

文章编号: 0253-2239(2006)11-1721-6

泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响^{*}

方利华 王肇圻 王伟 刘铭

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 基于两个人眼光学质量客观评价标准同心相对瞳孔平面(PFWc)和区域调制传递函数($M_{\text{area MTF}}$), 研究和分析了波前像差均方根值 W_{RMS} 处于 $0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 较大范围内泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响。分析结果表明, 泽尼克各项在 W_{RMS} 一定时, 瞳孔中心区域的光学质量差距明显, 离焦(C4)和球差(C12)项的 M_{PFWc} 值最小, 而五叶草(C15、C20)项的 M_{PFWc} 值最大。五叶草项在 W_{RMS} 值处于 $0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 的范围内, 其 $M_{\text{area MTF}}$ 值均大于 0.94, 表明该像差项对光学质量的影响可以忽略。 M_{PFWc} 值和 $M_{\text{area MTF}}$ 值随着 W_{RMS} 值的增大而减小, 但不是简单的线性关系, 随着 W_{RMS} 值的增大, 它们的变化趋于平缓。各项泽尼克像差对人眼光学质量的影响存在较大差别, 对人眼光学质量的影响从大到小依次为: 球差、离焦、散光、彗差、三叶草、四叶草、五叶草等。

关键词: 医用光学与生物技术; 视光学; 光学质量标准; 视功能; 波前像差

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Influence of Wavefront Aberration of Single Zernike Modes on Optical Quality of Human Eyes

Fang Lihua Wang Zhaoqi Wang Wei Liu Ming

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: Based on PFWc and AreaMTF metrics, which are objective and quantitative metrics of optical quality of human eyes, the influence of wavefront aberration of single Zernike modes on optical quality is investigated with the W_{RMS} wavefront aberration of $0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$. The results show that when a fixed amount of W_{RMS} aberration is loaded into single Zernike modes, the optical quality of the central region of the pupil varies with the Zernike modes. The value of M_{PFWc} of defocus (C4) and spherical aberration (C12) is minimum, but that of pentafoil (C15 and C20) is maximum. The value of area MTF of pentafoil is more than 0.94 in the case of W_{RMS} wavefront aberration within the range of $0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$, so its influence on optical quality can be ignored. Furthermore, the value of PFWc, as well as $M_{\text{area MTF}}$, decreases with rise of W_{RMS} , but nonlinearly, and their decreased slopes become smaller as the W_{RMS} value increases. Moreover, the influences of wavefront aberration of single Zernike modes on optical quality of human eyes are of great difference, the effect sequence of which is followed from the maximum to the minimum by sphere, defocus, astigmatism, coma, trefoil, tetrafoil and pentafoil.

Key words: medical optics and biotechnology; visual optics; metrics of optical quality; visual performance; wavefront aberration

1 引言

随着现代波前像差技术^[1,2]的发展, 各种波前像差仪在眼科临床上得到了广泛的应用, 波前引导的屈光手术矫正视力也将得到普及。人眼波前像差

的测量和像差对视功能的影响^[3]引起了眼科医生和视光专家的极大关注。

泽尼克多项式^[4]可以利用相对较小的系数集来表示一个完整的波前像差图, 其基本函数对应于传

^{*} 国家自然科学基金重点项目(60438030)、天津市科技攻关项目(033183711)资助课题。

作者简介: 方利华(1971~), 男, 江西都昌人, 天津南开大学现代光学研究所博士研究生, 主要从事人眼波前像差的研究。E-mail: fanglh71@sohu.com

导师简介: 王肇圻(1944~), 男, 山东牟平人, 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: 2006-04-24

统的几何像差,归一化后各项相互正交,使得它成为报告人眼波前像差的标准^[5]。如果泽尼克展开多项式系数是归一化的,则各项的均方根(W_{RMS})波前误差由其系数给定,而总的 W_{RMS} 可表示为

$$W_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum (C_m)^2},$$

C_m 其中为泽尼克展开多项式的归一化系数。

人眼视觉质量的好坏与泽尼克各项像差有直接关系。Applegate R A 等^[6~8] 研究表明,当整个眼睛的像差处于低水平($W_{\text{RMS}} < 0.33 \mu\text{m}$)时,泽尼克各项像差对视功能的影响存在差异。而解决这种差异对实现个性化的屈光手术和个性化的接触镜矫正非常重要。为此,Applegate R A 等进行了多个实验研究。实验结果表明,在瞳孔为 6 mm, $W_{\text{RMS}} = 0.25 \mu\text{m}$ 时,像差对视锐度的影响程度决定于包含像差的泽尼克项,在径向各阶中,靠近像差金字塔中心的项对视锐度的影响比金字塔边缘的项要大^[6]。随着 W_{RMS} 的线性增大,人眼的视功能线性减小,而且在每个径向各阶中,中心项的线性拟合斜率要比边缘大^[7]。在波前像差 W_{RMS} 一定时,波前像差分布的差异会导致人眼视功能的差异。

Jason D. Marsack 等^[9] 总结出了 31 个人眼光学质量的客观评价标准,通过定量评价人眼的光学质量来预测视功能^[10,11]。它们可分为两类,瞳孔平面标准和像平面标准。瞳孔平面标准定义为瞳孔平面上像差的形状质量。像平面标准可分为基于点扩展函数和基于光学传递函数两类。其中 10 个瞳孔平面标准(PPM),11 个基于点扩展函数的像平面标准(PSFM)和 10 个基于光学传递函数的像平面标准(OTFM)。在一些标准中,加入神经系统的权重以模拟神经系统的效果,就能更准确地预测人眼视功能。

这些标准都是基于人眼光学质量的某些方面而设计的,所以它们之间以及它们与视功能之间都密切相关。例如,这 31 个标准与视锐度的相关系数各不相同,相关系数越大,说明该标准在预测人眼视锐度方面更准确。

Applegate R A 等的实验都是基于视锐度的实验测定来研究泽尼克各项和它们之间的组合对人眼视功能的影响。而基于上述 31 个评价标准来研究泽尼克各项对人眼光学质量的影响尚少有报道。本文基于两个与视锐度相关系数(R^2)较大的评价标准——瞳孔平面的同心相对瞳孔平面(PFWc)标准($R^2 = 0.64$),光学传递函数的区域调制传递函数

($M_{\text{area MTF}}$)标准($R^2 = 0.72$),在 $W_{\text{RMS}} = 0 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 较大范围内评价泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响。分析结果表明,泽尼克各项像差在 W_{RMS} 相等的情况下,对光学质量的影响是不等价的;在较大范围内,泽尼克各项的 W_{RMS} 值与光学质量评价标准的值不成线性关系。

2 方 法

2.1 M_{PFWc} 的定义及计算方法

M_{PFWc} 是描述波前质量的人眼光学质量标准之一,它是基于瞳孔百分率的概念而定义的^[12]。 M_{PFWc} 定义为满足合理光学质量标准的同心子孔径面积 A_c 占整个瞳孔平面面积 A_p 的百分率。大百分率意味着更多符合标准的光线通过瞳孔进入眼内,其结果是视网膜成像更清晰。其计算公式为:

$$M_{\text{PFWc}} = \frac{A_c}{A_p} = \left(\frac{d_c}{d_p}\right)^2, \quad (1)$$

式中 d_c 是临界直径,指波前质量刚好满足指定标准时对应的同心子孔径的直径, d_p 为瞳孔直径。 M_{PFWc} 的合理光学质量标准选为同心子孔径内 $W_{\text{RMS}} < 0.25\lambda$ 。

2.2 $M_{\text{area MTF}}$ 的定义及计算方法

$M_{\text{area MTF}}$ 是基于光学传递函数的人眼视觉质量标准之一。由光学理论知,当输入物看做强度透射率为不同频率余弦光栅的线性组合时,调制传递函数(MTF)描述了这些余弦光栅在成像过程中的对比度的改变。 $M_{\text{area MTF}}$ 定义为按衍射极限进行归一化的径向平均调制传递函数的可见区域的面积,即空间像调制度(AIM)曲线之上的面积,如图 1 所示。图中阴影区域的面积即为调制传递函数的可见区域的面积。 $M_{\text{area MTF}}$ 计算公式如下:

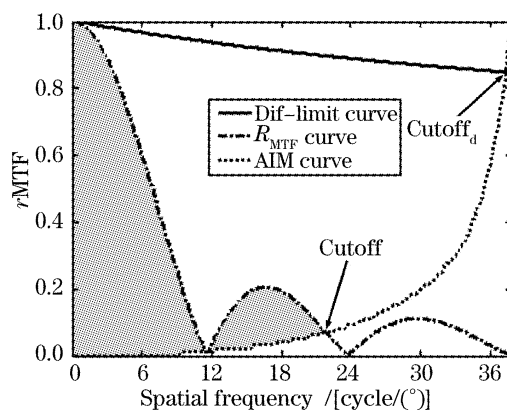


图 1 计算 $M_{\text{area MTF}}$ 的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of $M_{\text{area MTF}}$

$$M_{\text{area MTF}} = \frac{\int_0^{\text{cutoff}} R_{\text{MTF}}(f)df - \int_0^{\text{cutoff}} T_N(f)df}{\int_0^{\text{cutoff}_d} R_{\text{MTF DL}}(f)df - \int_0^{\text{cutoff}_d} T_N(f)df}, \quad (2)$$

式中 $T_N(f)$ 是神经系统的空间像调制函数，它等于神经系统的对比敏感度函数的倒数； $R_{\text{MTF}}(f)$ 为径向平均调制传递函数；cutoff 对应于神经系统的空间像调制曲线与有像差时的调制传递函数曲线交点中的空间频率最大值； cutoff_d 为神经系统的空间像调制曲线与衍射极限时的调制传递函数曲线交点的空间频率值。

3 结 果

3.1 泽尼克各项 M_{PFWC} 值与 W_{RMS} 值之间的关系

斯太耳斯-克劳福德 (Stiles-Crawford) 效应^[13]

(SCE)表明，人眼对各个方向的光线感受并不一致，通过瞳孔中心区域的光线要比边缘区域的光线亮。这一效应源自于视网膜上的视锥细胞在接受近轴光线时更有效，视网膜成像时瞳孔中心区域的光线权重更大。 M_{PFWC} 标准实际上是评价瞳孔平面上中心区域波前质量的指标。 M_{PFWC} 值越大，瞳孔中心区域的光学质量越好。

瞳孔直径为 6 mm，波长为 0.58 μm ，考查 $W_{\text{RMS}}=0.15 \mu\text{m}, 0.20 \mu\text{m}, 0.25 \mu\text{m}, 0.30 \mu\text{m}, 0.40 \mu\text{m}, 0.50 \mu\text{m}, 0.60 \mu\text{m}, 0.70 \mu\text{m}, 0.80 \mu\text{m}, 0.90 \mu\text{m}, 1.00 \mu\text{m}$ 时各项像差单独存在时的 M_{PFWC} 值。使泽尼克展开式中的某一项的 W_{RMS} 值保持为定值，其它项全部为零，考查该项的 M_{PFWC} 值。其结果如表 1 所示。

表 1 中的泽尼克各项与几何像差的对应关系如表 2 所示的像差金字塔。

表 1 泽尼克各项 M_{PFWC} 值与 W_{RMS} 值的关系

Table 1 Relationship of M_{PFWC} and W_{RMS} wavefront aberration

$W_{\text{RMS}}/\mu\text{m}$	C3	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
0.15	0.96	0.96	0.96	0.17	0.17	0.96	0.98	0.42	0.42	0.98	0.98	0.98	0.04	0.04	0.98	0.94
0.20	0.71	0.72	0.79	0.08	0.08	0.79	0.85	0.24	0.25	0.85	0.86	0.38	0.02	0.02	0.38	0.85
0.25	0.58	0.58	0.69	0.04	0.04	0.69	0.76	0.18	0.18	0.76	0.79	0.30	0.01	0.01	0.30	0.77
0.30	0.48	0.48	0.61	0.03	0.03	0.61	0.69	0.14	0.14	0.69	0.74	0.26	0.01	0.01	0.26	0.72
0.40	0.36	0.36	0.50	0.02	0.02	0.50	0.59	0.10	0.10	0.59	0.66	0.20	0	0	0.20	0.64
0.50	0.28	0.28	0.44	0.01	0.01	0.44	0.53	0.08	0.08	0.53	0.59	0.17	0	0	0.17	0.58
0.60	0.24	0.24	0.38	0.01	0.01	0.38	0.49	0.06	0.06	0.49	0.56	0.14	0	0	0.14	0.55
0.70	0.20	0.20	0.35	0	0	0.35	0.45	0.06	0.06	0.45	0.52	0.13	0	0	0.13	0.50
0.80	0.18	0.18	0.31	0	0	0.31	0.42	0.05	0.05	0.42	0.50	0.12	0	0	0.12	0.48
0.90	0.16	0.16	0.29	0	0	0.29	0.40	0.04	0.04	0.40	0.48	0.11	0	0	0.11	0.46
1.0	0.14	0.14	0.27	0	0	0.27	0.37	0.04	0.04	0.37	0.45	0.10	0	0	0.10	0.44

表 2 像差金字塔

Table 2 Zernike pyramid

Radial order	Angular frequency					
2	C3 45° astigmatism		C4 defocus		C5 0° astigmatism	
3	C6 Y-trefoil		C7 Y-coma		C8 X-coma	
4	C10 Y-tetrafoil		C11 Y-secondary astigmatism		C12 sphere	
5	C15 Y-pentafoil		C16 Y-secondary trefoil		C17 Y-secondary coma	
			C18 X-secondary coma		C19 X-secondary trefoil	
					C20 X-pentafoil	

为了更直观地表示 M_{PFWC} 值的变化规律，用图示的方法分析表 1 中的数据，如图 2 和图 3 所示。图 2 给出了 M_{PFWC} 值随泽尼克各项的变化曲线。

从图 2 可以看出，在 W_{RMS} 值一定时，泽尼克各项的 M_{PFWC} 值差距明显，彗差 (C7、C8)、次阶散光 (C11、C13)、次阶彗差 (C17、C18) 等项 M_{PFWC} 值明显较小，而

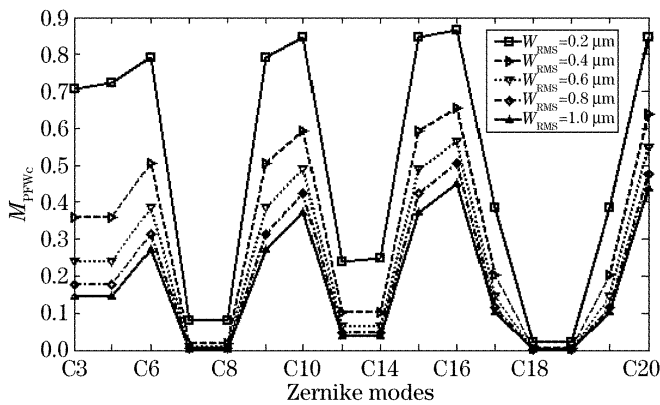


图 2 M_{PFWC} 值随泽尼克各项的变化曲线

Fig. 2 Relationship curves of M_{PFWC} and Zernike modes

三叶草 (C6、C9)、四叶草 (C10、C14)、五叶草 (C15、C20) 等项 M_{PFWC} 值较大, 表明它们对视功能的影响存在差异; 五叶草项对应的 M_{PFWC} 值最大, 表明它们的瞳孔中心区域波前质量最好; 与像差金字塔对应的泽尼克径向各阶像差的 M_{PFWC} 值具有左右对称性, 如当 $W_{RMS} = 0.40 \mu\text{m}$ 时, C3 和 C5 的 M_{PFWC} 都为 0.36、C11 和 C13 的 M_{PFWC} 都为 0.10。

图 3 给出了泽尼克项 M_{PFWC} 值与 W_{RMS} 值的拟合曲线。

因与像差金字塔对应的泽尼克项径向各阶像差的 M_{PFWC} 值具有左右对称性, 所以这里只作出了 C3、C6、C7、C10、C11、C15、C16、C17 与 W_{RMS} 值的拟合曲线。从图 3 中可以得出, M_{PFWC} 值随着波前像差 W_{RMS} 值的增大而降低, 即 W_{RMS} 值越大, 瞳孔中心区域波前

质量越差; 但是 M_{PFWC} 值与波前像差 W_{RMS} 值不是简单的线性关系, 随着 W_{RMS} 值的增大, M_{PFWC} 值的变化趋于平缓; 泽尼克各项对应的 M_{PFWC} 值依序为五叶草、四叶草、三叶草、散光、次阶三叶草、次阶散光、彗差、次阶彗差而逐渐降低。在处理数据时发现: 离焦 (C4) 和球差 (C12) 两项, 在 $W_{RMS} > 0.1 \mu\text{m}$ 时, $M_{PFWC} = 0$, 说明这两项对应的瞳孔中心区域波前质量最差。

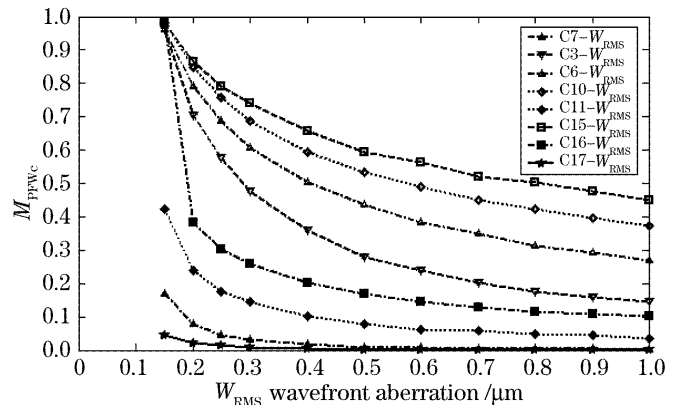


图 3 泽尼克项 M_{PFWC} 值与 W_{RMS} 值的拟合曲线

Fig. 3 Fit curves of M_{PFWC} and W_{RMS} wavefront aberration

3.2 泽尼克各项 $M_{area MTF}$ 值与 W_{RMS} 值之间的关系

瞳孔直径为 6 mm, 波长为 $0.58 \mu\text{m}$, 分别考查 $W_{RMS} = 0.10 \mu\text{m}, 0.20 \mu\text{m}, 0.25 \mu\text{m}, 0.30 \mu\text{m}, 0.40 \mu\text{m}, 0.50 \mu\text{m}, 0.60 \mu\text{m}, 0.70 \mu\text{m}, 0.80 \mu\text{m}, 0.90 \mu\text{m}, 1.00 \mu\text{m}$ 时各项像差单独存在时的 $M_{area MTF}$ 值。其结果如表 3 所示。

表 3 泽尼克各项 $M_{area MTF}$ 值与 W_{RMS} 值的关系

Table 3 Relationship of $M_{area MTF}$ and W_{RMS} wavefront aberration

$W_{RMS}/\mu\text{m}$	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
0.10	0.98	0.98	0.99	0.99	0.96	0.96	0.99	1.00	0.88	0.86	0.93	1.00	1.00	0.93	0.87	0.87	0.93	1.00
0.20	0.93	0.93	0.96	0.98	0.93	0.93	0.98	0.99	0.68	0.61	0.75	0.99	1.00	0.78	0.71	0.71	0.78	1.00
0.25	0.9	0.89	0.94	0.96	0.93	0.93	0.96	0.98	0.60	0.51	0.65	0.99	1.00	0.71	0.62	0.62	0.71	1.00
0.30	0.87	0.85	0.92	0.95	0.94	0.94	0.95	0.98	0.53	0.43	0.57	0.99	0.99	0.65	0.55	0.55	0.65	0.99
0.40	0.80	0.76	0.86	0.91	0.87	0.87	0.91	0.96	0.43	0.33	0.44	0.98	0.99	0.53	0.44	0.44	0.53	0.99
0.50	0.73	0.66	0.80	0.87	0.81	0.81	0.87	0.94	0.35	0.26	0.36	0.96	0.99	0.43	0.36	0.36	0.43	0.98
0.60	0.66	0.58	0.73	0.83	0.79	0.79	0.83	0.92	0.30	0.26	0.30	0.95	0.98	0.37	0.31	0.31	0.37	0.98
0.70	0.60	0.51	0.67	0.79	0.73	0.73	0.79	0.89	0.26	0.19	0.26	0.93	0.97	0.32	0.27	0.27	0.32	0.97
0.80	0.55	0.45	0.61	0.75	0.67	0.67	0.75	0.87	0.23	0.21	0.23	0.91	0.96	0.29	0.24	0.24	0.29	0.96
0.90	0.50	0.40	0.55	0.72	0.64	0.64	0.72	0.84	0.21	0.19	0.20	0.89	0.96	0.26	0.22	0.22	0.26	0.95
1.0	0.46	0.37	0.50	0.68	0.60	0.60	0.68	0.82	0.19	0.17	0.26	0.87	0.95	0.24	0.20	0.20	0.24	0.94

用图示的方法分析表 3 中的数据, 如图 4 和图 5 所示。图 4 给出了 $M_{area MTF}$ 值随泽尼克各项的变化曲线。

从图 4 中可以看出, 五叶草 (C15、C20) 项在 W_{RMS} 处于 $0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 范围内, 其 $M_{area MTF}$ 值均大于 0.94, 表明该项对人眼光学质量的影响可以忽

略; 与像差金字塔对应的泽尼克径向各阶像差的 $M_{area MTF}$ 值对称性并不严格, 如在 $W_{RMS} = 0.25$ 时 C3 的 $M_{area MTF}$ 值为 C5 的 95%, C11 的 $M_{area MTF}$ 值为 C13 的 92%; 当 $W_{RMS} = 1.00 \mu\text{m}$ 时, 泽尼克各项对光学质量的影响差距较大, 如 C15 的 $M_{area MTF}$ 值是 C3 的 2.1 倍、C4 的 2.6 倍、C7 的 1.6 倍、C12 的

5.6 倍。

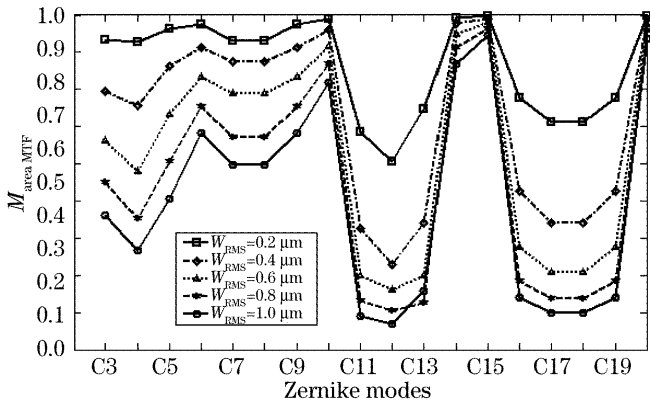


图 4 $M_{\text{area MTF}}$ 值随泽尼克各项的变化曲线

Fig. 4 Relationship curves of $M_{\text{area MTF}}$ and Zernike modes

图 5 给出了泽尼克各项 $M_{\text{area MTF}}$ 值与 W_{RMS} 值的拟合曲线。

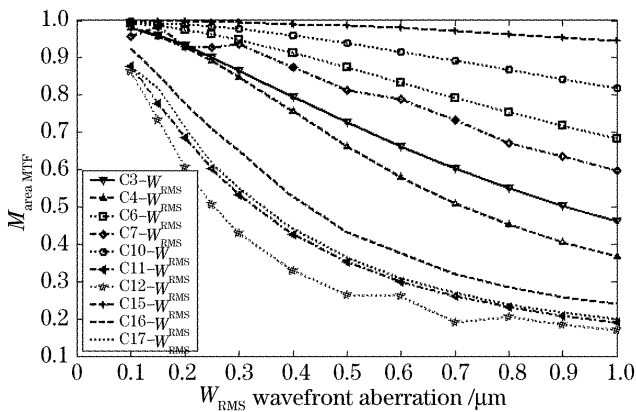


图 5 泽尼克项 $M_{\text{area MTF}}$ 值与 W_{RMS} 值的拟合曲线

Fig. 5 Fit curves of $M_{\text{area MTF}}$ and W_{RMS} wavefront aberration

因对称性,所以只作出了 C3、C4、C6、C7、C10、C11、C12、C15、C16、C17 的 $M_{\text{area MTF}}$ 值与 W_{RMS} 值的拟合曲线。从图 5 中可以看出,泽尼克各项的 $M_{\text{area MTF}}$ 值随着 W_{RMS} 值的增大而降低,但不是简单的线性关系,随着 W_{RMS} 值的增大, $M_{\text{area MTF}}$ 值的变化趋于平缓;当 $W_{\text{RMS}} = 0.10 \mu\text{m}$ 时, $M_{\text{area MTF}}$ 值都大于 0.85,这一结果表明泽尼克各项在 $W_{\text{RMS}} \leq 0.10 \mu\text{m}$ 时对人眼光学质量的影响可以忽略;五叶草的拟合曲线始终处于其它曲线之上,说明其对光学质量的影响最小,而球差的拟合曲线处于其它曲线的下方,说明其对光学质量的影响最大;泽尼克各项对应的 $M_{\text{area MTF}}$ 值依次序五叶草、四叶草、三叶草、彗差、散光、离焦、次阶三叶草、次阶彗差、次阶散光、球差逐渐降低。

4 结 论

人眼光学质量评价标准 M_{PFWC} 和 $M_{\text{area MTF}}$ 为两

个客观定量的评价标准,这两个标准与视锐度的相关系数较大,通过这些客观评价标准的分析可以预测人眼波前像差分布对视功能的影响。通过 M_{PFWC} 标准分析得到,在 $W_{\text{RMS}} > 0.1 \mu\text{m}$ 时,离焦(C4)和球差项(C12)的 M_{PFWC} 值为 0,说明这两项对应的瞳孔中心区域波前质量最差;而五叶草项(C15、C20)在 W_{RMS} 一定时,其对应的瞳孔平面中心区域的光学质量最好。通过 $M_{\text{area MTF}}$ 标准分析得到,五叶草项处于 $W_{\text{RMS}} = 0.05 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 的范围内时,其 $M_{\text{area MTF}}$ 值均大于 0.94,表明该像差项对光学质量的影响可以忽略;与像差金字塔对应的泽尼克径向各阶像差的 $M_{\text{area MTF}}$ 值的对称性并不严格。 M_{PFWC} 值和 $M_{\text{area MTF}}$ 值随着 W_{RMS} 值的增大而减小,但不是简单的线性关系,随着 W_{RMS} 值的增大,它们的变化趋于平缓。

研究结果表明,各项泽尼克像差对人眼光学质量的影响存在较大差别,其对人眼光学质量的影响从大到小依次为:球差、离焦、散光、彗差、三叶草、四叶草、五叶草。目前常规的视力矫正只是矫正离焦和散光等二阶泽尼克像差,但要更好地改善人眼的视觉质量还必须矫正高阶像差。实际上矫正所有的高阶和低阶像差是不现实的,因此未来的视力矫正可以根据病人的个体实际而只矫正对人眼光学质量影响大的像差项如球差、离焦、散光、彗差等来达到较好的视觉效果。该研究结果对视力矫正具有理论指导意义。

参 考 文 献

- 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**(5): 666~671
- Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1236~1240 (in Chinese)
李新阳,姜文汉. 哈特曼-夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1236~1240
- 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
- Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Frequency domain analysis of surface figure fitting based on Zernike polynomials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1062~1066 (in Chinese)
刘剑峰,龙夫年,张 伟. 基于泽尼克多项式进行面形误差拟合的频域分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1062~1066
- Larry N. Thibos, Raymond A. Applegate, James T. Schwiegerling *et al.*. VSIA standards taskforce members.

- Standards for reporting the optical aberrations of eyes[J]. *J. Refract. Surg.*, 2002, **18**(5): S652~S660
- 6 Raymond A. Applegate, Edwin J. Sarver, Vic Khemsara. Are all aberrations equal? [J]. *J. Refract. Surg.*, 2002, **18**(5): S556~S562
- 7 Raymond A. Applegate, Charles Ballentine, Hillery Gross *et al.*. Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error[J]. *Optometry and Vision Science*, 2003, **80**(2): 97~105
- 8 Raymond A. Applegate, Jason D. Marsack, Roberto Ramos *et al.*. Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance[J]. *J. Cataract. Refract. Surg.*, 2003, **29**(8): 1487~1495
- 9 Jason D. Marsack, Larry N. Thibos, Raymond A. Applegate. Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance[J]. *J. Vis.*, 2004, **4**(4): 322~328
- 10 Xu Cheng, Arthur Bradley, Larry N. Thibos. Predicting subjective judgment of best focus with objective image quality metrics[J]. *J. Vis.*, 2004, **4**(4): 310~321
- 11 Larry N. Thibos, Xin Hong, Arthur Bradley *et al.*. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations [J]. *J. Vis.*, 2004, **4**(4): 329~351
- 12 Xu Cheng, Larry N. Thibos, Arthur Bradley. Estimating visual quality from wavefront aberration measurements[J]. *J. Refract. Surg.*, 2003, **19**(5): S579~S584
- 13 David A. Atchison, Susana Marcos, Dion H. Scott. The influence of the Stiles-Crawford peak location on visual performance[J]. *Vision. Res.*, 2003, **43**(6): 659~668

《中国学术期刊文摘》中文版和英文版 2007 年征订启事

《中国学术期刊文摘》分中文版(简称 CSAC)和英文版(简称 CSAE)两种,各自收录了我国高水平学术期刊中基础科学、医学、农业科学和工程技术领域约 40 个学科的论文文摘,全景展现我国的科研成果与进展。

作为综合性科技类检索刊物,《中国学术期刊文摘》致力于将我国科学技术各领域的原创性学术成果全面、快速地向科技工作者交流、传播,其中 CSAE 是我国第一份综合性英文版科技类学术检索刊物。

《中国学术期刊文摘》由中国科学技术协会主管,科技导报社主办并负责编辑、出版、发行,对科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者检索和了解我国的科技研究成果、学术研究动向具有重要的参考价值。

《中国学术期刊文摘(中文版)》刊号为 CN 11-3501/N,ISSN 1005-8923,2007 年为半月刊,大 16 开,国内定价 38.00 元/册,全年定价 912 元,邮发代号:82-707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》刊号为 CN 11-5411/N,ISSN 1673-4084,2007 年改为月刊,大 16 开,国内定价 15.00 元/册,全年定价 180 元,邮发代号:80-487。

欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

通讯地址: 北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社(邮编 100081)

联系电话: 010-62103122 **联系人:** 姚玉琴

征订信箱: wzbjb@cast.org.cn **单位主页:** <http://www.csac.org.cn>

户 名: 科技导报社 **账 号:** 0200001409089017271

开户银行: 工商银行百万庄支行