

日夜共焦被动无热化高变倍比变焦光学系统设计

余德晖

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月18日; 录用日期: 2025年5月24日; 发布日期: 2025年5月30日

摘要

日夜共焦变焦光学系统常用于安防等领域,但是由于光学材料在不同环境温度的变化导致各焦距位置改变,影响成像质量,给无热化变焦系统的设计带来较大困难,同时大视场角带来大的畸变以及轴外视场变化,增加了设计难度。同时优化日夜共焦,不同焦距不同温度下可见光近红外离焦范围很难满足实际使用。针对上述问题,本文从变焦系统设计条件出发,结合消色差和消热差方程,设计了一款可见光近红外20倍变倍比被动无热化连续变焦光学系统,系统F数恒定为4.8,焦距范围为6~120 mm,最大视场为 $64.69^{\circ}\sim 3.62^{\circ}$,波长范围0.48~0.85 μm ,适合1080P像元3.45 μm 的探测器。该系统总透镜数为18片国产球面镜,采用四组元正组补偿,总长225 mm。本设计采用全球面透镜成本低,变焦中实现日夜共焦且无需滤光片进行切换,轴向色差小,色焦移满足焦深范围。并对本系统进行被动无热化设计,变焦全程及其在 -40°C 到 60°C 的成像质量均达到要求。该光学系统在变焦过程中保持良好的成像性能,其公差设计符合当前加工工艺要求。系统架构经过优化设计,具有装配简便、调试容易等特点,适用于安防监控等多种应用场景。

关键词

变焦, 大视场, 日夜共焦, 被动无热化, 正组补偿

Design of a Day Night Confocal Passive Heatless High Zoom Ratio Zoom Optical System

Dehui She

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 18th, 2025; accepted: May 24th, 2025; published: May 30th, 2025

Abstract

The day and night confocal zoom optical system is often used in security and other fields, but due to the change of optical materials in different ambient temperatures, the position of each focal length changes, which affects the imaging quality, and brings great difficulties to the design of the athermalized zoom system. At the same time, the day and night confocal is optimized, and it is difficult to meet the practical use of visible and near-infrared defocus ranges at different focal lengths and temperatures. In order to solve the above problems, starting from the design conditions of the zoom system, combined with the achromatic and athermal equations, a visible near-infrared 20x zoom ratio passive athermalized continuous zoom optical system was designed, with a constant F-number of the system, a focal length range of 6~120 mm, a maximum field of view of $64.69^{\circ}\sim 3.62^{\circ}$, and a wavelength range of 0.48~0.85 μm , which is suitable for detectors with 1080P pixels of 3.45 μm . The total number of lenses in the system is 18 domestic spherical mirrors, which are compensated by four elements and have a total length of 225 mm. This design adopts a global lens with low cost, day and night confocal in zoom and no filter switching, small axial chromatic aberration, and color focus shift to meet the depth of focus range. The system is designed to be passive and heatless, and the zoom process and its imaging quality from -40°C to 60°C meet the requirements. The optical system maintains good imaging performance in the zoom process, and its tolerance design is in line with the current processing technology requirements. The system architecture is optimized and has the characteristics of simple assembly and easy debugging, which is suitable for various application scenarios such as security monitoring.

Keywords

Variable Focus, Large Field of View, Day Night Confocal, Passive Non-Thermal, Positive Group Compensation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大变倍比兼顾更大视场的安防变焦镜头，通过变化焦距实现对更多场景的应用[1]，为确保光学系统在宽温域环境下的稳定性能，需采用热补偿技术以抑制温度变化对成像质量的影响。在初始设计阶段，应结合无热化方法对光学元件进行优化，从而校正由热效应引起的像质退化，提升系统在极端温度条件下的适应性。本文采用光学被动式无热化方法，通过合理光学材料和机械材料搭配使用，使得光学系统在温度变化时自动调整焦距或焦平面，避免成像质量下降，确保光学系统在温度变化较大的环境中保持良好的光学系统性能。2020年，长春理工大学阎帅设计了一款大变倍比安防光学镜头加入非球面塑料镜片用于设计，塑料非球面成本相对玻璃非球面成本低，但是由于工艺上的问题，使得制造难度提高，但是，未对温差大的环境进行无热化设计，使得安防镜头无法适应复杂环境的需求。2021年，西安工业大学苗兆设计了一款使用机电主动式补偿技术实现安防监控系统在 -40°C 到 60°C 高低温成像，机电无热化依赖电子元件质量，且增加整体系统重量和成本，本文使用被动无热化设计，相对机电主动无热化设计，被动无热化设计通过修改变焦组元方式来改变如光焦度变化和光学材料等，被动无热化补偿方式成本较低，重量轻，可维护性好具有极大优势。2022年西安工业大学李世江设计了一款双波段变焦安防镜头。

视场角最大 60.34° ，同时加入两片非球面使得成本提高，由于是安防镜头，对于复杂环境如温差 100° 的环境没有进行无热化设计，本设计对比具有一定优势，且变倍比更大，李世江使用滤光片切换，加大成本和加工装调问题，本设计使用日夜共焦设计技术，无需滤光片，降低了成本，同时成像质量稳定。2022年，长春理工大学宋鹏飞设计了一款10倍变焦距安防镜头，采用国产球面透镜。短焦视场角为 25° ，相对本设计短焦视场角 64° 视场角小，且使用低熔点球面玻璃，加工难度较大，成本较本设计高，本设计均采用国产环保玻璃，易于加工，成本相对较低。2023年，福建师范大学吴羽婷设计了一款20倍的工作温度范围在 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 的变焦光学安防镜头，该设计采用光学被动半无热化设计采用机械调焦结构，缺点是无法在任意位置下均实现光学被动无热化，降低调焦频率，本设计采用被动无热化可以在任何工作温度范围内任何焦距都不受温度影响[2]-[4]。市面上安防镜头大多采用滤光片切换技术实现日夜共焦，白天使用红外截止滤光片，夜间使用探测器充分利用所有光线，加入全光谱光学玻璃，并且加入LED补光技术，以此提高夜间成像效果，本设计在设计之初就使用日夜共焦设计，无需加入滤光片，降低成本，成像质量仍然符合条件，实现日夜共焦，且本设计轴向色差均满足温漂和常温使用条件。因此针对上述目前监控安防镜头存在的视场窄，进光量少，无法日夜两用共焦同时变焦能力，无法适应复杂环境变化，以及现有设计接入滤光片和非球面镜，增加成本和不稳定性[5]-[10]。本文使用国产化球面镜进行设计，以及通过四组元正组补偿系统，同时设计的光学系统拥有更大的视场，更长的焦距，更高的分辨率，设计了一款短焦最大视场 64° 的变焦镜头，焦距范围 $6\sim 120\text{ mm}$ ，适应温度 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ ，变倍比20倍的日夜共焦国产化镜头，实现了日夜共焦且变焦的被动无热化变焦设计，进一步提高了安防监控系统对目标的识别能力，提升了系统的稳定性，凸轮变化曲线合理，且公差满足了现代加工的水平。

2. 基本原理

本设计使用机械补偿变焦形式进行大变倍比连续变焦设计，变焦光学系统在焦距范围内实现连续变焦且像面位置稳定的光学系统。如图1物象交换示意图所示，当变焦光学系统各个组元的光焦度不变时，通过移动组元改变间隔实现变焦功能，基本原理是物像交换实现像面稳定与像面补偿。物像交换原则：在变焦光学系统的运动组件分析中，存在以下关键特性：

a) 每个可移动光学组件均对应一对共轭物像位置，并由此生成两条相互关联的补偿轨迹；

b) 当组件处于这对共轭位置时，其轴向放大率呈现倒数关系，这一特性直接影响变焦过程的补偿机制设计。， $m_1 = 1/m_2$ ，则变倍比为 $\Gamma = m_1^2$ ，同时组份在共轭距不变上交换物面和像面。变焦过程中，组元之间的共轭之和改变量为零。根据高斯公式得到组元共轭距和组元倍率之间关系为：

$$L = f' \left(2 - \frac{1}{m} - m \right)$$

当倍率 $m = -1$ ；满足共轭距极小值：

$$L_{\min} = 4f'$$

如图1机械四组元正组补偿示意图，前固定组是把物体的像成在某一固定位置，变倍补偿组工作时可以使系统总焦距发生变化，补偿组通过相应移动使得不同焦距所成像保持在一个平面上，然后和后固定组将像成于无穷远处。变倍组和补偿组移动依靠凸轮机构控制，对于正组补偿微分变焦方程，式中 f_2' 表示的是变倍组的焦距， f_3' 表示的是补偿组的焦距。

$$dL = \frac{1-m_2^2}{m_2^2} f_2' dm_2 + \frac{1-m_3^2}{m_3^2} f_3' dm_3 = 0$$

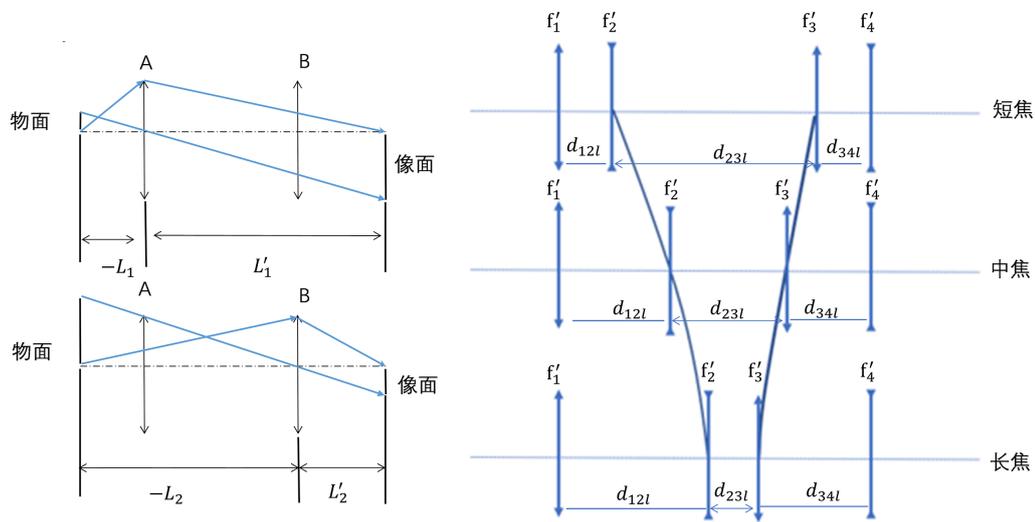


Figure 1. The image exchange diagram and the mechanical four groups of element positive group compensation diagramss

图 1. 物象交换示意图和机械四组元正组补偿示意图

求解上式先计算

$$m_{3l} = \frac{f'_3}{f'_2(1 - m_{2l}) - d_{23l} + f'_3}$$

求得变倍组倍率:

$$m_2 = \frac{1}{\frac{1}{m_{2l}} + \frac{q}{f'_2}}$$

系统总的变焦比:

$$\begin{cases} \Gamma_1 = \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_{31}} \\ \Gamma_2 = \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_{32}} \end{cases}$$

每有一个变倍组的移动量, 对应的总变焦比有两个。变倍组和补偿组一起运动, 直到要求的总变焦比为止。

变焦方程位移微分方程[11]-[13]:

$$(1 - m_2^2) dq + \frac{1 - m_3^2}{m_2^2} d\Delta = 0$$

本论文采用四组式变焦距物镜, 四组式机械补偿变焦距物镜式由变倍补偿组和后固定系统组成, 总分为前固定组, 变倍组, 补偿组, 后固定组。本文采用正组补偿式连续变焦光学系统, 其机械结构简单, 具有成像质量好变倍比高, 同时兼顾可靠性。

光学被动无热化的方法是通过合理的光学材料和机械材料组合实现无需额外调节机构即可消除热差的目标。其关键在于通过精准计算与选择合理材料搭配, 使光学系统在温度变化时自动调整焦距或焦平面, 从而避免成像质量下降, 确保光学系统在温度变化时维持稳定的成像质量。理论上, 光学系统在无

热化设计时应满足以下三个方程[14] [15]:

光焦度分配方程

$$\sum_{i=1}^n h_i \varphi_i = \varphi$$

消色差方程:

$$\frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial \lambda} = \frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^n h_i \theta_i \varphi_i = 0$$

消热差方程:

$$\frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial T} = \frac{1}{h_1^2} \sum_{i=1}^n h_i \rho_i \varphi_i = -\alpha_m L$$

其中 h_i 表示第一近轴光线在第 i 镜组上的入射高度, φ_i 表示第 i 镜组的光焦度, θ_i 表示第 i 镜组的消色差系数, ρ_i 表示第 i 镜组的消热差系数, α_m 表示材料本身的线性膨胀系数。

选择如下材料进行合理分配在实际光学设计过程中, 可采用 ZEMAX 软件中的阻尼最小二乘法等方法进行设计求解。本设计变焦系统在各个组元材料选取原则如下: 色散系数相对小的透镜如 H-FK95N 作为正组元中正透镜, 采用 H-ZK2 和 H-LAK53 进行胶合可以进行色散的矫正, 光学系统中的 H-LAK53 用于单色像差矫正, H-ZPK2A 阿贝数较大, 色散小, 用于胶合, 来消除多色光像差矫正; 同时在消热差材料选择上, 尽量选择热膨胀系数小的透镜, 选择如下表中热膨胀系数较小的材料, 根据上述公式, 选择如下材料, 前固定组需要保持较小热差, 选择 H-LAK8A, H-ZK2, H-LAK53 等材料, 热差小, 同时第一个球面透镜折射率大, 有助于光线传播能力大且离焦小, 后固定组根据上述公式采用, H-LAK10, H-ZK50, H-LAK4 等材料矫正残余像差作用。

根据上述计算, 可以得到四组元变焦系统中各个组元的光焦度分布以及色差热差分布, 选取合适初始结构带入 ZEMAX 软件中进行缩放优化, 同时兼顾可见光近红外波段, 采用日夜共焦, 波长分配同样权重, 同时根据上述公式可求出变焦光学系统各组元的色差系数和热差系数, 选择如表 1 中的材料, 反复迭代使得像质达到设计要求。

Table 1. Optical system spherical lens performance table

表 1. 光学系统球面透镜性能表

Material	Refractive Index				Relative Partial Dispersions			Thermal Expansion Coefficient
	$n_{0.48\mu\text{m}}$	$n_{0.58\mu\text{m}}$	$n_{0.65\mu\text{m}}$	$n_{0.85\mu\text{m}}$	$P_{g,F}$	$P_{d,C}$	$P_{C,s}$	$T / \times 10^{-7} \text{ K}$
H-K6	1.517	1.511	1.509	1.504	0.543	0.304	0.545	85
H-LAK8A	1.729	1.720	1.716	1.708	0.551	0.303	0.532	53
H-FK95N	1.441	1.438	1.436	1.434	0.534	0.307	0.550	144
H-LAK53A	1.765	1.755	1.751	1.743	0.548	0.303	0.533	61
H-ZBAF50	1.668	1.658	1.655	1.648	0.558	0.300	0.518	75
H-LAK4	1.647	1.640	1.637	1.631	0.537	0.307	0.559	60
H-LAF53	1.754	1.743	1.739	1.731	0.553	0.302	0.525	55
H-ZF52AGT	1.872	1.847	1.836	1.820	0.620	0.286	0.458	84
H-ZK50GT	1.615	1.607	1.604	1.598	0.548	0.303	0.528	68

续表

H-ZK50	1.615	1.607	1.604	1.598	0.548	0.303	0.528	68
H-ZK2	1.590	1.583	1.580	1.575	0.543	0.305	0.541	61
ZF7L	1.828	1.805	1.796	1.782	0.610	0.287	0.458	79
H-BAF3	1.587	1.579	1.576	1.571	0.553	0.302	0.524	67
H-LAK10	1.659	1.651	1.648	1.641	0.548	0.303	0.530	71
H-LAK53	1.765	1.755	1.751	1.743	0.548	0.303	0.534	57
H-ZLAF55D	1.849	1.835	1.830	1.819	0.564	0.298	0.507	64
H-ZPK2A	1.609	1.603	1.600	1.595	0.541	0.305	0.545	93

3. 设计实例

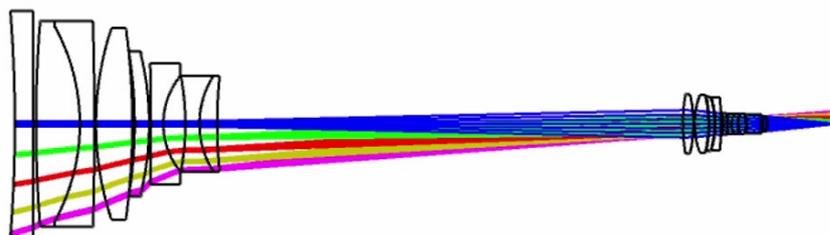
本设计选用 486 nm~656 nm 和 850 nm，像元数为 1920*1080，像元尺寸为 3.45 μm ，对角线长度 3.8 mm 的 CMOS 面阵探测器，具体设计指标如下表 2 所示。

Table 2. Design index
表 2. 设计指标

设计指标	
系统 F 数	4.8
系统焦距	6~120 mm
视场角	64.69°~3.62°
工作波段	486 nm~656 nm, 850 nm
总长	225 mm
工作温度范围	-40°C~60°C

光学系统前固定组承担光焦度，采用四片式结构，采用为 H-LAK8A 材料，H-ZK2 材料，H-LAK53 和 H-FK95N 材料，用于平衡色差和热差，变倍组行程大，同样采用四片式结构同时使用 H-ZPK2A 和 ZF7L 进行胶合，具有正负光焦度，保障变倍组具有小色差；补偿组采用 H-BAF3 和 H-FK95N 并采用两个弯月形透镜进行补偿；光阑后的后固定组采用六片元件，使用 H-LAK53 与 H-ZK50 进行胶合，最后留有大于 15 mm 的后截距。

采用 ZEMAX 软件对上述光学系统进行优化分析。如下图 2 为日夜共焦被动无热化高变倍比变焦光学系统优化示意图。光机采用铝合金材料。总长 225 mm，单透镜最大口径 62 mm，双胶合透镜最大口径小于 56 mm。



(a)

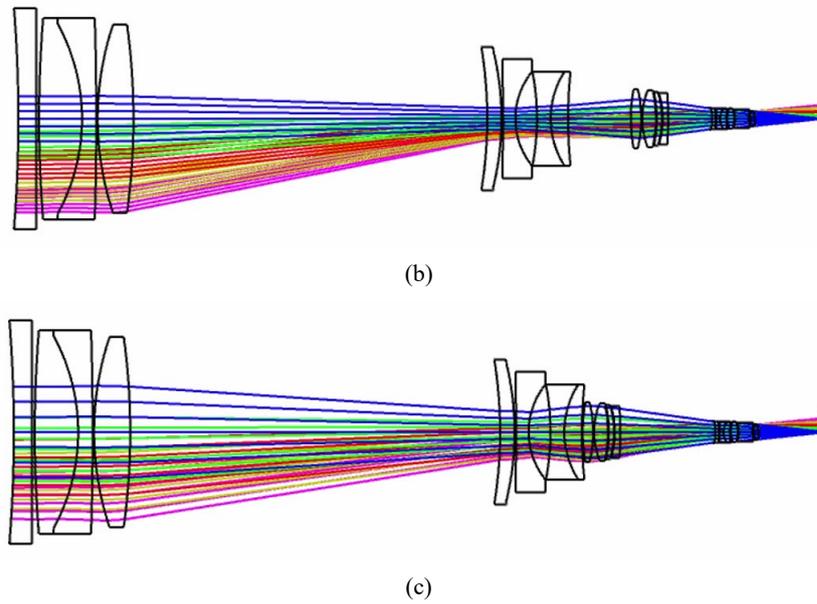


Figure 2. Optimization results of 0.48–0.85 μm day and night confocal continuous zoom optical system (a) focal length 6 mm (b) focal length 60 mm (c) focal length 120 mm
图 2. 0.48–0.85 μm 日夜共焦连续变焦光学系统优化结果图(a) 焦距 6 mm (b) 焦距 60 mm (c) 焦距 120 mm

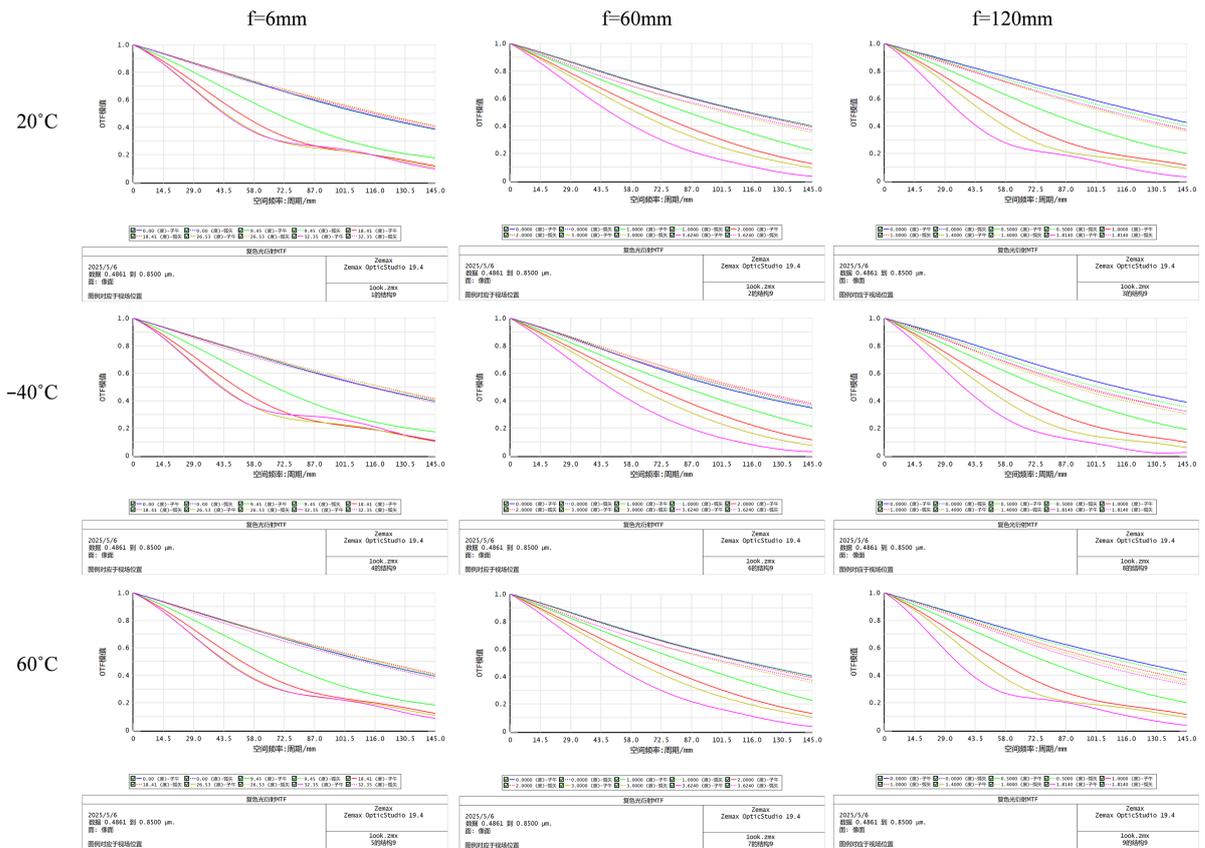


Figure 3. MTF of the optical system of the security lens at 20°C, -40°C, 60°C and different focal lengths of 0.48 μm –0.85 μm spectral line range
图 3. 安防镜头光学系统在 20°C、-40°C、60°C 且不同焦距下 0.48 μm –0.85 μm 谱线范围的 MTF

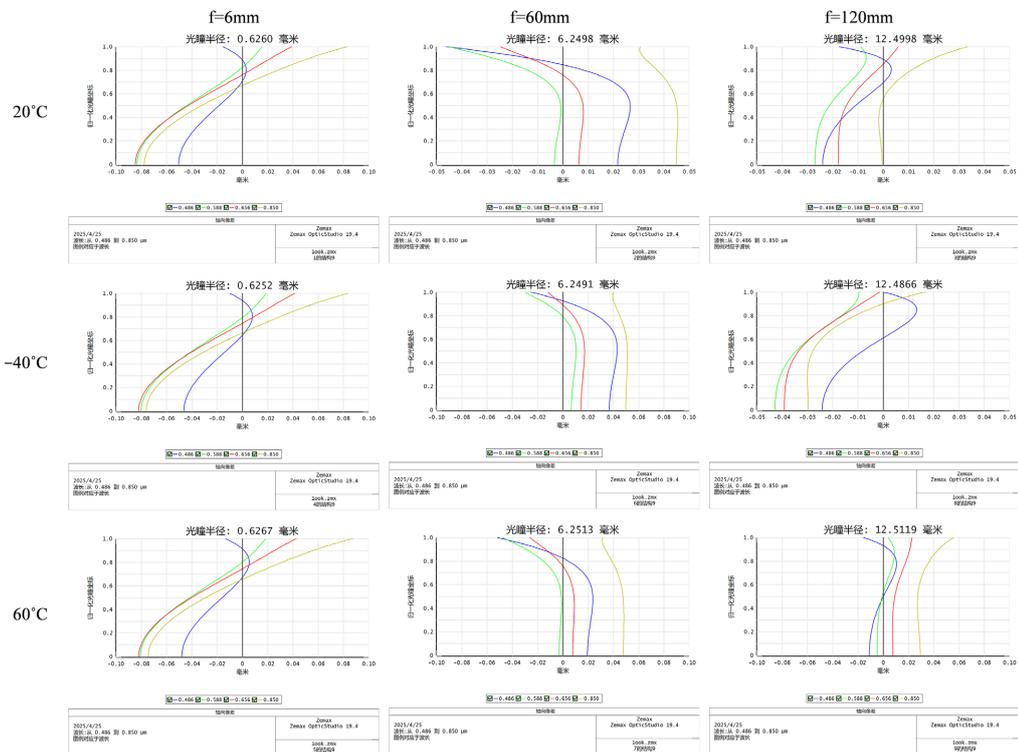


Figure 4. The axial color difference of the security lens optical system at 20°C and -40°C and 60°C with different focal lengths
图 4. 安防镜头光学系统在 20°C 和 -40°C、60°C 下不同焦距下的轴向色差

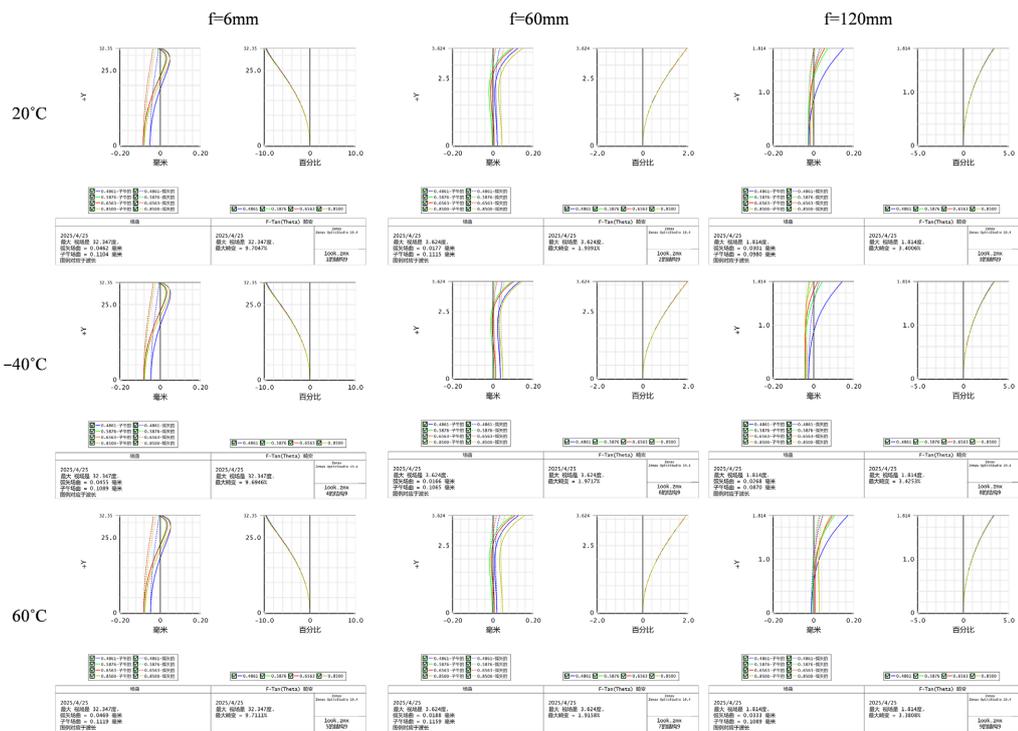


Figure 5. Field curvature and distortion maps of the security lens optical system at 20°C and -40°C and 60°C with different focal lengths
图 5. 安防镜头光学系统在 20°C 和 -40°C、60°C 下不同焦距下的场曲和畸变图

对上述光学系统不同温度,不同视场的 MTF 如图 3 所示,所设计光学系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内,短焦 $f = 6\text{ mm}$ 处的 MTF 传递函数均大于 0.1;中焦的 MTF 传递函数分布较好,整体分布较均匀;长焦处 MTF 由于视场变小,变倍组和补偿组较为靠近,成像满足使用需求,整体而言,在长中短焦距不同位置,空间频率 145 lp/mm 内均具有较好的传函分布,对于温度范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$,光学系统表现出的成像质量满足使用需求。光学系统各个焦距的位置的色焦移均在焦深($54\text{ }\mu\text{m}$)范围内,且轴上波前像差满足小于波长的四分之一,表明变焦光学系统具有较好的成像质量,也证明上述变焦镜头设计方法的可行性。如图 4,各个波长在不同温度下,不同焦距下的轴向色差均小于 0.1 mm ,短焦的轴向色差小于 0.1 mm ,中焦轴向色差小于 0.05 mm ,长焦下的轴向色差小于 0.03 mm ,对于日夜共焦的无热化变焦镜头,符合使用标准,且系统无需加入滤光片来进行切换即可实现日夜共焦需求,大大降低生产成本并且提高的使用寿命。图 5 所示,光学系统在不同温度下,短焦,中焦和长焦下的场曲和畸变图,短焦处的畸变小于 10% ,TV 畸变小于 4% ,中焦畸变全程小于 2% ,长焦畸变都全程小于 4% ,对于大视场的高变倍比变焦镜头,符合使用标准。使用 zemax 对上述变焦镜头进行连续凸轮曲线优化设计,得到图 6 优化完成的变焦系统凸轮曲线,变焦全程平滑流畅,不存在明显无拐点,变焦过程成像质量稳定。

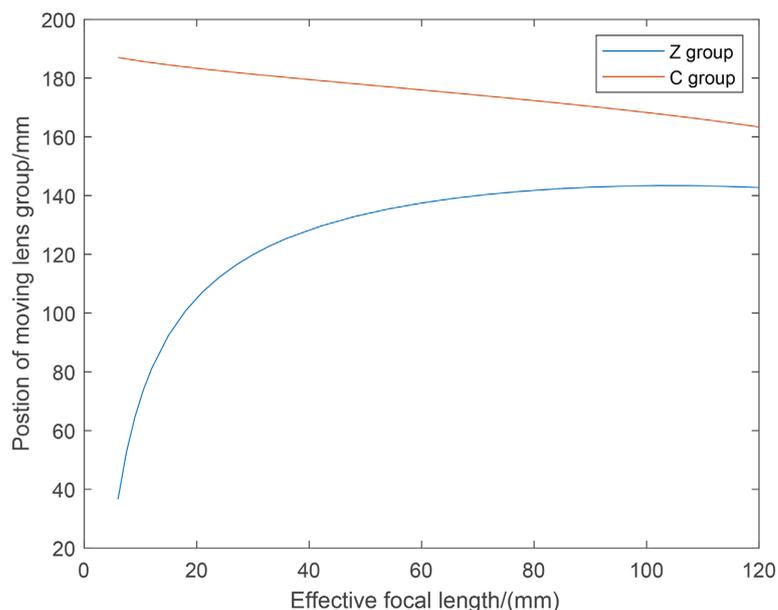


Figure 6. Zoom system CAM curve

图 6. 变焦系统凸轮曲线

采用 ZEMAX 光学设计软件的公差分析模块,对系统在 586 nm 工作波长下的制造及装配误差进行仿真评估。根据光学加工行业标准,设定如下公差参数:光学元件面形精度:光圈偏差 ≤ 2 ,局部不规则度 ≤ 0.3 ;几何尺寸公差:中心厚度偏差 $\pm 0.02\text{ mm}$;对准误差:元件表面偏心 $\leq 0.02\text{ mm}$,装配偏心 $\leq 0.02\text{ mm}$;材料特性公差:折射率偏差 ± 0.002 ,阿贝数波动范围 $\pm 1\%$ 。该公差分配方案综合考虑了现代光学加工工艺水平,确保系统在实际制造中的可实现性。

进行公差分析时选择灵敏度分析,评价方式选择衍射 MTF 平均评价,对系统进行 200 次蒙特卡罗分析。通过反复调整系统公差范围,最终公差结果对变焦安防镜头在短焦端和长焦端的 MTF 的误差范围的影响分别如表 3 和表 4 所示,MTF 估计值能达到 MTF 标准值的 70% ,则说明系统公差对 MTF 值可以更好的控制,制定的公差在合理的范围内,满足光学加工和装调工艺的要求。

Table 3. Standard deviation of MTF at the short focal end
表 3. 短焦端的 MTF 标准偏差

评判标准	数值
MTF 标准值	0.27606908
MTF 估计值	0.22520392
估计 MTF 误差	0.05086516

Table 4. Standard deviation of MTF at the long focal end
表 4. 长焦端的 MTF 标准偏差

评判标准	数值
MTF 标准值	0.27998790
MTF 估计值	0.16810499
估计 MTF 误差	0.11188291

4. 结论

设计了一款日夜共焦高变倍比无热化变焦安防镜头光学系统，基于高分辨率探测器，采用四组元正组补偿系统，恒定 F 数，被动无热化的设计思路和方法，实现了安防光学系统焦距在 6~120 mm 连续变焦且日夜共焦的被动无热化光学系统。口径适中，变倍比高，成像质量良好，国产化球面透镜，无需滤光片调焦等，可广泛应用于安防系统中。

参考文献

- [1] 李世江. 8mm-32mm 双波段变焦安防镜头设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [2] 吴羽婷. 紧凑型 20 倍高性能变焦光学系统设计[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2023.
- [3] 阎帅. 大变倍比安防镜头光学系统设计[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [4] 苗兆. 大变倍安防变焦监控镜头的光学设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [5] 闫阿奇, 崔雯, 董森. 大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 141-148.
- [6] 曲锐, 郭惠楠, 曹剑中, 等. 可见-近红外无热化连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 249-255.
- [7] 费穷, 刘丽花, 赵代兵, 等. 大光圈日夜共焦无热化变焦光学系统设计[J]. 新技术新工艺, 2025, 445(1): 62-69.
- [8] 钱楷, 刘长进, 张天安, 等. 超大光圈广角日夜共焦监控镜头设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2022, 68(5): 567-573.
- [9] 杨欢丽. 变焦安防、日夜共焦式光学系统设计及评价[D]: [硕士学位论文]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [10] Kong, X.D., Mei, C., Qu, R. and Guo, X.Y. (2025) Design of an Athermal Zoom Optical System for Space Station Applications. *Applied Optics*, **64**, 1653-1659. <https://doi.org/10.1364/AO.546022>
- [11] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [12] 曲锐, 张洪伟, 郭惠楠, 等. 可见-短波红外宽波段 30 倍连续变焦光学系统设计(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(10): 65-71.
- [13] 王春艳, 王志坚, 周庆才. 应用动态光学理论求解变焦光学系统补偿组凸轮曲线[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 891-894.
- [14] 石佳. 光学系统热分析及无热化镜头优化设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [15] 郭欣瑜. 面向空间站应用的无热化连续变焦光学系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2024.