

波前角膜接触镜的设计

李蕊^{1,2} 王肇圻^{1,2} 刘永基^{1,2} 孔祥鸣³

¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071
² 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071
³ 天津宇光光学公司, 天津 300384

摘要 提出了一种客观验光的波前角膜接触镜的设计方法。采用角膜地形图数据,最优化拟合得到角膜接触镜的后表面面型结构;采用眼波前像差数据,运用波前在介质中传播的衍射光学的角谱理论,结合泪液透镜的作用,最优化设计角膜接触镜的前表面面型结构;根据角膜接触镜前后表面的结构,计算得角膜接触镜的最优矫正光焦度。为 8 只具有不同程度离焦和像散的近视眼设计了波前角膜接触镜,对角膜接触镜光焦度的分析表明,接触镜后表面为球面面型设计的,其接触镜的光焦度等于人眼的光焦度与泪液镜光焦度之和,而对于镜片后表面为环曲面面型设计的,其接触镜光焦度与全眼光焦度匹配,验证了结果的合理性。

关键词 波前像差;角膜接触镜;光焦度;优化

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.s116001

Design of Corneal Contact Lens by Wavefront Technology

Li Rui^{1,2} Wang Zhaoqi^{1,2} Liu Yongji^{1,2} Kong Xiangming³

¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China
² Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China
³ Tianoptics Incorporation, Tianjin 300384, China

Abstract The design method of wavefront corneal contact lens by the objective optometry is presented. The back surface profile of the contact lens is acquired from the topographic data of the anterior corneal surface, via a fitting procedure of least square; and the front surface profile is acquired from the ocular aberrated wavefront data, via a propagation procedure through tear film and lens medium with the diffraction theory of angular spectrum. Applying the profile of the two surfaces, the prescription of the contact lens can be obtained. Eight myopic eyes with different defocusing and astigmatism are selected in this research and their corresponding contact lenses based on the wavefront aberrations have been designed. By analyzing the vergence of the designed contact lens, it is found that the vergence of the contact lens is equal to that of the eye plus to that of the tear lens while the profile of the back surface of the contact lens is spherical and the vergence of the contact lens is equal to that of the eye for the case of toroidal, then the design procedure of the contact lens is validated.

Key words wavefront aberration; contact lens; vergence; optimization

OCIS codes 330.2210; 330.5370

1 引言

1508 年,文艺复兴时期著名画家达·芬奇在他撰写的《Codex of the Eye》一书中,就介绍了将眼睛浸泡到充满水的容器中,可以中和角膜屈光力的实验,无意中表达了角膜接触镜的基本原理^[1]。角膜

接触镜自问世至今已经历了几百年的发展,随着制造工艺和制作材料的不断改进,以及验配和设计的个性化,角膜接触镜作为一种矫正人眼屈光不正的工具,越来越为人们所关注。

矫正屈光不正所需的角膜接触镜光焦度是通过

收稿日期: 2011-07-15; 收到修改稿日期: 2011-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(60978068,11104149)和天津市科技支撑计划重点项目(10ZCKFGX18800)资助课题。

作者简介: 李蕊(1983—),女,博士研究生,主要从事眼视光学方面的研究。E-mail: lrui@126.com

导师简介: 王肇圻(1944—),男,博士,研究员,主要从事眼视光学、衍射光学和光学信息等方面的研究。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

验光获得的。目前临床常用的角膜接触镜的验光方法^[1,2]为:基于客观电脑验光仪和人工检影验光测得的基本光焦度,结合角膜曲率计得到的被检眼角膜曲率半径,选择一定规格的试戴片,然后进行主观插片验光,由此得到的检测结果是以前框架眼镜平面为参考面的光焦度,经过顶点距离公式将之最终转化为角膜接触镜的验光处方。由此可见,由主观方法决定的最终屈光力检测结果,会因为被检者的心理因素及检查环境造成误差。此外,插片验光的球柱镜精度为 0.25 m^{-1} ,临床发现,有些患者对小于 0.25 m^{-1} 的球柱镜度数也会非常敏感,因此这种验光方法是不够准确的。

人眼波前像差的成功测量^[3]是 20 世纪末眼视光学领域的一个重大进步。波前像差的研究是从衍射光学角度研究人眼光学系统缺陷和视功能信息,从波阵面的最佳补偿来研究视觉矫正。波前技术及相关领域的发展,在短短十多年间,视觉矫正技术产生了巨大变革:1) 波前引导的个性化激光角膜手术已经普遍应用于眼科临床^[4~7];2) 21 世纪初,波前框架眼镜^[8~11]出现,它利用波前验光的客观方法确定配镜处方,较之于传统的主观验光方法,其结果更加客观和准确,光焦度可精确到 0.1 m^{-1} 。

利用波前框架眼镜矫正屈光不正,可以看作是利利用眼镜片产生的波像差补偿人眼波前像差。虽然同是用于矫正屈光不正,框架眼镜和角膜接触镜之间存在诸多不同之处^[1,12],如,框架眼镜片和角膜之间有 $12\sim 15 \text{ mm}$ 的距离,而角膜接触镜直接贴附在角膜的泪液层($6.5\sim 7.5 \mu\text{m}$ 厚)上,结合泪液透镜的作用矫正人眼的屈光不正。除此之外,角膜接触镜的后表面光学区的曲率半径要与角膜相匹配,整个镜片的光焦度由前表面光学区的曲率半径最终确定。

本文基于波前像差技术,设计了用于视觉矫正的角膜接触镜。采用角膜地形图数据,最优化设计角膜接触镜的后表面面型结构;基于波前像差数据,运用波前在介质中传播时的衍射角谱理论,结合泪液透镜的作用,最优化设计角膜接触镜的前表面光学区面型结构;采用角膜接触镜前后表面的结构,计算得到整个角膜接触镜的最优矫正光焦度。

2 实验方法

角膜接触镜的中央光学区是可用光学部分,其矫正度数包容在这个范围内^[1],因此,本文所指的角

膜接触镜的结构设计仅指对其中央光学区的结构面型的设计。

2.1 基于角膜面型的角膜接触镜的后表面设计

采用角膜地形仪^[13]测量角膜前表面的面形,得到参考球面的曲率半径和实际角膜地形相对于参考球面的径向高度差,运用 Matlab 软件进行编程计算,将径向高度差转化为沿垂直方向的高度差,然后用最小二乘法拟合出角膜前表面的最优曲面(球面或环曲面),作为角膜接触镜的后表面,同时也是泪液透镜的前表面,泪液透镜的后表面与角膜前表面匹配。

一般角膜接触镜的后表面设计包括球面、非球面和环曲面面型等^[2]。对于球面设计,弧面上各点的曲率半径值均相等,其曲率称为基弧;非球面设计包括椭圆弧面、抛物弧面等,此面型的配戴舒适度优于后表面为球面设计的;环曲面指的是,相互垂直的两条子午线上有不同曲率的面型,采用此面型设计的目的是为了矫正中高度角膜散光(小于等于 1.50 m^{-1})并使得配戴更为舒适。本文根据角膜散光的不同,选择球面和环曲面两种面型设计。

球面函数表达式为

$$Z = \frac{C_s(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - C_s^2(x^2 + y^2)}}, \quad (1)$$

环曲面函数表达式为

$$Z = \frac{C_1 x_1^2 + C_2 y_1^2}{1 + \sqrt{1 - C_1^2 x_1^2 - C_2^2 y_1^2}}, \quad (2)$$

式中 Z 指沿光轴方向的距离, (x, y) 指与光轴垂直的平面上的坐标系, (x_1, y_1) 指在 (x, y) 坐标系下旋转 θ 角的坐标系, C_s 指球面的曲率, C_1 和 C_2 分别指环曲面的沿 x_1 轴和 y_1 轴方向的曲率。

2.2 波前像差在角膜接触镜及相关介质内的传播

衍射的角谱理论^[14]具有和基尔霍夫衍射理论同等的价值,是在频域讨论光的传播,计算更为方便,本文采用衍射的角谱理论进行传播计算。用 Hartmann-Shack 波前像差仪测量实际人眼的波前像差,并以 Zernike 多项式表示为

$$W(x, y) = \sum_k C_k Z_k(x, y), \quad (x^2 + y^2 \leq 1) \quad (3)$$

式中 $Z_k(x, y)$ 是 Zernike 多项式的第 k 项, C_k 是 Zernike 多项式系数, x, y 为归一化坐标。则瞳孔平面处复振幅可表示为

$$u_0(x, y) = P(x, y) \exp[jkW(x, y)], \quad (4)$$

式中 $P(x, y)$ 是光瞳函数,表示为

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

式中 r 为波前像差的测量半径。

由于泪液透镜的厚度很薄, 仅为 $6.5 \sim 7.5 \mu\text{m}^{[1]}$, 所以波前由泪液镜的后表面透经泪液介质到达前表面, 相当于经过一个特定结构的相位板。泪液镜对入射波前 $u_1(x_1, y_1)$ 的相位变换作用, 即泪液镜的振幅透射率为

$$t(x_1, y_1) = \exp\{jk[(d_1 + d_a)n_a + [d_{t_2}(x_1, y_1) - d_{t_1}(x_1, y_1)](n_1 - 1)]\}, \quad (6)$$

式中 d_1 为泪液透镜的中心厚度, d_a 为泪液透镜的空气层的厚度, $d_{t_2}(x_1, y_1) - d_{t_1}(x_1, y_1)$ 指在 (x_1, y_1) 点处, 泪液透镜的前表面与后表面之间沿光轴方向的距离。 n_1 指泪液折射率, 取值为 1.336。

泪液镜前表面处的波前为

$$u_2(x_2, y_2) = u_1(x_1, y_1)t(x_1, y_1). \quad (7)$$

其角谱为 A_2 , 由角谱理论, 得到 $u_2(x, y)$ 的角谱 A_2 为

$$A_2\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_2(x, y) \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}x + \frac{\cos \beta}{\lambda}y\right)\right] dx dy, \quad (8)$$

式中 λ 为波前像差的测量波长, 取值 $0.555 \mu\text{m}$ 。

经过在角膜接触镜镜介质中传播后, 波前 $u_3(x, y)$ 为

$$u_3(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_2\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}, \frac{\cos \beta}{\lambda}\right) \times \exp\left(jn_{cl}\frac{2\pi d_{cl}}{\lambda} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta}\right) \times \exp\left[j2\pi\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}x + \frac{\cos \beta}{\lambda}y\right)\right] d\left(\frac{\cos \alpha}{\lambda}\right) d\left(\frac{\cos \beta}{\lambda}\right), \quad (9)$$

式中 n_{cl} 为角膜接触镜介质的折射率, 角膜接触镜包括软性和硬性两种^[1,2], 软镜介质的折射率为 1.37~1.45, 硬镜介质的折射率为 1.49, 本文采用软镜介质设计镜片结构, 折射率取值为 1.40, d_{cl} 为角膜接触镜的中央厚度, 取值为 0.10 mm。

2.3 角膜接触镜前表面面型结构的获得

由 $u_3(x, y)$ 得到角膜接触镜前表面处的等效波前像差, 为了使角膜接触镜产生的相位差能够补偿此波前像差, 设定其前表面的面型结构为环曲面, 此环曲面的坐标系经过 θ 角度的旋转, 表达如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 (x, y) 为原坐标系, (x', y') 为旋转后的坐标系, θ 角为 x' 轴与 x 轴(或 y' 轴与 y 轴)之间的夹角。进行最小二乘法优化计算, 使得优化后的曲面构成的透镜, 其产生的相位差与角膜接触镜前表面处的

等效波前像差的均方根(RMS)最小, 最后拟合出角膜接触镜前表面光学区的面型结构确定。

2.4 角膜接触镜光焦度的获得

在已获得的角膜接触镜前后表面光学区的面型结构的基础上, 计算整个角膜接触镜光焦度数时, 首先在接触镜的后表面处设定一平面波, 然后通过传播计算, 得到其传播至接触镜前表面后的波前, 此波前相对于平面波的相位延迟即是由角膜接触镜所产生的振幅透射率, 用球镜和柱镜拟合此等效波前像差, 即得到整个角膜接触镜的球度、柱度和散光轴位角。其中, 球镜和柱镜的表达式分别如(11)式和(12)式所示, y_1 是在 (x, y) 基础上经过 θ 角度的旋转, C'_S 和 C'_C 分别是球镜和柱镜的曲率。

$$Z'_S = \frac{C'_S(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - C'^2_S(x^2 + y^2)}}(n_{cl} - 1), \quad (11)$$

$$Z'_C = \frac{C'_C y_1^2}{1 + \sqrt{1 - C'^2_C y_1^2}}(n_{cl} - 1). \quad (12)$$

用球镜和柱镜的组合拟合即是通过 $\min |(Z'_S + Z'_C) - W_f|$ 得到的与波前 W_f 最接近的最佳球度和柱度。

3 实验结果及分析

本文随机选取 8 只人眼作为研究目标, 这 8 只眼均为近视眼。表 1 是用 Orbscan II 测得的 8 只被试眼的角膜前表面曲率半径, 以 R 表示; 以及采用角膜地形数据在 Matlab 中运用最小二乘法计算得到的其最佳拟合球面的曲率半径 R' 和最佳拟合环曲面的特征参数: R_1 和 R_2 分别表示沿两个相互垂直子午线方向的曲率半径, P_1 和 P_2 为相应方向的光焦度, 光焦度和曲率半径的关系^[15]为

$$P = \frac{n - 1}{R}, \quad (13)$$

式中这里的 n 为角膜的折射率, 取值为 1.3771。 $\Delta P = |P_1 - P_2|$, 为角膜的散光度, θ 角表示环曲面所在的坐标系相对于原坐标系旋转的角度。所有被试眼角膜前表面的最优拟合曲面(球面/环曲面)的 RMS 值均在 10^{-4} mm 量级。

由于存在个体差异, 8 只眼的角膜散光各不相同, 最小值为 0.15 m^{-1} , 最大值为 2.60 m^{-1} , 平均值为 1.06 m^{-1} 。根据临床验配经验^[1,2], 为角膜散光小于 1.50 m^{-1} 的患眼选取后表面为球面的接触镜, 为角膜散光大于等于 1.50 m^{-1} 的选取环曲面型结构。

表 1 角膜前表面及其拟合曲面的特征参数

Table 1 Structural parameters for the anterior cornea and its fitting surface

Eye order	R/mm	R'/mm	R_1/mm	R_2/mm	P_1/m^{-1}	P_2/m^{-1}	$\Delta P/m^{-1}$	$\theta/(^\circ)$
1	8.50	8.69	8.63	8.76	43.71	43.06	0.65	9
2	8.08	8.23	8.21	8.26	45.93	45.63	0.30	0
3	8.04	8.14	8.21	8.09	45.93	46.61	0.68	-2
4	8.22	8.46	8.28	8.66	45.52	43.56	1.96	10
5	8.21	8.46	8.23	8.73	45.82	43.22	2.60	5
6	8.07	8.20	8.22	8.19	45.89	46.04	0.15	-5
7	8.26	8.48	8.29	8.66	45.47	43.56	1.91	5
8	7.94	8.11	8.14	8.10	46.35	46.57	0.22	-5

采用 Wavescan II 波前像差仪测量 8 只眼的波前像差,每只眼测量 3 次取平均值,测量直径为 6~7 mm。由于明视条件下,人眼瞳径为 3~4 mm,所以表 2 为将大瞳径下测量的波前像差转化为 4 mm 瞳径后对应的波前像差数据, $Z_3 \sim Z_9$ 表示第 3 到第

9 项 Zernike 多项式系数,其中 Z_4 表示离焦, Z_3 和 Z_5 表示像散, Z_6 和 Z_9 表示三叶草, Z_7 和 Z_8 表示彗差。可以看出,每只眼的离焦项最大,其次是像散项,高阶像差均较小,具体数值因人而异^[16]。

表 2 4 mm 瞳径下的波前像差

Table 2 Wavefront aberrations for 4 mm pupil diameter

Eye order	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
1	-0.2417	2.1849	-0.2105	0.0264	0.0082	-0.0762	0.0066
2	0.0408	4.1326	-0.5317	0.0120	0.0307	-0.0130	-0.0107
3	-0.0206	2.2916	0.0632	0.0071	-0.0010	0.0449	0.0243
4	-0.0573	4.1506	0.0416	-0.0403	0.0988	-0.0207	0.0161
5	-0.2332	5.3428	-0.3644	-0.0023	0.0020	-0.0342	0.0011
6	-0.0821	3.4362	-0.1653	-0.1057	0.1137	-0.0387	0.0070
7	-0.0924	2.2165	-0.2578	-0.0400	0.0677	0.0015	0.0028
8	0.0378	1.9997	0.1019	0.0346	-0.0055	-0.0063	-0.0244

表 3 为 8 只眼配戴传统通用角膜接触镜的光焦度结果,其中 P_s 是球镜度数, P_c 是柱镜度数, θ 是散光轴位角。

表 3 角膜接触镜的最优光焦度

Table 3 Diopter of the conventional corneal contact lens

Eye order	1	2	3	4	5	6	7	8
P_s/m^{-1}	-3.25	-6.25	-4.50	-7.00	-8.75	-5.50	-3.50	-3.75
P_c/m^{-1}	-1.00	-1.50	0.75	0.25	-0.75	-0.50	-0.50	0.50
$\theta/(^\circ)$	-5	5	0	5	-5	5	5	0

根据波前在泪液镜和角膜接触镜介质内的传播,得到角膜接触镜前表面处的等效波前像差,对其进行拟合,进而获得接触镜前表面光学区最优面型

结构,8 只被试眼的角膜接触镜前表面光学区面型结构相关参数由表 4 给出。 R_1, R_2, P_1, P_2 和 θ 的含义与表 1 相同。

表 4 角膜接触镜前表面面型结构

Table 4 Front surface profile of the contact lens

Eye order	R_1/mm	R_2/mm	P_1/m^{-1}	P_2/m^{-1}	$\Delta P/m^{-1}$	$\theta/(^\circ)$
1	9.34	9.59	42.84	41.72	1.12	-10
2	9.39	9.78	42.60	40.88	1.72	14
3	8.91	8.76	44.88	45.64	0.76	0
4	9.69	10.16	41.28	39.36	1.92	5
5	9.98	10.95	40.08	36.52	3.56	2
6	9.23	9.31	43.32	42.96	0.36	5
7	8.92	9.47	44.84	42.24	2.60	5
8	8.77	8.67	45.60	46.16	0.56	10

由已获得的角膜接触镜前后表面的面型结构,通过衍射光学原理可以计算获得整个角膜接触镜片的光焦度,即矫正有像差人眼的角膜接触镜最优光焦度,计算结果由表5给出。 P_s, P_c, θ 角的含义与表3相同。可以看出接触镜后表面为球面面型设计

表5 角膜接触镜的最优光焦度

Table 5 Optimised diopter power of the contact lens

Eye order	1	2	3	4	5	6	7	8
P_s/m^{-1}	-3.36	-6.24	-4.39	-7.16	-8.72	-5.64	-3.52	-3.84
P_c/m^{-1}	-1.00	-1.64	0.76	0.16	-0.84	-0.36	-0.56	0.56
$\theta/(^\circ)$	5	5	5	0	0	6	5	5

4 结 论

采用角膜地形图数据,设计了最优化的角膜接触镜后表面光学区面型结构;基于波前像差数据,运用波前在介质中传播时的衍射的角谱理论,结合泪液透镜的作用,设计了最优化的角膜接触镜前表面光学区面型结构;采用角膜接触镜前后表面的结构,计算得到整个角膜接触镜的最优矫正光焦度数,从而达到了矫正视力和提高视觉质量的目的。

本文所提出的设计方法和验光处方,是基于光学仪器测量的客观数据,其中,角膜地形仪和波前像差仪的测量误差分别是 $1 \mu\text{m}$ 和 0.1 m^{-1} 。所选取的8只被试眼的角膜散光均为规则散光,且其散光度数具有一定的代表性,根据临床验配经验为每只被试眼选择适合的角膜接触镜后表面面型后,从而设计了两两种角膜接触镜的结构,即球-环曲面型结构和环曲-环曲面型结构,并通过对波前数据、角膜的面型结构参数、泪液镜的光焦度和计算获得的角膜接触镜光焦度的分析可知,所得结果具有合理性和准确性。计算过程中,拟合的RMS值均在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ mm}$ 量级,拟合得到的光焦度精度为 0.04 m^{-1} ,所以本设计方法具有客观性和精确性的特点。

参 考 文 献

- Lü Fan, Xie Peiying. Contact Lens [M]. Beijing: People's Hygiene Press, 2004. 1~23, 116~137
吕帆, 谢培英. 角膜接触镜学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004. 1~23, 116~137
- E. S. Bennett, B. A. Weissman. Clinical Contact Lens Practice [M]. Lippincott Williams & Wilkins, 2005. 111~151
- J. Liang, D. R. Williams. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(11): 2873~2883
- T. Seiler, M. Mrochen, M. Kaemmerer. Operative correction of ocular aberrations to improve visual acuity[J]. *Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology*, 2001, **3**(2): 69~71

的,如1,2,3,6和8号眼,其整个镜片的光焦度数等于全眼光焦度与泪液镜光焦度之和,而对于镜片后表面为环曲面面型设计的,如4,5和7号眼,其接触镜光焦度与全眼光焦度匹配。

- T. Seller, M. Mrochen, M. Kaemmerer. 波前像差引导的LASIK校正眼球像差[J]. *眼视光学杂志*, 2001, **3**(2): 69~71
- S. MacRae, R. R. Krueger, R. A. Applegate. Customized Corneal Ablation: The Quest for Super Vision [M]. United States: John H. Bond, 2001
- L. N. Thibos, X. Hong. Clinical applications of the Shack-Hartmann aberrometer[J]. *Optom. Vis. Sci.*, 1999, **76**(12): 817~825
- J. F. Bille, C. F. H. Harner, H. L. Fieder. Aberration-Free Refractive Surgery: New Frontiers in Vision [M]. Germany: Springer, 2002. 1~23
- W. H. Seiple, J. P. Szlyk. Clinical investigation into the vision performance provided by the izon spectacle lens system [J]. *Review of Ophthalmology*, 2008. 1~16
- L. N. Thibos, X. Hong, A. Bradley *et al.*. Accuracy and precision of objective refraction from wavefront aberrations[J]. *Journal of Vision*, 2004, **4**(4): 329~351
- Zhang Zhenhua, Rao Feng, Wang Zhaoqi. Study of objective refraction based on wave-front aberrations of human eyes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 123302
张振华, 饶丰, 王肇圻. 基于眼波前像差数据的客观验光研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 123302
- Qu Jia, Yao Jin. Spectacle Lenses [M]. Beijing: People's Hygiene Press, 2004. 8~18
瞿佳, 姚进. 眼镜学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004. 8~18
- L. A. Carvalho. Accuracy of Zernike polynomials in characterizing optical aberrations and the corneal surface of the eye[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2005, **46**(6): 1915~1926
- J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. McGraw-Hill, 1968. 31~96
- Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008. 29~60
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 29~60
- 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
- Fang Lihua, Wang Zhaoqi, Wang Wei *et al.*. The influence of wavefront aberration of single Zernike modes on optical quality of human eye[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