

文章编号:1004-4213(2010)01-0110-6

基于人眼光学质量的球差和离焦补偿关系研究*

方利华^{1,2}, 何兴道¹, 李淑静¹

(1 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

(2 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘要:基于人眼光学质量客观评估方法,通过实测的屈光手术前后人眼波前像差数据,研究和分析了球差与离焦的补偿关系.结果表明,对于屈光手术前的近视眼患者,离焦与球差的补偿关系并不明显.对于屈光手术后的近视眼患者,离焦与球差的补偿关系明显,残余离焦可以部分补偿由于高阶像差增加引起的视功能降低.当残余离焦处于 0.27D~0.74D 范围内,离焦与高阶像差组合后,光学质量提高了 20% 以上.在屈光手术方案设计时,预留 0.27D~0.74D 的离焦时,可以使 80% 的人眼达到更好的视觉矫正效果.

关键词:视光学;光学质量标准;球差;离焦

中图分类号: O435.2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0110

0 引言

视网膜图像质量的优劣决定于人眼光学系统的衍射、像差^[1-2]、散射和光学媒介的吸收.正常人眼中,像差是引起视网膜图像质量退化的主要原因.因此术前和术后像差组合对人眼视功能^[3]的影响规律对于解决视觉科学方面的基本问题和视觉矫正非常重要.研究表明,在一个正常眼人群中,像差结构存在较大的个体化差异,除球差以外的其它高阶像差项的系数统计平均值接近于零,而球差的平均值偏向于一个正值^[4-5].对于屈光手术后的近视眼患者,常规的屈光手术在矫正低阶像差离焦和散光的同时,增加了高阶像差^[6-8].由于 PRK 和 LASIK 屈光手术是通过重新改变角膜前表面的形状降低瞳孔中心区域曲率来矫正近视,结果造成角膜边缘部分比中心区域更加陡峭,近轴光线聚焦落后于边缘光线的聚焦,导致了球差的明显增大^[9].

另一方面,当像差的 RMS 值保持一定时,像差对人眼视功能的影响存在很大的差异. Applegate 等人的研究表明泽尼克各项对视功能的影响存在明显差异^[10],泽尼克像差项组合后对视功能的影响也不相同^[11].人眼视功能与光学质量紧密相关,人眼光学质量可以通过调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF)、点扩散函数 (Point

Spread Function, PSF) 以及建立在 MTF 和 PSF 上的光学质量标准来进行客观评估.研究表明一些特定的光学质量标准与一些特定的视功能具有很强的相关性^[12-14],能够较准确的预测这些特定的视功能.本课题组的研究结果也表明,当像差组合时,光学质量差异较大,光学质量决定于组合像差项的类型和在组合中的相对比例^[15-16].一些像差项组合后,发现视功能比组合前降低了,但是另外一些像差项组合后,视功能得到了提高^[11].例如,离焦 C_0^2 和球差 C_4^0 组合后的视功能比它们单独存在时的视功能有一定的提高,即离焦与球差是补偿关系.实际上,人眼像差结构中仅仅存在离焦和球差是不可能的,因此术前和术后的像差结构中,球差与离焦的补偿关系值得进一步研究.本研究中用 Shack-Hartmann 波前传感器测量出近视人眼屈光手术前和屈光手术后的波前像差,选出手术前球差较大的部分病例和手术后的全部病例.在其他高阶像差存在的情况下,通过像差对人眼光学质量的影响,分析术前和术后的球差与离焦的补偿关系,为视觉矫正方案设计和术前术后病人视功能的评判提供有益的帮助.

1 离焦与球差关系的理论分析

1.1 基于光学质量的评估方法

本研究通过像差对人眼光学质量的影响来评估离焦和球差的关系.从文献^[14]的附录列举出的光学质量标准中,选择了三个质量评价标准,它们是区域调制传递函数 (AreaMTF)、频率域的斯特列尔比例 (VSMTF) 和园形区域能量 (EE).它们的计算方法为

* 国家自然科学基金 (60777011) 和江西省教育厅科技项目 (08228) 资助

Tel: 0791-3953470

Email: fanglh71@126.com

收稿日期: 2009-02-28

修回日期: 2009-05-04

$$\text{AreaMTF} = \frac{\int_0^{\text{cutoff}} r\text{MTF}(f)df - \int_0^{\text{cutoff}} T_N(f)df}{\int_0^{\text{cutoff}_d} r\text{MTF}_{\text{DL}}(f)df - \int_0^{\text{cutoff}_d} T_N(f)df} \quad (1)$$

式中: $T_N(f)$ 是神经系统的对比度阈值函数; $r\text{MTF}$ 为径向平均调制传递函数; cutoff 对应于神经系统的对比度阈值函数曲线与有像差时的 $r\text{MTF}$ 曲线交点中的空间频率最大值; cutoff_d 为神经系统的对比度阈值函数曲线与衍射受限时的 $r\text{MTF}$ 曲线交点的空间频率值。

$$\text{VSMTF} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{CSF}_N(f_x, f_y) \text{MTF}(f_x, f_y) df_x df_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{CSF}_N(f_x, f_y) \text{MTF}_{\text{DL}}(f_x, f_y) df_x df_y} \quad (2)$$

式中 CSF_N 为神经系统的对比敏感度函数。

$$\text{EE} = \int_0^{2\pi} \int_0^r \text{PSF}_N(r, \theta) r dr d\theta \quad (3)$$

式中 PSF_N 为归一化的点扩散函数(总强度为 1), r 为圆形区域的半径, 圆心位于波前像差图的中心, 单位为弧分。

1.2 球差与离焦两项像差组合时的补偿关系

当符号相同的球差与离焦组合时, 由于波前像差图中离焦项的中间部分和球差项的中间部分的像差方向不同, 从而使得它们之间会相互补偿, 使得瞳孔中心部分的像差面变得更加平坦, 即两项像差组合后, 视网膜图像质量会得到提升, 如图 1。

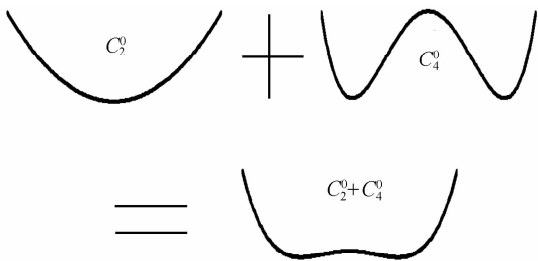
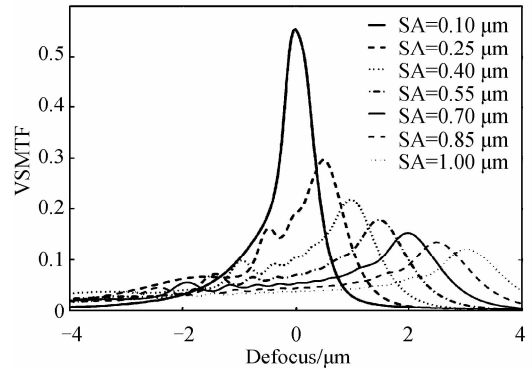


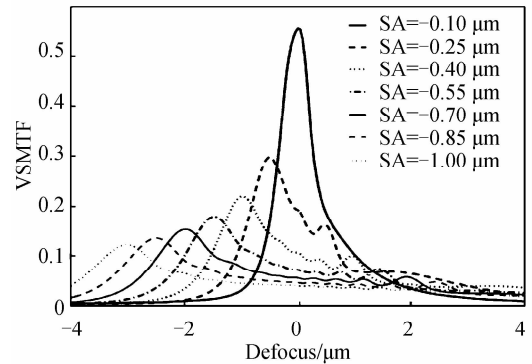
图 1 球差和离焦的补偿关系

Fig. 1 The counterbalanced relationship between spherical aberration and defocus

为了定量分析球差与离焦组合时的补偿关系, 本文采用了如下所述方法。当球差 $\text{SA} = 0.1 \mu\text{m}$ 固定值时, 离焦的变化范围为 $-4 \sim 4 \mu\text{m}$ 的情况下, 分别计算光学质量, 分析光学质量随离焦的变化关系。同样的, 球差 $\text{SA} = 0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85, 1.0 \mu\text{m}$ 时, 离焦变化范围为 $-4 \sim 4 \mu\text{m}$ 的情况下, 分析光学质量随离焦的变化关系。图 2 显示了球差和离焦组合后, 球差为一固定值, 光学质量 VSMTF 随离焦的变化关系。图 2(a) 中球差符号为正, (b) 中球差符号为负。从图 2(a) 中可以看出, 当球差符号与离焦符号相同时, 才会出现较明显地补偿关系。如



(a) Spherical aberration is positive



(b) Spherical aberration is negative

图 2 不同水平的离焦和球差组合后的 VSMTF 值
Fig. 2 The VSMTF values of combination between defocus and spherical aberration

球差 $\text{SA} = 0.25 \mu\text{m}$, 离焦等于 $0.48 \mu\text{m}$ (0.37D) 时, 光学质量达到最优值 $\text{VSMTF} = 0.297$, 且为离焦等于 0 时光学质量 VSMTF 的 1.55 倍, 即此时球差与离焦补偿效果最明显。而且离焦在 $0 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 内, 球差与离焦组合后的光学质量都优于离焦为 0 时的光学质量。随着球差的增大, 光学质量出现最优值的离焦量越来越大, 球差分别 SA 等于 $0.4, 0.55, 0.7, 0.85$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时, 离焦分别为 $0.96 \mu\text{m}$ (0.74D)、 $1.48 \mu\text{m}$ (1.14D)、 $2 \mu\text{m}$ (1.54D)、 $2.48 \mu\text{m}$ (1.91D)、 $3 \mu\text{m}$ (2.31D) 时, 光学质量 VSMTF 值出现最优值。同时, 随着球差的增大, 球差与离焦之间相互补偿效果更明显, 能够得到补偿的离焦范围越来越大, 如 $\text{SA} = 1 \mu\text{m}$ 时, 光学质量最大值 VSMTF 为等于 0 时的 3.17 倍, 能够得到补偿的离焦范围达到了 0 到 $4 \mu\text{m}$ 。从图 2(b) 中可以看出, 球差和离焦之间的补偿情况与球差符号为正时完全对称。

图 3 显示了球差为一固定值, 光学质量 AreaMTF 、 EE 随离焦的变化关系。图 3(a) 为光学质量 AreaMTF 随离焦的变化关系, 图 3(b) 为光学质量 EE 随离焦的变化关系。

从图 3 中可以看出, 光学质量 AreaMTF 、 EE 随离焦变化的关系中, 极大值的位置、能够得到补偿的离焦范围等和 VSMTF 的分析结果基本相同。说明这三个光学质量在评估离焦与球差补偿方面的一致性。

因此,在后续的研究中只选择了一种光学质量.

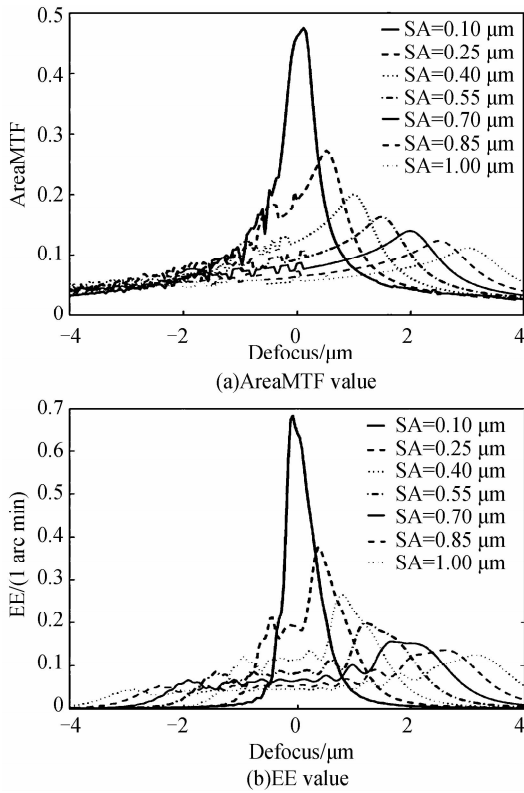


图3 不同水平的离焦和球差组合后的 AreaMTF 和 EE 值
Fig. 3 The AreaMTF and EE values of combination between defocus and spherical aberration

1.3 离焦与其它高阶像差组合时的关系

离焦与其它高阶像差的关系也需要关注. 因此取各项高阶像差为 0.25 μm 固定值时,离焦的变化范围从 -4 到 4 μm 的情况下,分析光学质量随离焦的变化关系. 图 4 显示了高阶像差(3~6 阶)和离焦组合后,高阶像差为一固定值时,光学质量 VSMTF 随离焦的变化关系. 因像差的对称性,图 4 中只包含了 10 条曲线. 从图中可以看出,曲线具有严格的左右对称性,而且离焦为 0 时的光学质量最优. 因此,在高阶像差为 0.25 μm 固定值时,离焦与图中所示的像差项没有补偿关系. 因此,高阶像差与离焦的补偿关系主要体现为球差与离焦的补偿关系.

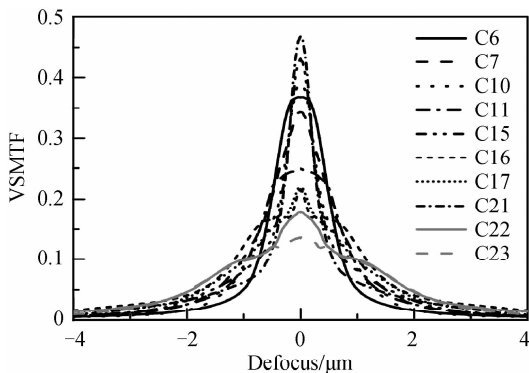


图4 不同水平的离焦和高阶像差组合后的 VSMTF 值
Fig. 4 The VSMTF values of combination between defocus and higher-order aberration

2 屈光手术前后球差与离焦的关系

2.1 研究对象

研究中,从 219 只近视眼中挑选出 30 只眼,这些眼的像差结构中球差的 Zernike 系数都大于 0.17 μm . 另外,选择了 55 只屈光手术后的人眼,球差的 Zernike 系数全部都大于 0.17 μm . 所有眼的波前直径为 6 mm,光波波长为 550 nm. 波前像差数据是由 VISX 公司的哈特曼-夏克波前传感系统在暗室条件下测量得到的. 波前传感像差测量系统的原理是从激光器发出的光经准直后在视网膜上汇聚为一点作为点光源. 因人眼存在像差,从视网膜上漫反射的光在光瞳平面形成一扭曲的波前. 经过透镜组把光瞳成像在微透镜阵列上,波前被透镜阵列聚焦后,由 CCD 接收形成点阵图. 根据有像差时微透镜阵列的点阵与标准点阵之间的局部偏移量,通过波前重建即可得到波前像差,波前像差表示成一个 6 阶的泽尼克多项式. 测量波前像差数据时,每只眼至少测量三次,然后对三次测量结果相近的泽尼克系数求平均作为这只眼的波前像差数据.

2.2 屈光手术前和屈光手术后人眼的像差分布

图 5 显示了屈光手术前和手术后人眼泽尼克高阶像差项的统计分布情况,包括平均值和正负标准差. 从图中可以看出,术后的球差明显比术前的球差

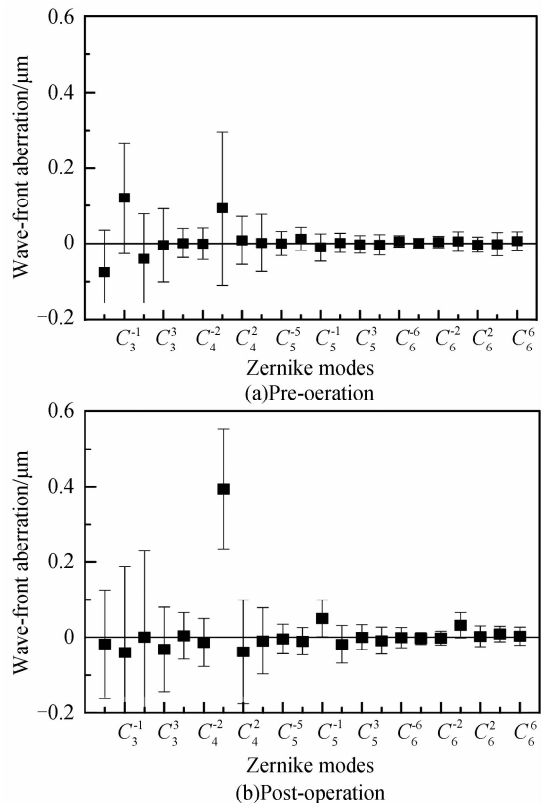


图5 屈光手术前和手术后人眼泽尼克高阶像差项的统计分布
Fig. 5 Statistical summaries of higher-order aberrations for preoperative and postoperative populations

大,术前人眼的球差平均值为 $0.09 \mu\text{m}$,术后为 $0.39 \mu\text{m}$.其它像差项的平均值虽然没有明显变大,但是标准差明显大于术前的人眼,如彗差 C_3^{-1} 和 C_3^1 ,说明术后的彗差也比术前有较明显的增加.

2.3 屈光手术前近视眼患者像差结构中的球差与离焦的关系

屈光手术前的 30 只近视眼,高阶像差 RMS 值范围为 $0.22 \sim 0.59 \mu\text{m}$.球差的绝对值都大于 $0.17 \mu\text{m}$,绝对值平均为 $0.22 \mu\text{m}$.计算离焦的变化范围为 $-4 \sim 4 \mu\text{m}$ 的情况下,光学质量随离焦的变化关系.VSMTF 比例是指离焦和高阶像差组合后与仅高阶像差存在时的 VSMTF 值之比.VSMTF 比例可以评判离焦与高阶像差的关系,比值大于 1 时,离焦与高阶像差相互补偿,比值小于 1 时,离焦与高阶像差对光学质量的影响是累积的.图 6 显示了屈光手术前 30 只近视眼的 VSMTF 比值随离焦变化的关系.

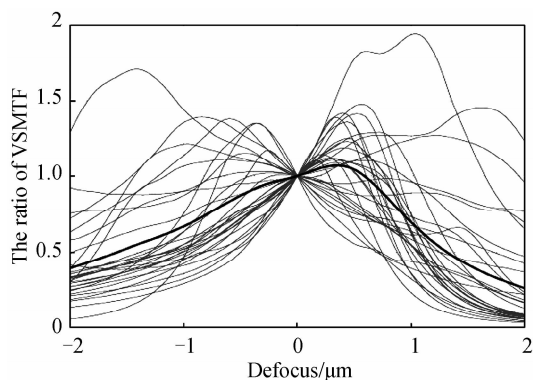


图 6 屈光手术前的人眼离焦与 VSMTF 比值之间的关系
Fig. 6 The relationship between defocus and the ratio of VSMTF for preoperative eyes

图 6 中的细曲线为 30 只眼的 VSMTF 比值随离焦变化的曲线,粗曲线为这些眼的 VSMTF 比值的平均值.从图中细曲线可以看出,不同的人眼离焦与高阶像差补偿的范围和程度都不相同.从图中粗曲线可以看出,平均来说,在离焦处于 $0 \sim 0.6 \mu\text{m}$ (0.46D) 范围内,离焦与高阶像差有补偿关系,但是补偿的效果不大,最大的平均 VSMTF 比值仅为 1.07.由于离焦与球差以外的高阶像差项没有补偿关系,因此,在手术前的这 30 只眼中,由于高阶像差存在的影响,离焦与球差的补偿关系并不明显.而且,这些眼是从 219 只眼中选择出球差较大的眼,因此手术前的近视眼人群中,离焦与球差没有明显的补偿关系.

2.4 屈光手术后像差结构中的球差与离焦的关系

对于屈光手术之后的 55 只眼,球差系数都大于 $0.19 \mu\text{m}$,高阶像差 RMS 值范围为从 $0.28 \mu\text{m}$ 到 $0.94 \mu\text{m}$,球差范围为 $0.19 \sim 0.86 \mu\text{m}$.计算离焦的

变化范围为 $-4 \sim 4 \mu\text{m}$ 的情况下,光学质量随离焦的变化关系.图 7 显示了屈光手术后近视眼的离焦与 VSMTF 比值之间的关系.

图 7 中的细曲线为 55 只眼的 VSMTF 比值随离焦变化的曲线,粗曲线为这些眼的 VSMTF 比值的平均值.同样地,从图中细曲线可以看出,不同的人眼离焦与高阶像差补偿的范围和程度都不相同,而且在离焦为正的范围内,VSMTF 比值明显高于离焦为负的范围.从图中粗曲线可以看出,55 只眼在离焦处于 $0 \sim 1.24 \mu\text{m}$ (0.95D) 范围内,离焦与高阶像差是补偿关系,补偿现象非常明显,最大的 VSMTF 比值达到 1.27.因此,在手术后的近视患者眼中,虽然存在高阶像差的影响,但是离焦与球差的补偿关系明显.

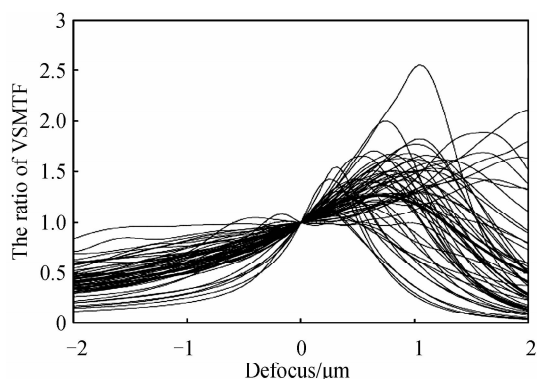


图 7 屈光手术后的人眼离焦与 VSMTF 比值之间的关系
Fig. 7 The relationship between defocus and the ratio of VSMTF for postoperative eyes

3 球差与离焦的线性回归分析

因为光学质量最优,对应的视功能往往最好.因此,期望得到最优光学质量对应的离焦量与人眼中球差的关系.根据 1.2 节描述的方法,计算出光学质量 VSMTF 值出现最优值时对应的离焦大小,以球差为横坐标,以光学质量 VSMTF 值出现最优时的离焦量为纵坐标,并进行了线性回归拟合,结果如图 8.

从图 8(a)中可以看出,屈光手术前近视眼患者球差与离焦的补偿关系并不明显.线性回归的 P 值为 0.39,即最优光学质量时的离焦与球差线性补偿关系无统计学意义.造成这个结果的原因是在屈光手术前近视眼患者中球差相对较小和像差结构中的其它像差项与离焦之间的相互影响不容忽视.

从图 8(b)中可以看出,屈光手术后近视眼患者离焦与球差的补偿关系明显.线性回归的 P 值小于 0.000 1,即离焦与球差线性补偿关系具有统计学意义.实际上,球差和离焦两项组合后的线性回归方程为 $y=3.34x-0.35$, $R=1.0$.说明术后的人眼由于

存在其它像差的影响而降低了离焦与球差的补偿关系。

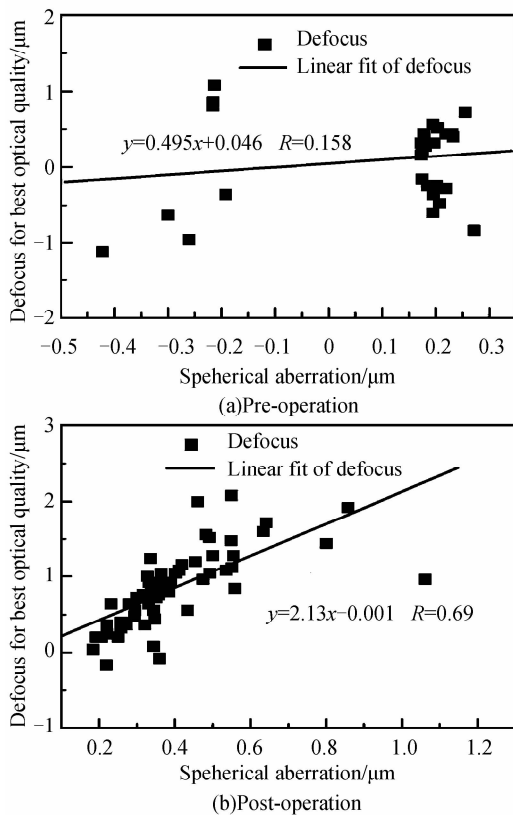


图8 球差与对应最优光学质量的离焦之间的关系
Fig. 8 The relationship between spherical aberration and defocus for best optical quality

另一方面,从2.3节的结果来看,在离焦处于0.15D~0.37D范围内,VSM TF比值的平均值大于1.05,光学质量提高了5%~7%,但个体化差异较大,即30只眼中只有15只(50%)眼VSM TF比值大于1.从2.4的结果来看,在离焦处于0.27D~0.74D范围内,VSM TF比值的平均值大于1.2,光学质量提高了20%~27%,而且在55只眼中有44只(80%)VSM TF比值大于1.

通过以上分析,为了提高屈光手术后的人眼光学质量,残余离焦为0.27D~0.74D的范围内时,人眼光学质量比仅仅存在高阶像差时能够提高20%左右.

4 结论

符号相同的球差和离焦组合后对视网膜图像质量的影响表现为补偿关系.随着球差的增大,球差与离焦之间的相互补偿效果更明显,能够得到补偿的离焦范围越来越大.对于屈光手术前的近视眼患者,由于其它像差的干扰,同时球差的绝对值较小,球差与离焦的补偿关系并不明显.对于屈光手术后的近视眼患者虽然也有其它像差项的存在,但是术后的球差绝对值较大,离焦与球差的补偿关系明显,如残

余离焦量在0.27D~0.74D范围内,光学质量提高了20%以上.离焦为0.52D时VSM TF比值最大,光学质量平均提高了27%,而且80%的人眼VSM TF比值大于1.另一方面,球差和光学质量最优值时的离焦量之间的线性回归分析表明,术后近视眼患者眼中,由于其它高阶像差项的影响降低了离焦与球差的补偿关系.

本文结果表明,屈光手术后的近视眼患者眼中残存的离焦能够补偿手术带来的球差对视功能的影响,从而部分补偿由于高阶增加引起的视功能降低.因此,屈光手术方案设计时,预留0.27D~0.74D的离焦时,可以使近80%的人眼达到更好的视觉矫正效果.

参考文献

- [1] QUAN Wei, SONG Gui-cai, WANG Zhao-qi, *et al.* Aberrations of the human eye as in the horizontal visual field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6): 1102-1105.
全薇, 宋贵才, 王肇圻, 等. 人眼大视场波前像差特性研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6): 1102-1105.
- [2] LIU Yong-ji, WANG Zhao-qi, FANG Zhi-liang, *et al.* The contributions of each refractive surface of the human model eye to the aberrations[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1554-1556.
刘永基, 王肇圻, 方志良, 等. 人眼模型中各折射面对人眼像差的贡献[J]. *光子学报*, 2005, **34**(10): 1554-1556.
- [3] QUAN Wei, WANG Zhao-qi, SONG Gui-cai, *et al.* The application of SVAG1 thin-film transistor liquid-crystal display to correction of aberrations in human eyes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1445-1448.
全薇, 王肇圻, 宋贵才, 等. 用SVGA1薄膜晶体管液晶显示器矫正人眼波像差[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1445-1448.
- [4] THIBOS L N, HONG X, BRADLEY A, *et al.* Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes[J]. *JOSA: Opt Image Sci Vis*, 2002, **19**(12): 2329-2348.
- [5] GUIRAO A, PORTER J, WILLIAMS D R, *et al.* Calculated impact of higher-order monochromatic aberrations on retinal image quality in a population of human eyes[J]. *JOSA: Opt Image Sci Vis*, 2002, **19**(3): 620-628.
- [6] YAMANE N, MIYATA K, SAMEJIMA T, *et al.* Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after conventional laser in situ keratomileusis[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2004, **45**(11): 3986-3990.
- [7] VILLA C, GUTIERREZ R, JIMENEZ J R, *et al.* Night vision disturbances after successful LASIK surgery [J]. *Br J Ophthalmol*, 2007, **91**(8): 1031-1037.
- [8] MROCHEN M, KAEMMERER M, MIERDEL P, *et al.* Increased higher-order optical aberrations after laser refractive surgery: a problem of subclinical decentration[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2001, **27**(3): 362-369.
- [9] WANG Y, ZHAO K X, HE J C, *et al.* Ocular higher-order aberrations features analysis after corneal refractive surgery

- [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2007, **120**(4): 269-273.
- [10] APPELGATE R A, SARVER E J, KHEMSAR V. Are all aberrations equal? [J]. *J Refract Surg*, 2002, **18**(5): S556-S562.
- [11] APPELGATE R A, MARSACK J D, RAMOS R, *et al.* Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, **29**(8): 1487-1495.
- [12] CHENG X, BRADLEY A, THIBOS L N. Predicting subjective judgment of best focus with objective image quality metrics[J]. *J Vis*, 2004, **4**(4): 310-321.
- [13] MARSACK J D, THIBOS L N, APPELGATE R A. Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance[J]. *J Vis*, 2004, **4**(4): 322-328.
- [14] THIBOS L N, HONG X, BRADLEY A, *et al.* Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations [J]. *J Vis*, 2004, **4**(4): 329-351.
- [15] FANG Li-hua, QUAN Wei, WANG Zhao-qi, *et al.* Influence of wavefront aberration of combined Zernike modes on optical quality of human eyes [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 21-27.
方利华, 全薇, 王肇圻, 等. 泽尼克像差组合对人眼光学质量的影响[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12): 21-27.
- [16] FANG Li-hua, WANG Zhao-qi, WANG Wei, *et al.* The Influence of wavefront aberration of single zernike modes on optical quality of human eyes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1721-1726.
方利华, 王肇圻, 王伟, 等. 泽尼克各项像差对人眼光学质量的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1721-1726.

Counterbalanced Relationship Between Defocus and Spherical Aberration Based on Optical Quality Metrics of Human Eyes

FANG Li-hua^{1,2}, HE Xing-dao¹, Li Shu-ying¹

(1 *Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

(2 *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: Based on optical quality metrics of human eyes, the counterbalanced relationship between defocus and spherical aberration for wave-front aberration data of preoperative and postoperative myopic eyes is studied. The results show that defocus can not obviously compensate spherical aberration for preoperative patients. But the counterbalanced relationship can be distinctly observed for the postoperative patients, which reveals that the remained defocus can partially ameliorate the influence of the increased higher-order aberrations after corneal refractive surgery on visual performance. For postoperative patients, more than 20% improvement of optical quality can be achieved when the remained defocus ranges from 0. 27D to 0. 74D. More than 80% of eyes can achieve better visual performance when the remained defocus ranges from 0. 3D to 0. 75 for a design of vision correction.

Key words: Visual optics; Metrics of optical quality; Spherical aberration; Defocus



FANG Li-hua was born in 1971. He is a Ph. D. degree candidate at Institute of Modern Optics, Nankai University. His current research interests focus on visual optics.