

# 基于多焦点自由曲面菲涅耳人工晶状体设计

曹晶辉<sup>1,2</sup>, 朱华新<sup>1,2</sup>, 苏宙平<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;

<sup>2</sup>江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

**摘要** 为了实现人工晶状体植入人眼后在远、中、近三个视距范围内均清晰成像, 帮助白内障患者获得更好的视觉体验, 设计了多焦点菲涅耳透镜, 其环带面采用自由曲面的形式。通过每个环带交替控制焦距的方法, 避免了随着瞳孔收缩而出现的焦点丢失的问题。基于折射定律的矢量形式, 采取迭代计算的方法, 设计了自由曲面形式的菲涅耳透镜, 并模拟了不同焦点处的能量分布。基于 ISO 11979-2 标准眼模型模拟了自由曲面菲涅耳三焦点人工晶状体植入眼成像系统, 附加光焦度分别为 +1.66 D 和 +3.32 D。通过光线追迹计算了不同光焦度下的调制传递函数; 计算结果表明: 在空间频率为 50 lp/mm 时, 远焦点、中焦点及近焦点处调制传递函数均在 0.2 以上, 满足患者的使用需求。

**关键词** 光学设计; 菲涅耳透镜; 自由曲面; 多焦点; 人工晶状体; 调制传递函数

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082202

## Design of Intraocular Lens Based on Multifocal Freeform-Fresnel Surface

Cao Jinghui<sup>1,2</sup>, Zhu Huaxin<sup>1,2</sup>, Su Zhouping<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** In order to help cataract patients obtain a better visual experience with the intraocular lens implantation, which form a clear image on the retina in the far, intermediate and near vision synchronously, we design a trifocal intraocular lens with freeform-Fresnel surface. Each individual focal length is controlled by several different Fresnel zones, which can avoid the focal point disappearing with pupil contraction. Based on the vector form of refraction law, the Fresnel lens with freeform surface is designed by iterative computation, and the energy distribution at different focal points is simulated. Afterwards, we construct the trifocal intraocular lens with freeform-Fresnel surface in the eye model of ISO 11979-2, of which the additional power of the focal length is +1.66 D and +3.32 D, respectively. By ray tracing, the modulation transfer function of the system at different focal point is obtained. It is clear that the modulation transfer function is greater than 0.2 at the spatial frequency of 50 lp/mm for all focal points, which meets the daily vision demand of cataract patients.

**Key words** optical design; Fresnel lens; freeform surface; multifocal; intraocular lens; modulation transfer function

**OCIS codes** 220.3630; 220.2740; 000.1430

## 1 引言

人在刚出生时, 眼睛的天然晶状体是清澈透明的。随着年龄的增长和其他诱因, 人眼看近物的能

力逐渐降低, 甚至彻底失去视力。摘除病变的晶状体, 并植入一片人工晶状体(IOL)作为代替被视为是恢复视力的最有效手段<sup>[1-2]</sup>。按照焦点数量的不同, 人工晶状体可以分成单焦点人工晶状体和多焦

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-02-14; 录用日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(60908041)、上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(2012ADL03)

\* E-mail: zpsu\_optics@163.com

点人工晶状体。现有的单焦点人工晶状体不具备调节能力,只覆盖远视力,患者看近处物体时仍需要佩戴眼镜,十分不便。多焦点人工晶状体的设计有很多,如:折射型三焦点人工晶状体(采用径向分段折射原理),其在全孔径下可以提供3个视距,但随着瞳孔尺寸的变化,焦点数量将减少<sup>[3]</sup>;爱尔康公司推出了ReSTOR ©衍射型多焦点人工晶状体<sup>[4]</sup>,其采用折衍混合设计<sup>[5]</sup>。入射光波约81%的能量主要被分配到0级、+1级或+2级上,其余约19%的光能不用于成像<sup>[6]</sup>,这不但造成光能的损失,还会影响检测<sup>[7]</sup>。另外,传统的多焦点设计因受限于边缘厚度而不能太薄,透镜的中心厚度一般较大,手术过程中的切口也较大。比如,常规的20 D人工晶状体的中心厚度约为0.6 mm,34 D人工晶状体的中心厚度约为0.9 mm,白内障小切口超声乳化手术切口为2.2~3 mm,最新的白内障微切口超声乳化手术切口也需要1.8 mm,但只是针对简单结构的人工晶状体<sup>[8-9]</sup>。综上,现有的多焦点人工晶状体植入人眼后,中程视力仍然相对缺失,术中损伤大。所以对微手术切口的高性能三焦点人工晶状体的研究是未来人工晶状体的发展趋势。

与传统的折射光学透镜相比,菲涅耳透镜可以实现同样的功能,但其中心厚度(以及质量)可以极大地减薄<sup>[10-11]</sup>。与一般的衍射光学元件相比,其设计、加工和检测的复杂程度小得多。对于20~34 D正光焦度人工晶状体,其中心厚度较大,若采用菲涅耳透镜设计,中心厚度预计在0.4~0.5 mm之间,手术切口有望不超过1.8 mm,有利于实现小创口快恢复。

本文设计了自由曲面形式的菲涅耳透镜,该透镜通过几个不连续的环带来控制1个焦距,避免了随着瞳孔收缩出现的焦点丢失的问题。讨论了多焦点自由曲面菲涅耳透镜的设计原理,并在眼模型中建立了自由曲面菲涅耳透镜,并优化了像质,最终基于光线追迹方法给出了自由曲面菲涅耳三焦点人工晶状体在不同光焦度下[23.32 D(近焦)、21.66 D(中焦)和20 D(远焦)]眼模型系统的调制传递函数(MTF)。

## 2 多焦点自由曲面菲涅耳透镜设计原理

通常,菲涅耳透镜采用平凸或平凹外形,即入射光经过的第一面是平面,然后到达菲涅耳面,这种结构便于设计。以一个平凸结构为基础设计三焦点自

由曲面菲涅耳透镜,成像示意图如图1所示。三焦点的形成原理是:第1个环带(最外围的环带)焦距为 $f_1$ ,第2个环带焦距为 $f_2$ ,第3个环带焦距 $f_3$ ,第4个环带焦距又变为 $f_1$ ,按这种方式依次重复下去,每个环带的通光面积相等。这种设计具有非常明显的优势:将这种透镜植入人眼后,随着瞳孔缩小,当最外面的1~3个环带不起作用时,剩下的环带依然可以保证3个焦点同时存在,这是因为本透镜采取了焦距随环带依次重复出现的方式。以9个环带的菲涅耳透镜为例,若按传统的设计方法,设计3个焦点时,第1~3个环带焦距为 $f_1$ ,第4~6个环带焦距为 $f_2$ ,第7~9个环带焦距为 $f_3$ ,随着瞳孔缩小,当第1~3个环带不起作用时,就只剩下两个焦点了。本设计的三焦点自由曲面菲涅耳透镜焦点数几乎不受瞳孔大小的影响。

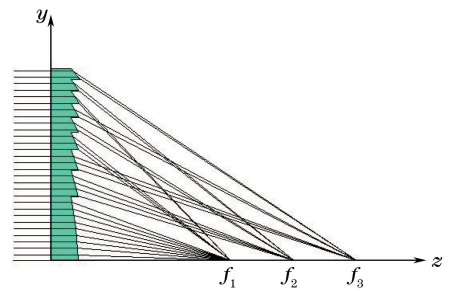


图1 自由曲面菲涅耳三焦点人工晶状体的成像示意图  
Fig. 1 Imaging schematic of freeform-Fresnel trifocal IOL

### 2.1 按等光能划分菲涅耳面的环带

为了更好地阐述菲涅耳自由曲面的设计过程,将透镜的第1个面设为平面,如图2所示。环带半径按等环带面积进行划分,这样可使每个环带内的通光面积相等。以透镜半口径 $R=3\text{ mm}$ 为例,假设有 $N=9$ 个环带(也可以更多),若采用等面积划分各个环带,则每个环带的面积为

$$\Delta S = \frac{\pi R^2}{N} = \pi(r_{j+1}^2 - r_j^2), \quad (1)$$

第 $j$ 个环带的半径为:

$$r_j = R \sqrt{\frac{j}{N}}. \quad (2)$$

### 2.2 菲涅耳自由曲面算法设计

以菲涅耳透镜中的某个环带自由曲面设计为例,如图3所示,在该环带内以一系列的等间距平行光线为采样光线,每条采样光线与自由曲面的交点 $x$ 方向的坐标都是已知的。假设已经知道该环带自由曲面上的任意一点 $B_k(x_k, y_k)$ ,如果能计算出与其相邻的 $B_{k+1}$ ,构建自由曲面局部面片上 $B_k$ 与 $B_{k+1}$ 的迭代关系,就可以计算出该环带内的所有采样点<sup>[12-13]</sup>。

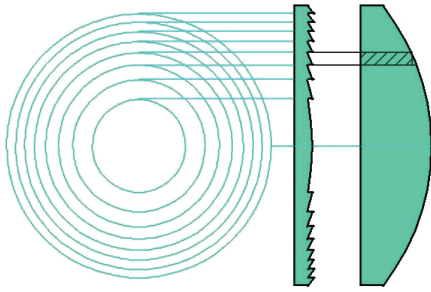


图2 菲涅耳透镜环带区域的划分原理

Fig. 2 Division schematic for the ring zone of Fresnel lens

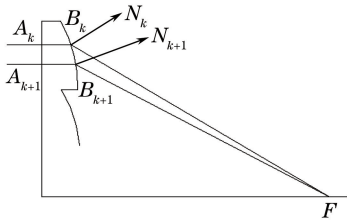


图3 自由曲面菲涅耳透镜的设计原理示意图

Fig. 3 Schematic for designing freeform-Fresnel lens

光线经过透镜前表面上的  $A_k$  点入射到  $B_k$  点, 入射光线的单位方向矢量如下:

$$\mathbf{U}_{in} = [0, j], \quad (3)$$

光线  $A_k B_k$  在  $B_k$  点发生折射后, 出射到了焦点  $F(0, Y_F)$  上。经自由曲面上  $B_k$  点出射的光线的单位矢量如下:

$$\mathbf{U}_{out} = \left[ \frac{-x_k}{\sqrt{x_k^2 + (Y_F - y_k)^2}} \mathbf{i}, \frac{Y_F - y_k}{\sqrt{x_k^2 + (Y_F - y_k)^2}} \mathbf{j} \right], \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{i}$  和  $\mathbf{j}$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴的单位方向矢量。折射定律的矢量形式为<sup>[14]</sup>

$$n_s \mathbf{U}_{out} - n_{iol} \mathbf{U}_{in} =$$

$$\left[ n_s^2 + n_{iol}^2 - 2n_s n_{iol} (\mathbf{U}_{out} \cdot \mathbf{U}_{in}) \right]^{\frac{1}{2}} \mathbf{N}, \quad (5)$$

式中:  $n_s$  为自由曲面菲涅耳透镜周围介质的折射率;  $n_{iol}$  为材料的折射率。根据(5)式可以求得过  $B_k$  点的单位法向矢量  $\mathbf{N}_k$ , 于是过  $B_k$  点的切线斜率为

$$q_k = \frac{n_s x_k}{n_s (Y_F - y_k) - n_{iol} \sqrt{x_k^2 + (Y_F - y_k)^2}}, \quad (6)$$

过  $B_k$  点的切线与第  $k+1$  条采样光线交于  $B_{k+1}$  点, 因为采样光线是平行等间隔分布的, 故而  $B_k$  点在  $x$  轴方向的坐标在初始条件中就可以得到, 为  $x_{k+1}$ 。接下来主要求  $B_{k+1}$  点在  $y$  轴方向的坐标  $y_{k+1}$ 。过  $B_k$  点的切线与过  $A_{k+1}$  的直线相交于  $B_{k+1}(x_{k+1}, y_{k+1})$ , 其中  $y_{k+1}$  为待求的量。过  $B_k$  点的切线斜率又可以表示为

$$q_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}, \quad (7)$$

联立(6)、(7)式可以得到菲涅耳面上相邻点之间的迭代关系:

$$y_{k+1} = \frac{n_s x_k}{n_s (Y_F - y_k) - n_{iol} \sqrt{x_k^2 + (Y_F - y_k)^2}} \cdot (x_{k+1} - x_k) + y_k. \quad (8)$$

从(8)式可以知道曲面上相邻两个采样点之间的迭代关系, 一旦  $B_k$  已知, 就可以求出其相邻的采样点  $B_{k+1}$ 。环带上的第一个点是由边界条件给出的, 利用这种迭代关系可以求出剖视图中的—条母线, 经旋转对称之后可以得到整个曲面<sup>[15]</sup>。利用相同的方法可以计算其他环带上的所有点, 菲涅耳透镜采取了等高模式。这里设计一个自由曲面菲涅耳透镜, 产生的三种焦距分别是  $f_1 = 50$  mm,  $f_2 = 46.17$  mm,  $f_3 = 42.88$  mm, 设计完成的菲涅耳透镜如图4所示, 其中图4(a)、(b)分别为菲涅耳透镜的二维和三维轮廓图。

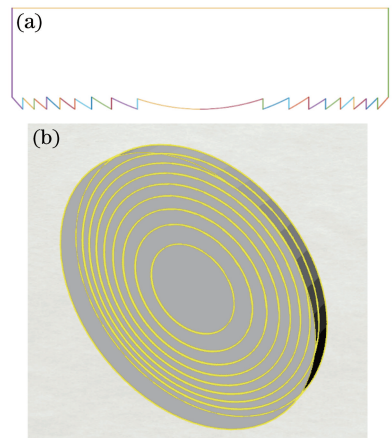


图4 自由曲面菲涅耳透镜示意图。(a)二维;(b)三维

Fig. 4 Schematics of freeform-Fresnel lens.

(a) 2D view; (b) 3D view

### 2.3 多焦点自由曲面菲涅耳透镜不同焦点处的能量分布

基于蒙特卡罗光线追迹<sup>[16]</sup>方法, 对图4中的自由曲面菲涅耳透镜进行了光线追迹, 追迹后分析各焦点处的能量分布, 结果如图5所示。在光线追迹过程中, 透镜采用全孔径通光, 可以看出各焦点上的能量分布几乎相同。

为了模拟瞳孔缩小导致的边缘环带无光线通过, 设计菲涅耳透镜最边缘的一个环带没有光线通过, 模拟结果如图6所示。由图6可以看出, 仍然有3个焦点存在, 只是远焦点的能量比其他两个焦点的能量少一些。然而在传统的设计方法中, 当瞳孔

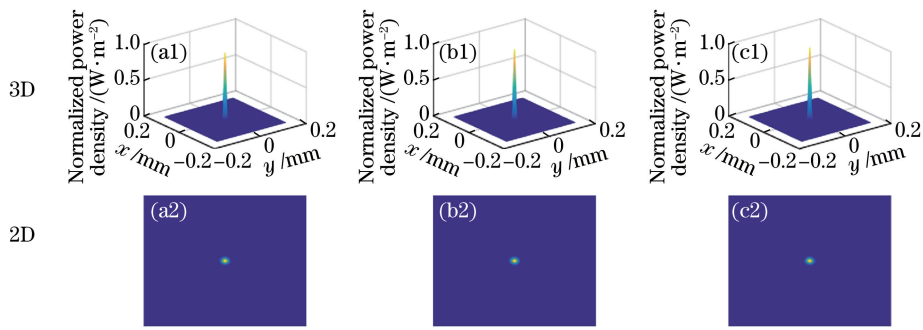


图 5 全孔径透光的三焦点能量分布图。(a)远焦点;(b)中焦点;(c)近焦点

Fig. 5 Energy distributions for three sights with light transmittance in full aperture.

(a) Far focus; (b) middle focus; (c) near focus

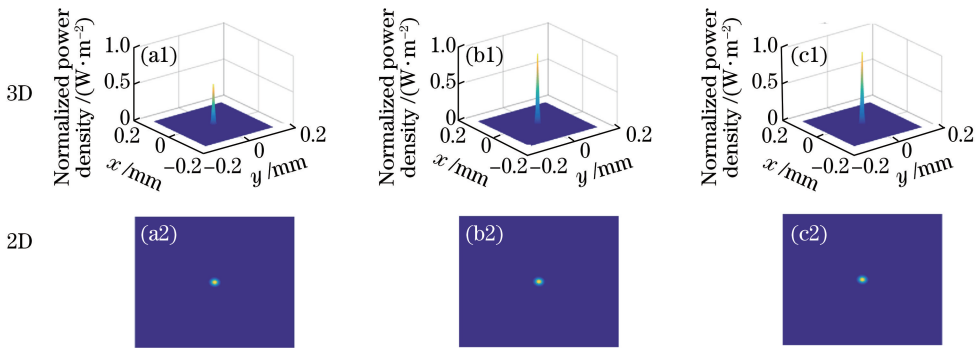


图 6 部分孔径透光的三焦点能量分布图。

(a)远焦点;(b)中焦点;(c)近焦点

Fig. 6 Energy distribution for three sights in partial aperture.

(a) Far focus; (b) intermediate focus; (c) near focus

缩小到 2/3 左右时,就会失去一个焦点。

### 3 多焦点自由曲面菲涅耳透镜在眼模型中的应用

#### 3.1 设计方法及原理

多焦点的人工晶状体最终要植入到人眼中,因此设计自由曲面菲涅耳透镜人工晶状体要在眼模型中进行。国际标准化组织(ISO)标准眼模型<sup>[17]</sup>如图 7 所示。

图 7 中的透镜 6 就是待设计的自由曲面菲涅耳透镜。该人工晶状体材料采用聚甲基丙烯酸酯,材料折射率为 1.54,阿贝数为 41.4。该透镜设计为三个焦距,对应的光焦度(眼溶液中)分别为 23.32 D(近焦)、21.66 D(中焦)和 20 D(远焦)。近焦和中焦的附加光焦度(相对远焦的光焦度)分别为 +3.32 D 和 +1.66 D。该透镜的设计比图 4 中的菲涅耳透镜复杂,透镜的前表面是球面,后表面是自由曲面形式的菲涅耳面,入射与出射菲涅耳面的光线矢量在眼模型中通过连续光线追迹可以计算得到,按 2.2 节

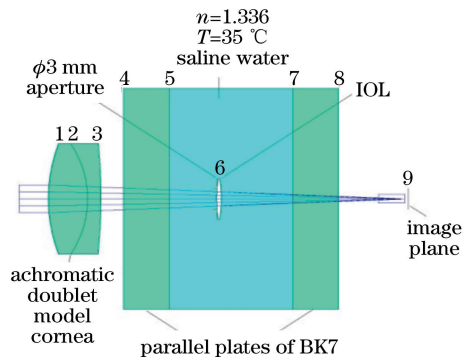


图 7 ISO 标准眼型示意图

Fig. 7 Schematic of ISO eye model

中的计算方法可以计算出自由表面上的采样点,然后构建菲涅耳透镜的轮廓如图 8 所示。

将菲涅耳透镜置于图 7 的 ISO 眼模型中,在 Zemax 软件中构建模型并进行光线追迹,如图 9(a)所示。其中自由曲面菲涅耳透镜为图 9(a)中圈出部分,其放大图如图 9(b)所示。自由曲面菲涅耳面是个非连续面,在 Zemax 的序列模式下建模比较困难。为了模拟多环带的自由曲面菲涅耳透镜,本研

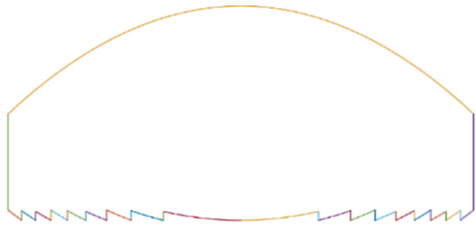


图 8 自由曲面菲涅耳三焦点人工晶状体的二维轮廓

Fig. 8 2D profile of freeform-Fresnel trifocal IOL

究采用 Zemax 中的多重结构,在不同的孔径范围使用不同的曲面。

菲涅耳透镜置于眼模型中进行光线追迹,将图 7 中的像面 9 局部放大,在 Zemax 中的 layout 仿真图(图 10)中可以看出三个焦点已经初步形成。这表明自由曲面的计算有效,三个焦点清晰可辨。

### 3.2 多焦点自由曲面菲涅耳透镜的成像性能评价

根据眼睛移植人工晶状体的 ISO 11979-2 标准<sup>[17]</sup>,使用 546 nm 单色光对植入菲涅耳透镜的眼模型进行光线追迹,得到 3 个不同焦平面上的 MTF 曲线,如图 11 所示。从曲线上可以看出,当空间频率为 50 lp/mm 时,各个焦点附近的 MTF

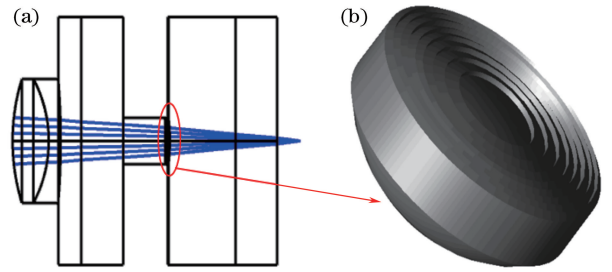


图 9 (a)自由曲面菲涅耳多焦点人工晶状体在 ISO 眼模型中的成像示意图;(b)菲涅耳透镜的放大图  
Fig. 9 (a) Imaging schematic of freeform-Fresnel trifocal IOL in ISO eye model; (b) enlarged view of Fresnel lens

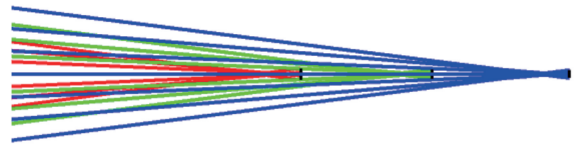


图 10 Zemax 中 ISO 眼模型的三焦点分布图  
Fig. 10 Trifocal distribution of ISO eye model in Zemax software

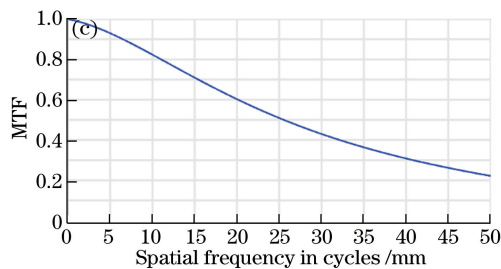
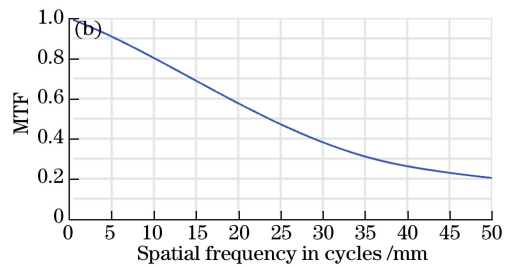
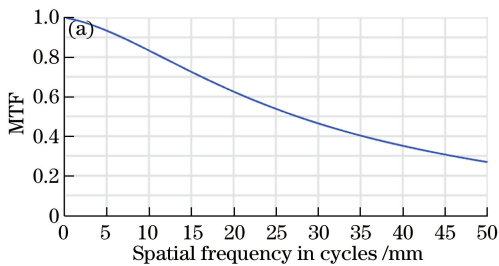


图 11 不同焦平面的 MTF 曲线。(a)远焦;(b)中焦;(c)近焦

Fig. 11 MTF curves for different focal planes. (a) Far focus; (b) middle focus; (c) near focus

## 4 结 论

设计了自由曲面形式的菲涅耳透镜,该透镜通过几个不连续的环带来控制一个焦距,避免了随着瞳孔收缩出现的焦点丢失的问题,通过模拟不同焦点处的能量分布证明了该设计的有效性。基于 ISO 标准眼模型设计了自由曲面形式的菲涅耳透镜,该透镜的中心厚度约为 0.5 mm,手术切口有望减小。

通过光线追迹计算了自由曲面菲涅耳三焦点人工晶状体在不同光焦度下的眼模型系统的 MTF。计算结果表明在远焦点、中焦点及近焦点处 MTF 均在 0.2 以上,满足患者的使用需求。

### 参 考 文 献

- [1] Ashwin P T, Shah S, Wolffson J S. Advances in cataract surgery [J]. Clinical & Experimental

- Optometry, 2009, 92(4): 333-342.
- [2] Apple D J, Ram J, Foster A, *et al.* Elimination of cataract blindness: a global perspective entering the new millenium[J]. Survey of Ophthalmology, 2000, 45(s1):1-196.
- [3] Zelichowska B, Rekas M, Stankiewicz A, *et al.* Apodized diffractive versus refractive multifocal intraocular lenses: optical and visual evaluation[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2008, 34(12):2036-2042.
- [4] Voldemar K, Lenkova G A. Diffractive-refractive intraocular lens [C]. Diffractive Optics and Micro-Optics, 2000: 214-215.
- [5] Klein S A. Understanding the diffractive bifocal contact lens [J]. Optometry and Vision Science, 1993, 70(6): 439-460.
- [6] Simpson M J. Diffractive multifocal intraocular lens image quality [J]. Applied Optics, 1992, 31(19): 3621-3626.
- [7] Schwiegerling J, Dehoog F. Problems testing diffractive intraocular lenses with Shack-Hartmann sensors[J]. Applied Optics, 2010, 49(16): 62-68.
- [8] Hayashi K, Yoshida M, Hayashi H. Postoperative corneal shape changes: microincision versus small-incision coaxial cataract surgery [J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2008, 35(2): 233-239.
- [9] Liu F, Shao Y. Dialectical analysis on microincision cataract surgery development [J]. Medicine and Philosophy, 2015, 36(14): 89-91.  
刘菲, 邵彦. 微切口白内障手术发展中的利弊分析 [J]. 医学与哲学, 2015, 36(14): 89-91.
- [10] Zhang Y J, Zhao Z L, Wu D M, *et al.* The simulation analysis of focusing performance based on PMMA of Fresnel lens[J]. Plastics, 2016, 45(5): 1-4.  
张燕军, 赵中里, 吴大鸣, 等. 基于 PMMA 的菲涅尔透镜聚光性能的模拟分析 [J]. 塑料, 2016, 45(5): 1-4.
- [11] Wu H L. The research of Fresnel concentrator for HCPV [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.  
吴贺利. 菲涅尔太阳能聚光器研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [12] He Z H, Cao J, Song J. Design method of multi-section freeform surface lens [J]. China Light & Lighting, 2017(1):1-5.  
何志宏, 曹婧, 宋杰. 多段自由曲面透镜的设计方法 [J]. 中国照明电器, 2017(1): 1-5.
- [13] Zhu Z M, Luo H. Design method of diffuse reflection freeform surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 052201.  
祝振敏, 罗慧. 漫反射自由曲面的设计方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 052201.
- [14] Peng Y M, Su Z P. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522003.  
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522003.
- [15] Liang W Y, Li Y X, Long Y B, *et al.* Design of freeform surface lens with chip on board LED sources for uniform illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012202.  
梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型 LED 光源均匀照明自由曲面透镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012202.
- [16] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.  
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.
- [17] Technical Committee ISO/TC 172/SC 7 Ophthalmic Optics and Instruments. Ophthalmic implants-intraocular lenses-part 2: optical properties and test methods: ISO11979-2[S]. 2014.