

文章编号 1004-924X(2025)13-2008-12

全塑料3倍全动型变焦镜头设计

蓝 澜^{1,2}, 王紫东^{1,2}, 傅峥尧^{1,2}, 赵申雨^{1,2}, 程德文^{1,2*}, 杨 通^{1,2}

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要:为满足消费电子领域对紧凑型、高性能变焦镜头的需求,设计了一个全塑料3倍全动型连续变焦镜头。该设计采用全动型变焦结构,所有透镜组均可运动,以优化变焦倍率和像质水平。利用Q型非球面提高成像质量,并结合塑料材料降低制造成本,使用LightTools为光学系统各表面设置相应的光学属性,通过光线追迹进行鬼像分析。优化后镜头实现了22.72~68.16 mm的3倍变焦, F 数为4.5,光学总长小于68 mm。在10, 1, 0.2 m的物距下,不同焦距各视场80 lp/mm处衍射MTF大于0.3, 160 lp/mm处MTF大于0.22,实现了高分辨率成像,且凸轮曲线设计流畅无拐点。鬼像分析表明,各表面组合形成的鬼像与像点最大辐照度之比均小于0.012 2%,对系统影响较小。全塑料3倍全动型变焦镜头在光学性能、紧凑性及可制造性方面均表现出色,为高性能、小型化变焦镜头的设计提供了技术参考。

关键词: 光学设计; 全动型变焦; 全塑料镜头; Q型非球面; 变焦凸轮设计; 鬼像分析

中图分类号: TH74 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253313.2008

CSTR: 32169.14.OPE.20253313.2008

Design of 3× plastic zoom lens with all-movable components

LAN Lan^{1,2}, WANG Zidong^{1,2}, FU Zhengyao^{1,2}, ZHAO Shenyu^{1,2},

CHENG Dewen^{1,2*}, YANG Tong^{1,2}

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display Technology,

Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: cdwlxk@bit.edu.cn

Abstract: To address the increasing demand for compact, high-performance zoom lenses in consumer electronics, this paper presents the design of an all-plastic 3× continuous zoom lens featuring fully movable components. An all-movable zoom structure is employed, wherein all lens groups are mobile to optimize both zoom range and image quality. Q-type aspheres are utilized to enhance optical performance, while plastic materials serve to reduce manufacturing costs. Optical properties are assigned to each surface using LightTools, and ghost image analysis is performed via ray tracing. The optimized lens achieves a 3× zoom range from 22.72 mm to 68.16 mm with an F-number of 4.5 and a total optical length under 68 mm. At object distances of 10, 1, and 0.2 m, the diffraction MTF exceeds 0.3 at 80 lp/mm and 0.22 at 160 lp/mm across all fields of view at various zoom positions, ensuring high-resolution imaging. The cam

收稿日期: 2025-04-08; 修订日期: 2025-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62275019)

curve is smooth and free of inflection points. Ghost image analysis indicates that the peak irradiance of ghost images formed by all surface combinations remains below 0.012 2% of the main image's peak irradiance, demonstrating negligible impact on system performance. The proposed all-plastic 3 $\times$ all-movable zoom lens exhibits excellent optical performance, compactness, and manufacturability, offering a valuable technical reference for the design of high-performance, miniaturized zoom lenses.

Key words: optical design; all-movable zoom; all-plastic lens; Q-type aspheres; cam curve of zoom; ghost image analysis

1 引 言

近年来,紧凑型变焦光学系统在相机镜头、安防监控、医疗诊断等领域都有广泛应用^[1-2]。随着对变焦系统的研究不断深入,人们对变焦光学系统的变焦能力、光圈尺寸、成像质量等性能要求越来越高,同时还要兼顾小体积与低成本。因此,在有限的结构空间内设计具备高放大倍率、大相对孔径和优异成像质量的紧凑型变焦镜头^[3],成为光学设计人员关注的重点。

围绕紧凑型变焦光学系统,罗春华^[4]等提出了一款用于投影系统的变焦物镜,其焦距为 22~37 mm,视场角为 46°~75°, F 数为 2.8,总长 247 mm,适用于大视场的成像需求。Rudiran^[5]等设计了一款三组元紧凑型变焦镜头,其焦距为 35~69 mm,视场角为 30°~56°, F 数在 4.16~8.02 之间,总长小于 45 mm,在保持成像质量的同时有效压缩了系统体积。钟刘军^[6]等则以四组元全动型结构为基础,设计了一种焦距为 12~120 mm,半像高 4 mm, F 数为 4 的变焦系统,总长在 150 mm 以内,进一步拓展了变焦比并提升了系统的灵活性。

在材料与制造方面,随着高精度注塑技术与光学塑料性能的提升,全塑料镜头在成像质量、热稳定性与成本控制方面已具备明显的优势。相较于传统玻璃材料,塑料镜头不仅具有成本低、质量轻,还可通过注塑或紫外复制等方式实现复杂自由曲面结构,在 F 数较小、分辨率高的情况下依然具备良好的成像质量^[7]。同时,非球面面形的引入可显著改善像差性能,而 Q 型非球面作为高效优化面型,通过正交多项式表达使各阶系数互不耦合,具有优化效率高、加工精度易控制等优点^[8-9],显著提高了光学系统的性能和制造效率。

相较于采用玻璃镜片和机械补偿变焦的传统方案,本文提出了一种全塑料 3 倍全动型变焦光学系统设计方法,参考同类设计结果,通过减少镜片数量、采用 Q 型非球面和全塑料透镜,实现了一款紧凑型、大相对孔径的光学变焦系统。对该系统进行了公差分析及鬼像分析,为真实环境下高可靠成像提供保障。该设计可实现光学连续变焦,具备成像性能优异,结构简单紧凑,适于制造及应用等特点。

2 原 理

2.1 变焦补偿方式

变焦光学系统通过改变镜片组的位置来实现系统焦距的变化,根据变焦过程中像面的补偿方式,可分为光学补偿型变焦系统和机械补偿型变焦系统。传统的光学补偿型变焦系统通过系统内部部分镜片的同向线性移动实现变焦,同时承担变焦和像面补偿的作用。然而,由于像面补偿不完全,仅能在部分焦距范围内保持像面稳定,该结构在现代变焦镜头中较少采用。机械补偿型变焦系统通过独立的变焦组和补偿组来分别承担变倍和像面补偿任务,提高了像面的稳定性。该系统通常由“前固定组+变焦组+补偿组+后固定组”组成^[10]。其中,前固定组和后固定组保持不动,用于改变焦距;变焦组和补偿组轴向移动,用于补偿像面位移以确保清晰成像。

具有固定组的变焦系统虽然在结构计算、像差校正等方面具备优势,但固定组的存在限制了参数选择的范围,导致总长较长,不利于小型化设计。相比之下,全动型变焦系统取消了固定的变倍组和补偿组,让所有镜片组均可运动,各组元在凸轮驱动下既可线性移动,也

可非线性移动,为变焦设计提供了更大的灵活性和优化空间。为了提高变焦比和像质,全动型变焦系统逐步成为变焦镜头设计的趋势。

2.2 全动型变焦系统

如图 1 所示,以四组元的全动型变焦系统为例。在全动型变焦过程中,第一组元起到补偿组的作用,而剩下的镜头均起到变倍组的作用。由于运动的组元数量多,因此,各组元承担的变焦倍率较小,光焦度分配较均匀,进而提升了变焦系统的像质。

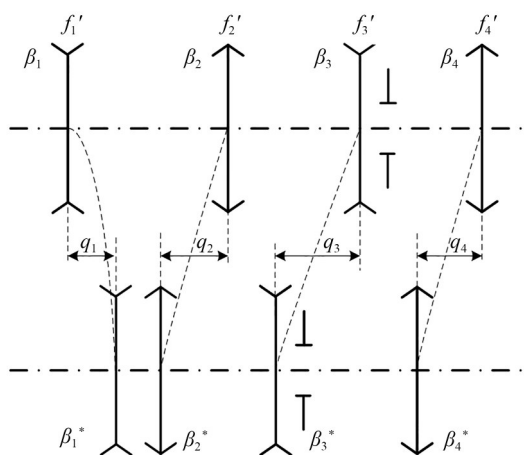


图 1 全动型变焦系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of zoom lens with all elements movable

由动态光学理论可知,对于一个四组元全动型变焦光学系统,为保证变焦过程中光学系统的共轭距变化量为零,满足稳像需求,由高斯光学的物像共轭关系推导出的稳像方程为^[11]:

$$\begin{aligned} & R_4^* R_4 R_3^* R_3 R_2^* R_2 (E - R_1^* R_1) q_1 + \\ & R_4^* R_4 R_3^* R_3 (E - R_2^* R_2) q_2 + \\ & R_4^* R_4 (E - R_3^* R_3) q_3 + \\ & (E - R_4^* R_4) q_4 = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

其中: R_1, R_2, R_3, R_4 是光学系统组元的静态作用矩阵, $R_1^*, R_2^*, R_3^*, R_4^*$ 是光学系统的动态作用矩阵, q_1, q_2, q_3, q_4 是各透镜组运动矢量, E 为单位矩阵。由于变焦镜头各透镜组均沿光轴进行一维位移,可以用相对应的轴向放大率代替光学系统

的作用矩阵,故式(1)可简化为:

$$\begin{aligned} & \beta_4^* \beta_4 \beta_3^* \beta_3 \beta_2^* \beta_2 (1 - \beta_1^* \beta_1) q_1 + \\ & \beta_4^* \beta_4 \beta_3^* \beta_3 (1 - \beta_2^* \beta_2) q_2 + \\ & \beta_4^* \beta_4 (1 - \beta_3^* \beta_3) q_3 + (1 - \beta_4^* \beta_4) q_4 = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 是初始位置的垂轴放大率, $\beta_1^*, \beta_2^*, \beta_3^*, \beta_4^*$ 是运动后的垂轴放大率, q_1, q_2, q_3, q_4 是各透镜组沿光轴的位移量,放大率无量纲。当变焦距光学系统中的透镜组位移取微分形式时,可以近似认为 $\beta_1 = \beta_1^*, \beta_2 = \beta_2^*, \beta_3 = \beta_3^*, \beta_4 = \beta_4^*$, $q_1 = \Delta q_1, q_2 = \Delta q_2, q_3 = \Delta q_3, q_4 = \Delta q_4$,微分形式的稳像方程表示为:

$$\begin{aligned} & \beta_4^2 \beta_3^2 \beta_2^2 (1 - \beta_1^2) \Delta q_1 + \beta_4^2 \beta_3^2 (1 - \beta_2^2) \Delta q_2 + \\ & \beta_4^2 (1 - \beta_3^2) \Delta q_3 + (1 - \beta_4^2) \Delta q_4 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

通过高斯光学的成像公式,可以得到轴向放大率 β_i^* 和焦距 f'_i (i 为1~4)的关系为:

$$\begin{cases} \beta_1^* = \frac{\beta_1 f'_1}{f'_1 - \beta_1 q_1} \\ \beta_2^* = \frac{\beta_2 f'_2}{f'_2 + (1 - \beta_1 \beta_1^*) \beta_2 q_2 - \beta_2 q_2} \\ \beta_3^* = \frac{\beta_3 f'_3}{f'_3 + (1 - \beta_2 \beta_2^*) \beta_3 q_3 - \beta_3 q_3} \\ \beta_4^* = \frac{\beta_4 f'_4}{f'_4 + (1 - \beta_3 \beta_3^*) \beta_4 q_4 - \beta_4 q_4} \end{cases} \quad (4)$$

对方程(4)两边取微分,可以得到各运动组元的微分移动量 $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4$ 与垂轴放大率和各组元的焦距的关系为:

$$\begin{cases} \Delta q_1 = \frac{f'_1}{\beta_1^2} \Delta \beta_1 \\ \Delta q_2 = (1 - \beta_1^2) \Delta q_1 + \frac{f'_2}{\beta_2^2} \Delta \beta_2 \\ \Delta q_3 = (1 - \beta_1^2) \beta_2^2 \Delta q_1 + (1 - \beta_2^2) \Delta q_2 + \frac{f'_3}{\beta_3^2} \Delta \beta_3 \\ \Delta q_4 = f'_4 \Delta \beta_4 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\Delta \beta_1, \Delta \beta_2, \Delta \beta_3, \Delta \beta_4$ 为各组元垂轴放大率微分量; f'_1, f'_2, f'_3, f'_4 为各组元的焦距。联立式(3)和式(5),可以得到四组元全动型变焦光学系统的变焦运动方程:

$$\sum_{i=1}^4 \frac{1 - \beta_i^2}{\beta_i^2} f'_i \Delta \beta_i = 0. \quad (6)$$

对运动过程中各组位移极值问题讨论分析可以计算出变焦移动过程中各组位移 q_1, q_2, q_3, q_4 的运动曲线。

3 设计过程

3.1 设计要求

变焦系统的设计指标如表 1 所示。该系统需要实现 22.73~68.16 mm 的 3 倍连续变焦,满足 16.98 mm 的最大像面要求,工作波长为 470~650 nm, F 数需要控制在 2.4~4.5 以内。该焦段覆盖了从广角到中长焦的等效焦距范围,满足主流消费电子设备对光学变焦功能的基本需求。

表 1 变焦系统的设计指标	
Tab. 1 Design specifications for zoom system	
指 标	要 求
有效焦距/mm	22.72~68.16
最大像面/mm	16.98
F 数	2.4~4.5
光学后焦/mm	≥ 1
工作波长/mm	470~650
畸变	$\leq 2\%$
考察物距/m	10,1,0.2
考察 MTF/(lp·mm ⁻¹)	80,160

3.2 系统初始结构

在光学设计过程中,初始结构的选择往往与最终系统的性能有着密切联系。根据设计指标中的有效焦距和总长的要求,选择 ZEBASE 专利库中 S_23 全动型变焦系统作为初始结构,该系统的有效焦距为 40~102 mm,最大总长为 134 mm,13 枚玻璃透镜, F 数为 6.8,变倍比为 2.55,总长与最大焦距相近,组元数量较少,如图 2 所

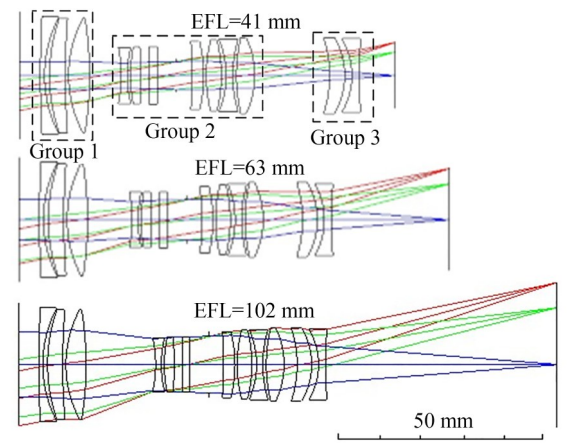


图 2 变焦光学系统的初始结构
Fig. 2 Initial structure of zoom optical system

示。该初始结构透镜数较多, F 数较大,不满足设计要求,需要进行系统缩放和后续优化。

3.3 优化策略

变焦镜头设计时,各组镜片在移动过程中会产生复杂的像差变化,仅应用像差理论难以校正和平衡像差,需要结合专业光学设计软件,建立不同焦距的多重结构对像差进行评估,通过设置变量、迭代计算进行系统优化。

3.3.1 基本参数控制

初始结构整体缩放后仍与设计目标存在偏差。基于不同焦距与像高的对应关系,在“多重结构”中设置视场类型为“角度”以提升优化效率,利用 ZEMAX 软件中 EFFL(有效焦距)、TTHI(总长)、WFNO(工作 F 数)等操作数读取系统参数,配合 OPLT(参数下限)、OPGT(参数上限)等约束操作数控制条件范围;同时,通过 MNCA/MNEA/MXCA/MXEA(最小/最大空气中心/边缘厚度)、MNCG/MNEG/MXCG/MXEG(最小/大玻璃中心/边缘厚度)操作数限制厚度。采用渐进优化策略:分阶段增大视场角、降低 F 数、逐步缩紧操作数的约束范围,直至焦距、总长、像高及 F 数满足设计指标。

3.3.2 系统结构调整

为避免各焦距下系统总长差异过大,图 3 中

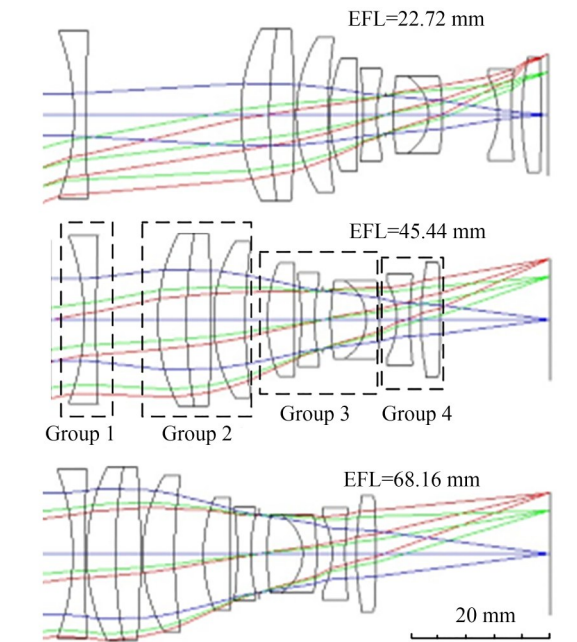


图 3 增删透镜后全球面系统结构
Fig. 3 Structure of all-spherical surface system after adding or removing lenses

第一组元(Group 1)用来保持总长相对稳定性。通过渐进式结构优化,将光焦度贡献弱的透镜曲率半径优化至趋近平板状态后删除;对需胶合消色差的两个透镜,将其相邻面曲率半径优化至相近值。同步实施材料替换,根据折射率及阿贝数相近匹配原则,逐步将玻璃材料替换为塑料材料。结构调整后的系统如图 3 所示,此时像质未达标准,需引入非球面进一步优化。设计后期应增加多重结构数量,保证变焦过程中各焦段下的运动组元无碰撞且凸轮曲线无拐点。

3.3.3 系统像质提升

结合“波像差”与“点列图”评价函数优化基础像质,精细化提升调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF),可采用 MTFA(平均 MTF)、MTFS(弧矢 MTF)、MTFT(子午 MTF)等操作数。引入非球面后,为保障全视场像质,需将视场数量增加,将多重结构视场类型切换为“实际像高”以简化设置。通过 SSAG(矢高控制)、SDRV(径向斜率控制)等操作数约束非球面面形,避免反曲,以降低加工难度。

3.4 加入 Q 型非球面

在光学设计过程中,采用传统幂次级非球面往往会出现优化效率低,优化结果不理想的问题。近年来,研究人员发现 Q 型多项式采用正交基底,使得各阶系数独立影响面形修正,可以有效提高优化效率和成像质量,便于加工与检测^[12-14]。

Q 型非球面可以分为强非球面 Q_{con} 与温和非球面 Q_{bfs} ^[12,15]。 Q_{con} 型非球面的表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{m=0}^M Q_m^{\text{con}} \cdot \left(\frac{r^2}{R_{\text{max}}^2} \right)^{m+1}, \quad (7)$$

其中: c 为圆锥基面的顶点曲率(即顶点曲率半径的倒数, $c=1/R$),决定基准二次曲面的基础形状; k 为圆锥常数,控制基准二次曲面的类型。 $k=-1$ 时为抛物面, $k>0$ 时为扁椭圆体, $k<-1$ 时为双曲面; Q_m^{con} 为多项式系数,表示非球面 Q_{con} 相对于基准二次曲面的正交化偏离量, m 为阶数。各系数独立控制特定阶次的面形修正,优化时互不干扰; r 为归一化径向坐标,取值为 $[0,1]$; R_{max} 为归一化半径,通常取非球面的最大通光口

径,用于保证多项式项在单位圆上正交,避免系数间数值抵消^[16]。

Q_{bfs} 型非球面的表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - c^2r^2}} + \sum_{m=0}^M Q_m^{\text{bfs}} \cdot \left(\frac{r^2}{R_{\text{max}}^2} \right)^{m+1} \cdot \cos \theta, \quad (8)$$

其中: c 为最佳拟合球面(Best Fit Sphere, BFS)的顶点曲率,基准球面通过非球面顶点和最大通光口径边缘; Q_m^{bfs} 为多项式系数,表征非球面 Q_{bfs} 与最佳拟合球面的偏离量, m 为阶数。系数与面形偏离的斜率直接相关; $\cos \theta$ 为余弦因子,将沿光轴的偏离转换为法线方向的偏离,便于加工检测时通过斜率约束控制面形精度。

本文引入 Q 型非球面进行优化,设计过程中,为降低后端透镜组的像差校正负担,将物方第一片透镜设为非球面;同时,将邻近像面的两枚透镜也设置为非球面,以优化即将到达成像平面的光线形态,尤其针对场曲和畸变,从而进一步提高成像质量。系统的最终结构如图 4 所示,表面 $S_1, S_2, S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{17}$ 为 8 阶 Q 型非球面,面形流畅无反曲。系统采用塑料材料,模压加工难度小,透镜制造成本低。

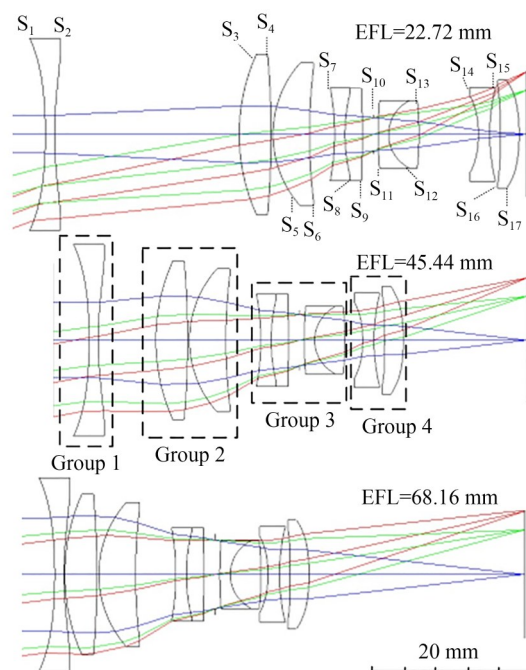


图 4 最终设计结构

Fig. 4 Final design structure

4 设计结果

4.1 设计指标

优化后镜头各项指标满足要求,长焦无穷远物距的结构数据如表 2 所示,采用全动型变焦实现 22.72~68.16 mm 3 倍连续变焦,系统 F 数为 4.5,总长 68 mm,最大像面为 16.98 mm。在 10, 1,0.2 m 的物距下,使用内调焦的方式满足清晰成像要求。

表 2 最终镜头数据
Tab. 2 Final lens data

曲面序号	曲面类型	曲率半径/ mm	厚度/ mm	材料
0(物面)	球面	无限		
1	Q 型非球面	-71.897	1.237	APL5014DP
2	Q 型非球面	45.553	0.117	
3	球面	26.246	4.344	APL5014DO
4	球面	-124.48	0.260	
5	球面	14.496	4.960	ARTON_ D4532
6	球面	72.713	5.441	
7	球面	-34.076	1.417	EP5000
8	球面	23.414	2.372	APL5014DP
9	球面	-126.977	1.530	
10(光阑)	球面	无限	0.611	
11	球面	56.169	1.424	E48R
12	球面	5.101	4.142	ARTON_ D4540
13	球面	-43.920	0.942	
14	Q 型非球面	-16.487	1.520	APL5014DP
15	Q 型非球面	20.434	1.444	
16	Q 型非球面	-122.992	2.592	OKP-1
17	Q 型非球面	-23.604	29.084	
18(像面)	球面	无限	—	

4.2 性能指标

4.2.1 MTF 评估

MTF 是衡量光学系统成像质量的重要指标,系统在 10 m 物距下不同焦距的 MTF 曲线如图 5 所示。在 10 m 和 1 m 物距时,各视场在

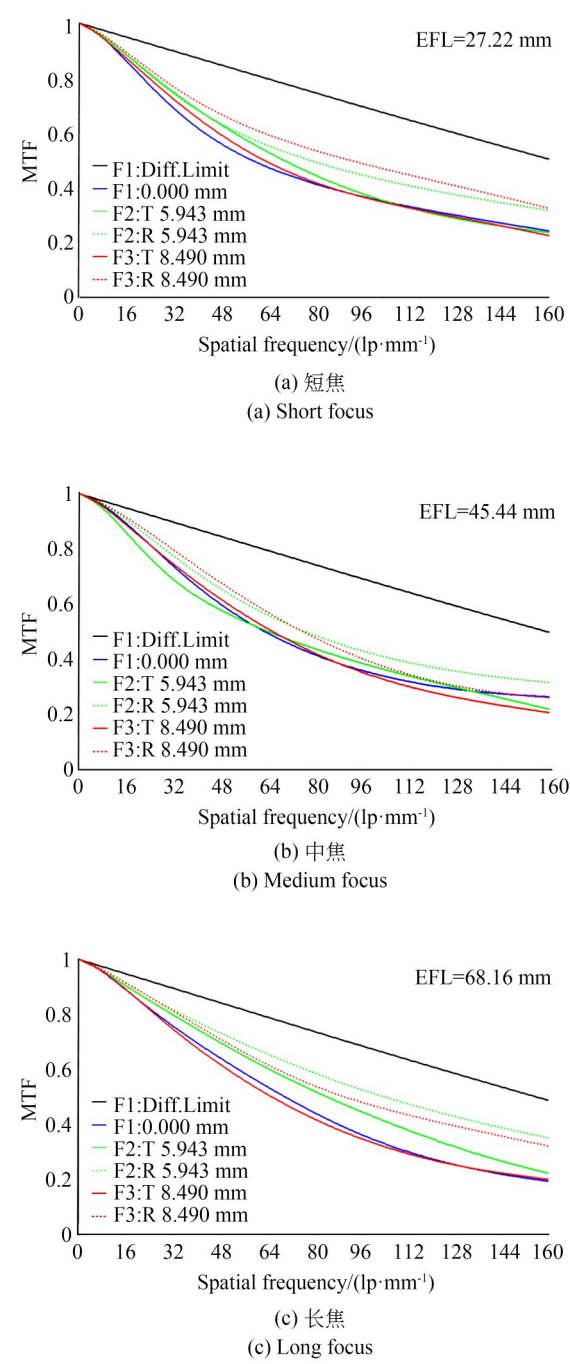


图 5 系统在 10 m 物距下的 MTF 曲线
Fig. 5 System MTF curves at 10 m object distance

80 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4,160 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.2,说明系统在远距离成像时能够提供较高的分辨率;在 0.2 m 物距时,短焦的 80 lp/mm 处的 MTF 值仍能达到 0.3,160 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.2,而中焦 80 lp/mm 处的 MTF 值在 0.7 视场内大于 0.2,160 lp/mm

处的 MTF 值在 0.7 视场内大于 0.1。结果表明,该系统在不同物距下均能提供较好的成像质量,特别是在远距离成像时表现更为优秀。

4.2.2 畸变

光学系统的畸变会导致图像变形,本设计要求在不同物距下系统的相对畸变均小于 2%。10 m 物距下不同焦距的畸变曲线如图 6 所示,最大相对畸变约为 1.25%,其余短焦、中焦、长焦各状态下的畸变均符合系统设计要求。

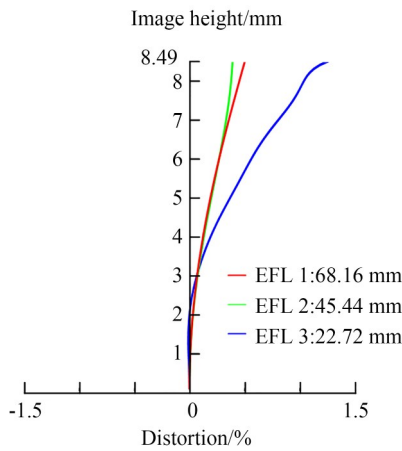


图 6 系统在 10 m 物距下的畸变曲线
Fig. 6 System distortion curves at 10 m object distance

4.2.3 相对照度

相对照度影响图像边缘的亮度均匀性,10 m 物距下的相对照度如图 7 所示,最大视场处的最小相对照度为 57.7%,远大于 20% 的设计要求,说明该系统在所有工作状态下均能提供较高的边缘亮度,提高成像均匀性。

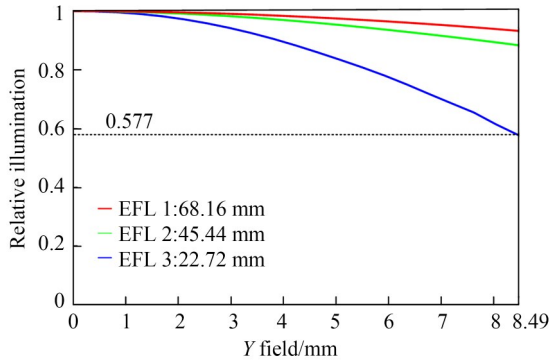


图 7 系统在 10 m 物距下的相对照度
Fig. 7 System relative illuminance at 10 m object distance

4.2.4 公差分析

在完成设计后,首先采用较为宽松的预定公差值对系统各焦段进行分析,给定公差项以及公差值如表 3 所示。以衍射 MTF 平均值为评价指标进行 2 000 轮次蒙特卡洛模拟,并收紧公差敏感项,如表 4 所示,重新进行分析。蒙特卡洛分析结果如表 5 所示,不同物距下系统在 80 lp/mm 处衍射 MTF 均值高于 0.236 的良率在 80%,在 160lp/mm 处衍射 MTF 均值高于 0.119 的良率在 80%。通过上述分析,该设计公差敏感度较低,公差较为宽松,可加工性高,良率高。

表 3 初始公差预设值
Tab. 3 Initial tolerance grade

公差类型	给定值
光圈数	2
厚度/mm	0.037 5
表面倾斜/(°)	1
表面偏心/mm	0.01
元件倾斜/(°)	1
元件偏心/mm	0.01
不规则度	0.5
折射率	0.001
阿贝误差/%	0.1

表 4 公差敏感项收紧

敏感公差项	收紧后公差
表面 4,6,11,12 厚度	0.012 5 mm
表面 1,2,14 偏心	0.005 mm
表面 5,11,12 折射率	0.000 5

表 5 80% 良率下衍射 MTF 平均值的蒙特卡洛分析结果
Tab. 5 Monte Carlo analysis results of average diffraction MTF at 80% yield

物距焦段	80 lp/mm 处	160 lp/mm 处
10 m 短焦	0.418	0.230
10 m 中焦	0.384	0.207
10 m 长焦	0.325	0.143
1 m 短焦	0.423	0.236
1 m 中焦	0.393	0.190
1 m 长焦	0.298	0.133
0.2 m 短焦	0.334	0.157
0.2 m 中焦	0.236	0.119

5 变焦凸轮曲线设计

本设计采用内调焦方式,即通过移动镜头内部部分组元实现调焦。具体而言,通过调整表 2 所列的 S_6 , S_{13} 空气厚度以及后截进行对焦操作,将图 4 所示的 Group 1 与 Group 2 组合形成调焦组 1, Group 3 则作为调焦组 2, 并需改变后截距。针对不同物距, 主要通过调后截距进行较大调整, 并辅以微调各调焦组之间的相对位置来实现对焦。如表 6 所示, 相同焦距设定下对不同物距进行对焦时, 除中焦段的后截距变

化较为显著外,各调焦组的微调移动量均较小,保持在 0.5 mm 以内,各调焦透镜的运动不存在机械干涉问题。

在变焦光学系统中,变焦曲线不应出现拐点,否则容易导致变焦过程中凸轮发生卡顿甚至卡死的现象^[17-19]。在设计全动型变焦系统时,为了降低加工难度以及提升变焦流畅度,将 Group 2 和 Group 3 的变焦曲线设计为直线, Group 1 和 Group 4 的变焦曲线设计为高次曲线。全动型变焦系统采用直径为 13 mm 的凸轮机构驱动四组镜片运动。

表 6 不同物距下对焦时各表面厚度的变化

Tab. 6 Variation of surface thickness during focusing under varying object distances (mm)

焦距	10 m			1 m			0.2 m		
	S_6 厚度	S_{13} 厚度	后截距	S_6 厚度	S_{13} 厚度	后截距	S_6 厚度	S_{13} 厚度	后截距
短焦	3.42	8.08	1.00	3.35	8.19	1.43	3.34	8.22	3.43
中焦	4.77	2.42	16.91	4.64	2.59	18.79	4.34	2.96	29.98
长焦	5.44	0.94	29.08	5.37	1.03	33.71	—	—	—

在 10 m 物距下,四组镜片至像面的距离随凸轮旋转角度的变化关系如图 8 所示。凸轮旋转角度 0°时系统处于短焦端,随着旋转角度增大,系统实现变焦操作,焦距相应增大。分析结果显示,凸轮运动曲线流畅无拐点,确保了变焦与对焦过程的平稳性。

6 鬼像分析

鬼像是指由于透镜表面反射而在光学系统焦面附近产生的附加像,当鬼像与系统像面距离近时,会产生明显的鬼像斑影响成像;而距离较远时,离焦的鬼像斑会影响成像整体的清晰度^[20]。光学设计后期需要使用光学仿真软件进行鬼像分析,将在系统中经过透镜表面多次反射的非成像路径称为鬼像路径。一般情况下,较为严重鬼像路径的判断依据为:该路径下的光通量不小于成像路径下光通量的 0.01%^[21]。为了方便计算,后续分析中使用鬼像最大辐照度与成像最大辐照度之比进行判断,当该值小于 0.01% 时,则可以认为该鬼像不严重,对系统影响不大。

使用 LightTools 软件对系统各表面产生的鬼像进行分析,各表面的光学属性如表 7 所示。采用 10 m 物距下结构近似无限远物距情况进行鬼像分析。光源设置为 1 W 功率朗伯光源,坐标在系统入瞳位置,大小为在 ZEMAX 中查看对应位置的光束口径。探测器设置为圆形接收器,尺寸与最大像面一致,即半径为 8.49 mm。光线追

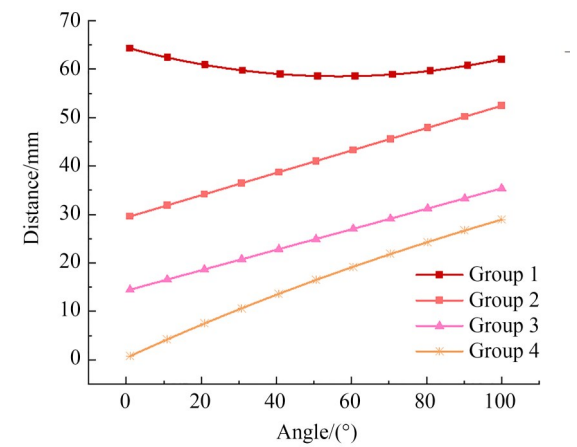


图 8 凸轮拟合曲线
Fig. 8 Fitting cam curves

表 7 鬼像分析各表面的光学属性

Tab. 7 Optical property settings for each surface in ghost image analysis

表面类型	反射率	透过率	吸收率
透镜侧表面	0%	\	100%
透镜通光表面	10%	90%	\

迹数为 3×10^4 , 光线阈值设为 10^{-5} 。分析模型如图 9 所示。运行光线追迹, 由于像点辐照度与鬼像辐照度差异巨大, 辐照度分布采用对数表示, 不同焦距的鬼像分析结果如图 10 所示。不同焦距下各视场鬼像最大辐照度与像点最大辐照度之比如表 8 所示, 结果表明, 短焦下各视场鬼像较明显; 中长焦鬼像相对不严重, 但均小于 0.108%, 在可接受范围内。

利用 LightTools 局部分分析及滤光片筛选光

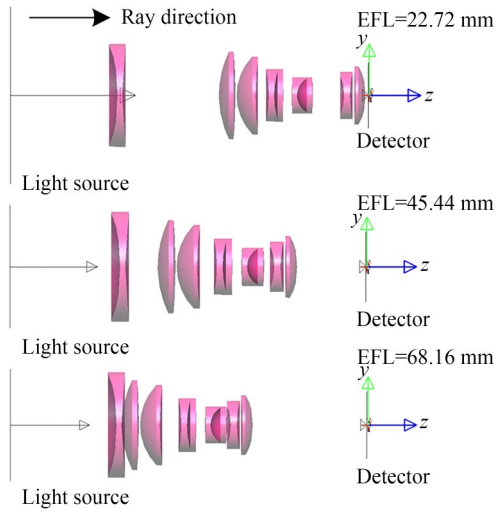


图 9 鬼像分析模型

Fig. 9 Ghost image analysis model

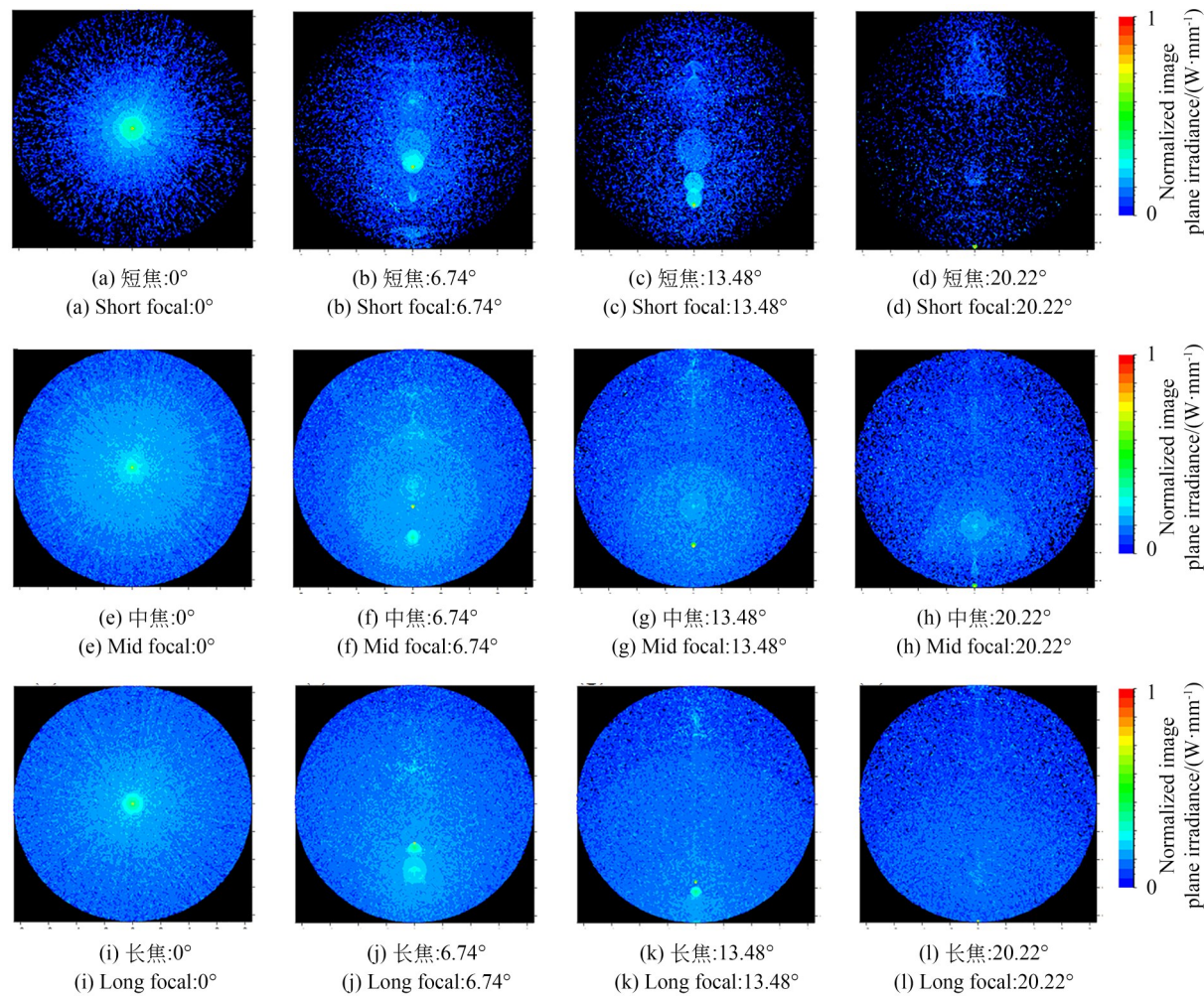


图 10 不同焦距各视场下鬼像分析像面辐照度分布

Fig. 10 Image plane irradiance distribution for ghost image analysis at different focal lengths and field angles

表 8 不同焦距下各视场鬼像与像点最大辐照度之比
Tab.8 Ratio of ghost image to maximum irradiance of image point at different focal lengths and field angles (%)

焦距	零视场	三分之一视场	三分之二视场	最大视场
短焦	0.106 14	0.042 73	0.067 15	0.108 00
中焦	0.019 51	0.004 36	0.003 70	0.005 73
长焦	0.032 21	0.012 27	0.010 46	0.002 32

线功能寻找形成较明显鬼像的表面,并单独计算其产生的鬼像最大辐照度与成像最大辐照度之比,结果如表 9 所示,表面序号同图 4。各表面组合产生的鬼像与像点最大辐照度之比均小于 0.012%,影响较小。若要降低整体鬼像对成像的影响,可以重点关注表 9 中的表面组合,通过在设计中改变其表面形状、避免鬼像斑会聚能量较大,或提升其表面透过率、减少反射率来抑制鬼像^[22]。

表 9 不同焦距下产生较明显鬼像的表面组合
Tab.9 Surface combinations produce relatively obvious ghost images under different focal lengths

焦距	表面组合	鬼像与像点最大辐照度之比
短焦	S ₁₅ —S ₁₄	0.118 8×10 ⁻³
短焦	S ₁₆ —S ₁₅	0.118 6×10 ⁻³
中焦	S ₁₀ —S ₄	0.023 8×10 ⁻³
长焦	S ₄ —S ₁	0.121 6×10 ⁻³
长焦	S ₁₀ —S ₄	0.004 0×10 ⁻³

参考文献:

[1] 蒋曲博,郭智元,卢泽楷,等. 1300万像素广角手机镜头设计[J]. 光学技术, 2024, 50(5): 520-525. JIANG Q B, GUO ZH Y, LU Z K, *et al.* Design of 13 megapixel wide-angle mobile phone lens[J]. *Optical Technique*, 2024, 50(5): 520-525. (in Chinese)

[2] SUN W S, LIU Y H, TIEN C L. Optical design of a miniaturized 10× periscope zoom lens for smart-phones[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1272.

[3] PARK S C, JO Y J. Ultra-slim zoom lens design for a 3× mobile camera[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2008, 52(4): 1048-1056.

7 结 论

本文通过应用全动型变焦结构和 Q 型非球面技术,实现了全塑料 3 倍连续变焦光学系统的小型化与高性能设计。实验结果表明,该系统在总长 68 mm 的前提下,实现了 22.72~68.16 mm 的连续变焦和 F4.5 的大相对孔径,通过 3 枚 8 阶 Q 型非球面透镜的优化配置,在 10 m 和 1 m 物距时,各焦距下各视场在 80 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4,160 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.2; 0.2 m 物距下仍能保持良好成像,畸变小于 2%,相对照度大于 57.7%。公差设置较宽松,进行了凸轮曲线拟合,采用 13 mm 直径无拐点凸轮机构,凸轮曲线的最大角度为 100°,曲线流畅无拐点,系统制造与装配可行性强。鬼像结果表明,不同焦距和不同视场下,各表面组合形成的鬼像与像点最大辐照度之比均小于 0.012 2%,所有鬼像路径与像点最大辐照度之比总和小于 0.108%,对系统成像的影响较小。与现有技术相比,本方案通过选用全动型变焦结构,采用 Q 型非球面,进行全塑料化,为消费电子领域的光学变焦系统提供了兼具性能优势与经济性的解决方案。

作者贡献声明:

蓝澜:系统设计及分析,论文构思和撰写;
王紫东:背景调研,原理梳理及论文写作;
傅峥尧:前期调研及结果分析;
赵申雨:结果分析及论文编辑;
程德文、杨通:论文指导。

[4] 罗春华,岳品良,张东虎,等. 变焦投影物镜光学系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 180-186. LUO CH H, YUE P L, ZHANG D H, *et al.* Optical design of zoom projection lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 180-186. (in Chinese)

[5] RUDIRAN S, DHANALAKSHMI S. Optical imaging of compact photographic zoom lens systems [C]. 2024 *IEEE International Conference for Women in Innovation, Technology & Entrepreneurship (ICWITE)*. February 16-17, 2024, Bangalore, India. IEEE, 2024: 489-493.

[6] 钟刘军,安志勇,高铎瑞,等. 多组元全动型变焦

- 物镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 199-204.
- ZHONG L J, AN ZH Y, GAO D R, *et al.* All lens elements movable zoom lens design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 199-204. (in Chinese)
- [7] WIPPERMANN F C, DUPARRÉ J W, HAGEN N. Scalable and energy-saving manufacturing approach for monolithic polymer components[C]. *Digital Optical Technologies 2023. June 26-30, 2023. Munich, Germany*. SPIE, 2023: 25.
- [8] WEI G M, ZHANG K, XIA X P. Performance evaluation of a zoom iris recognition system using Q-type aspherical design[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(2): 390-395.
- [9] LIU J L, SHI J, CHEN T F, *et al.* Mobile phone lens based on Q-type aspheres[C]. *2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). August 22-23, 2020, Hangzhou, China*. IEEE, 2020: 70-74.
- [10] 吴羽婷. 紧凑型 20 倍高性能变焦光学系统设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
- WU Y T. *Design of Compact 20× High Performance Zoom Optical System*[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023. (in Chinese)
- [11] 王向阳, 刘卫林. 多动型变焦距物镜设计[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 277-280.
- WANG X Y, LIU W L. Optical design of telephoto zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 277-280. (in Chinese)
- [12] 刘锦琳. Q 型非球面及其在光学系统设计中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- LIU J L. *Q-type Aspheres and Its Application in Optical System Design*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- [13] 贾孟, 薛常喜. 基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 267-274.
- JIA M, XUE CH X. Design of dual-band infrared optical system with Q-type asphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 267-274. (in Chinese)
- [14] 彭星, 翟德德, 石峰, 等. 高反射工件表面缺陷偏振检测光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(6): 365-378.
- PENG X, ZHAI D D, SHI F, *et al.* Design of optical polarization system for defect detection on highly reflective surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 365-378. (in Chinese)
- [15] FORBES W G. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [16] 郑玮, 林峰. Q-type 非球面技术在超短焦全景镜头设计中的应用[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1317-1320.
- ZHENG W, LIN F. Application of Q-type asphere in the design of super short-focus panoramic lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1317-1320. (in Chinese)
- [17] 王谭, 袁屹杰, 吴英春, 等. 连续变焦镜头凸轮曲线压力升角优化研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(1): 61-65.
- WANG T, YUAN Y J, WU Y CH, *et al.* Pressure angle optimization for cam curve of continuous zoom lens[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(1): 61-65. (in Chinese)
- [18] 侯国柱, 吕丽军. 五组元变焦镜头凸轮曲线设计[J]. 红外技术, 2018, 40(5): 477-480.
- HOU G ZH, LYU L J. Cam curve design of five component zoom lens[J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(5): 477-480. (in Chinese)
- [19] 张坤, 曲正, 钟兴, 等. 30 倍轻小型变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(11): 1263-1271.
- ZHANG K, QU ZH, ZHONG X, *et al.* Design of 30 × zoom optical system with light weight and compact size[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1263-1271. (in Chinese)
- [20] 肖鹏益, 刘铭鑫, 闫磊, 等. 鬼像影响下的调制传递函数计算模型[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(5): 1183-1191.
- XIAO P Y, LIU M X, YAN L, *et al.* An MTF calculation model under the influence of ghost images[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1183-1191. (in Chinese)
- [21] 周岩, 吴时彬, 汪利华, 等. 大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 767-774.
- ZHOU Y, WU S B, WANG L H, *et al.* Design of catadioptric middle infrared diffractive telescope system with large aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 767-774. (in Chinese)
- [22] 王虎, 陈钦芳, 马占鹏, 等. 杂散光抑制与评估技

术发展与展望(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7): 125-180.

WANG H, CHEN Q F, MA ZH P, *et al.* Devel-

opment and prospect of stray light suppression and evaluation technology (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 125-180. (in Chinese)

作者简介:



蓝 澜(2001—),女,广西南宁人,硕士研究生,2024年于北京理工大学获得学士学位,主要从事红外与变焦系统设计。E-mail: Lanxlan_1224@163.com

通讯作者:



程德文(1982—),男,江西婺源人,博士,教授,博导,2004年、2011年于北京理工大学分别获得学士和博士学位,国家级领军人才,北京耐德佳显示技术有限公司创始人,主要从事自由曲面光学系统设计、虚拟现实(VR)和增强现实(AR)头戴显示技术及视光学研究。E-mail:cdwlxk@bit.edu.cn