

基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜设计

王起 张国芳

Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination

WANG Qi, ZHANG Guo-fang

引用本文:

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*, 2024, 17(4): 921-931. doi: 10.37188/CO.2023-0240

WANG Qi, ZHANG Guo-fang. Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 921-931. doi: 10.37188/CO.2023-0240

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0240>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高波前拟合精度的紧凑型音圈变形镜

Compact voice coil deformable mirror with high wavefront fitting precision

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1463 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0001>

结构光照明显微镜重建算法研究进展

Recent progress on the reconstruction algorithms of structured illumination microscopy

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1211 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0011>

紧凑型波长自动调谐脉冲CO₂激光器

Compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1007 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0107>

大视场光学显微成像技术

Large field-of-view optical microscopic imaging technology

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1194 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0098>

基于自由曲面的聚焦型太阳模拟器设计

Design of focusing solar simulator based on free-form surface

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1356 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0207>

基于一种透镜材料的宽谱段紫外成像仪光学设计

Optical design of a wide-spectrum ultraviolet imager based on a single material

中国光学 (中英文). 2022, 15(1): 65 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0127>

文章编号 2097-1842(2024)04-0921-11

基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜设计

王 起^{1*}, 张国芳²

(1. 滁州职业技术学院 传媒与设计学院, 安徽 滁州 239000;
2. 安徽财经大学 艺术学院, 安徽 蚌埠 233030)

摘要: 为了实现大靶面、大变倍比显微成像并解决同轴柯勒照明高集成度设计的问题, 本文提出了一种基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜光学系统设计方法。首先, 对望远镜和显微镜连续变倍光学系统的成像原理进行了分析, 并对正组补偿式变倍显微镜光学系统的设计原理进行了理论分析。然后, 提出把前固定组分解为准直组和汇聚组, 并在两镜组间设计分光镜, 并通过共用透镜组实现同轴柯勒照明系统的紧凑型设计。最后, 对大靶面连续变倍显微镜系统和与之匹配的同轴柯勒照明光学系统进行设计, 设计结果表明显微成像光学系统的变倍比为 10 \times , 工作距离为 60 mm, 物方最高分辨率为 1.75 μm , 同轴照明均匀性为 94.3%。该系统具有成像质量好、畸变小、变倍曲线平滑、体积小巧等特点, 实验验证了该设计方法的可行性。

关键词: 连续变倍显微镜; 同轴柯勒照明; 光学设计; 紧凑型

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0240

Design of large zoom ratio compact microscope based on coaxial Kohler illumination

WANG Qi^{1*}, ZHANG Guo-fang²

(1. School of Media and Design, Chuzhou Vocational and Technical College, Chuzhou 239000, China;
2. School of Art, Anhui University of Finance and Economics, Bengbu 233030, China)

* Corresponding author, E-mail: wangqi@chzc.edu.cn

Abstract: In order to achieve a large image plane and large zoom ratio in microscopic imaging and solve the problem of the high integration of coaxial Kohler illumination, we propose a design method for a compact optical system with a large zoom ratio based on coaxial Kohler illumination. First, the imaging principle of the continuous zoom optical system of telescopes and microscopes is analyzed, and the design principle of the positive group compensation zoom microscope is analyzed theoretically. Then, the front fixed group is divided into a collimation group and a convergence group, and a beam splitter prism is designed between the two lens groups to achieve a compact coaxial Kohler illumination optical system by sharing lens groups. Finally, the continuous zoom microscope with a large image plane and the matched coaxial Kohler illumina-

收稿日期: 2023-12-30; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 滁州职业技术学院提质培优《产品表现技法》课堂革命项目 (No. 2022TZPY046); 滁州职业技术学院工业设计特色专业教学资源库项目 (No. 2022jxzyk04)

Supported by Improvement and Optimization of Product Performance Techniques: a Revolutionary Project in the Classroom of Chuzhou Vocational and Technical College (No. 2022TZPY046); Industrial Design Specialty Teaching Resource Library Project of Chuzhou Vocational and Technical College (No. 2022jxzyk04)

tion optical system are designed. The design results show that the zoom ratio of the microscope optical system is $10\times$, the working distance is 60 mm, the highest resolution of the object side is $1.75\ \mu\text{m}$, and the coaxial illumination uniformity is 94.3%. The designed microscope has excellent imaging quality, minimal distortion, a smooth zoom curve, and a compact size, verifying the feasibility of the design method.

Key words: continuous zoom microscope; coaxial Kohler illumination; optical design; compact structure

1 引言

根据显微镜的成像倍率是否可调节, 可把显微镜分为固定成像倍率显微镜、多档位成像倍率显微镜和连续变倍显微镜^[1-3]。固定成像倍率显微镜有且仅有一个成像倍率, 多档位成像倍率显微镜有多个特定的放大倍率可清晰成像。与前两种不同, 连续变倍显微镜的成像放大倍率连续可调, 在连续变倍显微镜的成像过程中, 通过调节凸轮能够连续改变显微镜成像的放大倍率, 从而把被观测的微小物体进行连续的放大^[4-6]。因此, 连续变倍显微镜不仅可以对较大的感兴趣区域进行观测, 而且还能够对微米量级的物体进行分辨, 这是固定放大倍率显微镜所不具备的^[7-8]。如今, 连续变倍显微镜在航空航天制造、芯片制造、生物医学研究以及工业检测等诸多领域都得到了广泛的应用^[9-13]。

近十几年来, 随着变焦系统设计理论不断完善, 变倍显微镜的设计方法层出不穷。大致可分为两种类型: 第一种是利用液体变焦透镜实现变倍^[14], 第二种是利用透镜组运动实现变倍^[15]。例如, Lee 等人^[16]使用十几块透镜和 2 块可变焦液体透镜设计了一个无移动组元的 4 倍变焦医用腹腔镜光学系统; Jo 等人^[17]使用 9 块常规透镜和 2 块可调焦透镜设计了一款紧凑的 8 倍变焦光学系统, 但该系统的成像像高仅为 1 mm; Li 等人^[18]利用常规透镜和 4 块液体变焦透镜并结合光阑移动的方法, 设计了一个成像放大率为 $-0.8\sim-1.6$ 的 2 倍双远心变倍显微镜光学系统。Zhang 等人^[19]利用四组稳像原理, 设计了一个仅有 3 个运动组元的 40 倍连续变焦光学系统; Zhang 等人^[20]利用机械补偿变焦设计原理, 仅采用两种光学玻璃材料设计了一个耐辐照的 6 倍连续变焦光学系统。东莞锐星视觉技术有限公司研发了一款 8.3 倍变倍显微镜, 该系统的成像靶面为 $2/3$ 英

寸, 光学放大倍率为 $0.6\times\sim 5.0\times$, 但不具备同轴照明柯勒照明的特点。通过调研发现, 目前变焦显微系统难以将同轴柯勒照明与变焦成像相融合, 以满足大变倍比、高集成度的应用场景需求。

针对该问题, 本文提出了一种基于同轴柯勒照明的大变倍比紧凑型显微镜光学系统的设计方法。采用正组补偿式结构实现大变倍比连续变倍, 并将前固定组分解为两个组元后再引入分镜, 通过共口径的方式实现紧凑型设计。该方法不仅可以减小显微镜的光学口径, 而且还能够有效保障显微镜的长工作距。采用本文提出的方法, 设计了一个放大倍率为 $-0.6\sim-6.0$ 的连续变倍显微镜光学系统, 该光学系统的最大口径为 36 mm, 工作距离为 60 mm, 物方最高分辨率为 $1.75\ \mu\text{m}$ 。该连续变倍显微镜在微纳制造和机器视觉等领域具有较大的应用价值。

2 变倍显微镜光学系统设计原理

2.1 望远变焦与显微变倍系统的成像原理

通常情况下, 望远型变焦光学系统是在无穷远的成像条件下进行设计的, 若要实现有限距离的清晰成像, 需要移动调焦组元, 利用物像的对应关系进行调焦。望远型机械补偿式变焦光学系统的成像原理如图 1(a) 所示^[20], 光学系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 部分组成, 各组元对应的焦距分别为 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 和 f_4' 。通过凸轮旋转来改变变倍组和补偿组的相对位置以实现连续变焦, 并且在连续变焦的过程中焦平面相对前固定组的位置不变, 即光学系统的总长保持恒定。

根据光学系统成像的物像对应关系公式 (1) 可知, 当物距 l 恒定不变时, 像距 l' 将随着焦距 f' 的变化而改变, 即像平面沿光轴的调焦量不相等。由此可知, 当望远型变焦光学系统在对某一确定距离的物体进行清晰成像时, 光学系统的总长并非为一个恒定值。

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

然而, 连续变倍显微镜是专门对近距离的物体进行成像的, 通常情况下其成像时的物距远小于望远型变焦光学系统, 因此具有更大的成像放大倍率。下面对机械补偿式变倍显微镜光学系统的成像原理进行分析。

机械补偿式变倍显微镜光学系统与望远型机械补偿式变焦光学系统的组成结构相同, 都是由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 部分构成, 各组元对应的焦距同样分别为 f'_1 、 f'_2 、 f'_3 和 f'_4 。当光焦度分配分别为“+,-,+”时, 正组补偿式变倍显微镜光学系统的成像原理如图 1(b) 所示。在正组补偿式变倍显微镜光学系统中, 物平面、前固定组、后固定组和像平面的位置保持不变, 即光学系统的总长恒定, 连续变倍成像是通过改变变倍组和补偿组的相对位置来实现的。

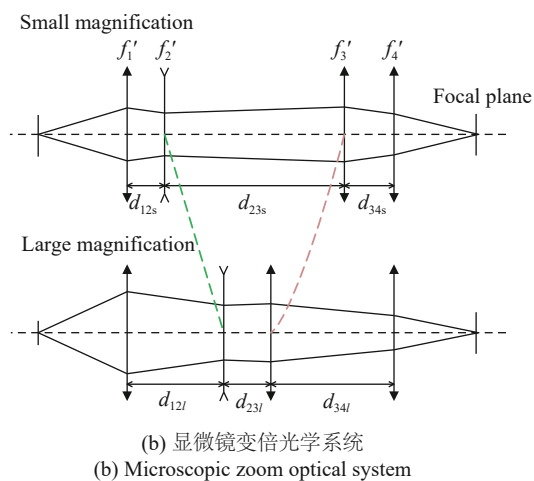
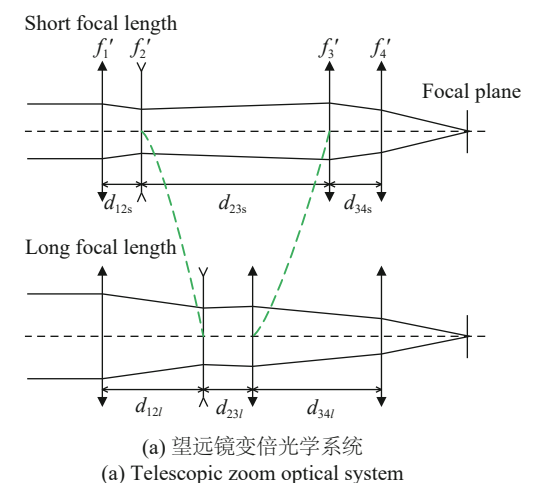


图 1 正组补偿变倍成像原理图

Fig. 1 Imaging principle diagram of the positive group compensation zoom optical system

当显微镜光学系统呈现为最小放大倍率时, 变倍组距离前固定组最近, 补偿组距离后固定组最近。当显微镜光学系统由较小放大倍率逐渐向较大放大倍率连续变化时, 变倍组将逐渐向右远离前固定组, 补偿组向左远离后固定组, 最后变倍组和补偿组的距离达到最小值, 此时显微镜光学系统的成像放大倍率最大。

由上可知, 变倍显微镜的设计原理与望远型变焦光学系统原理虽有差异, 但仍可以借鉴望远型变焦光学系统的设计方法^[21]。当变倍显微镜的透镜组沿光轴方向运动时, 光学系统的焦距发生了改变, 在物像共轭距为常数的情况下, 其物距和像距必然会发生改变, 所以放大倍率也会发生变化, 只是在线性变倍的过程中, 焦距的变化并不是一个线性变化的过程。

2.2 机械补偿式变倍显微镜设计原理

正组补偿连续变倍显微镜的成像原理如图 2 所示。在连续变倍显微成像过程中, 物平面、前固定组、后固定组和像平面的位置始终保持不变。下面将对连续变倍显微成像原理进行理论分析^[19-21]。

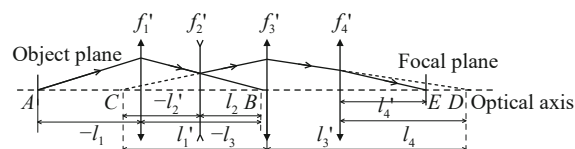


图 2 变倍显微镜成像原理图

Fig. 2 Imaging principle diagram of the zoom microscope

由图 2 可知, 物平面上的点 A 经过前固定组后成像于点 B, 再经过变倍组和补偿组依次成像于点 D, 最后经过后固定组成像于焦平面上的点 E 处。因此, 在连续变倍成像过程中, 无论变倍组和补偿组的相对位置如何改变, 变倍组的物点 B 和补偿组的像点 D 之间的距离将恒定不变, 由此可得公式 (2):

$$\overline{BD} = (l'_3 - l_3) - (l_2 - l'_2) = l'_3 - l_3 + l'_2 - l_2 \quad (2)$$

其中, l_2 和 l'_2 分别表示变倍组的物距和像距, l_3 和 l'_3 分别表示补偿组的物距和像距。

光学系统的焦距 f' 、物距 l 、像距 l' 和放大倍率 β 之间的关系为:

$$\begin{cases} l = \frac{1-\beta}{\beta} f' \\ l' = (1-\beta) f' \end{cases} \quad (3)$$

把公式 (3) 代入公式 (2), 化简可得:

$$\overline{BD} = 2(f'_2 + f'_3) - f'_2 \left(\beta_2 + \frac{1}{\beta_2} \right) - f'_3 \left(\beta_3 + \frac{1}{\beta_3} \right), \quad (4)$$

其中, β_2 和 β_3 分别为变倍组和补偿组的放大倍率。

由于点 B 到点 D 的距离为常数, 可得到正组补偿显微镜光学系统的变倍关系:

$$2(f'_2 + f'_3) - f'_2 \left(\beta_2 + \frac{1}{\beta_2} \right) - f'_3 \left(\beta_3 + \frac{1}{\beta_3} \right) = \text{Constant} \quad (5)$$

当显微镜的放大倍率最小时, 假设变倍组和补偿组对应的放大倍率为 (β_{2s}, β_{3s}) ; 当显微镜的放大倍率最大时, 假设变倍组和补偿组对应的放大倍率为 (β_{2l}, β_{3l}) , 由此可得到公式 (6)。

$$\begin{aligned} f'_2 \left(\beta_{2s} + \frac{1}{\beta_{2s}} \right) + f'_3 \left(\beta_{3s} + \frac{1}{\beta_{3s}} \right) = \\ f'_2 \left(\beta_{2l} + \frac{1}{\beta_{2l}} \right) + f'_3 \left(\beta_{3l} + \frac{1}{\beta_{3l}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

连续变倍显微镜光学系统的变倍比为最大放大倍率与最小放大倍率的比值, 即:

$$\Gamma = \frac{\beta_1 \times \beta_{2l} \times \beta_{3l} \times \beta_4}{\beta_1 \times \beta_{2s} \times \beta_{3s} \times \beta_4} = \frac{\beta_{2l} \times \beta_{3l}}{\beta_{2s} \times \beta_{3s}}, \quad (7)$$

其中, β_1 和 β_4 分别为前固定组和后固定组的放大倍率。

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{l'_1}{l_1} \\ \beta_4 = \frac{l'_4}{l_4} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, $-l_1$ 表示物方工作距, l'_1 表示前固定组的像距, l_4 和 l'_4 分别表示后固定组的物距和像距。

当连续变倍显微镜光学系统在最小放大倍率处各组元的放大倍率确定后, 最小倍率成像时各组元间的间隔为:

$$\begin{cases} d_{12s} = l'_1 - l_{2s} = l'_1 - \frac{1 - \beta_{2s}}{\beta_{2s}} f'_2 \\ d_{23s} = -l_{3s} + l'_{2s} = -\frac{1 - \beta_{3s}}{\beta_{3s}} f'_3 + (1 - \beta_{2s}) f'_2 \\ d_{34s} = l'_{3s} - l_4 = (1 - \beta_{3s}) f'_3 - \frac{1 - \beta_4}{\beta_4} f'_4 \\ d_{4f} = l'_4 = (1 - \beta_4) f'_4 \end{cases}, \quad (9)$$

其中, d_{12s} 、 d_{23s} 、 d_{34s} 和 d_{4f} 分别表示显微镜在最小

倍率时前固定组与变倍组的距离、变倍组与补偿组的距离、补偿组与后固定组的距离、后固定组与像平面的距离。

根据图 2 中的几何关系和方程 (3), 可得到变倍显微镜光学系统的总长 L :

$$\begin{aligned} L = f'_1 + 2(f'_2 + f'_3 + f'_4) - \beta_1 f'_1 - \left(\beta_{2s} + \frac{1}{\beta_{2s}} \right) f'_2 - \\ \left(\beta_{3s} + \frac{1}{\beta_{3s}} \right) f'_3 - \left(\beta_{4s} + \frac{1}{\beta_{4s}} \right) f'_4 \end{aligned} \quad (10)$$

3 变倍显微镜光学系统设计

3.1 设计指标

对成像光学系统来说, 大靶面探测器具有更大的成像视野, 但必然会增大光学系统的设计难度。传统的显微镜通常采用 1/2 英寸的探测器, 本文为了扩大成像视野, 选用 2/3 英寸的大靶面高分辨率探测器, 其像素数为 2448 pixel×2048 pixel, 像元尺寸为 3.45 μm×3.45 μm。变倍显微镜的工作距为 60 mm, 放大率范围为 -0.6~6.0, 最大放大倍率时的物方分辨率优于 1.8 μm。10 倍连续变倍显微镜的总体设计指标如表 1 所示。可根据公式 (11) 计算出显微镜光学系统的物方分辨率大小。

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (11)$$

其中 NA 和 λ 分别表示显微镜光学系统的物方数值孔径和工作波长。

表 1 变倍显微镜光学系统设计参数

Tab. 1 Design parameters of zoom microscope optical system

参数	数值
变倍比	10×
放大率	-0.6~6.0
工作距/mm	60
工作波段/nm	480~660
相机分辨率/pixel	2448×2048
像素尺寸/μm	3.45×3.45
照明方式	同轴柯勒照明

3.2 光学系统设计

根据2.2节可知,式(2)~式(10)属于欠定方程组,因此变倍显微镜光学系统的初始结构具有多重解。为了快速有效地获取较佳的初始结构,并对各组元像差校正难度进行有效评估,本文采用已设计的望远型连续变焦光学系统结构,并结合光学设计软件联合解算的方法,来获取连续变倍显微镜的初始结构。选用文献[21]中的30倍望远型变焦光学系统作为最初的结构,然后再利用理想透镜对四组元进行替换,最后在光学设计软件中建立评价函数进行初始结构计算,并评估四组元的像差校正难度。

利用上述初始结构计算方法,对10倍变倍显微镜光学系统的初始结构进行解算和优化,最后得到显微镜光学系统中各组元的焦距,如表2所示。

表2 四组元的初始焦距

Tab. 2 Focal lengths of the four groups in the initial structure

组元	前固定组	变焦组	补偿组	后固定组
焦距/mm	40.7	-29.3	54.4	1001.9

当显微镜光学系统的放大率分别为-0.6、-1.5和-6.0时,各组元之间的间距,如表3所示。

表3 四组元之间的间距

Tab. 3 Spacing between the four groups

放大倍率 β	组元距离				
	$-l_1$ /mm	d_{12} /mm	d_{23} /mm	d_{34} /mm	l_4' /mm
-0.6	60.0	36.02	98.06	36.75	49.17
-1.5	60.0	51.88	53.13	65.82	49.17
-6.0	60.0	82.53	3.20	85.10	49.17

连续变倍显微镜光学系统的理想结构如图3所示。理想的显微镜光学系统总长为220 mm,孔径光阑位于补偿组前方0.2 mm处。在连续变倍的过程中,孔径光阑与补偿组同步运动,孔径光阑的口径为11.0 mm,并保持恒定,显微镜光学系统的物方分辨率随着放大倍率的变化不断变化。

由图3可知,光学系统的放大倍率从-0.6连续变化到-6.0的过程中,变倍组逐渐远离前固定组,补偿组逐渐靠近前固定组。在连续变倍的过程中,两个运动组元的运动轨迹平滑。

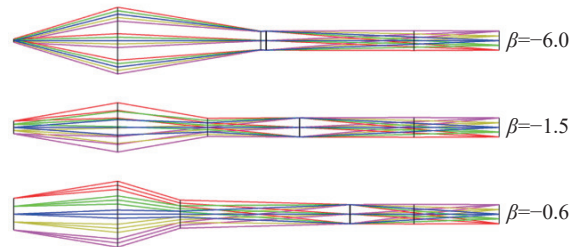


图3 变倍显微镜的理想模型结构

Fig. 3 Ideal model diagram of the zoom microscope

把表2和表3中的数据代入光学设计软件中进行透镜替换。此外,为了在减小显微镜前固定组口径的同时,实现同轴柯勒均匀照明,把前固定组拆分为两个组元,前组元进行成像光线准直,后组元对准直光线进行聚焦,其中间部位引入一块分光棱镜进行分光。最后设计出10×连续变倍显微镜光学系统的二维结构如图4所示。显微镜光学系统全长为245 mm,其中分光棱镜的边长为36 mm。由图4可知,在连续变倍过程中,显微镜光学系统始终保持着准双远心结构的特点。

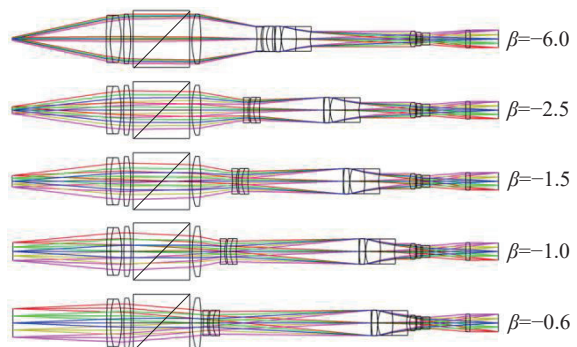


图4 10×连续变倍显微镜二维结构图

Fig. 4 2D structural diagram of the 10× continuous zoom microscope

连续变倍显微镜的结构参数如图5所示,变倍显微镜中的光学透镜全部采用成都光明(CDGM)玻璃材料。

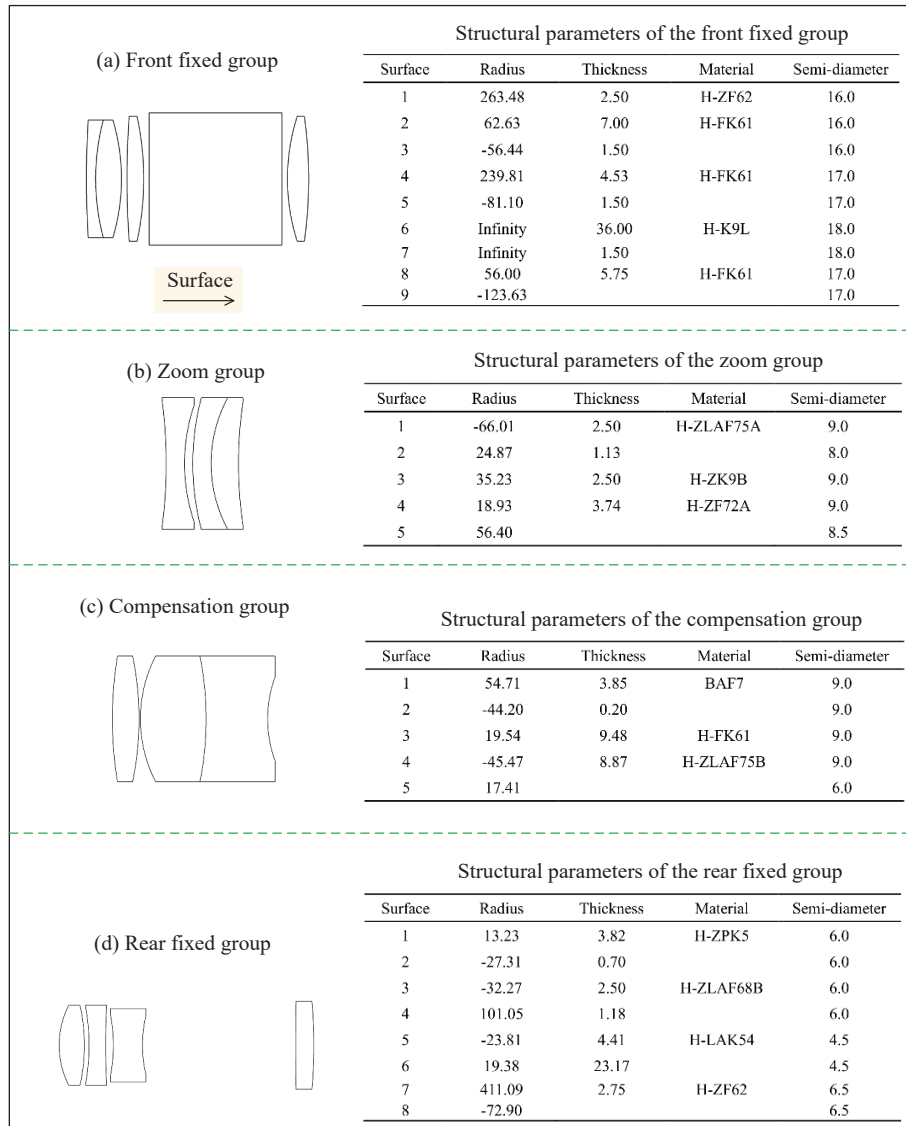


图 5 变倍显微镜结构参数图

Fig. 5 Structural parameter diagram of the zoom microscope

3.3 像质评价

连续变倍显微镜在变倍过程中,其物方空间分辨率是不断变化的。对于本文设计的变倍显微镜而言,当放大倍率为 -6.0 时,显微镜的放大倍率最大,此时光学系统的奈奎斯特频率最低;当放大倍率为 -0.6 时,显微镜的放大倍率最小,此时光学系统的奈奎斯特频率最高。

根据变倍显微镜的设计指标要求可知:当光学系统的放大倍率为 -6.0 时,物方分辨率要优于 $1.8\ \mu\text{m}$,本文设计值为 $1.75\ \mu\text{m}$ (根据光学系统的NA计算获得),此时光学系统对应的奈奎斯特频率为 $48\ \text{lp/mm}$;当光学系统的放大倍率为 -1.5 时,物方分辨率为 $4.6\ \mu\text{m}$,此时光学系统对应的奈

奎斯特频率为 $73\ \text{lp/mm}$;当光学系统的放大倍率为 -0.6 时,物方分辨率为 $9.0\ \mu\text{m}$,此时光学系统对应的奈奎斯特频率为 $93\ \text{lp/mm}$ 。由上述分析可知,变倍显微镜的最大奈奎斯特频率小于探测器的奈奎斯特频率 $145\ \text{lp/mm}$,因此,所选探测器可充分利用变倍显微镜光学系统的分辨率。

变倍显微镜光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图6(彩图见期刊电子版)所示。由图6可知,当变倍显微镜的放大率分别为 -0.6 、和 -1.5 时,光学系统在奈奎斯特频率处的MTF都接近衍射极限。当变倍显微镜的放大率为 -6.0 时,在奈奎斯特频率处的MTF大于 0.2 。

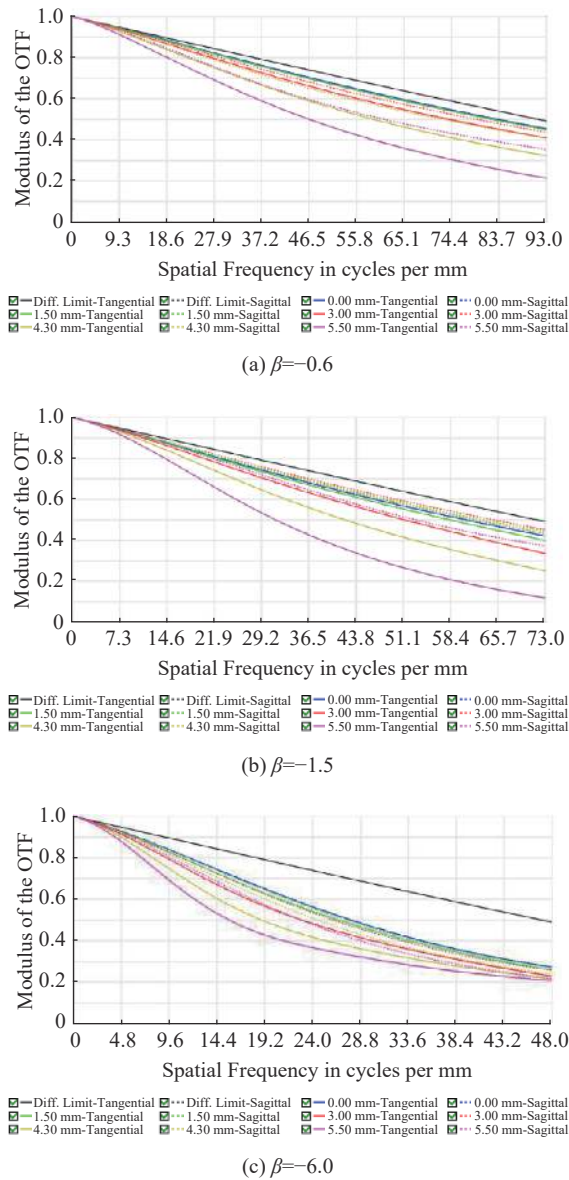


图 6 变倍显微镜 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF curves of the zoom microscope

变倍显微镜光学系统的点列图如图 7(彩图见期刊电子版)所示。由图 7 可知,当变倍显微镜的放大率分别为-0.6、-1.5 和-6.0 时,光学系统的成像光斑半径逐渐增大。这是因为不同放大倍率下光学系统对应的奈奎斯特频率不同。由图 7 可知,变倍显微镜光学系统的成像光斑半径满足成像要求。

连续变倍显微镜光学系统的畸变曲线如图 8(彩图见期刊电子版)所示。

由图 8 可知,变倍显微镜光学系统的畸变小于 0.05%, 较低的光学畸变为高精度显微测量提供了必要保障。

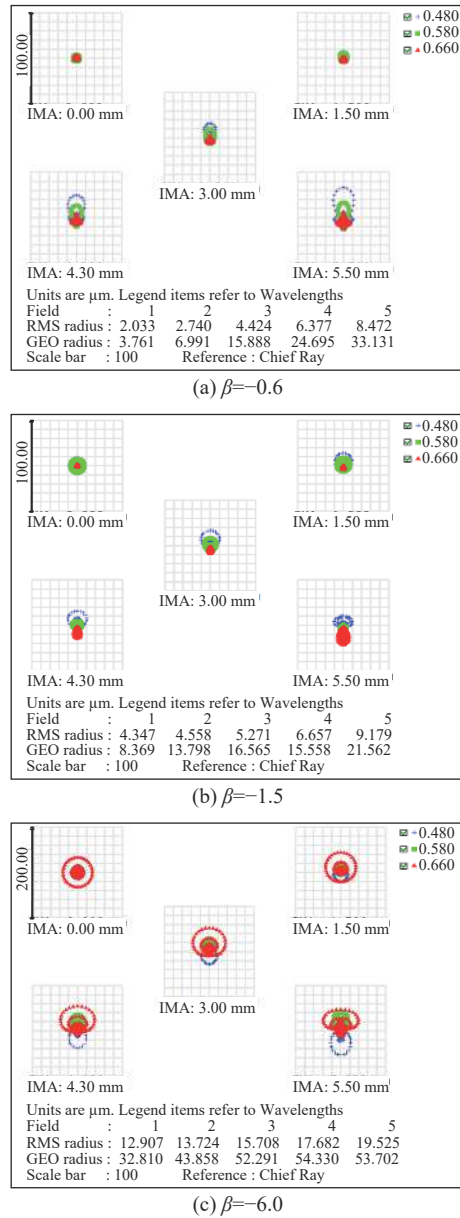
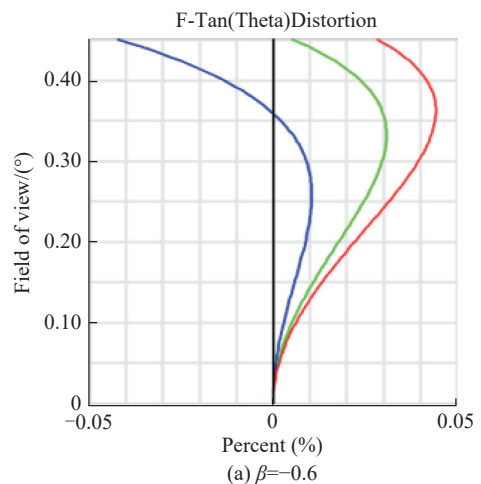


图 7 变倍显微镜点列图

Fig. 7 Spot diagram of the zoom microscope



(a) $\beta=-0.6$

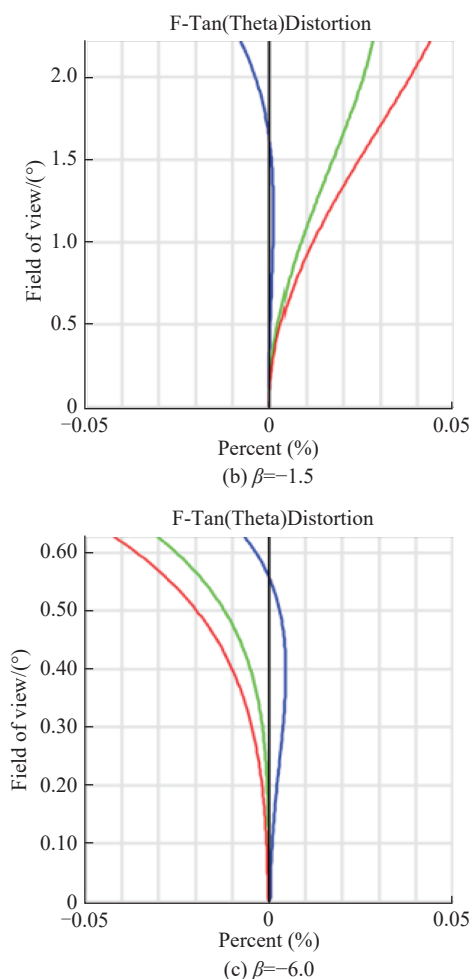


图 8 变倍显微镜畸变曲线图

Fig. 8 Distortion curves of the zoom microscope

4 均匀照明光路设计及总体分析

4.1 同轴柯勒照明光学系统设计

为了给变倍显微镜的物方视场进行充分照明,在进行同轴均匀照明光学系统设计时,均匀照明的光斑半径必须大于最大成像物高。在连续变倍成像的过程中,变倍显微镜的最大物高为 9 mm,因此本文把均匀照明光斑半径设计为 10.5 mm,以充分覆盖整个成像物面。选用 LED 作为照明光源,照明光源的长度为 6 mm。

临界照明方式的照明均匀性主要取决于照明光源本身的均匀性,然而柯勒照明方式的照明均匀性优于临界照明,且照明的均匀性与照明光源本身的均匀性无关^[22-24]。因此,本文选择柯勒均匀照明方式。根据柯勒照明的原理进行同轴均匀照明光学系统设计,在设计过程中采用逆向设计。具体设计步骤如下:

首先,把入瞳设计在显微镜光学系统的物平面上,均匀照明光学系统共用变倍显微镜中的分光棱镜及分光棱镜前的透镜组元,对从棱镜出射的光进行第一次成像;

然后,进行二次成像光学系统设计,在二次成像光学系统设计过程中,先采用理想透镜进行设计,然后再把光阑设置在理想透镜上,并利用评价函数把入瞳约束在显微镜的物平面上,在对理想透镜进行实体透镜替换的同时对入瞳位置和成像光斑进行优化;

最后,将整个均匀照明光学系统进行逆向光线追迹,并采用 Tracepro 软件对照明均匀性进行评价。

通过以上步骤对同轴柯勒均匀照明光学系统进行设计,最终设计的均匀照明光学系统的二维结构如图 9(彩图见期刊电子版)所示。为了使整个系统的结构更加紧凑,采用反射镜进行光路折叠,折叠后光学系统的总长为 167 mm,宽度为 70 mm,高度为 36 mm,后截距为 16.4 mm。

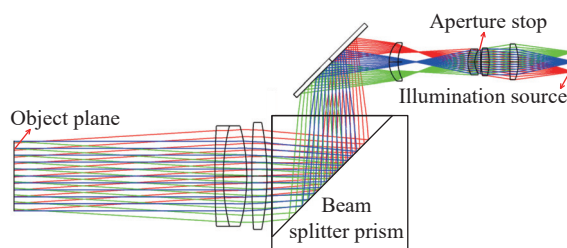


图 9 同轴柯勒照明光学系统

Fig. 9 Optical system of the coaxial Kohler illumination

同轴柯勒照明光学系统的结构参数如图 10 所示,光学系统中的光学透镜也全部采用 CDGM 玻璃材料。

Structural parameters of the Kohler illumination				
Surface	Radius	Thickness	Material	Semi-diameter
1	8.40	2.65	D-LAF50	6.5
2	11.10	20.85		5.5
3	8.00	2.08	H-ZF52	4.5
4	6.36	1.95		3.6
5	24.49	2.34	H-ZLAF69A	4.5
6	-15.95	6.18		4.5
7	158.87	2.53	H-LAK52	6.0
8	-15.58			6.0

图 10 柯勒照明光学系统结构参数

Fig. 10 Structural parameters of the Kohler illumination optical system

采用 TracePro 软件进行同轴照明均匀性仿真分析,在 TracePro 软件中光学元件透光面设置为 3 Layer AR,光学元件非透光面及机械结构的表面设置为 Black Paint,分光棱镜的分光面设置为半反半透。设置好光源后进行光线追迹分析。获得的照明强度分布情况如图 11(彩图见期刊电

子版)所示, 仿真分析结果表明同轴照明系统在物面 $\Phi 21\text{ mm}$ 内的照明均匀性约为 94.3%。

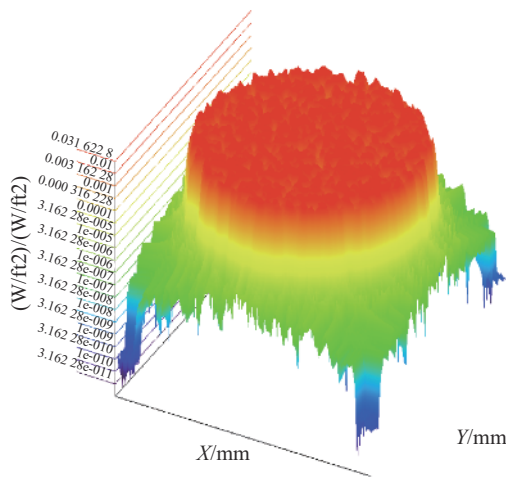


图 11 照明强度分布图

Fig. 11 Lighting intensity distribution

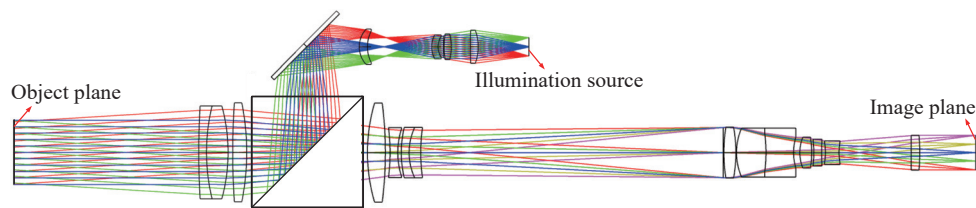


图 12 变倍显微镜总体光路图($\beta=-0.6$)

Fig. 12 Overall optical path diagram of the zoom microscope

表 4 变倍显微镜的物方分辨率

Tab. 4 Object-side resolution of the zoom microscope

放大倍率	物方NA	物方分辨率
$\beta=-0.6$	0.038	9.0 μm
$\beta=-1.5$	0.073	4.6 μm
$\beta=-6.0$	0.192	1.75 μm

4.3 公差分析

公差分析是显微镜光学镜头加工装配前分析的重要环节之一。利用光学设计软件中的公差分析功能可以快速有效地评估出变倍显微镜镜头的制造难度。综合考虑变倍显微镜光学系统在小倍率、中倍率和大倍率时各光学透镜的公差灵敏度, 最终确定变倍显微镜光学系统的公差分配情况如表 5 所示。

根据蒙特卡洛分析可得, 当采用表 5 的公差时, 变倍显微镜光学系统在各自奈奎斯特频率处的 MTF 分布规律如图 13(彩图见期刊电子版)所示。蒙特卡洛分析表明, 当变倍显微镜的放大率为 -0.6 、 -1.5 和 -6.0 时, 80% 的系统在各自的奈奎斯特频率处的 MTF 分别为 0.27、0.27 和 0.12。

4.2 总体光路合成设计

基于同轴柯勒照明的连续变倍显微镜的总体光路如图 12 所示。由图 12 可知, 均匀照明光学系统的照明光斑半径大于显微镜成像的最大物高。因此, 变倍显微镜在连续变倍过程中, 成像物面都始终保持着均匀照明的特点, 不会受成像倍率变化的影响。

在连续变倍过程中, 变倍显微镜的物方成像分辨率如表 4 所示。

从表 4 可知, 当显微镜的放大倍率为 -0.6 时, 物方的成像分辨率为 9.0 μm ; 当显微镜的放大倍率为 -1.5 时, 物方的成像分辨率为 4.6 μm ; 当显微镜的放大倍率为 -6.0 时, 物方的成像分辨率为 1.75 μm 。

表 5 变倍显微镜公差分配表

Tab. 5 Tolerance distribution of the zoom microscope

公差项	数值
光圈/fringe	≤ 3
元件厚度/mm	± 0.02
表面偏心/mm	± 0.01
元件倾斜($^\circ$)	± 0.01
元件偏心/mm	± 0.01
表面不规则度/fringe	≤ 0.3
折射率	± 0.001
阿贝数/%	± 0.5

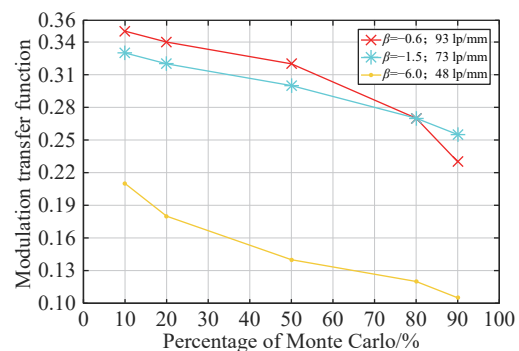


图 13 蒙特卡洛分析概率图

Fig. 13 Monte Carlo probability diagram

4.4 变倍曲线分析

变倍显微镜光学系统是在保证物平面和像平面位置恒定的前提下,通过移动变倍组和补偿组的相对位置实现系统的连续变倍,而凸轮是保证变倍组和补偿组沿着光轴以某种相对关系连续运动的关键器件。

在本文设计的变倍显微镜光学系统中,变倍组与补偿组之间的相对运动关系曲线如图 14 所示。从图 14 可知,该曲线平滑稳定无拐点,凸轮结构设计易于实现,在连续变倍成像过程中不会出现卡死的现象。

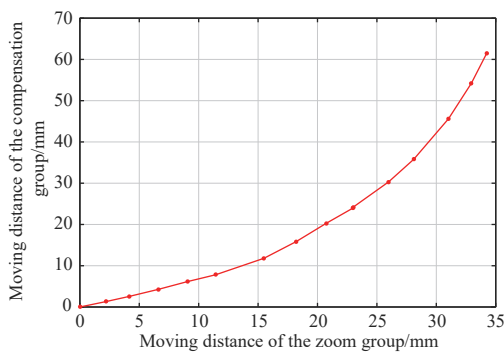


图 14 变倍运动曲线图

Fig. 14 Zoom curve diagram

5 结 论

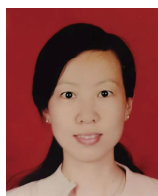
针对连续变倍显微镜光学系统大视野、高变倍比和柯勒同轴照明高集成度设计难以兼顾的问题,本文提出了一种基于柯勒同轴均匀照明的高变倍比紧凑型显微镜光学系统设计方法。本文提出把机械补偿式变倍显微镜光学系统的前固定组分解为两个组元,前组元用于光线准直,后组元对准直光线进行聚焦,中间则加入分光棱镜以实现共口径同轴照明。该方法不仅减小了前固定组元的光学口径,而且还通过共用光学透镜组的方法显著压缩了同轴柯勒照明光学系统的体积。采用本文提出的设计方法,利用球面透镜设计了一款放大倍率为 $-0.6\sim-6.0$ 的 10 倍连续变倍显微镜光学系统。该光学系统匹配 2/3 英寸探测器时,最大光学口径为 36 mm,全长为 245 mm,物方最高分辨率为 $1.75\ \mu\text{m}$ 。该变倍显微镜系统在航空航天、芯片制造以及生物医学研究等领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG K, LI J CH, ZHANG X, *et al.*. Design method of dual-band synchronous zoom optical system based on co-path zoom groups[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 170: 107791.
- [2] FAN Z CH, WEI S L, ZHU ZH B, *et al.*. Automatically retrieving an initial design of a double-sided telecentric zoom lens based on a particle swarm optimization[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7379-7386.
- [3] 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 J, LUO T J, LUO CH H, *et al.*. Optical system design of 30 mm~300 mm light weight zoom objective[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 51-57. (in Chinese).
- [4] ZHANG K, LI J CH, SUN S, *et al.*. Design method of dual-band synchronous zoom microscope optical system based on coaxial Kohler illumination[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41234-41251.
- [5] 贺磊, 张建隆, 杨振. 6.5 倍微小可见光变焦光学系统设计[J]. *光学仪器*, 2019, 41(2): 46-52.
HE L, ZHANG J L, YANG ZH. Design of a 6.5 times microscale continuous visible zoom optical system[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(2): 46-52. (in Chinese).
- [6] MIKŠ A, NOVÁK J. Paraxial imaging properties of double conjugate zoom lens system composed of three tunable-focus lenses[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 53: 86-89.
- [7] MIKŠ A, NOVÁK P. Paraxial design of four-component zoom lens with fixed position of optical center composed of members with variable focal length[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25611-25616.
- [8] LIANG D, WANG X Y. Zoom optical system using tunable polymer lens[J]. *Optics Communications*, 2016, 371: 189-195.
- [9] 马海宽, 曹焯, 褚东志, 等. 应用于海洋监测的水下变焦镜头设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 68-73.
MA H K, CAO X, CHU D ZH, *et al.*. Design of underwater zoom lens for marine monitoring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 68-73. (in Chinese).
- [10] 张欣婷, 亢磊, 吴倩倩. 超高倍变焦光学系统设计[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 466-469.

- ZHANG X T, KANG L, WU Q Q. Design of ultra-high zoom optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 466-469. (in Chinese).
- [11] FAN CH X, YANG B, LIU Y P, *et al.*. Zoom lens with high zoom ratio design based on Gaussian bracket and particle swarm optimization[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(11): 3217-3223.
- [12] MIKŠ A, NOVÁK P. Double-sided telecentric zoom lens consisting of four tunable lenses with fixed distance between object and image plane[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7020-7023.
- [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): 012201.
YAN J, LIU Y, SUN Q, *et al.*. Design of 10× MWIR continuous zoom optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012201. (in Chinese).
- [14] 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.
- [15] 刘圆, 叶德茂, 王建楹, 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 Y, YE D M, WANG J Y, *et al.*. Design of 50 mm~1000 mm zoom optical system with high zoom ratio[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1147-1152. (in Chinese).
- [16] LEE S, CHOI M, LEE E, *et al.*. Zoom lens design using liquid lens for laparoscope[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1751-1761.
- [17] 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.
- [18] LI J CH, ZHANG K, DU J L, *et al.*. Double-sided telecentric zoom optical system using adaptive liquid lenses[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 2508-2522.
- [19] ZHANG K, QU ZH, 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.
- [20] ZHANG K, ZHONG X, QU ZH, *et al.*. Design method research of a radiation-resistant zoom lens[J]. *Optics Communications*, 2022, 509: 127881.
- [21] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1263-1271. (in Chinese).
- [22] 陈鲁, 李志强. 面板检测用显微镜光学系统设计[J]. *光学仪器*, 2021, 43(1): 42-48.
CHEN L, LI ZH Q. Design of microscope optical system for panel inspection[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(1): 42-48. (in Chinese).
- [23] 王谭, 袁屹杰, 吴英春, 等. 连续变焦镜头凸轮曲线压力升角优化研究[J]. *电光与控制*, 2021, 28(1): 61-65.
WANG T, YUAN Y J, WU Y CH, *et al.*. Pressure angle optimization for cam curve of continuous zoom lens[J]. *Electronics Optics & Control*, 2021, 28(1): 61-65. (in Chinese).
- [24] LI J CH, ZHANG K, DU J L, *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.

作者简介:



王起(1979—),女,安徽滁州人,硕士,讲师,滁州职业技术学院讲师,2016年于东南大学获得硕士学位,主要研究方向为工业(产品)设计。E-mail: wangqi@chzc.edu.cn