

折反式超短焦投影镜头设计

赵淞 王春艳 孙昊 赵义武 刘欢

Design of catadioptric ultra-short focal projection lens

ZHAO Peisong, WANG Chunyan, SUN Hao, ZHAO Yiwu, LIU Huan

引用本文:

赵淞, 王春艳, 孙昊, 等. 折反式超短焦投影镜头设计[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 24–29. DOI: 10.5768/JAO202344.0101004

ZHAO Peisong, WANG Chunyan, SUN Hao, et al. Design of catadioptric ultra-short focal projection lens[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 24–29. DOI: 10.5768/JAO202344.0101004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>

超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>

大口径长焦距变焦光学系统设计

Design of large aperture and long focal length zoom optical system

应用光学. 2018, 39(5): 644–649 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501009>

大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计

Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture

应用光学. 2021, 42(5): 767–774 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501002>

大口径变焦投影镜头设计

Design of large aperture zoom projection lens

应用光学. 2018, 39(3): 405–411 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305001>

大口径超长焦距紧凑型光学系统设计

Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length

应用光学. 2018, 39(5): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0024-06

折反式超短焦投影镜头设计

赵珮淞, 王春艳, 孙 昊, 赵义武, 刘 欢

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对国内外市场对近距离、大屏幕投影系统中需降低投影镜头加工难度及成本的要求, 该文设计了一款超短焦投影镜头。设计过程中选用折反式结构, 利用物、像关系原理, 结合物方视场计算反射镜面型参数, 得出反射镜面型。该方法便于校正大视场畸变、抵消折射镜组的像散和场曲, 整个光学系统包括 15 片球面透镜和一片非球面反射镜, 系统总长 286 mm, 投影距离 500 mm, 投射画面尺寸 254 cm (100 英寸), 系统投射比 0.22, 相对照度大于 85%, MTF (modulation transfer function) 在 0.4 lp/mm 时大于 0.5, 水平 TV 畸变小于 0.55%, 垂直 TV 畸变小于 0.65%。该系统的多项设计指标均优于市面上现有的产品指标, 采用同轴球面设计易于加工、装调, 可有效降低生产成本。

关键词: 光学设计; 投影系统; 折反射系统; 超短焦距

中图分类号: TN202;O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0101004

Design of catadioptric ultra-short focal projection lens

ZHAO Peisong, WANG Chunyan, SUN Hao, ZHAO Yiwu, LIU Huan

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To meet the requirements of short-range and large-screen projection system in domestic and foreign markets, it is necessary to reduce the processing difficulty and cost of projection lens. In this case, an ultra-short focal projection lens was designed. The catadioptric structure was selected, the principle of the relationship between object and image was used, the mirror surface type parameters were calculated by combining the object field of view, and finally the mirror surface type was obtained. This method was convenient to correct the distortion of large field of view and counteract the astigmatism and field curvature of refraction lens group. The whole optical system consists of 15 spherical lenses and one piece of aspheric mirror, with a total length of 286 mm, projection distance of 500 mm, projection screen size of 254 cm (100 inch), and projection ratio of 0.22. The relative illumination is greater than 85%, the MTF is greater than 0.5 at 0.4 lp/mm, the horizontal TV distortion is less than 0.55%, and the vertical TV distortion is less than 0.65%. Many design indexes of the system are better than that of the existing products on the market, and its coaxial spherical surface design is easy to process and adjust, which can effectively reduce the production cost.

Key words: optical design; projection system; catadioptric system; ultra-short focal length

引言

投影技术一直贯穿人类社会发展各个阶段, 从二千年前的皮影戏到现代的各种投影仪, 其成像原理大同小异^[1]。随着科技不断进步, 投影技术也在飞速发展, 目前国内外市场对小型化、超短焦距投影系统需求强烈。相比于传统投影设备^[2-3], 投

射比小于 0.4 的超短焦投影设备可以在短距离投射出大尺寸、高质量的画面, 也可以解决传统投影设备投射光路容易被遮挡的问题^[4-5]。

较早研究超短焦投影系统的是日本 NEC 公司, 其在 2003 年发布了一款由 4 片离轴反射镜组成的超短焦投影镜头, 该镜头投射比为 0.32, 采用

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20200401048GX); 吉林省自然科学基金 (20200201185JC)

作者简介: 赵珮淞 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 384365764@qq.com

通信作者: 王春艳 (1971—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 245044961@qq.com

反射式结构不会引入色差,保证了图像色彩的真实性和完整性。缺点是体积大,反射镜倾斜和离轴安装会增加装配难度,大面形非球面加工和检测会增加成本^[6-7]。为了降低成本、缩小体积,更多的超短焦投影系统开始采用折反式结构,如杨建明等采用7片透镜和2片反射镜设计出投射比为0.17的折反式投影镜头^[8],于百华等运用一片自由曲面反射镜设计出可以在230 mm处投射254 cm(100英寸)画面的折反式投影镜头^[9]。但上述镜头均采用自由曲面和非球面,会导致加工和安装成本升高。

本文设计了一款折反式超短焦投影镜头,折射部分均采用玻璃球面透镜,反射部分采用一面偶次非球面反射镜,投射比为0.22,焦距为2.15 mm,放大倍率为212。该镜头不使用非球面透镜和自由曲面反射镜,可有效降低加工和安装成本,在镜头长度和成像质量方面也优于同类型的折反式投影镜头。

1 设计原理

1.1 折反式投影镜头设计原理

投影镜头投射画面越大,视场也越大,会产生严重畸变和色差。折射式镜头结构相对复杂,加工装配难度大,成本高,像差校正效果欠佳^[10]。为了改善上述缺点,本文选用折反式结构^[11-12],在距离折射透镜组一定距离处放置一块反射镜来扩大视场角。该反射镜可有效校正畸变,反射镜不会产生色差且会承担系统大部分光焦度,小光焦度的折射透镜组产生较小色差,使色差也得到有效抑制^[13-15]。图1为折反式投影镜头示意图。

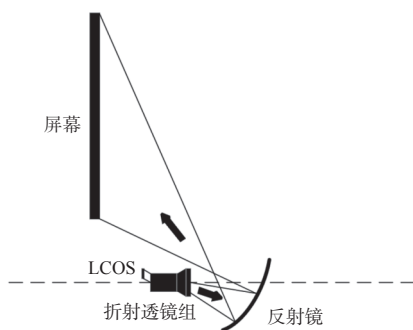


图1 折反式投影镜头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of catadioptric projection lens

1.2 非球面反射镜面型计算原理

反射镜面型直接影响畸变的校正效果,本文利用折射透镜组不同视场主光线追迹情况来计算非球面反射镜面型。根据光学系统成像原理,折射透镜组所有视场主光线均通过出瞳中心,且每条主光

线通过出瞳后出射方向不变。如图2所示,根据物像对应关系,确定物面上一点O即可确定其理想像点B。在经过O点的主光线上找到一点A,使入射光线 $\vec{OA}$ 与出射光线 $\vec{AB}$ 在该点满足反射定律,即

$$\vec{N} = \vec{AB} - \vec{OA} \quad (1)$$

$$\vec{OA} \times \vec{N} = \vec{AB} \times \vec{N} \quad (2)$$

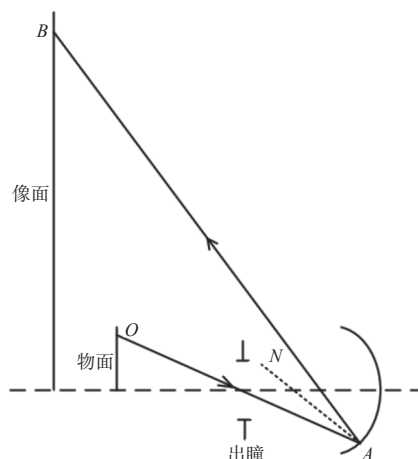


图2 物、像关系原理图

Fig. 2 Schematic diagram of relationship between object and image

式中 $\vec{N}$ 为点A在待求非球面上的法线。根据(1)式和(2)式可以求出点A坐标,运用反射定律逐点求出物面上每个视场主光线与非球面交点,得到一系列非球面上离散点坐标 $A_n(x_n, y_n, z_n)$ 。根据离散点坐标和偶次非球面公式,运用最小二乘法求解非球面高次项系数,完成非球面面型拟合。偶次非球面公式如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + \dots + a_nr^{2n} \quad (3)$$

式中: $c = 1/r$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为非球面顶点处曲率半径; k 为二次曲面常量值; a_n 为非球面高次项系数。

2 设计过程

2.1 技术指标分析

本文设计的超短焦投影镜头拟应用在家庭投影显示或商务会议等场合,需要在近距离投射大尺寸画面,预计可在500 mm位置处投射2540 mm(100英寸)画面。为了使画面具有良好清晰度,本文选用11.938 mm(0.47英寸)LCOS芯片,分辨率1920×1080 pixel,像元尺寸5.4 μm。投射比TR(throw ratio)是描述投影镜头投射画面尺寸能力的重要指标,在相同距离下,投射比越小意味着投影镜头投

射画面尺寸越大。投射比计算公式为

$$TR = \frac{L}{W} \quad (4)$$

式中: L 为投影镜头最后一面到投影屏幕的距离; W 为投影屏幕宽度。根据(4)式可计算出本文设计的投影镜头投射比为 0.22, 属于超短焦投影镜头。

以 MTF 曲线作为像质评价标准, 当 MTF 值大于 0.3 时, 人眼能较好地分辨图像, 故本文设计的镜头 MTF 值要求全视场在奈奎斯特截止频率处大于 0.3。奈奎斯特截止频率计算公式为

$$\delta = \frac{1}{2\beta a} \quad (5)$$

式中: β 为投影镜头放大倍率; a 为芯片单个像素大小。根据(5)式可计算出本文截止频率为 0.4 lp/mm。

为避免投射画面出现边缘和中心视场亮度不均匀现象, 相对照度要大于 60%。垂轴色差过大会导致溢色, 故垂轴色差需小于半个像素。综上所述, 投影镜头技术指标如表 1 所示。

表 1 投影镜头技术指标

Table 1 Technical indexes of projection lens

参数	指标要求
芯片尺寸/mm	11.938 (1 920×1 080 pixel)
画面尺寸/mm	2 540
投射比	0.22
MTF	>0.3@0.4 lp/mm
垂轴色差/pixel	<0.5
相对照度/%	>60

2.2 设计过程描述

根据构建的折射透镜组的出光情况计算反射镜面型并进行设计, 根据需要合理分配折射透镜组和反射镜光焦度, 降低设计难度。根据折射组光焦度, 选择 F 数和焦距相近结构进行优化。折射组承担离轴像差和色差的校正, 反射镜承担畸变的校正。

折射镜组设计完成后, 根据上述方法计算反射镜面型。根据物像对应关系, 均匀采集 100 对对应点, 运用反射定律分别计算这 100 对对应点与非球面反射镜交点坐标, 最后用最小二乘法拟合反射镜面型。计算过程中采用的理想像点会和实际情况有所偏差, 需要进一步优化, 使最终成像质量满足设计指标要求。

使用 ZEMAX 软件进行优化, 将透镜厚度、曲率半径、空气间隔和非球面系数作为优化变量。在局部优化和锤形优化过程中不断手动添加操作

数优化像质, 以全视场光斑半径小于 1 个像素作为优化终点, 用 MTF、垂轴色差等指标作为性能评价标准。

最终设计的投影镜头由 15 片球面玻璃折射透镜和 1 片偶次非球面反射镜组成, 折反式投影镜头结构图如图 3 所示。该镜头可以在 500 mm 位置处投射 2 540 mm(100 英寸)画面, 焦距 2.15 mm, 镜头总长 286 mm。

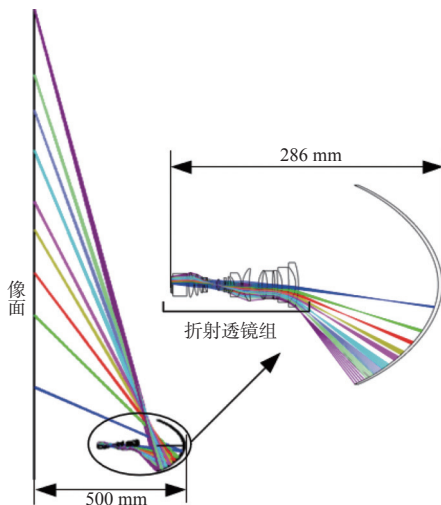


图 3 折反式投影镜头结构图

Fig. 3 Structure diagram of catadioptric projection lens

3 性能评价

3.1 光学传递函数(MTF)

MTF 是评价光学系统性能的综合性指标, 镜头优化后各视场 MTF 曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 在截止频率 0.4 lp/mm 处中心视场 MTF 接近衍射极限, 边缘视场 MTF 大于 0.5, 远高于设计指标要求, 具有良好的成像质量。

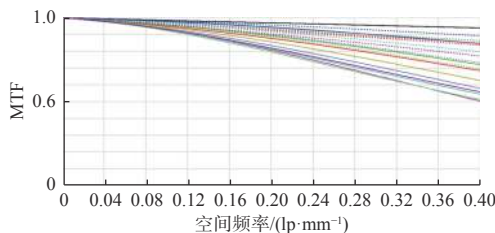


图 4 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curves diagram

3.2 点列图与相对照度

LCOS 芯片像元尺寸为 5.4 μm , 根据放大倍率可计算出像面像斑尺寸为 1.144 8 mm。系统点列图如图 5 所示。由图 5 可以看出, 镜头 RMS 半径在全视场均小于 0.773 7 mm, 低于 1 个像斑尺寸,

可以使每个像素清晰成像。镜头相对照度如图 6 所示。由图 6 可以看出, 镜头相对照度均大于 85%, 曲线无明显拐点, 成像清晰, 所成图像均匀性良好。

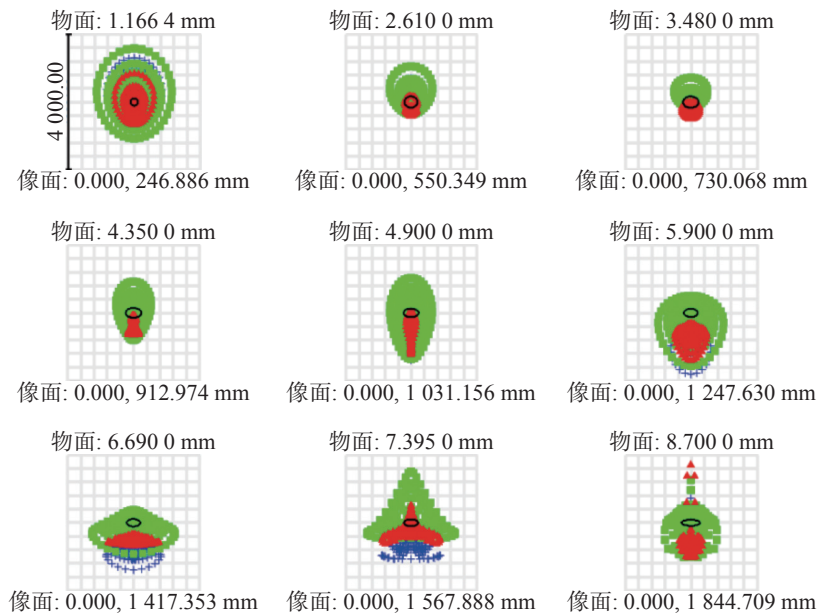


图 5 点列图

Fig. 5 Spot diagrams

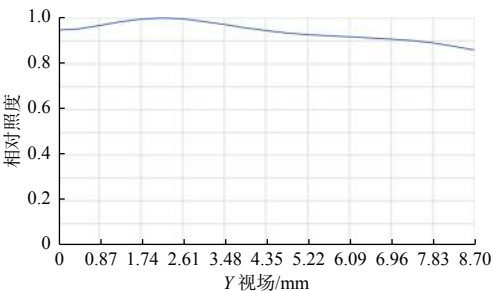


图 6 相对照度

Fig. 6 Relative illumination diagram

3.3 垂轴色差

该镜头在 486 nm~656 nm 范围内垂轴色差曲线如图 7 所示, 通过胶合光阑左侧 2 片透镜对垂轴色差进行抑制。由图 7 可知, 垂轴色差最大值小于像面上半个像素, 画面不会出现颜色溢出, 满足指

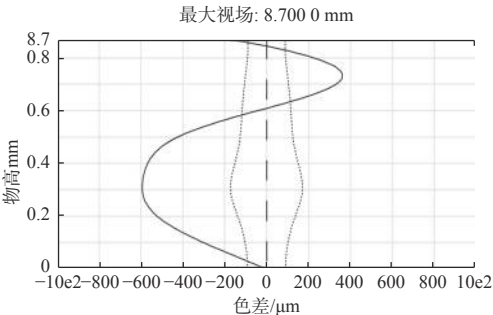


图 7 垂轴色差曲线

Fig. 7 Vertical axis chromatic aberration curves

标要求。

3.4 TV 畸变

投影镜头采用 TV 畸变来衡量画面变形程度, TV 畸变小于 2% 时人眼不会察觉图像变形。TV 畸变分为水平 TV 畸变 $D_{(V)}$ 和垂直 TV 畸变 $D_{(H)}$, 计算公式如下:

$$D_{(V)} = \frac{\frac{V_1 + V_2}{2} - V}{V} \times 100\% \quad (6)$$

$$D_{(H)} = \frac{\frac{H_1 + H_2}{2} - H}{H} \times 100\% \quad (7)$$

式中: V_1 为像面顶部宽度; V_2 为像面底部宽度; H_1 为像面左侧高度; H_2 为像面右侧高度; V 和 H 为理想像面宽度和高度; 各参数含义如图 8 所

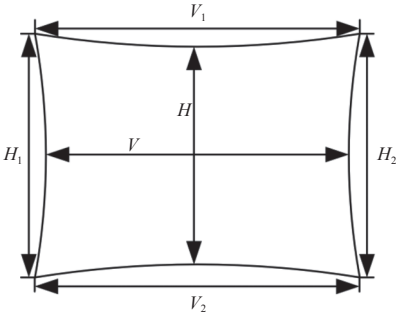


图 8 TV 畸变

Fig. 8 TV distortion diagram

示。根据上述公式及图 9 像面网格图可计算本镜头水平 TV 畸变为 0.52%，垂直 TV 畸变为 0.62%，满足使用要求。

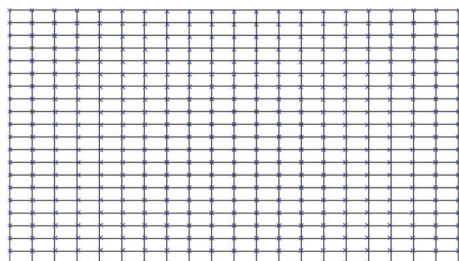


图 9 像面网格图

Fig. 9 Image plane grid diagram

4 公差分析

公差分析结果决定光学系统能否大规模投入生产，是光学系统设计中的重要环节。公差分析初始阶段应给定一个较为宽松的公差，通过多次蒙特卡洛分析不断调整公差松紧程度，直至得到符合指标要求的公差值。

本文按照 3 级公差标准确定公差分配，如表 2 所示。将像面轴向位置设为补偿器，进行 100 次蒙特卡罗分析后的公差分析结果如图 10 所示。由图 10 可知，镜头大部分 MTF 处于 0.4~0.5 之间，在截止频率 0.4 lp/mm 处有 90% 以上优于 0.3，人眼可以准确分辨画面，满足公差分析要求。

表 2 公差设定

Table 2 Tolerance setting

公差类型	公差值
曲率半径/光圈	± 1
厚度/mm	± 0.015
表面偏心/mm	± 0.008
表面倾斜/(°)	± 0.013
元件偏心/mm	± 0.008
元件倾斜/(°)	± 0.013

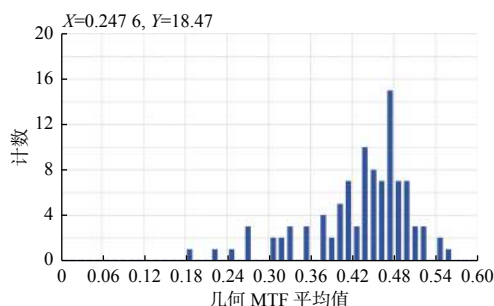


图 10 公差分析结果

Fig. 10 Tolerance analysis results diagram

5 结论

通过将某透射面改为反射面，解决了大视场角系统畸变难以校正的问题，简化了镜头结构，降低了设计难度。最终设计了一款可在近距离投射出大尺寸画面的超短焦投影镜头，可应用在家庭投影或商务会议等场合。运用本文提出的方法设计的投影镜头具有图像变形程度低、光学总长短、设计难度低等特点，且镜头采用国产玻璃球面透镜、偶次非球面反射镜进行同轴设计，易于装配和批量生产。设计结果表明，该镜头成像质量良好，满足使用要求。

参考文献:

- [1] 居荣兵. 基于LED光源的微投影光学系统设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
JU Rongbing. The micro projection optical system design on LED[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [2] 陈琛, 李维善, 张禹, 等. 短焦数字投影镜头的光学设计[J]. 光子学报, 2011, 40(12): 1855-1859.
CHEN Chen, LI Weishan, ZHANG Yu, et al. Optical design of short focal digital projection lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(12): 1855-1859.
- [3] 李维善, 陈琛, 张禹, 等. 基于ZEMAX软件的短焦数字投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 714-717.
LI Weishan, CHEN Chen, ZHANG Yu, et al. Design of short focal digital projection lens based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 714-717.
- [4] 贺天赐. 共轴超短焦大孔径投影镜头设计[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
HE Tianci. Coaxial ultra-short focus and large aperture projection lens design[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2018.
- [5] 刘振杰. LED光源照明DLP折反射超短焦投影光引擎系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIU Zhenjie. The DLP catadioptric super short distance optical engine with LED illumination[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [6] BIAN Yinxu, WANG Heng, GUO Tianyi, et al. Design of ultra-short throw ratio projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1222002.
- [7] SHIKAMA S, SUZUKI H, TERAMOTO K. Optical system of ultra-thin rear projector equipped with refractive-reflective projection optics[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2002, 33(1): 1250-1253.

- [8] 杨建明, 刘伟奇, 孟祥翔, 等. 同轴超短焦距折反式投影系统设计[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 864-871.
YANG Jianming, LIU Weiqi, MENG Xiangxiang, et al. Design of coaxial short focal length catadioptric projection system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 864-871.
- [9] 于百华, 田志辉, 苏东奇, 等. 超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(3): 46-53.
YU Baihua, TIAN Zhihui, SU Dongqi, et al. Multi-fields optimization iterative design method of freeform surface in ultra-short-focus projection system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 46-53.
- [10] YANG Jianming, LIU Weiqi, LYU Weizhen. Method of achieving a wide field-of-view head-mounted display with small distortion.[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2035-2037.
- [11] CHEN Xuemin, WANG Yong, HAO Qun. Design of an optical system in an ultra-short throw projector using the aspheric surfaces[J]. *SPIE*, 2015, 8557: 855712.
- [12] 陈驰. 折反式超短焦投影镜头设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
CHEN Chi. Refractive-reflective ultra-short focus projection lens design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [13] LI Daoping, ZHENG Jihong, YANG Bo. Zoom projection lens design for small throw ratio and large field of view[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(15): 1827-1838.
- [14] 李润芝, 杨波, 张婧京, 等. 采用折反式成像的超短焦距投影物镜设计[J]. *光学技术*, 2018, 44(3): 305-309.
LI Runzhi, YANG Bo, ZHANG Jingjing, et al. Design of ultra-short focal length catadioptric projection lens[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(3): 305-309.
- [15] 谢欣茹, 杨波, 潘帅, 等. 折反式超短焦变焦投影镜头的设计[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 20-26.
XIE Xinru, YANG Bo, PAN Shuai, et al. Design of catadioptric ultra-short focus zoom projection lens[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 20-26.