

引用格式: CHEN Suhao, LÜ Bo, LIU Weiqi, et al. Design of a Solar-blind Ultraviolet Imaging System for Corona Detection [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0922001

陈塑湜, 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

# 用于电晕检测的日盲紫外成像系统设计

陈塑湜<sup>1,2</sup>, 吕博<sup>1</sup>, 刘伟奇<sup>1</sup>, 冯睿<sup>1</sup>, 魏忠伦<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**在对高压电晕放电进行监测时,为了扩大成像系统的检测范围,提升检测精度,设计了一款大视场大相对孔径高分辨率的日盲紫外成像系统。该系统采用反远距的结构形式,使用 12 片标准球面镜片,光学总长为 90 mm,系统全视场角为  $56^\circ$ ,相对孔径为  $1/2$ 。系统工作波长为 240~280 nm,在全视场范围内,畸变小于 2.2%,相对照度大于 70%,系统的在 110 lp/mm 的空间频率处调制传递函数大于 0.65,为之后的公差分配和热差校正留有足够空间。计算了由温度变化引起的热离焦,根据离焦量,利用被动式机械补偿法对系统的热差进行校正,补偿后的系统在  $-20\sim 60^\circ\text{C}$  的温度范围内调制传递函数均大于 0.4,实现了无热化设计。最后,通过合理的公差分配及分析,加工装调后的系统仍有较高的成像质量,满足电晕检测的实际使用需求。

**关键词:**应用光学;日盲紫外;光学设计;无热化设计;成像系统

中图分类号:O435

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225109.0922001

## 0 引言

在高压供电系统中,当输电线路表面的电场强度超过空气分子的游离强度时,空气分子被电离和激发,这种现象称为电晕放电<sup>[1-2]</sup>。高压线的电晕放电不仅会消耗大量电能,还会腐蚀电线的绝缘体,导致短路事故的发生。同时电晕放电的电流会产生脉冲电磁波从而严重干扰无线电和高频通信,因此必须对电晕放电进行实时监测和精确定位,以便于电力公司及时发现和处理故障,从而减少电晕放电现象带来的损失<sup>[3-5]</sup>。

在空气中的电晕放电产生的光谱会随着放电的强弱产生变化,对于较弱的电晕放电,其光谱主要集中在紫外波段,而对于较强的放电现象,其光谱可以扩展到可见以及红外波段<sup>[1]</sup>。在电晕检测过程中,电晕放电产生的峰值辐射强度小于太阳辐射强度,太阳辐射会干扰检测过程。但由于地球臭氧层的吸收,太阳对地辐射在 240~280 nm 日盲紫外波段内其辐射强度变得十分微弱<sup>[6]</sup>,在该波段下对高压线路进行观测可以很好地减少环境的干扰,从而提升成像对比度,降低误检率,因此可以利用日盲紫外光学系统对电晕放电进行检测<sup>[7]</sup>。

日盲紫外光学系统凭借其不受太阳辐射干扰的特性,除了用于电晕检测,还在紫外告警<sup>[8]</sup>、紫外侦查<sup>[9]</sup>等领域有着重要的应用。目前国内已有不少学者对日盲紫外光学系统进行了深入的研究,其中,刘建卓<sup>[10]</sup>等设计了日盲紫外和可见光波段采用共光路结构,长波红外段采用独立光路的三波段电晕检测光学系统,通过单镜片调焦使得系统在  $-40\sim 60^\circ\text{C}$  内清晰成像。王红<sup>[11]</sup>设计了一个  $F$  数为 2,全视场为  $120^\circ$ ,焦距仅为 6.95 mm 的大相对孔径广角紫外光学系统,采用反远距,准像方远心光路的结构形式。崔穆涵等<sup>[4]</sup>利用改进的分离式双胶合透镜结构设计了一款大孔径高分辨率的消色差紫外光学系统,在  $10^\circ$  视场范围内,设计的紫外光学系统全探测范围内点列图均方根直径为 0.08 mm,分辨率为 20 lp/mm,有效解决了目前大多数紫外

基金项目:高分专项装备预研项目(No. GFZX0403260206)

第一作者:陈塑湜(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为成像系统设计。Email: chensuhao1993@gmail.com

通讯作者:吕博(1986—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为光学系统设计。Email: jllvbo@163.com

收稿日期:2022-03-17;录用日期:2022-07-01

<http://www.photon.ac.cn>

成像仪存在的定位和指向精度欠缺,色差较大,分辨率及光能利用率不足等问题。高旭东等<sup>[12]</sup>提出了拆分设计和单层衍射光学元件相结合的方法实现深紫外光学系统的无热化设计方法,设计了全视场为 $20^\circ$ , $F$ 数为3.5,温度为 $-60\sim 100^\circ\text{C}$ 的深紫外侦察相机镜头,在 $18.5\text{ lp/mm}$ 处调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)均大于0.65。王森鑫等<sup>[13]</sup>设计了匹配于日盲紫外像增强器的紫外光学系统,视场角为 $40^\circ$ , $F$ 数为2.5。系统由5块标准球面镜组成,光学传递函数在空间频率为 $40\text{ lp/mm}$ 时大于0.6,成像质量良好,但由于设置了渐晕,相面照度受到了一定的影响。

本文所设计的日盲紫外成像系统是用于高压电线的实时监测,通常设置在高压电塔底部。为了扩大电晕检测系统的监测范围,提升检测精度,光学系统在保证较大视场角的情况下,还要具有较高的分辨率。针对电晕检测中对光学系统大视场,高灵敏度以及高分辨率的需求,本文设计了一款日盲紫外光学系统,该系统视场 $56^\circ$ ,相对孔径为 $1/2$ ,同时其分辨率达到 $110\text{ lp/mm}$ 。为了提高系统的稳定性,相比于现有的光学系统,该系统全部使用标准球面镜片,提升了系统的工艺性能,并且在机械设计上利用双层镜筒结构的被动式机械补偿法补偿了热离焦,使得系统在 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内都能保持良好的光学性能。

## 1 光学系统设计

### 1.1 光学系统参数

根据使用场景和镜头视场角需求,选用像面对角线为 $8\text{ mm}$ 的探测器,分辨率为 $1\ 392\times 1\ 040$ ,像元大小为 $4.65\ \mu\text{m}\times 4.65\ \mu\text{m}$ 。可计算出系统焦距约为 $8\text{ mm}$ ,奈奎斯特采样频率约为 $110\text{ lp/mm}$ 。结合使用需求,该镜头的参数要求如表1。

表1 镜头主要设计指标  
Table 1 Main specifications of lens

Parameter	Value
Wavelength	$240\sim 280\text{ nm}$
Field of view: $2\omega$	$56^\circ$
Focal length	$8\text{ mm}$
Relative aperture	$1/2$
Distortion	$<2.5\%$
Total length	$<90\text{ mm}$
Back focal length	$>3\text{ mm}$
MTF@ $110\text{lp/mm}$	$>0.3$

### 1.2 光学系统分析

在 $240\sim 280\text{ nm}$ 的日盲紫外波段,绝大部分光学玻璃的透过率非常低无法使用,常用的光学材料有石英、氟化钙、氟化镁以及蓝宝石。由于氟化镁具有双折射特性,而蓝宝石材料加工难,成本高<sup>[14]</sup>,而石英材料中熔石英在工作波段上相较于石英晶体有着更高的透过率,同时为了便于色差的校正,在设计时选用熔石英和氟化钙两种材料作为镜片材料。氟化钙材料具有吸湿特性,不宜长期暴露在空气中,因此在设计时第一片和最后一块透镜应选用理化性能更好的熔石英材料。

为了满足镜头大视场大相对孔径的参数要求及整机小型化的目标,选择反远距结构作为镜头初始结构。反远距镜头通常由一个具有负光焦度的前镜组和一个正光焦度的后镜组组成,相较于其他对称结构的广角镜头,其系统总长相对较长且轴外像差难以控制,但是反远距镜头的后截距较长,且像方视场角较小,有利于像面照度的均匀性。

优化时将初始结构中的镜片材料替换为熔石英和氟化钙,根据色差校正原理,正透镜替换为阿贝数大的氟化钙材料,负透镜替换为阿贝数小的熔石英材料。这两种材料的折射率在日盲紫外波段都偏低且阿贝数差值小,对色差校正较为不利,而且典型的消色差结构—双胶合透镜结构无法透射紫外波段辐射,因此还需要对原结构中的胶合透镜进行拆分<sup>[15]</sup>。

在优化过程中没有引入非球面,镜头使用全球面透镜结构,主要原因有两点:一是熔石英和氟化钙材料

无法像其他低熔点材料非球面透镜制造时使用模压成型的方法,若采用小球磨头车抛非球面的加工方法,熔石英非球面材料质地坚硬,去除效率较低,批量化加工时相比成盘加工的球面透镜成本高出较多,而氟化钙非球面材料加工停留时间过长时将导致其表面面型稳定性不高。二是紫外波长较短,对表面粗糙度的加工要求较高,使用非球面镜片也会提高工艺难度。因此在设计中使用球面镜片,虽然优化结果的镜片数量较多,但是却能降低批量生产时的成本。通过逐步减小系统视场角,去除渐晕,扩大光阑等方法对镜头进行优化,在前组中增加镜片并且根据结构调整镜间距约束,后组中加入两组双分离结构来代替双胶合镜片校正色差,进一步提升成像质量。

### 1.3 设计结果及性能分析

设计的镜头结构如图1,系统总长为90 mm,共包含12片透镜。系统的调制传递函数如图2所示,在采样的视场内MTF值均大于0.65,远高于设计要求的0.3,为之后的热差及公差分析留有足够的余量。系统在110 lp/mm处的全视场MTF平均值为0.71,最小值为0.65,如图3,全视场内成像质量较一致。系统的点列图如图4,中心视场光斑圆度较好,各视场弥散斑的均方根直径均小于探测器像元尺寸 $4.65\ \mu\text{m}$ ,成像质量良好。系统场曲小于0.05 mm,全视场畸变小于2.2%,如图5,满足设计指标要求。系统在全视场内照度较为均匀,边缘视场的相对照度达到70%以上,如图6所示。

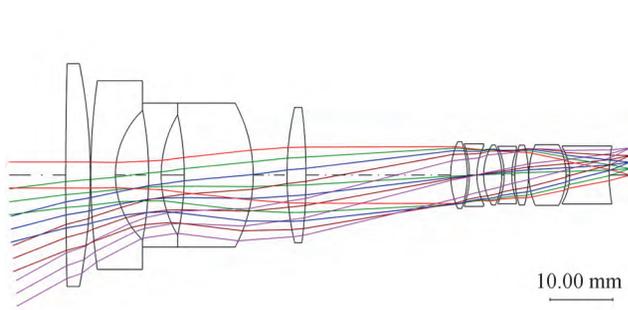


图1 光学系统结构

Fig. 1 Optical system structure

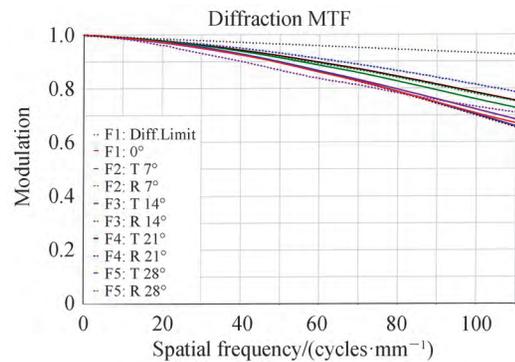


图2 MTF 曲线

Fig. 2 MTF curves

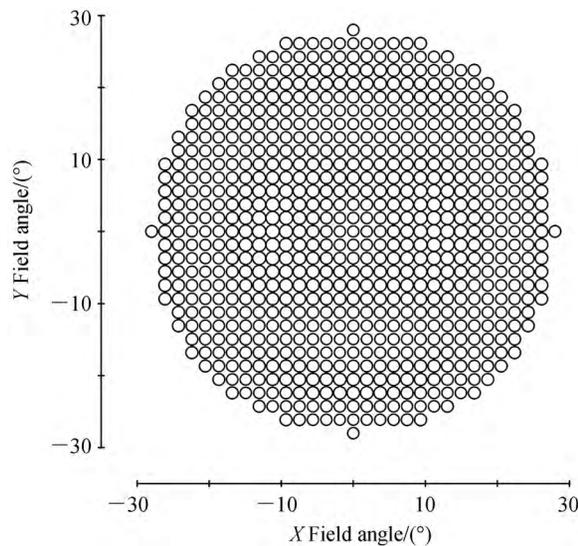


图3 全视场采样MTF

Fig. 3 MTF values in full-field sampling

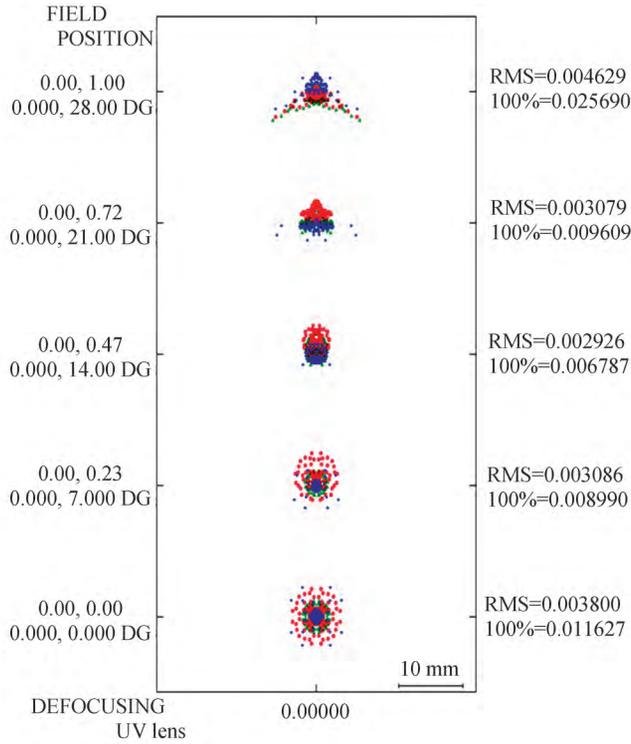


图4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

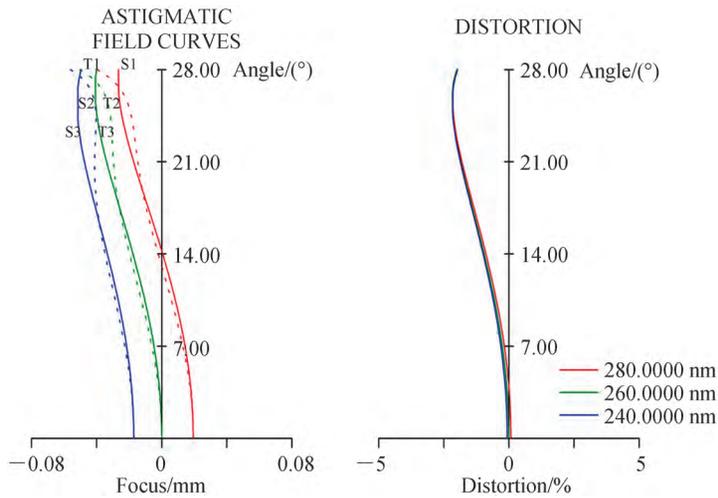


图5 场曲和畸变

Fig. 5 Field curves and distortion

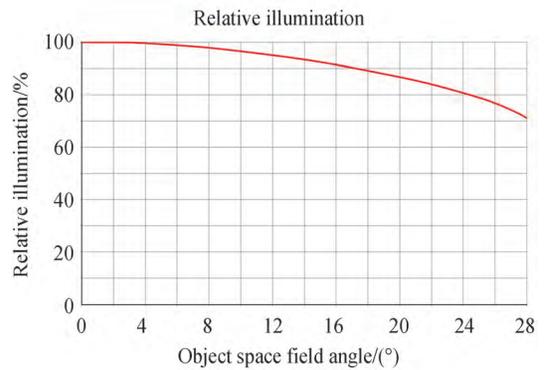


图6 相对照度

Fig. 6 Relative illumination

## 2 系统热差分析

当镜头周围温度发生变化时,光学系统由于镜片和镜筒材料的热变形以及光学材料的热致折射率变化,会产生热离焦现象。尤其是对波长较短的深紫外光学系统成像质量影响极为严重<sup>[12]</sup>。系统的设计温度为 20 ℃,根据实际使用需求,分析了系统在 -20~60 ℃时的 MTF 表现,分析时使用铝合金作为镜筒及隔圈材料,结果如图 7。可以看到系统的 MTF 在环境温度发生变化时有明显的下降,在计算中发现即使是 ±10 ℃的温差,也会对系统 MTF 产生较大的影响,因此必须通过无热化设计以保证系统在不同温度下光学性能的稳定。

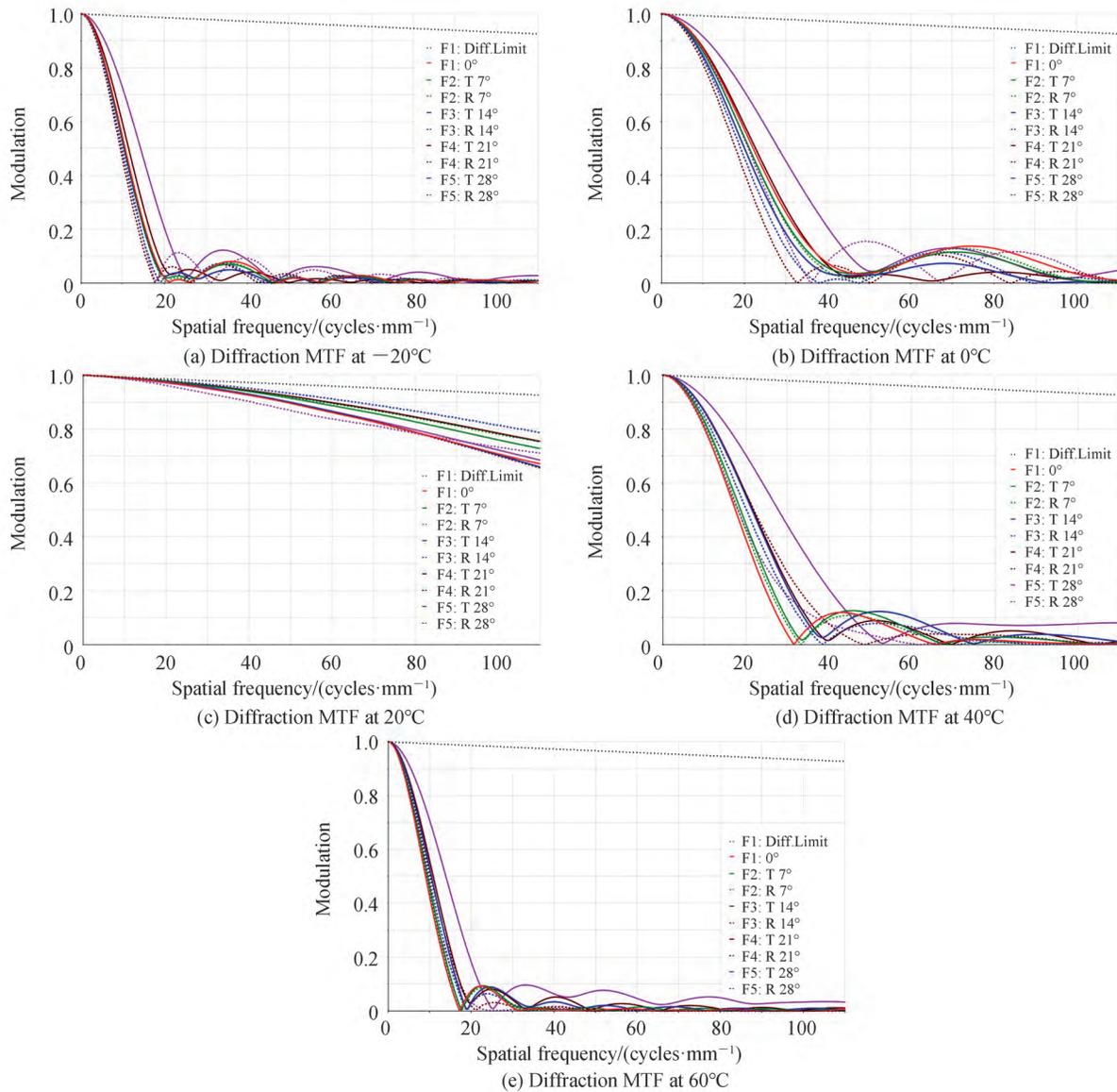


图7 -20~60 °C温度下系统MTF曲线  
Fig. 7 MTF curves at -20~60 °C

无热化设计通常使用机械补偿和光学无热化两种方法实现。由于深紫外波段可用材料少,且氟化钙晶体相较于常用光学玻璃,其线膨胀系数较大( $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),对热差校正十分不利,如果采用光学无热化设计会大大增加系统复杂度以及设计难度,因此本设计中采用机械补偿法对系统热差进行补偿。首先尝试利用后截距对系统的热差进行补偿,在各个温度条件下,发现仅通过改变像面位置即可使系统MTF有明显的提升。记录了各温度下最优的后截距,与20°C时的系统相比得到各个温度下系统相对于原系统的热离焦量,如表2。

表2 各温度下理想像面偏移量  
Table 2 Ideal image plane offset at each temperature

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
Ideal offset/mm	-0.132 9	-0.100 1	-0.06 7	-0.033 7	0	0.034	0.068 4	0.103	0.137 9

常用的机械补偿方法包括被动机械补偿和主动机电补偿,其中传统的被动机械补偿法是利用镜筒机械结构的热胀冷缩现象控制部分镜头结构的移动,使得结构的热膨胀量和补偿面的偏移量相匹配,从而实现热差补偿的方法<sup>[16-17]</sup>,因此被动式机械补偿法中补偿面的位移量和温度的变化量在一定温度范围内是近似

线性的关系。从表2中可以看到,计算得到的理想像面偏移量随温度的变化有较高的线性程度,满足被动式机械补偿法的要求<sup>[18]</sup>。

根据镜头结构,可用作补偿镜筒的最大长度约为72 mm,结合表2中的温度与理想的像面位移量,可以估算出当使用单一补偿镜筒材料时,该材料的线胀系数约为 $48 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。常用金属材料的线胀系数普遍都小于这个数值,因此需要通过工程塑料(线胀系数可达 $100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以上)与金属材料的配合来组成补偿镜筒结构。如图8所示,本文选用了双层镜筒的结构,所有透镜均安装在内镜筒上,探测器则固定在外层的补偿镜筒上,由于内外镜筒膨胀系数的区别,在温度变化时系统的像面会随着补偿镜筒的热膨胀产生较大的位移,从而实现了对系统热差的补偿。

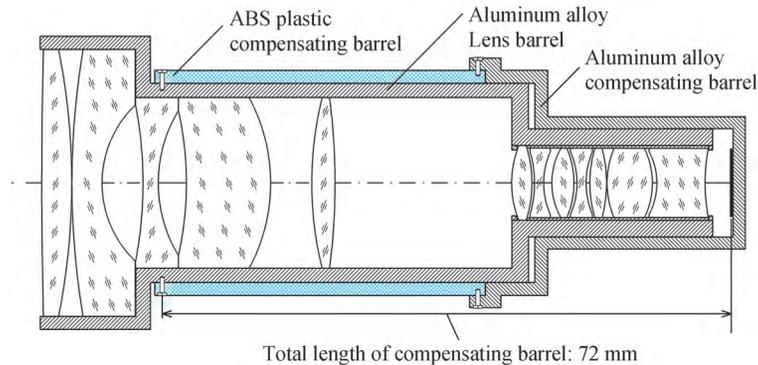


Fig. 8 Structural of compensation lens cone

通过查找材料库<sup>[19-20]</sup>,选择铝合金与ABS塑料作为补偿材料。假设补偿镜筒中ABS塑料长度为 $L_1$ ,铝合金材料长度为 $L_2$ ,则补偿镜筒长度随温度的变化量 $\Delta L(T) = L_1 \times \Delta T \times \beta_{\text{ABS}}(T) + L_2 \times \Delta T \times \beta_{\text{Al}}(T)$ ,其中 $L_2 = 72 \text{ mm} - L_1$ , $\Delta T = T - 20^{\circ}\text{C}$ , $\beta_{\text{ABS}}(T)$ 和 $\beta_{\text{Al}}(T)$ 分别为两种材料在不同温度下的热膨胀系数。通过优化计算,得到 $L_1 = 36.3 \text{ mm}$ 时,实际的像面补偿量与理想的像面偏移量拟合良好,如图9所示。在计算补偿量时,由于理想像面偏移量是以光学设计软件中各温度下后截距的变化量作为参考,而实际的补偿镜筒的变化量 $\Delta L(T)$ 是以补偿镜筒固定点为参考计算的,因此在优化时 $\Delta L(T)$ 需要与理想像面的偏移量和内镜筒筒长随温度的变化量之和进行拟合,以消除两种计算方法之间的差值。

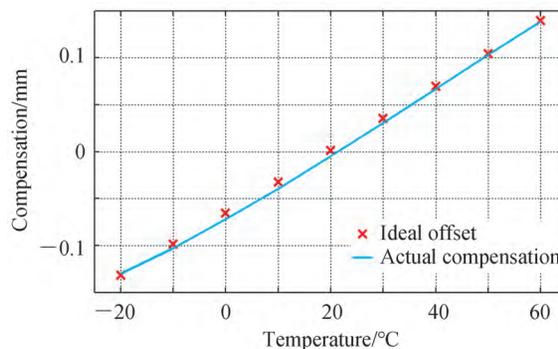


图9 实际补偿量和理想偏移量

Fig. 9 Actual compensation vs. ideal offset

将实际补偿量带入到光学系统中,分析各个温度下补偿后的MTF,结果如图10。可以看到通过被动式机械补偿后,虽然系统MTF在 $20^{\circ}\text{C}$ 时相对于设计值有所降低,但是在温度变化时整体的MTF有明显的提升,全视场MTF均大于0.4,整体成像质量较为良好,因此经过补偿后的系统在 $-20 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 仍有较为稳定的性能表现。

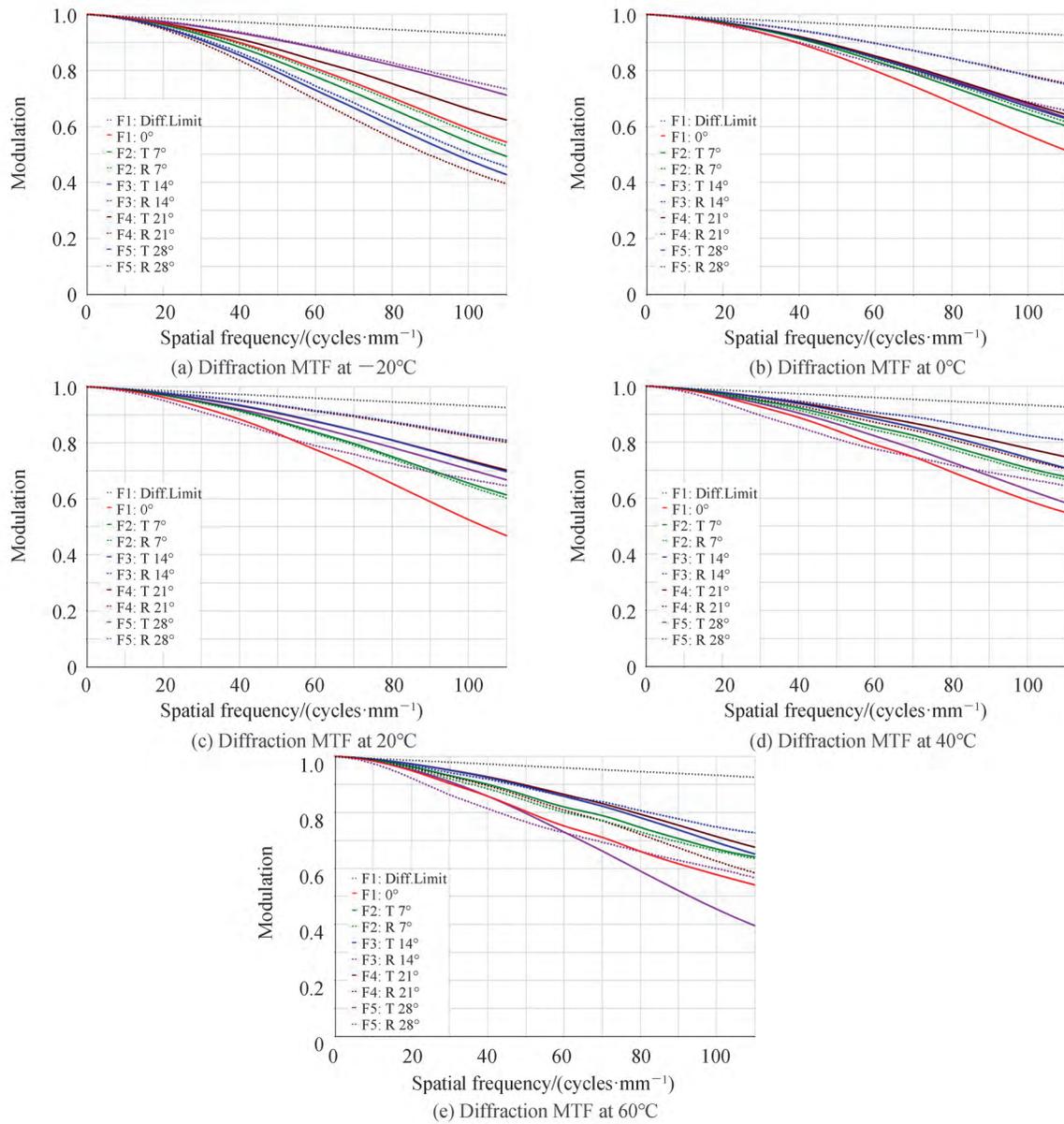


图 10  $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下补偿后的系统 MTF 曲线  
 Fig. 10 MTF curves at  $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  after compensation

### 3 公差分析

在光学系统的加工与装调过程中,由于各类公差的影响,不可避免地会导致系统性能的下陷。因此在系统设计完成后,需要对公差进行分析,找到对系统性能影响较大的公差项,对其进行严格的约束,以保证实际生产和制造的产品能满足使用需求。

使用设计软件的默认公差对系统进行分析,将后截距作为补偿器,将奈奎斯特采样频率  $110\text{ lp/mm}$  下的 MTF 作为评价指标。该默认公差是根据每个表面的具体参数,在给出的公差极限内由软件进行自动分配得到的,其约束较为宽松。在默认公差下系统 MTF 下降太多,无法满足实际需求,通过分析各项公差对 MTF 的影响,发现光学系统中后组镜头的偏心量对 MTF 的影响最为严重。由于后组中各镜片口径较小且相差不大,因此可以通过机械设计上严格约束其偏心为  $0.005\text{ mm}$ ,后组中两组双分离镜头因为镜片间距非常小,仅有约  $0.15\text{ mm}$ ,因此其厚度公差约束为  $0.005\text{ mm}$ ,重新分配的公差如表 3。除此之外,其他各项公差包括折射率、阿贝数、表面不规则度等均使用默认生成的公差。

采用重新分配后的公差对系统进行分析,结果如图 11,图(a)和(b)分别为正切向和弧矢向的 MTF 变化

表 3 公差分配  
Table 3 Tolerance allocation

Element number	Test plate fit tolerance /fringes	Radius tolerance /mm	Thickness tolerance /mm	Element wedge tolerances /mm	Barrel tilt tolerances /radians	Group displacement tolerances /mm
1	12	84/0.5	0.5/0.2	0.1	0.002 5	0.2
2	12	4.2/0.02	0.4/0.1	0.05	0.000 5	0.02
3	12	1.8/0.04	0.3/0.1	0.04	0.000 3	0.02
4	12	0.2/0.4	0.1/0.08	0.02	0.001 5	0.02
5	12	0.2/1.9	0.08/0.04	0.02	0.002 5	0.04
6	2	0.02	0.02/0.005	0.004	0.000 3	0.005
7	2	0.02	0.02	0.002	0.000 3	0.005
8	2	0.02	0.02/0.005	0.002	0.000 3	0.005
9	2	0.02	0.02	0.002	0.000 3	0.005
10	2	0.02	0.04/0.01	0.004	0.000 5	0.005
11	6	0.04/0.02	0.02/0.01	0.01	0.000 5	0.005
12	2	0.02/0.9	0.06	0.002	0.000 3	0.005

概率曲线。可以看到在加工装调后的系统正切和弧矢方向的 MTF 在公差的影响下下降得较为一致,在 80% 的概率下系统奈奎斯特采样频率处 MTF 均大于 0.35,满足设计指标要求。

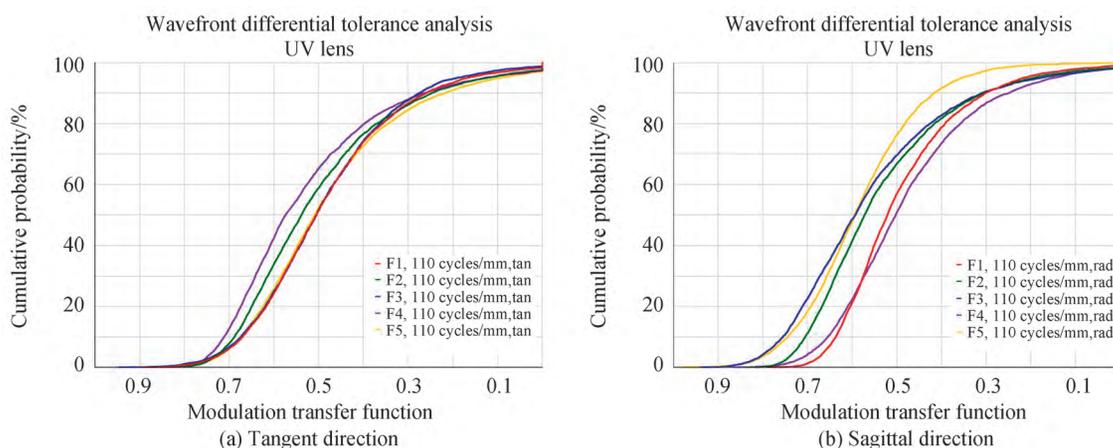


图 11 公差影响下 MTF 变化概率曲线

Fig. 11 MTF change probability curves with tolerance

## 4 结论

本文针对高压线路电晕检测中的实际需求,设计了一款用于电晕检测的大视场大相对孔径高分辨率的日盲紫外光学系统,系统总长为 90 mm,共使用 12 片标准球面镜片,结构设计合理,易于加工和装调。在 56° 的全视场范围内,系统在 110 lp/mm 的空间频率处 MTF 大于 0.65,畸变小于 2.2%,相对照度大于 70%,具有良好的成像质量;通过被动式机械补偿法实现了无热化设计,系统在 -20~60℃ 的温度范围内,全视场 MTF 均大于 0.4,热稳定性良好;通过合理的公差分配,加工装调完成后的系统 MTF 有 80% 的概率在 0.35 以上。设计结果表明,该光学系统在光学性能、热稳定性以及公差灵敏度上均满足设计指标要求,具有较高的工程应用价值。

### 参考文献

- [1] ZHANG Haifeng, PANG Qichang, CHEN Xiuchun. The characteristics of high-voltage corona and its detection [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2006, 43(2): 6-8+31.

- 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] YAN Feng, YU Zijiang, YU Xiao, et al. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 709-713.  
闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 709-713.
- [3] ZHANG Haifeng, PANG Qichang, LI Hong, et al. Detection of high-voltage corona based on UV spectrum technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(8): 1162-1166.  
张海峰,庞其昌,李洪,等. 基于 UV 光谱技术的高压电晕放电检测[J]. 光子学报, 2006, 35(8): 1162-1166.
- [4] CUI Muhan, TIAN Zhihui, ZHOU Yue, et al. Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera [J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 212-218.  
崔穆涵,田志辉,周跃,等. 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 212-218.
- [5] ZHANG Hongjia, MA Jun, ZHU Haiyu, et al. Design of "solar blind" ultraviolet zoom optical system used in corona detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 157-163.  
张鸿佳,马军,朱海宇,等. "日盲"紫外电晕检测变焦光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 157-163.
- [6] JIN Guiping, PANG Qichang. The key points of UV imaging and detecting system [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(3): 294-297.  
靳贵平,庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. 光子学报, 2003, 32(3): 294-297.
- [7] DAVARI N, AKBARIZADEH G, MASHHOUR E. Intelligent diagnosis of incipient fault in power distribution lines based on corona detection in UV-visible videos[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(6): 3640-3648.
- [8] ZHENG Haijing, BAI Tingzhu. Development analysis and state of ultraviolet warning technology [J]. Infrared Technology, 2017, 39(9): 773-779.  
郑海晶,白廷柱. 紫外告警技术现状及发展分析[J]. 红外技术, 2017, 39(9): 773-779.
- [9] ZHU Haiyu, MA Jun, ZHANG Hongjia, et al. Design of solar blind ultraviolet refractive /diffractive zoom lens used in criminal investigation [J]. Laser Technology, 2015, 39(2): 242-246.  
朱海宇,马军,张鸿佳,等. 刑侦日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 242-246.
- [10] LIU Jianzhuo, WANG Xuejin, HUANG Jianbo, et al. Design of three-band optical system used in corona detection [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1228-1234.  
刘建卓,王学进,黄剑波,等. 三波段电晕检测光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1228-1234.
- [11] WANG Hong. Optical system study and design used for the ultraviolet warning camera with ultra-wide field [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12): 160-164.  
王红. 大视场紫外告警相机光学系统研究与设计[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 160-164.
- [12] GAO Xudong, CUI Qingfeng, ZHENG Hanqin, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 154-162.  
高旭东,崔庆丰,郑汉青,等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 154-162.
- [13] WANG Miaoxin, CHENG Hongchang, LI Jinbo. Design of large aperture transmission ultraviolet optical system based on solar-blind ultraviolet image intensifier [J]. Infrared Technology, 2021, 43(2): 127-130.  
王淼鑫,程宏昌,李进波. 基于日盲紫外像增强器的大孔径透射式紫外光学系统设计[J]. 红外技术, 2021, 43(2): 127-130.
- [14] XU Miao, LIANG Xiuling. Optical design of long transmission type solar blind ultraviolet system [J]. Optical Instruments, 2017, 39(2): 43-47.  
徐苗,梁秀玲. 中焦距透射式日盲紫外光学系统设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 43-47.
- [15] KANG Sirui. Design of solar blind ultraviolet zoom optical system for corona detection [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.  
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.
- [16] WU Xiaojing, MENG Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005(4): 391-393+405.  
吴晓靖,孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005(4): 391-393+405.
- [17] WANG Ziwei. Thermal compensation analysis of infrared lenses with mechanical passive temperature adaption [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.  
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.
- [18] JIAO Mingyin. General conditions for thermal compensation in optical systems [J]. Journal of Applied Optics. 2006(3): 195-197.  
焦明印. 光学系统实现热补偿的通用条件[J]. 应用光学, 2006(3): 195-197.
- [19] CORRUCINI R J, GNIEWEK J J. Thermal expansion of technical solids at low temperatures: a compilation from the literature[M]. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1961.
- [20] HUANG Yonghua, WU Zhe, LI Xiaoci, et al. Development of simple thermal expansion coefficient measurement apparatus and its application to several materials [J]. CIESC Journal, 2016, 67(S2): 38-45.  
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.

## Design of a Solar-blind Ultraviolet Imaging System for Corona Detection

CHEN Suhao<sup>1,2</sup>, LÜ Bo<sup>1</sup>, LIU Weiqi<sup>1</sup>, FENG Rui<sup>1</sup>, WEI Zhonglun<sup>1</sup>

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** During real-time monitoring of high voltage corona discharge, the solar radiation intensity is much higher than the radiation generated by corona discharges, which will interfere with the detection process. However, due to the absorption of the earth's ozone layer, the radiation intensity of the sun's radiation to the ground becomes very weak in the solar-blind ultraviolet band of 240~280 nm. Observing high-voltage wires in this band can reduce the interference of the environment, thereby improving the imaging contrast and reducing the false detection rate. In order to expand the detection range and improve the detection accuracy of the solar-blind UV imaging system, the optical system needs to have a higher resolution while ensuring a larger field of view. In this paper, a solar-blind ultraviolet optical system with a large field of view, large relative aperture and high resolution is designed. We have formulated the design index according to user needs, and selected an anti-telephoto lens as the initial structure according to the design index requirements. During optimization, we first replaced the lens material with fused silica and calcium fluoride materials commonly used in the ultraviolet band. According to the principle of chromatic aberration correction, the positive lens is replaced by calcium fluoride with a large Abbe number, and the negative lens is replaced by fused silica with a small Abbe number. The refractive index of these two materials is low and the Abbe number difference is small in the solar-blind ultraviolet band, which is not suitable for chromatic aberration correction, and the typical achromatic structure doublet lenses can not transmit ultraviolet radiation, so we added two sets of double separation structures to correct chromatic aberration. Due to the high requirements for the surface roughness of the lens in the ultraviolet band, the limitation of materials and apertures, and the consideration of technological difficulty, no aspherical lens was introduced in this design. The final design uses 12 standard spherical lenses, with a total optical length of 90 mm, a full field of view of 56°, and a relative aperture of 1/2. In the full field of view, the distortion is less than 2.2%, the relative illumination is greater than 70%, the Modulation Transfer Function (MTF) of the system is greater than 0.65 at the spatial frequency of 110 lp/mm, and the optical system has good imaging quality. After that, we analyzed the thermal defocusing caused by the thermal deformation of the lens and lens barrel materials and the thermally induced refractive index change of the optical material in the temperature range of -20~60 °C. The results show that the MTF of the system decreases significantly when the ambient temperature changes. The thermal defocus amount of the system has an approximate linear relationship with the temperature change, so we can use the passive mechanical compensation method to correct the thermal difference of the system. We use ABS plastic with high coefficient of linear expansion as the compensation lens barrel to compensate for thermal defocusing. The MTF of the compensated system is greater than 0.4 in the working temperature range, realizing athermal design. Finally, through reasonable tolerance allocation, the MTF of the tangential and sagittal directions of the system after processing and adjustment decreases relatively uniformly under the influence of tolerances. Under the probability of 80%, the MTF at the Nyquist sampling frequency of the system is greater than 0.35, and the system still maintains a high imaging quality, which meets the actual requirements of corona detection.

**Key words:** Applied optics; Solar-blind ultraviolet; Optical design; Athermalization design; Imaging system

**OCIS Codes:** 220.2740; 040.7190; 080.3620