

50倍变焦安防镜头光学系统设计

詹硕 李博

Design of optical system for 50^x zoom security lens

ZHAN Shuo, LI Bo

引用本文:

詹硕, 李博. 50倍变焦安防镜头光学系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 966–973. DOI: 10.5768/JAO202546.0501002

ZHAN Shuo, LI Bo. Design of optical system for 50^x zoom security lens[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 966–973. DOI: 10.5768/JAO202546.0501002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

50 mm ~ 1 000 mm大变倍比变焦光学系统设计

Design of 50 mm~1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio

应用光学. 2020, 41(6): 1147–1152 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601002>

40^x大变倍比宽波段连续变焦光学系统设计

Design of wide-band continuous zoom optical system with 40^x large zoom ratio

应用光学. 2023, 44(2): 246–252 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201002>

二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计

Optical design of ultraviolet continuous zoom lens for sulfur dioxide remote sensing monitoring

应用光学. 2024, 45(6): 1108–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601001>

紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>

适用于高精度激光测距的光学系统设计

Design of optical system for high-precision laser ranging

应用光学. 2022, 43(2): 191–197 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201002>

基于像差特征分析的变焦光学系统装调

Alignment of zoom optical system based on aberration feature analysis

应用光学. 2020, 41(2): 389–393 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0205002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-0966-08

引用格式: 詹硕, 李博. 50倍变焦安防镜头光学系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 966-973.

ZHAN Shuo, LI Bo. Design of optical system for 50^x zoom security lens[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 966-973.



在线阅读

50倍变焦安防镜头光学系统设计

詹硕, 李博

(浙江工业大学 物理学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为满足当前安防市场对高性能变焦光学镜头在大范围监控和高清成像的需求, 设计了一款焦距范围为 10 mm~500 mm 的平滑变焦光学系统。系统采用机械式正组补偿方式, 通过参数设定与优化结合的方法计算出初始结构参数, 采用移动光阑的方式保持恒定 F 数; 引入非球面透镜, 有效矫正系统的位置色差和轴向色差, 提升了成像性能; 整个系统由 13 个球面透镜和 2 个非球面透镜组成, 总长为 375.6 mm, 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 在 104 lp/mm 处全程均高于 0.35; 给出了变倍组与补偿组的运动曲线, 曲线平滑无断点, 验证了系统的可靠性与稳定性。最终分析结果表明: 该系统能够满足大范围监控的实际需求, 为大变倍比变焦光学系统的设计提供了参考。

关键词: 光学设计; 大变倍比; 变焦系统; 机械补偿变焦; 凸轮曲线

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0501002

Design of optical system for 50^x zoom security lens

ZHAN Shuo, LI Bo

(School of Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: To meet the growing demands for high-performance zoom optical lenses in large-area surveillance and high-definition imaging within the security market, a smooth zoom optical system with a focal length range of 10 mm to 500 mm was designed. The system employed a mechanical positive compensation method, where optimal initial structural parameters were determined through parameter setting and optimization. A moving aperture was implemented to maintain a constant F -number throughout the zoom range. Additionally, aspherical lenses were introduced to effectively correct positional and axial chromatic aberrations, thereby enhancing imaging performance. The optical system consists of 13 spherical lenses and 2 aspherical lenses, with a total length of 375.6 mm. The modulation transfer function (MTF) remains above 0.35 at 104 lp/mm across the entire zoom range. During the design process, motion curves for the zoom and compensation groups were plotted, demonstrating smooth, breakpoint-free transitions, which could validate the system's reliability and stability. Final analysis results indicate that the proposed system meets the practical large-area surveillance requirements and provides valuable references for the design of high-zoom-ratio optical systems.

Key words: optical design; high zoom ratio; zoom system; mechanical compensation zoom; cam curves

引言

在安防、摄影、机器视觉和消费电子等领域,

变焦镜头正越来越多地被视为重要的图像采集方案。尽管其应用广泛, 但高变焦比变焦镜头的设

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-03-22

基金项目: 浙江工业大学产学研项目“低功耗无线摄像机开发”(KYY-HX-20220057)

第一作者: 詹硕, E-mail: 201806110722@zjut.edu.cn

通信作者: 李博, E-mail: libo@zjut.edu.cn

计仍面临诸多挑战。目前市场上的变焦镜头变倍比普遍较小,而大变倍比镜头系统往往存在像质表现不佳、结构笨重等问题。因此,随着光学技术的不断进步,在确保高变倍比和卓越成像质量的同时,实现系统的轻量化和紧凑化,已成为航空航天、安防监控、医疗成像等领域的重要研究方向。针对这一问题的深入研究,不仅有助于推动光学变焦系统的发展,还能满足现代安防工程对高性能、小型化设备的迫切需求^[1]。目前,变焦镜头已成为安防企业重点研发的方向,其中小型化与大变倍比设计是整个系统开发的核心难点^[2-3]。

2017 年,杨明洋等^[4]通过三组元独立运动设计出 6 mm~600 mm 的机械式补偿光学系统,MTF 在 182 lp/mm 处的中心视场基本达到了衍射极限。2019 年,张健等^[5]基于正组补偿结构设计了一款 30 mm~300 mm 的变焦光学系统,实现了轻量化和小型化。然而,该系统的凸轮曲线不够平滑,存在拐点。2020 年,刘圆等^[6]提出了一种 50 mm~1 000 mm 的光学系统,由 28 片最大孔径 100 mm、总长度 399.9 mm 的球面透镜组成。同年,LIU Y P 等^[7]设计了一款 50 倍五组元变焦光学系统,结构紧凑,但文章未分析该系统是否具备 50 倍连续变焦和良好的成像性能。张昆等^[8]推导了四组元连续变焦光学系统的高斯方程,设计了变焦平滑、成像质量高的 40 倍连续变焦光学系统,但中焦和长焦段的艾里斑直径较大。2021 年,苗兆等^[9]设计了一款 7 mm~154 mm 的机械补偿式近红外变焦光学系统。2022 年张坤等^[10]设计了一款 7 mm~210 mm 的 30 倍连续变焦光学系统,可搭配 1.27 cm(1/2 英寸)探测器,全长为 190 mm。以上两款系统的变焦范围都较小。2023 年,王美钦等^[11]设计了一款 10 mm~400 mm 的近红外波段连续变焦光学系统,但搭配的探测器分辨率较低。

因此,根据高端安防市场对大变倍镜头的应用需求,本文通过计算查询初始结构,并将其导入 Zemax 进行光学仿真和像质优化,设计了一款变倍比为 50,可见光波段范围的变焦光学系统。镜片材料均采用光学设计中常见的光学玻璃(FK61、FK95N、ZPK7、ZPK5、LAF50、LAF4、ZF88、ZF1、ZF62、ZK3、ZBAF50、LAK54、LAK538 等),实现了焦距为 10 mm~500 mm 的连续变焦,成像质量基本满足市场要求。本文选择搭配的探测器像元尺寸为 4.8 μm×4.8 μm,各焦距的 MTF 值在 104 lp/mm 处均在 0.35 以上,色差控制较佳,凸轮曲线平滑无

拐点。该变焦系统能够满足实际应用中大范围、长距离监控区域探测的要求。

1 设计过程及原理

1.1 主要指标要求

通过分析国内外市场上安防镜头的主流技术指标及实际应用需求,确保设计方案符合行业标准和市场趋势。为了满足低成本的设计目标,在设计过程中利用 Zemax 对初始结构进行优化,以提升成像质量,减少像差,并在确保性能达标的前提下尽可能降低系统复杂度和制造成本。最终确定的主要设计指标如表 1 所示。

表 1 主要设计指标
Table 1 Main technical specifications

设计指标	数值
焦距/mm	10~500
工作波长/nm	480~650
<i>F</i> 数	4.6
探测器分辨率/μm	4.8
全视场/(°)	1.05~49.4
相对照度/%	≥40

1.2 变焦方式选取

大变倍系统在变焦过程中必须确保焦距连续变化,以满足不同应用场景的要求。同时,由于本系统对成像质量要求较高,因此需要在整个变焦范围内保持良好的像质,尽可能减少像差。此外,变焦时的影像位置需要保持稳定,以确保系统在不同焦距下能够获得清晰、准确的成像结果。除了光学性能,工厂在生产、加工和装配过程中的难易程度以及成本因素也是选择镜头材料和像质优化时需要重点考虑的因素。

目前,光学补偿式变焦系统虽然具有整体设计较为简单、装配难度较低、制造成本相对低的优势,但在实际应用中却很少选择此种补偿方式。其原因是:首先,由于补偿机制的特性,该系统难以实现焦距的连续变化,无法满足大变倍变焦系统的基本要求;其次,光学补偿方式在变焦过程中系统稳定性较低,影响成像质量。因此,从满足大变倍变焦需求以及保证成像稳定性的角度出发,光学补偿式变焦系统并不是最佳选择。虽然市面上常见的变焦光学系统设计方式种类繁多,各种方式各具优缺点,但在分析了不同变焦方式的性能特点后,结合本系统对超高变倍的设计要求,同

时兼顾成像质量、装配工艺等综合因素,最终选择采用机械补偿的形式完成本系统的设计和优化。

机械补偿式变焦系统又分为正组补偿和负组补偿两种方式。正组补偿的光学设计结构通常呈细长形态,采用平滑换根解的光学设计方法,在实现高变倍变焦的同时能够较好地控制像差,使成像质量保持稳定。负组补偿的光学设计结构相对较为粗短,虽然在某些特殊的焦距位置能够完成变焦并保证像面恒定,但整体上设计灵活性较低,难以满足大变倍变焦系统的需求,因此在此类系统设计中较少采用。

综合考虑光学性能、系统稳定性、加工难度和成本等因素,本系统最终选用了二组元正组补偿方式,如图1所示,以确保变焦系统能够在较大的变倍范围内保持良好的成像质量和较高的稳定性。同时优化光学设计,提高制造的可行性和经济性。

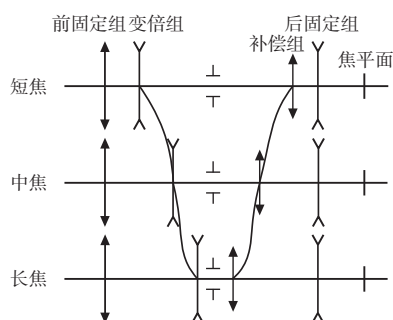


图1 二组元正组补偿变焦光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-element positive group compensating zoom optical system

由图1可知,在镜头变焦过程中变倍组和补偿组做相向运动。通过移动变倍组和补偿组控制整个光学系统的焦距,补偿组矫正像面漂移和像质变化。在设计时必须确保两组元的空间间隔大于0,以避免相撞。

假设系统的变倍比为 M ,前固定组、变倍组和补偿组的焦距分别为 f'_1 、 f'_2 、 f'_3 ,前固定组和变倍组间隔为 d_{12} ,变倍组和补偿组的间隔为 d_{23} ,变倍组和补偿组的初始物距为 l_2 、 l_3 ,则变倍组和补偿组的放大倍率 m_2 、 m_3 分别为

$$m_2 = \frac{f'_2}{f'_2 + l_2} = \frac{f'_2}{f'_2 + f'_1 - d_{12}} \quad (1)$$

$$m_3 = \frac{f'_3}{f'_3 + l_3} = \frac{f'_3}{f'_3 + f'_3(1 - m_2) - d_{23}} \quad (2)$$

在变倍组和补偿组移动时,两组元共同作用以

保持像面一致。假设变倍组移动量为 x ,补偿组移动量为 y ,则两组元之间的间隔 d'_{23} 为

$$d'_{23} = d_{23} - x + y \quad (3)$$

由于机械结构设计和装配的原因, d'_{23} 需要大于0。

2 参数计算与设计结果

2.1 参数计算

目前,变焦系统的结构设计主要有两种方法:一种是基于近轴光学理论的计算方法,利用光学基本原理进行解析计算,但该方法由于计算复杂度较高,误差较大,因此通常仅适用于对结构和性能要求相对较低的变焦系统^[12];另一种方法是采用光学设计软件(如Zemax、CodeV等)进行辅助计算,首先查阅专利和相关文献确定初始光学结构,然后在光学设计软件中结合光学优化函数进行仿真和像质优化,最终得到符合设计要求的变焦系统。由于本文设计的光学结构复杂度较高,因此采用第二种设计方法。系统搭配的探测器像元尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$,奈奎斯特频率为104 lp/mm。

根据公式(4)计算视场角:

$$w = \arctan \frac{l}{f'} \quad (4)$$

式中: w 为视场角; l 为探测器靶面对角线长; f' 为光学系统焦距。

由公式(4)计算得出初始结构3个焦距位置的焦距值,如表2所示。

表2 系统初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters of system

参数	短焦	中焦	长焦
焦距 f' /mm	10	70	500
全视场 $w/(\circ)$	49.4	7.52	1.05
F 数	4.6	4.6	4.6

如图1所示,根据高斯光学计算公式确定本系统的初始结构^[13]。假设变倍组和补偿组的归一化焦距是 f_2 、 f_3 ,以及在长焦状态时的归一化倍率是 m_{21} 、 m_{31} ,前固定组和变倍组在短焦和长焦时的间隔分别为 d_{12s} 、 d_{12l} ,则变倍组和补偿组之间的间隔 d_{23l} 为

$$d_{23l} = f_2(1 - m_{21}) + f_3 - \frac{f_3}{m_{31}} \quad (5)$$

变倍组从短焦变为长焦时的移动量 X 为

$$X = d_{121} - d_{12s} \quad (6)$$

移动量 X 与短焦状态时的倍率 m_{2s} 的关系为

$$m_{2s} = \frac{1}{1/m_{21} + X/f_2} \quad (7)$$

根据变焦微分方程可计算出短焦时补偿组的倍率 m_{3s} :

$$m_{3s} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (8)$$

$$b = -\frac{f_2}{f_3} \left(\frac{1}{m_{2s}} - \frac{1}{m_{21}} + m_{2s} - m_{21} \right) + \frac{1}{m_{31}} + m_{31} \quad (9)$$

变焦过程中像面的移动量 Δ 为

$$\Delta = f_3(m_{3s} - m_{31}) \quad (10)$$

系统总变倍比 M 为

$$M = \frac{m_{21}m_{31}}{m_{2s}m_{3s}} \quad (11)$$

短焦时前固定组焦距 f'_1 为

$$f'_1 = d_{12s} + \frac{f_2(1 - m_{2s})}{m_{2s}} \quad (12)$$

联合式 (5)~式 (12), 并利用参数设定的方法可计算出 f'_1 、 f'_2 、 f'_3 , 从而确定光学系统的初始焦距和结构。

2.2 设计结果

在变焦系统中采用恒定光圈可以确保光通量和成像质量稳定。采用移动光阑的方式, 将补偿组的第一枚镜面作为有效光阑, 通过动态调整入瞳位置, 实现恒定 F 数控制。该设计在保证光通量稳定的同时, 通过精确设计镜面的曲率和运动轨迹, 优化了像差补偿, 系统在全焦距范围内可达到良好的成像质量。不同焦距下的 F 数如表 3 所示。从表 3 可以看出, F 数随着焦距增大而升高, 但短焦端和长焦端相差不超过 3.5%, 变化范围较小, 系统在全焦距范围内可达到良好的成像质量并保持稳定的光通量。

表 3 各焦距的 F 数

Table 3 F -number corresponding to each focal length

焦距/mm	入瞳直径/mm	F 数
10	2.173 93	4.61
70	15.217 4	4.64
500	108.696	4.76

通过采用式 (1)~式 (12), 基于数学模型和反复迭代, 不断调整参数, 可计算出变焦系统的初始结构。具体设计步骤如下。

1) 为了确保补偿组能够顺利实现换根, 保持

像面稳定, 首先假设变倍组和补偿组的放大倍率均为 -1 , 即物像关系满足共轭关系, 然后根据光学成像公式计算出补偿组焦距、补偿组与变倍组的物像距离及两组之间的间距。

2) 在长焦端, 变倍组的放大倍率需要根据系统要求设定, 并求解变倍组的物距、像距及其沿光轴的移动量。

3) 在短焦状态下, 通过变倍比计算两组的放大倍率, 然后再计算前固定组的焦距, 根据设定的后固定组的放大倍率 (控制最终的像方放大率) 计算后固定组的焦距。

4) 通过系统参数缩放, 确定长焦段、中焦段及短焦段时各组元之间的距离。通过优化设计调整变倍组、补偿组的运动轨迹, 使整个变焦过程中像质稳定。

5) 将符合计算要求的四组元初始结构导入 Zemax, 然后进行模拟仿真和像质分析, 对系统进行解算和优化。首先对 F 数、焦距、镜片数量和各镜头间隔等进行优化, 然后再对成像质量进一步分析与优化^[14]。

最后得到的光学系统结构图如图 2 所示, 分别给出了 3 种焦距下的系统设计图。表 4 为变焦时前固定组与变倍组和补偿组的距离, 其中 d_1 是前固定组与变倍组之间的距离, d_2 是后固定组与补偿组之间的距离。表 5 为系统各组元之间的焦距。

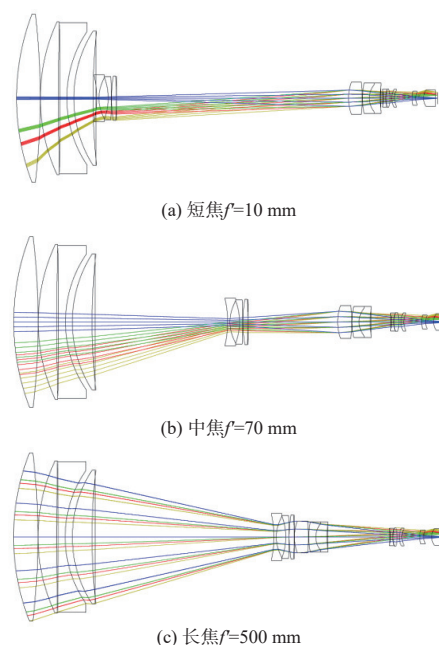


图 2 变焦系统结构示意图

Fig. 2 Zoom system structural schematic

表4 各焦距的空间间隔

焦距	d_1	d_{23}	d_2
10	0.159	207.646	1.660
70	114.81	77.526	17.13
500	155.36	0.135	53.970

表5 各组元的焦距

组元名称	焦距/mm
前固定组	283
变倍组	-24.9
补偿组	46.9
后固定组	35.24

本系统总长 375.6 mm, 最大口径为 66.7 mm, 共由 15 枚镜片构成。其中, 前固定组为 4 个球面透镜, 为正光焦度; 变倍组和补偿组均由 2 个球面透镜和 1 个非球面透镜组成, 在变倍过程中进行非线性运动, 以保持像面恒定; 后固定组由 5 个球面透镜组成, 采用低色散玻璃与消色差玻璃相结合的方法对残余色差进行校正。

3 光学系统设计结果与分析

3.1 像质分析

MTF 能够直观反映系统在不同焦距下的分辨率和对比度特性^[15]。在光学设计中, 通过分析 MTF 曲线可以调整系统参数, 提升成像质量, 最终设计的变焦系统的 MTF 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 系统在奈奎斯特频率 104 lp/mm 处 MTF 均大于 0.35, 表明该系统在不同焦距下都能够有效传递高频信息, 满足高分辨率成像要求, 在成像信息传递过程中损耗较少, 可满足监控视场内远距离微小外来物的探测识别。

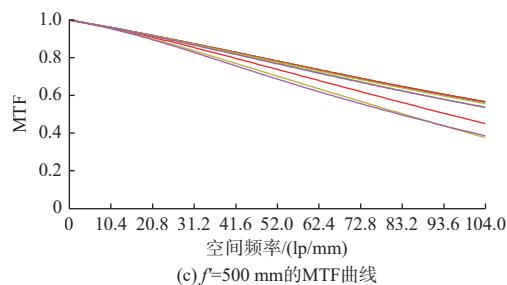
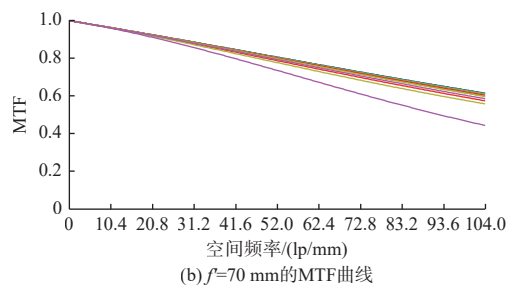
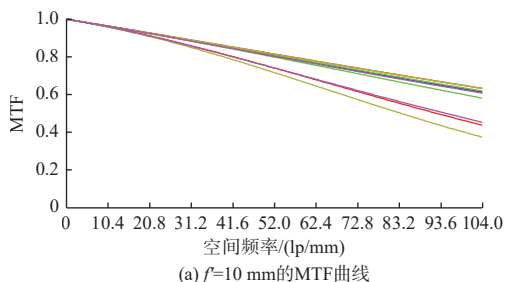
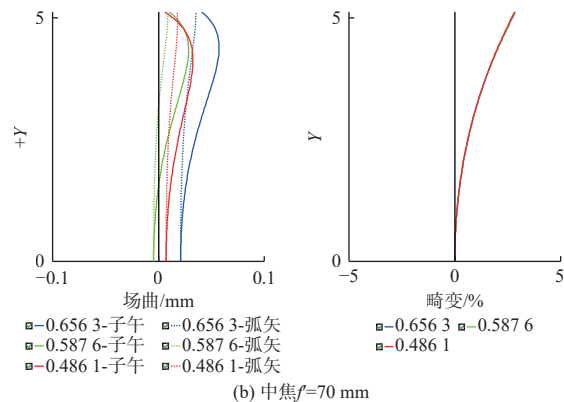
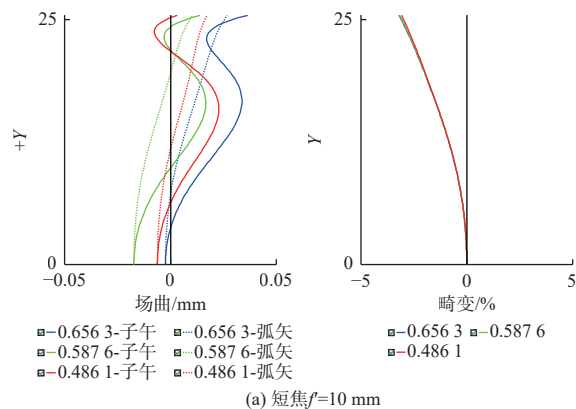


图3 变焦镜头的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of focal length of zoom lens

系统的畸变和场曲如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 系统在短焦、中焦和长焦位置的畸变值分别为 3.17%、2.83% 和 1.06%, 表明在长焦状态下系统畸变控制较优, 而短焦时畸变较为明显。此外, 通过对场曲曲线的分析可知, 无论系统处于何种焦距状态, 场曲均处于 0.1 mm 以内, 表明系统在整个变焦范围内像面弯曲程度较小。



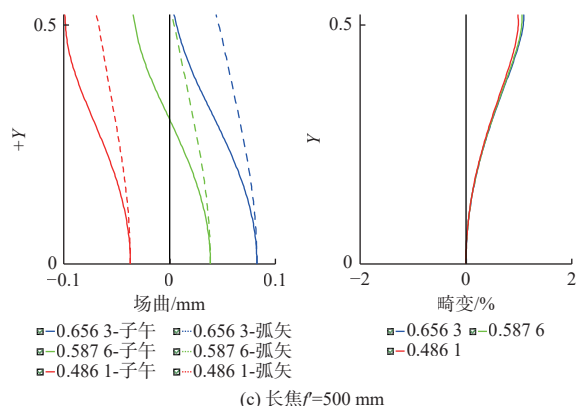


图4 变焦系统场曲与畸变图

Fig. 4 Zoom system field curvature and distortion diagram

系统在长焦时的垂轴色差和轴向像差如图5所示。从图5可以看出,光轴上F光($0.65\ \mu\text{m}$)和C光($0.48\ \mu\text{m}$)之间的差值,在长焦状态下系统的色差控制在 $0.1\ \text{mm}$ 以内,表明色差校正效果良好。同时,整个视场范围内色差均小于艾里斑尺寸,保证了系统在不同视场角下的色彩还原能力和分辨率。垂轴色差最大值小于 $4\ \mu\text{m}$,表明系统在长焦状态下聚焦效果良好,可满足高精度成像和大变焦变焦系统设计要求。

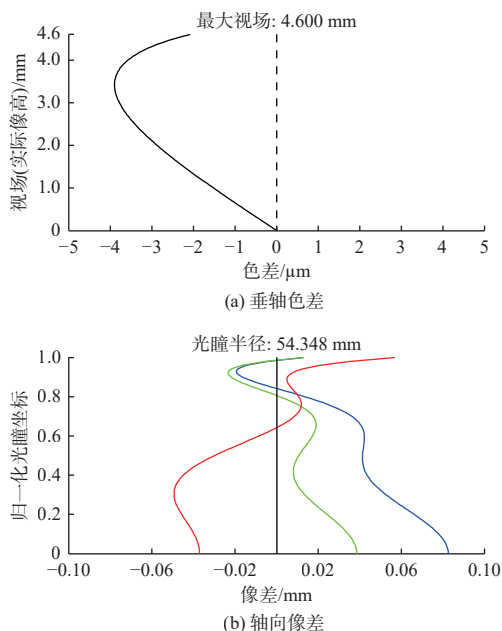


图5 长焦的垂轴色差与轴向像差

Fig. 5 Vertical axis color difference and axial aberration of long focus

3.2 热分析及主动补偿

安防监控镜头在不同温度环境下会受到多方面的影响^[15]。首先,温度会导致镜片的折射率发生变化,使成像质量发生波动,尤其在大温差环境下

影响更明显。其次,镜片和镜筒材料的热膨胀系数不同,会引起镜片间距变化,导致焦距漂移,影响清晰度。此外,温度引起的机械变形可能导致光轴偏移,使成像发生畸变或视场偏移。红外镜头还可能受到热辐射影响,导致像质下降,长期高温或低温环境可能加速镀膜老化,影响透过率 and 对比度。因此,在安防监控系统中需充分考虑温度对成像质量的影响^[16]。

通过采用被动式热补偿的方法,选用热膨胀系数低的材料如FK61、FK95N、FK61A、PK7等,以及2个非球面透镜来减少焦移和高阶像差。波前图可以分析在不同温度下的波前误差,从而判断热焦移对光学性能的影响。一般来说,均方根波前误差 $<0.07\lambda$ 时可认为成像质量较好,超过 0.15λ 时表明系统已经明显失焦,性能下降。各温度下长焦端的波前图如图6所示。从图6可知,系统在常温状态下波前差为 0.065λ ,成像质量良好。但在 -30°C 和 70°C 时波前差均大于 0.15λ ,因此,需要

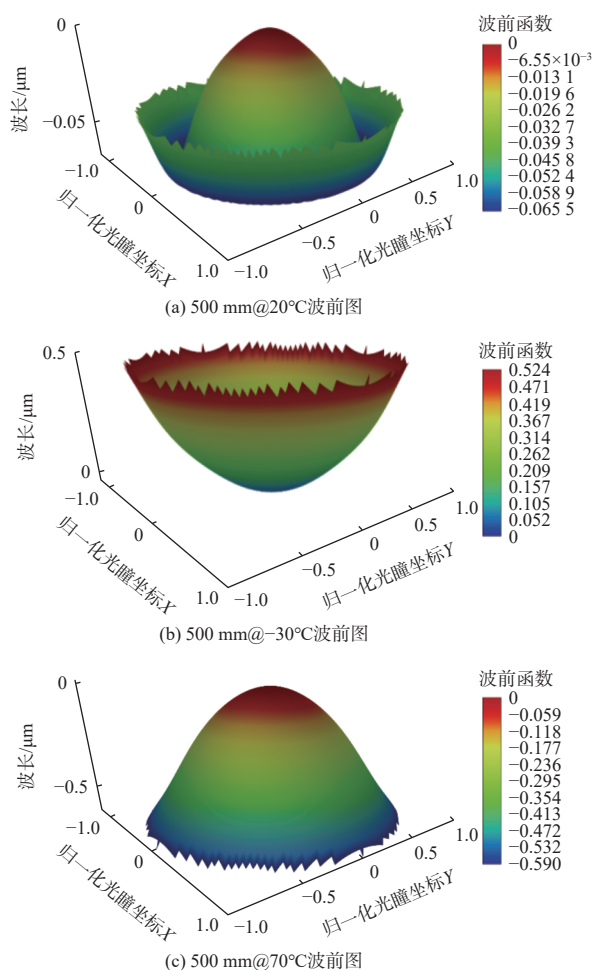


图6 各温度下的长焦端波前图

Fig. 6 Telephoto wavefronts at various temperatures

采用主动式热补偿在硬件及算法方面提高系统在极端环境下的适应性。

3.3 凸轮曲线拟合

为了保证补偿组和变倍组在焦距变化过程中不会发生组元相撞,机械补偿式变焦系统需要绘制凸轮曲线^[17]。由于本系统变倍比比较大,同时光学总长度控制较为紧凑,所以采用多焦距模式下的补偿组和变倍组位置进行曲线拟合。系统设计中变倍组和补偿组均可移动,各组元之间的间隔随变焦过程动态调整。将短焦 $f'=10\text{ mm}$ 时前固定组透镜后表面的位置设立为基准面,焦距作为因变量,通过仿真采样计算,可以得到变倍组透镜前表面和补偿组透镜前表面到基准面随焦距变化的曲线,即变焦系统的凸轮曲线。

在 Zemax 软件中获取了具有良好成像性能的 50 个数据点。基于这些数据点,利用 Matlab 程序对凸轮运动曲线进行拟合,得到的结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,凸轮曲线在整个运动过程中平滑且无拐点出现,确保了系统的机械运动稳定性和成像性能的可靠性,为后续制造与实际使用奠定了基础,可充分满足安防行业应用需求。

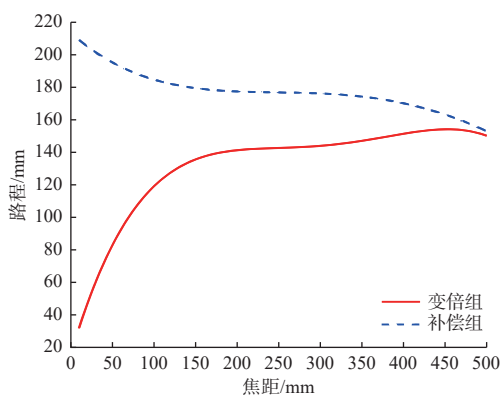


图 7 变倍补偿曲线

Fig. 7 Zoom compensation curves

3.4 公差分析

变焦系统设计完成后,在光学镜头的实际制造过程中,加工精度、材料特性偏差及装配误差等因素会显著影响最终成像质量,导致产品性能与理论设计存在差异。若仅追求理想状态下的光学参数而忽略实际误差,将难以保证镜头的实用性。因此,通过公差分析评估误差对系统的综合影响至关重要。参考行业装配规则及目前国内的镜片加工水平,按照表 6 参数设置进行公差分析。

表 6 Zemax 公差表

Table 6 Zemax tolerance table

公差项	公差值
曲率半径/fringe	3
厚度/mm	0.015
表面偏心/mm	0.01
表面倾斜/(°)	0.017
S+A 不规则度/fringe	0.5
元件偏心/mm	0.01
元件倾斜/(°)	0.02
折射率	0.001
阿贝数/%	1

变焦系统在全视场 104 lp/mm 处平均 MTF 分布情况如表 7 所示。从表 7 可知,90% 中短焦视场的 MTF 值均大于 0.3,满足基本性能要求。但是,在长焦状态时系统公差敏感度较高,仅有 20% 的 MTF 值大于 0.11。在实际加工中加强长焦端镜片装配精度的控制,优化装配工艺,可提升系统在长焦端的成像稳定性。

表 7 蒙特卡洛分析 MTF 分布情况

Table 7 Monte Carlo analysis of MTF distribution

蒙特卡洛分析	10 mm	70 mm	210 mm	325 mm	500 mm
90%≥	0.370 6	0.333 4	0.180 0	0.098 7	0.050 6
80%≥	0.391 2	0.360 9	0.207 5	0.123 1	0.057 1
50%≥	0.425 7	0.408 1	0.257 6	0.160 8	0.075 2
20%≥	0.459 7	0.446 1	0.320 0	0.218 1	0.113 1
10%≥	0.468 6	0.473 1	0.346 9	0.230 1	0.187 8

4 结论

为满足当前安防市场对多焦段、高分辨率成像的需求,本文设计了一款焦距范围为 10 mm~500 mm 的大倍率变焦安防镜头,并对其光学性能进行了详细分析与优化。该系统实现了 50 倍连续变焦,可匹配 $4.8\text{ }\mu\text{m}\times 4.8\text{ }\mu\text{m}$ 像元尺寸探测器,最大口径 66.7 mm,总长度 375.6 mm,在 104 lp/mm 处全视场 MTF 大于 0.35。此外,该系统具备低像差、低场曲、凸轮曲线无拐点及制造成本低等优势。针对安防监控镜头受温度变化影响显著的问题,采用被动式热补偿优化焦移和像差,并通过波前误差分析评估系统在不同温度环境下的成像质量。研究结果表明,在极端温度条件下,仍需结合主动式热补偿,以进一步提升系统的成像稳定

性。综合分析结果表明: 该光学系统在成像性能、结构紧凑性和制造可行性方面均表现出显著优势, 为高性能、高性价比安防变焦镜头的开发提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 蔡伟. 大变倍比变焦距系统设计[D]. 长春: 中国科学院研究生院: 长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
CAI Wei. Design of large zoom ratio variable focal length system[D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, 2012.
- [2] ITO D. Optical design of the high-power zoom lens[J]. *Optical Review*, 2014, 21(6): 745-751.
- [3] TIEN C L, HUANG C H, LIN T W, et al. Optimization design of two-group nightvision zoom lenses[J]. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 2011(12): 809-815.
- [4] 杨明洋. 大变倍比连续变焦光学系统研究[D]. 西安: 中国科学院大学: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2017.
YANG Mingyang. Research on large zoom ratio continuous zoom optical system[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [5] 张健, 罗天娇, 罗春华, 等. 30 mm~300 mm 轻型变焦物镜光学系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(1): 51-57.
ZHANG Jian, LUO Tianjiao, LUO Chunhua, et al. Optical design of a 30 mm~300 mm lightweight zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 51-57.
- [6] 刘圆, 叶德茂, 王建樾, 等. 50 mm~1000 mm 大变倍比变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(6): 1147-1152.
LIU Yuan, YE Demao, WANG Jianying, et al. Design of a 50 mm~1000 mm large zoom ratio optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1147-1152.
- [7] LIU Y P, YANG B, GU P X, et al. 50° fivegroup inner-focus zoom lens design with focus tunable lens using Gaussian brackets and lens modules[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29098-29111.
- [8] ZHANG K, QU Z, ZHONG X, et al. 40° zoom optical system design based on stable imaging principle of four groups[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(6): 1516-1522.
- [9] 苗兆. 大变倍安防变焦监控镜头的光学设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
MIAO Zhao. Optical design of large zoom ratio security zoom monitoring lens[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [10] 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 Kun, QU Zheng, ZHONG Xing, et al. Design of a 30° lightweight and compact zoom optical system[J]. *Optical Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1263-1271.
- [11] 王美钦, 潘海俊, 刘斌. 40°大变倍比宽波段连续变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2023, 44(2): 246-252.
WANG Meiqin, PAN Haijun, LIU Bin. Design of a 40° large zoom ratio wideband continuous zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 246-252.
- [12] 白虎冰, 缪礼. 大口径长焦距变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 644-649.
BAI Hubing, MIAO Li. Design of a large aperture long focal length zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 644-649.
- [13] 闫晶, 刘英, 孙权, 等. 10 倍中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 161-166.
YAN Jing, LIU Ying, SUN Quan, et al. Design of 10° MWIR continuous zoom optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 161-166.
- [14] JOSEPH M. G. Introduction to lens design with practical Zemax examples[M]. Huntsville: Center for Applied Optics, 2002.
- [15] 王思聪, 王起飞, 陈晓西, 等. 基于曲面传感器的大孔径 1300 万像素手机镜头设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 902-907.
WANG Sicong, WANG Qifei, CHEN Xiaoxi, et al. Design of a large aperture 13 megapixel smartphone lens based on curved sensors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 902-907.
- [16] 武汉光为通信科技有限公司. 液冷光模块的多通道信号混合解耦方法及系统: 中国, CN202410762598.1[P]. 2024-06-13.
Wuhan Guangwei Communication Technology Co., Ltd. Multi-channel signal mixing and decoupling method and system for liquid-cooled optical modules: CN2024-10762598.1[P]. 2024-06-13.
- [17] 许嘉豪. 机场跑道异物检测系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
XU Jiahao. Design of airport runway foreign object detection system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023.