

文章编号: 1002-1582(2026)03-0318-06

双远心两档变倍显微镜成像系统设计

冀勉^{1*}, 沈羽¹, 刘晓芳²

(1. 河南质量工程职业学院, 河南 平顶山 467000)

(2. 河南城建学院, 河南 平顶山 467041)

摘 要: 针对航空航天精密零部件的大视场、高分辨和高精度的检测需求, 设计了一种双远心两档变倍显微镜光学系统。提出在光轴方向以变倍组和补偿组作运动匹配的方法, 通过同步切换达到双远心大变倍比成像的目的, 并且为了减小机械运动结构的复杂度, 在变化成像倍率的过程中孔径光阑随补偿组一起运动。通过这种方法设计了一个双远心变倍显微镜光学系统, 其成像放大率分别为-0.4和-2.0, 且该光学系统的变倍比为5×, 畸变小于5.0μm, 双远心度误差小于0.35°, 光学总长为142mm。双远心两档变倍显微镜系统具有变倍比大、畸变小、变倍结构简单和易制造等优点, 在精密测量领域具有广阔的应用前景。

关 键 词: 光学设计; 变倍显微镜; 双远心结构; 光学系统

中图分类号: O439

文献标识码: A

Design of microscope imaging system for double-telecentric and two-position zoom microscope

Ji Mian^{1*}, SHEN Yu¹, LIU Xiaofang²

(1. Henan Quality Institute, Pingdingshan 467000, China)

(2. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467041, China)

Abstract: To meet the detection requirements of large field of view, high resolution, and high precision for aerospace precision components, a double-telecentric two-position zoom microscope has been designed. A method is proposed for motion matching between the zoom group and the compensation group in the optical axis direction, achieving dual telecentric imaging with a large zoom ratio through synchronous switching. To reduce the complexity of the mechanical motion structure, the aperture stop moves along with the compensation group during the zoom process. Using this method, a dual-telecentric zoom microscope optical system with imaging magnifications of -0.4 and -2.0 was designed. The zoom ratio of this optical system is 5×, with distortion less than 5.0 μm, dual-telecentric error less than 0.35°, and a total length of 142 mm. The dual-telecentric two-position zoom microscope system possesses advantages such as a large zoom ratio, low distortion, a simple zoom structure, and ease of manufacturing, making it have broad application prospects in the field of precision measurement.

Keywords: optical design; zoom microscope; double-telecentric structure; optical system

0 引 言

快速推进航空航天和光刻投影精密仪器的研制步伐是世界各国抢占科技制高点的国家战略目

标之一, 但在精密仪器的研制过程中, 如何对精密零部件实现高效高精度的缺陷检测是目前亟待解决的关键问题之一。精密仪器的高精度检测, 对它的检测仪器的要求更加严苛。例如, 检测显

收稿日期: 2026-01-12; 收到修改稿日期: 2026-03-09

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (25B460029)

作者简介: 冀勉 (1984—), 女, 讲师, 硕士, 从事光学成像与图像处理研究。

* 通讯作者: jimian202601@126.com

显微镜仪器的成像视场、分辨率和测量精度的要求会更高^[1-3]。一方面传统的显微镜光学系统仅有一个固定的成像放大倍率^[4-6],难以兼顾大视场和高分辨的成像需求;另一方面,精密部件的缺陷尺寸检测精度要求极高,常规的显微镜在测量尺寸时会受到非远心成像的限制,从而产生物体成像变形,这对精密测量是致命的^[7,8]。

针对以上问题,科研人员提出了双远心变倍显微镜成像系统并对其展开了研究,这类成像系统是大视场高精度缺陷尺寸精密测量的最佳选择之一^[9,10]。近十几年来,针对双远心变倍显微成像系统科研人员研究了多种光学设计方法^[11]。2020年,叶文炜等^[12]以机械补偿式结构设计了一种变倍比为 $2.5\times$,远心度误差为 0.1° 的双远心光学系统。2023年,李京宸等^[13]采用液体透镜设计一个变倍比为 $2\times$ 的双远心光学系统,远心度误差为 0.1° ,总长为 195mm ,由于液体透镜的焦距变化受限,因此难以实现大倍率变倍成像。2024年,林正煜等^[14]采用多组元全动型结构,设计出了高分辨三变倍大面阵双远心光学系统,其变倍比为 $1.6\times$,光学全长小于 362mm ,远心度误差小于 0.2° ,但该系统内各个组元的运动情况非常复杂。2025年,杨玉霞等^[15]采用单运动组元变倍的方法,设计了一个像方远心短波红外显微镜光学系统,其变倍比为 $4\times$ 。综上所述可知,由于大变倍比和双远心是两个相互矛盾的设计指标,因此目前的设计方法难以同时实现大变倍比和双远心这两个设计指标。

基于此,本文设计了一种由4个组元构成的双远心大变倍比显微镜光学系统,通过切换变倍组和补偿组沿光轴的移动位置实现倍率变化,并且孔径光阑位于补偿组前随补偿组一起运动,前固定组和后固定组的位置保持不变。最终设计出的两档双远心显微镜光学系统,其变倍比为 $5\times$,成像放大率分别为 -0.4 和 -2.0 ,物方远心度及像方远心度误差均优于 0.35° 。该设计方法缓解了大变倍比和双远心设计之间的设计矛盾,该成像系统在精密部件测量过程中,不仅能够实现较大范围的表面缺陷检测,而且还能够满足细节特征的高精度检测需求。

1 双远心变倍显微镜设计方法

基于双运动组元的两档双远心变倍显微镜的成像倍率变化原理如图1所示。变倍光学系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成。变倍显微镜光学系统在切换倍率的过程中,工作距保持不变且前固定组、后固定组和焦平面也固定不动,仅变倍组和补偿组沿光轴方向同步运动到相

互匹配的位置以实现变倍成像^[16]。

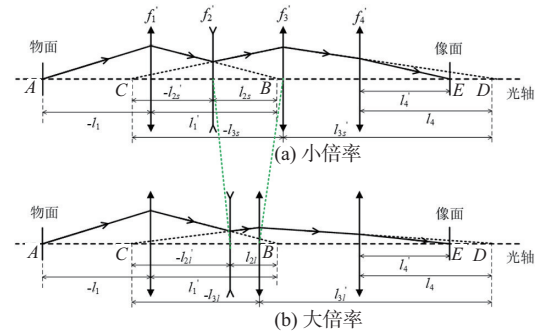


图1 两档双远心变倍显微镜变倍原理

变倍组成像的物点 B 和补偿组的像点 D ,在成像放大率切换过程中沿光轴的距离是恒定的,即可获得

$$\overline{BD} = l_3' - l_3 + l_2' - l_2 \quad (1)$$

式中,变倍组和补偿组的物距和像距分别为 l_2 、 l_2' 、 l_3 和 l_3' 。

在变倍光学系统中,成像放大倍率 β 、物距 l 、像距 l' 和焦距 f' 的关系为

$$\begin{cases} l = \frac{1-\beta}{\beta} f' \\ l' = (1-\beta) f' \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2)和式(1)可得

$$\overline{BD} = 2(f_2' + f_3') - f_2 \left(\beta_2 + \frac{1}{\beta_2} \right) - f_3 \left(\beta_3 + \frac{1}{\beta_3} \right) \quad (3)$$

式中,变倍组和补偿组的成像放大率分别为 β_2 和 β_3 。

若变倍显微镜系统分别处于最小和最大放大率时,变倍组和补偿组对应的成像放大率为 (β_{2s}, β_{3s}) 和 (β_{2l}, β_{3l}) ,根据式(3)可得

$$\begin{aligned} f_2 \left(\beta_{2s} + \frac{1}{\beta_{2s}} \right) + f_3 \left(\beta_{3s} + \frac{1}{\beta_{3s}} \right) = \\ f_2 \left(\beta_{2l} + \frac{1}{\beta_{2l}} \right) + f_3 \left(\beta_{3l} + \frac{1}{\beta_{3l}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

最大和最小成像放大率的比值为变倍光学系统的变倍比,即

$$\Gamma = \frac{\beta_1 \times \beta_{2l} \times \beta_{3l} \times \beta_4}{\beta_1 \times \beta_{2s} \times \beta_{3s} \times \beta_4} = \frac{\beta_{2l} \times \beta_{3l}}{\beta_{2s} \times \beta_{3s}} \quad (5)$$

式中,前后固定组的成像放大倍率分别为 β_1 和 β_4

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{l_1'}{l_1} \\ \beta_4 = \frac{l_4'}{l_4} \end{cases} \quad (6)$$

式中,物方工作距和前固定组的像距为 $-l_1$ 和 l_1' ,后固定组的物距和像距为 l_4 和 l_4' 。

当变倍光学系统位于最小成像放大倍率状态时，各组元之间的间隔可表示为

$$\begin{cases} d_{12s} = l_1' - \frac{1 - \beta_{2s}}{\beta_{2s}} f_2' \\ d_{23s} = -\frac{1 - \beta_{3s}}{\beta_{3s}} f_3' + (1 - \beta_{2s}) f_2' \\ d_{34s} = (1 - \beta_{3s}) f_3' - \frac{1 - \beta_4}{\beta_4} f_4' \\ d_{4f} = (1 - \beta_4) f_4' \end{cases} \quad (7)$$

式中， d_{12s} 和分别表示前固定组与变倍组的距离， d_{23s} 表示变倍组与补偿组的距离， d_{34s} 表示补偿组与后固定组的距离， d_{4f} 表示后固定组与像平面的距离。

当变倍光学系统位于最大成像放大倍率状态时，变倍组和补偿组沿光轴方向相互靠近，但变倍组和补偿组沿光轴的距离不能为负数，因此需满足

$$d_{23f} > 0 \quad (8)$$

当变倍光学系统位于最小成像放大倍率状态时，变倍组沿前固定组方向运动，补偿组沿后固定组方向运动，同理为了避免出现组元间的物理空间干涉需满足方程组

$$\begin{cases} d_{12s} > 0 \\ d_{34s} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

双远心大变倍比显微镜光学系统的初始结构计算比较困难，根据图1可知，光学系统的结构参数明显大于方程的数量。为了快速有效地获得具有像差校正潜力的初始结构，本文提出采用前研究人员设计的变倍光学系统结构作为初始结构，再通过建立优化函数进行光学系统优化，以快速获得双远心两档变倍显微镜光学系统。该设计方法的具体设计流程如下：

- (1) 查询相似指标的光学结构作为最初结构；
- (2) 首先，对该光学系统进行缩放，再逐步调整工作波段、工作距离、放大倍率、光学元件的厚度等参数进行初步优化；
- (3) 然后，再逐步控制光学系统的双远心度误差和畸变等设计指标参数，并对光学系统进行精细化优化；
- (4) 最后，对透镜玻璃材料进行 Hammer 优化，以校正不同放大倍率状态下光学系统的像差，从而满足最终的成像质量要求。

2 远心变倍光学系统设计

2.1 设计指标

本文选用像元尺寸大小为 $3.45\mu\text{m} \times 3.45\mu\text{m}$ ，

像素数为 $1920 \times 1200\text{pixels}$ 的探测器。为了兼顾大视场和高分辨成像的需求，双远心两档变倍显微镜光学系统的变倍比设计为 $5\times$ ，为了满足更多的应用场景需求其工作距设计为 50mm 。光学系统的设计指标如表1所示。

表1 光学系统设计指标

项目类型	数值
工作距离/mm	50
工作谱段/nm	480~660
最小放大率	-0.4
最大放大率	-2.0
成像高/mm	4
远心度误差/°	≤0.40

2.2 光学系统设计

本文选用文献[16]中的变倍成像系统当作初始结构，其光学结构如图2所示。采用第1节提出的设计流程在光学软件中建立优化函数进行设计，设计过程中建立的优化函数主要包括：(1) 使用操作数 REAB 和 OPLT 约束物方远心度误差和像方远心度误差；(2) 使用操作数 TTHI 和 OPLT 约束光学总长和物方工作距离；(3) 使用操作数 DIMX 控制全视场的畸变大小；(4) 使用操作数 PMAG 控制成像放大倍率和变倍比；(5) 在透镜材料替换时，选用低色散正透镜和高折射率负透镜的组合方式来校正光学系统的像差。优化目标是采用全视场在奈奎斯特频率 145lp/mm 处的 MTF 数值作为评价标准，MTF 数值越大越好。

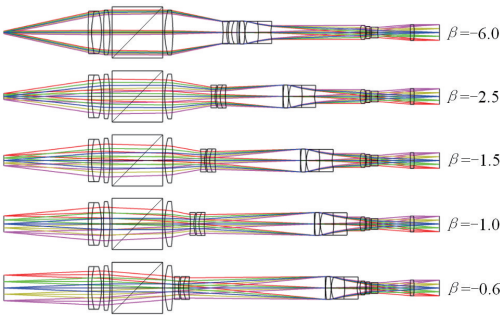


图2 文献[16]中的变倍显微镜二维结构图

图3是最终设计的两档变倍双远心显微镜光学结构，由10组13块球面透镜构成，孔径光阑位于补偿组前方保持相对位置恒定。光学系统全长为 142mm ，光学元件的最大直径为 25mm 。变倍显微镜的成像放大倍率分别为 -0.4 和 -2.0 ，物方数值孔径 NA 分别为 0.057 和 0.170 ，其对应的物方分辨率分别为 $6.2\mu\text{m}$ 和 $2.1\mu\text{m}$ 。在最大成像倍率切换到最小成像倍率过程中，变倍组与前固定组沿光轴的距离由 18.22mm 变化为 7.66mm ，同时补偿组与后固定组沿光轴的距离由 38.02mm 变化为 13.64mm 。

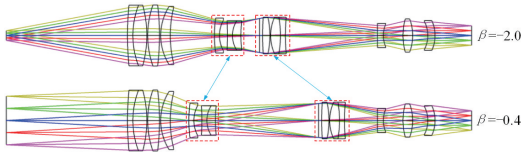


图3 双远心两档变倍显微镜光学结构图

两档变倍双远心显微镜光学系统的结构参数如表2所示，前固定组由3组4块球面透镜组成，变倍组由2组3块球面透镜组成，补偿组由2组3块球面透镜组成，后固定组由3块球面透镜组成。

表2 变倍显微镜光学系统的结构参数

组元	表面	半径/mm	厚度/mm	材料
前固定组	1	128.01	2.23	H-ZF62
	2	34.63	5.75	H-FK61
	3	-46.87	0.37	
	4	37.95	4.84	H-FK61
	5	-106.24	0.51	
	6	22.43	3.95	H-FK61
	7	48.18	/	
变倍组	1	51.88	2.09	D-LAF82L
	2	13.12	3.30	
	3	-93.15	2.06	H-ZLAF75A
	4	11.36	3.47	H-ZF88
	5	48.58	/	
补偿组	1	101.98	3.04	H-ZLAF53B
	2	-34.99	0.29	
	3	18.28	4.05	H-FK61
	4	-43.56	2.05	H-ZLAF75A
	5	80.41	/	
后固定组	1	-418.62	2.41	H-ZF71
	2	11.89	8.09	
	3	24.92	4.00	D-ZPK1A
	4	-19.55	6.24	
	5	-12.49	3.00	D-LAF79
	6	-14.62	/	

精密零部件的测量精度会受到光学系统的像方远心度误差的严重影响，所以光学系统的物方和像方远心度误差必须进行仿真分析，仿真分析结果如表3所示。当变倍显微镜的放大倍率分别为-0.4和-2.0时，其物方远心度和像方远心度都优于0.35°，即优于6.1mrad。

表3 变倍显微镜的双远心度误差

放大率	$\beta=-0.4$	$\beta=-2.0$
物方远心度误差	0.25°	0.35°
像方远心度误差	0.30°	0.30°

3 成像性能及加工性评估

3.1 成像性能评价

调制传递函数（MTF）是最能全面描述光学系统成像性能的指标之一。光学成像系统在所选探测器的奈奎斯特频率处的MTF数值越高，其成像性能越好。变倍显微镜光学系统的MTF曲线如图4所示。根据图4可知，当变倍系统的放大率分别处于-0.4和-2.0状态时，光学系统全视场在奈奎斯特频率145lp/mm处的平均MTF数值分别大于0.3和0.2。

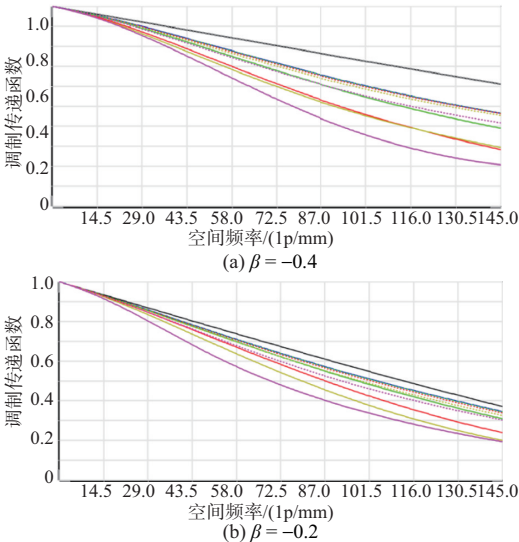


图4 MTF曲线图

物平面发出的光线束经过光学系统聚焦后在像平面的成像光斑即为光学系统的成像点列图，各视场的成像光斑的RMS半径越小其成像性能越好。变倍显微镜光学系统的点列图如图5所示。根据图5可知，当光学系统的放大率分别处于-0.4和-2.0状态时，光学系统全视场成像弥散斑的RMS半径分别小于3.5μm和3.0μm。

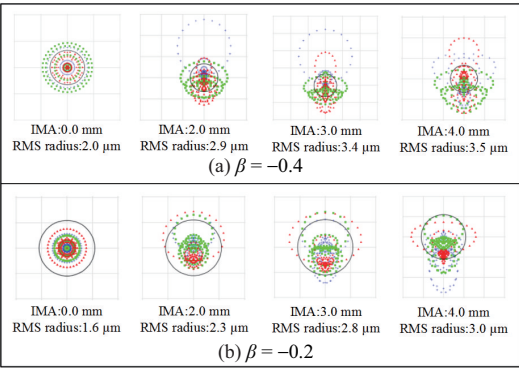


图5 点列图

光学系统的畸变会对精密部件的测量精度产生严重影响，光学系统的畸变越小其测量精度就越高。图6为变倍显微镜光学系统的畸变曲线，当

光学系统的放大率分别处于-0.4和-2.0状态时，光学系统全视场的最大畸变都小于5.0 μm 。

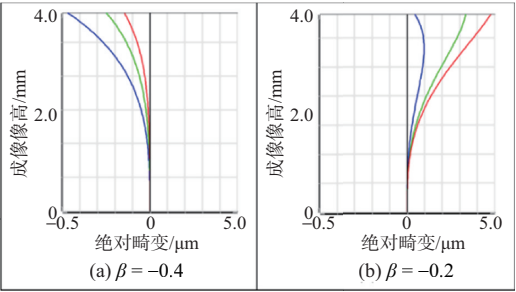


图 6 畸变曲线图

3.2 公差分析

公差分析能够提前评估光学系统的可制造程度，针对变倍显微镜光学系统的公差分配问题，采用光学设计软件中的公差分析功能进行分析。当变倍光学系统的放大率分别处于-0.4和-2.0状态时，对两个成像状态下每个透镜的公差灵敏度进行分析，取两个放大倍率状态下的最严公差。表4为变倍显微镜光学系统的公差分配情况。

表 4 公差分配表

公差类型	数值范围
透镜厚度/mm	± 0.02
透镜偏心/mm	± 0.02
透镜倾斜/ $^\circ$	± 0.02
透镜表面偏心/mm	± 0.02
光学表面光圈/光圈	≤ 3
表面不规则度/光圈	≤ 0.3
透镜材料折射率	± 0.001

根据表3中的公差范围，对变倍光学系统中两个放大倍率状态进行蒙特卡洛分析，蒙特卡洛分析的本量为600，评价指标为光学系统奈奎斯特频率145lp/mm处的MTF数值。分析结果如图7所示，当显微镜的放大率为-0.4和-2.0时，50%的模拟系统在奈奎斯特频率145lp/mm处全视场的平均MTF分别为0.26和0.12。

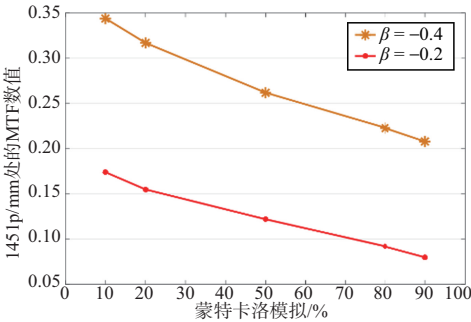


图 7 蒙特卡洛分析概率结果

4 结 论

针对光机电精密部件的大视场、高分辨和高

精度检测问题，设计了一种双远心变倍显微镜光学系统。在传统的机械补偿式连续变倍成像结构的基础上，提出采用基于四组元的双运动组沿光轴同步切换位置的方法以实现大变倍比和双远心成像，并对该设计方法进行了设计实例验证。设计的两档双远心显微镜光学系统由13片球面透镜组成，其变倍比为5 $\times$ ，成像放大率分别为-0.4和-2.0，全视场畸变小于5.0 μm ，双远心度误差都优于0.35 $^\circ$ 。该光学系统仅通过同步切换变倍组和补偿组沿光轴方向的位置即可实现变倍，并且具有成像视场可调、测量精度高、变倍结构简单和研发费用低等优点，在精密机械制造、精密光学测量以及工业检测等领域具有较大的应用前景。

参考文献:

[1] 刘凌鸿, 冯云, 农柳华, 等. 三倍率双远心镜头设计及视场对光学设计影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(07): 300—308.
Liu Linghong, Feng Yun, Nong Liuhua, et al. Three-magnification double-telecentric optical system and effect of field on optical design[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(07): 300—308.
[2] 韦晓孝, 戴振秋, 何晓冰, 等. 用于病理切片检测的大视场变焦显微镜光学系统设计[J]. 光学技术, 2025, 51(01): 7—12.
Wei Xiaoxiao, Dai Zhenqiu, He Xiaobing, et al. Design of the large-field zoom microscope optical system for pathological section detection[J]. Optical Technique, 2025, 51(01): 7—12.
[3] 杨军, 闫亚东, 李奇, 等. 基于双远心镜头的空间分辨PDV探头研制[J]. 光子学报, 2021, 50(07): 147—159.
Yang Jun, Yan Yadong, Li Qi, et al. Design of spatial resolution PDV probe based on double telecentric lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(07): 147—159.
[4] 王晶锦, 刘鑫, 姜子康, 等. 视频型手术显微镜光学成像研究进展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 54—67.
Wang Jingjin, Liu Xin, Jiang Zikang, et al. Progress in optical imaging of video-based surgical microscope[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(22): 54—67.
[5] 赵哲承, 朱嘉诚, 刘雪峰, 等. 用于三角测量大数值孔径双远心光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(07): 198—205.
Zhao Zhecheng, Zhu Jiacheng, Liu Xuefeng, et al. Optical design of bi-telecentric system with large numerical aperture for the triangulation measurement[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(07): 198—205.
[6] 曹一青. 一种用于机器视觉系统的双远心镜头设计[J]. 红外技术, 2022, 44(02): 140—144.
Cao Yiqing. Design of double telecentric lens using machine vision system. Infrared Technology[J], Infrared Technique, 2022, 44(02): 140—144.
[7] Li Jingchen, Zhang Kun, Du Jialin, et al. Design and theoretical analysis of the image-side telecentric zoom system using focus tunable lenses based on Gaussian brackets and lens modules[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164, 107494.
[8] Zhang Kun, Li Jingchen, Sun Si, et al. Optical system design

- of double-sided telecentric microscope with high numerical aperture and long working distance[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 23518—23532.
- [9] 张欣婷, 亢磊, 丁红昌, 等. 基于机器视觉的非球面双远心工业镜头设计[J]. *激光与红外*, 2019, 49(02): 230—234.
Zhang Xinting, Kang Lei, Ding Hongchang, et al. Industrial lens design of aspheric double telecentric based on machine vision[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(02): 230—234.
- [10] 蔡达岭, 范君柳, 吴泉英, 等. 基于机器视觉的小景深高分辨率双远心光学系统的设计[J]. *激光杂志*, 2020, 41(04): 24—28.
Cai Daling, Fan Junliu, Wu Quanying, et al. Design on bilateral telecentric optical system with small depth of field and high resolution for machine vision[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(04): 24—28.
- [11] 陈腾飞, 余飞鸿. 连续变倍显微镜综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(06): 62—72.
Chen Tengfei, Yu Feihong. Review of continuous zoom microscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(06): 62—72.
- [12] 叶文伟, 黄锦媛, 周天福, 等. 可连续变倍双远心系统设计及其凸轮曲线分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(05): 218—224.
Ye Wenwei, Huang Jinxuan, Zhou Tianfu, et al. Design of continuous zoom double telecentric system and analysis of cam curve[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(05): 218—224.
- [13] Li Jingchen, Zhang Kun, Du Jialin, et al. Double-sided telecentric zoom optical system using adaptive liquid lenses[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2), 2508—2522.
- [14] 林正煜, 张继艳, 孙丽婷, 等. 大面阵高分辨率三变倍双远心光学设计[J]. *激光与红外*, 2024, 54(05): 796—803.
Lin Zhengyu, Zhang Jiyuan, Sun Liting, et al. Large array high-resolution triple-zoom double telecentric optical design[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(05): 796—803.
- [15] 杨玉霞, 王艳云. 基于单运动组元的双视场像方远心显微镜设计[J]. *光学技术*, 2025, 51(02): 183—188.
Yang Yuxia, Wang Yanyun. Design of image-side telecentric microscope with dual fields of view based on a single moving group[J]. *Optical Technique*, 2025, 51(02): 183—188.
- [16] 王起, 张国芳. 基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(04): 921—931.
Wang Qi, Zhang Guofang. Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(04): 921—931.