

文章编号: 1005-5630(2023)04-0040-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.004.006

用于电晕检测的日盲紫外光学系统设计

沈 亮, 朱世鸿, 梁秀玲

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室 福建省光子技术
重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 日盲紫外光学探测器可以精准的接收到电晕放电产生的紫外辐射。利用 Zemax 软件设计了一款定焦日盲紫外光学系统, 该系统由五片球面透镜构成, 工作波段 240~280 nm, 匹配靶面直径 18 mm 的紫外像增强器, F 数为 2.5, 焦距为 50 mm, 视场角为 20.4°, 光学总长为 72 mm。调制传递函数在空间频率 20 lp/mm 处全视场均大于 0.8, 最大畸变小于 0.5%。分析了系统在 -20~60 °C 的离焦现象, 计算了各温度下的热离焦量, 采用被动式机械补偿的方法校正了由温度变化产生的热差。最后, 通过蒙特卡洛分析模拟, 对系统给出了合理的公差分配, 分析结果表示系统加工装配后仍具有较好的成像质量。

关键词: 日盲紫外; 光学设计; Zemax; 公差分析

中图分类号: TN 23 **文献标志码:** A

Design of a solar blind ultraviolet optical system for corona detection

SHEN Liang, ZHU Shihong, LIANG Xiuling

(Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The solar blind ultraviolet optical detector accurately captures the ultraviolet radiation generated by corona discharge. In this paper, a fixed focal solar blind optical system was designed by using Zemax. The system comprises five standard spherical lens and has a working wavelength range of 240-280 nm, the F number of 2.5, the focal distance of 50 mm, a field angle of 20.4°, an optical length of 72 mm and matches with a ultraviolet image intensifier with a target diameter of 18 mm. The full field of modulation transfer function is greater than 0.8 at the spatial frequency of 20 lp/mm, the maximum distortion is less than 0.5%. The defocusing phenomenon of the system was analyzed across a temperature range of -20°C to 60°C. The thermal defocusing amount was calculated at different temperatures, and a Passive mechanical compensation method was employed to correct thermal dispersion caused by temperature changes. Finally, through Monte Carlo

收稿日期: 2022-12-11

基金项目: 福建省科技厅引导性项目 (2017H0010); 福建省科技重大专项 (2021YZ040012)

第一作者: 沈 亮 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光学设计。E-mail: 2865296947@qq.com

通信作者: 梁秀玲 (1964—), 女, 高级工程师, 研究方向为光学设计与光学检测。E-mail: xlliang@fjnu.edu.cn

simulation analysis, the system is given a reasonable tolerance allocation. The analysis results show that the system still maintains good imaging quality even after processing and assembly.

Keywords: solar blind; optical design; Zemax; tolerance analysis

引言

当带电体表面的电场强度高于其附近气体介质的游离强度时,介质分子会被激发、电离,出现一种自持放电现象,俗称电晕放电,常发生在高压、特高压输电线路中^[1]。电晕放电过程中产生的高频电磁波会对附近的无线信号造成干扰,长期放电会造成电力系统巨大的能量损耗,对电站设备与输电线路的绝缘性造成严重的损害。因此有必要对高压线路进行大范围、多场景的监测,并及时响应、检修维护,以保障各高压输电线路平稳、长久运行。

现有监测电晕放电最有效的手段是日盲紫外检测。日盲紫外指波段处于200~300 nm的紫外光,太阳辐射经过大气层时该波段被臭氧吸收形成了截止区,因此该波段被命名为“日盲区^[2]”,电晕放电产生的电弧发射出的光谱与太阳光谱近似,日盲紫外探测器的工作波段通常在200~280 nm之间,正是利用了日光背景下这一波段缺失的特征,有效地排除了太阳光背景对探测器的干扰,与过去利用红外、超声^[3]对电晕放电进行监测相比,日盲紫外技术大大地提高了检测的精度。

日盲紫外探测技术在20世纪80年代末被美国一家公司用于导弹逼近紫外告警系统,随后数年,苏联的电力公司将该技术应用于电力系统检测^[4]。国内对相关技术的研究虽未能夺得头筹,但经过诸多科研工作者们数十年的研究,目前日盲紫外光学探测技术已广泛应用于军事领域和电力系统。日盲紫外光学系统的结构主要是透射式和折反射式结构。如李松岩^[5]采用卡塞格林折反射式初始结构设计了一款变焦日盲紫外镜头,但是视场角仅有10°,范雯雯^[6]在紫外告警光学系统设计过程中引入非球面和衍射元件,采用5片透镜,实现了60°全视场角下成像质量良好的效果,但玻璃非球面的加入会造成加工成本急

剧上升,陈塑淇等^[7]设计了一款12片式大视场大相对孔径高分辨率的球面镜头,有较好的应用前景。

针对高压输电线路需要进行实时监测,且需要较大的视场以满足特定监测位置的全面覆盖,本文设计了用于电晕检测的日盲紫外光学系统。其中,结构简单、大视场、成像良好的球面透射式日盲紫外光学镜头,相比于市场现有电晕用途日盲紫外光学镜头,增大了相对孔径,提高了视场角;机械结构上采用双层镜筒结构,以被动式机械补偿的方法补偿热差,最后,对系统进行公差分析以验证光学系统的工艺性。

1 光学系统设计

1.1 设计指标

镜头设计主要指标如表1所示,工作波段为240~280 nm,焦距为50 mm,相对孔径为1/2.5,匹配靶面直径为 $\Phi 18$ mm的紫外像增强器,像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$,根据像元尺寸大小计算截止频率为20 lp/mm,设计要求在截止频率处调制传递函数(MTF)需大于等于0.3。

表1 光学系统主要设计指标
Tab. 1 Key design parameters of optical system

参数	值
波长/nm	240~280
焦距/mm	50
相对孔径	1/2.5
靶面尺寸/mm	$\Phi 18$
MTF(@20 lp/mm)	≥ 0.3
畸变	≤ 3

1.2 材料选取与初始结构确定

工程上大多采用一些光学晶体如熔石英、蓝宝石、氟化钙、氟化镁,这些材料在紫外波段有着很高的透过率,蓝宝石价格昂贵,可加工性

差, 氟化镁双折射特性很高^[8] 因此, 现有紫外光学系统大多都是选用熔石英和氟化钙, 本设计中材料采用熔石英和氟化钙。

本文光学系统采用全透射式结构, 系统指标确定后, 选择一个合适的初始结构, 对后续的设计优化过程至关重要。一般初试结构的确定有解析法(PW法)和缩放法两种方法, 解析法是基于薄透镜系统的初级像差理论, 通过计算, 初步确定元件数量和光焦度分配^[9]。本文选择采用缩放法, 经查阅相关资料, 最终确定的初始结构如图1所示。该结构由5片透镜组成, 焦距为127 mm, 相对孔径为1/4, 光学总长为152.5 mm, 全视场角为10°。

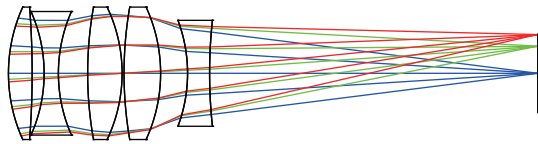


图 1 初始结构 2D 图

Fig. 1 2D diagram of initial structure

1.3 优化设计

初始结构的焦距与本文要求的焦距不同, 因此首先要按照指定焦距对结构进行缩放至50 mm, 更改初始结构的工作波长为240~280 nm, 同时根据紫外 CCD 尺寸将视场设置为9 mm 实际像高。滤波片和 CCD 基底上的保护玻璃都以平板玻璃的形式加入到系统中。采用默认评价函数 RMS+Spot Radius+Centroid, 合理设置透镜厚度与空气厚度等边界约束, 设置好变量后对结构进行初步的优化。优化过程前需使用操作数 EFFL 将焦距固定为50 mm, 以免系统在优化过程中焦距变化导致结构混乱。初步优化结束后, 系统的各项指标趋于稳定, 由于相对孔径并未达到1/2.5的要求, 因此需要增大相对孔径继续优化, 采用 F 数逐步从4、3.5、3、2.5 递减的方式分步优化。

优化过程中根据危害像质的主要像差对系统结构做出调整。一般在可见光光学系统设计时, 选择合适材料, 搭配并胶合透镜, 可以比较容易地达到消色差的目的^[10]。由于紫外波段的特殊性, 系统设计时可用玻璃材料十分有限, 亦无粘

合胶能透过该波段, 所以色差是日盲紫外光学系统设计中难以校正的一种像差。根据所选初始结构, 采用微小空气间隙的双分离透镜组的方法校正色差, 透镜组的光焦度分配应符合如下关系^[11]

$$\frac{\phi_1}{u_1} + \frac{\phi_2}{u_2} = 0 \quad (1)$$

式中 ϕ 、 u 分别为透镜的光焦度和阿贝数。使用复合操作数控制结构中镜片的光焦度和阿贝数满足式(1)中的关系以控制系统的色差。大视场光学系统的边缘视场像质受场曲的影响非常大, 场曲值随视场增大而增大, 因此大视场光学系统的场曲必须校正, 根据薄透镜匹兹凡和的校正

$$\sum S_{IV} = J^2 \sum \frac{\phi}{n} \quad (2)$$

式中: S_{IV} 为第四赛德和数; J 为拉氏不变量; ϕ 为透镜光焦度; n 为材料折射率。用复合操作数控制光学系统的匹兹凡和以控制场曲。其余像差适当使用像差操作数, 用 LONA 控制各孔径的球差, 用 ASTI 控制像散, DIST 控制畸变; 用 MTFT、MTFS 控制系统轴外视场, 以提高整体像质。

在光学系统设计时可以通过参数控制的方法初步地保证镜片的可加工性。在镜片的定心磨边中, 可以用定心系数, 也叫 Z 系数, 用以衡量镜片定心的难易程度, 其计算式为

$$Z = \frac{\left| \frac{D_1}{R_1} \pm \frac{D_2}{R_2} \right|}{4} \quad (3)$$

式中 D 、 R 分别为镜片口径和镜面曲率半径。当 Z 系数大于0.15时, 镜片定心容易, 用宏语言控制每片镜片的 Z 系数大于0.15。此外考虑到镜头装配, 镜片靠的太近, 在加工误差的影响下, 后续装配可能会出现顶心^[12], 使用 MNEA 和 MNCA 操作数对部分空气的中心、边缘厚度进行限制, 最小值为0.3 mm。经过多次优化调整, 各项指标达到要求。最终设计结构如图2所示, 该日盲紫外系统焦距为50 mm, 相对孔径为1/2.5, 视场角为20.4°, 光学总长为72 mm。

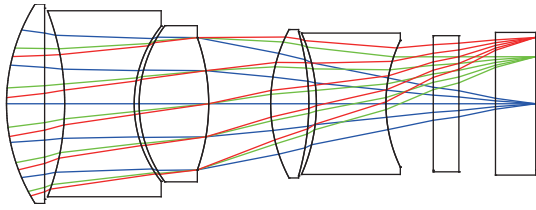


图 2 最终结构 2D 图

Fig. 2 2D diagram of final structure

2 像质评价

本文采用点列图、光学传递函数、像点衍射能量分布图、畸变图对所设计的光学系统进行像质评价。

点列图是指物方光线经过光学系统后汇聚于像面获得的二维分布, 反映了像面成像能量的集中度^[13]。如图 3 所示是本文设计的光学系统点列图, 三个视场的均方根半径 (RMS) 分别为 5.713 μm 、7.918 μm 、9.209 μm , 而紫外 CCD 的像元尺寸为 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 由此可见满足要求。

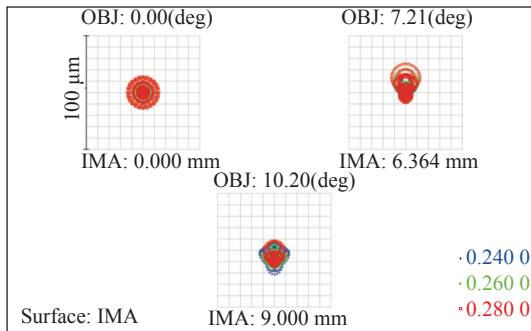


图 3 点列图

Fig. 3 Spot diagram

光学调制传递函数既和系统的几何像差有关, 又与衍射效果有关, 对光学系统的成像质量评价比较客观、可靠^[13]。图 4 为光学传递函数, 由像元尺寸的大小确定的特征频率为 20 lp/mm, 从图上可看到中心视场的光学传递函数在 20 lp/mm 时大于 0.85, 轴外视场大于 0.8, 符合设计要求。

图 5、图 6 分别是光学系统的各视场的像点衍射能量分布图和畸变图。由图 5 可知, 80% 以上的衍射能量都被包围在了 10 μm 的圆内, 几乎所有的能量都落入了 16 μm 的圆内, 均小于像元尺寸, 能量集中度高。由图 6 知, 最大畸变百分比小于 0.5%, 满足系统指标要求。

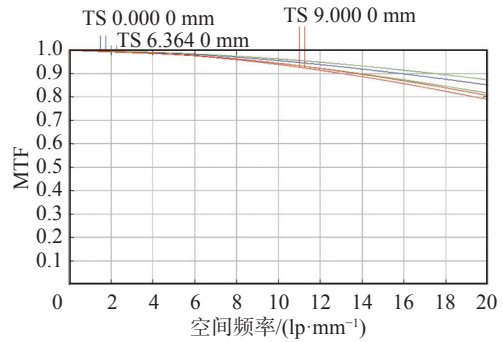


图 4 MTF 曲线图

Fig. 4 MTF curves

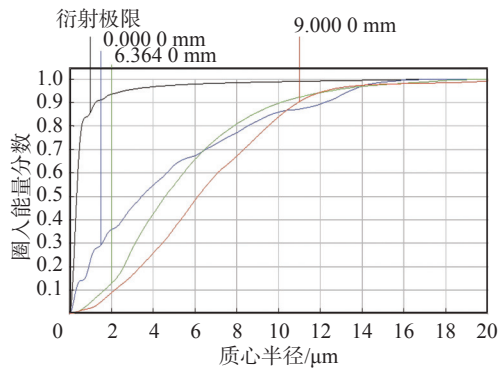


图 5 衍射圈入能量图

Fig. 5 Diffraction encircled energy

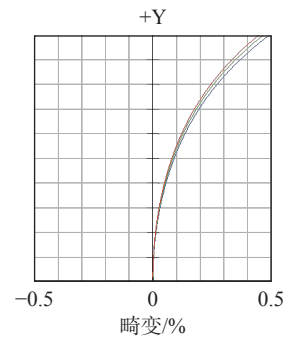


图 6 畸变曲线

Fig. 6 Curves of distortion

3 系统热差分析

光学系统性能受环境温度变化的影响比较大。由于温度的波动, 光学镜片和镜筒隔圈热胀冷缩发生变形, 尤其光学材料的折射率随温度的变化会使镜头的成像质量严重恶化^[14]。系统设计时的温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 考虑到镜头实际使用时环境温度的变化, 在镜筒、隔圈使用铝合金材料的

前提下,分析了光学系统处于温度-20 ℃ 和 60 ℃ 环境下的 MTF,如图 7 所示。MTF 已经严重偏离设计时的表现,温度变化引起的离焦可能会导致镜头在实际使用过程中失效。因此有必要对光学系统因温度变化产生的热差进行补偿。

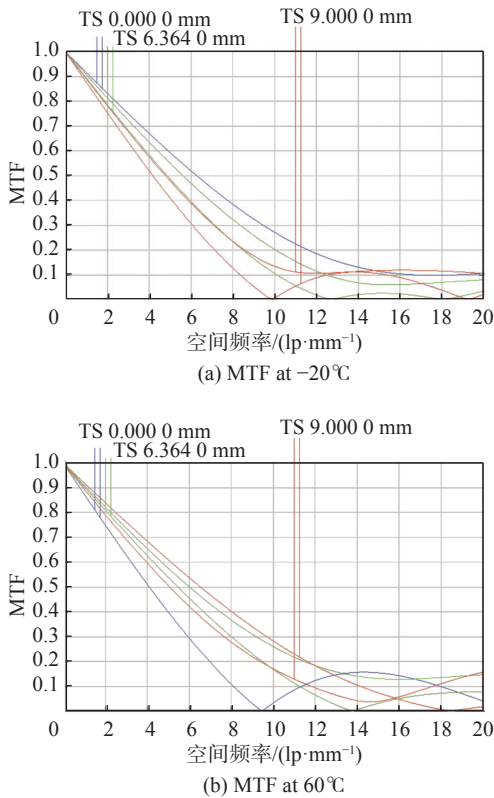


图 7 -20 ℃ 和 60 ℃ 温度下的 MTF 曲线图
Fig. 7 MTF curves at -20 ℃ and 60 ℃

分析系统在-20~60 ℃ 下理想像面相对于设计时的偏离量,如表 2 所示。可以看到热离焦量与温度的变化存在着近似线性的关系,因此可以考虑采用被动式机械补偿的方法对系统热差进行补偿,其原理是镜筒等机械结构在一定温度范围

内热胀冷缩控制镜头某处结构的移动^[15],材料的变形量符合线性关系,其关系式为 β 为材料线膨胀系数

$$\Delta L = L_0 \times \beta \times \Delta T \quad (4)$$

式中: ΔL 为材料长度变形量; L_0 为材料原长; β 为材料线膨胀系数; ΔT 为温度变化量。据镜头结构图 8,可作热差补偿的镜筒长度约为 50 mm。初步估算使用铝合金($\beta = 23 \times 10^{-6}/K$)作为外层镜筒材料时,温度变化引起的位移量明显不够补偿热离焦量,需使用较大线膨胀系数的工程塑料配合铝合金共同补偿热差,通过初步估算并查找相关材料^[16],拟使用 ABS 工程塑料($\beta = 100 \times 10^{-6}/K$)。本文采用的是双层镜筒结构,内外镜筒线膨胀系数的差异导致温度变化是位移量不同,像面发生移动,补偿热差。根据上述计算出的像面偏移量,大致确定两种材料补偿的可用长度,关系式为

$$\Delta L = (L_1 \times \beta_1 \times \Delta T + L_2 \times \beta_2 \times \Delta T) - L_3 \times \beta_2 \times \Delta T \quad (5)$$

L_3 为铝合金内镜筒长度约 58 mm,计算出补偿镜筒 ABS 工程塑料的长度 L_1 约为 38 mm,外镜筒铝合金长度 L_2 约为 12 mm。镜筒机械结构的实际补偿量与理想像面的偏移量进行比较,如图 9 所示,除 60 ℃ 补偿稍有欠缺外,其余温度下均拟合良好。将实际补偿量加入到后截距后,在光学软件中分析了各温度下 MTF 的表现情况,其中-20 ℃、60 ℃ 温度下的结果如图 10 所示。相对于 20 ℃ 时,MTF 稍有下降,但整体表现良好,被动式机械补偿结构能良好地中和环境温度变化对光学系统的影响。

表 2 -20~60 ℃ 温度下理想像面的偏移量
Tab. 2 Ideal image plane offset at -20 -60 ℃

温度/℃	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
偏移量/mm	-0.1313	-0.0992	-0.0665	-0.0333	0	0.0346	0.0692	0.1043	0.1299

4 公差分析

光学系统设计仅考虑理想环境,忽略了很多

对光学系统成像质量有不利影响的因素,比如实际加工装配带来的误差:透镜半径、厚度加工、安装偏心等误差。这些误差应该控制在什么范围内才能保证光学系统成像质量,以及误差控制的

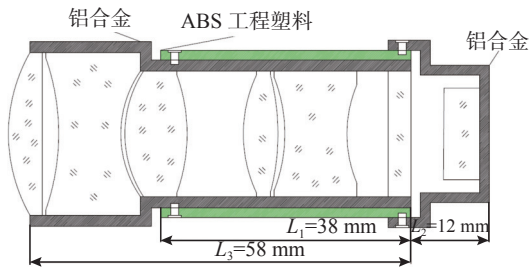


图 8 补偿结构示意图

Fig. 8 Diagram of compensation structure

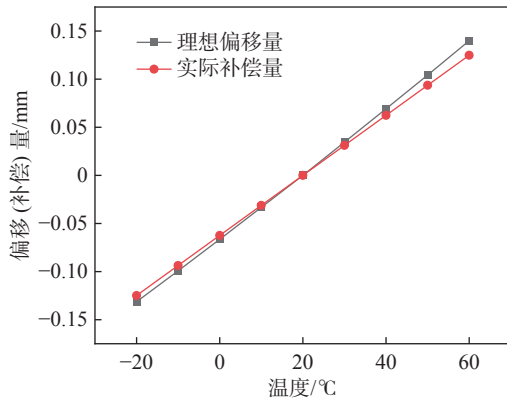
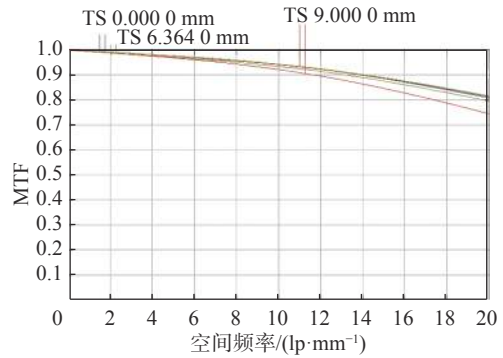


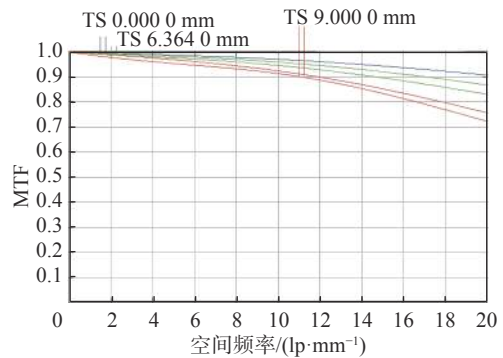
图 9 实际补偿量和理想偏移量

Fig. 9 Actual compensation and ideal offset

范围是否符合现有加工水平, 针对这些问题, 需要对所设计的光学系统做公差分析。本文采用 Zemax 软件中的蒙特卡洛样本灵敏度分析法, 以 MTF 和 RMS 光斑半径为评价标准。经过多



(a) -20 °C



(b) 60 °C

图 10 补偿后 -20 °C 和 60 °C 温度下的 MTF 曲线图

Fig. 10 MTF curves after compensation at -20 °C and 60 °C

次调整分析, 最终确定各类公差分配值如表 3 所示。以上两种评价方式的蒙特卡洛公差分析结果如表 4 所示, 在此公差分配下系统装调后 MTF 在截止频率下仍有 90% 的可能性大于 0.43, 高

表 3 系统公差分配

Tab. 3 Tolerance allocation of the system

表面序号	半径公差 / 光圈	厚度公差/mm	表面偏心公差/mm	元件偏心公差/mm	元件倾斜公差/°	表面不规则度	折射率公差	阿贝数公差/%
1	±4	±0.03	±0.02			±0.5		
2	±4	±0.03	±0.02	±0.02	±0.05	±0.5	±0.001	±1
3	±4	±0.03	±0.02			±0.5		
4	±4	±0.03	±0.02	±0.02	±0.05	±0.5	±0.001	±1
5	±4	±0.03	±0.02			±0.5		
6	±4	±0.03	±0.02	±0.02	±0.05	±0.5	±0.001	±1
7	±4	±0.03	±0.02			±0.5		
8	±4	±0.03	±0.02	±0.02	±0.05	±0.5	±0.001	±1
9	±4	±0.03	±0.02			±0.5		
10	±4	±0.03	±0.02	±0.02	±0.05	±0.5	±0.001	±1

表 4 蒙特卡洛公差分析结果
Tab. 4 Results of Monte Carlo tolerance analysis

蒙特卡洛百分比/%	MTF(@ 20 lp/mm)	RMS光斑半径/mm
≥90	0.4391	0.0205
≥80	0.5118	0.0198
≥50	0.5824	0.0167
≥20	0.6255	0.0122
≥10	0.6494	0.0106

于设计指标 0.3。

5 结 论

本文针对电晕检测的实际需求, 设计了大相对孔径大视场电晕检测用途的日盲紫外光学镜头, 共使用 5 片球面透镜, 焦距为 50 mm, F 数为 2.5, 靶面直径 18 mm, 全视场角 20.4°, 工作波段 240 ~280 nm, 光学总长为 72 mm。MTF 在空间频率 20 lp/mm 处全视场均大于 0.8, 最大畸变小于 0.5%。本文采用的镜片数目少, 结构简单, 分辨率高。采用被动式机械补偿法的双层镜筒结构, 有效地补偿了热差, 保证了系统在 -20 ~60 °C 温度范围内工作的稳定性, 合理的公差分配与分析结果确保了镜头加工装调的可行性。该镜头具有良好的成像质量, 工艺性好, 满足实际需求。

参考文献:

- [1] 张海峰, 庞其昌, 陈秀春. 高压电晕放电特征及其检测 [J]. *电测与仪表*, 2006, 43(2): 6 - 8,31.
- [2] 唐家业, 方盛江, 颜士飞, 等. 日盲紫外真空探测器件和组件技术研究 [J]. *真空电子技术*, 2022(2): 37 - 44.
- [3] 张路飞, 吕银环, 郑伟波, 等. 用于电晕检测的高光效紫外光学系统设计 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(11): 2683 - 2687.
- [4] 康思睿. 用于电晕检测的日盲紫外变焦光学系统设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [5] 李松岩. 折反射式日盲紫外变焦光学系统设计 [D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
- [6] 范雯雯. 大视场日盲紫外告警光学系统设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [7] 陈塑淇, 吕博, 刘伟奇, 等. 用于电晕检测的日盲紫外成像系统设计 [J]. *光子学报*, 2022, 51(9): 0922001.
- [8] 徐苗. 透射式日盲紫外双焦距光学系统设计 [J]. *信息系统工程*, 2020(5): 28 - 29.
- [9] 丁家奎, 王振鹏, 宋真真, 等. 快焦比长焦距日盲紫外光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(19): 192201.
- [10] 梁秀玲. 折反射式日盲紫外预警镜头设计 [J]. *光源与照明*, 2022(7): 52 - 54,245.
- [11] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 128 - 130.
- [12] 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.
- [13] 吉紫娟, 包佳祺, 刘祥彪. ZEMAX 光学系统设计实训教程 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018: 54 - 56.
- [14] 焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件 [J]. *应用光学*, 2006, 27(3): 195 - 197.
- [15] 王子威. 机械被动式温度自适应红外镜头热补偿分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [16] 黄永华, 吴哲, 李晓慈, 等. 热膨胀系数简易测量装置研制及若干材料测量 [J]. *化工学报*, 2016, 67(S2): 38 - 45.

(编辑: 张 磊)