



二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计

尚涵 孟祥翔 邱明杰

Optical design of ultraviolet continuous zoom lens for sulfur dioxide remote sensing monitoring

SHANG Han, MENG Xiangxiang, QIU Mingjie

引用本文:

尚涵, 孟祥翔, 邱明杰. 二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1108–1114. DOI: 10.5768/JAO202445.0601001

SHANG Han, MENG Xiangxiang, QIU Mingjie. Optical design of ultraviolet continuous zoom lens for sulfur dioxide remote sensing monitoring[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(6): 1108–1114. DOI: 10.5768/JAO202445.0601001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计](#)

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

[大孔径宽光谱变焦镜头设计](#)

Design of large-aperture and wide-spectrum zoom lens

应用光学. 2022, 43(5): 839–845 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0501002>

[高变倍比中波制冷型连续变焦光学系统设计](#)

Design of cooled MWIR continuous zooming optical system with high zoom ratio

应用光学. 2019, 40(6): 998–1003 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601011>

[40^x大变倍比宽波段连续变焦光学系统设计](#)

Design of wide-band continuous zoom optical system with 40^x large zoom ratio

应用光学. 2023, 44(2): 246–252 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0201002>

[大面阵连续变焦面阵扫描红外光学系统设计](#)

Design of continuous zoom area array scanning infrared optical system with large area array

应用光学. 2024, 45(2): 292–299 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201003>

[紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计](#)

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 06-1108-07

二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计

尚 涵, 孟祥翔, 邱明杰

(烟台大学 物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 为了满足大气二氧化硫遥感监测在不同距离下高清晰度成像的使用需求, 设计了一种连续变焦紫外镜头。通过对变焦系统高斯光学解的理论分析, 选取四组元正组补偿机械变焦初始结构, 计算了二组元机械补偿变焦系统变倍组求解的 3 个区间, 得到了变倍组与补偿组的光焦度分配; 根据大气二氧化硫对紫外光的吸收特性, 确定工作波段为 250 nm~340 nm; 利用 Zemax 光学设计软件设计了变倍比为 10、 F 数为 4、总长 431.5 mm 的紫外连续变焦光学系统, 并使用 Matlab 软件绘制了变倍组与补偿组的运动曲线。模拟结果表明: 系统的焦距范围为 25 mm~250 mm, 短焦视场范围 0° ~ 7.67° 、中焦视场范围 0° ~ 1.45° 、长焦视场范围 0° ~ 0.77° , 变焦过程中传递函数在 107 lp/mm 下均大于 0.3, 畸变均小于 1%, 弥散斑半径小于 5.5 μm 。本系统适用于船舶尾气、工业生产烟囱尾气等多种场景的二氧化硫监测。

关键词: 二氧化硫监测; 紫外成像; 连续变焦镜头; 光学设计

中图分类号: TN203

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0601001](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601001)

Optical design of ultraviolet continuous zoom lens for sulfur dioxide remote sensing monitoring

SHANG Han, MENG Xiangxiang, QIU Mingjie

(School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In order to meet the needs of high-definition imaging of atmospheric sulfur dioxide remote sensing monitoring at different distances, a continuous zoom ultraviolet lens was designed. Based on the theoretical analysis of Gaussian optical solution of zoom system, four groups of positive compensation mechanical zoom initial structure were selected, three intervals of zoom group solution of two-group mechanical compensation zoom system were calculated, and the power distribution of zoom group and compensation group was obtained. According to the absorption characteristics of atmospheric sulfur dioxide to ultraviolet light, the working band was determined to be 250 nm~340 nm. An ultraviolet continuous zoom optical system with zoom ratio of 10, F number of 4 and total length of 431.5 mm was designed by using Zemax optical design software, and the motion curves of zoom group and compensation group were drawn by using Matlab software. The focal length range of the system is 25 mm~250 mm, the short focal field range is 0° ~ 7.67° , the medium focal field range is 0° ~ 1.45° , and the telephoto field range is 0° ~ 0.77° . During zoom process, the transfer function is greater than 0.3 at 107 lp/mm, the distortion is less than 1%, and the radius of the speckle is less than 5.5 μm . This system is suitable for monitoring sulfur dioxide in various scenarios, such as ship exhaust, industrial production chimney exhaust and so on.

Key words: sulfur dioxide monitoring; ultraviolet imaging; continuous zoom lens; optical design

收稿日期:2024-01-08; 修回日期:2024-03-19

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2022QF095)

作者简介: 尚涵 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: 15254921929@163.com

通信作者: 孟祥翔 (1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事激光光学系统研究。E-mail: mengxx@ytu.edu.cn

引言

二氧化硫(SO_2)危害生态环境,威胁人类健康,是大气中常见的污染物之一,不仅污染大气环境引起酸雨等自然灾害,还会威胁人体健康。二氧化硫不但是评价环境空气质量的重要指标,而且是我国减排工作中的重要指标之一^[1-4]。对于二氧化硫进行实时准确的监测,有利于有效把握当前环境状况优劣,为后续制定二氧化硫治理方案提供依据^[5-6]。

2009年,DALTON M P^[7]等选用一个307 nm和一个326 nm的滤光片作为重要组件,组成了一套紫外相机系统,并通过该系统测得了燃煤电厂的二氧化硫排放浓度,证实了紫外相机技术监测结果的高准确性。2016年,严韦^[8]等提出了一种基于星上遥测参数和严格坐标转换关系的紫外相机几何定位方法,进行了影像数据几何定位及定位精度分析。2018年,张英华^[9]等在实验室中搭建了紫外相机监测二氧化硫,分析了该系统的线性响应,结果良好,并通过该系统测得了二氧化硫的二维空间分布。2020年,VARNAME M^[10]等使用两片中心波长分别为310 nm和330 nm的带通滤光片搭建的 SO_2 紫外相机,成功监测了马萨亚火山的二氧化硫变化。同年4月,段为民^[11]等以紫外相机为核心设备设计并研制出了一套双通道紫外成像遥感监测系统,准确、直观地监测了工业烟囱的二氧化硫浓度,推动了二氧化硫紫外相机在火山领域的应用。

但是,目前市面上的紫外连续变焦镜头波段大多在日盲紫外波段,不适用于二氧化硫的遥感监测。大部分二氧化硫遥感监测系统使用的紫外相机仍为紫外定焦镜头,对监测场景以及使用的便捷性有较大限制,因此,研制出一款能够用于二氧化硫遥感监测的紫外连续变焦镜头具有较高的实用价值。

1 光学设计

1.1 设计指标

二氧化硫气体分子在紫外波段有3个吸收带,分别是180 nm~235 nm强吸收带、340 nm~390 nm极弱吸收带、260 nm~340 nm弱吸收带。由于存在大气窗口,波长小于300 nm的紫外光几乎都被大气中的臭氧吸收,在此基础上,双通道紫外相机监测二氧化硫是将300 nm~320 nm作为探测波

段,320 nm~340 nm作为对照波段^[12],综合考虑二氧化硫的监测需求以及其他应用,将紫外镜头工作波段定为250 nm~340 nm。

探测器选用日本Artray公司的ARTCAM-407UV-WOM紫外CCD,像元尺寸为4.65 μm ,在250 nm~340 nm波段的量子效率大于40%。根据拍摄距离范围在540 m~5.4 km内识别10 m×10 m目标烟羽的要求,系统焦距可由下式求得:

$$\frac{f}{R} = \frac{n \times d}{a} \quad (1)$$

式中: f 为系统焦距; R 为探测距离; n 为需要的像元个数; d 为像元尺寸; a 为烟羽的面积。由焦距和有效靶面尺寸可以算出系统的半视场,公式如下:

$$\omega = \arctan \frac{A}{2f} \quad (2)$$

式中: ω 为半视场角; A 为CCD对角线长度; f 为系统焦距。由像元尺寸可以计算出特征频率为107 lp/mm,计算公式为

$$f_v = \frac{1000}{2d} \quad (3)$$

式中 d 为探测器像元尺寸。

大气二氧化硫遥感监测紫外连续变焦镜头光学设计指标如表1所示。

表1 光学设计指标

Table 1 Optical design indexes

参数	指标
工作波段/nm	250~340
焦距/mm	25~250
F 数	4
CCD 像元尺寸/ μm	4.65
有效靶面尺寸/pixels	1 024×1 024
MTF@107 lp/mm	≥0.3
畸变/%	≤1
总长/mm	431.5
变倍比	10

1.2 初始结构的选取和优化

1.2.1 紫外连续变焦高斯光学系统研究

变焦镜头根据其补偿方式不同,主要分为光学补偿变焦镜头、机械补偿变焦镜头、双组联动变焦镜头和全动型变焦镜头^[13]。设计采用机械补偿结构,系统由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组组成,由变倍组与补偿组的移动,即改变它们之间的空气间隔,可实现焦距变化以及像面稳定,如图1所示。

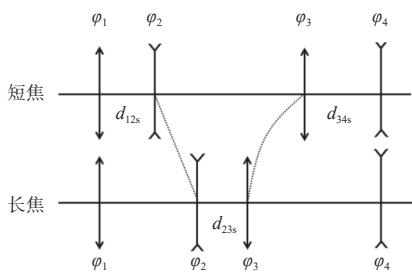


图 1 二组元变焦过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-component zoom process

根据二组元机械补偿变焦系统的高斯公式与倍率公式可知, 正组补偿形式的补偿组焦距并非是随意的, 满足变焦后, 变倍组与补偿组之间的间隔条件的补偿组焦距可以划分为 3 个解区, 利用初始前固定组焦距、变倍组焦距、补偿组焦距以及它们之间的空气间隔, 可以求解出变焦前后变倍组的垂轴放大率, 通过公式计算可以得到补偿组的 3 个解, 当选取的初始结构满足 $f_3' \leq f_{31}'$ 或 $f_{32}' \leq f_3' \leq f_{33}'$ 时, 即为正组补偿。其中, f_3' 为补偿组焦距, f_{31}' 、 f_{32}' 、 f_{33}' 分别是补偿组的 3 个解区, 可由以下公式求得:

$$f_{31}' = \frac{(3A + 3E) - \sqrt{(9A - E)(A - E)}}{8} \quad (4)$$

$$f_{32}' = \frac{(3A + 3E) + \sqrt{(9A - E)(A - E)}}{8} \quad (5)$$

$$f_{33}' = d_{23z} + \frac{f_1'}{f_1' - 1} \quad (6)$$

式中: d_{23z} 为初始状态下变倍组与补偿组之间的间隔; $A = 1 - \beta_2 + d_{23z}$; $E = 3 + 1/\beta_2 + d_{23z}$; β_2 为变倍组垂轴放大率。

1.2.2 初始结构的优化

目前常用的紫外材料有熔石英、氟化钙、氟化镁和蓝宝石, 4 种材料在紫外波段的光谱吸收性能较强, 透过率较高。由于氟化镁玻璃具有双折射性, 蓝宝石玻璃的加工工艺较复杂, 制造成本也相对较高, 因此, 在设计时选用熔石英玻璃和氟化钙玻璃为主要设计材料。查询文献及 Zemax 材料库文件可以发现, 熔石英玻璃在设计波段的折射率约为 1.46, 阿贝数约为 67.821, 透过率可达 90%; 氟化钙的折射率约为 1.43, 阿贝数约为 94.996, 透过率约为 70%~80%。

替换玻璃, 将光谱范围设置为 250 nm~340 nm, 中心波长为 295 nm, 根据指标计算, 将半视场和入瞳直径更改为相应值。将系统的全部曲率半径和空气间隔设为变量, 在评价函数编辑器中写入

TOTR 操作数, 控制系统总长; 利用 MNEA、MNEG、MNCA、MNCG 控制各透镜的最小中心厚度和边缘厚度, 以及空气最小中心厚度和边缘厚度, 避免透镜过薄、透镜边缘交叉和两透镜相撞。使用 CVVA 操作数控制曲率半径, 防止透镜过弯。利用 DIMX 控制各个结构的畸变在合理范围内。利用 RSCE 控制中心视场的弥散斑尺寸, 通过控制同一波长、不同孔径光线到达像面的入射高度来校正球差, 控制不同波长的同一孔径光线到达像面的高度差来校正色差。根据 Zemax 的点列图、光线光扇图、赛德尔系数图等判断系统仍存在初级像差, 通过增加透镜、胶合透镜等继续校正像差。

最后利用 ZTHI 操作数控制各个结构的总长, 达到一致, 必要时使用 TMTF 操作数优化 MTF 曲线。

1.3 设计结果

利用 Zemax 软件设计了一款高像质正组补偿紫外连续变焦镜头, 优化后的系统焦距 EFFL 为 25 mm~250 mm, 总长 TOTR 为 431.5 mm, F 数为 4, 可实现 10 倍变焦, 光学结构如图 2 所示。图 2 中从上向下依次为系统的短焦、中焦、长焦 3 种状态下的外形结构图。

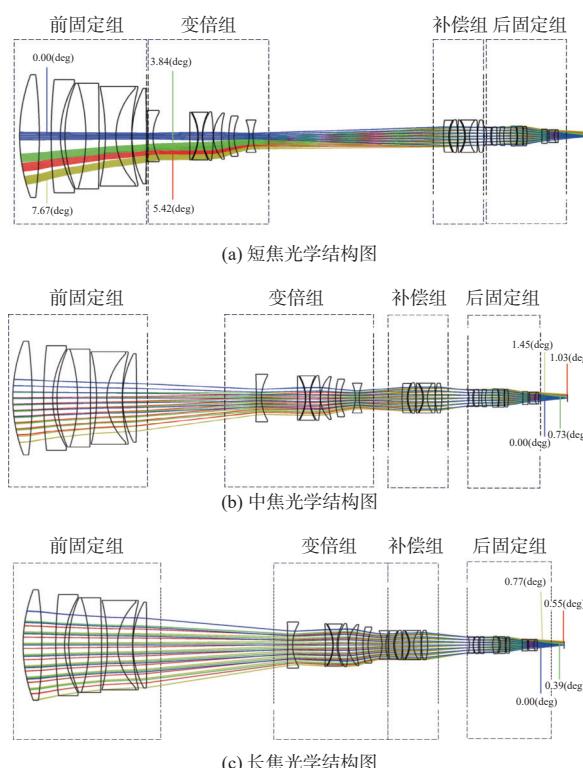


图 2 紫外连续变焦镜头不同焦距下的光学结构图

Fig. 2 Optical structure diagram of UV continuous zoom lens under different focal lengths

前固定组由3片球面单透镜和两组球面双胶合透镜组成,光焦度为正,其作用是平衡像差,减少后固定组的工作压力;变倍组由7片球面单透镜组成,光焦度为负,从左向右移动,改变系统的焦距由短焦变为长焦;补偿组由4片球面单透镜和一组球面双胶合透镜组成,光焦度为正,移动位置可补偿变倍组移动导致的像面位置改变;后固定组采用7片球面单透镜与一组双胶合透镜,为正光焦度,主要作用是校正残余像差。

1.4 像质评价

采用调制传递函数(modulation transfer function, MTF)、点列图和场曲畸变曲线来表征设计镜头的质量。利用Zemax设计软件得到紫外连续变焦镜头在短焦、中焦和长焦3种状态下的MTF,如图3所示。从图3可以看出,在奈奎斯特抽样频率为107 lp/mm处,短焦时 $MTF > 0.3$,中焦时 $MTF > 0.5$,长焦时 $MTF > 0.3$,说明系统在成像过程中被摄物体的信息损失少,满足设计要求。

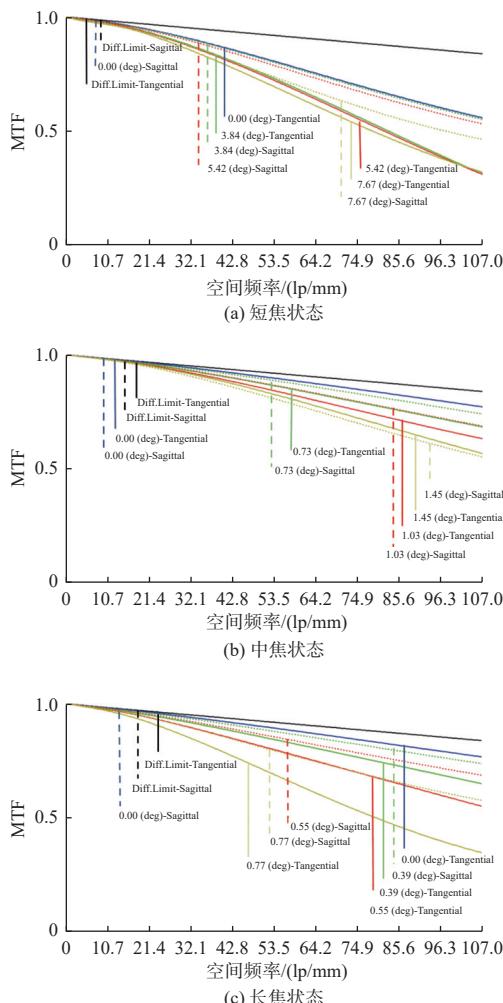


图3 不同焦距下的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves under different focal lengths

短焦、中焦以及长焦状态下的点列图如图4所示。从图4可以看出,整个光学系统在各个结构的中心视场弥散斑RMS半径小于5.5 μm ,GEO半径小于8 μm ,整个系统在变焦过程中都有很好的成像质量。

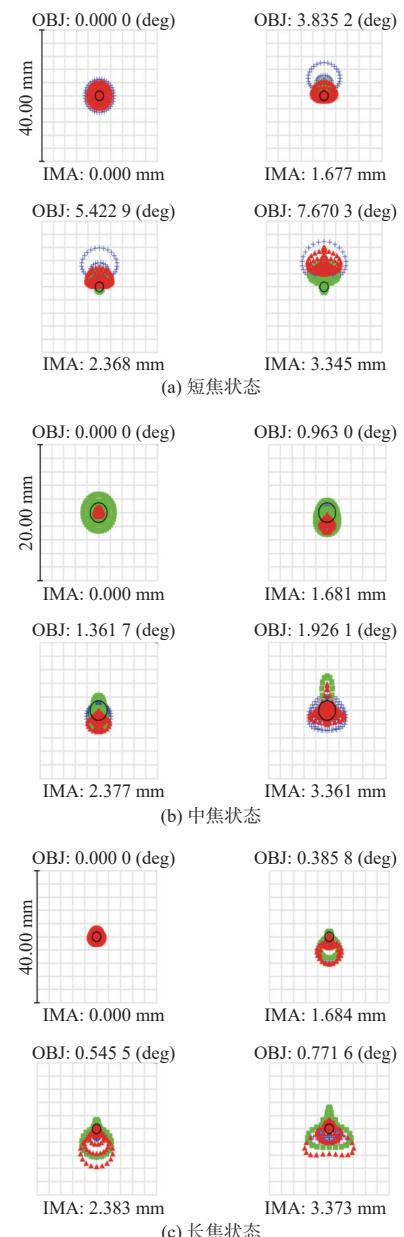


图4 不同焦距下系统点列图

Fig. 4 Point diagram of optical system under different focal lengths

短焦、中焦和长焦时系统的场曲、畸变曲线如图5所示。从图5可以看出,在变焦过程中最大视场下畸变小于1%,场曲小于0.05 mm,满足设计指标。

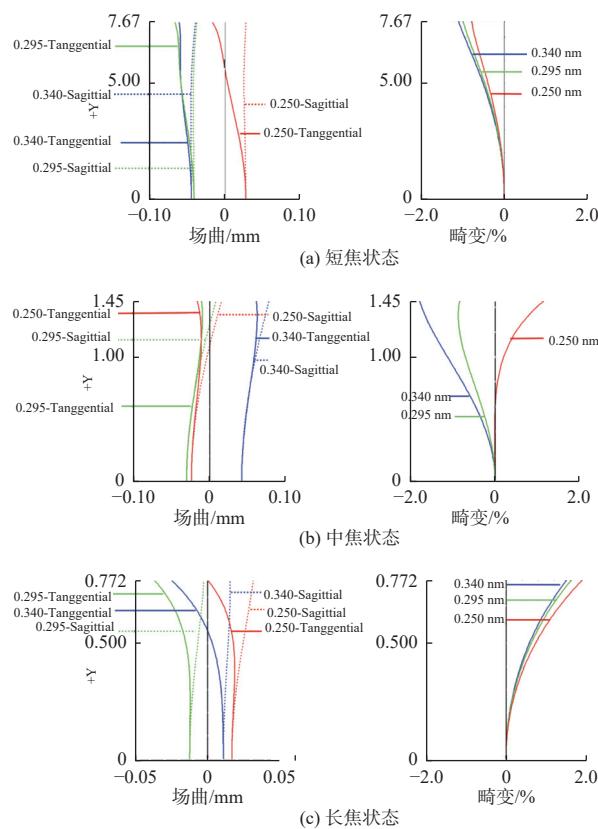


图 5 不同焦距下系统的场曲、畸变曲线

Fig. 5 Field curvature and distortion curves of system under different focal lengths

2 凸轮曲线设计

变焦凸轮曲线设计是连续变焦镜头设计中不可或缺的一项工作。在变焦系统中, 变倍组的运动是一条直线, 可以由公式(7)^[14-15]得到凸轮直径、工作转角及螺旋升角三者之间的关系:

$$D = \frac{2H}{\phi \cdot \tan \alpha} \quad (7)$$

式中: D 为凸轮直径; H 为光学导程; ϕ 为工作转角; α 为螺旋升角。

在 Matlab 中拟合出系统的变焦凸轮曲线, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 凸轮曲线连续不间断且平滑, 互不相撞。从短焦向长焦调节时, 变倍组逐渐远离前固定组, 补偿组逐渐远离后固定组, 变倍组与补偿组之间的距离逐渐减小。

3 公差分析及图像模拟实验

3.1 公差分析

从上述像质评价可知, 紫外连续变焦光学系统的成像质量已基本符合设计指标, 但是这仅说明

该光学系统在理想条件下最佳状态达到了标准。由于机械加工与人工装调存在一定的偏差, 可能导致光学系统在实际装配完成后成像质量不稳定甚至大幅下降, 因此, 还应该运用设计软件模拟每一处可能出现的误差, 分析各种误差对系统成像造成的影响, 以便得到系统在后续装配过程中允许的公差范围^[16-17]。

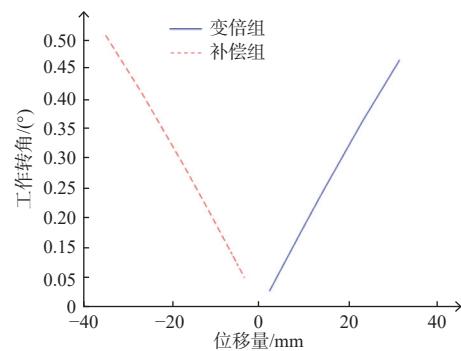


图 6 凸轮曲线

Fig. 6 Cam curve

利用 Zemax 软件公差分析模块, 以衍射 MTF 子午与弧矢为标准, 在特征频率 107 lp/mm 处进行 500 次蒙特卡罗分析, 经过多次软件模拟以及主观调整, 最终结果如表 2 和表 3 所示, 具体公差范围如表 4 所示。

表 2 以衍射 MTF 子午为标准的蒙特卡罗公差分析结果

Table 2 Monte Carlo tolerance analysis results based on diffraction MTF meridian

蒙特卡罗 样本百分比%	焦距/mm		
	25	133	250
≥ 90	0.273 3	0.301 0	0.148 9
≥ 80	0.288 8	0.362 1	0.187 6
≥ 50	0.324 8	0.452 1	0.275 7
≥ 20	0.359 0	0.544 2	0.367 9
≥ 10	0.372 4	0.594 2	0.422 8

表 3 以衍射 MTF 弧矢为标准的蒙特卡罗公差分析结果

Table 3 Monte Carlo tolerance analysis results based on diffraction MTF sagitta of arc

蒙特卡罗样 本百分比%	焦距/mm		
	25	147.3	250
≥ 90	0.411 9	0.341 3	0.143 7
≥ 80	0.439 0	0.397 4	0.212 6
≥ 50	0.494 1	0.499 0	0.335 7
≥ 20	0.541 1	0.586 0	0.444 7
≥ 10	0.567 7	0.694 2	0.512 8

表 4 零件允许公差

Table 4 Allowable tolerances of parts

公差	范围
半径公差/光圈数	± 2
厚度公差/mm	± 0.02
表面偏心公差/mm	± 0.0075
表面倾斜公差/(°)	± 0.0083
元件偏心公差/mm	± 0.0075
元件倾斜公差/(°)	± 0.0083
表面不规则度	± 0.2
折射率公差	± 0.0005
阿贝常数公差/%	± 0.03

3.2 Zemax 扩展图像模拟

为了判断紫外连续变焦光学系统在实际应用中成像质量的优劣, 实验使用 Zemax 扩展图像模块对系统在短焦、中焦、长焦 3 个状态下的成像进行模拟。光源位图如图 7 所示。



图 7 光源位图

Fig. 7 Light source bitmap

调整视场高度、过采样、探测器参数等配置, 可以得到系统在短焦、中焦、长焦状态下的成像结果, 如图 8 所示。

通过在 Zemax 软件中的模拟结果可以看出, 紫外连续变焦镜头可以在短焦、中焦与长焦位置清晰成像, 所成图像可以满足二氧化硫紫外相机监测后续图像分割等数据处理步骤的要求。



(a) 短焦状态



(b) 中焦状态



(c) 长焦状态

图 8 系统在不同焦距状态下的成像情况

Fig. 8 Imaging of system in different focal lengths

4 结论

利用 Zemax 与 Matlab 软件设计了一款可用于大气二氧化硫监测的紫外连续变焦镜头。通过紫外相机监测二氧化硫的原理确定了镜头的工作波段, 根据用户需求选用合适的紫外探测器, 由此制定了其他设计指标。利用 Zemax 中评价函数优化操作数和锤形优化对初始结构进行优化, 最终设计的连续变焦镜头可实现 10 倍变焦, 在奈奎斯特抽样频率 107 lp/mm 处传递函数均大于 0.3。光学系统结构设计完成后, 利用 Matlab 软件拟合了紫外连续变焦镜头的凸轮曲线, 通过 Zemax 软件中公差分析模块分析出了紫外连续变焦镜头的公差范围, 并使用软件自带的扩展图像模拟功能对本设计进行了成像模拟实验。最终结果表明, 设计的紫外连续变焦镜头可在 540 m~5.4 km 之间清晰成像, 可以得到待测烟羽的清晰图像, 进而实现对多种场景烟羽实时监测。

参考文献:

- [1] 蒋斌. 环境空气中二氧化硫监测技术的发展[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(1): 158-160.
JIANG Bin. Development of monitoring technology of sulfur dioxide in the air[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(1): 158-160.

- [2] 张宇. 浅析大气污染现状及防治措施[J]. 清洗世界, 2021, 37(7): 90-91.
ZHANG Yu. Analysis on the present situation of air pollution and its prevention measures[J]. Cleaning World, 2021, 37(7): 90-91.
- [3] 张玉杰. 中国二氧化硫排放情况及其对环境的影响(待续)[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2021(4): 30-35.
ZHANG Yujie. Sulfur dioxide emission in China and its impact on the environment (to be continued)[J]. Sulfur and Phosphorus Design and Powder Engineering, 2021(4): 30-35.
- [4] 张玉杰. 中国二氧化硫排放情况及其对环境的影响(续完)[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2021(5): 43-48.
ZHANG Yujie. Sulfur dioxide emission in China and its impact on the environment [J]. Sulfur and Phosphorus Design and Powder Engineering, 2021 (5): 43-48.
- [5] 杜晓峰. 大气污染原因和环境监测治理技术研究[J]. 科技与创新, 2020(23): 135-136.
DU Xiaofeng. Study on air pollution causes and environmental monitoring and control technology[J]. Science and Technology and Innovation, 2020(23): 135-136.
- [6] 吴淑枫, 陈祖云. 工业废气中二氧化硫的治理[J]. *当代化工研究*, 2022(13): 58-60.
WU Shucong, CHEN Zuyun. Treatment of sulfur dioxide in industrial waste gas[J]. *Contemporary Chemical Research*, 2022(13): 58-60.
- [7] DALTON M P, WATSON I M, NADEAU P A, et al. Assessment of the UV camera sulfur dioxide retrieval for point source plumes[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 188(4): 358-366.
- [8] 严伟, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥三号极紫外相机几何定位方法及其应用[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 119-124.
YAN Wei, REN Xin, LIU Jianjun, et al. Geometric positioning method of Chang'e-3 extreme ultraviolet camera and its application[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 119-124.
- [9] 张英华, 李昂, 谢品华, 等. 污染气体浓度二维空间分布的紫外成像方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1476-1480.
ZHANG Yinghua, LI Ang, XIE Pinhua, et al. Ultraviolet imaging method of two-dimensional spatial distribution of pollution gas concentration[J]. *Spectroscopy and Spec-*tral Analysis, 2018, 38(5): 1476-1480.
- [10] VARNAM M, BURTON M, ESSE B, et al. Two independent light dilution corrections for the SO₂ camera retrieve comparable emission rates at masaya volcano, nicaragua[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 935.
- [11] 段为民, 熊远辉, 陈振威, 等. 工业 SO₂ 及碳黑颗粒紫外成像遥感监测技术[J]. 光子学报, 2020, 49(4): 153-161.
DUAN Weimin, XIONG Yuanhui, CHEN Zhenwei, et al. Remote sensing monitoring technology of industrial SO₂ and carbon black particles by ultraviolet imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 153-161.
- [12] 熊远辉, 罗中杰, 陈振威, 等. SO₂ 气体排放的紫外成像遥感监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1289-1296.
XIONG Yuanhui, LUO Zhongjie, CHEN Zhenwei, et al. Monitoring SO₂ emission by ultraviolet imaging remote sensing[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(4): 1289-1296.
- [13] 李世江. 8 mm~32 mm 双波段变焦安防镜头设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
LI Shijiang. Design of 8 mm~32 mm dual-band zoom security lens[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [14] 高子英. 大口径变焦投影系统结构设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
GAO Ziying. Structural design of large-aperture zoom projection system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.
- [15] 宋鹏飞. 10 倍变焦距镜头设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
SONG Pengfei. Design of 10^x zoom lens[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022.
- [16] 曾振煌, 林峰. 30 mm~110 mm 大孔径红外变焦热像镜头设计[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 752-758.
ZENG Zhenhuang, LIN Feng. Design of 30 mm~110 mm large aperture infrared zoom thermal image lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 752-758.
- [17] 罗锐, 梁秀玲. 大孔径宽光谱变焦镜头设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 839-845.
LUO Rui, LIANG Xiuling. Design of large aperture and wide spectrum zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 839-845.