

文章编号: 0253-2239(2010)02-0485-06

基于波前曲率的客观验光新方法

方利华^{1,2} 何兴道² 陈 敏²

(¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071; ²南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063)

摘要 波前像差的客观验光准确度对眼科临床应用有重要的意义。基于实测人眼的波前像差数据, 计算波前像差曲面图的曲率分布, 得到人眼在瞳孔平面位置的屈光度。通过波前传播, 计算得到眼镜镜片所处位置的屈光度。该方法包含了高阶像差对人眼屈光度的影响, 分析该屈光度与主观验光屈光度间的差异发现, 4 mm 瞳孔直径下的波前验光结果与主观验光结果差异较小, 平均球度差异为 0.06D, 平均柱度和柱度角的差异分别为 -0.07D 和 0.62°。结果表明, 利用 4 mm 瞳孔直径下的曲率分布图验光结果可以较准确的预测主观验光结果。

关键词 医用光学; 验光; 波前像差; 视光学

中图分类号 O435.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0485

A New Method to Objective Refraction Based on the Curvature Distributions of Wave-front Aberrations Surface

Fang Lihua^{1,2} He Xingdao² Chen Min²

¹Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

²Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract The accuracy and precision of objective refraction from wave-front aberrations are important in the clinical medicine about optometry and ophthalmology. Based on the wave-front aberration data from human eyes, the curvature distributions of wave-front aberration surface are computed, and the spherical and cylindrical objective refractions in pupil plane are obtained. The refractions in the plane located at spectacle lenses are calculated through ocular wave-front propagation. This method takes into account the influence of higher-order aberration on objective refractions of human eyes. By analyzing the difference between the objective refraction from wave-front aberration and the subjective refraction, the result reveals that the objective refraction with a 4 mm pupil is nearly to the subjective refraction. The mean sphere difference is 0.06D, the mean cylinder difference is -0.07D, and the mean cylinder axis difference is 0.62°. The results show that the objective refractions from wave-front aberration with a 4 mm pupil can be used to predict the subjective refraction actually.

Key words medical optics; refraction; wave-front aberration; visual optics

1 引 言

随着人们对更高生活质量的追求, 利用眼镜矫正屈光不正已经不能满足近视眼患者的需要, 因而各种先进的视觉矫正技术迅速发展起来。现代波前像差等技术^[1]应用于眼科领域以后, 屈光不正患者所希望的高效安全的先进视觉矫正技术正逐渐成为他们的现实选择, 如个性化的角膜接触镜、个性化的眼内透镜植入或者个性化的准分子激光矫正手术。目前, 角膜接触镜、眼内透镜植入或者准分子激光矫

正手术已经给广大近视患者带来了良好的矫正效果。临床上, 制定视觉矫正方案、提高矫正后人眼的视觉质量, 一个非常重要的环节就是获得真实、准确的矫正前的人眼屈光状态。目前, 常规的屈光状态检查方法有主观验光和客观验光两大类。主观验光方法有显然验光法^[2]和云雾法, 显然验光结果通常作为人眼屈光状态度量的最佳结果, 也即作为开视觉矫正处方的依据。客观验光方法主要有检影法和自动验光仪法, 它们具有速度快、能避免患者主观

收稿日期: 2009-01-16; 收到修改稿日期: 2009-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(60777011)和江西省教育厅科技(08228)资助课题。

作者简介: 方利华(1971—), 男, 博士研究生, 主要从事人眼波前像差方面的研究。E-mail: fanglh71@126.com

判断对屈光度影响的优点,但稳定性、重复性尚有误差,因此它们的验光结果一般都不用作眼内透镜植入或者准分子激光矫正手术前患者的屈光度。随着波前技术的日益进步,利用波前像差数据进行人眼屈光检查已在临床上得到了广泛的应用,它不但可以得到人眼离焦和散光的低阶屈光状态,而且还可以得到人眼的球差、彗差等更高阶屈光状态。因此,通过波前像差进行客观验光可以得到更准确的人眼屈光状态。

波前像差可以通过波前像差仪测量得到,然后用泽尼克多项式展开表示^[3],其中第二阶像差为低阶像差,即离焦和散光,三阶及以上各阶像差为高阶像差。把波前像差图转换为入眼屈光度的最简单方法为利用第二阶泽尼克多项式系数计算得到矫正透镜度数^[4]。

但是,实践证明如此转换并不能得到真实、准确的人眼屈光度。首先,矫正二阶泽尼克像差并不能使主观下的人眼最优聚焦;其次,像差仪的工作波长为红外激光,测量出的波前像差为工作波长下的像差,而波前像差随着工作波长的变化而变化,特别是低阶像差中的离焦项随波长的变化呈现很显著的变化^[5,6];再者,人眼对事物的感知通常都为白光,在白光条件下,在某一时刻只有一种波长的光能够正好聚焦于视网膜上。

实际上,人眼对波长为 550 nm 的绿光最敏感,因此利用波前像差计算人眼屈光度时,一般把工作波长下的波前像差转换到波长为 550 nm 下的波前像差^[6]。研究表明,高阶像差对人眼光学质量有影响^[7~9],对人眼的屈光度也有影响,如 A. Guirao 和 D. R. Williams^[10]描述了一种三维空间搜索方法得到最优光学质量时对应的最优球度、柱度和柱度角, L. N. Thibos 等^[11]描述了一种渐进的方法得到最优光学质量时对应的最优球度、柱度和柱度角。结果都表明,考虑高阶像差后计算得到的人眼屈光度更精确。

利用第二阶泽尼克多项式系数计算得到的人眼屈光度没有考虑高阶像差对人眼屈光度的影响,而 A. Guirao 和 L. N. Thibos 通过最优光学质量计算得到的人眼屈光度虽然考虑了高阶像差对人眼屈光度的影响,但光学质量标准太多,无法确定最优的标准。因此通过测量近视眼患者的波前像差,计算波前像差曲面图的曲率分布,得到了人眼在瞳孔平面内屈光度的分布,考虑波前传播对波前像差的影响,并把它转化为球度、柱度和柱度角。

2 方 法

2.1 对象

测量了 21 个近视眼患者的左右眼。全部患者都无眼疾,年龄 18~32 周岁;主观验光的球度为 $-5.06\text{D} \pm 2.73\text{D}$,范围 $0 \sim -10.75\text{D}$,D 为人眼屈光度;柱度为 $-0.83\text{D} \pm 0.68\text{D}$,范围 $0 \sim -2.5\text{D}$ 。利用 VISX 公司的波前传感系统在散瞳条件下测量了被测者左右眼的波前像差。波前像差直径范围为 5.75~7 mm。测量过程中,用一装置固定患者的头部,通过电荷耦合器件(CCD)相机对准患者的瞳孔中心,每次测量采集 4 个 Shack-Hartmann 图像,每只眼至少测量 3 次,波前像差表示成一个六阶的泽尼克多项式^[12]

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i Z_i(x, y), \quad (1)$$

其中 a_i 为泽尼克多项式系数, $Z_i(x, y)$ 是泽尼克多项式。对戴隐形眼镜的患者,测量波前像差前,要求其摘下隐形眼镜一周以上,保证隐形眼镜对高阶像差的影响可以忽略。

2.2 将波前像差转化为人眼屈光度

像差仪测得的波前像差数据反映了人眼的屈光状态,而且瞳孔平面内不同点的波前像差也反映了人眼光学系统在该平面内不同位置的屈光状态。波前像差曲面的曲率描述了人眼的聚焦误差,因此,通过波前像差曲面曲率的计算,从而把波前像差转化为人眼的光学屈光度是可行的^[13]。

根据微分几何理论,一个折射表面上一个给定点的光学屈光度与曲面上该点的法曲率成正比,而曲面上任一点的法曲率可用欧拉公式表示,定理表述为^[14]:设 $\{e_1, e_2\}$ 是曲面 S 在点 P 的两个彼此正交的主方向单位向量,对应的主曲率是 k_1, k_2 ,则在点 P 沿任意一个单位切向量为

$$e = e_1 \cos \theta + e_2 \sin \theta, \quad (2)$$

对应的法曲率为

$$k_n(\theta) = k_1 \cos^2(\theta - \alpha) + k_2 \sin^2(\theta - \alpha) = k_1 + (k_2 - k_1) \cos^2(\theta - \alpha), \quad (3)$$

其中 α 为主方向 e_1 与水平坐标轴的夹角。

计算曲面 S 在点 P 的主曲率时,首先计算该点的平均曲率和高斯曲率,然后解方程得到主曲率 k_1 和 k_2 。曲面 S 在点 P 的平均曲率 H 为

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) = \frac{LG - 2MF + NE}{2(EG - F^2)}, \quad (4)$$

在点 P 的高斯曲率 K 为

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{(EG - F^2)}, \quad (5)$$

对应主曲率 k_1 的主方向为

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{M - k_1 F}{N - k_1 G}\right), \quad (6)$$

其中 E, F, G 为曲面 S 的第一类基本量, L, M, N 为曲面 S 的第二类基本量。它们的定义和计算方法可参考文献[14]。

散光由下式给出

$$J = (k_1 - k_2)/2, \quad (7)$$

把上述结果转化为屈光度的向量表示形式^[15]

$$\begin{cases} H = (k_1 + k_2)/2 \\ J_0 = J \cos(2\alpha) \\ J_{45} = J \sin(2\alpha) \end{cases}, \quad (8)$$

其中 H 为平均曲率, J_0 为 0 散光, J_{45} 为 45° 散光。屈光不正处方中的柱度与散光、波阵面主曲率的关系可以表示为

$$C = -2J = -(k_1 - k_2). \quad (9)$$

屈光不正处方中的球度与平均曲率、散光的关系可以表示为

$$S = -(H + J) = -k_1, \quad (10)$$

结合(1)式, (3)式, (8)式, (9)式可以得到波前像差曲面内点 P 的屈光度表达式

$$D(\theta) = -k_n(\theta) = S + C \cos^2(\theta - \alpha). \quad (11)$$

因此, 通过计算波前像差曲面在不同点的主曲率和主方向, 就可以得到人眼在瞳孔平面内的屈光度的分布。

2.3 波前像差传播对屈光度的影响

由波前像差计算得到的屈光度是在瞳孔平面位置的屈光度, 而对于一个光学系统, 沿轴向不同位置处的波前分布不同, 对应的屈光度也不同, 因此要比

较不同方法得到的人眼屈光度时, 必须通过波前传播原理, 把不同位置的屈光度转换为同一位置的屈光度。主观验光得到的屈光度是眼镜镜片所在位置的屈光度, 因此要比较波前像差得到的屈光度与主观验光的屈光度时, 应把瞳孔平面位置的屈光度转换到眼镜镜片所在位置的屈光度。根据波前传播原理, 不同位置的球度和柱度满足如下关系^[16]

$$S' = \frac{S}{1 - lS}$$

$$S' + C' = \frac{S + C}{1 - l(S + C)}, \quad (12)$$

其中 S' 和 C' 是转换后的眼镜镜片位置的屈光度, S 和 C 是瞳孔平面位置的屈光度, l 为瞳孔平面到眼镜镜片的距离。取角膜前表面到眼镜镜片的距离为 12 mm, 角膜前表面到瞳孔平面的距离为前房深度和角膜厚度之和, 该值的统计平均值接近于 3.5 mm。 l 从传播方向进入眼内时取正值, 从眼内出来时取负值, 因此 l 的取值为 -15.5 mm。

3 结 果

3.1 人眼在瞳孔平面内的屈光度分布

由波前像差数据计算波前像差曲面 S 上各点的第一类基本量 E, F, G 和第二类基本量 L, M, N , 然后计算该点的平均曲率、高斯曲率和主曲率 k_1 的主方向, 最后由(6)式, (7)式和(9)式得到球度 S , 0 散光 J_0 和 45° 散光 J_{45} 在瞳孔平面内的分布。图 1 即为患者右眼的屈光度分布图, 图 1(a), 图 1(b)和图 1(c)分别是 S, J_0 和 J_{45} 中, 波前直径大小为 7 mm。

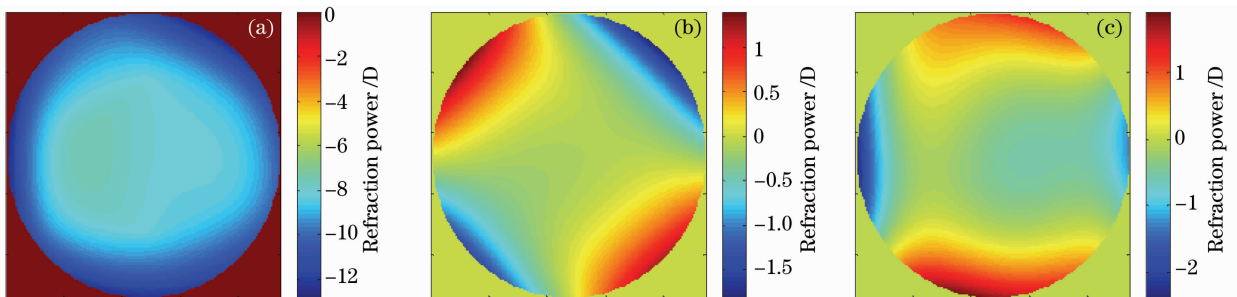


图 1 由人眼波前像差计算得到的屈光度分布图

Fig. 1 Refracting power distribution maps in the pupil plane from wave-front aberrations

从图 1 可以看出球度 S, J_0 和 J_{45} 散光在瞳孔平面内各点都不相同, 平面中心的球度 S 比边缘的球度明显小。球度 S 的范围为 -7.48D 到 -12.84D。同时, J_0 和 J_{45} 散光在瞳孔平面中心区域的分布较均匀, 而在周边部分的分布差异较大, 它们的范围分

别为 -1.81D~1.4D 和 -2.37D~1.89D。

3.2 波前像差传播对屈光度的影响

由(12)式可知, 波前像差传播不仅影响球度, 而且还影响柱度。图 2(a), 显示了主观验光的球度与瞳孔平面处的球度差异随着瞳孔平面处球度的变化曲

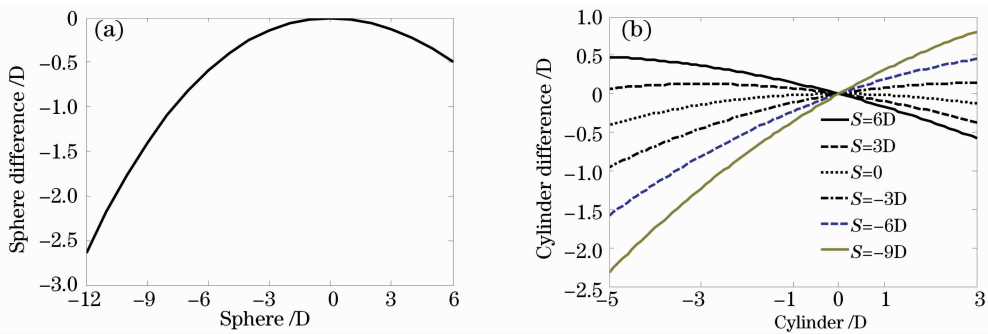


图 2 屈光度差异随人眼在瞳孔平面处屈光度的变化

Fig. 2 Changes of refracting power difference with sphere and cylinder in the pupil plane

线。图 2(b), 显示了主观验光的柱度与瞳孔平面处的柱度差异随着瞳孔平面处球度和柱度的变化曲线。

从图 2(a)可以看出, 当球度为负值(近视)时, 主观验光的球度与瞳孔平面处的球度之差的绝对值随着瞳孔平面处球度的绝对值增大而增大, 即传播后的球度更加近视, 而且随着球度的增大球度差异变化越陡峭, 当球度为 -12D 时, 球度差异达到了 -2.75D 。球度为 0 时, 球度差异也为 0 。当球度为正值(远视)时, 传播后的远视度数变小, 即球度也偏向近视。从图 2(b)中可以看出, 主观验光的柱度与瞳孔平面处的柱度之差不仅与柱度有关, 而且还与球度有关。柱度差异为正时表明传播后的柱度偏向远视, 而柱度差异为负时传播后的柱度偏向近视。球度绝对值越大, 柱度差异随柱度的变化越陡峭, 如图中球度 $S=-9\text{D}$ 时的曲线。当球度为负值时, 柱度为负值柱度差异也

为负, 即传播后的近视柱度偏向近视。当柱度一定时, 球度越大, 柱度差异也越大, 如柱度为 -5D , 球度为 $0, -3\text{D}, -6\text{D}, -9\text{D}$ 时, 柱度差异分别为 $-0.41\text{D}, -0.95\text{D}, -1.58\text{D}, -2.31\text{D}$ 。从上述分析可知在比较瞳孔平面处的屈光度与主观验光的屈光度时, 波前传播引起的屈光度改变不容忽视, 特别是近视柱度数较高的人眼必须考虑该影响。

3.3 根据屈光度分布图的验光与主观验光的比较

根据波前像差计算得到的屈光度分布图, 分别计算出暗适应瞳孔和 4mm 瞳孔直径下, 球度、 0 和 45° 散光的平均值, 然后由 0 和 45° 散光来确定柱度和柱度角^[2], 结果即为曲率分布图验光结果。对 42 只人眼的波前像差分别进行屈光度分布计算, 得到球度、柱度和柱度角, 计算结果与主观验光值比较, 统计结果如表 1 所示。

表 1 暗适应和 4mm 瞳孔直径下的曲率分布图验光与主观验光间的差异统计分析结果

Table 1 Statistical results of the difference between the objective refraction from wave-front aberration and the subjective refraction for scotopic and 4mm pupil

Pupil diameters	spherical equivalent difference /D				cylinder difference /D				axis difference /($^\circ$)			
	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
Scotopic	-0.15	0.648	-1.59	1.36	-0.14	0.441	-0.980	0.73	1.13	8.21	-14.6	15.4
4mm	0.06	0.313	-0.827	0.75	-0.07	0.251	-0.779	0.31	0.62	7.33	-14.5	14.7

表 1 中包括平均差异、标准差(SD)和最大最小差异, 差异为负值时表示曲率分布图验光度数小于主观验光度数, 即客观验光度数偏向近视; 差异为正值时表示曲率分布图验光度数偏向远视。表 1 中的结果表明, 暗适应和 4mm 瞳孔直径的平均球度差异都小于 0.25D 。 4mm 瞳孔直径下的平均球度差异为 0.06D , 表明曲率分布图验光的球度与主观验光结果接近, 差异范围为 $-0.827\text{D}\sim 0.75\text{D}$; 而暗适应瞳孔直径下的平均球度差异为 -0.153D , 表明曲率分布图验光的球度比主观验光偏向近视 0.153D , 而且球度差异的标准差较大(0.648D), 偏差最大者达

到了 -1.594D , 说明暗适应瞳孔下的波前验光结果与主观验光结果差距相对较大。同样地, 在 4mm 瞳孔直径下, 波前验光的柱度和柱度角与主观验光的差异相对较小, 平均差异分别为 -0.07D 和 0.62° , 它们的标准差明显地小于暗适应条件下的波前验光结果。因此, 通过 4mm 瞳孔直径下的曲率分布图验光可以较准确的预测主观验光结果。

4 讨 论

Thibos 在文献^[11]中, 通过波前像差第二阶泽尼克多项式系数计算得到的人眼球镜等效的平均值与

人眼的主观验光结果的平均值相差为 0.39D, 柱度的平均值差异为 0.09D, 等效球镜差异的平均值已经大于 0.25D, 因此在进行波前像差验光时仅仅考虑二阶像差是不够的。文献[9]和文献[10]中利用最优光学质量的验光方法中, 由于不同的光学质量标准, 球镜等效值和柱度值的准确度也不同, 在选取何种光学质量标准作为验光标准时, 实践中很难选择出令人信服的唯一的光学质量标准。利用波前像差曲面图的曲率分布进行验光时, 考虑了高阶像差对屈光度的影响, 方法论上是唯一的, 而且分布图中可以看出高阶像差对人眼屈光度分布的影响; 同时, 瞳孔平面内的验光结果可以利用二维或者三维图形可视化表示。因此该验光方法具有明显的比较优势。

自动验光仪测量区域是瞳孔中心直径为 3 mm 的区域, 此时对应的高阶像差较小, 验光结果主要决定于低阶像差, 验光结果也不够理想。在临床应用中也发现, 自动验光仪的结果并不能作为最后的验光处方。主观验光是在中度照明条件下进行的, 实际瞳孔的大小明显小于暗适应瞳孔, 因此 4 mm 瞳孔下的验光结果与主观验光结果更接近。另一方面, 人眼的视觉感知过程实际上是一个光学和神经因素的组合影响过程, 但是文献报道中发现选取没有考虑神经因素的最优光学质量时, 对应的客观验光值与主观验光的结果更接近。在验光过程中考虑了描述人眼神经因素的 Stiles-Crawford 效应后, 也发现了对应的客观验光值与主观验光结果的差异更明显。这可能是因为主观验光的中度照明条件, 使得神经系统的切趾效应相对较小造成的, 因为神经系统的切趾效应与瞳孔大小和照明条件有关^[17]。值得注意的是, 主观验光时存在一些不可控的因素, 如调节的波动等。因此个别病人的客观验光结果与主观验光结果不完全一致是合理的。

5 结 论

由波前像差曲面的曲率分布计算得到的人眼光学屈光度考虑了高阶像差对人眼屈光度的影响, 同时分布图可以给出瞳孔平面内局部的屈光度, 有利于眼科医生和视光专家临床正确诊断人眼的屈光状态。

通过比较曲率分布图验光与主观验光间的差异可以发现, 4 mm 瞳孔直径下的波前验光结果与主观验光结果差异较小, 平均球度差异为 0.06D, 标准差为 0.313D, 平均柱度和柱度角的差异分别为 -0.07D 和 0.62°, 它们的标准差分别为 0.251D 和 7.33°。进一步的统计结果表明, 在 4 mm 瞳孔直径

条件下, 曲率分布图验光与主观验光间的球度差异在 0.25D 之内的人眼有 25 只(60%), 柱度差异在 0.25D 之内的人眼有 28 只(66.7%), 而柱度角的差异在 15°之内的人眼有 30 只(71.4%), 因此利用 4 mm 瞳孔直径下的曲率分布图验光可以较准确的预测主观验光结果。

参 考 文 献

- 1 J. Liang, B. Grimm, S. Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 2 Xu Feng, Zhao Shaozhen. Comparison of the refraction results measured with WaveScan aberrometer and manifest refraction[J]. *Journal of Tianjin Medical University*, 2006, **12**(3): 430~431
徐 风, 赵少贞. WaveScan 波前像差仪客观验光与显光验光的结果比较[J]. *天津医科大学学报*, 2006, **12**(3): 430~431
- 3 L. N. Thibos, R. A. Applegate, J. T. Schwiegerling *et al.*. Standards for reporting the optical aberrations of eyes[J]. *J. Refract Surg.*, 2002, **18**(5): S652~60
- 4 Shen Jianxin, Ye Han, Zhang Yunhai. Relationship between second-order Zernike coefficients and conventional spectacles and aberration correction[J]. *Journal of Southeast University (Med. Sci. Edi.)*, 2004, **23**(1): 6~12
沈建新, 叶 寒, 张云海. 第二阶 Zernike 多项式与屈光不正的关系及其像差的矫正[J]. *东南大学学报(医学版)*, 2004, **23**(1): 6~12
- 5 Thibos Larry N., Ye Ming, Zhang Xiaoxiao *et al.*. The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans [J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(19): 3594~3600
- 6 T. O. Salmon, R. W. West, W. Gasser *et al.*. Measurement of refractive errors in young myopes using the COAS Shack-Hartmann aberrometer[J]. *Optom. Vis. Sci.*, 2003, **80**(1): 6~14
- 7 Fang Lihua, Quan Wei, Wang Zhaoqi *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
- 8 Fang Lihua, Wang Zhaoqi, 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
- 9 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
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
- 10 A. Guirao, D. R. Williams. A method to predict refractive errors from wave aberration data[J]. *Optom Vis. Sci.*, 2003, **80**(1): 36~42
- 11 L. N. Thibos, X. Hong, A. Bradley *et al.*. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations[J]. *J. Vis.*, 2004, **4**(4): 329~51
- 12 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1236~1240
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
- 13 Dorsch Rainer G, Haimelr Walter A, Esser Gregor K. Accurate

- computation of mean power and astigmatism by means of Zernike polynomials [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(6): 1686~1688
- 14 Chen Weiheng. Introduction of Differential Geometry [M]. Beijing: Beijing University Press, 1990. 95~109
陈维桓. 微分几何初步 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 95~109
- 15 L. N. Thibos, W. Wheeler, D. Horner. Power vectors: an application of fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error[J]. *Optom. Vis. Sci.*, 1997, **74**(6): 367~75
- 16 Dai Guangming. Wavefront optics for vision correction [C]. *SPIE*, 2007. 223~227
- 17 Atchison David A, Joblin Anthony, Smith George. Influence of stiles-crawford effect apodization on spatial visual performance [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(9): 2545~2551