

### 基于Varifocal变焦结构视光学系统设计

胡神保 张静 张功 张峻铭 张彦

#### Design of visual optical system based on Varifocal zoom structure

HU Shen-bao, ZHANG Jing, ZHANG Gong, ZHANG Jun-ming, ZHANG Yan

引用本文:

胡神保, 张静, 张功, 张峻铭, 张彦. 基于Varifocal变焦结构视光学系统设计[J]. *中国光学*, 2025, 18(4): 879-888. doi: 10.37188/CO.2024-0176

HU Shen-bao, ZHANG Jing, ZHANG Gong, ZHANG Jun-ming, ZHANG Yan. Design of visual optical system based on Varifocal zoom structure[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 879-888. doi: 10.37188/CO.2024-0176

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0176>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于自由曲面的聚焦型太阳模拟器设计

Design of focusing solar simulator based on free-form surface

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1356 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0207>

#### 光学自由曲面自适应干涉检测研究新进展

Research advances in adaptive interferometry for optical freeform surfaces

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 227 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0126>

#### 天基平台宽谱段成像光学系统设计

Optical design of visual and infrared imaging system based on space-based platform

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1495 <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0255>

#### 基于自由曲面的辐射定标光源设计

Design of a radiometric calibration light source based on a freeform reflector

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 127 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0021>

#### 基于粒子群算法离轴多反光学系统设计

Design of off-axis multi-reflective optical system based on particle swarm optimization

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1435 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0087>

#### 产生环形激光的光学系统设计

Design of an optical system for generating ring-shaped laser beam

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1365 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0045>

文章编号 2097-1842(2025)04-0879-10

## 基于 Varifocal 变焦结构视光学系统设计

胡神保, 张 静\*, 张 功, 张峻铭, 张 彦  
(长春理工大学 光电工程学院 吉林 长春 130022)

**摘要:** 当前市面上的视觉训练产品大多采用电子屏幕显示远近大小交替变化的物体, 通过观看屏幕刺激睫状肌, 进行视功能训练, 但该方法存在蓝光辐射, 对人眼构成潜在危害。针对此问题, 本文设计了一种基于 Varifocal 变焦结构的视光学系统。该系统通过控制两组垂直于光轴的镜片的横向移动实现光焦度连续变倍, 模拟物体远近的变化, 刺激睫状肌进行调节训练。本文首先分析了可变焦距透镜的面型限制, 加入可变焦距球面效应方程优化 Alvarez 透镜基础面型, 并采用 Zemax 软件进行设计。所设计的透镜面型由三阶 XY 多项式自由曲面表征, 其中两组透镜最大相对垂轴偏移量为 5.6 mm, 实现屈光度在 +4D~−8D 的连续变倍。设计结果表明, 全视场调制传递函数在奈奎斯特频率 30 lp/mm 处均大于 0.3, 均方根(RMS)半径值接近于艾里斑半径值, 畸变均小于 2%, 该光学系统成像质量较好。

**关键词:** 渐进多焦点; 光焦度; Varifocal; Alvarez 透镜; 自由曲面

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0176 CSTR: 32171.14.CO.2024-0176

## Design of visual optical system based on Varifocal zoom structure

HU Shen-bao, ZHANG Jing\*, ZHANG Gong, ZHANG Jun-ming, ZHANG Yan  
(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangjing46558960@qq.com

**Abstract:** Most of the current visual training products available on the market use electronic screens to display objects of varying dimensions and distances, thereby stimulating the ciliary muscle through looking at the screen for visual function training. However, this method involves blue light radiation, which poses a potential hazard to the human eye. To address this issue, a visual optical system based on a Varifocal zoom structure has been designed. The system achieves continuous magnification of optical power by manipulating the lateral movement of two sets of lenses perpendicular to the optical axis. This simulates changes in object distance and stimulating ciliary muscle regulation training. This paper first derives the surface shape limits of variable focal length lenses, incorporates the variable focal length spherical effect equation to optimize the basic surface shape of Alvarez lenses, and uses Zemax software for design. The designed lens surface is characterized by a third-order XY polynomial free-form surface, with a maximum relative vertical axis offset of 5.6 mm between the two groups of lenses, achieving continuous magnification of refractive power between +4D and −8D. The design results indicate that the full-field modulation transfer function exceeds 0.3

收稿日期: 2024-09-29; 修订日期: 2024-11-07

基金项目: 吉林省创新能力建设资金(No. 2022C045-4); 高等学校学科创新引智计划(111 计划, No. DL2023009002L)  
Supported by Jilin Province Innovation Capacity Building Fund (No. 2022C045-4); Higher Education Discipline Innovation and Introduction of Talents Program (No. 111 Plan, No. DL2023009002L)

at a Nyquist frequency of 30 lp/mm, with root mean square (RMS) radius values approaching the Airy spot radius value and distortion below 2%. The imaging quality of this optical system is satisfactory.

**Key words:** progressive multifocal; optical power; Varifocal; Alvarez lens; free-form surface

## 1 引言

随着科技飞速发展和人们生活水平的提高, 视光学产品的应用需求日益增长。目前, VTS 4D 是市面中最为常用的视觉训练产品<sup>[1-3]</sup>。其通过电子屏幕不断地调整视线距离, 让训练者交替观察远处和近处物体, 从而可以有效地提升眼睛的远近调节能力, 增强睫状肌的收缩和舒张功能, 在一定程度上实现视力恢复<sup>[4]</sup>。虽然其能实现人眼睫状肌的训练作用, 但电子产品中存在蓝光辐射, 对人眼有所危害, 且该系统体积较大, 不能随身携带。

本文采用 Varifocal 变焦结构<sup>[5-6]</sup>, 通过调整两组镜片的相对位置实现人眼观察远近物体(光焦度)的切换。Varifocal 变焦结构在视光学中的应用最早是 Alvarez 提出的用于矫正老花眼<sup>[7]</sup>。通过控制两组自由曲面的横向移动产生不同的光焦度来实现人眼对近处或远处物体的清晰观察。2011 年, Barbero 等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于自由曲面的可调焦光学系统, 其最大横向位移为 3 mm, 可实现光焦度在 -0.5D~5D 范围内的连续变焦。此后, Varifocal 变焦结构更多应用于航天、红外等领域中。2018 年, HOU 等<sup>[9]</sup>基于伽利略式望远镜的结构原理, 设计了一个能从 1 倍至 3 倍调节光学变焦系统。2021 年, 蒋婷婷等<sup>[10]</sup>设计了一种自由曲面内调焦光学系统, 物距调焦范围为 1.5 米至无穷远。2023 年, 该团队<sup>[11]</sup>基于五阶自由曲面垂轴偏移变焦方法, 设计了一种具有两倍变焦能力的光学系统, 自由曲面透镜垂轴偏移量在 8 mm 以内。2024 年, 欧阳琦等<sup>[12]</sup>设计了基于 Alvarez 透镜的紧凑型红外连续变倍光学系统, 其中两组透镜最大横向平移量仅为 1 mm, 可实现 5× 到 15× 的连续变倍。

本文将 Varifocal 变焦结构应用于视觉训练领域, 设计了一款自由曲面连续变焦光学系统, 通过控制两组自由曲面透镜的垂轴移动使人眼对远近物体进行交替观察, 提升睫状肌的调节能力, 避免了传统视功能训练产品的蓝光辐射。

## 2 设计理论

### 2.1 二元可变焦距透镜

二元可变焦距透镜<sup>[13-14]</sup>是在不使图像失真的前提下, 通过改变两个透镜元件之间的相对位置(平移或旋转)来调整焦距大小的。二元可变焦距透镜面型公式如式(1)所示:

$$F_{\text{var}}(x, y, \Delta m) = V(x, y) \cdot s(\Delta m) \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{var}}(x, y, \Delta m)$  表示由于位移  $\Delta m$  产生的光学效应(光线通过透镜时因折射作用而改变传播方向所产生的聚焦或发散等现象);  $V(x, y)$  表示变焦距函数, 描述了由可变焦透镜产生的光学效果的分布形态(光线经过透镜后的焦点位置、成像大小等);  $s(\Delta m)$  为幅度系数, 该值仅依赖于两个透镜元件相对运动  $\Delta m$  的大小。只有采用这种光学分离的形式时, 透镜产生的光学效应才能在幅度变化时保持不变。

假设透镜在  $X$  和  $Y$  两个方向同时运动, 将这些运动定义为  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 。因为运动在给定方向上相对坐标系是线性的, 所以  $\Delta x$  和  $\Delta y$  可认为是整体运动  $\Delta m$  的组成部分, 即:

$$\begin{aligned} \Delta x &= a \cdot \Delta m \\ \Delta y &= b \cdot \Delta m, \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $a$  表示  $X$  方向的平移系数,  $b$  表示  $Y$  方向的平移系数。当两个透镜的相对位移量为  $\Delta m$  时, 将两个透镜产生的可变焦距透镜的形式叠加泰勒展开后可得:

$$f(x + a \cdot \Delta m, y + b \cdot \Delta m) - f(x - a \cdot \Delta m, y - b \cdot \Delta m) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^{(2n+1)}}{(2n+1)!} \Delta m^{(2n+1)}, \quad (3)$$

式中:  $f(x, y)$  定义为二元透镜的表面形状函数式, 令公式(1)和公式(3)等号右边相等, 此时可得:

$$F_{\text{var}}(x, y, \Delta m) = V(x, y) \cdot s(\Delta m) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^{(2n+1)}}{(2n+1)!} \Delta m^{(2n+1)} \quad (4)$$

公式(4)可以视为一个关于  $\Delta m$  的函数, 特别是  $\Delta m$  的幂级数, 其中偏导数除以阶乘作为幂项的系数, 这表明函数  $s(\Delta m)$  是  $\Delta m$  幂级数形式, 因此

$$V(x, y) \cdot \{ \Delta m + \Delta m^3 + \dots \} = \left\{ 2 \left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) \Delta m + \frac{1}{3} \left( a^3 \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial x^3} + 3a^2 b \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial x^2 \partial y} \right) \Delta m^3 + \dots \right\} \quad (6)$$

由于  $\Delta m$  不是变量  $x$  和  $y$  的函数, 如果要使公式(6)两边相等, 那么等式右边乘以  $\Delta m$  的每个幂次的偏导数之和必须是  $V(x, y)$  的函数。可变焦距透镜的面型表达式  $f(x, y)$  须满足其中一个偏导数和是可以变化的, 其他偏导数和都等于一个常数时方程才能成立。具体限制如表达式(7)和(8)所示:

$$V(x, y) = 2 \left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} a^3 \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial x^3} + 3a^2 b \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial x^2 \partial y} \\ 3ab^2 \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial x \partial y^2} + b^3 \frac{\partial^3 f(x, y)}{\partial y^3} \end{pmatrix} = K \quad (8)$$

式中:  $K$  是常数。由公式(8)可知  $f(x, y)$  是不高于三阶的  $x$  和  $y$  函数。

### 2.2 自由曲面变焦透镜面型优化设计

结合上一小节中对二元可变焦距透镜的分析, 可知二元可变焦距透镜的面型  $f(x, y)$  是不高于  $x$  和  $y$  的三阶函数。本文使用 Alvarez 透镜为自由曲面的面型表征, 其满足二元可变焦距透镜限制要求。Alvarez 透镜表达式如公式(9)所示:

$$f(x, y) = A \left( \frac{1}{3} x^3 + xy^2 \right) + Dx + E \quad (9)$$

式中: 右边第一项是一个三次曲面;  $A$  是 Alvarez 变焦透镜的变焦调制系数, 其大小决定了焦距的调节能力;  $D$  是  $x$  方向的倾斜因子;  $E$  用于确保透镜中心厚度有足够的机械强度。

Alvarez 透镜组由两个薄透镜元件组成, 其中两个表面为平面, 位于透镜组外侧, 另外两个表面为三阶  $XY$  多项式自由曲面且相互倒置, 位于透镜组内侧, Alvarez 透镜的结构模型如图 1 所示。

式(4)可以用如下形式表达:

$$\sum_{n=0}^{\infty} V(x, y) \cdot \Delta m^{(2n+1)} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)^{(2n+1)}}{(2n+1)!} \Delta m^{(2n+1)} \quad (5)$$

将公式(5)的左右两边同时展开可得:

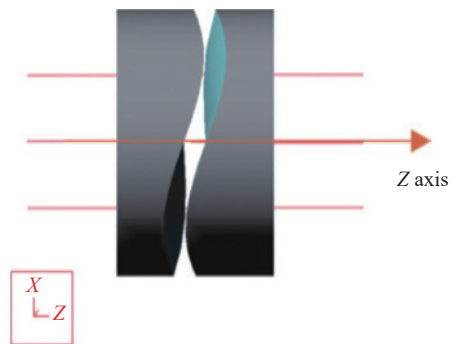


图 1 Alvarez 透镜<sup>[11]</sup>  
Fig. 1 Alvarez lens<sup>[11]</sup>

当两个透镜发生垂轴偏移  $\delta = 0$  时, 透镜的光焦度为 0, 类似平行玻璃板; 当  $\delta > 0$  时, 该模型类似凸透镜, 汇聚光束; 当  $\delta < 0$  时, 该模型类似凹透镜, 发散光束。Alvarez 透镜变焦原理如图 2 所示。

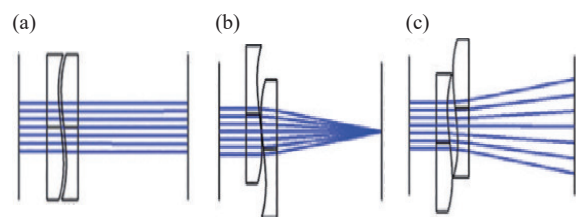


图 2 Alvarez 透镜变焦原理。(a) 平行玻璃板; (b) 凸透镜; (c) 凹透镜  
Fig. 2 Alvarez lens zoom principle. (a) Parallel glass plate; (b) convex lens; (c) concave lens

分析 Alvarez 透镜, 可得到焦距与两个透镜相对横向平移距离  $d$  和自由曲面调制系数  $A$  之间的关系<sup>[15]</sup>:

$$f = \frac{1}{4Ad(n-1)} \quad (10)$$

Alvarez 透镜面型是三次曲面, 当通光口径增大时会引起面型矢高的增加, 为防止当两个透镜

相互移动时,彼此间发生接触而影响光学系统的成像质量,此时需要增大镜片之间的间隔或者减小曲面的最大矢高值。而镜片间的间隔会直接影响物体成像于视网膜时的成像清晰度,所以设计重点是面型矢高值的变化。Alvarez 透镜的曲面矢高值主要取决于倾斜量 $x$ ,在 Alvarez 透镜中一阶倾斜量 $x$ 主要用来校正透镜的线性倾斜,对于系统的像差校正并不明显。

将 Alvarez 透镜面型表达式带入公式 (7) 中,文中两组镜片是沿 $X$ 轴移动的,因此平移系数 $a = 1, b = 0$ ,由此可求出此时的变焦距函数 $V(x, y)$ 产生的焦距效应:

$$V(x, y) = 2 \left( a \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + b \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) = 2(x^2 + y^2) \quad (11)$$

Alvarez 透镜产生的可变焦距呈现球面变化形式,以往的研究并未考虑当 Alvarez 变焦透镜沿 $X$ 轴移动时,产生的光学效应会使透镜的光学性能产生偏差。由上一节分析可知, $XY$ 二阶项不会影响焦距产生的形式,本文将产生的可变焦距球面效应方程加入自由曲面面型公式中,用以补偿透镜移动时的光学性能,使变焦更平滑,加入二阶项可以更好地控制透镜的曲率变化和面型优化,解决一阶倾斜量 $x$ 对像差校正不明显的缺点。

综上所述,本文的自由曲面面型使用三阶 $XY$ 多项式描述:

$$f(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A \left( \frac{1}{3}x^3 + xy^2 \right) + B \cdot x^2 + C \cdot y^2 + D \cdot x \quad (12)$$

式中:第一项是一个二次曲面基底; $c$ 为曲面顶点的曲率半径; $k$ 为圆锥系数; $A$ 取 $-0.0006$ ;  $B$ 、 $C$ 和 $D$ 是面型优化参数;用来控制曲面的矢高值;当透镜发生移动时;通过优化面型参数使光学系统成像质量达到指标要求。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 设计指标

本研究的设计目标是应用于视光学中通过两组自由曲面透镜的垂轴移动实现光焦度在 $+4D \sim -8D$ 内连续变焦光学系统。主要参数指标如表 1 所示。

表 1 连续变焦光学系统参数指标

Tab. 1 Parameters and indicators of continuous zoom optical system

Parameter	Value
Wavelength/nm	486~656
Full field of view /( $^{\circ}$ )	15
Entrance pupil diameter/mm	4
Focal power variation	+4D~-8D
Distortion/%	<2%
MTF	30line pairs >0.3

#### 3.2 设计过程

本文所设计的光学系统通过自由曲面变焦透镜垂轴偏移实现变焦,其原理如图 3 所示。

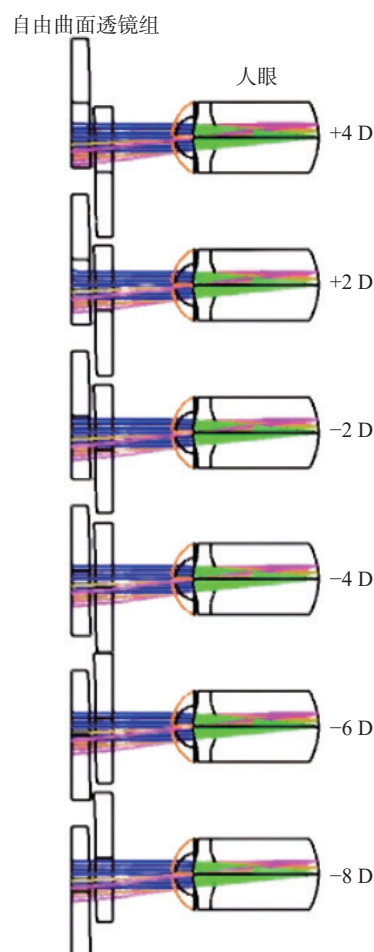


图 3 连续变焦光学系统 3D 视图

Fig. 3 3D view of continuous zoom optical system

所设计的连续变焦光学系统是基于三阶自由曲面中光学系统由两部分组成,分别为自由曲面变焦透镜组、人眼系统。光线通过自由曲面透镜

组的微小相对垂轴移动实现焦距的调节, 经人眼系统后聚焦于视网膜上。由公式 (10) 可知, 该变焦光学系统的设计重点是变焦调制系数  $A$  和垂轴偏移量  $d$ 。变焦调制系数  $A$  的取值会直接影响垂轴偏移量  $d$  和焦距  $f$  以及自由曲面透镜的口径。若  $A$  的值太小, 在焦距变化较小时所需的偏移量就会很大, 将直接影响到驱动装置设计的稳定性。若  $A$  的值太大, 偏移量太小会导致透镜组间有微小的错位, 出现较显著的光学像差, 综合考虑后本文选取  $A=-0.0006$ 。

当光焦度为 +4D 时, 根据屈光度和焦距互为倒数的关系, 可以求出此时焦距为 250 mm。根据公式 (10) 变焦调制系数  $A$  的值, 可以求出光焦度在 +4D 情况下自由曲面透镜的横向移动距离为:

$$f = \frac{1}{4Ad(n-1)} = \frac{1}{4 \times (-0.0006) \times d \times (1.5445 - 1)} \quad (13)$$

此时透镜移动距离为 -2.8 mm, 由此式可求得每个光焦度下, 自由曲面透镜的垂轴平移量, 具体数据如图 4 所示。

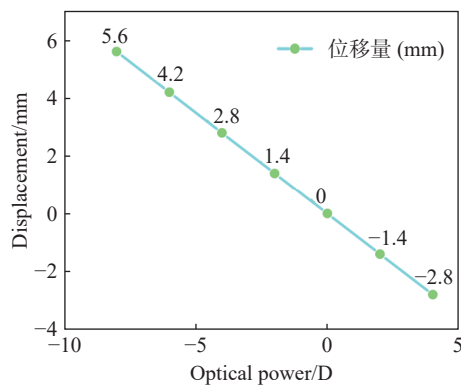


图 4 不同光焦度下位移量

Fig. 4 Displacement at different optical powers

使用 Zemax 软件进行光学优化仿真, 基础参数设置如表 2 所示。其中孔径类型为入瞳直径, 大小为 4 mm, 孔径光阑在人眼瞳孔处。自由曲面面型选择扩展多项式表面表征, 最后一块透镜表面距角膜 12 mm。通过插入坐标断点面使自由曲面透镜组沿垂轴移动。扩展多项式面型表征式为式 (12)。连续变焦光学系统参数指标和材料如表 2 所示。XY 多项式自由曲面系数如表 3 所示。

建立初始结构之后, 在多重结构编辑器中使用 PRAM 操作数控制自由曲面透镜在 X 轴方向偏心的位移量, 结合 CWGT 操作数来控制不同结构对评价函数的贡献量。在评价函数编辑器中优化函数为波前优化类型 RMS 参考质心光线, 使用 MCOL、MCOG、EFLX 操作数来控制各个光焦度结构下的垂轴偏移量, 使用操作数 MXSD 限制进入光学系统的最大有效通光口径, 利用操作数 REAX 和 RAID 控制光线位置, 使成像规整, 减小像差。同时将镜头数据中自由曲面透镜的曲率半径、多项式系数设置为变量, 进行局部优化和全局优化, 优化过程中对优化操作数的修改加权, 经过反复迭代优化后确保系统在各种视场和波长下都能获得清晰的图像, 满足成像质量要求。

表 2 连续变焦光学系统基本参数

Tab. 2 Basic parameters of continuous zoom optical system

Type	A	Radius	Thickness	Material
Standard	-	无限	3	APL5014CL
XY polynomial	-0.0006	-3.940E-09	1	
XY polynomial	-0.0006	-3.940E-09	3	APL5014CL
Standard	-	无限	12	
Standard (角膜)	-	6.896	0.6	Nd:1.377 Vd:55
Standard (液状体)	-	3.365	3	Nd:1.335 Vd:55
Standard(stop) (瞳孔)	-	10.100	0	
Standard (晶状体)	-	10.485	4	Nd:1.405 Vd:55
Even Aspheric (玻璃体)	-	-5.673	17.25	Nd:1.335 Vd:55
Standard (视网膜)	-	-12.5	0	

表 3 XY 多项式自由曲面系数

Tab. 3 XY polynomial free-form surface coefficients

Coefficient	Value
X <sup>3</sup>	2.11×10 <sup>-4</sup>
XY <sup>2</sup>	6.31×10 <sup>-4</sup>
X <sup>2</sup>	2.01×10 <sup>-5</sup>
Y <sup>2</sup>	1.38×10 <sup>-6</sup>
X	3.48×10 <sup>-5</sup>

结合公式 (12) 和表 3 中的 XY 多项式自由曲面系数, 使用 Matlab 软件中 surf 函数绘制面型,

并通过调整 meshgrid 函数改变  $x$  和  $y$  的范围以及步长, 最终曲面型如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。

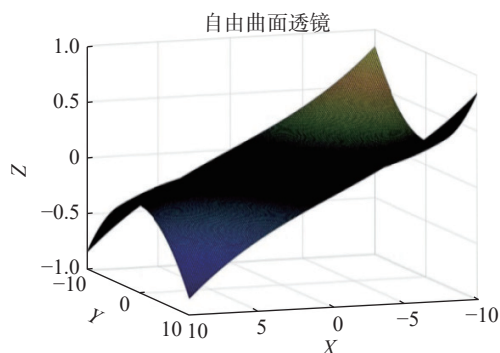


图 5 自由曲面透镜面型

Fig. 5 Surface shape of free-form surface lens

### 3.3 成像质量评价

由于自由曲面不具有旋转对称性, 因此在成像性能分析时, 重点分析中心视场、0.5 视场以及全视场的 3 个方向的成像质量。选择 0.5 视场更接近于中心视场和全视场的平均值, 有助于更全面地了解系统的整体成像性能。通过分析 0.5 视场的像差情况, 可以为系统的像差校正提供更准确的指导, 确保在整个视场范围内都能获得良好的成像质量。

为了评价自由曲面连续变焦光学系统的成像质量, 本文主要利用调制传递函数(MTF)、点列图以及畸变 3 个指标对系统设计结果进行评价。

#### 3.3.1 光学调制传递函数

光学系统调制传递函数能更全面地反映出光学系统的整体成像质量, 光学系统的 MTF 越高, 其成像清晰度越好。从人眼特性出发, 正常人眼在 30 lp/mm(每毫米 30 线对数)处的 MTF 值仍然较高时能较好地分辨图像细节<sup>[16-17]</sup>。图 6(彩图见期刊电子版)中光学系统在各个光焦度下, MTF 在 30 lp/mm 的特征频率处均大于 0.3, 光学系统成像质量清晰。

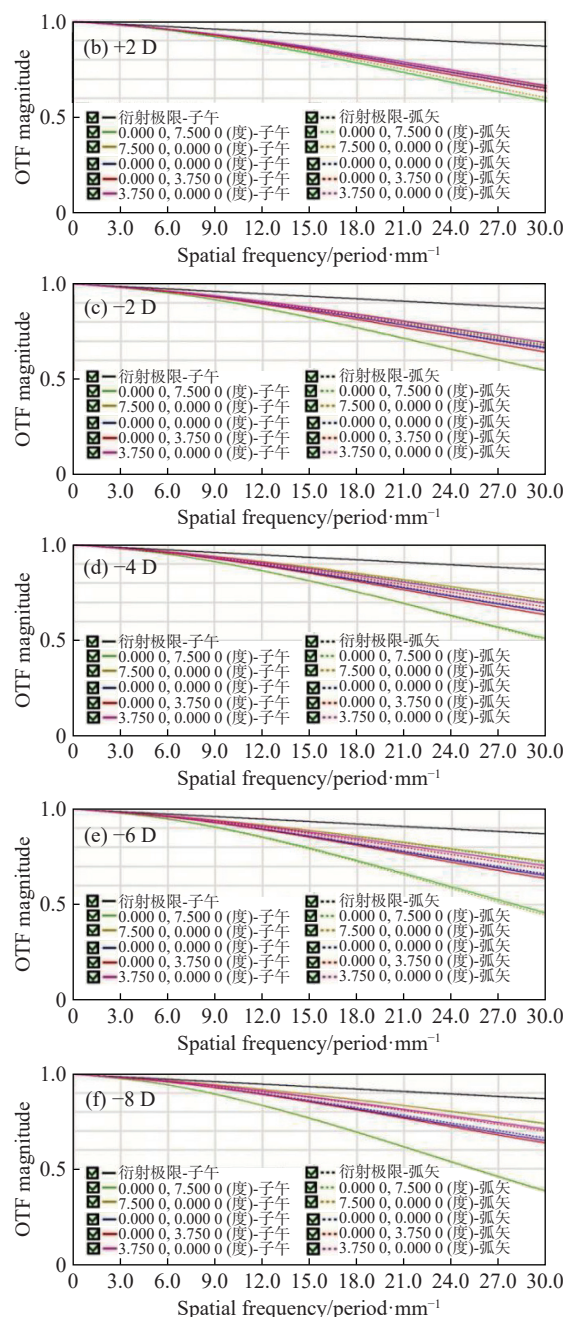
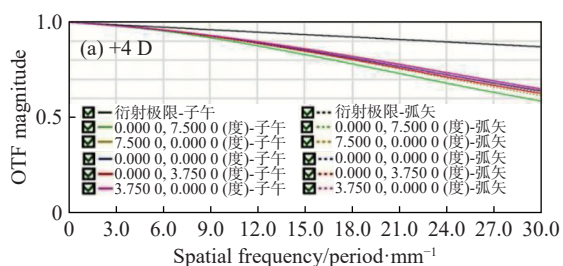


图 6 连续变焦光学系统传函曲线

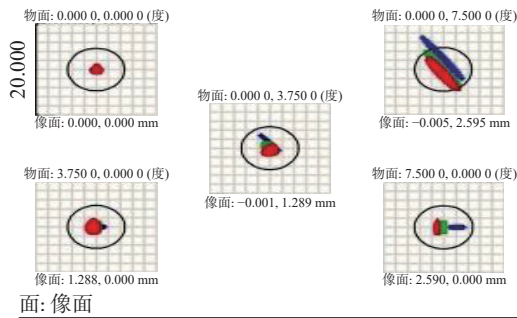
Fig. 6 MTF curve of continuous zoom optical system

#### 3.3.2 点列图

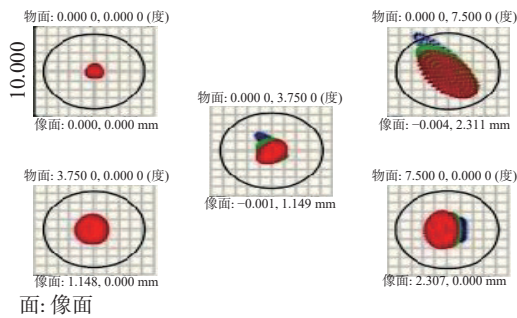
点列图反映像点在像面上的几何分布, 艾里斑是由衍射效应形成的最小光斑。前者体现了光学系统几何像差的情况, 几何像差是光线经过光学系统折转后实际成像与理想成像之间的偏差, 后者则是以衍射理论为基础, 讨论光学系统的中央像斑大小。因此在像差较小的条件下, 即使 MTF 曲线低于衍射极限, 像点依旧能够在一定程度上保持较高的集中度, 从而使得点列图的直径显著小于艾里斑直径。本文所设计光学系统屈光

度较小时, 系统的像差小, 图 7(a)~7(d)(彩图见期刊电子版)所代表的点列图直径小于艾里斑直径。

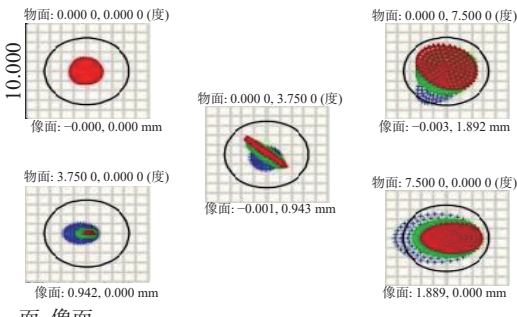
当系统屈光度增大, 光学系统的像差(如球差)增大, 导致边缘光线和近轴光线的聚焦位置差异增大, 从而使点列图的直径变大, 因此图 7(e) 和 7(f)(彩图见期刊电子版)的点列图会稍微大于艾里斑直径。



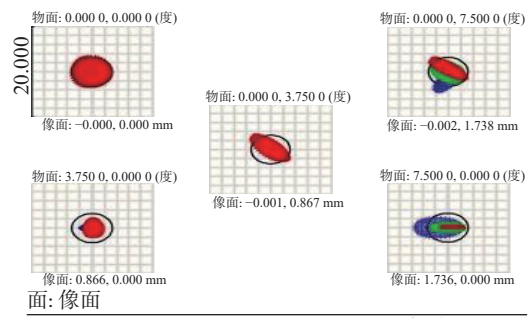
面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 4.721  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 0.455 3.068 1.226 0.984 1.618  
CEO 半径: 0.837 7.949 3.274 1.553 3.447  
缩放标尺: 20.000 参考线: 主光线  
(a) +4 D



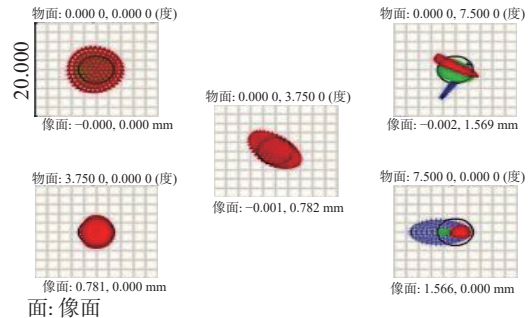
面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 4.210  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 0.284 2.061 0.911 0.829 1.197  
CEO 半径: 0.573 4.873 2.076 1.414 1.984  
缩放标尺: 10.000 参考线: 主光线  
(b) +2 D



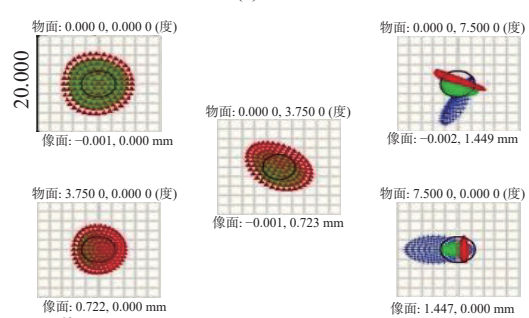
面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 3.449  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 0.667 1.827 1.032 0.613 1.943  
CEO 半径: 1.283 3.608 2.274 1.714 4.153  
缩放标尺: 10.000 参考线: 主光线  
(c) -2 D



面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 3.165  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 1.826 2.130 1.783 1.002 1.949  
CEO 半径: 3.332 4.623 4.069 1.856 5.419  
缩放标尺: 20.000 参考线: 主光线  
(d) -4 D



面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 2.856  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 2.530 2.492 2.303 1.698 2.365  
CEO 半径: 4.811 6.400 5.141 3.246 7.142  
缩放标尺: 20.000 参考线: 主光线  
(e) -6 D



面: 像面  
点列图  
2024/12/17  
单位是  $\mu\text{m}$  艾里半径: 2.639  $\mu\text{m}$  图例对应于波长  
视场: 1 2 3 4 5  
RMS 半径: 3.285 2.941 2.887 2.548 2.749  
CEO 半径: 6.354 8.414 6.022 4.910 8.466  
缩放标尺: 20.000 参考线: 主光线  
(f) -8 D

图 7 连续变焦光学系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of continuous zoom optical system

由图 7 可知该光学系统存在色差, 这是因为人眼光学系统本身存在色差, 随着光焦距的增大, 色差较为明显。虽然人眼的色差较大, 但眼睛对于光谱边缘的光线不敏感, 且晶体能很大程度地吸收短波长的光, 这有助于减小色差的影响。因

此, 色差对人眼功能的影响并不大<sup>[18]</sup>。

### 3.3.3 RMS vs 视场

RMS vs 视场可以绘制出 RMS 误差(或波前误差、斯特列尔比率等)随视场角变化的曲线。通过观察 RMS 值的变化, 可以直观地了解系统在不同视场下的性能。光学系统 RMS vs 视场如图 8(彩图见期刊电子版)所示, 各个屈光度的 RMS 点半径值随着视场变化时, 其值接近于衍射极限, 光焦度变大时, RMS 值略大于衍射极限, 光学系统成像质量良好。

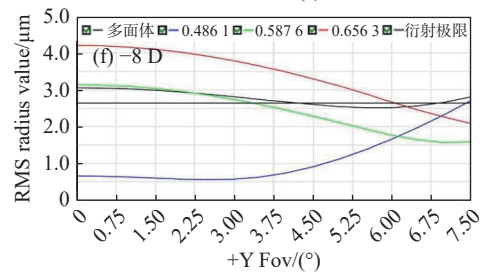
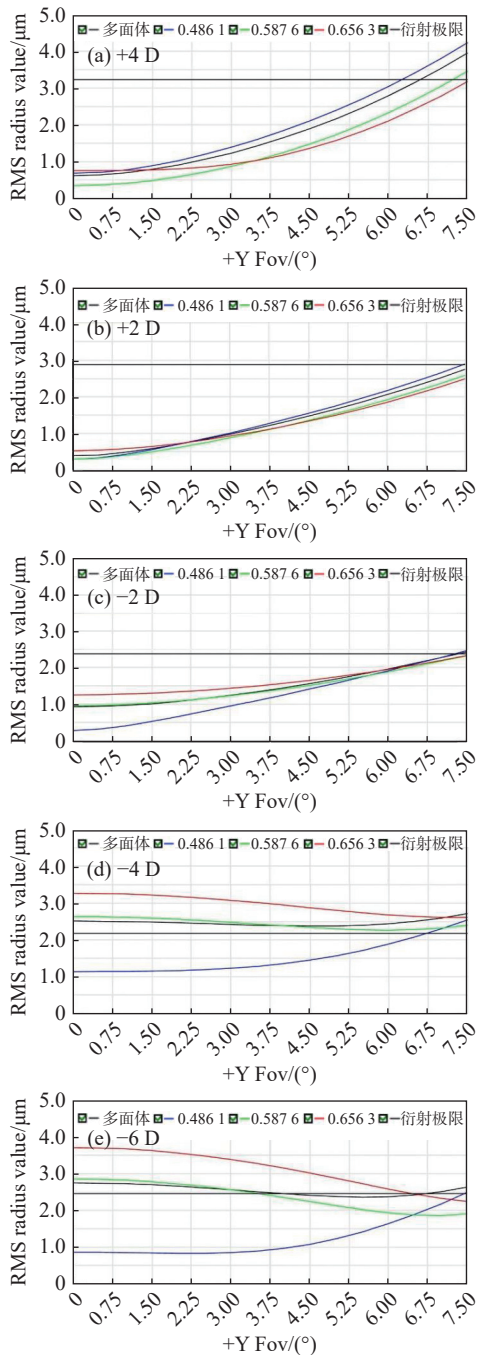


图 8 连续变焦系统 RMS vs 视场图

Fig. 8 Continuous zoom system RMS vs. FOV

### 3.3.4 畸变

畸变是系统主光线在高斯像面的交点与理想像点之间的像差量。光学系统畸变情况如图 9 所示, 各个光焦度最大畸变量均不超过 2%, 可知该连续变焦光学系统对系统成像无明显影响。

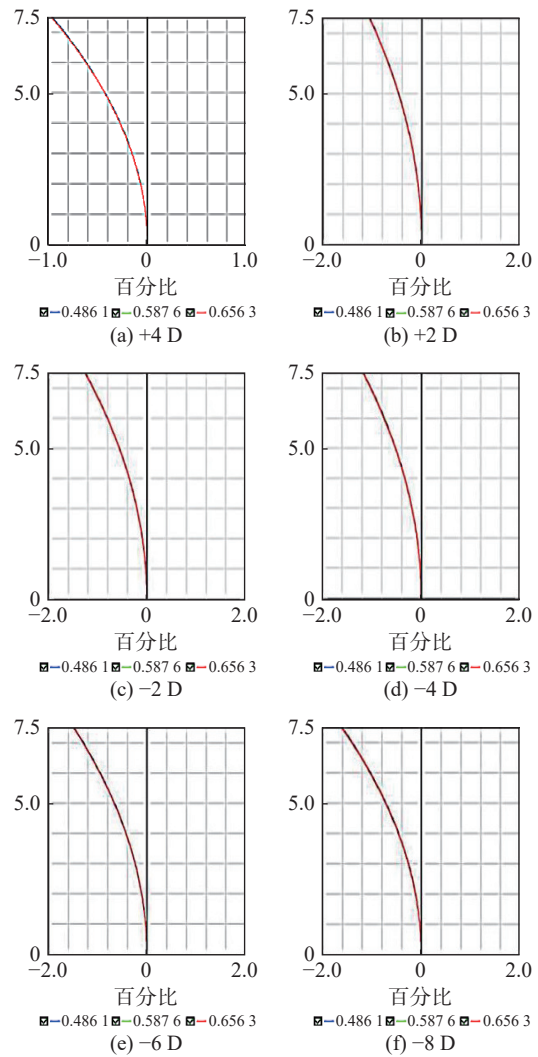


图 9 连续变焦系统畸变图

Fig. 9 Distortion diagram of continuous zoom optical system

## 4 公差分析

光学系统公差主要包括元件的加工误差和装调位置公差,透镜的不规则度、厚度、倾斜、偏心、光圈、元件的倾斜和偏心以及材料的折射率和阿贝数等。本文光学系统的敏感参数主要包括透镜表面的偏心以及透镜元件的偏心。依据实际生产公差要求,设置公差如表4所示。

表4 系统公差设置  
Tab. 4 System tolerance settings

Type	Operator	Item	Target
Index tolerances	TIND	Index	0.0005
	TABB	Abbe	0.3
	TIRR	Irregularity	0.5
Surface tolerances	TFRN	Radius/fringe	3
	TTHI	Thickness/mm	0.002
	TSDX(Y)	Decenter/mm	0.02
Element tolerances	TSTX(Y)	Tilt/ $^{\circ}$	0.0167
	TEDX(Y)	Decenter/mm	0.015
	TETX(Y)	Tilt/ $^{\circ}$	0.0167

采用灵敏度分析方法,以几何MTF截止频率30 lp/mm平均值作为评价标准,按照表4公差数据对各个组态下的光学系统进行1000次蒙特卡洛分析,得到的蒙特卡洛统计结果如图10(彩图见期刊电子版)所示。

由图10可知,蒙特卡洛样本中,各个光焦度状态下90%模拟结果的MTF值在截止频率处大

于0.38,50%模拟结果的MTF值在截止频率处大于0.42,10%模拟结果的MTF值在截止频率处大于0.44。可以认为,该系统在规定的公差范围内能够达到预期的成像质量,且易于加工,可实现性较高。

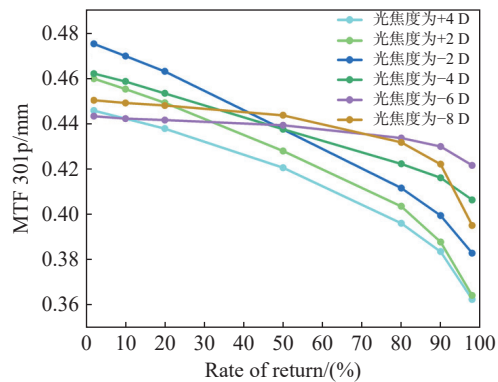


图10 蒙特卡洛分析图

Fig. 10 Monte Carlo analysis chart

## 5 结论

本文针对传统视功能训练产品操作难,体积大,存在蓝光辐射等问题,设计了一种基于 Varifocal 变焦结构的视功能训练系统。该系统由两组自由曲面透镜组成,透镜口径为11 mm,最大垂直轴偏移量为5.6 mm,覆盖波段为486~656 nm,视场为 $4^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$ ,可实现光焦度在+4D~-8D的连续变焦。对该系统进行公差分析,结果表明该系统具有变焦范围大、成像质量好、易于加工的优点。本文所述内容为视功能训练领域提供了一种新的思路。

### 参考文献:

- [1] 王婉珠,李爱华,倪连红. VTS4疗法联合传统综合疗法治疗屈光不正性弱视的效果[J]. 中国医学创新, 2023, 20(15): 107-110.  
WANG W ZH, LI A H, NI L H. Effect of VTS4 therapy combined with traditional comprehensive therapy in the treatment of ametropia amblyopia[J]. *Medical Innovation of China*, 2023, 20(15): 107-110. (in Chinese).
- [2] 迟英杰,王华君,李霄,等. 视觉训练系统联合传统综合疗法对屈光不正性弱视治疗的临床效果评价[J]. 中华实验眼科杂志, 2022, 40(6): 451-457.  
CHI Y J, WANG H J, LI X, et al.. Clinical evaluation of vision therapy system 4 combined with traditional comprehensive training for ametropic amblyopia[J]. *Chinese Journal of Experimental Ophthalmology*, 2022, 40(6): 451-457. (in Chinese).
- [3] 黄艳,李雪瑶,刘庆. 视觉功能训练系统在屈光性弱视患儿治疗中的应用效果[J]. 中国卫生标准管理, 2023, 14(13): 1-5.  
HUANG Y, LI X Y, LIU Q. Effectiveness of visual function training system in the treatment of children with refractive amblyopia[J]. *China Health Standard Management*, 2023, 14(13): 1-5. (in Chinese).

- [4] 杨翠. 基于 IPMC 驱动的可变焦微透镜的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.  
YANG C. *Research on variable focal microlens driven by IPMC*[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021. (in Chinese).
- [5] HAO Q, CHEN CH X, CAO J, *et al.*. Ultra-wide varifocal imaging with selectable region of interest capacity using Alvarez lenses actuated by a dielectric elastomer[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(7): 1543-1551.
- [6] 卞旭琪. 自由曲面变焦成像系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.  
DIAN X Q. *Research on freeform varifocal optical imaging systems*[D]. Suzhou: Soochow University, 2017. (in Chinese).
- [7] ALVAREZ L W. Two-element variable-power spherical lens: US, 3305294[P]. 1967-02-21.
- [8] BARBERO S, RUBINSTEIN J. Adjustable-focus lenses based on the Alvarez principle[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(12): 125705.
- [9] HOU CH L, XIN Q, ZANG Y. Optical zoom system realized by lateral shift of Alvarez freeform lenses[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(4): 045103.
- [10] 蒋婷婷, 冯华君, 李奇. 自由曲面变焦的内调焦式光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(4): 20200290.  
JIANG T T, FENG H J, LI Q. Design on internal focusing optical system with zoom lens of freeform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200290. (in Chinese).
- [11] 蒋婷婷, 徐之海, 李奇. 基于五阶自由曲面垂轴偏移的空间相机变焦方法[J]. *飞控与探测*, 2023, 6(2): 18-22.  
JIANG T T, XU ZH H, LI Q. Zooming method for space cameras based on lateral shift of fifth-order free-form lenses[J]. *Flight Control & Detection*, 2023, 6(2): 18-22. (in Chinese).
- [12] 欧阳琦, 柳萌遥, 宁妍, 等. 基于 Alvarez 透镜的紧凑型红外连续变倍系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(10): 1022001.  
OUYANG Q, LIU M Y, NING Y, *et al.*. Design of a compact infrared continuous optical zoom system based on Alvarez lenses[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(10): 1022001. (in Chinese).
- [13] CAMPBELL C E. Conditions under which two-element variable power lenses can be created. Part 1. Theoretical analysis[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(10): 2148-2152.
- [14] CAMPBELL C E. Conditions under which two-element variable power lenses can be created. Part 2. Application to specific designs[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, 28(10): 2153-2159.
- [15] 罗宇杰. 紧凑型无盲区全景成像光学系统及其变焦组件设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
LUO Y J. *Design of compact non-blind area PAL system and its zoom elements*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese).
- [16] 禹静. 自由曲面镜片评价方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.  
YU J. *Study on evaluation method of freeform spectacle lenses*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese).
- [17] 华芳芳, 禹静, 李东升. 渐进多焦点镜片光学系统 MTF 评价的仿真分析[J]. *光学技术*, 2018, 44(6): 709-716.  
HUA F F, YU J, LI D SH. Research on MTF evaluation method of progressive addition lenses[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(6): 709-716. (in Chinese).
- [18] 张梅. 基于个性化眼光学结构的人眼色差的研究[D]. 天津: 南开大学, 2010.  
ZHANG M. *Research on chromatic aberration of human eye based on individual eye*[D]. Tianjin: Nankai University, 2010. (in Chinese).

#### 作者简介:



胡神保(1998—),男,安徽安庆人,主要从事光学设计及先进制造方面研究。E-mail: [hushenbao1432982124@qq.com](mailto:hushenbao1432982124@qq.com)



张静(1984—),女,吉林长春人,博士,副教授,2015年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光学薄膜技术及先进光学制造技术。E-mail: [zhangjing46558960@qq.com](mailto:zhangjing46558960@qq.com)