033183711)资助课题。

作者简介: 王 杨(1979~), 女, 山东烟台人, 天津南开大学现代光学研究所博士研究生, 主要从事视觉光学的研究。
E-mail: please1615@sohu.com

导师简介: 王肇圻(1944~), 男, 山东人, 天津南开大学现代光学研究所研究员, 博士生导师, 主要从事信息光学处理的研究。
E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-03-07; 收到修改稿日期: 2006-04-14

人眼在颞侧方向 $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 视角的离轴像差, 给出了各阶像差泽尼克(Zernike)系数的变化趋势。尽管四只眼睛在大视场像差的变化幅度上有所不同, 但变化趋势大致吻合^[5]。Antonio Guirao^[6] 采用双程技术分析了 4 只人眼在颞侧方向 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 视角的像散及彗差的变化。David A. Atchison^[7] 采用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前技术测量了五只人眼分别在鼻侧和颞侧 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 视角的离轴像差, 报道了三阶及以上的高阶像差的变化趋势。

本文运用光学设计软件 Zemax 为 8 只人眼分别构建了个性化人眼模型, 在实际测量得到人眼角膜地形、眼内各部分轴向长度的基础上, 引入零视场人眼的波前像差数据, 优化晶状体结构, 使得针对某个个体所构造的模型眼具有与该眼相同的波前像差。分析了人眼颞侧方向 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 视角的像差变化趋势, 并将该数据与用哈特曼-夏克波前传感器实际测量的人眼大视场像差数据作比较, 两者结果吻合。迄今为止, 由个性化人眼模型分析人眼离轴像差的方法尚少有报道。

2 大视场波像差的测量方法

人眼波前像差的测量技术有许多种, 主要分主观法和客观法两大类^[8,9]。使用哈特曼-夏克波前传感器^[10] 提供实际人眼的像差数据, 基于哈特曼-夏克波前传感器的人眼大视场波像差的测量原理如图 1 所示。

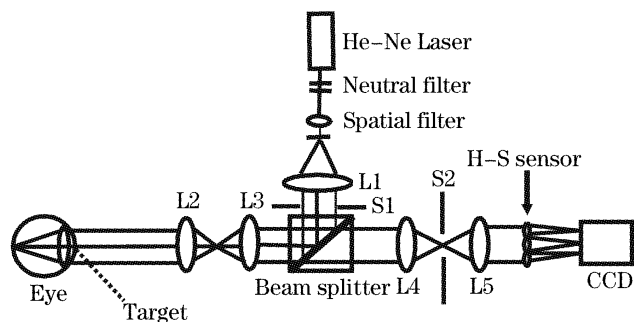


图 1 哈特曼-夏克波前传感器测量大视场波前像差原理图
Fig. 1 Schematic diagram of Hartmann-Shack wavefront sensor used to measure the wavefront aberrations at wide field of view

激光器发出的光经中性滤波片与空间滤波器后, 被透镜 L1 准直, 入射到人眼, 在视网膜上形成一点光源。进入人眼的光功率约为 $40 \mu\text{W}$, 低于美国国家标准协会所允许的最大激光安全功率。从视网膜中漫反射的光带有人眼的像差信息, 经过透镜

组 L2、L3、L4、L5 后, 成像在微透镜阵列上, 带有像差信息的波前被透镜阵列聚焦后, 由 CCD 接收。由此形成的点阵与微透镜阵列的标准点阵之间有偏移, 根据这些局部偏移量, 轴上点的波前像差可被计算出来。调节目标物的入射角度, 保持眼睛注视目标物, 此时被 CCD 记录下来的波前即是轴外点的波前。

分别测量了 8 只人眼的大视场波前像差, 眼睛的离焦屈光度范围为 $-2.0 \sim 0.0 \text{ D}$ (人工验光), 散光值均小于 0.5 D (人工验光)。被测者年龄在 $20 \sim 35$ 岁之间。测量时人眼瞳孔大小为 6 mm 。水平视场角以 10° 为间隔, 变化范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$ 。为避免药物对眼睛波像差的影响, 被测者的瞳孔在暗室条件下自然放大, 未使用散瞳。

3 个性化人眼模型的构建及大视场波像差的计算

全眼的零视场波前像差对整个人眼光学系统的特性来讲至关重要。采用哈特曼夏克波前传感器分别测量了 8 只人眼的零视场波前像差, 取前 35 项泽尼克系数。

角膜承担了整个人眼屈光系统的 $2/3$ 屈光度, 其形状的变化会对人眼光学系统的成像产生很大的影响。在个性化人眼模型的构建过程中, 对角膜表面的精确拟合非常重要。采用 Orbscan II 型角膜地形仪测量角膜表面相对于参考球面的高度值。由该角膜地形仪测量得到的角膜表面的高度数据是沿径向的数值, 运用数值计算软件 Matlab 将其换算为沿垂直方向的高度差, 并拟合出角膜表面形状。用最小二乘法将角膜面型分解成泽尼克多项式的表达形式。

采用医用 BMF-200 A/B 超声波测厚仪测量人眼内各部分轴向间距值。超声波测厚仪具有定位准确性高、轴向分辨力强的优点, 其测量精度可达到 0.01 mm 。对每只眼睛测量 10 次取平均值。将该数值输入到 Zemax 软件中构建个性化眼模型。

活体人眼晶状体的形状很难测量。为了精确拟合晶状体的表面形状, 运用 Zemax 软件的优化功能, 将实际测量的零视场波前像差作为评价函数, 在已有的角膜形状和眼内各部分轴向间距值的基础上, 优化得到实际人眼的晶状体形状。个性化的人眼模型已构建完成。将物距设定为 1100 mm , 将全眼光学系统的视场角分别设定为 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 。从 Zemax 软件中直接计算得到各视场条件下的波前像差。为了更加清楚地描述个性化眼模型,

表 1、表 2 和表 3 分别给出了 8 只正常人眼所对应的个性化人眼模型的基本参量,角膜前后表面的拟合参量以及优化后晶状体的结构参量。

如表 2 与表 3 所示,角膜与晶状体的前后表面面型以泽尼克系数的形式给出。因空间所限,这里各列出了其中五项。该系数所对应的泽尼克多项式的顺序与 Zemax 中的泽尼克多项式的表达形式一致。

表 1 个性化眼模型的基本参量

Table 1 Parameters of individual eye model

Wavelength / μm		0.55
Wide field/($^\circ$)		10~50
Medium refractive index inside eye	Cornea	1.377
	Anterior chamber	1.337
	Lens	1.420
	Vitreous body	1.336

表 2 Zemax 软件中角膜前后表面拟合的泽尼克系数

Table 2 Zernike coefficients of corneal surface in Zemax

Eye number	Refractive surface	Five Zernike coefficients				
		Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
1	Corneal anterior surface	-0.0068	0.0031	-0.0009	0.0014	0.0016
	Corneal posterior surface	-0.0074	0.0002	0.0013	0.0044	-0.0019
2	Corneal anterior surface	-0.0027	-0.0062	-0.0011	-0.0003	-0.0016
	Corneal posterior surface	-0.0036	-0.0139	-0.0065	0.0012	-0.0084
3	Corneal anterior surface	-0.0044	0.0007	-0.0048	0.0004	-0.0013
	Corneal posterior surface	-0.0215	0.0020	-0.0081	0.0012	-0.0069
4	Corneal anterior surface	-0.0039	0.0022	0.0018	0.0007	-0.0032
	Corneal posterior surface	-0.0102	-0.0009	-0.0021	0.0012	0.0004
5	Corneal anterior surface	-0.0064	0.0018	-0.0001	0.0016	0.0019
	Corneal posterior surface	-0.0104	-0.0039	0.0018	0.0018	-0.0090
6	Corneal anterior surface	-0.0044	0.0001	0.0008	0.0018	-0.0007
	Corneal posterior surface	-0.0112	-0.0075	0.0102	0.0035	0.0035
7	Corneal anterior surface	-0.0072	-0.0042	0.0005	0.0013	-0.0031
	Corneal posterior surface	-0.0230	-0.0022	0.0095	0.0037	0.0001
8	Corneal anterior surface	-0.0035	-0.0013	-0.0007	0.0001	-0.0013
	Corneal posterior surface	-0.0221	0.0055	0.0047	0.0005	-0.0112

表 3 优化后的晶状体结构的泽尼克系数

Table 3 Optimized Zernike coefficients of crystalline lens after optimizing

Eye number	Refractive surface	Five Zernike coefficients				
		Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
1	Anterior surface of lens	-0.0977	0.0015	0.0002	-0.0031	-0.0012
	Posterior surface of lens	0.1509	-0.0024	0.0005	0.0026	0.0007
2	Anterior surface of lens	-0.0556	0.0008	0.0017	0.0003	0.0001
	Posterior surface of lens	0.0918	-0.0013	-0.0027	-0.0006	-0.0001
3	Anterior surface of lens	-0.1086	0.0029	-0.0011	0.0007	0.0017
	Posterior surface of lens	0.1603	-0.0051	0.0015	0.0003	-0.0003
4	Anterior surface of lens	-0.1009	-0.0016	-0.0004	0.0051	-0.0024
	Posterior surface of lens	0.1624	0.0028	0.0012	-0.0026	0.0026
5	Anterior surface of lens	-0.0859	0.0003	-0.0017	-0.0036	-0.0024
	Posterior surface of lens	0.1396	-0.0005	0.0027	0.0034	0.0026
6	Anterior surface of lens	-0.0847	-0.0003	-0.0017	0.0026	-0.0027
	Posterior surface of lens	0.1385	0.0003	0.0026	-0.0013	0.0018
7	Anterior surface of lens	-0.0423	-0.0010	0.0044	0.0014	-0.0007
	Posterior surface of lens	0.0754	0.0024	-0.0067	-0.0039	0.0024
8	Anterior surface of lens	-0.1182	0.0009	0.0018	0.0004	0.0011
	Posterior surface of lens	0.1759	-0.0015	-0.0024	0.0001	-0.0006

4 结果分析

图 2 为哈特曼-夏克波前传感器测量得到的大视场波前像差与由个性化人眼模型计算得到的 8 只人眼的大视场波前像差数据的 RMS 值。图中横坐

标为不同的视场角,纵坐标为 RMS 值,单位为 μm 。斜条柱形表示由眼模型计算得到的 RMS 值,白色柱形表示由哈特曼夏克波前传感器实际测量得到的 RMS 值。

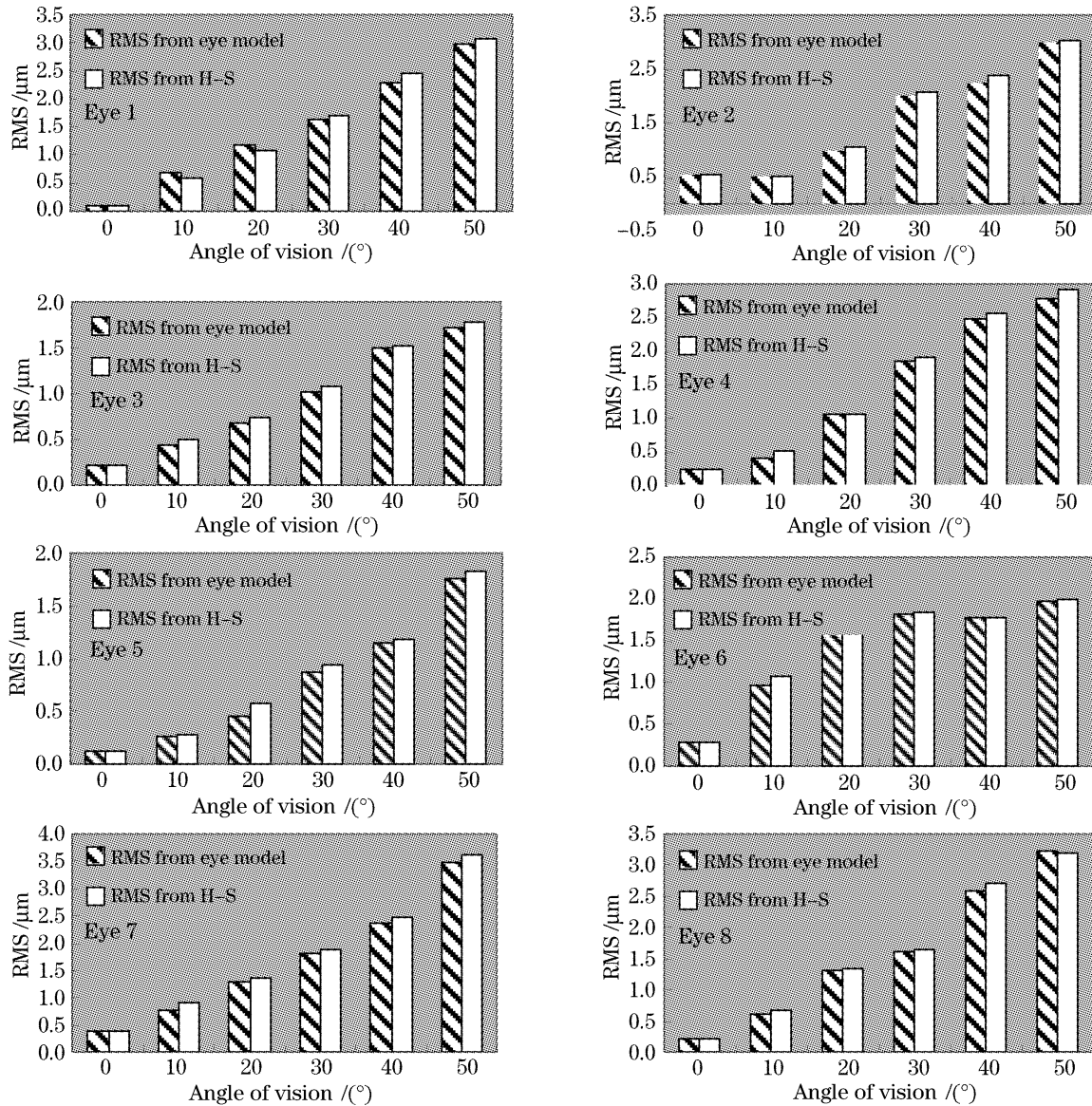


图 2 由眼模型计算得到的 RMS 值与由哈特曼-夏克波前传感器实际测量得到的 RMS 值的对比

Fig. 2 RMS values calculated from individual eye model and measured from Hartmann-Shack wavefront sensor

倾斜项与离焦项已经去除。可以看出,由眼模型计算得到的 RMS 值与由哈特曼-夏克波前传感器测量得到的 RMS 值接近。其中第一只眼睛在 40° 视场角时的 RMS 值之差最大,为 $0.22 \mu\text{m}$ 。而第二只眼睛在 10° 视场角时的 RMS 值之差最小,为 $0.01 \mu\text{m}$ 。大多数人眼,随着视场角由 $0^\circ \sim 50^\circ$ 变化,眼睛的像差也随之增大。比如,第一只眼睛在 0° 视场时的波前像差 RMS 值为 $0.10 \mu\text{m}$,在 50° 视场时波前像差的 RMS 值增大到 $2.96 \mu\text{m}$ 。但第六只眼

睛的情况有些例外,在 0° 视场时波前像差的 RMS 值为 $0.28 \mu\text{m}$,在 40° 视场时,像差值稍有下降为 $1.77 \mu\text{m}$,到 50° 视场时,像差值又上升为 $1.96 \mu\text{m}$ 。分析可知,人眼的边缘视觉与中央凹的视觉质量相比,下降很大。

图 3 为像散随着视场角的变化关系图。图中横坐标表示不同的视场角,纵坐标表示像散值,单位为 μm 。虚线表示由眼模型计算得到的像散,实线表示由哈特曼-夏克波前传感器实际测量得到的像散。

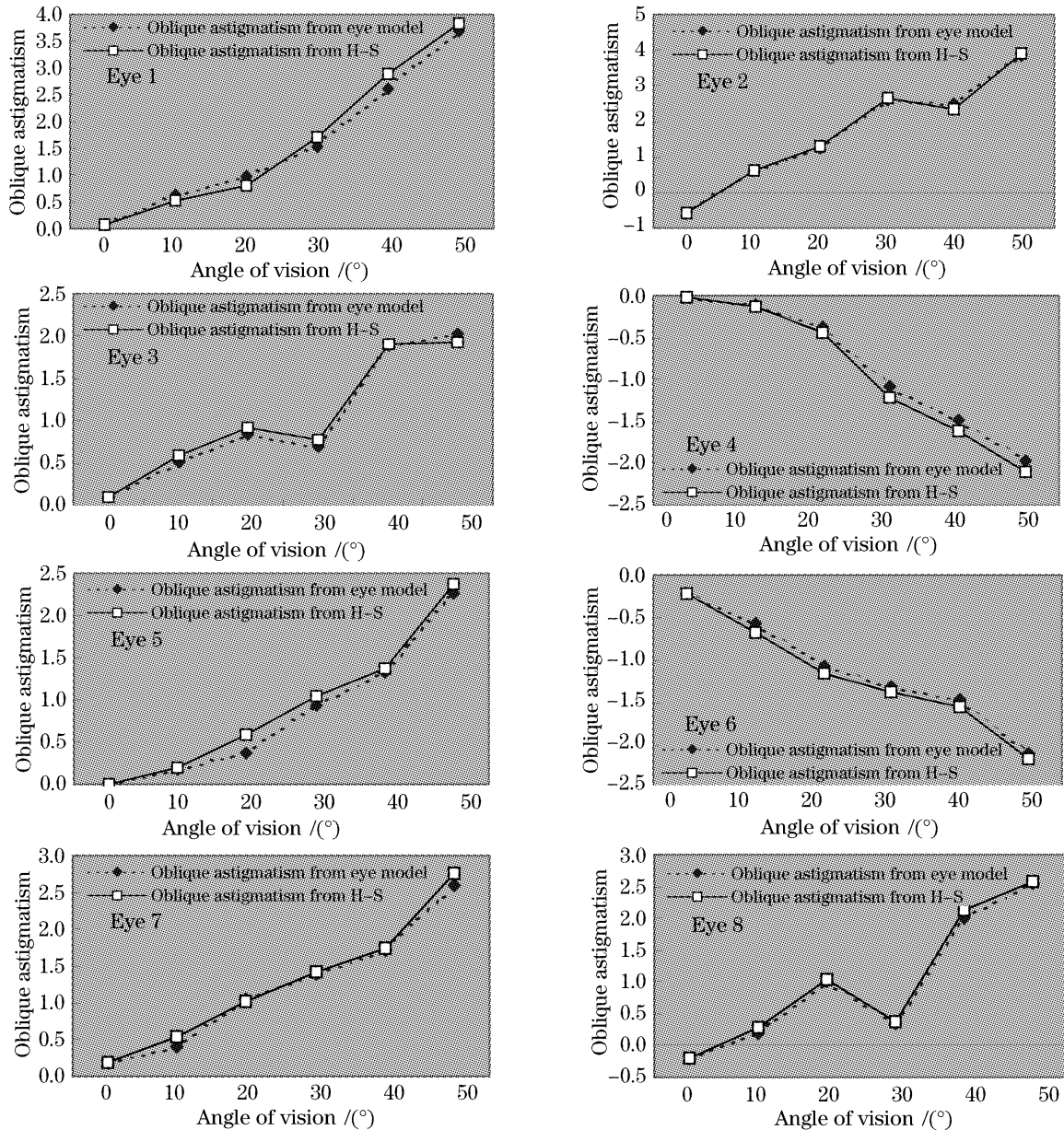


图 3 倾斜像散随视场角的变化

Fig. 3 Variation of oblique astigmatism with angle of vision

由图 3 可见,由眼模型计算得到的像散与由波前传感器实际测量得到的像散值相近。其中第五只眼睛在 20° 视场角时的像散值之差最大,为 $0.19 \mu\text{m}$ 。而第七只眼睛在 20° 视场角时的像散值之差最小,为 $0.01 \mu\text{m}$ 。图中显示,随着视场角由 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 变化,除个别眼睛的像散值有略微起伏的变化趋势外,多数人眼的像散值逐渐增大。比如第一只眼睛在 0° 视场时像散值为 $0.07 \mu\text{m}$,在 50° 视场时像散值增大至 $3.67 \mu\text{m}$ 。由此可见,由于个体人眼的生理结构与光学特性不同,导致不同人眼的像散值变化趋势略有不同。总体来讲,人眼的像散随着视场角的增大而增大。

图 4 分别列出了 8 只人眼的垂轴彗差(即泽尼

克多项式中的 Z_3^1 项)随着视场角的变化而变化的关系图。图中横坐标表示不同的视场。纵坐标表示垂轴彗差值,单位为 μm 。虚线表示由眼模型计算得到的垂轴彗差,实线表示由哈特曼-夏克波前传感器实际测量得到的垂轴彗差。

由图 4 可见,由个性化人眼模型计算得到的垂轴彗差值与由哈特曼-夏克波前传感器实际测量得到的垂轴彗差值接近。其中第七只眼睛在 50° 视场角时的垂轴彗差值之差最大,为 $0.20 \mu\text{m}$ 。而第四只眼睛在 50° 视场角时的垂轴彗差值之差最小,为 $0.003 \mu\text{m}$ 。随着视场角由 $0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 变化,多数眼睛的垂轴彗差随之增大。比如,第七只眼睛在 0° 视场时的垂轴彗差值为 $0.03 \mu\text{m}$,在 50° 视场时垂轴彗差值增大至

1.83 μm 。但也存在特例,比如,第一只眼睛的垂轴彗差值在 0 视场时为 $-0.01 \mu\text{m}$,在 40° 视场时增大至

1.25 μm ,而在 50° 视场时稍有下降至 $1.23 \mu\text{m}$ 。垂轴彗差对边缘人眼的视觉影响较大。

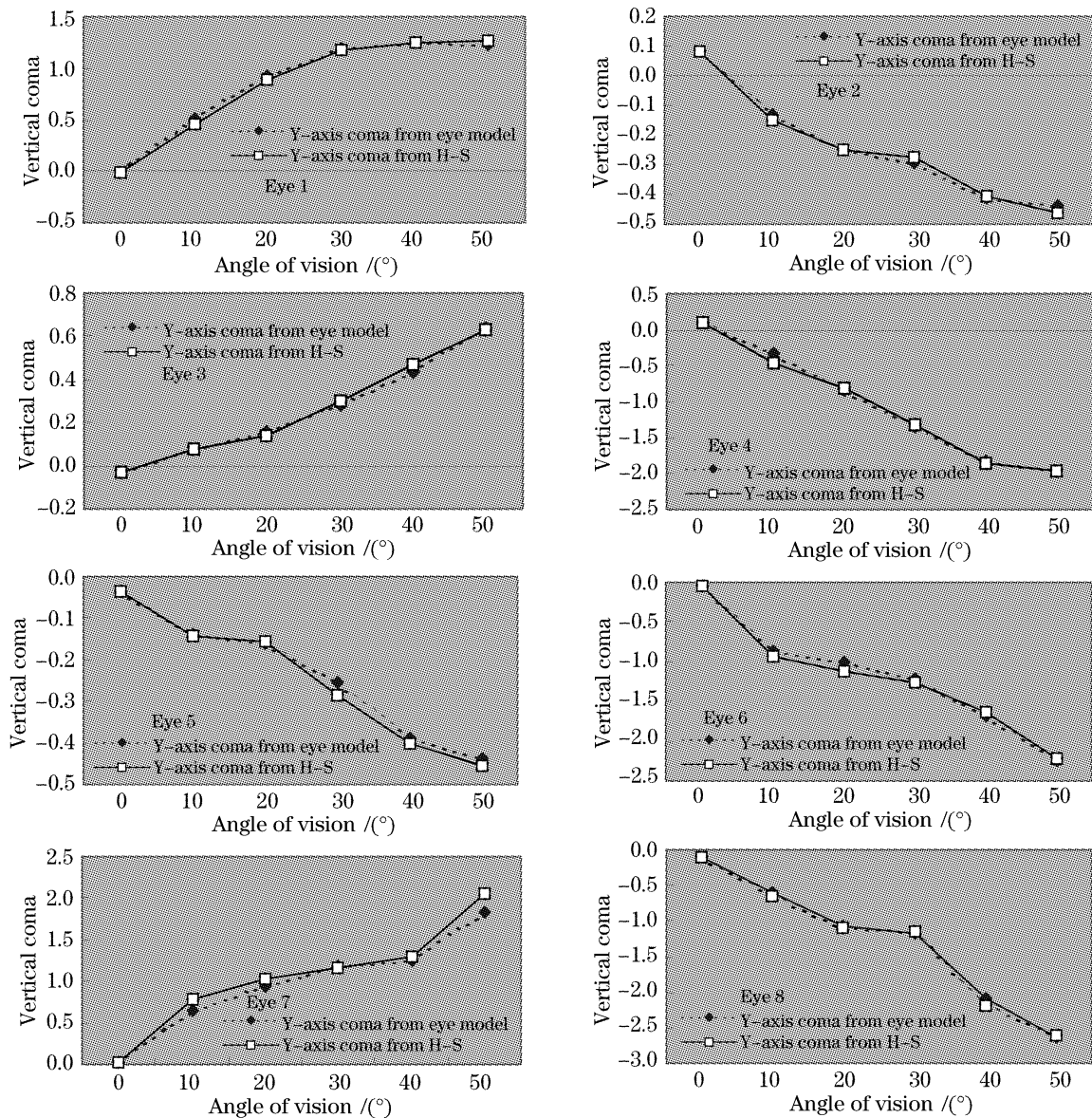


图 4 垂轴彗差随视场角的变化

Fig. 4 Variation of vertical coma with angle of vision

分析了四阶以上的高阶像差随着视场角的变化对人眼光学系统的影响。结果表明,随着视场角的逐渐增大,四阶以上的高阶像差基本保持不变。因此,大视场波前像差对人眼光学系统的影响主要来源于低阶像差。因空间所限,这里不再分别列出每只眼睛的高阶像差变化趋势图。

5 结 论

运用光学设计软件构建了个性化人眼模型,分析大视场的波前像差对人眼光学系统的影响。分析结果表明,边缘人眼的视觉成像质量比中央凹的视觉质量差,其主要影响来源于像散与彗差。虽然个体人眼

的变化趋势稍有不同,但人眼像差呈现随视场角增大而增大的变化规律。将个性化人眼模型计算得到的大视场波前像差值与哈特曼-夏克波前传感器实际测量的大视场波前像差值相比较,两者很好地吻合,进一步表明个性化人眼模型可以用来精确地分析个体人眼的光学特性。此外,个性化人眼模型作为一种有效的工具可以广泛地应用于个性化视觉诊断及个性化视觉矫正等领域。

参 考 文 献

1 Antonio Gutrao, Jason Porter, David R. Williams *et al.*. Calculated impact of higher-order monochromatic aberrations on retinal image quality in a population of human eyes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*,

- 2002, **19**(1): 1~8
- 2 Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing *et al.*. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1519~1525 (in Chinese)
王 杨,王肇圻,郭欢庆等. 人眼的高级像差对视功能的影响[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1519~1525
- 3 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Ultimate curves of aberration and Strehl ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1065~1067 (in Chinese)
侯 静,姜文汉,凌 宁. 像差与斯特列尔比的极限曲线[J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1065~1067
- 4 Xu Cheng, Larry N. Thibos, Arthur Bradley. Estimating visual quality from wavefront aberration measurements[J]. *J. Refractive Surgery*, 2003, **19**: S579~S584
- 5 Rafael Navarro, Esther Moreno, Carlos Dorrnsoro. Monochromatic aberrations and point-spread functions of the human eye across the visual field[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(9): 2522~2529
- 6 Antonio Guirao, Pablo Artal. Off-axis monochromatic aberrations estimated from double pass measurements in the human eye[J]. *Vision Research*, 1999, **39**: 207~217
- 7 David A. Atchison, Dion H. Scott. Monochromatic aberrations of human eye in the horizontal visual field[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(11): 2180~2184
- 8 Pablo Artal, Ignacio Igeasias, Norberto Lopez-Gil *et al.*. Double-pass measurements of the retinal-image quality with unequal entrance and exit pupil sizes and the reversibility of the eye's optical system[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(10): 2358~2366
- 9 Junzhong Liang, David R. Williams. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(1): 2873~2883
- 10 Shen Feng, Jiang Wenhan. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 666~671 (in Chinese)
沈 锋,姜文汉. 夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J]. 光学学报, 2000, **20**(9): 666~671

"名家讲坛" 征稿启事

为了让读者进一步全面了解光电子各领域的发展历程及研究进展,《激光与光电子学进展》杂志将从 2006 年下半年开始推出专题栏目“名家讲坛”,邀请国内外著名学者、教授、高级研发人员讲述激光与光电子技术发展过程中的关键技术、重要突破以及目前的研究热点。内容涉及理论探讨、技术突破、材料研发和市场开拓等相关领域。同时面向广大读者征稿,要求如下:

- 1、作者在激光与光电子应用领域具有一定造诣,并在某一方面有较深入的研究或对该领域的发展态势有较全面和前瞻的把握。
- 2、文章涉及内容应在激光与光电子领域占有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性。
- 3、文章最好配有一定数量的图表(最好为彩色),字数不少于 6000,最好不超过 20 000。
- 4、投稿同时,请作者提供作者简介,包括研究领域、研究成果等。
- 5、论文一经录用,本刊将优先发表,并酌付稿酬。
- 6、投稿地址:上海市 800-211 邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部



欢迎大家踊跃投稿,让我们共同期待“名家讲坛”的精彩呈现!

邮政编码: 201800

电子邮件: gwjg@mail.shcnc.ac.cn

联系电话: 021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部

主编 刘其元