

文章编号 1004-924X(2025)11-1713-09

多运动组共轨型紧凑变焦光学系统

谢佳儀¹, 王治乐^{1*}, 于东辉¹, 王泽奇², 黄莉雯¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

动态光学成像与测量国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:传统变焦系统广泛运用的机械补偿型变焦结构在一定程度上存在总长较大、结构笨重的问题,难以符合小型化设备对光学系统体积和质量的严格约束。为了解决上述问题,讨论了多运动组变焦系统稳定成像原理,提出了一种基于多运动组共轨型结构的紧凑变焦光学系统模型,以五组元变焦系统为设计载体,详细阐述了从设计指标制定到高斯解分析再到优化方案的完整设计流程,并通过性能评估验证了设计结果的有效性。设计结果表明:该系统采用3片玻璃透镜与7片塑料透镜组合,用69 mm总长实现了23~69 mm三倍连续变焦,其中 F 数为2.4~4.5,像高为8.49 mm,工作波段为435~650 nm,系统质量控制在30 g以内,全视场全焦段成像质量优良,变焦曲线平滑无拐点。该多运动组共轨型紧凑变焦光学系统设计模型在固定行程条件下扩大了单个运动组元的有效移动范围,在压缩变焦系统轴向尺寸的同时,保障了连续变焦过程中的像质稳定性,为实现变焦光学系统的紧凑型设计目标提供了有效路径。此外,通过透镜材料玻塑混合配置方案实现了系统的轻量化。

关键词: 光学设计; 连续变焦; 多运动组; 紧凑型光学系统

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253311. 1713

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253311. 1713

Compact zoom optical system with multiple moving groups sharing travel path

XIE Jiayi¹, WANG Zhile^{1*}, YU Donghui¹, WANG Zeqi², HUANG Liwen¹

(1. Research Center for Space Optical Engineering, School of Astronautics,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Key Laboratory of Dynamic Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangzhile@hit.edu.cn

Abstract: Traditional zoom system widely use mechanically compensated zoom structures, which suffer from excessive total track length and bulky structures. These limitations make it difficult for them to meet the strict constraints on volume and weight imposed by miniaturized devices. To address the aforementioned issues, this study discusses the principle of stable imaging in multiple moving groups zoom systems and proposes a compact zoom optical system model based on multiple moving groups sharing travel path.

收稿日期: 2025-04-14; 修订日期: 2025-05-07.

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 20220001077001)

Taking a five-group zoom system as a design case, the complete design process from the formulation of design specifications to Gaussian structure analysis and then to optimization solutions is elaborated in detail. The effectiveness of the design results is verified through performance evaluation. The design results show that the system employs three glass lenses and seven plastic lenses, achieving a $3\times$ continuous zoom from 23 mm to 69 mm with a total track length of 69 mm. The system has an F -number range of 2.4~4.5, an image height of 8.49 mm, and a working spectrum covering 435~650 nm, and the system mass is controlled below 30 g, while maintaining excellent imaging quality across the entire field of view and zoom range. The zoom curves exhibit smooth transitions without inflection points. The proposed compact zoom optical system model based on multiple moving groups sharing travel path effectively expands the effective motion range of individual moving groups under limited mechanical travel. While reducing the axial length of the zoom system, it ensures imaging quality stability during continuous zooming, providing an effective approach to achieve the goals of compactness design in zoom optical systems. Additionally, by adopting a glass-plastic hybrid configuration for the lens material, the lightweight target of the system is achieved.

Key words: optical design; continuous zoom; multiple moving groups; compact optical system

1 引 言

随着遥控无人机、智能机器人及头戴式显示器等技术的快速发展,光学系统在集成度与成像性能的平衡方面面临更严苛的挑战。例如,无人机载荷质量直接影响飞行器续航时间、航程、机动性等关键性能,头戴式显示器超重易引发颈部疲劳降低佩戴舒适度,智能机器人视觉模块的结构特性影响其灵活程度^[1-3]。因此,在空间受限的应用场景中,紧凑型与轻量化设计成为光学系统的关键指标要求。在此背景下,变焦光学系统凭借其动态调节能力和环境稳定性,逐渐发展为现代智能装备的核心组件^[4-6]。然而,当前广泛运用的机械补偿型变焦结构通常在一定程度上存在总长较大、结构笨重的局限性,难以满足小型化设备对光学系统体积和质量的严格约束^[7]。

研究人员已针对小型化设备的变焦需求进行了一些探索。数码变焦通过裁剪和插值放大图像模拟光学变焦,无法展示原始未捕获的高频细节^[8]。多摄像头切换的混合变焦可通过优化算法缓解部分画质损失,但效果仍受限于硬件差异^[9]。新型可调光焦度器件为解决轻小型化难题提供了新思路,这类器件通过改变透镜折射率、表面曲率或介质上电润湿流体接触角

来实现光焦度调节,显著减少了机械移动部件的需求^[10-12]。其中,Alvarez 透镜与液体透镜具有独特的变焦机制。然而,自由曲面引起的非对称像差难以通过其他透镜校正,设计难度较大^[13-14],液体透镜则存在易受温度、振动和重力影响的情况^[15]。

近年来,多组元移动变焦系统的研究取得了一定进展。SUN 等为 1 020 万像素的 APS-C 型数码单反提供了高质量的变焦镜头,其变焦范围为 17~51 mm,最大总长度为 175 mm^[16]。ZHANG 等基于四组元稳定成像原理构建的 40 倍变焦光学系统实现了高变倍比特性,但由于使用了 16 片透镜,结构复杂度较高^[17]。LI 等运用矩阵光学结合粒子群优化算法设计的五组高变倍比光学系统具有良好性能,但变焦曲线仍存在拐点^[18]。多组元移动变焦光学系统面临的问题主要表现为严苛技术指标要求下的像差校正复杂性、整体长度优化难度及变焦曲线平滑性等。在空间受限应用场景的驱动下,解决问题成为紧凑型轻量化光学系统技术迭代的关键。

本文讨论了多运动组变焦系统稳定成像原理,提出了一种基于多运动组共轨型结构的紧凑变焦光学系统模型,以五组元变焦系统为设计载体,详细阐述了从设计指标制定到高斯解分析再

到优化方案的完整设计流程,并通过性能评估验证了设计结果的有效性。

2 原 理

多运动组变焦系统的稳定成像依赖于各组元光学特性的精确设计以及运动规律的严

$$\begin{cases} \Phi = \frac{1}{f'} = \frac{\tan U'_{k-1}}{h_0} = \varphi_0 + \frac{h_1}{h_0} \varphi_1 + \frac{h_2}{h_0} \varphi_2 + \dots + \frac{h_{k-1}}{h_0} \varphi_{k-1} \\ \Phi^* = \frac{1}{f^*} = \frac{\tan U'^*_{k-1}}{h_0^*} = \varphi_0 + \frac{h_1^*}{h_0^*} \varphi_1 + \frac{h_2^*}{h_0^*} \varphi_2 + \dots + \frac{h_{k-1}^*}{h_0^*} \varphi_{k-1} \end{cases} \quad (1)$$

此时,系统的变倍比 Γ 为:

$$\Gamma = \frac{\Phi^*}{\Phi} = \frac{h_0(\varphi_0 h_0^* + \varphi_1 h_1^* + \varphi_2 h_2^* + \dots + \varphi_{k-1} h_{k-1}^*)}{h_0^*(\varphi_0 h_0 + \varphi_1 h_1 + \varphi_2 h_2 + \dots + \varphi_{k-1} h_{k-1})} \quad (2)$$

式中: U'_{k-1}, U'^*_{k-1} 分别为变焦前后最后一个光组 G_{k-1} 出射光线与光轴的夹角, φ_i 为第 $i+1$ 个组元的光焦度, h_i, h_i^* 为变焦前后光线在第 $i+1$ 个组元上的投射高度, i 取 $0, 1, 2, \dots, k-1$ 。

式(2)限定了系统的设计边界,该式说明多组元变焦光学系统的变焦能力不仅与各组元光焦度相关,还受光线在各组元上的投射高度的影响。 h_0, h_0^* 取决于光学系统的入瞳直径,通过多个轴向可移动组元的精密配合改变 $h_1, h_2, \dots, h_{k-1}$, 系统可实现焦距连续变化。

当首组元 G_0 保持固定时,该组份为系统提供稳定的成像基础,后续 $k-1$ 个运动组 $G_1, G_2, \dots, G_{k-1}$ 独立移动,以前固定组 G_0 为基准进行位移调整光路。这种“首组固定-其余组元全动”型变焦结构在维持变焦过程光学稳定性的同时,保证了变焦潜力。图1为多运动组变焦光学系统示意图。

这种包含 $k-1$ 个相邻运动组元的变焦光学系统,其变焦方程可以表述为:

$$\sum_i \frac{1-m_i^2}{m_i^2} f'_i dm_i = 0, \quad (3)$$

式中: f'_i 为移动组元 G_i 的焦距, m_i 为移动组元 G_i 的放大倍率, i 取 $1, 2, \dots, k-1$ 。

格控制。本文分析了多运动组变焦系统的稳定成像原理,建立多运动组变焦系统的数学模型。

对于由 k 个组元 $G_0, G_1, G_2, \dots, G_{k-1}$ 构成的多组元光学系统,当光线平行于光轴入射时,该光学系统的总光焦度在变焦前后由 Φ 变为 Φ^* ,其表达式为:

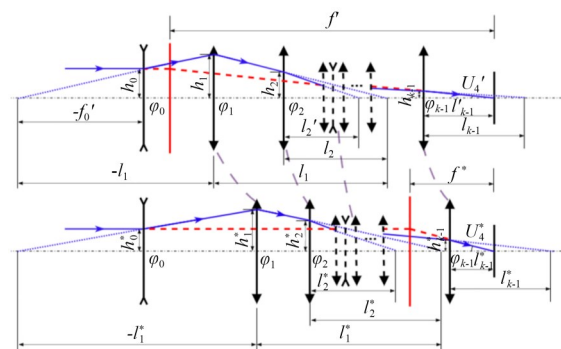


图1 多运动组变焦光学系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multiple moving groups zoom optical system

高斯公式如下:

$$\frac{1}{l'_i} - \frac{1}{l_i} = \frac{1}{f'_i} \quad (4)$$

将各组元物距 l_i 和像距 l'_i 分别同乘式(4)两侧有:

$$l_i = f'_i \left(\frac{1}{m_i} - 1 \right), \quad (5)$$

$$l'_i = f'_i (1 - m_i). \quad (6)$$

因此,每一组元的共轭距 L_i 为:

$$L_i = l'_i - l_i = f'_i \left(2 - \frac{1}{m_i} - m_i \right). \quad (7)$$

系统变焦前总长 L 的表达式为:

$$L = f'_0 + \sum_{i=1}^{k-1} L_i = f'_0 + \sum_{i=1}^{k-1} f'_i \left(2 - \frac{1}{m_i} - m_i \right). \quad (8)$$

同理,系统变焦后总长 L^* 的表达式为:

$$L^* = f'_0 + \sum_{i=1}^{k-1} L_i^* = f'_0 + \sum_{i=1}^{k-1} f'_i \left(2 - \frac{1}{m_i^*} - m_i^* \right). \quad (9)$$

通过约束 L 与 L^* 相等可构建系统总长与各组元焦距及放大倍率的解析关系,通过精准分配多运动组光焦度与放大倍率可实现连续变焦过程像面位置稳定,同时保证结构的紧凑性。

3 多运动组共轨型变焦系统设计

3.1 设计指标

在探测器选型方面,考虑到传统工业传感器体积较大的问题,为满足小型化便捷式应用场景的需求,光学系统选择旗舰型手机的 1 200 万像素 1 英寸大底 CMOS 传感器。该传感器对角线尺寸为 16.38 mm,为实现全像面照度均匀性,以直径 16.98 mm 的最大成像圆定义视场范围。光学系统的工作波段覆盖 435~650 nm 的可见光波段,其中,短波端设置 435 nm 截止波长以避免紫边效应。焦距支持 23~69 mm 三倍连续光学变焦,满足从广角到中长焦的多场景拍摄需求。受镜头模组装配限制,光学后截距必须大于 1 mm 以预留必要的间隙余量。针对不同焦段变化光圈数, F 数为 2.4 至 4.5。系统的总长度不超过 69 mm,光学透镜总质量控制在 30 g 以内,以满足空间受限应用场景的紧凑型轻量化需求。表 1 列出了多运动组共轨型变焦光学系统的关键设计指标。

3.2 变焦系统高斯解分析

为验证多运动组共轨型变焦系统设计方案的可行性,基于高斯光学理论对系统进行理想化建模分析。

考虑到长焦镜头存在像差校正难度大的固有特性,本设计在长焦端采用大 F 数值提升成像

表 1 变焦光学系统的设计指标

Tab. 1 Design index of the zoom optical system

Parameters	Value
F-number	2.4—4.5
Image height	8.49 mm
Working spectrum	435—650 nm
Zoom ratio	3
Effective focal length	23—69 mm
Total track length	≤ 69 mm
Mass	< 30 g
Back focal length	≥ 1 mm

质量,而短焦端匹配小 F 数值满足通光需求。由于需要通过调整光阑与光阑后续组元的相对位置来实现系统在不同焦段的 F 数变化,因此,系统采用光阑前置架构,所有移动组元均配置于光阑后方。这种布局还可有效控制透镜口径,进而实现系统整体的轻小型设计目标。

为提高有限机械行程下运动组元的效能,本设计中的多个运动组采用共轨方案,其核心特征包括:所有运动组元沿同一方向独立移动并使用公共行程;变焦过程全局像面保持稳定;各运动组间距满足共轨约束条件。

这里以五组元变焦系统为例说明多运动组共轨方案,要求五组元变焦系统的首组 G_0 为前固定组,其余 4 个组元 G_1, G_2, G_3, G_4 为运动组。由长焦向短焦变化的过程中,所有运动组沿光轴正方向独立移动并使用公共行程,则此时各运动组间距 $d_{01}, d_{12}, d_{23}, d_{34}$ 满足共轨约束条件:

$$\begin{cases} d_{01} < d_{01}^* < d_{01}^{**} \\ d_{01} + d_{12} < d_{01}^* + d_{12}^* < d_{01}^{**} + d_{12}^{**} \\ d_{01} + d_{12} + d_{23} < d_{01}^* + d_{12}^* + d_{23}^* < d_{01}^{**} + d_{12}^{**} + d_{23}^{**} \\ d_{01} + d_{12} + d_{23} + d_{34} < d_{01}^* + d_{12}^* + d_{23}^* + d_{34}^* < d_{01}^{**} + d_{12}^{**} + d_{23}^{**} + d_{34}^{**} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)约束了各运动组元的移动范围,也是多运动组共轨型变焦系统的变焦曲线无拐点要求。在此基础上,结合式(2)、式(3)对各组元的光焦度进行初步分配,框定各运动组在变焦过程中的运动范围;进一步运用式(8)、式(9)控制变焦过程全局像面保持稳定,并持续优化调整各组

元光焦度与放大倍率,直到系统总长满足紧凑性要求;最终,得到一种包括 4 个运动组的共轨型变焦系统高斯结构如图 2 所示。其中,前固定组 G_0 负光焦度配置实现了大视场光线收集功能,末端组元 G_4 采用正光焦度有利于系统压缩总长,中间组元以正负光焦度交替形式配合首末组元光

焦度,整个系统呈现“负-正-正-负-正”的光焦度分布结构形式。

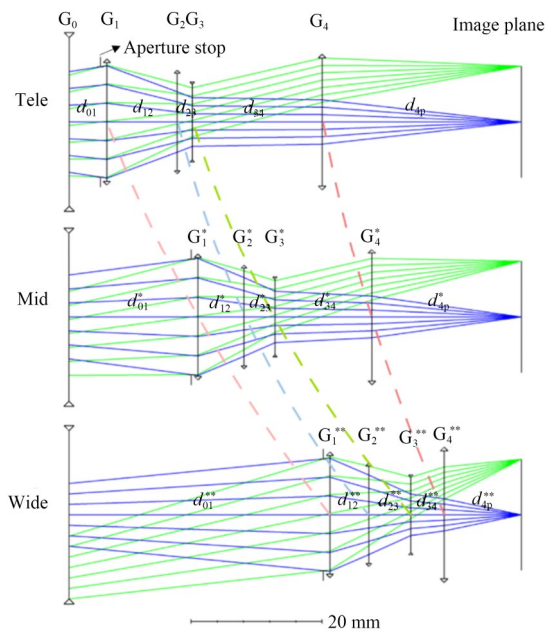


图2 变焦系统高斯结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of Gaussian structure for zoom system

表2和表3列出了基于多运动组共轨型紧凑变焦光学系统的高斯结构的参数配置。

表2 高斯结构各组元焦距	
Tab. 2 Focal lengths of groups in Gaussian structure	
Group	Focal length/mm
G_0	-49.69
G_1	16.37
G_2	264.34
G_3	-10.09
G_4	35.97

表 3 高斯结构各组元间隔					
Tab. 3 Component spacing in Gaussian structure(mm)					
Component spacing	d_{01}	d_{12}	d_{23}	d_{34}	d_{4p}
Long focal length	4.75	10.72	2.29	19.82	30.41
Middle focal length	18.67	7.03	4.73	14.78	22.79
Short focal length	38.79	5.94	6.41	5.09	11.77

3.3 优化方案

在将高斯结构转换为实体架构的过程中,透镜材料采用玻塑混合配置方案。玻璃材料的高折射率或低色散特性为系统提供优异的像差校正能力,塑料材料的低密度特性则有助于系统实现轻量化。前固定组 G_0 的首片透镜作为整个光学系统的首片透镜,选用高透过率的玻璃材料。4个移动组 G_1, G_2, G_3, G_4 协同承担变焦、像面位移补偿及像差校正功能。考虑到塑料非球面镜片易于成型、可批量生产的特性,在系统中适当引入偶次非球面以提升整体成像性能。优化过程中,需要避免非球面发生局部反曲现象,确保全部镜片符合模压工艺要求。为了降低制造和装调难度,严格控制各透镜的最小厚度与直径的比值大于0.1以保证机械强度。特别注意的是,各运动组元之间要保持安全间距,避免碰撞,规定最小空气间隔为0.4 mm。

4 系统性能评估

多运动组共轨型紧凑变焦光学系统结构示意图如图3所示。最终变焦系统采用3片玻璃透镜与7片塑料透镜完成设计,使用的玻璃材料包括 H-FK95N, H-ZF72A, H-ZLAF4LB 三种,塑料材料包括 K26R, OKP-700, EP8000, APL5514, PMMA 五种。该系统仅用 69 mm 总长便实现 23~69 mm 三倍连续变焦,其中 F 数为

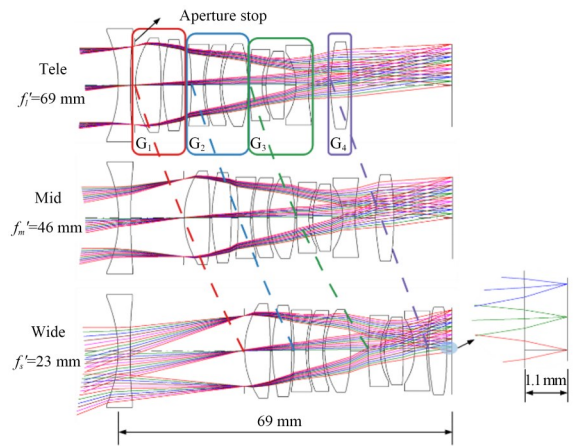


图3 多运动组共轨型紧凑变焦光学系统结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of compact zoom optical system with multiple moving groups sharing travel path

2.4~4.5, 像高为 8.49 mm, 工作波段为 435~650 nm, 全部透镜总质量为 29.6 g, 最短后截距为 1.1 mm。

变焦过程中, 移动组元的轨迹与高斯结构吻合, 各运动组元的共轨情况如图 4 所示。具体而言, 在长焦向短焦的变化过程中, 前固定组 G_0 与像面保持固定, 4 个移动组 G_1, G_2, G_3, G_4 逐渐远离前固定组 G_0 而渐近像面, 第一移动组 G_1 和第二移动组 G_2 逐渐靠近, 第三移动组 G_3 和第四移动组 G_4 逐渐靠近。孔径光阑随第一移动组 G_1 共同运动, 全焦段内孔径光阑的直径上限为 16.24 mm。

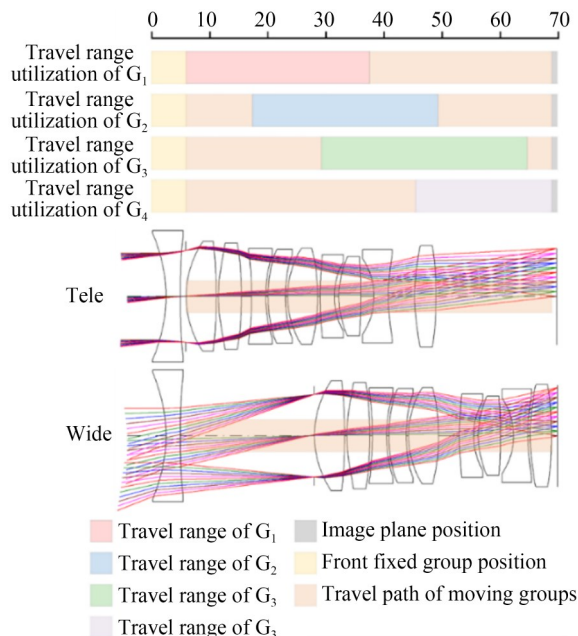
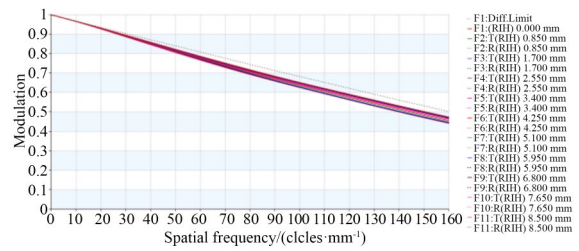


图 4 运动组元共轨情况

Fig. 4 Condition of moving groups sharing travel path

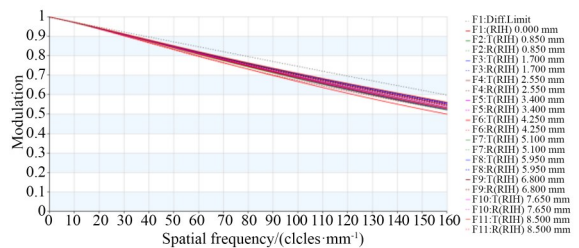
多运动组共轨型方案解除了传统机械补偿结构中变倍组与补偿组的运动耦合关系, 在固定行程条件下扩大了单个运动组的有效移动范围, 支持更灵活的运动轨迹规划, 以实现更紧凑的光学变焦结构。

变焦系统的调制传递函数如图 5 所示, 在考察空间频率 160 lp/mm 处, 全焦段全视场的 MTF 值均大于 0.3。其畸变情况如图 6 所示, 长、中焦端畸变绝对值小于 2%, 短焦端畸变绝对值小于 5%。图 7 显示了系统长、中、短焦时的相



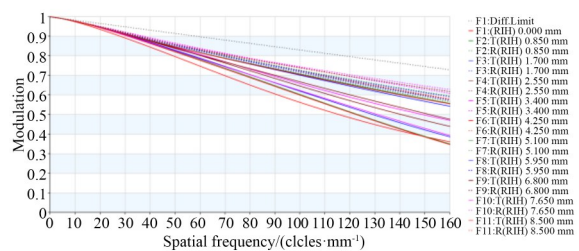
(a) 长焦端: $f'_l=69$ mm, F 数 4.5

(a) Tele position: $f'_l=69$ mm, F number 4.5



(b) 中焦端: $f'_m=46$ mm, F 数 3.6

(b) Mid position: $f'_m=46$ mm, F number 3.6



(c) 短焦端: $f'_s=23$ mm, F 数 2.4

(c) Wide position: $f'_s=23$ mm, F number 2.4

图 5 变焦光学系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of zoom optical system

对照度随视场变化情况。可以看出, 全焦段边缘视场的相对照度高于 70%。变焦曲线如图 8 所示, 纵坐标代表各组元相对于 G_0 组元第一片透镜前表面中心处的位置, 变焦曲线平滑无拐点与断点, 利于凸轮加工。

基于当前的加工能力和装调水平, 运用蒙特卡洛模拟法对多运动组共轨型紧凑变焦光学系统进行公差分析。依据表 4 中的公差分配条件, 经过 2 000 次模拟计算后得到, 在空间频率 160 lp/mm 处, 光学系统 MTF 值优于 0.15 的概率为 80%, 这表明小型化设计后的光学系统在合理的公差范围内具备良好的工程可实现性。

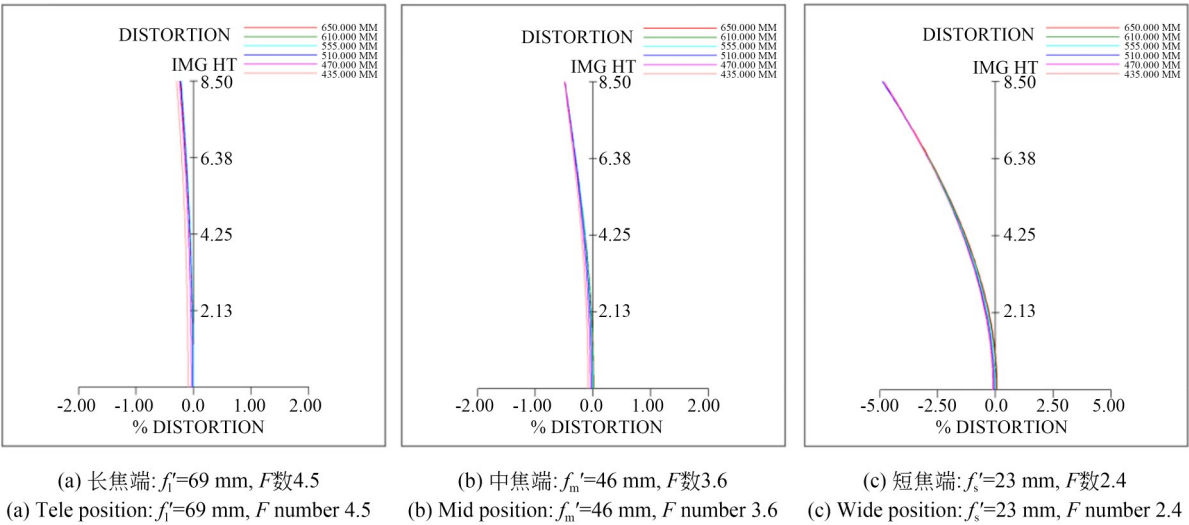


图 6 变焦光学系统的畸变曲线

Fig. 6 Distortion curves of zoom optical system

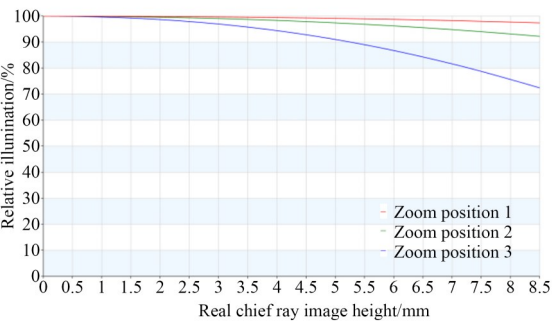


图 7 变焦系统的相对照度

Fig. 7 Relative illumination of zoom optical system

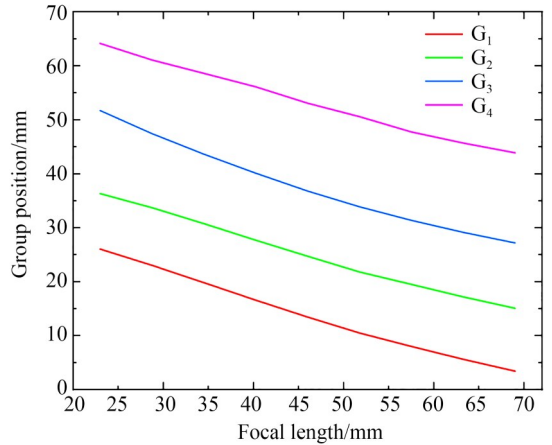


图 8 变焦曲线

Fig. 8 Zoom curves

表 4 变焦光学系统的公差分配	
Tab. 4 Tolerance limits of proposed zoom optical system	
Tolerance type	Tolerance range
Radius of lens surface/fringe	± 3
Thickness of lens/mm	± 0.02
Surface decenter/mm	± 0.01
Surface tilt/($^{\circ}$)	± 60
Element decenter/mm	± 0.02
Element tilt/($^{\circ}$)	± 60
Irregularity of lens surface/fringe	± 0.3
Refractive index	± 0.001
Abbe number/%	± 0.5

5 结 论

本文讨论了多运动组变焦系统稳定成像原理,提出了基于多运动组共轨型结构的紧凑变焦光学系统模型,给出了共轨方案的核心特征及约束条件。该模型在固定行程条件下扩大了单个运动组元的有效移动范围,在压缩变焦系统轴向尺寸的同时,保障了连续变焦过程中的像质稳定性,为实现变焦光学系统的紧凑型设计目标提供了有效路径。通过透镜材料玻塑混合配置方案进行系统轻量化。实验设计了一个五组元变焦光学系统,该系统采用 3 片玻璃透镜与 7 片塑料透镜组合,仅用 69 mm 的总长即实现 23~69 mm 的三倍连续变焦,其中 F 数为 2.4~4.5,像高为

8.49 mm,工作波段为435~650 nm,质量控制在30 g以内。在考察空间频率160 lp/mm处,全焦段全视场的MTF值均大于0.3,长、中焦端畸变绝对值小于2%,短焦端畸变绝对值小于5%,全焦段边缘视场相对照度高于70%,所有运动组元的变焦曲线平滑无拐点。

参考文献:

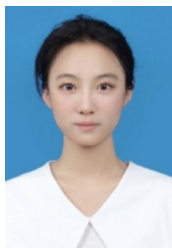
- [1] LIU Y P, YANG B, ZHUANG S L. Automated design of a slim catadioptric system combining free-form surface and zoom lens [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13372-13390.
- [2] WU T H, PAN J W. An immersive head-mounted display with a liquid lens [J]. *Optics Communications*, 2020, 455: 124453.
- [3] 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.
QU R, ZHANG H W, GUO H N, *et al.* 30 × VIS-SWIR wideband zoom lens design (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(10): 65-71. (in Chinese)
- [4] ZHANG K, ZHONG X, QU Z, *et al.* Design method research of a radiation-resistant zoom lens [J]. *Optics Communications*, 2022, 509: 127881.
- [5] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(11): 1263-1271. (in Chinese)
- [6] 陈琛, 胡春海. 球幕投影通用型变焦鱼镜头设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 323-335.
CHEN CH, HU CH H. Design of general type zoom fish-eye lens for dome-screen projector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 323-335. (in Chinese)
- [7] TANAK K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 1: Four-component type[J]. *Applied optics*, 1982, 21(12): 2174-2183.
TANAKA K. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. 3: Five-component type [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(4): 541-553.
- [8] LUKAC R, MARTIN K, PLATANOITIS K N. Digital camera zooming based on unified CFA image processing steps[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 15-24.
- [9] WU R L, ZHANG Z L, YANG Y, *et al.* Dual-camera smooth zoom on mobile phones [C]. *Computer Vision-ECCV 2024. Cham: Springer Nature Switzerland*, 2025: 250-269.
- [10] 程洪涛, 郭世俊, 吕杰, 等. 可调光焦度器件的变焦光学系统研究发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 80007.
CHENG H T, GUO SH J, LÜ J, *et al.* Research development trends of zoom system with variable focal power device [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 80007. (in Chinese)
- [11] JO S H, PARK S C. Design and analysis of an 8x four-group zoom system using focus tunable lenses [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13370-13382.
- [12] LIU Y P, YANG B, GU P X, *et al.* 50X five-group inner-focus zoom lens design with focus tunable lens using Gaussian brackets and lens modules [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29098-29111.
- [13] YAN J P, LI M H, ZHOU J W, *et al.* Shift-photography-assisted image super-resolution for optical zooming system based on Alvarez lenses [J]. *Optics Communications*, 2024, 570: 130921.
- [14] 张冰锐, 杨志旺, 张晨钟, 等. 基于 Alvarez 透镜的短行程红外变焦镜头[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(12): 255-265.
ZHANG B R, YANG ZH W, ZHANG CH ZH, *et al.* Application of Alvarez lens in small movement infrared zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(12): 255-265. (in Chinese)
- [15] ZHANG N H, YUAN R Y, ZHAO Z Z, *et al.*

作者贡献声明:

谢佳儀:总体方案确定,光学系统设计;
王治乐:项目管理,提供资源与指导;
于东辉:变焦系统长度表达式理论推导;
王泽奇:变焦曲线与共轨情况分析;
黄莉雯:成像质量分析。

- Multi-curved variable-focus liquid lens[J]. *Optics Communications*, 2022, 508: 127781.
- [16] SUN W S, CHU P Y, TIEN C L, *et al.* Zoom lens design for 10.2-megapixel APS-C digital SLR cameras [J]. *Applied Optics*, 2017, 56 (3) : 446-456.
- [17] ZHANG K, QU Z, ZHONG X, *et al.* $40\times$ zoom optical system design based on stable imaging principle of four groups[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(6): 1516-1522.
- [18] LI H, CHEN H H, LI X X, *et al.* Structural optical design of multi-group, high zoom ratio optical systems[J]. *Optics Communications*, 2024, 551: 130022.

作者简介:



谢佳儀(2001—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,2023年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学设计、杂散光分析等方面的研究。E-mail: 23S021009@stu.hit.edu.cn

通讯作者:



王治乐(1975—),男,河南偃师人,博士,教授,博士生导师,1998年、2001年、2004年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学设计、半实物仿真、光电测试等方面的研究。E-mail: wangzhile@hit.edu.cn