

控制近视进展并矫正近视散光的隐形眼镜

边亚燕, 刘永基*, 刘宝凯, 谷健达

南开大学电子信息与光学工程学院, 现代光学研究所, 天津 300350

摘要 为控制青少年的近视进展并矫正近视并发散光,设计一款多区域非球面隐形眼镜。运用 Zemax 构建了一3 D(屈光度)近视联合-1.5 D 散光的眼模型,基于此模型分别优化了隐形眼镜前表面各区域的面型参数,得到一款直径为 14.4 mm、中心厚度为 0.06678 mm 的隐形眼镜,并分析佩戴此隐形眼镜眼模型的成像性能及周边离焦情况。结果表明,眼模型在 3 mm(直径)瞳孔下视远时,空间频率 50 cycle/mm 处的调制传递函数(MTF)在 0°~7° 视场内均高于 0.7,表明近视和散光均得到良好矫正。当隐形眼镜出现 30°以内的旋转或 0.7 mm 以内的偏心时,佩戴隐形眼镜的眼模型的成像性能保持相对稳定。此外,眼模型在 3 mm 瞳孔下 25°视场的离焦值高达-9.5 D;在 6 mm 瞳孔下 0°~30°视场内的离焦值均在-6 D 左右,表明此款隐形眼镜提供了较大的周边近视性离焦值,具有控制近视进展的潜力。

关键词 光学设计; 隐形眼镜; 近视进展; 近视并发散光; 调制传递函数; 周边离焦

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0422001

Contact Lens for Controlling Myopia Progression and Correcting Myopia and Astigmatism

Bian Yayan, Liu Yongji*, Liu Baokai, Gu Jianda

*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering,
Nankai University, Tianjin 300350, China*

Abstract A multizone aspheric contact lens was designed to control myopia progression as well as correct myopia and astigmatism. An eye model of -3 D (Dioptre) myopia combined with -1.5 D astigmatism was constructed in Zemax software, based on which the anterior surface parameters of the contact lens were optimized. A multizone contact lens with a diameter of 14.4 mm and a central thickness of 0.06678 mm was obtained. The imaging performance and the relative peripheral myopic shift of the eye model with the designed contact lens were analyzed. The modulation transfer function (MTF) values at 50 cycle/mm are higher than 0.7 under 3 mm (in diameter) pupil for 0°-7° field of view (FOV) for distance vision, indicating that both myopia and astigmatism are corrected. Moreover, the MTFs remain relatively stable when the contact lens rotates within 30° or decentres within 0.7 mm. In addition, the myopic defocus of the model eye with the designed contact lens is up to -9.5 D at 25° FOV under 3 mm pupil, and around -6 D under 6 mm pupil for 0°-30° FOV. The results have indicated that the designed contact lens can provide greater peripheral myopic defocus, exhibiting highly potential to control the myopia progression.

Key words optical design; contact lens; myopia progression; myopia and astigmatism; modulation transfer function; peripheral defocus

OCIS codes 220.2740; 220.1250; 330.4460; 330.1070

1 引 言

过去几十年青少年儿童的近视患病率急剧上升^[1-3],近视发病低龄化会增加患高度近视的风险,从而引发白内障、青光眼、黄斑病、视网膜退化等相

关眼病^[4-6],因此控制近视进展至关重要。此外,部分近视患者至少有一只眼睛同时伴有 0.75 D(屈光度)或更高的散光,而未得到散光矫正的人眼易出现视锐度下降、视疲劳等问题,因此在矫正近视的同时也需要考虑矫正散光。佩戴隐形眼镜舒适安全,因

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-09-30; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家重点研发计划“地球观测与导航”专项(2018YFB0504400)、国家自然科学基金(11474172)

* E-mail: yjliu@nankai.edu.cn

此,这是一种较好的控制近视进展的光学治疗方法。

文献[7]研究表明,佩戴隐形眼镜的人眼在清晰视物的同时,存在的近视性离焦有助于抑制眼轴的增长,从而达到延缓近视进展的效果。动物实验研究发现^[8-9],矫正周边视网膜的屈光不正可调节眼球的生长,诱导周边近视性离焦,具有控制近视进展的潜力。基于周边近视性离焦减缓近视进展的理论,佩戴双焦点和多焦点的隐形眼镜已被应用于近视进展的控制^[10-12]。

目前控制近视进展的隐形眼镜主要包括三种设计类型:同心环双焦点设计、渐进多焦点设计和非球面设计^[13]。Anstice等^[11]提出了第一款用于控制近视进展的多区域双焦点隐形眼镜,后由Cooper Vision公司制作为MiSight隐形眼镜并推向市场,其提供的周边近视性离焦值为-2 D,被证明具有控制近视进展的效果。Rodriguez-Vallejo等^[14]提出了基于分形的多区域双焦点隐形眼镜(FCL),测试表明其提供的周边近视性离焦值可达-3.5 D。由强生公司提出的Acuvue Oasys隐形眼镜最初是为矫正老视眼而设计,后拓展运用到控制近视进展,其提供的周边近视性离焦值可达-2.5 D,但设计细节尚未公布^[13]。由Cooper Vision公司提出的Proclear渐进多焦点隐形眼镜,其提供的周边近视性离焦值达-2.5 D,且镜片表面设计更加平滑^[13]。

Cheng等^[15]研究表明,附加正球差的非球面隐形眼镜可有效控制近视进展,其作用效果类似于渐进多焦点隐形眼镜。现有研究结果表明,越大的周边近视性离焦值控制近视进展的效果越好,因此设计更大周边近视性离焦值的隐形眼镜具有重要的应用价值,而设计的隐形眼镜需考虑近视人眼剩余散光的矫正,但目前的设计往往不涉及矫正散光。

本文旨在设计一种多区域非球面隐形眼镜,在矫正近视和散光的同时,可提供更大的周边近视性离焦值,以便更为有效地控制青少年儿童的近视进展,具有潜在的应用价值。本文使用Zemax光线追迹软件基于Atchison眼模型设计隐形眼镜,并对其成像性能和周边离焦情况进行分析。

2 基本原理

2.1 近视散光眼模型的构建

基于Atchison眼模型构建了一3 D近视联合-1.5 D散光的眼模型。Atchison^[16]根据实验数据提出了与眼镜屈光度相关的眼模型,该模型已被用于研究不同非球面度的隐形眼镜对人眼周边屈光度的影响,并且被证明可以很好地预测近视眼的周边离焦值^[17-18],其结构参数如表1所示。此款隐形眼镜选用折射率为1.422的硅水凝胶材料Balaficon A,该材料含水量少且高透氧。

表1 Atchison近视眼模型结构参数

Table 1 Structural parameters of Atchison myopic eye model

Component	Zemax surface type	Refractive index (medium at 555 nm)	Radius /mm	Thickness /mm	Asphericity
Anterior contact lens	Multizone asphere	1.4220	-	-	-
Anterior cornea	Standard	1.3760	r_c	0.55	-0.150
Posterior cornea	Standard	1.3374	6.40	3.15	-0.275
Pupil	Standard	1.3374	∞	0	0
Anterior lens	Gradient	Grad A	11.48	1.44	-5.000
Equator	Gradient	Grad P	$-\infty$	2.16	0
Posterior lens	Standard	1.3360	-5.90	v_1	-2.000
Retina	Biconic	-	r_x, r_y	-	Q_x, Q_y

表1中,角膜前表面曲率半径为 $r_c = 7.770 + 0.022SR$;晶状体渐变折射率Grad A为 $1.371 +$

$0.0652778Z - 0.0226659Z^2 - 0.0020399(X^2 + Y^2)$, Grad P为 $1.418 - 0.0100737Z^2 - 0.0020399(X^2 +$

Y^2);晶状体后表面到视网膜的距离(后房深度)为 $v_1=16.280-0.299SR$;视网膜弧矢方向(x 向)曲率半径和非球面系数分别为 $r_x=-12.910-0.094SR$, $Q_x=0.270+0.026SR$;视网膜子午方向(y 向)曲率半径和非球面系数分别为 $r_y=-12.720+0.004SR$, $Q_y=0.250+0.017SR$ 。其中 SR 为人眼的球镜度数值,但是在上述公式中 SR 没有量纲,各曲率半径和长度的单位为 mm 。

选用 $-3D$ 的 Atchison 近视眼模型,并在其角膜前表面子午方向附加 $-1.5D$ 的散光,此时角膜前表面变为复曲面,从而得到 $-3D$ 近视联合 $-1.5D$ 散光的眼模型,其对应的变量参数分别为:弧矢方向的曲率半径为 $R_{cx}=7.704mm$,子午方向的曲率半径为 $R_{cy}=7.475mm$; $v_1=17.177mm$; $r_x=-12.628mm$, $Q_x=0.192$; $r_y=-12.732mm$, $Q_y=0.199$ 。

在实际情况下,角膜和晶状体的前、后表面的曲率半径均可能发生改变从而导致眼睛散光。由于角膜前表面与空气相接触,其曲率半径的变化对人眼屈光系统有明显的影响,其他表面曲率半径的变化对人眼屈光的影响较小。对于人眼屈光系统来说,无论是角膜还是晶状体,其前、后表面曲率半径在某一方向上的变化都会引起人眼屈光系统的散光。因此通过改变角膜前表面曲率半径,将散光引入人眼模型。

2.2 隐形眼镜的面型

隐形眼镜后表面的面型与角膜前表面一致,隐形眼镜前表面是由交替的远视力矫正区和近视控制区构成的多区域结构,最外层区域为固定隐形眼镜佩戴的链接区^[19]。

隐形眼镜前表面采用旋转对称的多区域非球面面型,该面型可被5个径向坐标(数值表示半径) A_1, A_2, \dots, A_5 分为5个区域。第1个区域从隐形眼镜的中心延伸到径向坐标 A_1 处,第2个区域从径向坐标 A_1 延伸到 A_2 处,第3个区域从径向坐标 A_2 延伸到 A_3 处,以此类推,第5个区域延伸到 A_5 处($0 < A_1 < A_2 < \dots < A_5$)。每个区域具有独立的曲率半径、二次曲面系数、各阶非球面系数,第 j 个径向区域的面型矢高可表述为

$$Z_j(r) = \frac{c_j r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_j) c_j^2 r^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_{ji} \rho_j^{2i} + Z_0, \quad (1)$$

$$A_{j-1} < r \leq A_j,$$

式中: c_j 为第 j 个区域非球面顶点处的曲率; r 为非球面上的点到光轴的径向距离; k_j 为第 j 个区域的

二次曲面 conic 系数; N 为非球面系数的个数; α_{ji} 为第 j 个区域的各阶非球面系数; ρ_j 为第 j 个区域的归一化坐标, $\rho_j = r/A_j$; Z_0 为当前区域与前一个区域的矢高偏移值。

各个区域具有独立的上述各项系数,矢高偏移值 Z_0 使得面型矢高在两个相邻的区域边界处保持连续,可表述为

$$Z_0 = Z_{j-1}(A_{j-1}) - Z_j(A_j). \quad (2)$$

该设计根据人眼在不同环境中的瞳孔大小及隐形眼镜的面型分布,首先确定各个区域的径向坐标大小,其中 $A_1 = 1.75mm$; $A_2 = 2.50mm$; $A_3 = 3.40mm$; $A_4 = 4.20mm$; $A_5 = 7.20mm$ 。隐形眼镜前表面第1个中心区域为了完全矫正近视和散光,采用非球面面型;考虑到球面比非球面更易加工的特点,且其他区域对视觉质量的要求相对较低,因此第 $A_2 \sim A_5$ 个区域采用球面,没有优化非球面系数。

2.3 隐形眼镜的设计

在构建的近视散光眼模型的基础上,对隐形眼镜前表面5个区域的面型参数分别进行优化设计,具体步骤如下所述。

1) 设计波长选用人眼最为敏感的 $555nm$ 波段,优化中的视场角设为 0° ,物距设为无穷远,隐形眼镜的厚度预设为 $0.08mm$ 。

2) 第1个区域($0 < r \leq 1.75mm$)和第3个区域($2.50mm < r \leq 3.40mm$)为视力矫正区。建立评价函数,控制隐形眼镜的中心厚度、边缘厚度和成像质量,分别在 $3mm$ (瞳孔直径)(明视觉)和 $6mm$ (暗视觉)下,对第1个区域的中心厚度、曲率半径、二次曲面系数、第4~10阶偶次非球面系数进行优化;对第3个区域的曲率半径进行优化,使得调制传递函数(MTF)接近衍射极限,中心视场的近视和散光得到矫正。

3) 第2个区域($1.75mm < r \leq 2.50mm$)和第4个区域($3.40mm < r \leq 4.20mm$)为近视治疗区。中心视场的像点相对于视网膜($v_1 = 17.177mm$)的位置越靠前,则周边视场的像点位置也越靠前,即形成的周边近视性离焦值也越大。建立评价函数,分别在 $4.5mm$ 和 $8.0mm$ 瞳孔直径下对第2个和第4个区域的曲率半径进行优化,使得像点分别聚焦在 v_1 等于 $13.290mm$ 、 $13.888mm$ 的位置处,相当于在第2个、第4个区域分别附加了 $-10D$ 、 $-8D$ 的近视性离焦。

4) 第5个区域($4.20mm < r \leq 7.20mm$)为固定隐形眼镜佩戴的衔接区。由于人眼基弧区的曲率

半径一般为 8.4~8.6 mm,因此将第 5 个区域的曲率半径设为 8.6 mm,使得隐形眼镜适合大多数人佩戴。此时隐形眼镜的边缘厚度为 0.413 mm,整体面型分布合理。

3 设计结果

经过上述优化,得到一款中心厚度为 0.06678 mm,直径为 14.4 mm,可矫正-3 D 近视联合-1.5D 散光的隐形眼镜,此款多区域非球面隐

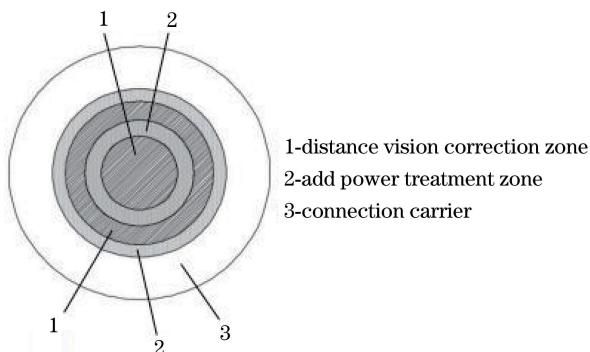


图 1 多区域非球面隐形眼镜前表面结构示意图

Fig. 1 Anterior surface structure of the multi-zone aspheric contact lens

表 2 隐形眼镜前表面 5 个区域的曲率半径

Table 2 Radius of curvature for the 5 zones of the contact lens anterior surfaces

Zone	1	2	3	4	5
Radius /mm	8.162	6.771	8.224	7.212	8.600

4 分析与讨论

人眼的视轴与光轴的夹角约为 5°,眼睛的视场虽大,但只有黄斑附近才能清晰识别物体,黄斑对应的视场角约为±5°,因此分析佩戴此款隐形眼镜的近视散光眼模型在 0°、3°、5°、7°视场下的成像质量,作出眼模型在 3 mm 瞳孔下(明视觉)的 MTF 曲线,如图 2 所示。

由图 2 可知,在 0°~7°视场下,子午和弧矢方向的 MTF 曲线在低频 30 cycle/mm 之前均趋于重合,在高频处略有分散,但趋于一致,可认为在 0°~7°视场范围内的散光得到良好矫正。在各个视场下空间频率 50 cycle/mm 和 100 cycle/mm 处的 MTF 分别高于 0.7 和 0.53,表明佩戴此款隐形眼镜的人眼模型的成像质量优异。以上分析表明近视散光眼模型佩戴设计的隐形眼镜后,0°~7°视场内的近视和散光均得到良好的矫正。

为了解佩戴所设计隐形眼镜的近视散光眼模型在周边视场的屈光分布情况,计算眼模型在不同瞳孔

形眼镜如图 1 所示。其中编号 1 为远视力矫正区,编号 2 为近视控制区,1 和 2 共同组成光学区;编号 3 为衔接区。

隐形眼镜后表面的面型参数与近视散光眼模型的角膜前表面相同,即 $R_{cx} = 7.704$ mm, $R_{cy} = 7.475$ mm,两个方向的二次曲面系数均为-0.15。隐形眼镜前表面第 1 个中心视力矫正区采用非球面,其二次曲面系数为-0.400168,各阶非球面系数依次为: $\alpha_4 = 3.0158 \times 10^{-3}$, $\alpha_6 = -5.8717 \times 10^{-3}$, $\alpha_8 = 5.7014 \times 10^{-3}$, $\alpha_{10} = -2.0287 \times 10^{-3}$ 。隐形眼镜前表面第 2~5 个区域均采用球面,这 5 个区域的曲率半径如表 2 所示。

设计完成后,运用 Zemax 软件对佩戴此款隐形眼镜的近视散光眼模型的成像性能进行分析,并计算各个视场下的周边离焦大小。为了与临床数据匹配,把以波数为单位代表离焦项的泽尼克系数 Z_4 换算成以屈光度 D 为单位的离焦值 $M^{[20]}$,其换算公式为

$$M = -\frac{4\sqrt{3} \times Z_4 \times \lambda}{r^2}, \quad (3)$$

式中: λ 为设计波长,即为 555 nm; r 为瞳孔半径,明视觉环境下为 1.5 mm,暗视觉环境下为 3 mm。

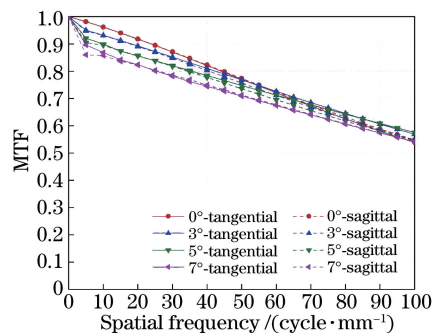


图 2 植入此款隐形眼镜的近视散光人眼在 3 mm 瞳孔下各个视场的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves of the myopia-astigmatism model eye fitted with the designed multi-zone soft contact lens under a pupil diameter of 3 mm

大小下 0°~30°视场范围内,每隔 5°的球镜度(M),以度量眼模型的周边离焦情况,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,3 mm 瞳孔下,0°视场的离焦值近似为 0 D,表明眼模型的近视和散光已得到完全矫正,25°视场的近视性离焦值达-9.5 D,表明眼模型的周边视场表现出比目前设计更大的近视性离焦值。

6 mm瞳孔下,10°视场的近视性离焦值达-6.2 D,0°~30°视场范围内的周边近视性离焦值均在-6 D左右,表明眼模型在中心30°的视场范围内均展现了较大的周边近视性离焦值。由上述分析可知,此款多区域非球面隐形眼镜,在明视觉环境中可以完全矫正中心视场的近视和散光,在明视觉和暗视觉环境中均可提供较大的周边近视性离焦值,相较于市场上控制近视进展的隐形眼镜,此款设计提供更大的离焦量,并具有优异的减慢近视进展的潜力。

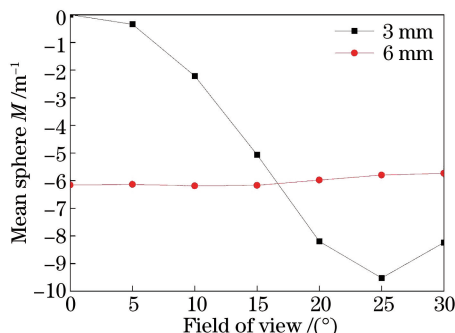


图3 佩戴此隐形眼镜的近视散光人眼在3 mm和6 mm瞳孔下,周边离焦随视场的变化

Fig. 3 Peripheral defocus as a function of the visual field under 3 mm and 6 mm pupil diameters for the myopia-astigmatism model eye fitted with the designed multi-zone soft contact lens

此外,佩戴复曲面眼镜要求特定方向的屈光轴须与患者的散光轴保持大致对准,考虑到隐形眼镜在患者佩戴过程中可能发生偏心或旋转,从而远离最贴合位置的实际情况,其成像性能需要对旋转和偏心具有一定的容限,才能满足实际视物的需求。McIlraith等^[21]的统计分析表明复曲面隐形眼镜在佩戴过程中可能出现11°~29.1°范围内的旋转。Rodriguez-Vallejo等^[22]对佩戴FCL隐形眼镜的患者进行统计分析,发现隐形眼镜在佩戴过程中可能出现(0.70±0.19) mm范围内的偏心。于是本文分析隐形眼镜在佩戴过程中,发生30°以内旋转及0.7 mm以内偏心时的成像性能。

当佩戴隐形眼镜过程中发生30°以内的旋转时,近视散光眼模型在3 mm瞳孔下的成像MTF曲线如图4所示。由图4可知,当隐形眼镜在佩戴中出现0°、10°、15°、30°的旋转时,虽然隐形眼镜后表面的轴位与人眼的散光轴位有了较大的偏离,但是各个角度下的成像MTF均没有明显的降低。各个旋转角度下,MTF在空间频率50 cycle/mm和100 cycle/mm处分别均高于0.76和0.49。上述分析表明,当隐形眼镜在佩戴过程中发生30°以内的

旋转时,佩戴此款隐形眼镜的人眼模型成像质量保持良好。

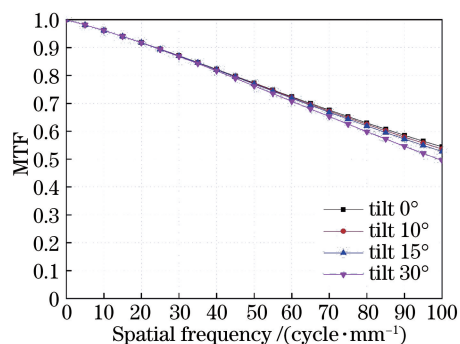


图4 佩戴隐形眼镜出现30°以内的旋转时,近视散光眼模型在3 mm瞳孔下的成像MTF曲线

Fig. 4 MTF curves of the myopia-astigmatism model eye fitted with the designed multi-zone soft contact lens under 3 mm pupil diameter when the contact lens was tilted within 30°

当佩戴隐形眼镜过程中发生0.7 mm以内的偏心时,近视散光眼模型在3 mm瞳孔下的成像MTF曲线如图5所示。

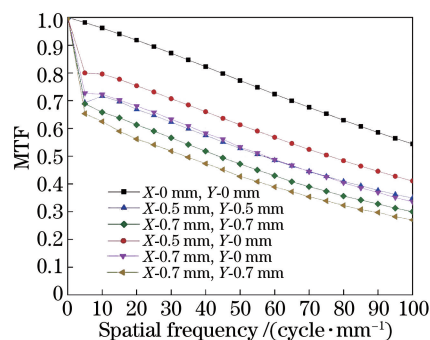


图5 隐形眼镜出现0.7 mm以内的偏心时3 mm瞳孔眼模型的成像MTF曲线(X为向颞侧偏心,Y为向下偏心)

Fig. 5 MTFs of the myopia-astigmatism model eye implanted with the designed multi-zone soft contact lens under 3 mm pupil diameter when the contact lens was decentered within 0.7 mm (X stands for temporal decentration and Y stands for inferior decentration)

由图5可知,当隐形眼镜分别向颞侧和向下各偏心0.5 mm时,MTF在50 cycle/mm和100 cycle/mm处分别高于0.52和0.34,表明眼模型的成像质量依然较为优异;当隐形眼镜分别向颞侧和向下各偏心0.7 mm时,空间频率为50 cycle/mm和100 cycle/mm处的MTF分别高于0.42和0.26,说明眼模型的成像性能依然保持在可接受的水平。上述分析表明,当隐形眼镜在实际佩戴过程中发生0.7 mm范围内的偏心时,人眼模型的成像质量保持

良好,满足人眼实际视物的需求。

该款隐形眼镜只有中心区域为非球面,其他区域为球面,且中心区域的非球面系数取到第4项(α_{10}),满足加工要求,能够实现加工制造。从理论设计角度而言,该隐形眼镜可提供高于 -6 D的周边离焦,表明其具有控制近视进展的光学性能,如能实际加工并进行临床试验,则能进一步明确其控制进展的疗效。需要指出的是,该隐形眼镜的性能分析使用了特定的眼模型,虽然选取的人眼模型具有一定代表性,但是不同人眼会存在较大的个体差异,因此,对于个人眼而言,该隐形眼镜提供的实际周边离焦值会与理论分析存在一定的差异。

5 结 论

运用 Zemax 软件基于所构建的 -3 D 近视联合 -1.5 D 散光眼模型,设计一款中心厚度为 0.06678 mm,直径为 14.4 mm 的多区域非球面隐形眼镜。佩戴该隐形眼镜的近视散光眼模型在 3 mm 瞳孔下视远时, $0^\circ\sim 7^\circ$ 视场内的近视和散光均得到良好矫正,且隐形眼镜在佩戴过程中出现 30° 以内的旋转或 0.7 mm 以内的偏心时,眼模型的成像质量仍可接受,满足人眼实际佩戴需求。此外,佩戴该隐形眼镜的眼模型在 3 mm 瞳孔下 25° 视场的近视离焦值高达 -9.5 D,在 6 mm 瞳孔下 $0^\circ\sim 30^\circ$ 视场内的近视离焦值均在 -6 D 左右,本文所设计的隐形眼镜提供了比现有设计更大的周边近视性离焦值,展现出更优异的控制近视进展的潜力。后续工作需实现该设计的加工制造并进行相关的临床试验,以验证其控制近视进展的临床效果。

参 考 文 献

- [1] Lin L L K, Shih Y F, Hsiao C K, et al. Prevalence of myopia in Taiwanese schoolchildren: 1983 to 2000 [J]. *Annals Academy of Medicine Singapore*, 2004, 33(1): 27-33.
- [2] Lam C S, Goh W S, Tang Y K, et al. Changes in refractive trends and optical components of Hong Kong Chinese aged over 40 years[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 1994, 14(4): 383-388.
- [3] Morgan I G, Rose K A, Ellwein L B, et al. Is emmetropia the natural endpoint for human refractive development? An analysis of population-based data from the refractive error study in children (RESC) [J]. *Acta Ophthalmologica*, 2010, 88(8): 877-884.
- [4] Saw S M, Gazzard G, Shih-Yen E C, et al. Myopia and associated pathological complications [J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2005, 25(5): 381-391.
- [5] Mitchell P, Hourihan F, Sandbach J, et al. The relationship between glaucoma and myopia: the blue mountains eye study[J]. *Ophthalmology*, 1999, 106(10): 2010-2015.
- [6] Gwiazda J. Treatment options for myopia [J]. *Optometry and Vision Science*, 2009, 86(6): 624-628.
- [7] Kollbaum P S, Jansen M E, Tan J, et al. Vision performance with a contact lens designed to slow myopia progression [J]. *Optometry and Vision Science*, 2013, 90(3): 205-214.
- [8] Smith E L, Kee C S, Ramamirtham R, et al. Peripheral vision can influence eye growth and refractive development in infant monkeys [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2005, 46(11): 3965-3972.
- [9] Smith E L. Prentice award lecture 2010: a case for peripheral optical treatment strategies for myopia[J]. *Optometry and Vision Science*, 2011, 88(9): 1029-1044.
- [10] Sankaridurg P, Holden B, Smith E, et al. Decrease in rate of myopia progression with a contact lens designed to reduce relative peripheral hyperopia: one-year results [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2011, 52(13): 9362-9367.
- [11] Anstice N S, Phillips J R. Effect of dual-focus soft contact lens wear on axial myopia progression in children[J]. *Ophthalmology*, 2011, 118(6): 1152-1161.
- [12] Berntsen D A, Kramer C E. Peripheral defocus with spherical and multifocal soft contact lenses [J]. *Optometry and Vision Science*, 2013, 90(11): 1215-1224.
- [13] Li Q, Fang F Z. Advances and challenges of soft contact lens design for myopia control [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1639-1656.
- [14] Rodriguez-Vallejo M, Benlloch J, Pons A, et al. The effect of fractal contact lenses on peripheral refraction in myopic model eyes [J]. *Current Eye Research*, 2014, 39(12): 1151-1160.
- [15] Cheng X, Xu J, Chehab K, et al. Soft contact lenses with positive spherical aberration for myopia control [J]. *Optometry and Vision Science*, 2016, 93(4): 353-366.
- [16] Atchison D A. Optical models for human myopic eyes [J]. *Vision Research*, 2006, 46(14): 2236-2250.
- [17] Bakaraju R C, Ehrmann K, Papas E, et al. Finite schematic eye models and their accuracy to *in-vivo*

- data[J]. *Vision Research*, 2008, 48 (16): 1681-1694.
- [18] Atchison D A, Pritchard N, Schmid K L. Peripheral refraction along the horizontal and vertical visual fields in myopia[J]. *Vision Research*, 2006, 46 (8/9): 1450-1458.
- [19] Chen H L, Gao Y, Cheng D W, et al. Optical description and design method of annularly piecewise surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (5): 0522002.
陈海龙, 高阳, 程德文, 等. 分段环形曲面的光学描述和设计方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38 (5): 0522002.
- [20] Atchison D A, Guo H Q, Charman W N, et al. Blur limits for defocus, astigmatism and trefoil[J]. *Vision Research*, 2009, 49(19): 2393-2403.
- [21] McIlraith R, Young G, Hunt C. Toric lens orientation and visual acuity in non-standard conditions[J]. *Contact Lens and Anterior Eye*, 2010, 33(1): 23-26.
- [22] Rodriguez-Vallejo M, Montagud D, Monsoriu J A, et al. Relative peripheral myopia induced by fractal contact lenses [J]. *Current Eye Research*, 2018, 43 (12): 1514-1521.