

文章编号 1004-924X(2025)17-2718-16

## 反射/折反射式变焦光学系统综述

孟庆宇<sup>1\*</sup>, 戚允升<sup>1,2</sup>, 陈 琪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 变焦光学系统通过对光学元件的主动可控调节, 可以在单一光学系统内实现多个焦距数值, 具有光学成像模式灵活的特点。反射/折反射变焦光学系统具有可实现大口径、长焦距的优势, 在高分辨率成像场景中具有重要的应用潜力。本文系统地梳理了反射/折反射式变焦光学系统的发展历程, 总结了各阶段的演进特征, 并对典型系统的构型特征进行了梳理归纳, 分析了其技术特点与指标数据。最后, 对反射/折反射变焦光学系统的发展前景进行了展望, 供光学设计领域研究人员共同探讨。

**关键词:** 变焦光学系统; 反射式变焦; 折反射式变焦; 光学系统设计

中图分类号: O439 文献标识码: A

doi: 10. 37188/OPE. 20253317. 2718 CSTR: 32169. 14. OPE. 20253317. 2718

## Review of reflective/catadioptric zoom optical systems

MENG Qingyu<sup>1\*</sup>, QI Yunsheng<sup>1,2</sup>, CHEN Qi<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: mengqy@ciomp. ac. cn

**Abstract:** Zoom optical systems realize multiple focal lengths within a single configuration by actively and controllably adjusting optical elements, enabling flexible imaging modalities. Reflective and catadioptric zoom systems are particularly suited to high-resolution imaging applications owing to their capacity for large apertures and extended focal lengths. This paper presents a systematic review of the development of reflective and catadioptric zoom optics, delineates the evolutionary characteristics at each stage, and classifies the structural typologies of representative systems. Their technical attributes and performance metrics are analyzed and compared. Finally, prospects for future advances in these systems are discussed to stimulate interdisciplinary dialogue among researchers in optical design.

**Key words:** zoom optical systems; reflective zoom; catadioptric zoom; optical system design

收稿日期: 2025-05-12; 修订日期: 2025-06-04.

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)资助项目(No. XDB1050200); 中国科学院青年创新促进会优秀会员资助项目(No. Y2023061)

## 1 引言

变焦光学系统具有能够主动可控地调节光学系统焦距和视场的技术特点,在光学成像领域中具有重要的应用。早在1902年,变焦光学系统即被提出并获得专利,经过一个多世纪以来的发展,经典的透射式变焦光学系统凭借其丰富的设计自由度,可以获得充足的变倍比,实现较大的光学视场角,得到了广泛的应用。然而,受到透射式系统固有特性的限制,如光学玻璃色散给光学系统带来色差、大口径高均匀性光学玻璃难以获得、光学玻璃力学与热性特性等因素,使获得具有长焦距、高分辨率特征的透射式变焦光学系统在一定程度上面临着从设计到工程实现的难度。

在大尺寸光学系统实现方面,反射/折反射式光学系统一直具有工程落地优势,这为长焦距、高分辨率变焦光学系统提供了研究思路与实现路径。反射式变焦光学系统的技术核心优势一方面在于彻底规避了色差问题,在宽谱段成像中具备独特优势;另一方面,反射镜材料更为丰富,更加支持大口径设计。这对于宽谱段、高分辨率成像应用具有更广阔的场景。

折反射式变焦光学系统则结合透射式变焦光学系统与反射式变焦光学系统两者的优点,通常以反射式系统作为主系统,解决大口径、长焦距的问题,同时保留少量透镜,以扩大设计自由度,辅助像差校正,在维持性能的前提下简化了设计难度。折反射式变焦光学系统凭借设计的灵活性,在大变倍比的应用场景下具有优势。同固定焦距光学系统的发展一样,反射/折反射变焦光学系统的差异化发展,共同拓展了光学变焦技术的应用边界。

本文聚焦反射/折反射式变焦光学系统的设计方法、技术演进及典型应用,系统简要地梳理了1980年代至今的代表性研究成果,通过对比与分析各类典型光学系统的特点、优势与不足,为光学设计者提供技术借鉴,并为变焦光学系统的未来研究提供参考。

## 2 反射式变焦光学系统

在光学系统中,透射式系统与反射式系统是竞相发展的,变焦光学系统也不例外。反射式变焦光学系统的研究始于20世纪80年代末,传统透射式变焦光学系统存在色差且校正难度大、系统光能量利用率等问题,无法满足人们更高的要求。为了满足宽谱段成像需求,研究人员开始探索反射式结构的可能性。

### 2.1 非机械补偿式

#### 2.1.1 早期探索与基础架构

在反射式变焦光学系统的研究初期,通过轴向移动镜组实现变焦功能,以及如何在反射式系统设计变量较少的情况下实现像差校正是重点。

1989年,Pinson提出了一种四反射镜变焦光学系统<sup>[1]</sup>,如图1所示。该系统采用了卡塞格林-逆卡塞格林光学构型,能够通过反射镜的轴向运动改变系统的焦距。该系统给出了有关反射镜间距与系统焦距的对应关系,并以此指导系统实

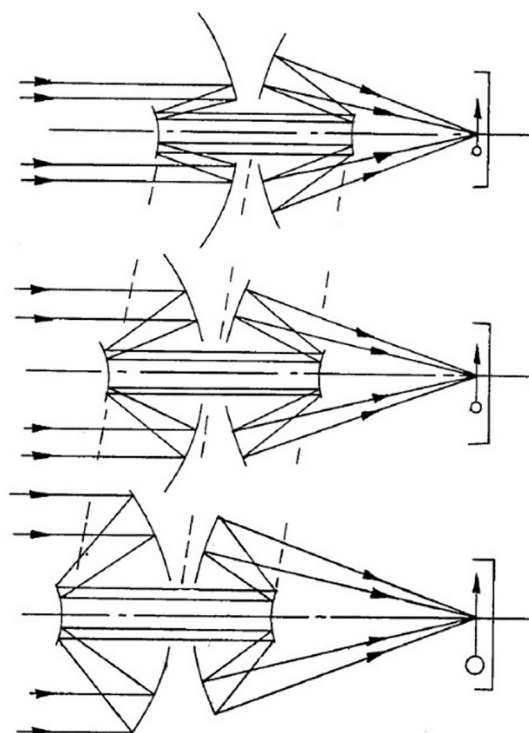


图1 George T. Pinson设计的四反变焦光学系统<sup>[1]</sup>  
Fig. 1 Four-mirror zoom system designed by George T. Pinson<sup>[1]</sup>

现变焦。该全反射变焦光学系统设计方法为宽光谱变焦光学系统开发提供了可扩展的架构基础。

同年,韩国科学技术院的 Rah 和 Lee 提出了一种四反变焦光学系统<sup>[2]</sup>。该系统同样是在传统卡塞格林构型的基础上扩展而来,是首个满足等晕条件的全对称反射式变焦光学系统。系统能够实现 2 倍连续变焦,焦距为 66.67~133.33 cm,  $F$  数为 4~8,设计波长为 10.6  $\mu\text{m}$ ,系统总长随焦距变化呈现非线性变化的特性,光学系统如图 2 所示。该系统应用三阶像差理论设计,能够在  $\pm 1^\circ$  视场内消除球差和彗差,使中心视场的波前误差(Peak to Valley, PV)值保持在  $\lambda/4$  ( $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ) 以内,像质接近衍射极限。研究指出,由于球面镜固有像散的限制,该系统的实际有效视场需控制在  $1^\circ$  以内。为此,研究人员指出后续的优化可以考虑采用二次曲面主镜(如椭球面)改善离轴像差。该设计方法为 90 年代反射式变焦光学系统发展提供了技术路线参考。

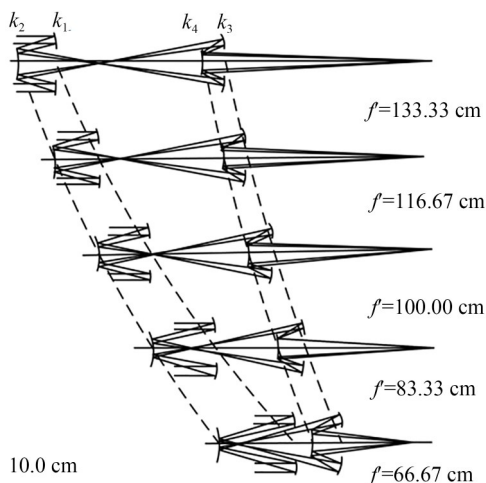


图 2 Rah 和 Lee 设计的四反变焦光学系统<sup>[2]</sup>

Fig. 2 Four-mirror zoom system designed by Rah and Lee<sup>[2]</sup>

### 2.1.2 性能突破与离轴设计

1990 年,阿拉巴马大学亨茨维尔分校应用光学中心的 Johnson 等在第一代设计的基础上,成功研制出四反射镜全反射式变焦光学系统<sup>[3]</sup>,如图 3 所示。该系统通过两面反射镜的轴向移动,实现了 74~295 mm 的 4 倍连续变焦,对应视场范

围从  $6^\circ$  变化至  $1.5^\circ$ 。该系统主镜直径为 124 mm,系统  $F$  数为 3.3,在可见光波段的轴上像质能够达到衍射极限,轴外像质随视场增加而略有退化。该研究完成了原型机的初步设计与性能验证,为反射式变焦光学系统从理论设计迈向工程应用奠定了基础。

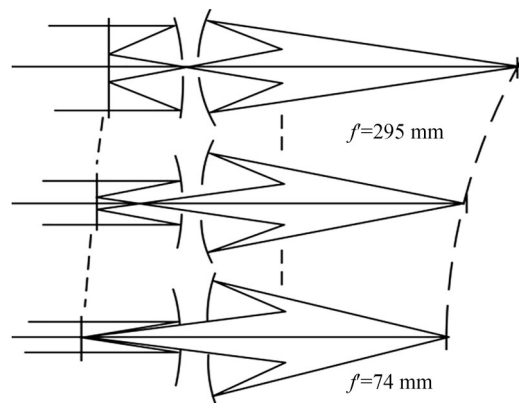


图 3 Johnson 改进后的全反射变焦光学系统<sup>[3]</sup>

Fig. 3 All-reflective zoom system improved by Johnson et al<sup>[3]</sup>

1991 年,美国休斯飞机公司的 Cook 提出的全反射变焦光学系统由固定椭球面主镜、双曲面次镜与三镜及两组平面折镜构成<sup>[4]</sup>,如图 4 所示。该系统可以通过联动两组折镜来调节次镜到三镜、三镜到像面的间距,以实现 154.2~305.5 mm 的连续变焦。在变焦过程中,系统的  $F$  数由 5.14 变化至 10.2,视场角由  $3^\circ$  变化为  $1.5^\circ$ 。系统的工作谱段为 8~12  $\mu\text{m}$ 。

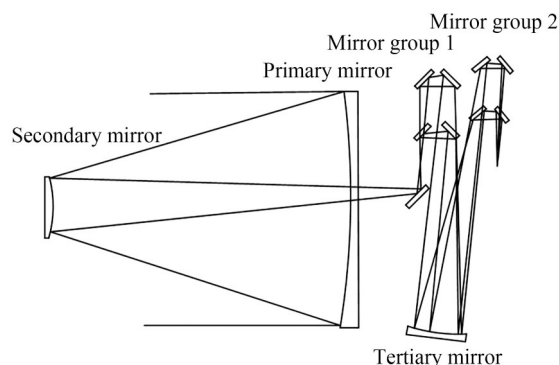


图 4 Cook 提出的全反射变焦光学系统<sup>[4]</sup>

Fig. 4 All-reflective zoom optical system designed by Cook et al<sup>[4]</sup>

1992年,美国休斯飞机公司的Kebo提出了两种无焦离轴反射式变焦光学系统<sup>[5]</sup>,通过离轴化设计,解决了传统同轴系统的光路遮挡问题。其中,离轴四反变焦光学系统采用了固定主镜与可移动的次镜、三镜、四镜的构型,能够在1.7×至3.6×的变倍比内保持系统出瞳位置稳定,该系统如图5所示。另外一种离轴三反变焦光学系统则通过主次镜联动实现0.125×至0.5×连续变焦,反向使用时可实现2×至8×变焦,如图6所示。该系统为后续离轴反射式变焦光学系统的研发提供了重要设计参考。

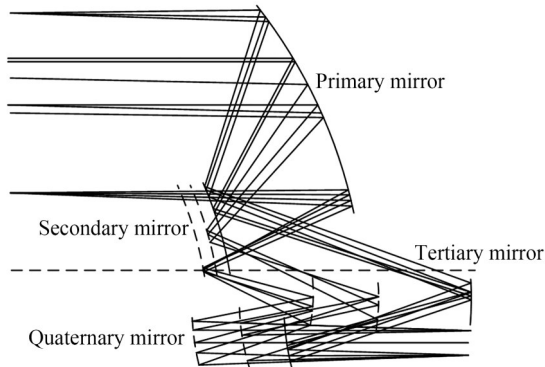


图5 Kebo设计的离轴四反无焦变焦光学系统<sup>[5]</sup>  
Fig. 5 Off-axis four-mirror afocal zoom system designed by Kebo<sup>[5]</sup>

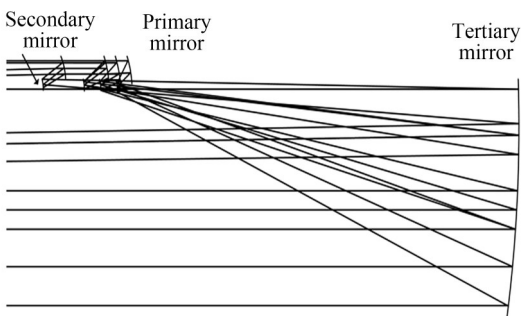
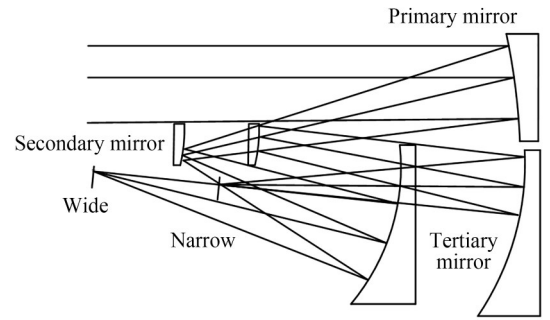


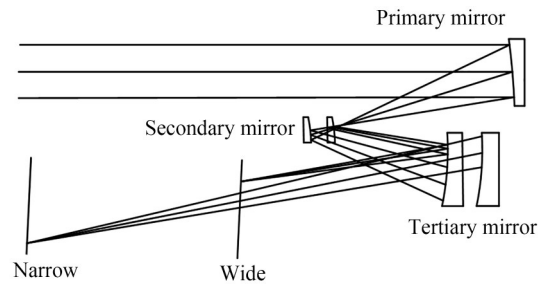
图6 Kebo设计的离轴三反无焦变焦光学系统<sup>[5]</sup>  
Fig. 6 Off-axis three-mirror afocal zoom system designed by Kebo<sup>[5]</sup>

1995年,阿拉巴马大学的Johnson等提出了一种离轴三反变焦光学系统设计方法<sup>[6]</sup>,通过四组系统设计,验证了不同场景下反射式变焦光学系统的可行性,4组光学系统如图7所示。其中,系统1(2×变倍比、 $F/3\sim F/6$ 、入瞳直径100 mm)

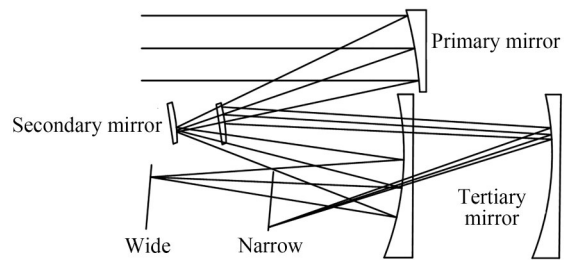
结构相对紧凑,短焦端的RMS角分辨率为59  $\mu\text{rad}$ ,长焦端的RMS角分辨率为30  $\mu\text{rad}$ ;系统2(4×变倍比、 $F/6.5\sim F/25$ 、入瞳直径100 mm)的结构紧凑,且反射镜尺寸较小,但是像面的位置会随着变焦过程发生明显的移动;系统3(4×变



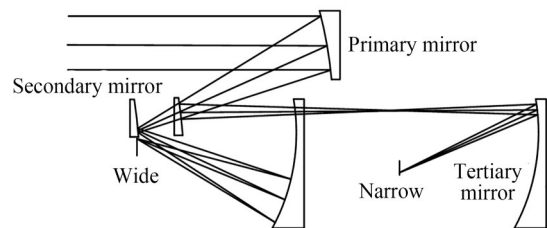
(a) 系统1  
(a) System 1



(b) 系统2  
(b) System 2



(c) 系统3  
(c) System 3



(d) 系统4  
(d) System 4

图7 Johnson提出的4种离轴三反变焦光学系统<sup>[6]</sup>  
Fig. 7 Four kinds of off-axis three-mirror zoom system designed by Johnson<sup>[6]</sup>

倍比、 $F/4 \sim F/16$ 、视场偏置  $-5^\circ$ ) 与系统 4 ( $4 \times$  倍比、 $F/4 \sim F/16$ 、视场偏置  $-2^\circ$ ) 的设计参数基本相同,唯一的区别是视场偏置角度不同。系统 4 在变焦过程中三镜的行程更长,这导致了更长的系统总长。与前 3 个系统相比,系统 4 拥有更高的均方根值(Root Mean Square, RMS)角分辨率,在短焦段达到了  $45 \mu\text{rad}$ ,长焦段达到了  $12 \mu\text{rad}$ 。研究发现,第三镜的运动方向能够直接影响系统性能,向右侧运动有助于实现高分辨率,而向左侧运动对系统的畸变控制更有利,为不同任务需求提供了灵活选择。

## 2.2 机械补偿式

### 2.2.1 补偿像面的反射式变焦光学系统

变焦理论已有半个多世纪的发展历史。早在 20 世纪 80 年代左右,Паномов 等以及陶纯堪等<sup>[7]</sup>便建立了较为完整的变焦理论体系,并给出了多种构型的机械补偿式折射变焦光学系统设计。

针对反射变焦光学系统,在 2006 年常军等<sup>[8]</sup>基于高斯光学理论建立了数学模型,在“固定共轭长度”约束条件下,通过微分方程精确描述补偿镜的运动轨迹,推导出了次镜与三镜的协同运动规律。理论分析表明,当次镜做线性移动时,三镜需沿特定非线性路径运动以维持像面稳定,这种动态补偿机制为系统设计工程化实现奠定了理论基础。该团队设计了两套典型变焦光学系统,其中系统 1 为无中间像面的离轴三反变焦光学系统,如图 8 所示,该系统能在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  和

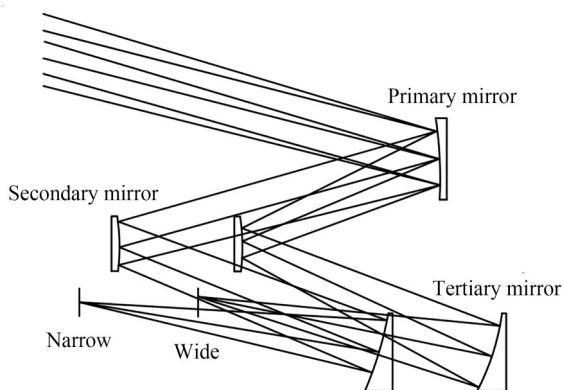


图 8 常军等设计的离轴三反变焦光学系统<sup>[8]</sup>

Fig. 8 Off-axis three-mirror zoom system designed by Chang Jun *et al.*<sup>[8]</sup>

$8 \sim 12 \mu\text{m}$  双波段实现焦距  $150 \sim 300 \text{ mm}$  的连续变焦,且变焦过程中  $F$  数恒定保持为 4,整体结构紧凑。为实现衍射极限成像,主镜采用了 4 阶非球面,次镜与三镜则使用了圆锥曲面。系统 2 为机械补偿式同轴三反变焦光学系统,如图 9 所示,该系统通过次镜与三镜的机械补偿运动,能够维持像面位置稳定。该系统的  $F$  数同样恒定为 4,可实现焦距  $150 \sim 450 \text{ mm}$  的连续变焦。该研究使用的理论模型为后续机械补偿式连续变焦反射变焦光学系统设计提供了重要参考。

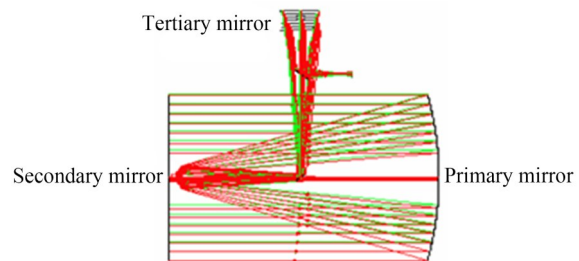


图 9 常军等设计的机械补偿式变焦光学系统<sup>[8]</sup>

Fig. 9 Mechanically compensated zoom system designed by Chang Jun *et al.*<sup>[8]</sup>

### 2.2.2 非轴向运动变焦技术

2020 年,机械补偿式反射式变焦光学系统的研究呈现出了对高自由度补偿的深入探索。2023 年,常军等提出了离轴四反机械变焦光学系统<sup>[9]</sup>,如图 10 所示。该研究通过非轴向运动模式取代了传统的轴向移动,显著提升了系统自由度,次镜、三镜、四镜在变焦过程中沿多维轨迹运动,并基于节点像差理论构建了波像差综合评价函数,动态平衡多结构像差。在  $F$  数恒定为 4 的情况下,系统实现了焦距为  $100 \sim 450 \text{ mm}$  的 4.57

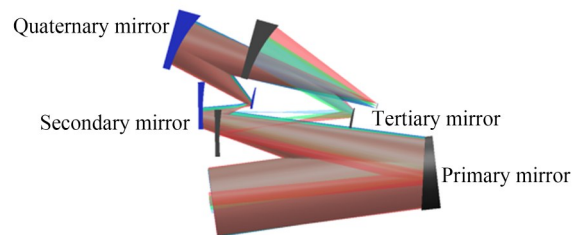


图 10 常军等设计的离轴四反变焦光学系统<sup>[9]</sup>

Fig. 10 Off-axis four-mirror zoom system designed by Chang Jun *et al.*<sup>[9]</sup>

倍连续变焦,系统所有镜面均采用高次非球面设计以校正像差,全视场平均调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)在 50 lp/mm 下优于 0.5。研究证实,主动偏心补偿机制可有效抑制大孔径引入的非对称像差,为非轴向运动提升系统变倍能力提供了理论指导。然而,该团队亦指出,多结构下镜面孔径区域的动态偏移会导致系统体积较大,且机械变焦依赖电机驱动限制了响应速度,这些实际挑战为后续研究方向提供了参考。

### 2.3 变形镜驱动式

21 世纪初,自适应光学与变形镜技术得到较大发展,在高精密光学系统中得到越来越多的应用<sup>[10-11]</sup>。将变形镜技术应用于反射式变焦光学系统的设计中,通过对变形镜面型的调整,光学系统能够在无轴向运动部件的条件下实现变焦与像差校正。该系统作为突破传统机械运动限制的重要技术路径,展现了独特的技术优势与创新价值。

2009 年,德国弗劳恩霍夫应用光学与精密机械研究所的 Seidl 等成功设计了全反射式变形镜变焦光学系统<sup>[12-13]</sup>,如图 11 所示。研究基于 Schiefspiegler 离轴反射式结构,采用双变形镜协同变焦的方案,构建了无机械结构运动的反射式变焦光学系统。该系统能够通过实时调节主镜和四镜的曲率半径,实现 3 倍连续变焦。系统变焦为 5.2~15.6 mm,相应的  $F$  数变化为 4.5~5.7,视场角变化为  $38^\circ \times 49^\circ \sim 13^\circ \times 17^\circ$ 。数据表明,系统在全焦段范围内具备稳定的光学性能,点列图直径均控制在  $40 \mu\text{m}$  以内。尽管系统仅使用单致动器驱动变形镜,但通过优化镜间距、倾斜角度及使用非球面面型,成功抑制了离轴反

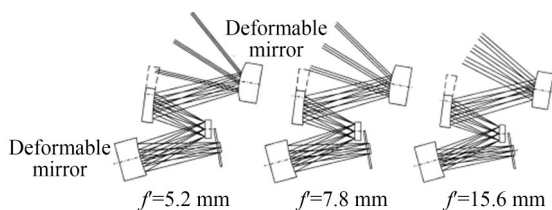


图 11 基于变形镜的离轴四反变焦光学系统<sup>[11]</sup>

Fig. 11 Off-axis four-mirror zoom system based on deformable mirror<sup>[11]</sup>

射结构固有的彗差与像散。光机验证实验表明,该系统在特征焦距位置的图像质量可满足大部分成像应用需求。

2013 年,中国科学院西安光学精密机械研究所的赵惠等设计了一种基于单变形镜的全反射式双焦光学系统<sup>[14]</sup>,如图 12 所示。该系统通过使用分体式主镜的结构,将粗、精侦察双通道的光路整合于同一光路中,仅使用单个变形镜即可实现变焦,降低了系统的复杂性。在设计过程中,通过“光学杠杆效应”使单变形镜曲率半径的微小变化能够对系统焦距产生显著影响,实现了焦距为 48 mm 和 192 mm 的两档变焦, $F$  数在 8 与 15 之间切换。系统 RMS 波前误差经校正后优于  $0.07\lambda$  ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )。实验结果证明了光学杠杆效应的正确性,并证明了变形镜在高质量成像中的新用途,但是由于该相机无法感测系统波前,因此无法使用变形镜的闭环控制。研究团队提出,在未来改进中将引入波前传感技术构建闭环控制,以实现成像质量的自适应校正。

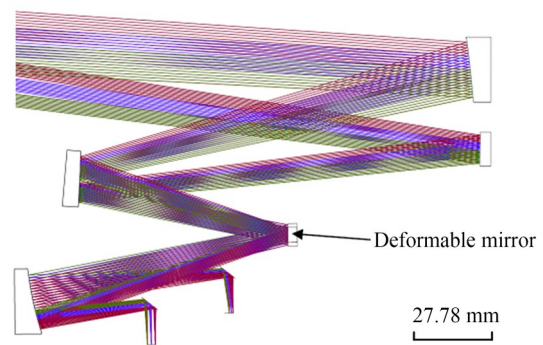


图 12 基于单变形镜的全反射式双焦光学系统<sup>[14]</sup>

Fig. 12 All-reflective zoom system based on a single deformable mirror<sup>[14]</sup>

2014 年,常军等提出了一种离轴三反主动变焦光学系统设计方法<sup>[15]</sup>。该方法基于主动光学理论,研究了系统主动变焦原理,并推导了系统一阶特性光学参数的求解公式。研究团队根据该方法设计了变倍比为 3 倍的同轴三反系统,如图 13 所示,该系统的入瞳直径为 5 mm,视场为  $0.94^\circ \sim 2.8^\circ$ ,波长从可见光波段到  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  的红外波段。通过次镜和三镜的曲率半径变化,该系统能够实现焦距 15~45 mm 的变焦。为解决同

轴系统的中心遮挡问题,该团队进一步进行了离轴优化设计,通过调整主镜、次镜的偏心与倾斜量以及平面镜和三镜的偏心量消除了系统的中心遮挡,如图 14 所示。设计结果表明,同轴系统与离轴系统在可见光(50 lp/mm)和红外波段(15 lp/mm)的 MTF 均大于 0.3。该设计实例验证了设计方法的有效性,并通过对比同轴系统与离轴变焦系统来指出离轴主动变焦系统研究的重要性。

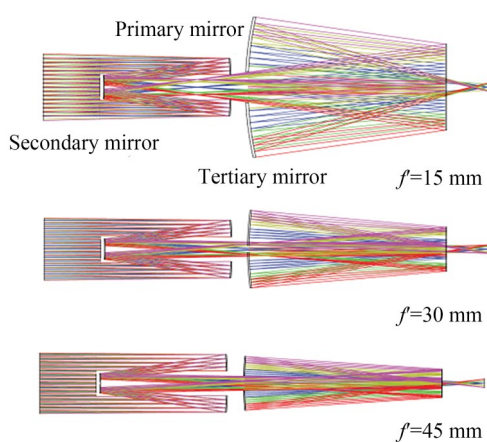


图 13 常军等设计的同轴三反变焦光学系统<sup>[15]</sup>

Fig. 13 Coaxial three-mirror zoom system designed by Chang Jun *et al.*<sup>[15]</sup>

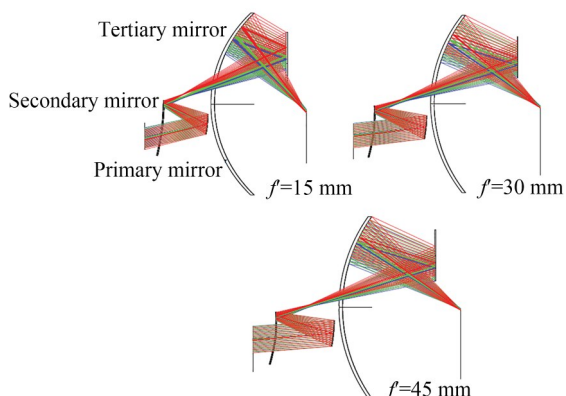


图 14 常军等设计的离轴三反变焦光学系统<sup>[15]</sup>

Fig. 14 Off-axis three-mirror zoom system designed by Chang Jun *et al.*<sup>[15]</sup>

2016年,该团队提出了一种宽谱段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统设计方法<sup>[16]</sup>。该方法结合离轴主动反射变焦理论与局部动态高分辨率设计方法,利用矩阵光学分析了系统的

成像原理,求解了系统的初始结构。基于该方法设计了一个离轴三反射变焦系统,如图 15 所示,该系统工作于可见光波段,焦距在 75~150 mm 之间,对应的  $F$  数为 7~14。在 75 mm 焦距时视场为  $x:0^\circ\sim 0.5^\circ, y:3^\circ\sim 10^\circ$ ,在 150 mm 焦距时为  $x:0^\circ\sim 0.5^\circ, y:1.7^\circ\sim 5^\circ$ 。系统采用主镜、次镜和三镜均为变形镜的全动型设计,并利用离轴设计有效避免了中心遮挡问题。该设计通过在主镜的面型上叠加 Zernike 多项式项来校正特定感兴趣区域(Region of Interest, ROI)的像差。经优化和像差校正后,系统在各焦距下设定的 ROI 内,MTF 在 50 lp/mm 处均能达到衍射极限,实现了高质量的局部清晰成像。

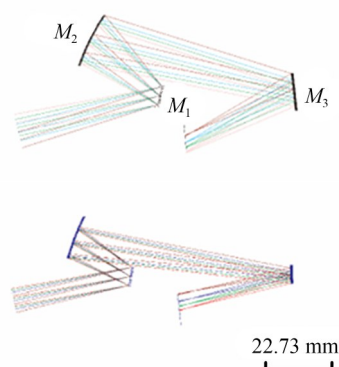
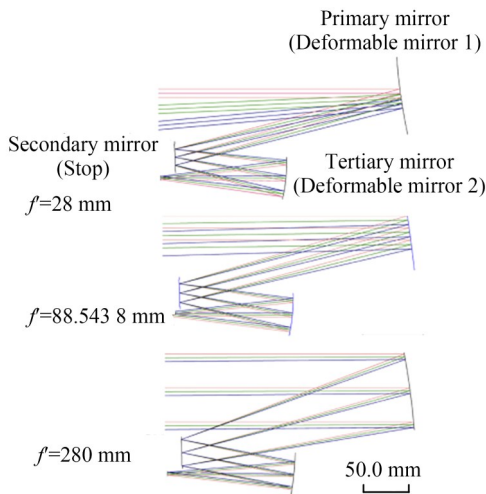


图 15 常军等设计的宽谱段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统<sup>[16]</sup>

Fig. 15 Off-axis reflective active zoom system with broad spectrum and dynamic local high-resolution designed by Chang Jun *et al.*<sup>[16]</sup>

2021年,清华大学的程雪岷等提出一种基于双变形镜的大变倍比离轴变焦光学系统设计方法<sup>[17]</sup>。该方法通过解析推导离轴反射式变焦系统的初级像差分布特性,建立了包含变焦方程与像差平衡的非线性全局评价函数,并利用遗传算法实现多参数的协同优化。如图 16 所示,系统采用双变形镜(主镜与三镜)的构型,实现了焦距在 28~280 mm 的 10 倍连续变焦,短焦端视场为  $10^\circ\times 5^\circ$ ,长焦端视场为  $1^\circ\times 0.5^\circ$ 。系统在 8~12  $\mu\text{m}$  波段内的 MTF 接近衍射极限。该研究进一步指出,该构型可作为自由曲面优化的初始结构,未来工作将重点拓展自由曲面在变焦光学系

图 16 基于双变形镜的大变倍比光学系统<sup>[17]</sup>Fig. 16 High zoom ratio optical system based on dual deformable mirrors<sup>[17]</sup>

统像差校正中的应用,并探索更高效的优化算法。该研究验证了变形镜变焦方案在大变倍比需求下的理论可行性,并为后续研究提供了可扩展的理论框架。

变形镜变焦光学系统的优势在于其快速变焦以及在光学系统中的多功能(如变焦稳像一体化)能力。但现有技术仍面临许多挑战:受材料物理特性与工艺水平制约,变形镜的动态调节范围受到限制;开环控制模式下面形预测误差的累积效应,以及长时工作下的蠕变特性,会使系统的稳定性下降;复杂校准流程对实验数据的依赖,一定程度上限制了技术应用的普适性。未来的突破在于新型驱动材料的开发、多物理场耦合控制模型的构建,以及智能化校准算法的创新,从而推动该技术在反射式变焦光学系统设计中的普及应用。

## 2.4 设计方法的理论创新

### 2.4.1 基于像差理论的设计方法

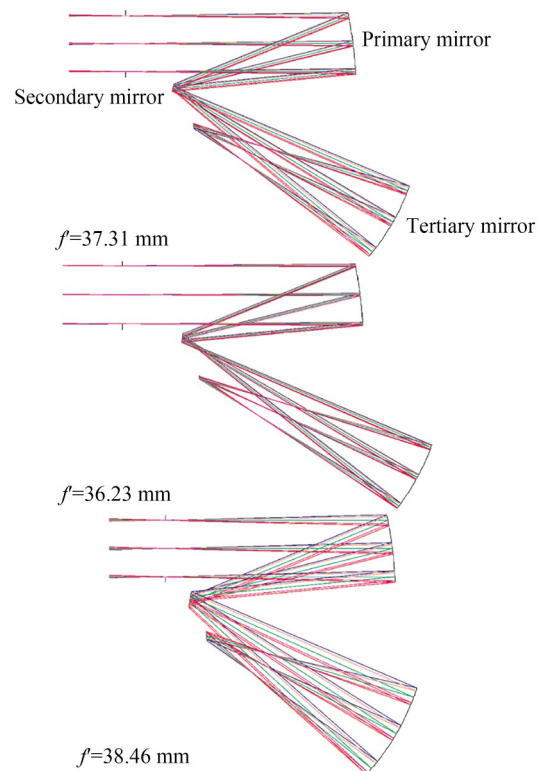
近年来,离轴反射变焦光学系统的设计方法在像差理论驱动下取得了重要进展。传统几何光学框架的局限性逐渐被突破,研究人员通过建立数学驱动的系统性设计框架,在非对称像差控制、大变倍比实现与自由曲面应用等方面取得很大进展。

2010年,北京理工大学的王涌天等提出了一种离轴三反变焦光学系统设计方法<sup>[18]</sup>,通过引入

矢量像差理论为非对称变焦光学系统的像差分析提供了新视角,突破了传统赛德尔像差理论仅适用于旋转对称系统的限制。该研究表明,系统的像差可表征为各反射镜像差的矢量叠加,其中彗差的中心位置由各镜面像差系数与等效倾斜量的矢量加权结果决定,而像散则呈现独特的双零点分布模式。该理论框架构建了可解析的数学模型,通过建立反射镜运动参数与像差场演变的数学关系,实现了变焦过程中像差平衡条件的定量化描述。

研究团队为验证该方法的可行性,设计了一款离轴三反变焦光学系统,变倍比为4,焦距为50~200 mm,系统如图17所示。系统的入瞳口径为37.5 mm,F数随焦距在4~12内连续变化。系统在可见光波段的全焦段内MTF均接近衍射极限。优化过程中,等效倾斜量与理论值仅有微小偏差,既验证了理论模型的准确性,也证明了该方法在像差预判中的有效性。

2024年,清华大学朱钧等提出了一种自由曲

图 17 基于矢量像差理论设计的离轴三反变焦光学系统<sup>[18]</sup>Fig. 17 Off-axis three-mirror zoom system designed based on vector aberration theory<sup>[18]</sup>

面离轴反射变焦光学系统的设计方法<sup>[19]</sup>。该方法通过分阶段优化的策略,有效解决了传统离轴变焦光学系统设计中起始点依赖性强、优化效率低的问题。其设计过程分解为离轴球面系统构建与自由曲面迭代优化两个阶段。首先,针对不同变焦位置分别构建满足焦距需求的同轴球面系统,再通过偏心和倾斜实现离轴化;然后,采用基于离散点迭代的曲面重构方法对曲面法向量进行修正,在保持原始坐标点位置不变的前提下调整局部曲率特性,有效校正了离轴非对称像差。针对变焦过程中多位置曲面参数协调难题,该方法引入基准坐标系转换机制,将不同变焦状态的离散数据统一至主镜局部坐标系进行曲面拟合,最终解决了运动元件几何参数连续性问题。

该方法通过 3 个系统设计,如图 18 所示,验证了其有效性。系统 1 为离轴三反两档变焦光学系统,短焦端焦距为 100 mm(视场为  $4^\circ \times 4^\circ$ ),长焦端焦距为 400 mm(视场为  $1^\circ \times 1^\circ$ ),系统  $F$  数恒定为 5,像面位置保持不变。系统最大畸变短焦端为 2.5%,长焦端为 4.3%。系统 2 为三反连续变焦光学系统,能够实现焦距 100~200 mm 的 2 倍连续变焦,全焦段 RMS 波前误差小于  $0.039\lambda$  ( $\lambda=3\ \mu\text{m}$ )。系统 3 为四反变焦光学系统,通过三镜旋转实现 2 倍变焦(100~200 mm),系统 MTF 值在 100 lp/mm 处优于 0.5,短焦端最大畸变为 3.6%,长焦端最大畸变为 3%。设计结果表明,该方法能够提升自由曲面离轴反射变焦光学系统的设计效率,为自由曲面在复杂变焦光学系统中的设计应用提供了指导。

2024 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的孟庆宇等针对大变倍比反射式变焦光学系统的设计难题,提出了一种基于初始结构全局求解的设计方法<sup>[20]</sup>。研究认为,反射式变焦光学系统在追求大变倍比时面临双重制约:其一,变焦方程可行解区与运动组件碰撞约束形成协同限制,本质上框定了系统变焦能力的理论边界;其二,离轴构型导致的旋转对称性缺失显著增加了像差校正的复杂程度。传统设计方法受限于经验参数调整与局部优化策略,难以在复杂约束条件下实现大变倍比与高像质的平衡。通

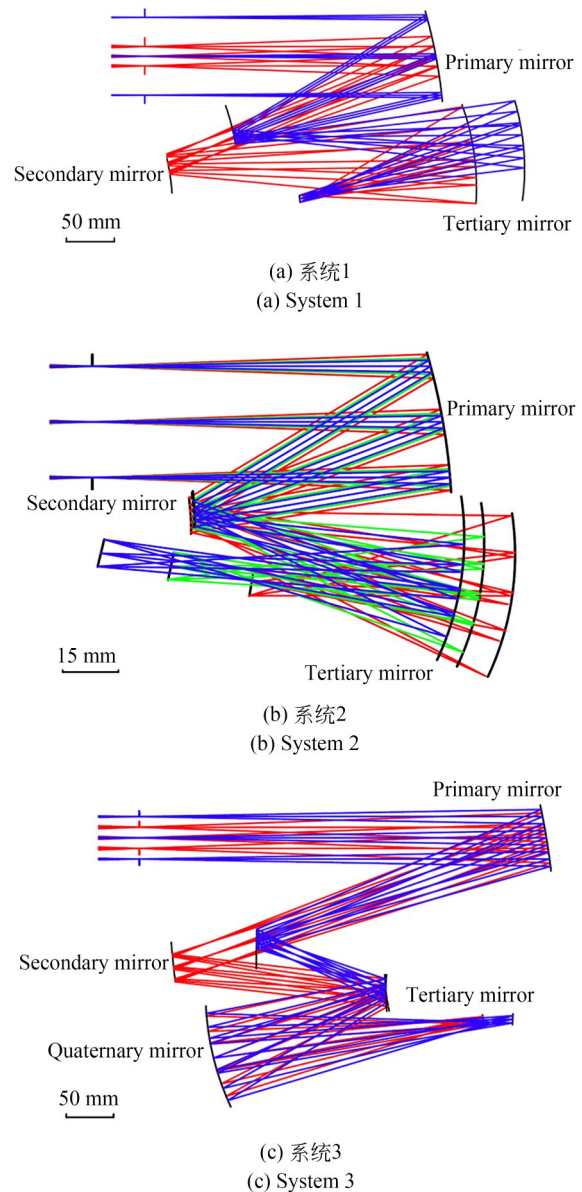


图 18 朱钧等设计的离轴四反变焦光学系统<sup>[19]</sup>  
Fig. 18 Off-axis three-mirror zoom system designed by Zhu Jun *et al.*<sup>[19]</sup>

过建立包含变倍比因子  $F1$  和像质因子  $F2$  的多目标评价体系,构建了融合系统变倍比与成像性能的全局评价函数,基于多目标遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II)对三反变焦光学系统初始结构展开全局搜索求解,并在 Pareto 前沿区域解集中筛选出兼具大变倍比潜力且像差可控的初始结构。该方法突破了传统经验设计对系统变倍能力的限制,为后续优化设计奠定了重要基础。针对反射式系统

设计自由度不足的固有缺陷,该研究在离轴化设计阶段引入了自由曲面,通过复杂面型带来的额外自由度显著提升了高阶像差校正能力。为验证方法有效性,设计了变倍比为 10 倍、焦距覆盖 15~150 mm 的离轴三反变焦光学系统,如图 19 所示。该系统在保持  $F$  数恒定为 8 的条件下,各焦段 MTF 值均接近衍射极限。该方法克服了传统设计因经验起点导致的系统变倍比限制,为机械补偿式反射变焦光学系统的设计提供了新思路。

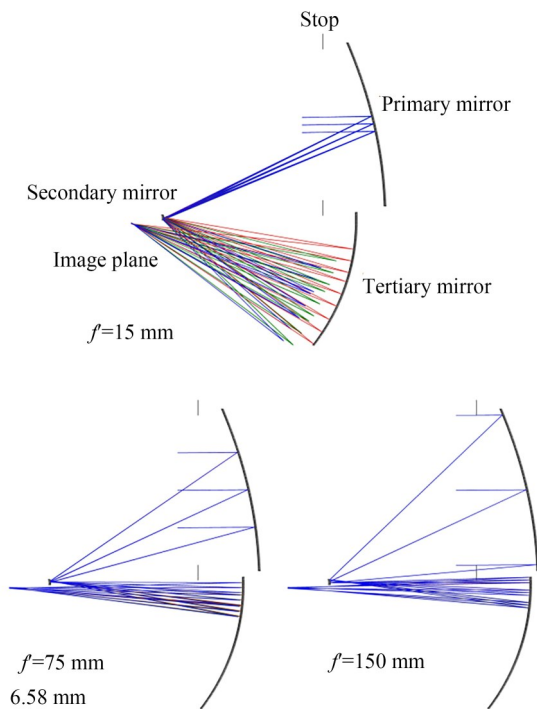


图 19 大变倍比自由曲面反射式变焦光学系统<sup>[20]</sup>

Fig. 19 High zoom ratio all-reflective freeform zoom system<sup>[20]</sup>

2024 年,北京理工大学的常军等针对离轴反射变焦光学系统中存在的像差累积与焦距漂移问题,提出了一种基于波像差线性化预测与焦距分步逼近的联合优化方法<sup>[21]</sup>。该方法通过建立微扰参数与波前变化的数学关联模型,将镜面位移引起的像差变化分解为镜面形变贡献分量与参考波面位移分量,并基于主光线追迹数据构建多视场 Zernike 像差灵敏度矩阵。在焦距控制方面,以归一化视场主光线的像面位置差异作

为特征参量,通过分步迭代策略逐步逼近目标焦距,同时维持初始结构的像差水平。优化过程中,将镜面偏心参数与 XY 多项式自由曲面系数共同作为优化变量,通过构建波像差约束矩阵与焦距约束矩阵的联合方程组,采用最小二乘法求解参数变化量,在避免反复追迹计算的同时,实现了像差与焦距的同步优化。应用该方法设计了  $F$  数为 5、焦距 50~200 mm 的 4 倍连续变焦离轴三反变焦光学系统,如图 20 所示。系统采用 XY 多项式自由曲面,增加了系统的优化自由度,使各焦段 MTF 在 100 lp/mm 处均超过 0.49,系统 RMS 波前误差小于  $\lambda/26$  ( $\lambda=632.8$  nm)。研究团队同时指出当前方法仍存在以下问题并提出改进方向:(1)初始结构的高度依赖性,可通过逐点设计方法生成初始结构数据集以提高适用性;(2)畸变与实际加工可行性不足,可通过增加采样视场数量并控制相邻主光线像高差比例进一步优化;(3)局部优化特性,建议引入逃逸算法(如全局优化策略)以突破局部最优限制,从而提升方法的稳定性与实用性。

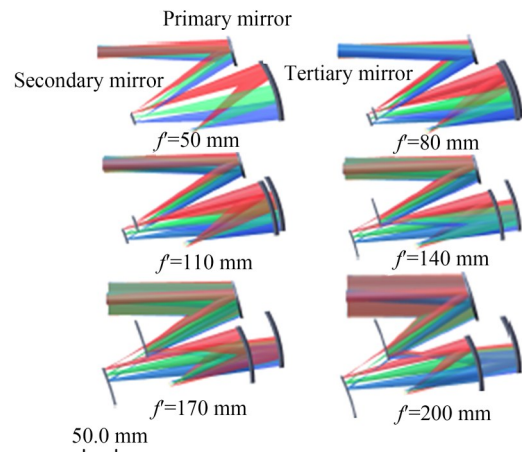


图 20 自由曲面离轴三反变焦光学系统<sup>[21]</sup>

Fig. 20 Freeform off-axis three-mirror zoom system<sup>[21]</sup>

#### 2.4.2 变焦形式与光路结构

除了对设计方法的探索,研究人员针对变焦光学系统依赖轴向运动部件实现变焦的局限性,提出了不同的变焦形式与光路结构,进一步丰富了反射式变焦光学系统的技术路线。

2016 年,清华大学的朱钧等设计了一种基于

次镜旋转的反射式变焦光学系统<sup>[22]</sup>。该系统采用离轴三反构型,系统的主镜、三镜及像面位置固定不变,通过次镜翻转切换面型实现两档变焦。该系统如图 21 所示,短焦端焦距为 180 mm,  $F$  数为 2, 视场为  $3^\circ \times 3^\circ$ ; 长焦端焦距为 216 mm,  $F$  数为 2.4, 视场为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

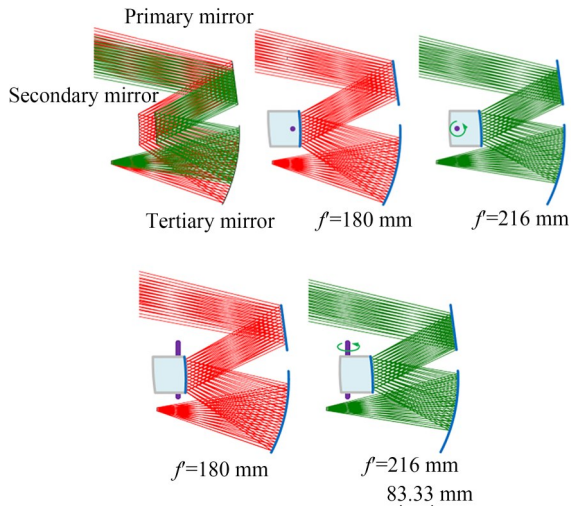


图 21 基于次镜旋转的反射式变焦光学系统<sup>[22]</sup>

Fig. 21 Reflective zoom system based on secondary-mirror-rotation<sup>[22]</sup>

设计过程中应用了构造-迭代法。首先,基于同轴三反系统的近似解确定镜面光焦度分布,构建包含 672 条特征光线(每个焦段)的初始平面系统,然后,利用光线追迹与费马原理逐点计算自由曲面数据点,并通过包含坐标与法向量的综合拟合方法生成 XY 多项式曲面。迭代过程中,采用负反馈系数修正目标点位置,经 70 次迭代后特征光线像点均方根偏差降低 87.8%。最终对系统进行优化使系统像质接近衍射极限,短焦端平均 RMS 波前误差分别为  $0.055\lambda$ , 长焦端为  $0.03\lambda$  ( $\lambda=4 \mu\text{m}$ )。该设计通过将构造-迭代法与变焦系统设计深度融合,为新形式离轴反射式变焦光学系统设计提供了理论基础。

2024 年,北京理工大学的赵高兴等提出了另一种基于单镜旋转的变焦光学系统构型<sup>[23]</sup>,如图 22 所示。该系统采用非对称离轴反射式布局,通过三镜的小幅旋转实现 2 倍变焦。在短焦端,光线经主镜、次镜和三镜三次反射后直接成像;长焦端则通过对三镜施加微小角度的旋转,使光线

四次反射(其中次镜被重复利用一次以形成四次反射光路)。这种光路复用机制有效延长了焦距,同时避免了传统变焦光学系统预留移动空间导致的体积增加。通过同轴系统初始结构求解、遮挡消除优化、自由曲面迭代补偿等系统性设计方法,成功解决了双焦段下的像差校正难题。在设计过程中,使用基于光线追迹的自由曲面迭代算法,实现了对离轴像散、彗差等非对称像差的精准补偿,系统在可见光波段的双焦段 MTF 曲线均接近衍射极限,最大畸变控制在 3% 以内。这种基于单镜旋转的变焦光学系统在实现系统高度紧凑的同时,保持优秀的成像质量,为空间受限的紧凑型变焦光学系统设计提供了新思路。

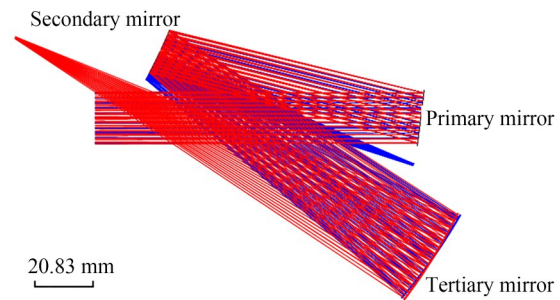


图 22 基于单镜旋转的反射式变焦光学系统<sup>[23]</sup>

Fig. 22 Reflective zoom system based on single-mirror-rotation<sup>[23]</sup>

### 3 折反射式变焦光学系统

#### 3.1 同轴折反射式变焦光学系统的早期构型

折反射式变焦光学系统最初是为了解决透射式变焦光学系统难以实现长焦距、大口径的问题。早期的折反射式变焦光学系统多为同轴构型,通过将反射镜与透射式变焦光学系统组合,进而对系统的有效焦距进行扩展。

典型的系统如 Jacob Moskovich 等<sup>[24]</sup>于 1990 年设计的一种折反射式变焦镜头系统。该系统由固定前组、分体式变焦中继组及补偿组构成,如图 23 所示。系统最长焦距达到 2 502 mm,能够实现  $10\times$  变焦。前组采用折反射混合结构,后组为透射式变倍组与负补偿组。该系统在变焦过程中入瞳口径恒定,  $F$  数在 1.2 至 12 之间连续变化。在设计过程中,研究人员通过约束变焦组

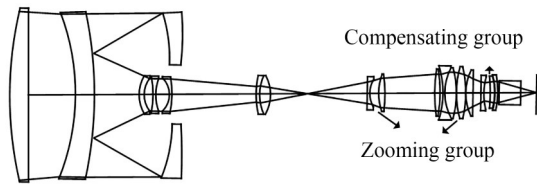


图 23 Moskovich 等设计的同轴折反射式变焦光学系统<sup>[24]</sup>

Fig. 23 Coaxial catadioptric zoom system designed by Moskovich *et al.*<sup>[24]</sup>

与补偿组的光焦度比例实现像差校正,实验结果表明,该系统成像质量良好,在全焦段均接近衍射极限性能。

1992 年, Sigler 等也设计了一种同轴折反射式变焦光学系统<sup>[25]</sup>,如图 24 所示。该系统针对红外波段(8~12  $\mu\text{m}$ )设计,采用椭球面主镜与曼金镜结合的折反射结构,通过 3 片可移动透镜的轴向位移实现连续变焦。光线经主镜反射至曼金镜后,穿过主镜中心孔进入后置透射式变焦光学系统,焦面位置在变焦过程中保持稳定。

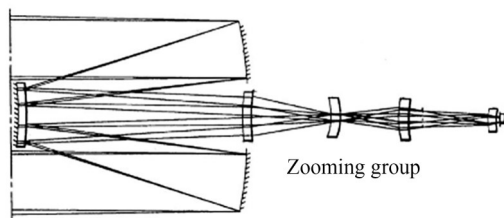


图 24 Robert D. Sigler 等设计的同轴折反射式变焦光学系统<sup>[25]</sup>

Fig. 24 Coaxial catadioptric zoom system designed by Robert D. Sigler *et al.*<sup>[25]</sup>

系统通过 3 片透镜轴向运动即可实现 4 倍变倍比(753~2 989.3 mm),  $F$  数由 1.5 变化至 6, 视场角从  $1^\circ$  逐步缩小至  $0.24^\circ$ 。系统的入瞳口径为 500 mm, 通过在出瞳处设置光阑, 以确保变焦过程中像面照度均匀。该系统在各焦段的成像质量均接近衍射极限。

国内的研究团队也开展了有关同轴折反射式变焦光学系统方面的研究。田铁印等于 2014 年设计了一种用于实时跟踪测量的超大口径连续变焦系统<sup>[26]</sup>, 如图 25 所示。系统入瞳口径为 650 mm, 焦距可在 2 000~5 000 mm 内连续变

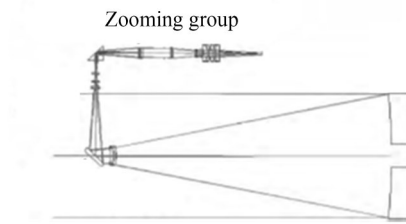


图 25 田铁印等设计的同轴折反射式变焦光学系统<sup>[26]</sup>

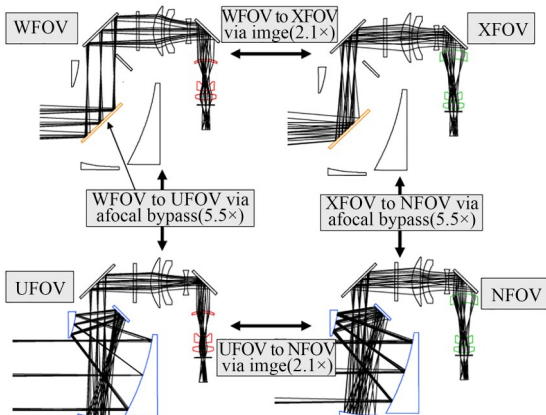
Fig. 25 Coaxial catadioptric zoom system designed by Tian Tieyin *et al.*<sup>[26]</sup>

化, 变焦过程中  $F$  数恒定为 7.7。系统工作波段为  $0.6\sim 0.8\ \mu\text{m}$ , 适配  $1\ 024\times 1\ 024$  像元的 CCD 探测器。其主系统采用牛顿式结构, 结合准直镜组实现第一次成像; 变焦部分采用正组补偿的机械补偿法, 由前固定组、线性移动的变倍组和非线性移动的补偿组构成。设计过程中, 通过倒置常规变焦系统并将入瞳设置在特定位置, 解决了光瞳匹配问题, 消除了变焦过程中像面中心的鬼像。

### 3.2 离轴折反射式变焦光学系统的构型演进

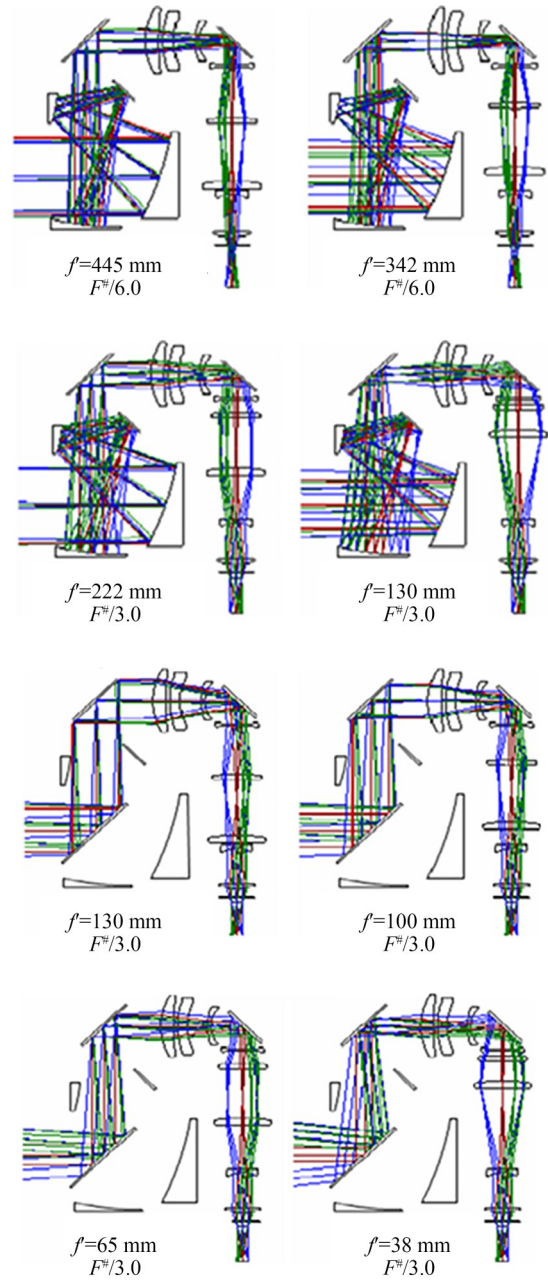
由于同轴构型的视场限制, 早期的折反射式变焦光学系统难以实现大视场的设计目标。离轴折反射式变焦光学系统的设计实现了对系统视场的显著扩展, 进一步提升了折反射式变焦光学系统的性能。

在 2008 年, 美国陆军夜视和电子传感器指挥部的 Vizgaitis 等通过将离轴反射式无焦系统与后置变焦透镜系统组合, 设计了共孔径的中波/长波红外双波段、四档非连续变焦、双  $F$  数的折反射式红外光学系统<sup>[27]</sup>, 系统如图 26 所示。其中, 前置无焦系统离轴三反构型, 后置透射式系统能够通过切换单片透镜, 实现  $3.4\times$  变焦。在短焦端, 前置无焦系统不接入光路, 后置透射式系统独立实现两档变焦; 当切换至长焦端时, 前置无焦系统切入光路与后置透射式系统组合成像, 前置无焦系统对后置透镜系统的焦距进行放大, 系统的变倍比也提升至  $11.5\times$ ; 最终, 系统的焦距为  $53\sim 610\ \text{mm}$ , 视场为  $10.4^\circ\times 13.8^\circ\sim 0.9^\circ\times 1.2^\circ$ 。这种多光学通道的结构形式, 能够在不显著增加系统复杂度的同时提升变倍能力, 为折反射系统的性能跃升提供了新的技术路径, 并成为后续折反射系统发展的重要参考。

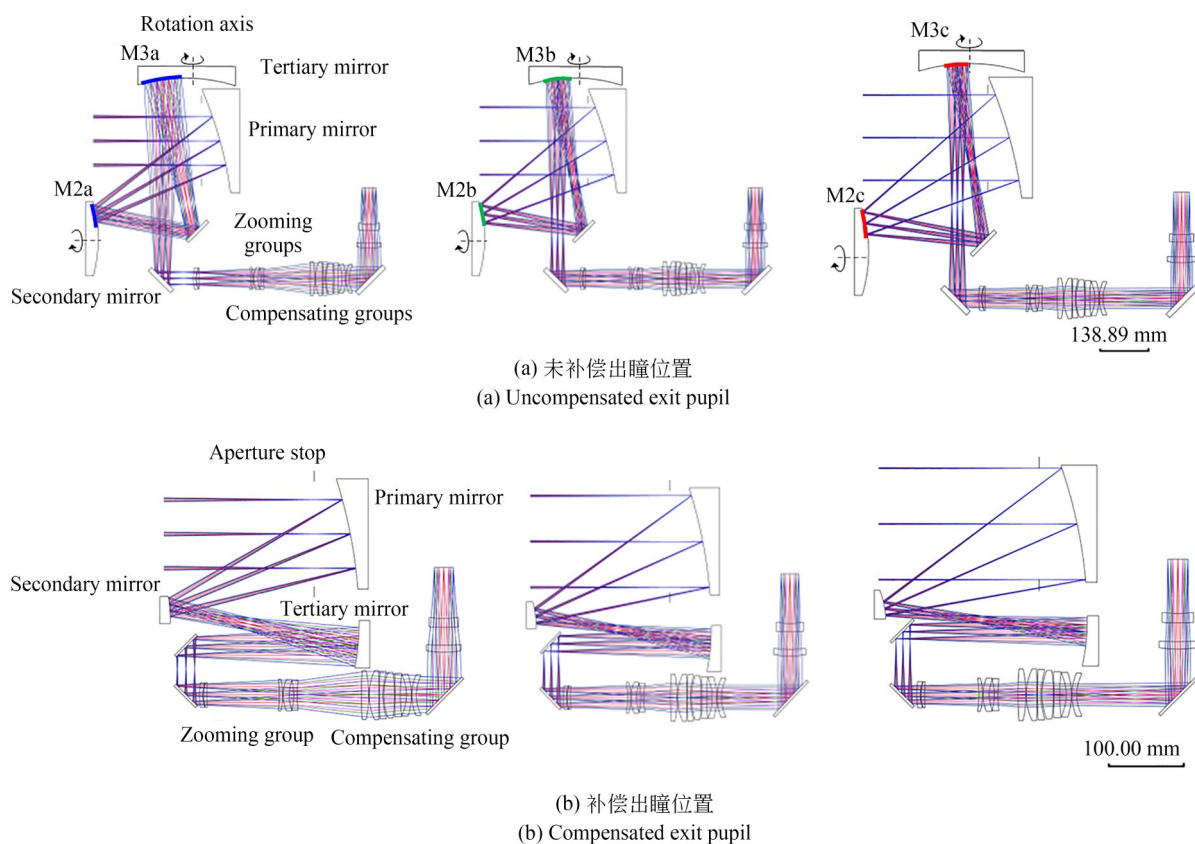
图 26 共孔径多档变焦折反射式光学系统<sup>[27]</sup>Fig. 26 Common-aperture multi-configuration catadioptric zoom system<sup>[27]</sup>

2010年, Vizgaitis等又设计了焦距在38~445 mm、变倍比为11.7×的共孔径、双波段、双F数连续变焦红外光学系统<sup>[28]</sup>,设计同样采用了反射式无焦系统与变焦透镜系统组合的方式,系统如图27所示。与之前不同的是,后置变焦透镜系统能够实现38~130 mm的连续变焦,系统视场为5.6°~19.1°。当前置无焦系统与后置变焦透镜系统相组合时,系统焦距放大至130~445 mm。将两种成像模式结合之后,系统就能够实现38~445 mm的连续变焦,此时系统视场变为1.6°~5.6°。

2024年,孟庆宇团队提出了一种前组-后组双变焦的新型折反射式变焦光学系统<sup>[29]</sup>。在切换变焦的基础上,使前置无焦系统也同时具备变焦能力,即可使系统的变倍比得到进一步扩展。研究团队以出瞳位置为边界条件,建立了可变缩束比的无焦离轴三反系统构型方程。在该方程的指导下,设计出4×~6×~8×三档缩束比可调制的无焦反射系统。通过将此系统与一个仅有1.5×变倍比的透射式变焦光学系统组合,成功扩展了系统的变倍区间。在前置反射无焦系统不补偿出瞳与补偿出瞳的情况下,分别实现了399~4 896 mm和399~4 893 mm的12×变倍比的变焦光学系统设计,系统分别如图28所示。这种前组-后组双变焦的设计方法可以为高分辨率、大变倍比的折反射式变焦光学系统的设计提供了有价值的参考和解决思路。

图 27 共孔径连续变焦折反射式光学系统<sup>[28]</sup>Fig. 27 Common-aperture catadioptric zoom system<sup>[28]</sup>

历经数十年技术演进,折反射变焦光学系统已实现从实验室功能验证到工程化应用的跨越式发展。在系统设计方法迭代中,大口径与大变倍比的技术博弈始终是该领域的研究热点。随着折反射式变焦光学系统在多模式协同变焦、多谱段融合成像等前沿方向不断发展,折反射变焦光学系统有望在空间遥感、高分辨率成像等领域展现出更大的应用潜力。

图 28 前组-后组双变焦折反射式光学系统<sup>[29]</sup>Fig. 28 Catadioptric zoom system with dual-zoom configuration<sup>[29]</sup>

#### 4 结论与展望

本文对反射式/折反射式变焦光学系统的发展与研究现状进行了总结。综述了反射式/折反射式变焦光学系统的典型应用。反射/折反射式变焦光学系统因具有长焦距、大口径的特点,在高分辨率成像领域具有显著优势,因此具有重要的应用价值。

几十年来,研究人员在反射/折反射式变焦光学系统设计方法领域不断探索,获得了一系列的成果。但是目前还有一些亟待解决的问题以及值得进一步探索的方向。首先,对大变倍比、高分辨率的探索从未停止,虽然近年来已有少数大变倍比反射式变焦光学系统的研究取得了进展。但实现变倍比 $5\times$ 以上的高性能系统仍面临较大难度,相关研究仍是该领域的热点。其次,随着新型光学元件的快速发展,它们在反射/折反射式变焦系

统中的应用潜力亟待挖掘,其性能扩展有望进一步推动系统性能提升。最后,随着人工智能领域的发展,各种智能算法在反射/折反射式变焦光学系统设计中的潜力还未被充分挖掘。以上仅是未来研究方向的简要列举,反射/折反射式变焦光学系统的广阔研究方向远不止于此。

反射式/折反射式变焦光学系统依然是应用光学领域未来的研究热点,其持续的技术突破不仅将推动现代光学系统向更高性能、更强适应性的方向发展,更将催生多学科交叉的创新性光学系统设计方法。

#### 作者贡献声明:

孟庆宇:论文构思和撰写,论文修改,项目管理,终稿审阅。

戚允升:论文构思和撰写,文献和数据整理。

陈琪:论文修改,相关文献整理。

## 参考文献:

- [1] PINSON G T. Catoptric zoom optical device: US4812030[P]. 1989-03-14.
- [2] MANN A. Infrared zoom lenses in the 1980s and beyond [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31 (5): 1064.
- [3] JOHNSON R B, HADAWAY J B, BURLESON T A, *et al.* All-reflective four-element zoom telescope: design and analysis [C]. 1990 *Intl Lens Design Conf. Monterey, USA*. SPIE, 1991: 669.
- [4] COOK L G. Continuous zoom all-reflective optical system: US4993818[P]. 1991-02-19.
- [5] KEBO R S. *All-reflective zoom optical system*: US5144476[P]. 1992-09-01.
- [6] JOHNSON R B. Unobscured reflective zoom systems [C]. *Zoom Lenses. San Diego, CA, USA*. SPIE, 1995: 218.
- [7] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.  
TAO CH K. *Design of Zoom Optical System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988. (in Chinese)
- [8] CHANG J, WANG Y T, ZHANG T C, *et al.* All-reflective zoom systems for infrared optics [C]. *International Optical Design Conference 2006. Vancouver, BC, Canada*. SPIE, 2007: 63421Q.
- [9] CAO J J, CHANG J, WANG W X, *et al.* Design of off-axis aspheric four-mirror non-axial mechanical zoom optical system with large relative aperture [J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29119-29131.
- [10] 安其昌, 吴小霞, 唐境, 等. 多镜面大视场主动光学望远镜调控方法 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32 (6): 785-791.  
AN Q CH, WU X X, TANG J, *et al.* Control method of active optical telescope with multiple mirrors and large field of view [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32 (6): 785-791. (in Chinese)
- [11] 邵蒙, 李洪文, 王建立, 等. 自适应光学千单元级高压驱动系统的设计和性能分析 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(17): 2493-2504.  
SHAO M, LI H W, WANG J L, *et al.* Design and performance analysis of high-voltage drive system for thousand-element adaptive optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31 (17): 2493-2504. (in Chinese)
- [12] SEIDL K, KNOBBE J, GRÜGER H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4097-4107.
- [13] SEIDL K, KNOBBE J, SCHNEIDER D, *et al.* Distortion correction of all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(14): 2712.
- [14] ZHAO H, FAN X W, ZOU G Y, *et al.* All-reflective optical bifocal zooming system without moving elements based on deformable mirror for space camera application [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1192-1210.
- [15] 沈本兰, 常军, 王希, 等. 三反射主动变焦系统设计 [J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 164-170.  
SHEN B L, CHANG J, WANG X, *et al.* Design of the active zoom system with three-mirror [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 164-170. (in Chinese)
- [16] 常军, 沈本兰, 王希, 等. 宽波段、动态局部高分辨离轴主动反射变焦系统 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 7-13.  
CHANG J, SHEN B L, WANG X, *et al.* Off-axis reflective active zoom system with broad spectrum and dynamic local high-resolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (1): 7-13. (in Chinese)
- [17] CHENG X M, YE H Z, HAO Q. Synthetic system design method for off-axis stabilized zoom systems with a high zoom ratio [J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10592-10612.
- [18] ZHANG T C, WANG Y T, CHANG J. Design of unobscured reflective zoom system with three mirrors [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(7): 701-705.
- [19] ZHAO G X, ZHU J. Design method of off-axis reflective freeform zoom optical systems [J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28806-28820.
- [20] QI Y S, MENG Q Y, *et al.* Design method for large zoom ratio freeform reflective zoom systems based on initial configuration optimization using global algorithms [J]. *Optics Express*, 2025, 33 (3): 5134.
- [21] JI Z Y, CAO J J, CHANG J, *et al.* Optical design of off-axis reflective zoom imaging system based on wave-aberration control and focal-length approximation [J]. *Optics & Laser Technology*,

- 2024, 168: 109894.
- [22] YANG T, ZHU J, JIN G F. Design of a free-form, dual fields-of-view, dual focal lengths, off-axis three-mirror imaging system with a point-by-point construction-iteration process [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(10): 100801.
- [23] ZHAO G X, ZHU J. Off-axis zoom optical systems based on mirror rotation and their design method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177: 111031.
- [24] MOSKOVICH J. Catadioptric zoom lens: US4971428[P]. 1990-11-20.
- [25] Sigler R D. Infrared catadioptric zoom relay telescope with an aspheric primary mirror: US5089910 [P]. 1992-02-18.
- [26] 田铁印, 王红. 长焦距大口径连续变焦距光学系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9): 2369-2374.
- TIAN T Y, WANG H. Optical zoom system with long focal length and large aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2369-2374. (in Chinese)
- [27] VIZGAITIS J. Third generation infrared optics [C]. *Infrared Technology and Applications XXX-IV. Orlando, FL*. SPIE, 2008: 69400S.
- [28] VIZGAITIS J N. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses [C]. *International Optical Design Conference 2010. Jackson Hole, WY*. SPIE, 2010: 76522E.
- [29] QI Y S, MENG Q Y. Design method for zoom systems based on magnification ratio modulation of afocal off-axis three-mirror anastigmat systems[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 34988-35001.

#### 作者简介:



孟庆宇(1986—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间光学相机总体设计、光学系统设计理论与方法方面的研究。E-mail: mengqy@ciomp.ac.cn