

激光与光电子学进展

双波段长后工作距连续变焦光学系统设计

王金沙^{1,2}, 巩岩^{2,3*}, 高志山¹, 郑汉青², 张艳微², 汪路涵²¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所医用光学室, 江苏 苏州 215163;³济南国科医工科技发展有限公司, 山东 济南 250102

摘要 为满足目前生物医学活体成像研究领域对多波段荧光成像的迫切需求, 提出并设计了一种可见光(486~656 nm)、近红外(900~1700 nm)双波段长后工作距有限远变焦光学系统。针对双波段、长后工作距变焦系统带来的色差变化范围大、组分光焦度选择受限等技术难题, 通过理论分析, 选择了适合该双波段系统的变焦结构, 计算得到了系统 4 组变焦结构的初始光焦度, 并利用理想近轴面验证变焦方案初始结构的可行性, 在此基础上对系统每一组元进行独立像差设计, 共光路部分兼顾双波段像差进行优化, 后组采用分光棱镜对两个波段分光, 并针对双波段设计不同的后固定组以校正系统残余像差, 同时实现长后工作距下的双波段成像。系统公差特性良好, 变焦曲线平滑无拐点, 变倍过程中像面稳定, 成像质量良好。

关键词 几何光学设计; 变焦光学系统; 双波段成像; 近红外二区

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222748

Design of Dual-Band Optical System with Long Back Working Distance and Continuous Zoom

Wang Jinsha^{1,2}, Gong Yan^{2,3*}, Gao Zhishan¹, Zheng Hanqing², Zhang Yanwei², Wang Luhan²¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;²Medical Optical Research Laboratory, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, Jiangsu, China;³Jinan Guoke Medical Technology Development Co., Ltd., Jinan 250102, Shandong, China

Abstract A dual-band optical system with a long back working distance and limited far zoom is proposed and designed for visible light (486–656 nm) and near-infrared (900–1700 nm) to satisfy the urgent demand for multiband fluorescence imaging in biomedicine imaging research. A zoom structure suitable for the dual-band system is adopted to address technical problems such as the broad range of chromatic aberration variation and limited selection of component optical power caused by the dual-band long-back-working distance zoom system. The initial optical powers of four groups of zoom structures of the system are calculated. The feasibility of the initial structure of the zoom scheme is verified using the ideal paraxial plane. The independent aberration design is performed for each group element of the system. In the common optical path part, dual-band aberration is optimized. The rear group uses a splitter prism to separate the two bands. Different rear fixed groups are designed for dual bands to correct the residual aberration of the system, and dual-band imaging under the long back working distance is realized. The system exhibits good tolerance characteristics, the zoom curve is smooth without an inflection point, the image plane is stable during the zooming process, and the imaging quality is excellent.

Key words geometric optical design; zoom optical system; dual-band imaging; second near-infrared

1 引言

在生物医学研究领域, 光学成像技术因其具备非

侵入性、分辨率高、无放射毒性、实时成像等特点而被广泛应用^[1-2]。生物组织对不同波段光的吸收散射能力存在差异, 传统的可见光(400~750 nm)与近红外一

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-11-11; 录用日期: 2022-11-30; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(61975228, 62005307)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20210031)、济南高校“20条”(2019GXRC042)、苏州市姑苏重大创新团队(ZXT2019007)

通信作者: *gongy@sibet.ac.cn

区(750~900 nm)波段的成像存在探测深度较低,无法穿透深层组织等缺点,因此其主要应用范围局限于生物组织的浅层成像^[3]。近红外二区(Second near-infrared, NIR-II)波长范围为 900~1700 nm,该波段的生物组织自发荧光背景低,对光吸收率高,光子散射少,具备更深的生物组织穿透力和更高的空间分辨率。近年来,近红外二区荧光成像以其独特的优势,被广泛应用于生命科学研究的各个领域,并被生物学家视为最具潜力的下一代活体荧光影像技术^[4-6]。同时,连续变焦光学系统可以满足不同视场大小及放大倍率的观测需求,快速发展的生物医学检测领域对有限远共轭距连续变焦光学系统提出了更高的要求。2016 年 Bentley 等^[7]设计了一款用于近红外荧光引导手术的定制宽带 15 倍变焦镜头,该变焦系统由 3 个镜组组成,对近红外与可见光图像进行融合以达到手术导航作用,但该系统的近红外覆盖波段仅到达 900 nm,难以对更深层次的生物组织进行观测。2019 年吴合龙^[8]设计了一款可见光与近红外双变焦探测系统,该系统可在双波段下工作,由 2 个独立的变焦系统组成,系统体积较大,存在视差,且该系统为无限远共轭的望远类系统。

针对以上问题,设计一种能够同时具备对深层组织和浅表层组织成像的光学系统尤为必要。本文设计了一款可见光-近红外二区双波段有限远共轭连续变焦系统,该系统的变倍比达到 6 倍,成像视野为 25~150 mm,系统具有较长的后工作距,无需转换光路,可以同时实现对生物组织的可见光波段实时监测以及近红外二区荧光成像,本设计对当前的生物医学研究领域,尤其是大深度、高时空分辨率的动态实时观测,近红外荧光手术导航等先进方向具有重要价值。

2 设计理论

2.1 变焦系统基本原理

变焦光学系统一般通过移动变焦镜组来改变系统的焦距,移动补偿镜组使系统像面位置保持稳定。按照补偿方式的不同,变焦系统可分为光学补偿式和机械补偿式。常见的机械补偿式 4 组元变焦光学系统由前固定组、变倍组、补偿组以及后固定组 4 部分组成^[9]。当变焦系统为无限远共轭时,一般使用系统焦距 f 描述变焦系统的性能,即 $f=f_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4$ 。当变焦系统为有限远共轭时,使用系统放大倍率 M 描述变焦光学系统的性能^[10-11], M 可表示为

$$M = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4, \quad (1)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 分别为变焦系统 4 组元的垂轴放大率, β_1, β_4 为常数,主要作用为调整物像关系以及校正像差。通过移动变倍组改变变焦系统的整体放大倍率,同时移动补偿组使得系统像面位置保持稳定。补偿组光焦度为正的两组元变焦系统模型示意图,如图 1 所示。图 1 中: x_1, x_2 为两组元的移动量, l'_2, l_2 分别

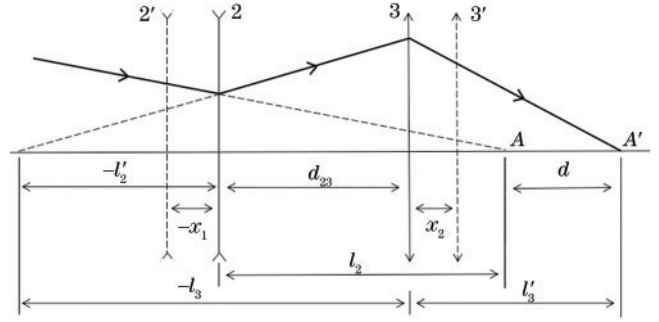


图 1 机械补偿式变焦组

Fig. 1 Mechanical compensated zoom group

为变倍组的物距和像距, l'_3, l_3 分别为补偿组的物距和像距, d_{23} 为变倍组与补偿组之间的距离, A 点为前固定组关于变倍组的像点, A' 点为后固定组关于补偿组的像点,在变倍过程中为保持像面稳定,需保证两点之间的距离 d 不变。

根据图 1 可得

$$d = (l'_3 - l_3) - (l_2 - l'_2), \quad (2)$$

由高斯公式可知

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

式中: β 为变焦组的垂轴放大率,联立式(3)、式(4)可得

$$d = 2(f_2 + f_3) - f_2 \left(\frac{1}{\beta_2} + \beta_2 \right) - f_3 \left(\frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right). \quad (4)$$

式中: f_2, f_3 为变倍组、补偿组的焦距; β_2, β_3 为变倍组、补偿组的放大倍率,当系统变焦组元处于初始长焦位置时,可得

$$\beta_3 = \frac{f_3}{f_3 + f_2(1 - \beta_2) - d_{23}}, \quad (5)$$

因此根据系统设计参数指标以及变倍要求,可以求出变焦系统在任一变倍时刻变焦组的相对位置、移动量以及放大率。在短焦处可得

$$\beta_1 = \frac{l_2^* + d_{12}^*}{l_1}, \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{l_1}{1/\beta_1 - 1}, \quad (7)$$

式中: f_1, β_1 为前固定组的焦距和放大倍率; d_{12}^* 为前固定组与变倍组之间的最小距离; l_2^* 为变倍组的物距; l_1 为系统的物距。由系统短焦处的放大倍率 M^* 、变倍组的放大倍率 β_2^* 和补偿组的放大倍率 β_3^* 可得

$$\beta_4 = \frac{M^*}{\beta_1 \beta_2^* \beta_3^*}, \quad (8)$$

系统后固定组的焦距 f_4 可以根据短焦处各组元的位置及系统总长确定。

2.2 变焦系统的像差模型

变焦系统的像差可以定义为 3 种类型:固定组的

像差;变焦组内的像差;变焦组移动产生的像差。变焦系统的波像差函数^[12]可表示为

$$W(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}, \gamma) = W_p(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) + W_k(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}) + W_k(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}, \gamma), \quad (9)$$

式中: $W_p(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho})$ 为固定组的波像差函数; $W_k(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho})$ 为变焦组内的波像差函数; $W_k(\mathbf{H}, \boldsymbol{\rho}, \gamma)$ 为变焦组移动产生的波像差函数, \mathbf{H} 为归一化视场矢量, $\boldsymbol{\rho}$ 为归一化光瞳矢量, γ 为归一化光焦度变化量。

对宽波段变焦系统而言,需格外关注色差的校正,而变焦系统的各组元需要满足光焦度方程和变焦过程的微分方程^[13]:

$$\begin{cases} f = f_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \beta_4 \\ \frac{1 - \beta_2^2}{\beta_2^2} f_2 d\beta_2 + \frac{1 - \beta_3^2}{\beta_3^2} f_3 d\beta_3 = 0^\circ \end{cases} \quad (10)$$

将光焦度方程对折射率作全微分并代入近似可得

$$\frac{\Delta f_c}{f} = \frac{\Delta f_{1c}}{f_1} + \frac{\Delta f_{2c}}{f_2} + \frac{\Delta f_{3c}}{f_3} + \frac{\Delta f_{4c}}{f_4} - \beta_2 \frac{\Delta f_{1c}}{f_2} - \beta_2^2 \beta_3 \frac{\Delta f_{1c}}{f_3} - \beta_2^2 \beta_3^2 \beta_4 \frac{\Delta f_{1c}}{f_4}, \quad (11)$$

式中:前四项为固定组和变焦组内的轴向色差;后三项代表由变焦组移动产生的轴向色差。 $\frac{\Delta f_c}{f}$ 为归化色差系数,等于阿贝数的倒数,表示系统中镜组的色散能力。

由式(11)可知,影响变焦系统轴向色差的因素有各镜组的色散能力、前固定组的轴向色散以及变焦组的放大倍率。当光学系统处于短焦处时,变焦组的放大倍率 β_2, β_3 一般小于 1,镜组之间的色差影响较小,各组元自身色散对系统色差影响较大。当光学系统处于长焦处时,变焦组的放大倍率 β_2, β_3 一般大于 1,此时若系统前组存在较大的色差,后组会将其进行放大从而导致光学系统色差较大。因此,在设计变焦光学系统时,对各组元的像差进行独立校正是一种非常有效的方法。

2.3 波段间消色差原理

普通的光学玻璃与光学胶在可见光与近红外二区 2 个波段内都具有非常高的透射率,但同一种光学玻璃在不同波段的色散能力并不相同,相较于可见光波段,近红外波段光学玻璃的色散特性要小得多^[14],光学材料的色散特性差异给宽波段以及多波段光学系统的设计带来了很大困难。从薄透镜理论出发,建立波段间消色差条件^[15]。对 2 个成像波段利用薄透镜成像关系,定义波段间色差系数 $P = \frac{(n_{1c} - n_{2c})}{(n_{1c} - 1)}$ ($1c, 2c$ 分别为 2 个波段的中心波长),并将波段间色差记为 L'_p ,可以得到

$$L'_p u'^2 - L_p u^2 = y^2 P \varphi, \quad (12)$$

式中: u, y, φ 分别为光线孔径角、光线入射高、元件光焦度,对光学系统中的 k 个透镜应用式(12)并相加

可得

$$L'_p u'^2 - L_p u^2 = \sum y_k^2 P_k \varphi_k, \quad (13)$$

式(13)即为薄透镜模型下的波段间色差的计算公式。根据光学系统的瑞利标准判据可得波段间消色差条件为

$$|L'_p| \leq 2\lambda_{1c} F^2 + 2\lambda_{2c} F^2, \quad (14)$$

式中: F 为系统 F 数, $\lambda_{1c}, \lambda_{2c}$ 分别为各波段中心波长。

因此在设计双波段光学系统时,消色差的方法主要有:1) 通过控制波段间的相对离焦量小于两个波段焦深之和来对系统进行优化;2) 使用波段间色散特性相差较小的材料以及控制光线在元件表面入射高度等。

3 光学系统设计

3.1 设计要求及指标

需设计一款能同时实现对生物组织的可见光波段实时监测以及近红外二区荧光成像的双波段有限远共轭连续变焦系统。选取的波段区间为可见光与近红外二区,选择不同的探测器以满足相应波段的成像需求,可见光 CCD 相机像元数为 2688 pixel × 2200 pixel,像元尺寸为 4.54 μm × 4.54 μm,近红外 InGaAs 相机像元数为 640 pixel × 512 pixel,像元尺寸为 15 μm × 15 μm。将工作距离确定为 300 mm,物方成像视野确定为 25~150 mm 以实现对有限远处生物组织不同放大倍率下的成像功能。另外,为满足双波段荧光成像的需求,需在系统后组放置滤光片,考虑到滤光片机构的安装及切换,光学系统需具备较长的后工作距,至少为 60 mm,设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Table 1 Design requirements

Parameter	Value
Object size (diagonal) /mm	150-25
Image size (diagonal) /mm	12.29 (Visible)
	15.77 (NIR II)
Magnification (image to object)	12.2-2.03 (Visible)
	9.5-1.58 (NIR II)
Zoom ratio	6×
Wavelength bands /nm	486-656 (Visible)
	900-1700 (NIR II)
Object working distance /mm	300±20
Image working distance /mm	≥60

3.2 双波段变焦系统初始结构设计

机械补偿式变焦系统的变倍组光焦度一般为负,当补偿组光焦度为正时,系统元件的口径较小,有利于双波段变焦系统的像差校正,而正组补偿式变焦系统前固定组的光焦度一般为正,当后固定组的光焦度也为正时,前固定组可以保持较小的光焦度,光焦度越小其色差也越小^[9,16]。因此,为实现所提的可见光-近红

外双波段变焦光学系统,将系统的 4 组光焦度分配选为“+,-,+”形式。另外,孔径光阑的位置也是变焦系统设计中影响系统性能的一个重要因素,设计孔径光阑位于变倍组和补偿组之间,整个变焦系统具有对称性,且口径较小,可使系统在镜片数量更少、总长更短的情况下满足更高的设计指标^[17]。

可见光与近红外 2 个波段的像差存在较大差异,系统放大倍率不同,且正组补偿式变焦结构比负组补偿式结构的后工作距更短,单一的共光路光学系统结构难以满足双波段长后工作距的设计要求。因此,设计的变焦系统中前固定组、变倍组以及补偿组采用共光路结构,针对可见光与近红外 2 个波段分别设计不同的后固定组并采用反远距型光组结构,以满足双波段长后工作距的设计指标。

根据式(1)~式(8)计算并结合光学设计软件解算得到变焦光学系统各组元的焦距如表 2 所示,其中

G1~G4 分别为变焦系统的前固定组、变倍组、补偿组、后固定组。系统物高在 150、76 和 25 mm 处各组元之间距离如表 3 所示,其中 d_1 为前固定组到变倍组之间的距离, d_2 为变倍组到孔径光阑之间的距离, d_3 为孔径光阑到补偿组之间的距离, d_4 为补偿组到后固定组之间的距离。系统初始结构理想模型,如图 2 所示。

表 2 变焦系统初始结构四组元焦距

Table 2 Initial structure of zoom system four component focal length

Group	Focal length /mm	
	Visible	NIR II
G1	139.03	139.03
G2	-67.73	-67.73
G3	90.83	90.83
G4	121.05	162.50

表 3 变焦系统初始结构各组元之间距离

Table 3 Spacing between groups of initial structure of zoom system

unit: mm

Spacing between groups	Object size (diagonal) is 150 mm	Object size (diagonal) is 76 mm	Object size (diagonal) is 25 mm
d_1	28.44	78.67	122.33
d_2	116.58	66.36	22.69
d_3	76.14	60.90	11.77
d_4	Visible	10.00	74.37
	NIR II	37.43	52.67

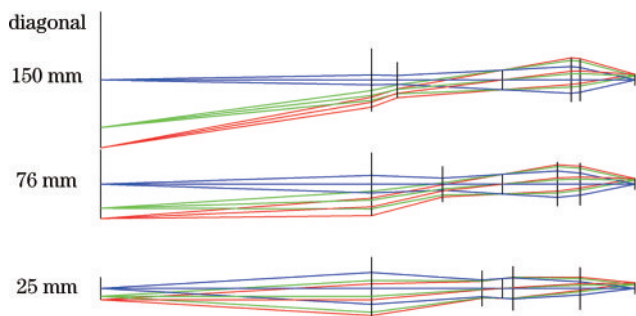


图 2 变焦系统初始结构理想模型

Fig. 2 Ideal model of initial structure of zoom system

4 光学设计结果与分析

4.1 设计结果

本系统要求在可见光、近红外二区 2 个波段放大倍率不同的情况下实现双波段同时连续变焦,由于这 2 个波段较宽,中心波长相差两倍,导致 2 个波段处的像差差异较大。为满足设计要求,需要对变焦系统的结构进行重新设计。在传统的变焦系统结构基础上,将系统的后固定组进行拆分,一部分作为公共后固定组,另外一部分对可见光、近红外 2 个波段分别进行单独设计。重新设计后变焦系统由共光路组、分光棱镜、可见光后固定组以及近红外后固定组 4 部分组成。其中,共光路组由前固定组、变倍组、补偿组和公共后固

定组 4 部分构成,这部分同时透射可见光和近红外光,并实现了双波段同步变焦。分光棱镜透射可见光,反射近红外光,可见光后固定组与近红外后固定组分别校正其各自的残余像差,并且将光线聚焦在各自的探测器上,系统的结构布局如图 3 所示。

前固定组采取两组双胶合透镜结构,分别使用材料 HLAF3B 与 HLAK4L、HLAF55、HFK69 组合对前组的色差进行校正。变倍组采用典型的单透镜+双胶合结构形式,镜组整体行程较大,承担整个光学系统的变倍作用,单透镜使用 HPK62A 材料,双胶合透镜使用 HZPK2A 与 HLAK53B 材料,以上 3 种材料在可见光与近红外 2 个波段间的色散特性差异较小,在对波段内消色差的同时保证镜组具有较小的波段间色差。补偿组同样采用 2 组双胶合透镜的结构,可保证其色差的独立校正,镜组的光焦度为正,主要作用是补偿因变倍组移动引起的像面漂移。近红外后固定组采用两组双胶合透镜校正近红外波段的残余像差,可见光后固定组采用 6 组镜片校正其残余像差,并使用反远距型光组结构以满足其后工作距的设计指标,二者主要用于平衡各自波段的位置色差与倍率色差。

系统每一组镜组的设计均遵循独立像差设计原则^[14],并且共光路部分在优化过程中需同时兼顾 2 个波段的像差,但双波段变焦系统在双波段不同变倍状

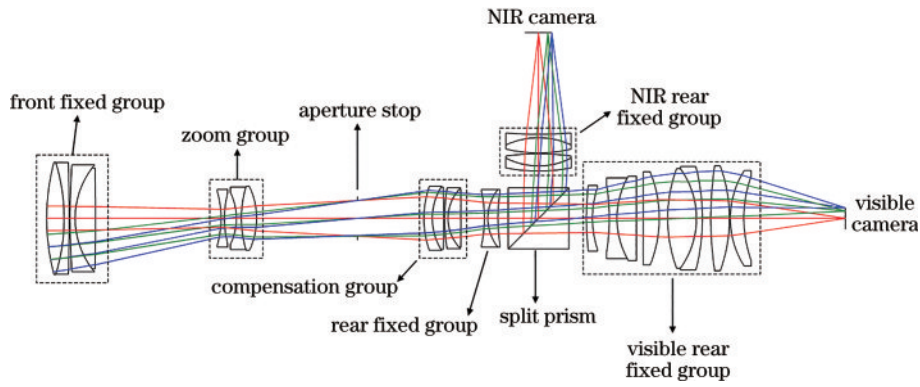


图 3 变焦光学系统结构布局

Fig. 3 Structural layout of zoom optical system

态下的像差差异较大,因此选取系统在 2 个波段下物高分别为 150、130、110、93、76、60、46、34、25 mm 的一系列变倍状态作为多重结构进行优化设计,使用垂轴光线像差作为优化函数,采用系统各多重结构不同视场下的弥散斑与调制传递函数作为评价标准。优化过程中,为平衡双波段不同变倍状态下的像差,可对不同变倍状态设置不同的优化权重。最终得到变焦系统在最大物方视野与最小物方视野处的总体结构如图 4 所示,物方标准工作距离为 300 mm,可以通过移动前固定组改变物距来实现 280~320 mm 范围内的清晰成像。系统在 2 个波段都具有较长的后工作距,给滤光片机构预留了足够的空间。变焦过程中,物方视野范围从 150 mm 到 25 mm 连续均匀变化,可见光波段放大倍率为 12.2~2.03,近红外波段放大倍率为 9.5~1.58,实现了 6× 的连续变倍功能。系统最终各组元焦距如表 4 所示,系统物高在 150、76、25 mm 处各组元之间距离如表 5 所示。另外,整个系统的 15 组共 25 片透镜均采用球面镜,易于加工制造。

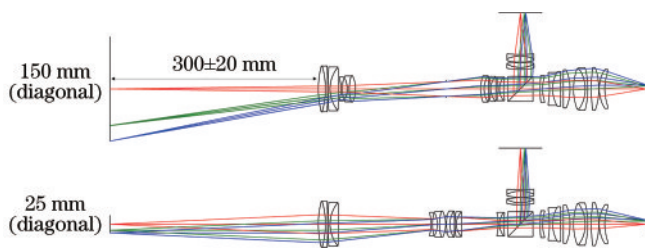


图 4 变焦系统总体结构示意图

Fig. 4 Overview of the zoom system architecture

表 4 变焦系统 4 组元焦距

Table 4 Four component focal length of zoom system

Group	Focal length /mm	
	Visible	NIR II
G1	160.70	161.00
G2	-74.90	-75.16
G3	74.94	75.10
G4	125.69	124.60

表 5 各组元之间距离

Table 5 Spacing between groups

unit: mm

Spacing between groups /mm	Object size (diagonal) is 150 mm	Object size (diagonal) is 76 mm	Object size (diagonal) is 25 mm
d_1	3.70	74.28	133.50
d_2	130.27	59.70	0.50
d_3	49.80	39.18	0.50
d_4	3.30	13.92	52.61

4.2 像质评价

光学系统主要的像质评价方式有点列图和调制传递函数 (Modulation transfer function, MTF)。点列图可以较为准确地表示出光学系统像面上成像光线的弥散情况,点列图的均方根 (Root mean square, RMS) 半径越小说明系统的成像质量越好。MTF 表示光学系统成像调制度的变化情况,可以反映出系统对物体不同频率成分的传递能力,通过 MTF 曲线可以较为全面地评价光学系统的成像质量。

图 5 为可见光波段系统的点列图 (以 3 个变倍状态为例),图 5 中显示可见光波段弥散斑的 RMS 最大值为 4.4 μm ,其在一个像元尺寸内 (4.54 μm)。图 6 为可见光波段系统各视场处的 MTF 曲线,可以看出在奈奎斯特频率为 111 lp/mm 处的可见光波段各变倍状态处传递函数值轴上视场大于 0.5,轴外视场大于 0.4,成像质量良好,接近衍射极限。

图 7 为近红外波段系统的点列图,该波段弥散斑的 RMS 最大值为 14.1 μm ,其在一个像元尺寸内 (15 μm),满足系统的成像质量要求。图 8 为近红外波段系统各视场处的 MTF 曲线,可以看出在奈奎斯特频率为 33 lp/mm 处的各变倍状态处传递函数值轴上视场大于 0.6,轴外视场大于 0.5,成像质量接近衍射极限。

4.3 系统凸轮曲线

机械补偿式变焦光学系统需通过凸轮机构来带动变倍组与补偿组进行移动以实现变倍的功能,因此凸轮曲线是变焦系统设计后期非常重要的一个环节。

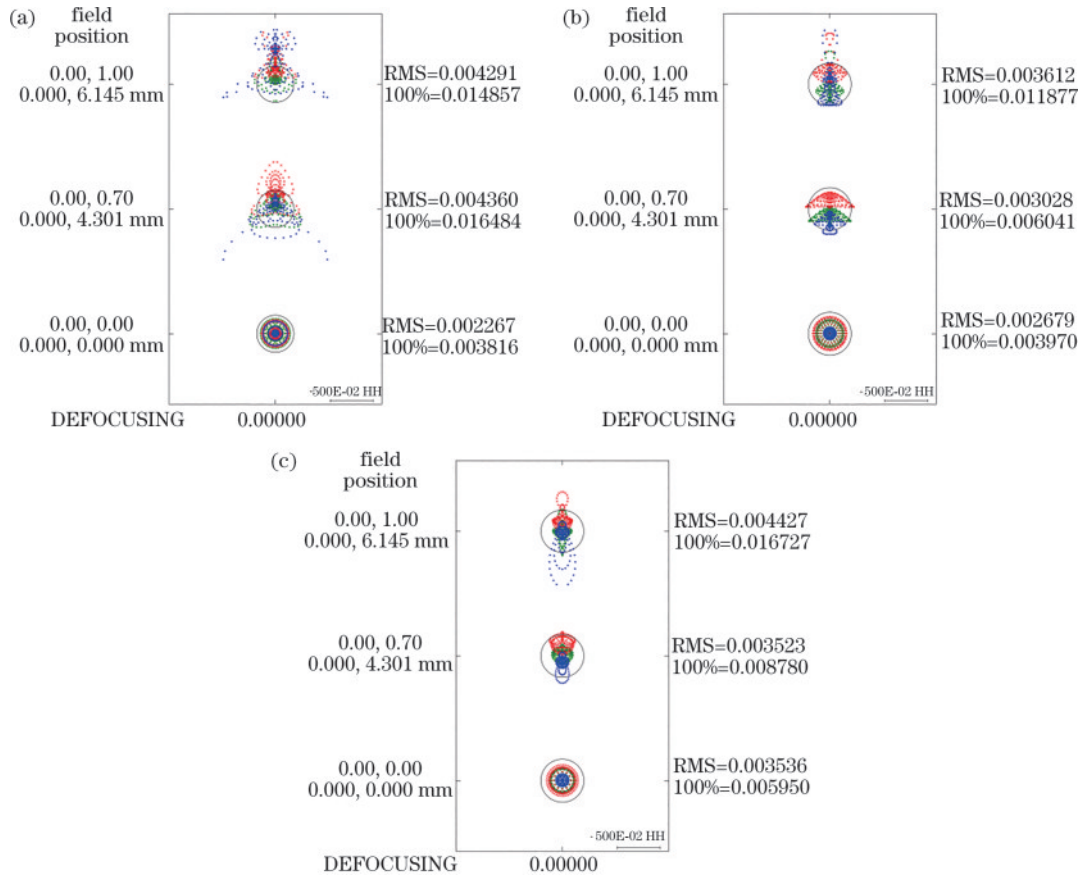


图 5 可见光波段系统点列图。(a)物高为 150 mm;(b)物高为 76 mm;(c)物高为 25 mm

Fig. 5 Spot diagram of visible light system. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

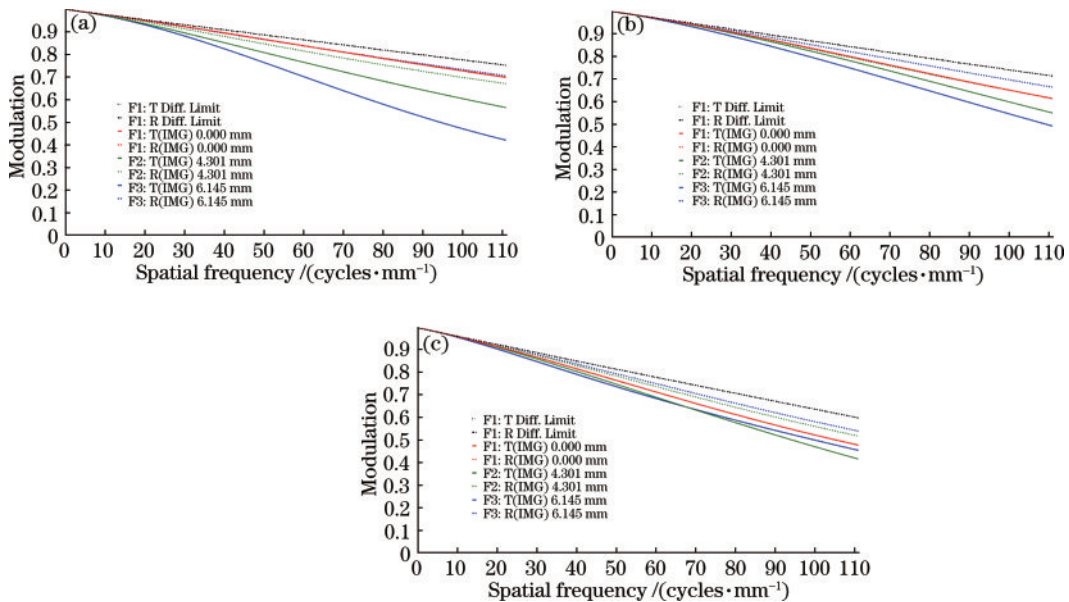


图 6 可见光波段系统调制传递函数。(a)物高为 150 mm;(b)物高为 76 mm;(c)物高为 25 mm

Fig. 6 MTF of visible light system. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

图 9 为系统变焦过程中变倍组与补偿的运动轨迹示意图,通过获取系统在一系列不同变倍状态下变倍组与补偿组的位置点进行拟合,得到移动组的变焦曲线如图 10 所示,横轴 q 表示变倍组与补偿组的位移变化量,纵轴表示对应变倍状态下的物方视野大小(25~

150 mm)。图 10 中曲线表明,2 个移动组的变焦曲线平滑无拐点,易于加工制造。

4.4 公差分析

以系统前固定组和后焦面之间的距离作为公差补偿,综合考虑变焦系统在 2 个波段各个变倍状态下各

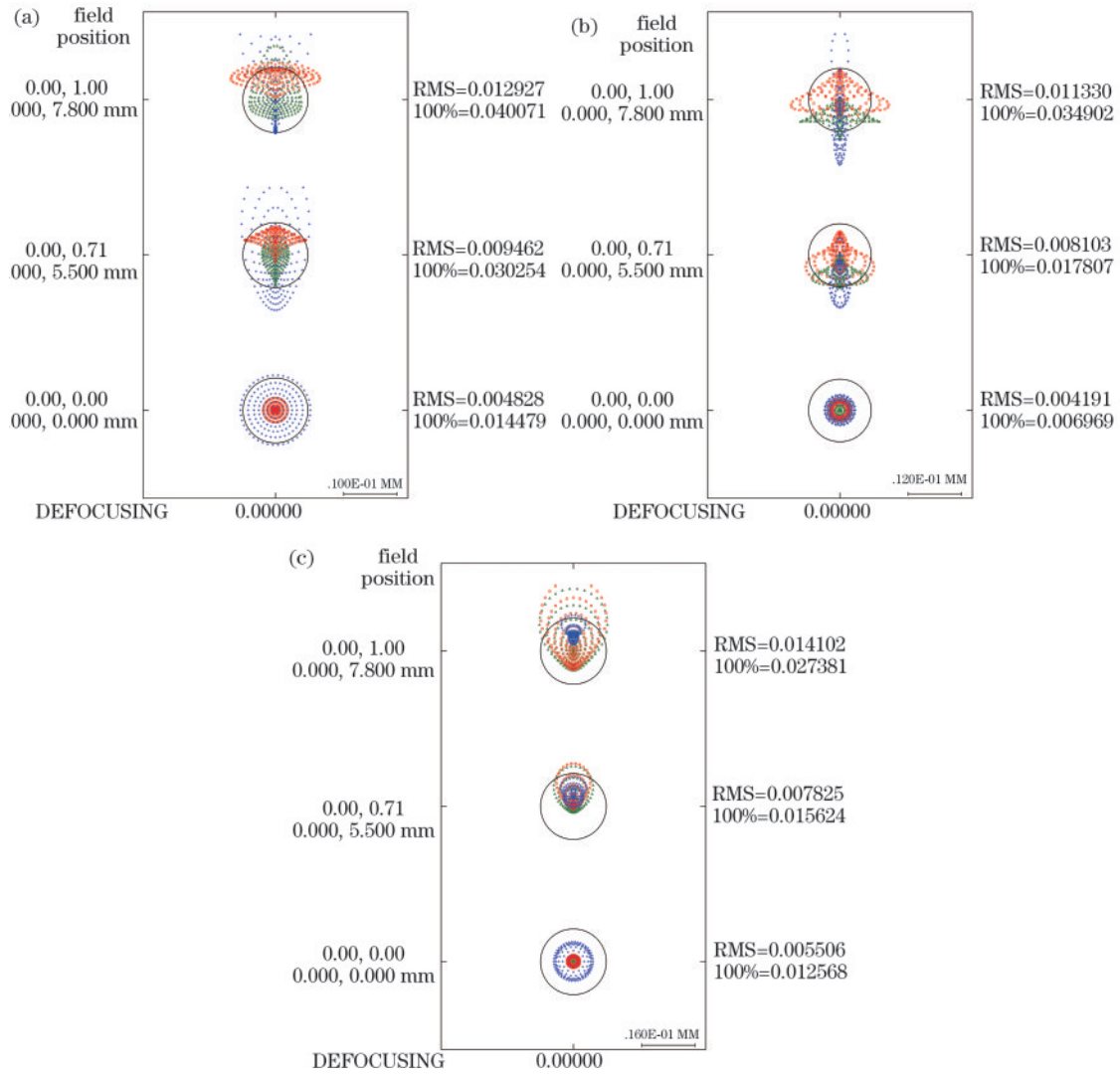


图 7 近红外波段系统点列图。(a)物高为 150 mm;(b)物高为 76 mm;(c)物高为 25 mm

Fig. 7 Spot diagram of NIR II system. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

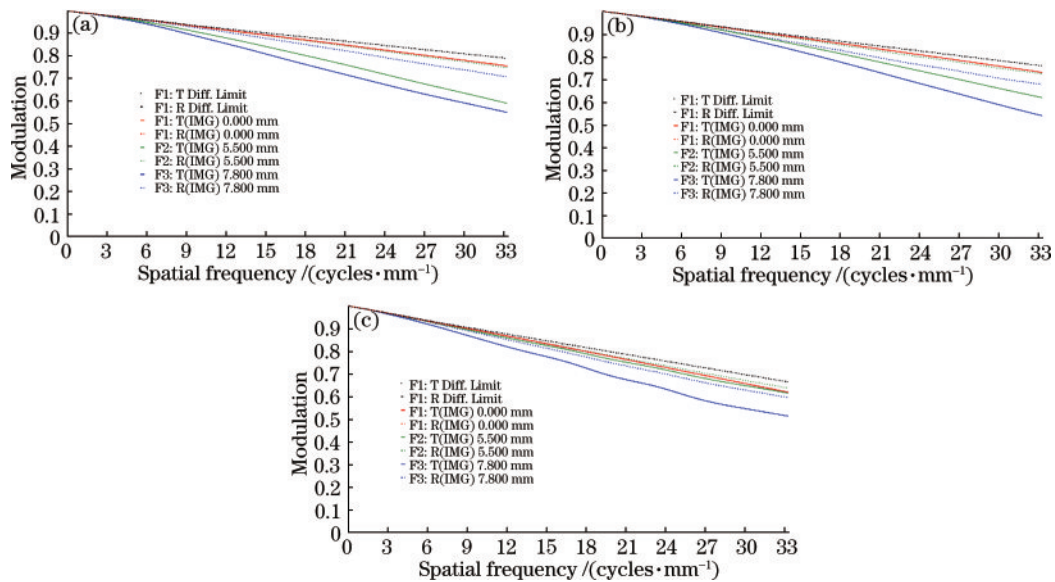


图 8 近红外波段系统调制传递函数。(a)物高为 150 mm;(b)物高为 76 mm;(c)物高为 25 mm

Fig. 8 MTF of NIR II system. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

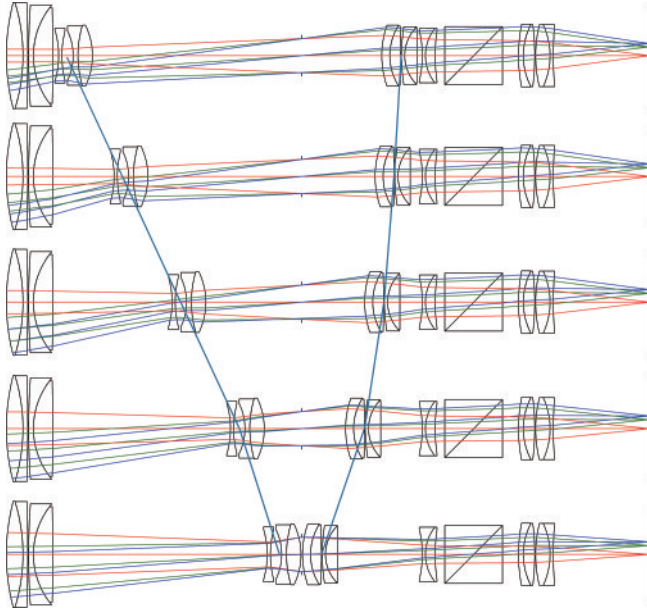


图9 变倍组与补偿组运动轨迹

Fig. 9 Motion track of zoom group and compensation group

透镜的公差灵敏度,得到最终变焦光学系统的公差分配情况,如表6所示。

分别对系统2个波段下的3组变倍状态进行公差分析,得到对应公差条件下子午方向各视场的MTF概率累计分布,结果如图11、图12所示。

由公差分析可知,可见光波段系统在奈奎斯特频率为111 lp/mm处的各视场平均MTF值为0.2时的良品率在85%以上,近红外波段系统在奈奎斯特频率为33 lp/mm处的各视场平均MTF值为0.2时的良品

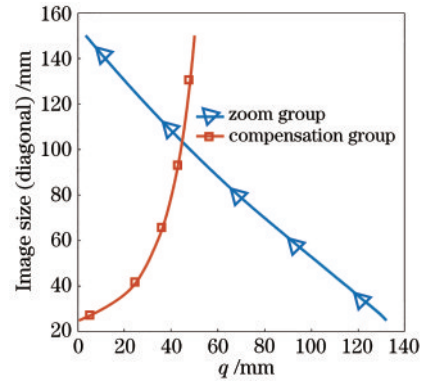


图10 系统变倍组与补偿组变焦曲线

Fig. 10 Zoom curves of zoom group and compensation group

表6 变焦光学系统的公差分配

Table 6 Tolerance distribution of zoom optical system

Parameter	Value range
Radius of curvature /fringes	≤ 2
Thickness /mm	± 0.02
Surface decenter /mm	± 0.02
Surface tilt /mm	± 0.02
Element decenter /mm	± 0.02
Element tilt /($^{\circ}$)	± 0.1
Surface irregularity /fringes	≤ 1
Index of refraction	± 0.0001
Abbe	± 0.002

率在90%以上,结果表明当前给出的公差标准满足双波段变焦系统的元件制造加工及装调工艺。

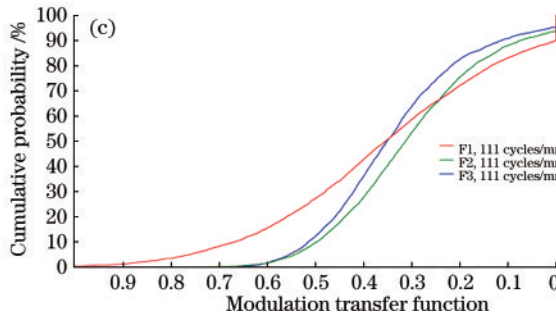
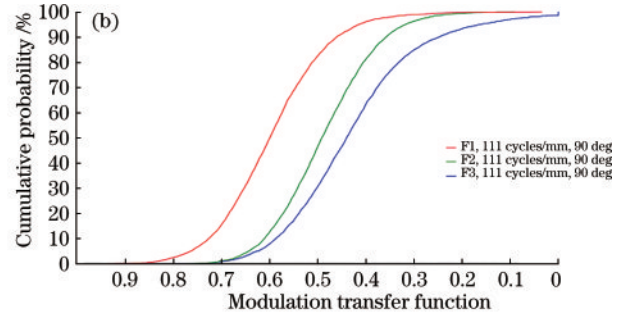
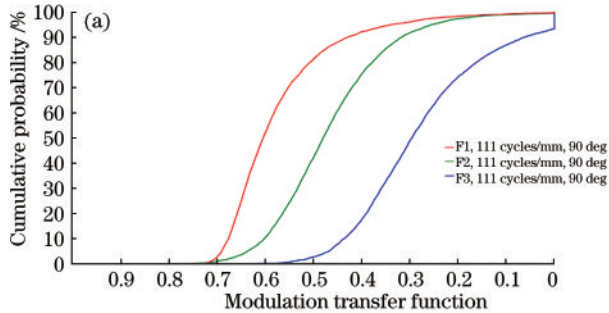


图11 486~656 nm波段MTF的累计概率分布。(a)物高为150 mm;(b)物高为76 mm;(c)物高为25 mm

Fig. 11 Cumulative probability of MTF in 486-656 nm. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

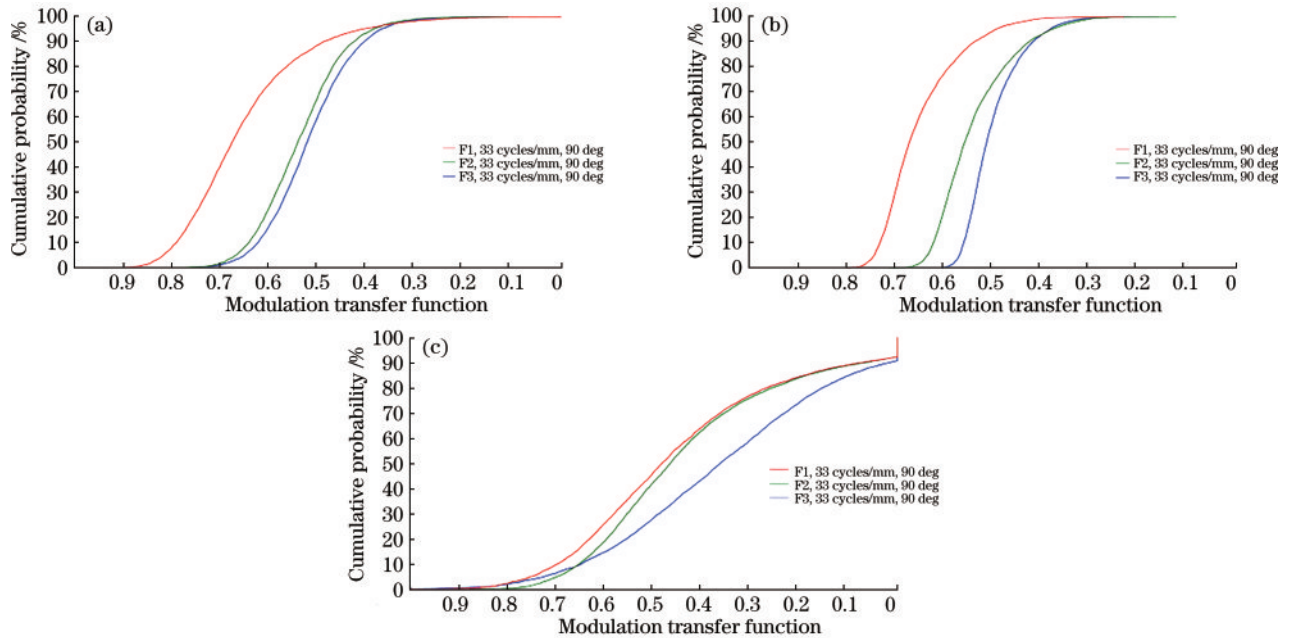


图 12 900~1700 nm 波段 MTF 的累计概率分布。(a)物高为 150 mm;(b)物高为 76 mm;(c)物高为 25 mm

Fig. 12 Cumulative probability of MTF in 900~1700 nm. (a) Object size is 150 mm; (b) object size is 76 mm; (c) object size is 25 mm

5 结 论

设计了一种可见光-近红外双波段长后工作距有限远共轭连续变焦光学系统,该设计前固定组、变倍组和补偿组采取共光路结构,对各组元进行独立像差设计,使用波段间色散特性相差小的玻璃材料,解决了由双波段、长后工作距带来的色差变化范围大、组分光焦距选择受限的技术难题,后固定组一部分作为公共部分,而后利用分光棱镜实现分光,针对 2 个波段进行单独后固定组的设计以校正其各自波段的残余像差,实现了长后工作距下的双波段荧光成像。该系统物方工作距离为 300 mm,视野大小为 25~150 mm,变倍比达到 6 \times ,后工作距大于 60 mm,为滤光片机构预留了足够的空间。系统在可见光波段在奈奎斯特频率为 111 lp/mm 时 MTF 值轴上大于 0.5,轴外大于 0.4,近红外波段在奈奎斯特频率为 33 lp/mm 时 MTF 值轴上大于 0.6,轴外大于 0.5。本设计具备良好的公差特性,变倍组与补偿组在变焦过程中轨迹平滑无拐点,成像质量良好,为荧光活体成像的应用提供了一种切实可行的方案,在生物医学成像领域具有广阔的实用前景。

参 考 文 献

- [1] 王瑞荣,崔丹丹,石玉娇.光敏感 AgBr@PLGA 纳米探针用于近红外二区肿瘤特异性光声成像[J].中国激光,2022,49(20):2007204.
Wang R R, Cui D D, Shi Y J, et al. Photosensitive AgBr@PLGA nanoprobes for near-infrared second region tumor-specific photoacoustic imaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(20): 2007204.
- [2] 纪光,闫路林,王慧,等.高效近红外聚集诱导发光纳米粒子用于生物成像的研究[J].化学学报,2016,74(11):917-922.
Ji G, Yan L L, Wang H, et al. Efficient near-infrared AIE nanoparticles for cell imaging[J]. Acta Chimica Sinica, 2016, 74(11): 917-922.
- [3] 陆峰,赵婷,孙晓军,等.近红外二区发光稀土纳米材料的设计及生物成像应用[J].化学进展,2022,34(6):1348-1358.
Lu F, Zhao T, Sun X J, et al. Design of NIR- II emissive rare-earth nanoparticles and their applications for bio-imaging[J]. Progress in Chemistry, 2022, 34(6): 1348-1358.
- [4] 韦族武,杨森,吴名,等.近红外二区荧光手术导航探针研究进展[J].中国激光,2022,49(5):0507102.
Wei Z W, Yang S, Wu M, et al. Recent progress in near-infrared- II fluorescence imaging probes for fluorescence surgical navigation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(5): 0507102.
- [5] 罗兴蕊,陈敏文,杨晴来.近红外二区活体成像技术及其应用研究进展[J].化学学报,2020,78(5):373-381.
Luo X R, Chen M W, Yang Q L. Research progress on near infrared II technology for *in vivo* imaging[J]. Acta Chimica Sinica, 2020, 78(5): 373-381.
- [6] Hameed S, Dai Z. Near-infrared fluorescence probes for surgical navigation[J]. Materials Today Chemistry, 2018, 10:90-103.
- [7] Bentley J L, Venugopal V, Frangioni J V, et al. The design and integration of a custom broadband 15x zoom lens for NIR fluorescence-guided surgery[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8573: 857306.
- [8] 吴合龙.可见与近红外双变焦探测系统设计[D].长春:长春理工大学,2019.
Wu H L. Design of visible and near-infrared dual zoom

- detection system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [9] 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 Z, 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.
- [10] 厉以宇, 陈浩, 王媛媛, 等. 用于电子助视器的连续变焦光学系统[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2387-2392.
Li Y Y, Chen H, Wang Y Y, et al. Continuous zoom optical system for E-vision aid device[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2387-2392.
- [11] 陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
Tao C K. Design of zoom optical system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
- [12] Sasián J. Aberrations of zoom lens kernel[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11106: 110604.
- [13] 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): 20210090.
Qu R, Guo H N, Cao J Z, et al. Design of visible-near infrared athermal continuous zoom optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20210090.
- [14] Zhao Y, Williams D J L, McCarthy P, et al. Chromatic correction for a VIS-SWIR zoom lens using optical glasses[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9580: 95800E.
- [15] 曲锐, 邓键. 红外双波段双视场消色差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122006.
Qu R, Deng J. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122006.
- [16] 金逢锡, 金虎杰. 变焦镜头结构形式的最佳选择方法[J]. 光学仪器, 2004, 26(1): 34-38.
Jin F X, Jin H J. Structural style's the best select device of vari-focus lens[J]. Optical Instruments, 2004, 26(1): 34-38.
- [17] Berman R, Corsetti J A, Fang K J, et al. Optical design study of a VIS-SWIR 3X zoom lens[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9580: 95800D.