

文章编号: 0253-2239(2005)11-1519-7

人眼的高级像差对视功能的影响*

王 杨¹ 王肇圻¹ 郭欢庆¹ 全 薇²

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(² 吉林大学通信工程学院, 长春 130022)

摘要: 准确测量和分析人眼的高级像差有助于更好地改善视觉, 具有重要的实验和临床意义。测量了实际人眼的波前像差, 分析了高级像差对人眼视功能的影响。像差数据由哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器分别对不同瞳孔的人眼进行测量而获得, 视功能的评价方法采用了调制传递函数(MTF)、对比敏感度函数(CSF)、斯特雷尔(Strehl)比率。由人眼的波前像差数据和视网膜空间像调制度(AIM)曲线直接给出了视锐度值与对比敏感度值。矫正了离焦与像散后, 被测者的平均视锐度值达到了1.0, 对比敏感度在低频(20 c/mm)处约为52, 高频(80 c/mm)处约为1; 矫正了前4阶像差后, 平均视锐度值可提高到1.2, 对比敏感度在低频(20 c/mm)处提高到96, 高频(80 c/mm)处提高到7。实际人眼各不相同, 达到理想成像需矫正高级像差的阶数也不同。矫正了前九阶像差后, 均可达到理想成像, 斯特雷尔比率值大于0.8。

关键词: 医用光学与生物技术; 波前像差; 视功能; 对比敏感度; 斯特雷尔比率; 视锐度

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Impact of Higher-Order Wavefront Aberrations of Human Eyes on Vision Performance

Wang Yang Wang Zhaoqi Guo Huanqing Quan Wei

(¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071
² College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Accurate measurement of higher-order wavefront aberrations helps to improve retinal image quality and has an important clinical value. Wavefront aberrations of human eyes have been measured and the impact of higher-order aberrations on vision has been evaluated in this article. Hartmann-Shack wavefront sensor is used to measure the aberrations and the eye's vision is evaluated with modulation transfer function (MTF), contrast sensitivity function (CSF) and Strehl ratio. Visual acuity and CSF values were directly given from wavefront aberrations and the retinal aerial image modulation (AIM) of human eyes. After correcting defocus and astigmatism, the average visual acuity of subjects is 1.0, the CSF value is about 52 for lower frequency (20 c/mm) and about 1 for higher frequency (80 c/mm). After removing the 2nd, 3rd and 4th Zernike aberrations, the average acuity reached 1.2, the CSF value is about 96 for lower frequency (20 c/mm) and about 7 for higher frequency (80 c/mm). Different people has its specific aberrations, so different order of aberrations must be corrected to reach the satisfactory imaging. After correcting the 2nd up to 9th Zernike aberrations, the Strehl ratios of three subjects are all in the ideal state and the average value is greater than 0.8.

Key words: medical optics and biotechnology; wavefront aberration; vision performance; contrast sensitivity; Strehl ratio; visual acuity

* 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在读博士研究生, 主要从事光学与信息光学处理的研究。E-mail: please1615@sohu.com

收稿日期: 2004-12-27; 收到修改稿日期: 2005-03-17

1 引 言

作为一种重要的光学系统,实际人眼除具有像散等像差外,还具有不规则的高级像差,如彗差、球差等。这些像差影响人眼的视功能,易引起眩光、晕光以及低照明光下视力下降等现象。对视觉功能要求的逐渐提高促使人们去研究、矫正各级像差。配戴眼镜、接触镜等可以矫正离焦和像散^[1]。激光原位角膜磨镶术(LASIK)、激光角膜切削术(PRK)等手术矫正低级像差的同时,容易引起术后高级像差的增加^[2]。因此,准确测量、分析人眼的高级像差有助于正确引导手术,以获得最佳的视觉功能。

国内^[3~6]对人眼波前前重构及波像差的测量技术进行了研究,并通过调制传递函数(MTF)分析了波前像差对人眼成像质量的影响。国内外学者十分重视对比敏感度,因为它能给出比视锐度更详尽的人眼视觉功能信息。然而目前人眼对比敏感度(CSF)数据的分析仍采用传统的视标式测量方法。这是一种主观测量技术,不仅测试速度慢,而且依赖于客体的主诉,缺乏波差数据支持,已经不能满足新视觉工程的精度要求。基于波前技术的视觉诊断可以克服这些缺点,可以在0.1 s内给出视觉系统的缺陷信息,而且具有高精度和客观性的特点。但是,目前波前数据还不能简单地给出视功能参量,缺乏波前数据向视功能数据的转换。

本文由实际人眼的波前像差数据和视网膜空间像调制度(AIM)曲线直接给出视锐度值和对比敏感度值,并将斯特雷尔(Strehl)比率曲线应用于实际人眼成像质量的分析;采用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器测量了实际人眼的波前像差,给出了调制传递函数曲线、对比敏感度曲线以及斯特雷尔比率曲线,对人眼的波前像差对视功能的影响作了分析。

2 测量方法

2.1 测量原理

波前像差测量技术主要有干涉法、切尔宁(Tscherning)法、哈特曼-夏克波前传感器、光线追迹(Ray-tracing)法、双程技术等。与其他测量方法相比,哈特曼-夏克波前传感器的优势在于如下几个方面:1)测量速度快。2)测量值不受视网膜返回光强的变化影响。3)采样密度高,可达0.2 mm。更密集的取样点可得到更精确的像差描述。4)精确度高,重复性好。可以可靠地捕捉到不规则像差。

图1是哈特曼-夏克波前传感器的原理图。

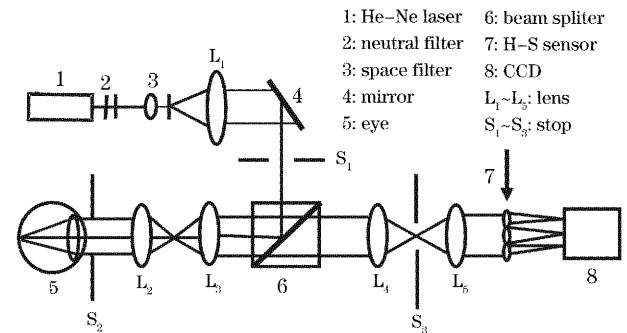


图1 哈特曼-夏克波前传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Hartmann-Shack wavefront sensor

从激光器发出的光经过扩束、准直后,在视网膜上汇聚为一点作为点光源。入射到人眼的光功率为44 μ W(低于美国国家标准协会所允许的最大激光功率4倍)。因人眼存在像差,从视网膜中漫反射的光在角膜面形成一扭曲的波前。经过透镜组 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 后,光瞳成像在微透镜阵列上,波前被透镜阵列聚焦后,由CCD接收。CCD的接收面与视网膜共轭。由此形成的点阵与微透镜阵列的标准点阵之间有些偏移,根据这些局部偏移量,计算出波前像差。

图2是由CCD记录下的光斑点阵图。理想的波前形成规则的点阵列,每一个焦点位于相应的微透镜光轴上。波前存在像差时,微透镜的焦点作相应的移动,移动量与实际波前的局部斜率成比例,由局部波前重建测量得到波前。

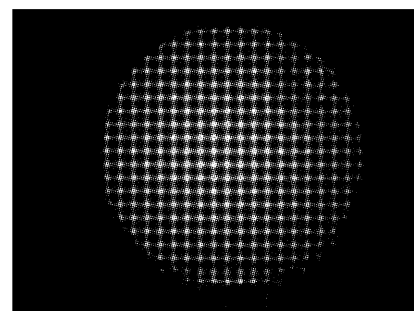


图2 人眼波前像差的点阵图

Fig. 2 Light spot array of aberration of eye

通过计算光斑质心可以确定焦点的位置。第 j 个光斑的质心可表示为

$$\begin{cases} x_j = \frac{\int x I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy}, \\ y_j = \frac{\int y I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 S_j 为第 j 个光斑的面积, $I(x, y)$ 为光斑的光强。

波前的局部斜率可由微透镜焦点的位移 $(\Delta x_j, \Delta y_j)$ 获得

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f}, \quad (2)$$

其中 f 为微透镜焦距, $\Delta x_j, \Delta y_j$ 分别为微透镜的焦点在 x, y 方向的位移。

重建波前 $W(x, y)$, 并用泽尼克多项式描述:

$$W(x, y) = \sum_k^{k_{\max}} C_k Z_k(x, y), \quad (3)$$

其中 $Z_k(x, y)$ 为泽尼克多项式的第 k 个模, C_k 为多项式系数, k_{\max} 为最大的截断项。

由(1)式、(2)式、(3)式, 可解得泽尼克系数。

2.2 数据的获得

分别测量了 30 名不同瞳孔和不同性别的 60 只正常人眼的波前像差, 以其中的三例作分析。LBS 的年龄 22 岁, 男性, 瞳孔大小为 6.3 mm, 屈光度为 +1.00D(人工验光)。ZY 的年龄 25 岁, 男性, 瞳孔大小为 6.8 mm, 屈光度为 -0.5D(人工验光)。DQ 的年龄 20 岁, 女性, 瞳孔大小为 6.8 mm, 屈光度为 -5.00D(人工验光)。测量前, 被测者处于黑暗中使瞳孔自然放大。因散瞳对人眼像差存在一定的影

响, 故本次实验中未用散瞳。测量时, 被测者处于自然放松的状态, 瞳孔对准圆形的摄像孔, 下巴和前额固定, 眼睛凝视目标点。

高级、不规则像差对小瞳孔的影响不大^[7,8], 但对于大瞳孔, 在空频的能见度范围, 会降低视网膜的分辨率和成像质量。本文在大瞳孔条件下对人眼的高级像差进行分析。

图 3 为这 3 例正常人眼的前 7 阶共 35 项的泽尼克系数。横坐标为泽尼克项数, 纵坐标为泽尼克系数值。

在图 3 中, 第 1、2 项分别为波面的 x, y 倾斜, 不影响光学系统的性能。第 3、5、6 项是不同角度的像散。LBS 的像散范围是 0.13~0.24 μm , ZY 的像散范围是 -0.63~-0.18 μm , DQ 的像散范围是 -0.39~0.54 μm 。第 4 项为离焦, LBS 为远视, ZY 为正视, DQ 为近视。第 7~35 项的高级像差值都比较小。虽然三次以上泽尼克项所对应的高级像差值比二次的低阶像差取值低得多, 但对于大瞳孔人眼视网膜上的像质仍具有不可忽视的影响。表 1 给出了三个被测者各阶像差的取值范围及其在所有高级像差中所占的比例。

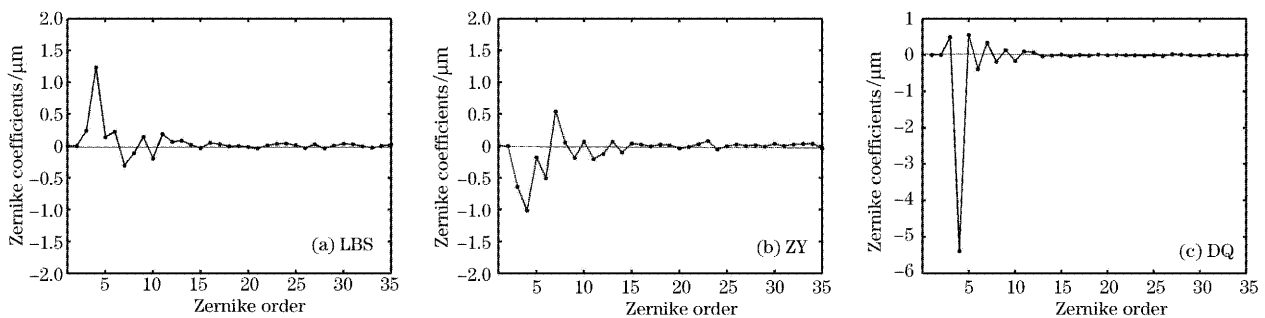


图 3 3 只正常人眼的前 35 项的相应泽尼克系数分布图

Fig. 3 Earlier 35th Zernike coefficient distribution of three human eyes

表 1 各阶像差的取值范围及在高级像差中所占的比例

Table 1 The aberration range of each Zernike term and the proportion to higher-order aberration

| Name | Sex | Age | Percentage (including only the higher-order Zernike aberrations) | | | | | Absolute value range of higher-order aberrations / μm |
|------|--------|-----|--|---------|---------|---------|---------|--|
| | | | 3th / % | 4th / % | 5th / % | 6th / % | 7th / % | |
| LBS | Male | 22 | 44 | 30 | 8 | 10 | 8 | 0~0.30 |
| ZY | Male | 25 | 55 | 24 | 6 | 8 | 7 | 0~0.54 |
| DQ | Female | 20 | 63 | 23 | 5 | 5 | 4 | 0~0.33 |

3 个被测者 3 阶像差在所有高级像差中所占的比例最大, 其次是 4 阶像差, 第 5、6、7 阶像差对高级像差的贡献相对较小。

3 结果分析

3.1 调制传递函数(MTF)与视锐度

各阶像差所对应的泽尼克系数值以及像差所占的比例大小不足以表现高级像差的影响。用调制传

递函数(MTF)曲线来直观地说明。

由波像差函数 $W(x,y)$ 来构造瞳函数 $P(x,y)$:

$$P(x,y) = p(x,y) \exp[iW(x,y)], \quad (4)$$

其中 $p(x,y)$ 是半径为 R 的瞳孔的孔径函数:

$$p(x,y) = \begin{cases} 1/(\pi R^2), & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5)$$

光学传递函数是瞳函数 $P(x,y)$ 的自相关。

$$f_{OTF}(x,y) = \int P(x',y')P^*(x'-x,y'-y)dx'dy', \quad (6)$$

调制传递函数是光学传递函数的模。

图 4 为被测者人眼调制度随空间频率变化的曲线。其中实线表示仅矫正了离焦和像散后的调制传递函数,点线表示矫正了离焦、像散和三阶像差后的调制传递函数,实心圆曲线表示矫正了离焦、像散、3 阶和 4 阶像差后的调制传递函数。虚线表示视网膜

的空间像调制度(AIM)曲线。图中横坐标为空间频率,纵坐标为调制度。

空间像调制度曲线的数值取自文献[10],取决于视网膜上最大分辨力的区域(即中央凹)的圆锥细胞的尺寸与结构,表征为视觉系统能分辨图像所要求的图像调制度。空间像调制度曲线与调制传递函数曲线的交点即为人眼的视锐度。

图 4(a)~图 4(c)中,矫正了 2 阶像差后,当继续矫正第 3 阶、第 4 阶像差时,调制传递函数曲线有了比较大的提高,表现为人的视功能有了较大的改善。但因不同的被测者存在不同的像差,所以矫正了各阶高级像差后,人眼的视觉能力提高的程度有所不同。

表 2 为矫正离焦与像散后,每矫正一阶像差,三名被测者的视锐度值与相应的调制度值。

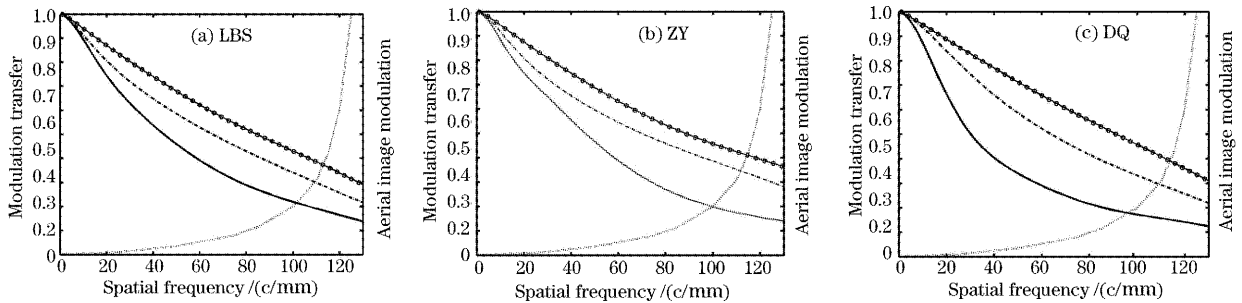


图 4 LBS、ZY、DQ 的调制传递函数曲线和空间像调制度曲线

Fig. 4 The modulation transfer function and spatial image modulation of LBS, ZY, DQ

表 2 每矫正一阶像差后,被测者的视锐度值与相应的调制度值

Table 2 Vision acuity (VA) and modulation after correcting one order aberrations

| Name | Defocus and astigmatism removed | | Defocus, astigmatism and third-order aberrations removed | | Defocus, astigmatism, third-order and fourth-order aberrations removed | |
|------|---------------------------------|------------|--|------------|--|------------|
| | VA | Modulation | VA | Modulation | VA | Modulation |
| LBS | 1.05 | 0.22 | 1.11 | 0.3 | 1.17 | 0.4 |
| ZY | 1.04 | 0.18 | 1.13 | 0.35 | 1.20 | 0.42 |
| DQ | 1.05 | 0.17 | 1.11 | 0.3 | 1.20 | 0.4 |

以图 4(a)为例,矫正了低阶像差后的调制传递函数曲线与空间像调制度曲线的交点所对应的空间频率为 103 c/mm,则人眼所能分辨的图像调制度最大可达 0.22。人眼的视锐度为 1.05。矫正了低阶像差后,LBS 的眼睛视锐度由原来的 0.4 提高到了 1.05。继续矫正 3 阶、4 阶高级像差,调制传递函数曲线有了较大的变化,相应地,人眼的视锐度也提高到了 1.17。ZY 和 DQ 在矫正了离焦与像散后,视锐度分别提高到 1.04 和 1.05,矫正了前 4 阶像差

后,视锐度值均可达到 1.20。人眼的高级像差对大瞳孔人眼的视网膜成像质量的影响比较明显的表现了出来。

2.2 对比敏感度函数(CSF)

对比敏感度^[11]定义为视觉系统所能觉察的对比度阈值的倒数:

$$S_c = \frac{I_{max} + I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (7)$$

其中 I_{max} 和 I_{min} 分别表示光栅条纹亮度的最大值和

最小值。

对比度阈值低,则对比敏感度高,视觉效果好。

利用空间像调制度曲线和调制传递函数曲线直接给出了对比敏感度曲线。以图 4(a)为例,调制度为 1 的图像经过人眼的光学系统后,在 100 c/mm 处衰减到 0.23。视网膜所要求的调制度与其相等,也为 0.23,这样就得到了人眼的最大分辨率。而对于 120 c/mm 处的高频图像,视网膜所要求的调制度为 0.9,从调制传递函数曲线来看,眼睛的光学系

统只能达到 0.18,那么该频率不能被分辨。由此得出的对比敏感度曲线由图 5 所示。图中标号为 1 的曲线为矫正了离焦与像散后,全部高级像差都存在时的对比敏感度,标号为 2 的曲线表示在仅存高级像差的基础上,又矫正了第 3 阶像差后的对比敏感度。标号为 3 的曲线表示矫正了前 4 阶像差后的对比敏感度。图中横坐标是空间频率,纵坐标是对比敏感度值。

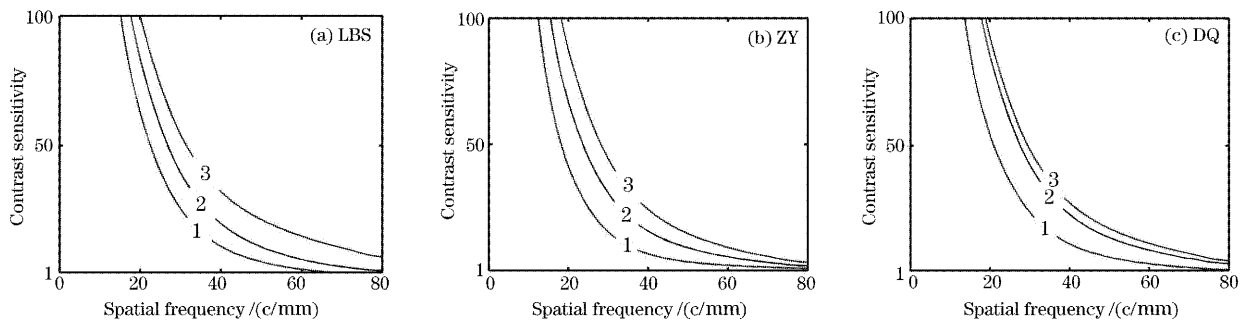


图 5 分别表示 LBS、ZY、DQ 的对比敏感度曲线

Fig. 5 Contrast sensitivity of LBS, ZY, DQ

由图 5 可以看出,矫正了离焦与像散之后,每矫正一阶高级像差,人眼的对比敏感度都有所提高。由表 1 知,LBS、ZY、DQ 三者中,三阶像差在所有高阶像差中所占的比例依次是 44%、55%、63%,比其他阶数的像差的权重更大。因此矫正了 3 阶像差后,人眼对比敏感度提高的幅度更大。不同的被测者各

阶像差的权重不同,即不同阶数的像差对人眼视觉功能的贡献不同,所以矫正后的对比敏感度值的改善程度不同。表 3 为空间频率为 20 c/mm、40 c/mm、60 c/mm、80 c/mm 处,每矫正一阶像差后,LBS、ZY、DQ 三者的对比敏感度值的对照。

表 3 20 c/mm, 40 c/mm, 60 c/mm, 80 c/mm 处的对比敏感度值

Table 3 Contrast sensitivity (CS) on 20 c/mm, 40 c/mm, 60 c/mm and 80 c/mm spatial frequency

| Name | CS with defocus and astigmatism removed / (c/mm) | | | | CS with defocus, astigmatism and third-order aberrations removed / (c/mm) | | | | CS with defocus, astigmatism, third-order and fourth-order aberrations removed / (c/mm) | | | |
|------|--|----|----|----|---|----|----|----|---|----|----|----|
| | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 | 20 | 40 | 60 | 80 |
| LBS | 60 | 12 | 3 | 1 | 82 | 21 | 8 | 3 | 100 | 35 | 16 | 8 |
| ZY | 43 | 8 | 4 | 1 | 68 | 17 | 9 | 3 | 90 | 26 | 15 | 6 |
| DQ | 52 | 13 | 4 | 1 | 85 | 25 | 8 | 4 | 95 | 30 | 15 | 7 |

矫正了离焦、像散后,LBS、ZY、DQ 三者的对比敏感度在低频(20 c/mm)处分别为 60、43、52,在高频(80 c/mm)处均为 1;而矫正了前 4 阶像差后,三者的对比敏感度有所提高,在低频(20 c/mm)处分别为 100、90、95,在高频(80 c/mm)处分别达到 8、6、7。

2.3 斯特列尔(Strehl)比率

斯特列尔比率定义为有像差时光学系统的点扩展函数的中心峰值强度与相应的衍射受限系统的点

扩展函数中心峰值强度的比值,值在 0~1 之间。文献[12,13]分析了斯特列尔比率与波面像差函数的数学模型,以及像差峰谷值、像差均方根值与斯特列尔值之间的关系。斯特列尔比率已经成为视光学中衡量视网膜成像质量的一种重要的客观评判指标。

图 6 为实际人眼像差的斯特列尔比率值。反应了矫正不同的像差,视网膜的成像质量能改善的程度。针对高级像差对人眼的影响进行分析,图 6 的斯特列尔比率值只显示了除去离焦与像散后的数

据。图中横坐标中 1 表示矫正了离焦与像散后的值, 2~9 表示除去离焦和像散后矫正了几阶像差。如横坐标为 3, 表示在离焦和像散被矫正后, 又矫正了 3 阶像差, 即矫正了前 4 阶像差。

当斯特列尔比率大于 0.8 时认为是理想成像。从图中可以看出, 除去离焦和像散后每矫正一阶像差, 斯特列尔比率都有一定程度的提高。实际人眼

的情况各不同, 斯特列尔比率曲线也有所不同。LBS、DQ 均是在矫正了前 8 阶像差后才达到理想成像的斯特列尔比率值的, ZY 是在矫正了前 9 阶像差之后才达到理想成像的斯特列尔值。表 4 为三名被测者在矫正了离焦与像散后, 每矫正一阶像差的斯特列尔比率值。

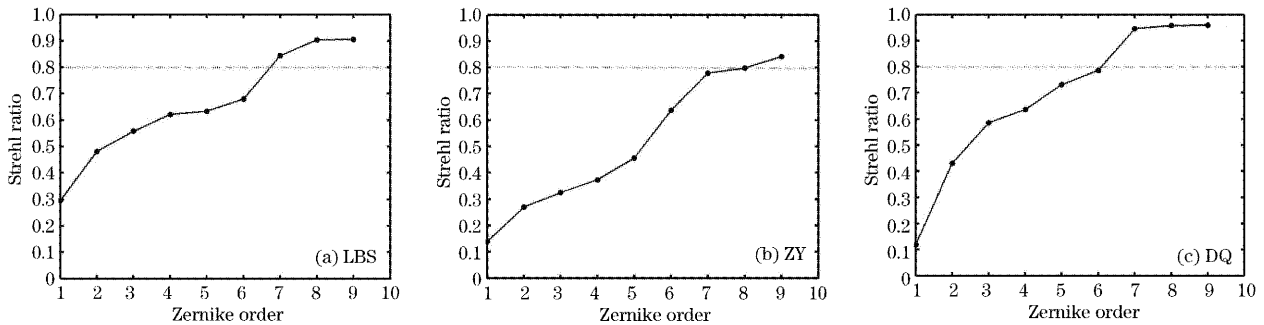


图 6 LBS、ZY、DQ 的斯特列尔比率曲线

Fig. 6 Strehl ratio of LBS, ZY, DQ

表 4 每矫正一阶像差后的 LBS、ZY、DQ 的斯特列尔比率值

Table 4 Strehl ratio after each order aberrations corrected

| Name | LBS | ZY | DQ |
|---------------------------------------|------|------|------|
| Defocus and astigmatism removed | 0.30 | 0.13 | 0.12 |
| First three order aberrations removed | 0.48 | 0.28 | 0.41 |
| First four order aberrations removed | 0.55 | 0.32 | 0.58 |
| First five order aberrations removed | 0.63 | 0.37 | 0.63 |
| First six order aberrations removed | 0.65 | 0.42 | 0.73 |
| First seven order aberrations removed | 0.70 | 0.61 | 0.79 |
| First eight order aberrations removed | 0.82 | 0.78 | 0.93 |
| First nine order aberrations removed | 0.90 | 0.80 | 0.95 |

3 结 论

根据实际人眼的波前像差数据给出表征视功能的调制传递函数、对比敏感度函数、视锐度和斯特列尔比率的数据, 从而对人眼光学系统的成像质量进行分析。分析结果表明, 高级像差对人眼的分辨率和成像质量的影响不容忽视。在矫正了离焦和像散等传统像差后, 每矫正一阶高级像差, 人眼的视功能都有所改善, 改善的幅度大小与各阶高级像差所占权重有关。由波前像差数据给出视锐度和对比敏感度函数的思路, 可形成一种新的视功能检测技术。

参 考 文 献

- Shen Weimin, Xue Mingqiu. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 743~748 (in Chinese)
沈为民, 薛鸣球. 非球面眼镜片的像差分析和设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 743~748
- Jin Hongying, Wang Qinmei, Wang Danmei *et al.*. Influence of corneal refractive surgery on wavefront aberrations of human eye [J]. *Chinese Ophthalmic J.*, 2003, **39**(16): 328~334 (in Chinese)
金红颖, 王勤美, 王丹梅 等. 角膜屈光手术对眼前像差的影响 [J]. *中华眼科杂志*, 2003, **39**(16): 328~334
- Antonio Guirao, 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): 1~9
- Quan Wei, Ling Ning, Wang Zhaoqi *et al.*. Property study for hartmann sensor used in measuring wave aberration of human eye [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(3): 1~5 (in Chinese)
全 薇, 凌 宁, 王肇圻 等. 哈特曼传感器测量人眼波像差的特性研究 [J]. *光电工程*, 2003, **30**(3): 1~5
- 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
- Wei Xueye, Yu Xin. An optical wavefront sensing and

- reconstruction method based on Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 718~723 (in Chinese)
魏学业, 俞 信. 一种基于 Zernike 多项式的波前探测与重构方法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 718~723
- 7 Howard C. Howland, Bradford Howland. A subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(11): 1508~1518
- 8 G. Walsh, W. N. Charman, H. C. Howland. Objective technique for the determination of monochromatic aberrations of the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1984, **1**(9): 987~992
- 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 Mouroulis P. *Visual Instrumentation: Optical Design and Engineering Principles* [M]. New York: McGraw-Hill, 1999. 278~280
- 11 Junzhong Liang, Gerald Westheimer. Method for measuring visual resolution at the retina level[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1993, **10**(8): 1691~1696
- 12 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. 像差与斯特雷尔比的极限曲线[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1065~1067
- 13 A. van den Bos. Aberration and the Strehl ratio[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2000, **17**(2): 356~358

欢迎订阅 2006 年《硅酸盐学报》

《硅酸盐学报》是中国硅酸盐学会主办的有关无机非金属材料领域的综合性学术期刊。1957 年创刊, 国内外公开发行人。《硅酸盐学报》为 EI 核心期刊, CA, SA, PJK 收录期刊。

《硅酸盐学报》的任务是报道水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、人工晶体及非金属矿等各专业在科研、教学、生产、设计方面具有创新性的研究成果, 以促进国内外学术交流, 为我国四个现代化建设服务。读者对象主要是有关专业工作者及大专院校师生。

《硅酸盐学报》具有正式广告经营许可证。证号为: 京海工商广字 0583 号。承办上述专业有关的国内外广告、发布外商来华广告。包括单位介绍和新研究成果、新材料、新产品、新工艺介绍、科技简讯等。《硅酸盐学报》竭诚为各界服务。

《硅酸盐学报》为月刊, 国际标准大 16 开, 单价 25 元, 全年 12 期共 300 元。邮发代号 2-695。全国各地邮局均可订阅, 也可直接与编辑部联系。

地址: 北京百万庄中国硅酸盐学会《硅酸盐学报》编辑室 邮编: 100831

电话: (010)88376444, 68352977 传真: 68352977, 68342016

E-mail: jccs@ceramsoc.com

Http://www.ceramsoc.com