

doi:10.3788/gzxb20184709.0922001

面向中距衍射多焦点人工晶状体设计

李季,薛常喜

(长春理工大学 光电工程学院,长春 130022)

摘 要:运用 ZEMAX 光学设计软件基于 Liou-Brennan 眼模型,材料选用疏水性丙烯酸酯,设计了前表面为衍射面,后表面为非球面的多焦点人工晶体,该设计利用 0 级、+1 级衍射级次,当物在不同位置时,使不同衍射级次发挥作用.对于所设计的人工晶体,采用的附加光焦度为 1.66 D,即两个焦点处的光焦度分别对应 20 D、21.66 D,小附加光焦度的确立旨在着重优化人工晶状体在中距处的光学质量.首先基于衍射光学理论计算衍射面的衍射效率,利用 ZEMAX 光学设计软件得到衍射面及非球面的光学参数,继而利用 MATLAB 模拟仿真软件模拟衍射面位相结构及实际表面轮廓,最后利用单点金刚石超精密车床对所设计的人工晶体进行加工,根据实测光学调制传递函数分析所设计的人工晶体的光学质量并利用实测离焦量曲线验证附加光焦度的正确性.该设计满足光学调制传递函数在空间频率 50 lp/mm 处大于 0.3,可为白内障患者在不同距离视物提供较好的视觉清晰度.新型人工晶体应用于物距为 75.3 cm 的工作距离,为小附加光焦度人工晶体应用领域提供理论及实验基础.

关键词:光学设计;几何光学;衍射;非球面;人工晶状体

中图分类号:O439;R276.7

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0922001-6

Design for Mid-range Diffraction Multifocal Intraocular Lens

LI Ji, XUE Chang-xi

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The Liou-Brennan (L-B) eye model is constructed using the optical design software ZEMAX. The material of Intraocular Lens (IOL) is hydrophobic acrylate. A multifocal intraocular lens with a diffractive surface on the anterior surface and an aspherical surface on the anterior surface is designed. The design uses 0th order and +1 order of diffraction. When the object is in different positions, different diffraction orders play a role. For the designed IOL, the additional optical power is 1.66 D, the optical powers of the two focal points are correspond to 20 D and 21.66 D respectively. The establishment of small additional power aims to focus on optimizing the optical quality of the intraocular lens at the mid-distance. Firstly, the diffraction efficiency of the diffractive surface is calculated based on the theory of diffractive optics. The optical parameters of the diffractive surface and the aspherical surface is obtained by ZEMAX optical design software. Then the phase structure and the actual surface profile of the diffractive surface are simulated by MATLAB simulation software. Finally, The designed IOL is processed by a single point diamond lathe. According to the measured optical Modulation Transfer Function (MTF) The optical quality of the designed IOL is analyzed and the correctness of the additional optical power is verified by the measured defocus curve. The design meets the optical modulation transfer function (MTF) at 50 lp/mm greater than 0.3, which provides better visual clarity for cataract patients for different distances. The new type of intraocular lens uses in the working distance of 75.3 cm, providing theoretical and experimental basis for the application of small additional power intraocular lens.

基金项目:吉林省自然科学基金(No.20150101062JC)资助

第一作者:李季(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学系统设计.Email:lijil12203@163.com

导师(通讯作者):薛常喜(1979-),男,教授,博导,主要研究方向为衍射光学、光学设计与超精密光学加工.Email:xcx272479@sina.com

收稿日期:2018-01-16;录用日期:2018-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Optical design; Geometric optics; Diffraction; Aspherics; Intraocular lenses

OCIS Codes: 220.2740; 080.4225; 220.3620; 220.3630; 000.1430

0 引言

人眼的天然晶状体具有自动调节能力,能使不同距离的物体聚焦在视网膜上.白内障患者手术后,天然晶状体被摘除,需要通过植入人工晶状体才能重见光明,但是植入的人工晶状体^[1](Intraocular Lens, IOL)曲率为固定值,不能变化,不具备调节能力.

白内障在我国是首要的致盲因素,从1980年起我国就将白内障致盲的复明工作,作为防盲和视觉损伤防治与康复的中心任务.随着白内障手术量的增加,人工晶状体的植入率从最初的59%提高到目前的95%以上.虽然我国在白内障防治中取得了很大的突破,但白内障致盲问题依然没有解决,至今仍有300万的白内障患者亟待治疗,为此,多焦点人工晶体应运而生,其中,折射型多焦点人工晶体^[2],衍射型多焦点人工晶体^[3],非球面人工晶体^[4-6]为当前临床上使用最为广泛的类型.国外最大的两家人工晶体厂商分别为雅培公司和爱尔康公司,其所设计的衍射多焦点人工晶体分为以下几个系列,雅培公司为ZMA00、ZMB00、ZMT系列,屈光度范围+5 D~+34 D,附加光焦度+4 D,爱尔康公司为SND1T系列、SV25T系列,屈光度范围+6 D~34 D,附加光焦度分别为+3 D、+2.5 D.对于+4 D、+3 D、+2.5 D的附加光焦度来说,患者视物的距离分别为31.25 cm、41.67 cm、50 cm,多用于看书看报等近距离视物,但是随着时代的发展和进步,已经问世的多焦点人工晶体并不能满足时下很多应用场合的需求.电脑如今广泛应用于生活的各个方面,如看书、看报、工作很多方面都离不开电脑,因此,小附加光焦度人工晶体在现实应用领域具有重要意义.所设计的衍射多焦点人工晶体,选用0级,+1级衍射,设定人眼瞳孔直径为3 mm^[7],前表面为衍射面,后表面为非球面^[8],附加光焦度为1.66 D,即视物距离为75.3 cm.针对不同病患人群进行设计,与现今问世的多焦点人工晶体应用领域的不同之处在于,小附加光焦度多焦点人工晶状体的设计针对的是时下应用最多的视物距离.本文使用ZEMAX设计了一款面向中距衍射多焦点人工晶状体,基于严格的衍射光学理论计算两个焦点处的衍射效率,随后在MATLAB中模拟衍射面位相结构及表面实际轮廓,最后借助单点金刚石超精密车床完成人工晶状体的加工,并对实验检测结果进行分析与讨论.

1 基本原理

1.1 衍射光学元件理论基础

衍射光学元件从光学原理上来说是一种衍射和干涉混合型光学元件,表面浮雕结构的每一周期或子周期都能够对光产生衍射作用,同时相邻周期的衍射光又发生干涉^[9],此外,衍射光学元件任意位相分布的性质可以用来校正光学系统的像差,提高光学系统的成像质量,同时还能够起到减少光学系统中透镜个数,减轻重量的作用.衍射光学元件最主要的作用就是对入射光的位相进行调制,成像光学系统中使用的对称式衍射光学元件的位相可表达为^[10]

$$\Phi(r) = 2\pi(C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + \dots) \quad (1)$$

式中, r 为衍射光学元件的径向坐标; C_1 、 C_2 、 C_3 ...为各项系数.

当衍射结构的台阶高度不等于 2π 时出射光波的波前是不连续的,这些波前通过干涉形成不同的衍射级次,对应不同的焦点.将衍射结构附于非球面上,当物在不同位置时,使不同衍射级次发挥作用.衍射人工晶体也是一个光学透镜,它通常可以被认为具有基底光焦度 $\Phi_{\text{基底}}$ 的折射透镜和具有附加光焦度 $\Phi_{\text{附加}}$ 的衍射透镜的组合.为了满足设计所需要的附加光焦度 $\Phi_{\text{附加}}$,就要求第 j 个衍射环的半径为^[11]

$$r_j = \sqrt{2j\lambda_0 / \Phi_{\text{附加}}} \quad (2)$$

式中, r_j 为第 j 个衍射环所在的半径, λ_0 为设计波长, $\Phi_{\text{附加}}$ 为所需的附加光焦度.

在每个区域的边缘,出现一个不连续的台阶,一般而言,区域之间的间隔从透镜中心到边缘逐渐变小.每个区域边界处的台阶高度决定了光线分布到各个不同的衍射级.不同衍射级次的衍射效率 η_m 由式(3)给出^[11]

$$\eta_m = \text{sinc}^2[m - \alpha\lambda_0 / \lambda] \quad (3)$$

式中, m 为衍射级次, α 为 2π 的分数倍.

利用 ZEMAX 光学设计软件对人工晶状体设计时,可以将人工晶状体转化为物空间成像,通过光学追迹可以计算出物空间光焦度与像空间光焦度的关系式为

$$0.8\Phi_{\text{像空间}} \approx \Phi_{\text{物空间}} \quad (4)$$

$$\Phi_{\text{物空间}} = 1000/l_{\text{物距}} \quad (5)$$

1.2 非球面理论基础

在设计中,为了降低术后眼的总球差并为人工晶体的设计提供更多的自由度,采用非球面的设计来平衡老龄患者眼所带的正球差.非球面在 ZEMAX 光学设计软件中的表达式为

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2r^2}} + A_4r^4 + A_6r^6 + A_8r^8 \dots \quad (6)$$

式中, c 是二次曲面的顶点曲率; K 是二次曲面系数; A_4 、 A_6 、 A_8 ...是高次非球面系数; r 是非球面的径向坐标.

2 人工晶体设计过程

2.1 人工晶体设计参数的确定

所设计的多焦点人工晶体是为了在临床应用过程中,为白内障患者提供更好的视觉质量^[12],使患者在不同距离视物时均能得到一个较好的视觉清晰度,同时平衡老龄病患眼所带的正球差,使人工晶体在医学上有更广的应用前景.许多学者用实验或临床测试的方法对人工晶体的光学特性进行了研究.例如,Negish^[13]和 Pieh^[14]等用水代替真实人眼中的房水和玻璃体,结合人造角膜和人工晶体构造实验眼,虽然得到了一些带有普遍意义的结果,即人工晶状体置于不同透镜组所构成的眼模型后所得到的实验结果有所不同^[15],但该方法并没有考虑到人眼的真实结构.实验表明 Lion-Brennan 眼模型^[16]用非球面更好的描述了人眼的结构特征,表 1 给出了该模型的具体参数.

表 1 Liou-Brennan 眼模型
Table 1 Liou-Brennan eye model

	Curvature/mm	Quadratic coefficient	Thickness/mm	Refractive index
Corneal anterior surface	7.77	-0.18	0.5	1.376
Corneal posterior surface	6.4	-0.6	3.16	1.336
Pupil	∞	-0.94	1.59	1.368~1.407
IOL front surface	12.4	-	2.43	1.407~1.368
IOL back surface	-8.1	0.96	16.7	1.336

人工晶体的设计采用基底透镜光焦度为 20 D,附加光焦度为 1.66 D,即两个焦点分别对应光焦度 20 D、21.66 D.根据人工晶体国标第二部分:光学性能及试验方法附录 A(光焦度的测量)所给出的计算公式来计算基底透镜的光学参数,具体设计参数详见表 2.

表 2 人工晶体主要设计参数
Table 2 Main specifications of the IOL

Parameters	Specifications
Wavelengths λ /nm	546
MTF	50 lp \geq 35%
Entrance pupil diameter/mm	3
Lens-front radius/mm	20.36
Lens-back radius/mm	-20.36
Central thickness/mm	0.767
Edge thickness/mm	0.22

人工晶体的材料使用疏水性丙烯酸酯^[17],光学区直径为 6 mm,将表 2 中的初始结构参数嵌入到 ZEMAX 中已经建立好的 L-B 眼模型中,使每个焦点处的光学调制传递函数 MTF 达到最佳,从而得到所需要的光学参数即衍射环带半径以及位相系数 C_1 、 C_2 .人工晶体置于 L-B 眼模型如图 1,人工晶体置于空气中的 ZEMAX 软件图如图 2,在 ZEMAX 光学设计软件中对球差进行校正,球差校正曲线如图 3.

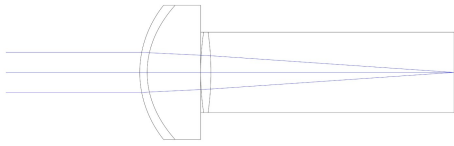


图1 人工晶体 2D 视图

Fig.1 2D view of intraocular lens

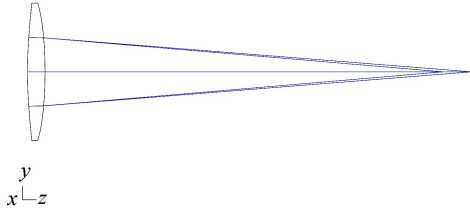


图2 双焦点图

Fig.2 Bifocal illustration

从图3中可以看出,在人工晶状体的设计中加入衍射面,球差得到校正.

2.2 位相压缩

在制作衍射光学元件时,需要将一个给定的连续相位函数 $\Phi(y)$ 以一定的位相差对其进行位相分层和压缩,利用 MATLAB 模拟仿真软件绘制出位相函数并进行位相压缩,使其与非球面函数曲线相结合以得到最终加工函数,位相压缩图如图4.

将位相函数以 π 的位相差压缩,利用衍射效率计算公式计算两个焦点处的衍射效率,根据式(3)可以计算出 $\eta_0 = \eta + 1 = 0.405$.

3 加工与检测结果讨论

3.1 人工晶体的加工

为了制造出衍射光学元件,将调制后的图4所示位相函数记为 $\Phi_d(r)$,这样衍射元件的位相分布函数就可以通过表面微结构函数 $h(r)$ 来表示,两者关系为

$$h(r) = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1} \cdot \frac{\Phi_d(r)}{2\pi} \quad (7)$$

式中, $n(\lambda_0)$ 为基底在中心波长 λ_0 时的折射率.

将式(6)、(7)相结合,得到超精密车床的加工函数为

$$z(r)_{\text{结合}} = z(r) + h(r) \quad (8)$$

在 MATLAB 模拟仿真软件中模拟并获取实际加工图及坐标点,利用超精密单点金刚石车床完成人工晶体的加工,实际加工路线图如图5.

3.2 检测结果

对于加工完成的实验件,利用 TRIOPTICS 全自动数字光学测焦仪,在 ISO 国标眼模型中移动像面的位置,每隔一段步长记录一个数据,根据所记录的实验数据绘制这一段焦距范围内的实测离焦曲线,绘制结果如图6.

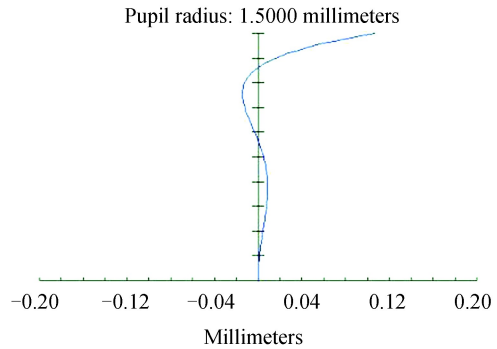


图3 球差校正曲线

Fig.3 Spherical aberration correction curve

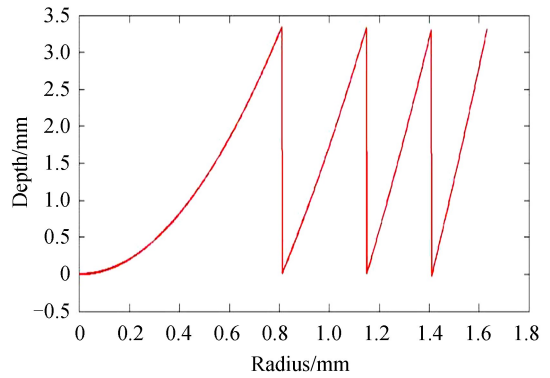


图4 压缩位相图

Fig.4 Compressed phase diagram

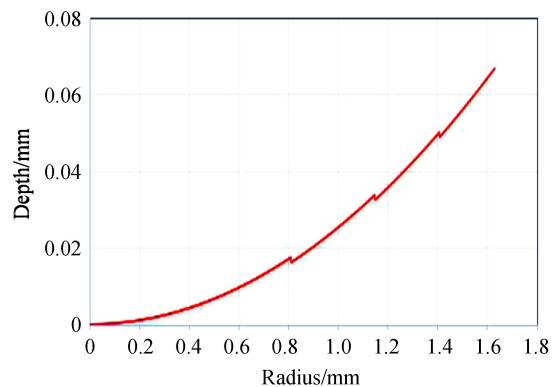


图5 加工图

Fig.5 Processing diagram

从图 6 中可以看到,在扫描范围内出现了两个 MTF 峰值,分别对应两个焦点,根据两个峰值处所对应的值逐面光学追击,逆向计算得到多焦点人工晶体的两个近轴焦距,所对应的光焦度分别为 19.8 D、21.46 D,即附加光焦度为 1.66 D.再根据两个焦点处的实测 MTF 值进一步分析像质,每隔一段空间频率记录一个 MTF 值,所记录的实测 MTF 曲线如图 7.

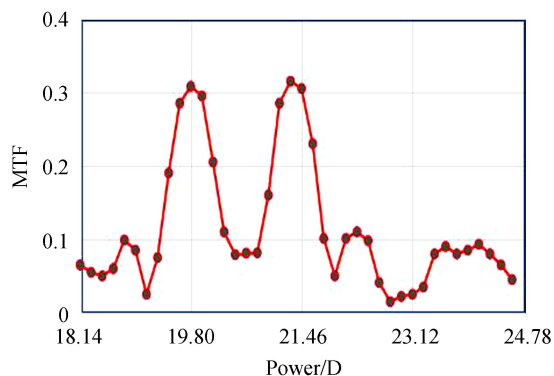


图 6 人工晶体在 ISO 眼模型中的实测离焦曲线
Fig.6 Measured defocused curve of intraocular lens in ISO eye model

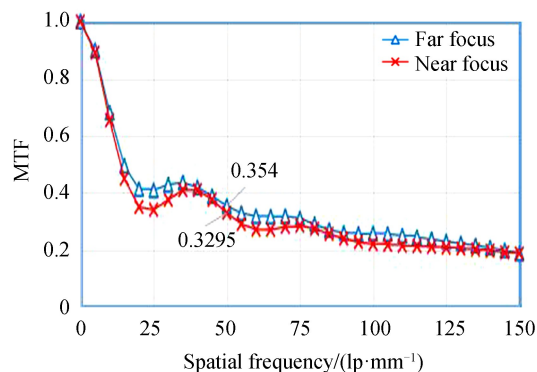


图 7 人工晶体在 ISO 眼模型中的实测 MTF
Fig.7 Measured of the designed intraocular Lens in ISO eye model

在进行 MTF 测试时,需要将人工晶状体放入带有眼角膜的模型眼中,孔径光阑为 3 mm,波长为 546 nm 单色光条件下进行测试在空间频率 50 lp/mm 处的 MTF 值^[18].从人工晶体在 ISO 国标眼模型中的实测 MTF 曲线可知,两个焦点的 MTF 值在 50 lp/mm 处分别为 0.354、0.33.

4 结论

本文所设计的人工晶状体在附加光焦度的控制上,将人工晶状体转为物空间成像,得到物方光焦度与像方光焦度的关系,通过物距控制法所得到的附加光焦度更为准确.实验结果表明,在 50 lp/mm 处 MTF 值分别为 0.354、0.33,均大于 0.3,能够为白内障患者术后对于不同距离的视物提供较好的视觉质量,满足国标多焦点人工晶状体的设计要求.两个焦点处所对应的光焦度分别为 19.8 D、21.46 D,即附加光焦度为 1.66 D,与理论设计值相吻合.面向中距的多焦点人工晶体与已经问世的传统双焦点人工晶状体相比,其设计理念更倾向于时下使用最多的工作距离,扩大了人工晶体的应用领域.课题将进一步考虑,在人工晶状体的加工过程中所存在的加工误差来源及解决措施,使所加工的人工晶状体各光学参数实测值更接近理论值.

参考文献

- [1] YAO Feng, WANG Zhao-qi, WANG Yan, *et al.* Eye model and intraocular lens design after corneal surgery[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1806-1810.
饶丰, 王肇圻, 王雁, 等. 角膜手术后眼模型的构建和人工晶状体设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1806-1810.
- [2] TIAN Ya-bin, MA Zhong-xu, WANG Wan-rong, *et al.* The clinical effect of asymmetrical zone refractive multifocal intraocular lens and tunable intraocular lens[J]. *Recent Advances in Ophthalmology*, 2016, **36**(12): 1157-1160.
田亚宾, 马忠旭, 黄婉荣, 等. 非对称区域折射型多焦点人工晶状体与可调节型人工晶状体的临床效果研究[J]. *眼科新进展*, 2016, **36**(12): 1157-1160.
- [3] LIU Yang, ZHONG Bin-wu, LI Dan-dan, *et al.* Clinical observation of multifocal intraocular lens implantation[J]. *Chinese Journal of Modern Drug Application*, 2011, **03**: 67-8.
刘洋, 钟彬武, 李丹丹, 等. 多焦点人工晶体植入的临床观察[J]. *中国现代药物应用*, 2011, **03**: 67-8.
- [4] SAVINI G, HOFFER K J, BARBONI P, *et al.* Corneal asphericity and IOL power calculation in eyes with aspherical IOLs.[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2017, **33**(7): 476-481.
- [5] SEMERARO F, ROMANO M R, DUSE S, *et al.* Quality of vision in patients implanted with aspherical and spherical intraocular lens: Intraindividual comparison.[J]. *Indian Journal of Ophthalmology*, 2014, **62**(4): 461-463.
- [6] RAJABI M T, KOROUJI S, FARJADNIA M, *et al.* Higher order aberration comparison between two aspherical intraocular lenses: MC6125AS and Akreos advanced optics.[J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2015, **8**(3): 565-568.
- [7] YAO Feng. Study on the design and the performance of Intraocular Lenses based on individual eye models[D]. Tian Jin: Nan Kai University, 2010: 31-32.

- 饶丰. 基于个性化眼模型的人工晶体设计及其特性研究[D].天津:南开大学, 2010: 31-32.
- [8] DOSKOLOVICH L L, BEZUS E A, MOROZOV A A, *et al.* Multifocal diffractive lens generating several fixed foci at different design wavelengths[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(4): 4698.
- [9] CUI Qing-feng. Design of hybrid diffractive-refractive imaging optical systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **01**: 12-5-38.
崔庆丰. 折衍射混合成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, 01: 12-5-38.
- [10] PIERS P A, WEEBER A H, NORRBY S. Diffractive bifocal intraocular lens: EP, EP2113226[P]. 2012.
- [11] SCHWIEGERLING J, DEHOOG E. Problems testing diffractive intraocular lenses with Shack[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(16): 62-8.
- [12] GARCIABELLA J, VENTURAABREU N, MORALESFERNANDEZ L, *et al.* Visual outcomes after progressive apodized diffractive intraocular lens implantation.[J]. *European Journal of Ophthalmology*, 2017(**5**).
- [13] NEGISHI K, OHNUMA K, IKEDA T, *et al.* Visual simulation of retinal images through a decentered monofocal and a refractive multifocal intraocular lens[J]. *Japanese Journal of Ophthalmology*, 2005, **49**(4): 281-286.
- [14] PIEH S, MARVAN P, LACKNER B, *et al.* Quantitative performance of bifocal and multifocal intraocular lenses in a model eye: point spread function in multifocal intraocular lenses[J]. *Archives of Ophthalmology*, 2002, **120**(1): 23-28.
- [15] HARMAN F E, MALING S, KAMPOUGERIS G, *et al.* Comparing the 1CU accommodative, multifocal, and monofocal intraocular lenses: a randomized trial.[J]. *Ophthalmology*, 2008, **115**(6): 993-1001.
- [16] LIOU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 1997, **14**(8): 1684-1695.
- [17] LIU Xiao-su, XU Mei-fang, GUO Mei-qing. Characteristics of IOLs and new progress in design[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*. 2007, **48**: 9793-6.
刘晓苏, 徐美芳, 郭梅清. 人工晶体材料的特点及设计新进展[J]. *中国组织工程研究与临床康复*. 2007, **48**: 9793-6.
- [18] INSTITUTION B S. Ophthalmic Implants - Intraocular Lenses - Part 9: Multifocal Intraocular Lenses[J].

Foundation item: Natural Science Foundation of Jilin Province of China (No.20150101062JC)

引用格式: LI Ji, XUE Chang-xi. Design for Mid-range Diffraction Multifocal Intraocular Lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0922001

李季, 薛常喜. 面向中距衍射多焦点人工晶状体设计[J]. *光子学报*, 2018, **47**(9): 0922001