

文章编号:1004-4213(2010)10-1770-5

# 双谱段全景电晕探测光学系统\*

王丽萍

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 1300332)

**摘要:**为扩大电晕系统探测范围、提高实时探测能力,采用折反射全景结构建立了一种新型双谱段(“日盲”紫外/可见光)电晕探测系统.介绍了双谱段折反射全景电晕探测系统工作原理,并根据系统要求确定了镜组结构及子系统光学参量.在分析折反射全景系统像差特性的基础上,研究了折、反射子光学系统间像差补偿及照度均匀性改善方法.完成了视场角为 $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$ 、相对孔径 1:2 的双谱段全景电晕探测光学系统设计.分析结果表明:“日盲”紫外全景系统各视场能量集中度 100% 弥散圆直径均小于紫外 ICCD 像元尺寸  $30 \mu\text{m}$ ;可见光紫外全景系统各视场  $\text{MTF} > 0.5 @ 83 \text{ lp/mm}$ .像面照度均匀性优于 99.8%;满足了大视场,大相对孔径及高均匀性像面照度等电晕探测需求.

**关键词:**双谱段电晕探测;折反射全景;大视场大相对孔径;高均匀性像面照度;光学设计

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1770

## 0 引言

紫外成像电晕探测技术利用了太阳辐射的“日盲”特性。“日盲”紫外是指波长为 220~290 nm 间的紫外光.由于臭氧层的强烈吸收,在近地大气中这部分紫外光含量几乎为零.在“日盲”区,电晕放电的紫外辐射在微弱的辐射背景噪音下就容易显现出来<sup>[1-4]</sup>.紫外成像电晕探测技术正是通过探测电晕放电“日盲”区的紫外辐射确定电晕的位置和强度.为了准确测定故障位置,在检测的紫外信号的同时,还须检测可见光背景图像.紫外成像电晕探测设备采用双光谱成像及图像融合技术,确保在日光下获得清晰的紫外光图像<sup>[5-6]</sup>.现有紫外成像电晕检测设备通常采用卡塞格林光学系统,视场角小( $8^\circ \times 5^\circ$ )且有中心遮拦,导致系统检测范围有限,实时性差.

本文提出一种新型电晕探测光学系统,将折反射全景结构引入电晕探测系统设计,可增大系统视场,消除遮拦影响,提高系统探测能力.本文根据电晕探测需求,通过合理分配反射、折射子光学系统参量,建立了双谱段折反射全景系统结构.分析了该系统光学特性,讨论了大相对孔径及高均匀性像面照度全景系统设计透镜方法,以最简洁的型式满足光学系统对光瞳衔接、滤光片入射角度、成像质量等要求.该系统具有  $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$  的大视场角,1:2 的相对孔径,99.8% 的像面照度均匀性.

## 1 工作原理与结构

双谱段全景电晕探测系统由反射镜组、紫外/可见光分束镜、紫外中继镜组、可见光中继镜组、紫外探测器及可见光探测器组成,如图 1.由离轴视场无遮拦地进入光学系统入瞳的光束首先入射到反射镜组的凹面反射镜上,反射后入射至凸面反射镜上再次反射,光线穿过凹面反射镜中心孔进入分束镜.被紫外/可见光分束镜分光后的可见光经可见光中继镜成像于可见光探测器;紫外光束经紫外中继镜成像于紫外探测器.实际系统设计中采用镀有“日盲紫外”高反膜的熔石英棱镜做分光器,避免使用平板分束镜引入的像散及位移.

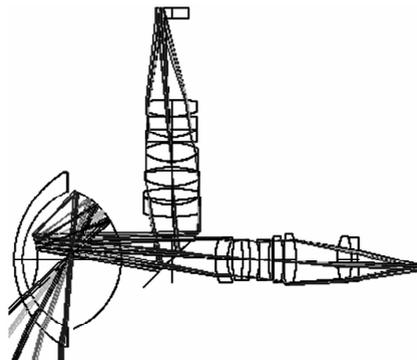


图 1 双谱段全景电晕探测系统原理

Fig. 1 Operating principle of the dual spectral panoramic corona detector

## 2 折反射全景系统成像特性

折反射全景系统由常规成像透镜和曲面反射镜组成,能够实时获取水平方向  $360^\circ$  和垂直方向一定

\* 吉林省科技发展基金(20080516)资助

Tel:0431-86176580

Email:wlp8121@126.com

收稿日期:2010-07-16

修回日期:2010-08-13

角度的全景图像.折反射全景成像系统采用平面圆柱投影法<sup>[7-12]</sup>.能够将一个 $360^\circ$ 方位角,超半球俯仰角的空间范围内景物放到一系列同轴的圆柱面上来观察,并将它们映射到二维平面上,形成一个环形的图.环带镜头的视场范围为(方位角 $x$ 俯仰角)为 $360^\circ \times (\omega_1 - \omega_u)$ .俯仰视场对应的角 $F$ 上边缘视场角为 $\omega_u$ ,下边缘视场角为 $\omega_1$ .圆环像外环的半径与 $\omega_1$ 成正比;中央盲区半径,即环带像内环的半径与 $\omega_u$ 成正比<sup>[13]</sup>.由于环带成像系统存在第二块凸面反射镜,必然会遮挡中心视场,将形成像面上的中央盲区.

为了尽可能增大视场范围,希望 $\omega_1$ 越大越好.但是在实际的系统设计中, $F$ 角一般在 $40^\circ \sim 60^\circ$ 之间,且总是存在 $\omega_u$ .盲区对应的立体角为

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\omega_u) \quad (1)$$

因此环带系统凝视视场对应的立体角为

$$\Omega_s = 2\pi(\cos\omega_u - \cos\omega_1) \quad (2)$$

### 3 双谱段折反射全景电晕探测系统光学设计

折反射全景系统的性能主要取决于前置反射镜组,反射镜地引入有效地扩大了系统视场,也带来了严重影响系统成像质量的像差.根据像差理论由大视场导致的轴外像差像散、及场曲,是全景系统像差的主要因素,影响像面清晰度.

该系统的设计难点在于紫外全景光路设计,既要实现大视场、大相对孔径、高均匀性像面照度的能量探测要求,还需在光学材料受限的条件下以最少的元件数满足滤光片入射角度、外形尺寸、工艺性能、成像质量等要求.

#### a) 紫外光学材料限制

虽然“日盲”紫外全景镜头的工作带宽较窄,但是随着波长变短,光学材料的色散变得很大.与熔石英和氟化钙在可见光区 $486 \sim 656 \text{ nm}$ 折射率变化相比,两种材料在 $245 \sim 285 \text{ nm}$ “日盲”紫外波段内折射率变化值更大.这就使得光学系统的像差尤其是色差校正变得困难,受到光学材料限制负透镜只能选熔石英,正透镜可选只有氟化钙.这两种材料的折射率都很低并且阿贝数差值小,不利于像差校正.

#### b) 光学薄膜对系统要求

滤光片入射光线角度控制是限制光学设计的自由度的另一个重要因素.为有效屏蔽紫外探测器对“日盲”紫外谱段外太阳辐射的响应,全景光学系统引入了分束镜及紫外带通滤光片确保探测器在日照环境下正常工作.为避免薄膜峰值漂移滤光片上入射光线角度应控制在 $10^\circ$ 以内.

#### c) 像面照度均匀性

保证高均匀性像面照度的是“日盲”紫外折反射全景系统设计的关键任务之一.照度的不均匀可能使目标图像被背景淹没,造成漏报;也容易因面探测器组件本身的噪音高于目标信号而产生误判等.

目前能采购到的“日盲”紫外 ICCD 的分辨率约为 $17 \text{ lp/mm}$ ,对用于目标辐射探测的能量系统,分辨率的要求可以适当放宽.即便如此,“日盲”紫外全景系统的像差必须得到良好的校正,否则像点的弥散斑直径将严重超出探测器像元尺寸.

### 3.1 光学系统技术指标确定

双谱段折反射全景电晕探测系统的优势就在于其提供的大范围凝视视场.水平放置时输电线路监控区域在视场外围而不在中央,双谱段折反射全景光学系统选择与这一区域相符的视场角: $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$ .紫外探测器选用 ICCD,光电阴极尺寸为 $\Phi 20 \text{ mm}$ ,最小像元 $30 \mu\text{m}$ ,可见光探测器选用全画幅相机,最小像元 $6 \mu\text{m}$ .综合成像质量,外形尺寸等因素,“日盲”紫外折反射全景系统相对孔径定为 $1:2$ .可见光折反射全景系统相对孔径定为 $1:4.5$ .该光学系统的相对孔径和视场都很大,给高级球差、场曲、像散的校正带来了困难.必须通过合理分配反射、折射子光学系统参量,选择适当初始结构保证光学系统的质量.

### 3.2 反射、折射子光学系统参量分配

可见光全景系统相对孔径小,分辨率要求高,折射系统放大倍率 $\beta_{\text{Refr}}$ 是决定系统尺寸、中继镜视场角、系统后工作距离,并影响着折反射子光学系统间像差平衡的关键参量.

“日盲”紫外全景系统相对孔径大,分辨率要求低,反射镜组的 $F$ 数是关键参量,它决定着“日盲”紫外全景系统反射镜组及中继镜的光学参量分配,直接影响系统的结构尺寸及像差校正.反射镜组为适应大孔径要求适当降低了分辨率, $F/\#_{\text{Refl}}$ 取值较小.

$$\beta_{\text{Refr}} = \frac{F/\#_s}{F/\#_{\text{Refl}}} \quad (3)$$

经分析确定的系统结构关键参量为

$$\beta_{v-\text{Refr}} = -0.6; F/\#_{u-\text{Refl}} = 3.3$$

### 3.3 反射镜组设计

反射镜组的设计自由度较小,主要提供适当的角放大倍率以扩大视场.设计时主要考虑满足系统焦距,结构尺寸要求,并确保各视场光路无遮拦.为保证系统良好的成像质量、折射和反射子光学系统应尽量独立的进行像差校正.避免大像差补偿设计时出现的加工、装调困难.兼顾系统结构紧凑及反射

镜镀膜工艺要求,反射镜组选取主镜凹镜,次镜凸镜的配合形式.反射镜组中主要的像差是由大视场带来的像散、场曲.两镜全球面设计没有足够的变量校正像差.初始结构求解时让两反射面的曲率半径近似相等以减小像散、场曲.

为保证光线无遮拦的前提下实现主次镜的定位安装.反射镜前引入了一片壳形的负透镜,材料为熔石英.将次镜背面胶合在负透镜上,胶合区域在系统盲区之内不会造成光线遮拦.另外,负透镜的引入也减小了入射到反射镜上的光线角度,有利于像差校正.引入负透镜的缺点是增大了系统口径,如图 2.

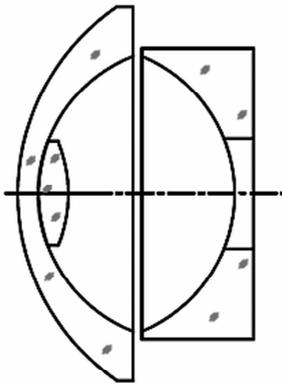


图 2 反射镜组  
Fig. 2 Layout of panoramic shell

大视场光学系统通常存在像面照度不均的现象,本文采用两种方案解决此问题.

#### a) 利用光阑像差

轴外像点照度以  $\cos^4 \omega'$  变小是从理想成像公式推导得到的,引入光阑像差是提高像面照度均匀性的一种重要途径.光阑彗差  $S_{\parallel P}$  使充满近轴入瞳的轴外光束在孔径光阑上的投影宽度比轴上点的相应宽度小.保证轴外光束充满孔径光阑,则其入瞳面上实际宽度必大于轴上光束宽度.此时,轴外像点照度为

$$E = E_0 \frac{S'_P}{S_{P_0}} \cos^4 \omega' \quad (4)$$

式中,  $S'_P$  和  $S_{P_0}$  分别为轴外点和轴上点的成像光束在入瞳上的截面积.

随半视场角的增大,光阑彗差  $S_{\parallel P}$  现象越明显.本文设计的反射镜组引入了大量光瞳像差,利用迭代使各视场主光线通过孔径光阑中心,并保证轴外光束充满孔径光阑产生像差渐晕改善像面照度均匀性<sup>[14-15]</sup>.

#### b) 利用大量桶形畸变

畸变将使像面元  $ds$  和  $ds'$  之比不同于理想系统,像面元在子午方向收缩必同时导致该方向孔径角增大.桶形畸变可使与物方半视场角  $\omega$  对应的  $\omega'$  越小,增大  $\cos^4 \omega'$  值.本文设计的全景系统采用  $f\theta$

投影关系,引入桶形畸变改善像面照度,在畸变曲线给定的条件下反演近  $f\theta$  投影关系,确定目标方向也容易实现.

### 3.4 中继镜设计

透射式中继镜的作用是将反射镜组所成的虚像以适当倍率成像到探测器上.设计中要保证转像镜入瞳与反射镜组出瞳重合,并将光学系统像差校正到一定状态以便与反射镜组产生的场曲、像散及彗差相互补偿.

中继镜是大相对孔径,中等视场的光学系统,对光线会聚作用强烈,容易产生负场曲适于像差平衡.将补偿面定为中继镜像面.由于中继镜物距大,设计按正向光路进行时,透镜组焦距和主面的微小变动对倍率及共轭距离影响小,利于提高像差的计算准确度.反射镜组像差折算到最终像面时需要乘以相应的倍率.沿轴像差乘中继镜垂轴放大率  $\beta_{\text{Ref}}$  的平方,垂轴像差直接乘中继镜垂轴放大率  $\beta_{\text{Ref}}$ .

#### a) “日盲”紫外中继镜

受光学材料、元件数量、滤光片入射角等制约,紫外中继镜初始结构无合适型式可选,本文从方程求解消初级像差初始结构入手,通过分裂透镜,加齐明镜等方法将系统复杂化,达到指标要求,见图 3. “日盲”紫外中继镜相对孔径 1:1.2,入瞳直径为 35 mm,滤光片最大入射光线角度小于  $10^\circ$ .

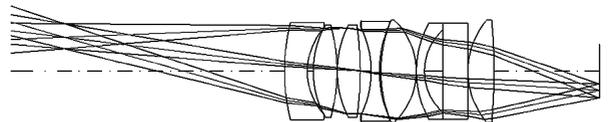


图 3 紫外中继镜组  
Fig. 3 Layout of SBUV relay lens

#### b) 可见光中继镜

选择具有对称结构的双高斯及 Topogon 物镜的联合型为初始结构,为提高相对孔径和成像质量,需要减少轴上及轴外高级球差.采用分散光焦度的方法在 Topogon 后面增加一胶合透镜.这个新增加的胶合镜承担了一定的光焦度以增大相对孔径,并使整个系统主面后移加大了中继镜物距减小了视场角.为降低高级球差,使新增加的胶合镜处于近似不晕的位置.另外,新增的胶合面采用了不等折射率的正常胶合产生负球差与系统平衡.在双高斯靠近光阑面的位置加入平板玻璃,利用其产生的光阑球差减小系统的高级像散和视场高级球差.优化后平板变为了负透镜,系统主面继续后移,使中继镜半视场角相应减小.

### 3.3 像差平衡

将中继镜与反射镜组连接后进行像差平衡,紫外及可见光系统都出现像散校正程度不足而场曲过

度校正的情况. 场曲来源于中继镜组, 中继镜组为大相对孔径系统, 光焦度大容易产生负场曲. 像散来源于反射镜组. 与反射镜组相比, 中继镜为小视场系统, 能够提供的负像散有限, 不足以补偿反射镜组像散. 中继镜设计时像散并不是主要的像差因素, 与反射镜组连接后, 像散的高级量也被传递过来, 像散显著增大. 可将反射镜非球面化减小像散<sup>[6]</sup>. 考虑非球面加工影响, 本文采用全球面设计, 软件分析表明, 该系统满足了大视场, 大相对孔径及高均匀性像面照度的能量探测需求.

### 4 设计结果

“日盲”紫外折反射全景电晕探测系统是对目标信号进行能量探测的系统, 能量集中度是评价系统成像质量的关键指标, “日盲”全景系统光路如图 4. 图 5 为紫外光路几何能量集中度曲线, 纵坐标代表百分比能量集中度, 横坐标代表弥散圆直径. “日盲”紫外全景系统各视场能量集中度 100% 弥散圆直径均小于紫外 ICCD 像元尺寸 30  $\mu\text{m}$ . 能量集中度 80% 弥散圆直径均小于 20  $\mu\text{m}$ . “日盲”紫外全景系统设计通过像差渐晕及引入适量的桶形畸变保证像面照度均匀性高于 99.8%, 见图 6. 全视场  $f\theta$  畸变量 2.5%, 目标位置视场角可根据畸变曲线标定.

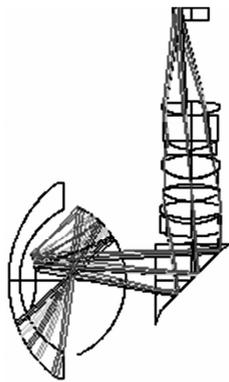


图 4 紫外折反射全景光路  
Fig. 4 Layout of SBUV catadioptric omnidirectional optical system

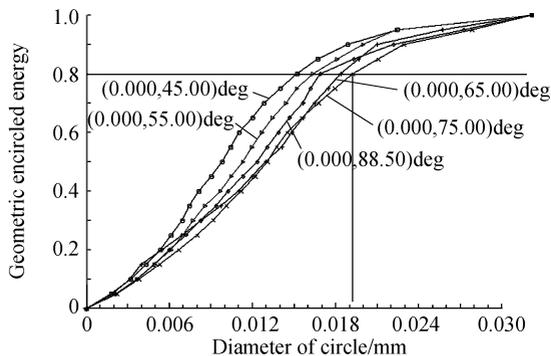


图 5 紫外折反射全景系统能量集中度  
Fig. 5 Encircled energy of SBUV catadioptric omnidirectional optical system

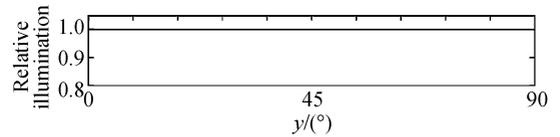


图 6 紫外折反射全景系统像面照度  
Fig. 6 Illumination uniformity on the image of SBUV catadioptric omnidirectional optical system

可见光折反射全景系统提供可见光背景图像便于准确测定故障位置, 该系统为成像系统(如图 7), 根据所选全画幅相机确定光谱范围 460~630 nm, 探测器 COMS 最小像元尺寸 6 $\mu\text{m}$ , 奈奎斯特频率  $N=1/2 \times 6=83 \text{ lp/mm}$ . 当  $N=83 \text{ lp/mm}$  时,  $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$  内各视场 MTF 高于 0.5, 见图 8. 图 9 所示为像面照度均匀性高于 99.8%. 全视场畸变量于紫外系统相同以便于双光谱图像融合与目标定位. 目前双谱段全景镜头已进入装调实验阶段, 见图 10.

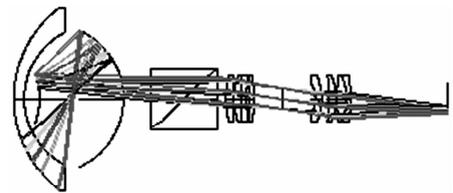


图 7 可见光折反射全景光路  
Fig. 7 Layout of visible catadioptric omnidirectional optical system

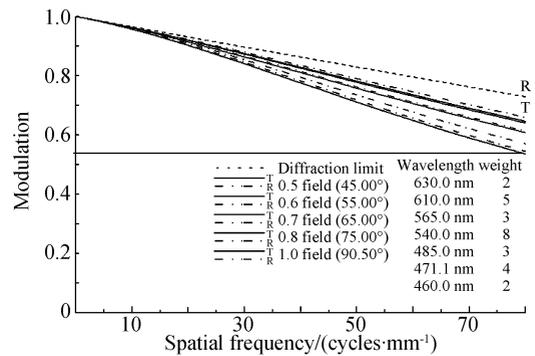


图 8 可见光折反射全景系统 MTF  
Fig. 8 MTF of visible catadioptric omnidirectional optical system

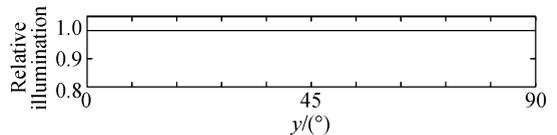


图 9 可见光折反射全景系统像面照度  
Fig. 9 Illumination uniformity on the image of visible catadioptric omnidirectional optical system



图 10 装调过程中的双谱段全景镜头  
Fig. 10 Layout of dual spectral panoramic imaging system in alignment

## 5 结论

本文设计的新型电晕探测光学系统利用折反射全景结构扩大视场,提高系统探测能力。“日盲”紫外全景系统在 $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$ 视场弥散圆直径小于ICCD像元尺寸,可见光紫外全景系统各视场MTF $>0.5@83\text{ lp/mm}$ 。系统像面照度均匀性大于99.8%。满足了大视场,大相对孔径及高均匀性像面照度的能量探测需求。

### 参考文献

- [1] WALKER D, KUMAR V, MI K, *et al.* Solar-blind AlGaIn photodiodes with very low cutoff wavelength[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **76**(4): 404-405.
- [2] REVERCHON J L, MAZZEO G, DUSSAIGNE A, *et al.* Status of AlGaIn based focal plane arrays for UV solar blind detection [C]. *SPIE*, 2005, **5964**: 596402-1-12.
- [3] SCHREIBER P, DANG T, PICKENPAUG H, *et al.* Solar blind UV region and UV detector development objectives [C]. *SPIE*, 1999, **3629**: 230-248.
- [4] DOO K S, OH JS, JAHNG S G, *et al.* Simulation of target detection in ultraviolet and infrared bands[J]. *Opt Eng*, 2001, **40**(11): 2646-2653.
- [5] LIU Jun, LI Zi-tian, YAO Ming-hui. Research of UV camera in corona discharge detection application [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, **7**(7): 1313-1315.  
刘军, 李自田, 姚鸣晖. 紫外相机在电晕检测系统中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2007, **7**(7): 1313-1315.
- [6] JIN Gui-ping, PANG Qi-chang. 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] MATRYNOV V N, JAKUSHENKOVA T I, URUSOVA M

- V. New constructions of panoramic annular lenses; design principle and output characteristics analysis[J]. *Proc SPIE*, 2008, **7100**: 71000O-1-12.
- [8] SIMON T. Panoramic lens applications revisited[C]. *SPIE*, 2008, **7000**: 70000L-1-8.
- [9] KWEON G, KIM K T, KIM G, *et al.* Folded catadioptric panoramic lens with an equidistance projection scheme[J]. *Appl Opt*, 2005, **44**(14): 2759-2767.
- [10] POWELL I. Design study of an infrared panoramic optical system [J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(31): 6190-6194.
- [11] POWELL I. Panoramic lens; US, 5473474[P]. 1995-12-05.
- [12] HOU Hui-jie, BAI Jian, YANG Guo-guang. Research on image processing of two-Dimensional plan of the hemispheric panoramic imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1686-1688.  
候慧杰, 白剑, 杨国光. 全景环形透镜二维平面成像展开算法研究[J]. *光子学报* 2006, **35**(11): 1686-1688.
- [13] ZHAO Lie-feng. Studies on the characteristics and applications of the annular imaging system with high resolving power [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 15-18.  
赵烈烽. 高分辨环带成像系统特性及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 15-18.
- [14] WANG Zhi-jiang. Theoretical foundation of optical design [M]. Beijing: Science Press, 1985: 455-458.  
王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 455-458.
- [15] FALLAH H R, MAXWELL J. Higher order pupil aberrations in wide-angle and panoramic optical systems[C]. *SPIE*, 1996, **2774**: 342-351.
- [16] WANG Li-ping, ZHANG Li-chao, HE Feng-yun, *et al.* Design of mirror profile for panoramic imaging system using multi-populations genetic algorithms [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 133-141.  
王丽萍, 张立超, 何锋贇, 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(5): 133-141.

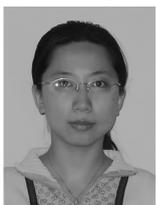
## Optical Design for Dual Spectral Panoramic Imaging System Applied in Corona Detector

WANG Li-ping

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to achieve the wide angle, large relative aperture and uniform illumination of corona detectors, a novel catadioptric omnidirectional optical system applied in the corona detector is presented which operates in the region of Solar Blind UV/visible. Operating principle of the dual spectral panoramic corona detector is introduced. And, the structure of the dual spectral panoramic imaging system is determined by assigning optical parameters of the primary (panoramic shell) and secondary (relay optics) groups. After investigating the origin and characters of the aberrations in the panoramic imaging system, methods for balancing aberration between the two groups and improving illumination uniformity are proposed. Finally, dual spectral panoramic imaging systems satisfying specifications are obtained. The field of view of the system achieves  $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$  and relative aperture extends to 1:2, the diameter of 80% encircled energy of SBUV panoramic imaging system is  $20\mu\text{m}$ , smaller than the pixel size of ICCD, the MTF value of visible panoramic imaging system is higher than  $0.5@83\text{lp/mm}$  over all fields, and the illumination uniformity on the images of SBUV/visible detectors is superior to 99.8%. The present results show that application of panoramic annular lens to the corona detector can satisfy the design requirements.

**Key words:** Dual spectral corona detector; Catadioptric omnidirectional optical system; Wide angle and large relative aperture; Illumination uniformity; Optical design



**WANG Li-ping** was born in 1981. She is an associate researcher with the Ph. D. degree. Her main research interests focus on optical design.