

矫正老视新方法—光剑人工晶体

樊若愚 刘永基

南开大学现代光学研究所教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071

摘要 为了矫正老视眼,使其达到在连续范围内清晰视物的目标,探索性地将具有大焦深成像性能的光剑元件(LSOE)作为人工晶体(IOL)引入人眼模型中,运用 Matlab 数值模拟的方法,模拟了 0~4D 物距内视网膜上的成像效果。同时从 E 图、调制传递函数(MTF)曲线和斯特列尔比率这三个角度,将该人工晶体的成像效果与老花镜和反向轴棱镜进行对比分析。结果显示,带有光剑人工晶体的人眼模型基本实现了阅读距离(25 cm)至无穷远处的清晰连续成像,在成像质量上占有优势,并且具有大焦深效果受瞳孔缩放影响较小的突出特点。

关键词 医用光学;老视矫正;大焦深;光剑元件

中图分类号 R778 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.051701

A New Element for Correcting Presbyopia—Intraocular Lens Based on Light Sword Element

Fan Ruoyu Liu Yongji

*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Ministry of Education,
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*

Abstract In order to get continuous and clear vision over a long distance for the presbyopic eyes, an intraocular lens (IOL) is introduced into the human eye model, and the IOL is designed according to the principle of light sword optical element (LSOE). Based on the method of numerical simulation in Matlab, the retina imaging effect is analysed in terms of E figure, modulation transfer function (MTF) curve and the Strehl ratio under the object distance of 0~4D. The LSOE-based intraocular lens is compared with traditional reading glass and axicon, depending on the quality of compensation. The results show that the LSOE-based IOL achieves clear continuous imaging from reading distance (25 cm) to infinity. It also has an advantage on the imaging quality. And the impact caused by the change of pupil diameter is lower than other elements.

Key words medical optics; correction of presbyopia; depth of focus; light sword optical element

OCIS codes 170.0110; 170.4460; 170.4470

1 引言

人眼是一个能够自动调焦的光学系统。睫状肌的收缩和扩张引起了晶状体的形状变化,从而改变了整个系统的屈光力,实现对相应距离的清晰成像。眼睛的调节能力在青少年时期状态最好,之后随着年龄的增长逐渐下降,人眼晶状体渐渐变硬无法改变形状,形成老视。大多数人从 40~45 岁以后视力开始模糊,60~65 岁以后,晶状体变硬成为一块焦距恒定的透镜,眼睛的调节能力完全丧失,在裸眼状态下只能看清远处的物体,无法看近景^[1]。

传统矫正老视的方法是配戴老视眼镜。老花镜具有特定的屈光度,人眼配戴后只能看清特定距离的物体(一般是阅读距离),而其他距离仍然看不清楚。为了克服老花镜单一焦点的缺陷,提出了多焦点的矫正方法^[2]。以双焦点为例,通过光学设计的方法制造一种具有两个焦点的隐形眼镜,人眼配戴以后,两个焦点分

收稿日期: 2014-11-06; 收到修改稿日期: 2014-12-29; 网络出版日期: 2015-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(11474172, 11104149)

作者简介: 樊若愚(1991—),男,硕士研究生,主要从事应用于人眼的大焦深光学元件等方面的研究。

E-mail: 1142332681@qq.com

导师简介: 刘永基(1972—),女,博士,讲师,主要从事眼视光学方面的研究。E-mail: yjliu@nankai.edu.cn (通信联系人)

别位于视网膜的前后,一个用于视远,另一个用于视近,从而实现远近都能看清的目标。但是这种方法也有致命缺陷。首先,虽然能看清 25 cm 和无穷远的物体,但是对于中间距离,成像却是十分模糊的;其次,双焦点元件的成像效果与孔径的大小有着密切的联系。人眼瞳孔的直径会根据环境亮度的改变进行缩放,导致视网膜上的成像质量不稳定。

在白内障治疗领域中,如今已有成熟可靠的治疗方法——晶状体置换手术。用人工晶体替代病态的自然晶状体,达到恢复视力的效果。现有的人工晶状体多为单焦点型,手术后患者虽能看清远处,但是看近处仍需配戴老视眼镜。为了解决这个问题,医疗公司推出了多焦点人工晶体(以双焦点为主),能同时看清远近的几个点,但不能在连续范围内清晰视物。

因此,若能设计一类具有大焦深性能^[3-5]的人工晶状体,则有望实现人眼在一个连续的范围内存看远和看近,并且通过特殊的结构,实现成像质量在瞳孔变化的情况下保持稳定的目标。基于此,探索性地提出一种新的人工晶体。这种特殊人工晶体的设计基于光剑元件(LSOE)的成像原理^[6-8],可以实现大焦深的性能。

2 原理与定义

光剑是一种具有聚焦性能的轻薄元器件。相位在极坐标系中的分布为^[4]

$$\phi(r) = -\frac{kr^2}{2[f + (\Delta f\theta/2\pi)]}, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, r 为半径, f 为元件的主焦点, Δf 为焦线长度, θ 为元件平面垂直于光轴的旋转角度。

与一般的聚焦元件不同,入射光通过光剑元件后,对应不同的 $\theta \in [0, 2\pi]$ 聚焦到不同的焦点 $f + \Delta f\theta/2\pi$, 最后在主焦点 f 的后方形成一段 Δf 长的焦线。

LSOE 是旋转非对称结构,入射光的弯曲大小与角度 θ 有关,表面屈光度分布如图 1(b) 所示。

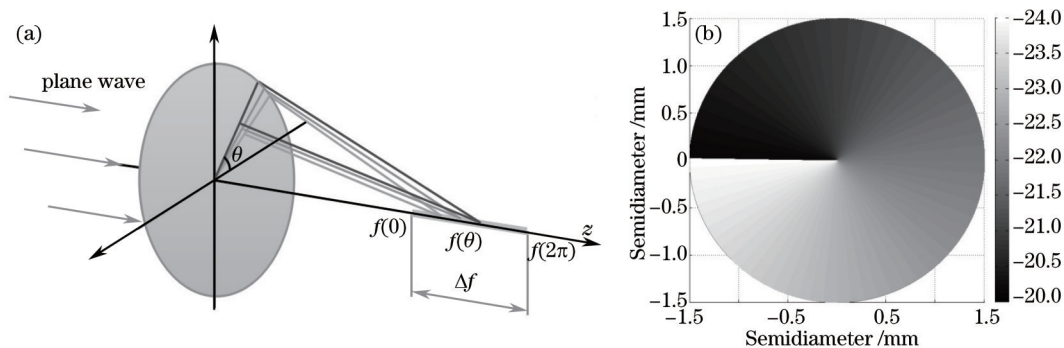


图 1 (a) LSOE 结构图; (b) 表面屈光度分布

Fig.1 (a) Structure of LSOE; (b) dioptric distribution

从图 1 可以看出,LSOE 人工晶体的屈光度随着角度 θ 变化,后方的焦线长度不受瞳孔大小缩放的影响。这一点在人眼老视矫正中十分重要。人眼瞳孔的直径是随着周围的亮度变化的。白天一般为 3 mm,夜间为 5 mm。在视力矫正时,需要充分考虑瞳孔的变化,使元件带来的大焦深性能尽量不受瞳孔变化的影响。

3 研究方法

为了研究的方便,忽略人眼复杂的生理结构,将没有晶状体的人眼简化成包含单透镜和瞳孔的光学系统,植入人工晶体后在 Matlab 中进行数据模拟^[8]。

对于 LSOE 人工晶体在矫正老视方面的研究,主要以两个方面为主,一是大焦深性能本身,另一个是在不同瞳孔下成像性能的稳定性。首先,整个光学系统距离视网膜 16.667 mm,对无穷远聚焦和阅读距离 (25 cm) 聚焦时的屈光度分别为 60D 和 64D。人眼要实现整个范围内的清晰成像,至少需要 4D 的调节能力。由于老视的晶体焦距固定,没有调节能力,对无穷远聚焦和阅读距离聚焦的后方像距分别是 15.625 mm 和 16.667 mm。所以,人工晶状体形成大焦深的焦线长度 Δf 必须大于二者之差 1.042 mm^[8]。其次,系统的孔径对成像质量有很大的影响,瞳孔减小本身将增大系统的焦深。人眼的瞳孔直径随着环境亮度做出调整,需要在瞳孔大小不同的情况下分别对元件进行模拟,使得元件的大焦深性能尽量不受瞳孔变化的影响。

加入人工晶状体之后系统的光瞳函数为^[9]

$$P(x,y) = A(x,y) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} W(x,y) + i\phi(x,y) \right], \quad (2)$$

式中 $W(x,y) = W_m \frac{x^2 + y^2}{b^2}$, $A(x,y) = \begin{cases} 1, & (x^2 + y^2) \leq r^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$, $W_m = \frac{\phi\lambda}{2\pi}$ 。系统的离焦量相位函数为

$$\varphi = \frac{\pi b^2}{\lambda} \left(\frac{1}{Z_i} + \frac{1}{Z_o} - \frac{1}{f} \right), \quad (3)$$

式中 f 为元件的焦点, Z_i 为像距, Z_o 为物距。

对于 LSOE 来说,

$$f_{\text{LSOE}} = f_0 + \Delta f \frac{\theta}{2\pi}, \quad (4)$$

然后通过点扩散函数计算出光学传递函数:

$$h(x,y) = F[P(x',y')]. \quad (5)$$

为了衡量矫正后人眼的成像质量,将系统的点扩散函数与理想图案(E图)卷积,得到实际成像图案。除了直观的图像成像模拟,斯特列尔比率也是衡量成像质量的标准之一^[10],它定义为某离焦量下人眼点扩散函数的最大值 $I_{\max,\phi}$ 与无相差下 ($\phi = 0$) 人眼衍射极限最大值 $I_{\max,\phi=0}$ 的比值:

$$S = \frac{I_{\max,\phi}}{I_{\max,\phi=0}}. \quad (6)$$

为了反映 LSOE 人工晶体在老视矫正领域的成像特点,将其与传统的老视眼镜进行比较。老视眼镜本质上是一个焦距固定的普通凸透镜。

在老视矫正中,也有人提出了基于反向轴棱镜结构的人工晶体矫正方法^[10-11]。也将这种方法与 LSOE 的成像性能做了比较。反向轴棱镜元件(IQAX)同样能在像方产生一定长度的焦线。图 2(b)为 IQAX 的屈光度分布,由图可以看出,中心部分的屈光度最低,沿半径方向逐渐增大。图 2(a)为其成像过程示意图,外侧的光被高屈光度部分会聚到近点,内侧的光被低屈光度部分会聚到远点,内外侧屈光度连续过渡,在后方形成了一段焦线。其相位在极坐标系中的分布为

$$\phi(r) = -\frac{1}{2(f_1 + \Delta f)} r^2 - \frac{1}{4R^2} \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_1 + \Delta f} \right) r^4. \quad (7)$$

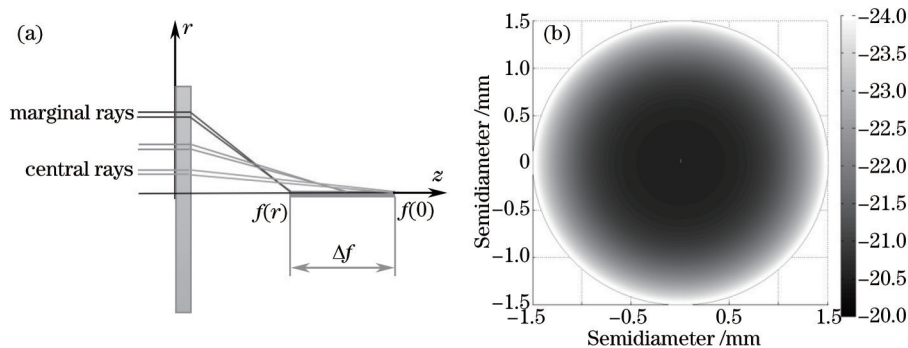


图 2 (a) IQAX 结构图; (b) 表面屈光度分布

Fig.2 (a) Structure of IQAX; (b) dioptric distribution

4 讨论与分析

图 3 为老视裸眼、老视镜矫正后的裸眼、IQAX 和 LSOE 在 3 mm 和 5 mm 瞳孔直径下,在 0~4D 物距范围内的模拟成像效果。结果显示,老视的裸眼和带上老视镜矫正后的眼睛都不能在整个范围内清晰连续成像。而且瞳孔越大,成像质量越差。与老视眼镜相比,经 LSOE 矫正后的眼睛,其可视范围在 0~4D 内明显增大,中间没有出现十分模糊的图像,在成像的连续性上占有很大的优势。与此同时,LSOE 也牺牲了单个位置上的清晰度,在 4D (25 cm) 这个位置上,老视眼镜的清晰度明显比 LSOE 高,虽然其清晰的范围很小。

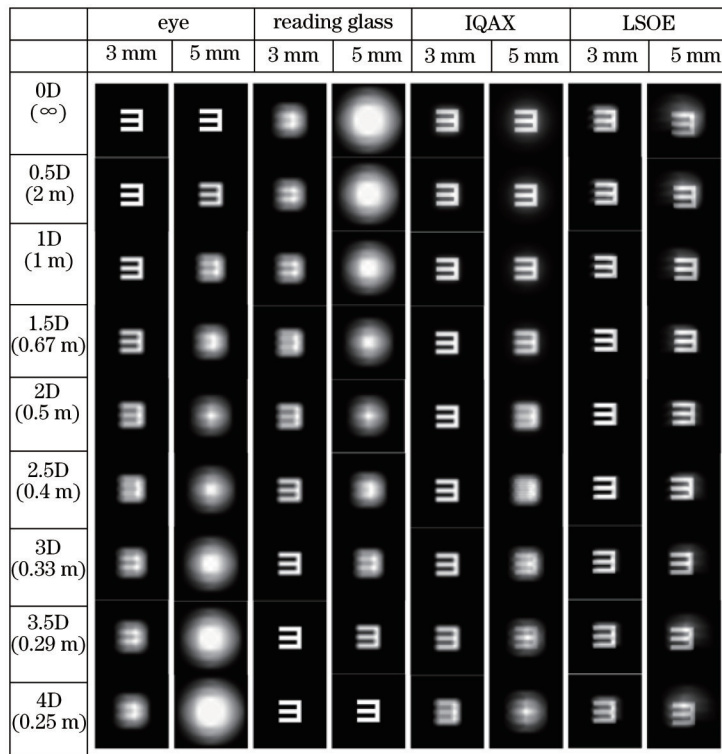


图3 在3 mm和5 mm瞳孔直径下,老视裸眼、老视眼镜、IQAX与LSOE的E图成像模拟

Fig.3 E figure imaging simulation results of naked eyes with presbyopia, reading glass, IQAX and LSOE, under the pupil diameter of 3 mm and 5 mm

在两种瞳孔大小下,对LSOE和IQAX人工晶体的成像性能进行对比。3 mm直径下两者的成像质量略有差异,都能在0~4D的范围内清晰成像,LSOE的效果在4D(25 cm阅读距离)处略优于IQAX。但是当切换到夜间的5 mm瞳孔直径时,IQAX的性能远不及LSOE,在近距离聚焦时出现了严重的模糊。出现这种现象的原因在于,IQAX属于旋转对称结构,屈光度分布与半径 r 有关[图2(b)],于是瞳孔的大小影响其像方焦线的长短。而LSOE的屈光度分布只与 θ 角度有关[图1(b)],受瞳孔大小影响不大。但是在扩大焦深增加可视范围的同时,也牺牲了单个位置上的清晰度。例如在看书时,此人工晶体的成像没有配戴老花眼镜那样清晰。不过人眼本身具有适应能力,配戴一段时间后会慢慢适应^[12]。

图4(a)~(c)分别为老视眼镜矫正后的老视眼、IQAX晶状体矫正后的老视眼、LSOE晶状体矫正后的老视眼,三者特定物距和瞳孔直径下的斯特列尔比率值分布。戴上老花镜后[图4(a)],4D附近有清晰的成像,但是远处无清晰成像。植入IQAX人工晶体后[图4(b)],在小孔径范围内清晰度较为均匀,但是孔径的增大对清晰度的分布影响很大。总体上LSOE人工晶体在不同孔径下实现了人眼在0~4D物距内清晰度的均匀分布[图4(c)]。随着孔径的增大,系统的焦深降低,成像质量随着斯特列尔比率的减小也有所下降。

图5为在3 mm和5 mm瞳孔直径下,植入LSOE人工晶体的眼模型分别在三个不同空间频率下的调制传递函数(MTF)值图。30 lp/mm处的值反映对物体轮廓的成像效果,50 lp/mm处的值反映对物体整体的成像效果,100 lp/mm处的值反映对物体细节的成像效果。当人眼的瞳孔直径为3 mm时,30 lp/mm标准下系统的MTF都在0.1以上,多数值大于0.2,说明在0~4D范围内能看清物体的轮廓。50 lp/mm标准下,大部分物距内的MTF都大于0.1,说明植入LSOE人工晶体人眼对中间大部分距离内的物体都能清晰成像。在100 lp/mm标准下,系统的MTF大部分在0.05~0.1之间,说明系统对物体有细节上的成像,但是不多。夜间瞳孔放大为5 mm时,整体MTF值都有所下降,30 lp/mm下的MTF值仍保持在0.1以上,100 lp/mm下的MTF值都在0.05以下。说明矫正后的人眼虽能看清物体的轮廓,但是无法呈现物体的更多细节。

5 结 论

针对人眼老视矫正的问题,探索性地将光剑元件运用于人工晶状体设计,并实现了较好的大焦深性能。

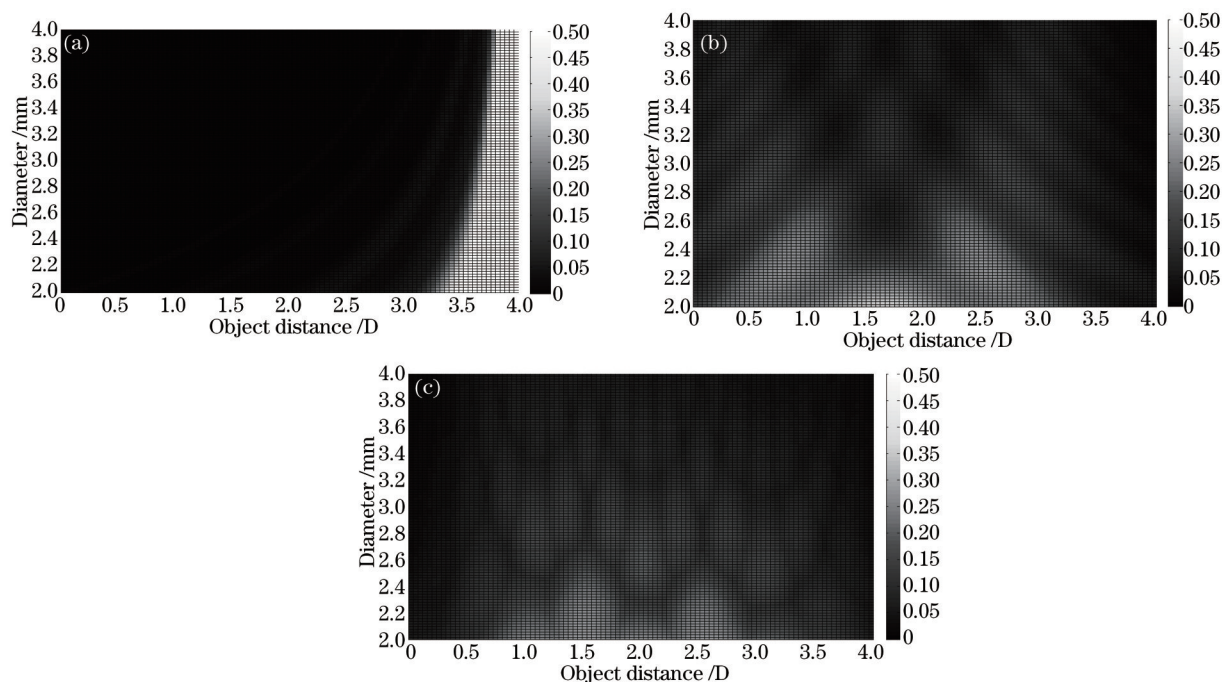


图4 不同瞳孔直径下0~4D物距范围内斯特列尔比率的数值分布

Fig.4 Distribution of Strehl ratio values within 0~4D under different pupil diameters

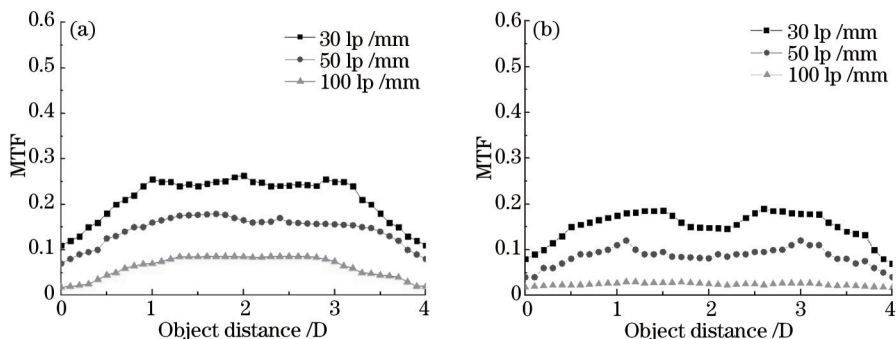


图5 (a) 3 mm和(b) 5 mm瞳孔直径下,植入LSOE人工晶体的眼模型分别在30 lp/mm, 50 lp/mm和100 lp/mm处的MTF值

Fig.5 MTF values of eye model with LSOE IOL at 30 lp/mm, 50 lp/mm and 100 lp/mm under the pupil diameter of

(a) 3 mm and (b) 5 mm

将此人工晶体植入眼睛以后,与传统的老视眼镜相比,在0~4D范围内成像的连续性有了很大的提高,达到了大焦深的效果。同时与IQAX相比,这种新设计的人工晶体在瞳孔变化时成像稳定。但是在扩大焦深,增加可视范围的同时,也牺牲了单个位置上的清晰度,虽然人眼具有适应能力,这个问题仍然需要后续的研究和改进。

参考文献

- 1 Xu Qing. Physiological Optics of the Human Eye[M]. Shanghai: Science and Education of Shanghai Press, 2012: 202-206.
徐庆. 眼的光学成像原理[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2012:202-206.
- 2 Tang Yunhai, Wu Quanying, Chen Xiaoyi, *et al.*. Optimization design of the meridian line of progressive addition lenses based on genetic algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0922005.
唐云海, 吴泉英, 陈晓翌, 等. 基于遗传算法的渐进多焦点镜片子午线优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0922005.
- 3 Z Zalevsky. Extended depth of focus imaging: A review[J]. SPIE Rev, 2010, 1: 018001.
- 4 Wang Zhongxun, Pan Yiming, Yin Shaoyun, *et al.*. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222004.
王仲勋, 潘一鸣, 尹韶云, 等. 长焦深、高分辨率激光加工聚焦透镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222004.
- 5 Xiao Jinsheng, Du Kanghua, Tu Chaoping, *et al.*. Depth of field simulation display for multi-focus images based on

- phased Gaussian kernel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1011006.
- 肖进胜, 杜康华, 涂超平, 等. 基于相控高斯核的多聚焦图像景深模拟[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1011006.
- 6 A A Gallego, S Bara, Z Jaroszewicz, *et al.*. Visual Strehl performance of IOL designs with extended depth of focus[J]. *Optometry Vision Sci*, 2012, 89(12): 1702-1707.
- 7 K Petelczyc, S Bara, A C Lopez, *et al.*. Contrast transfer characteristics of the light sword optical element designed for presbyopia compensations[J]. *J Eur Opt Soc*, 2011, 6: 11053.
- 8 K Petelczyc, J A Garcia, S Bara, *et al.*. Presbyopia compensation with a light sword optical element of a variable diameter[J]. *Photonics Lett Poland*, 2009, 1(2): 55-57.
- 9 Mo Xutao. Study on Extended Depth of Field Optical Imaging System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008: 20-24.
莫绪涛. 大景深光学成像系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008: 20-24.
- 10 K Petelczyc, J A Garcia, S Bara, *et al.*. Strehl ratios characterizing optical elements designed for presbyopia compensation [J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8693-8699.
- 11 J Ares, R Flores, S Bara, *et al.*. Presbyopia compensation with a quartic axicon[J]. *Optometry Vision Sci*, 2005, 82(12): 1071-1078.
- 12 R Montes-Mic, J L Alio. Distance and near contrast sensitivity function after multifocal intraocular lens implantation [J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(4): 703-711.

栏目编辑: 吴秀娟