

星载紫外全景成像仪光学系统设计

薛庆生, 陈 伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 采用全景环形透镜和中继透镜组组合的结构型式设计了一个中心波长 360nm, 带宽 10nm, 视场 $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$, 焦距 5mm, 相对孔径 1:3.3 的紫外全景成像仪光学系统。针对该光学系统视场大的特点, 重点研究了提高其像面照度均匀性的方法。利用 CODE V 和 ZEMAX 光学设计软件进行了优化设计和设计结果分析, 结果表明: 点列图弥散斑半径的 RMS 值小于 1/2 像元, 弥散斑 80% 的能量集中在一个像元内, 光学传递函数 $>0.72@38.5 \text{ lp/mm}$, $f-\theta$ 畸变控制在 0.4% 以内, 像面照度均匀性达到 91%, 设计结果满足指标要求, 并且体积小, 特别适合在空间大气探测等领域应用, 也证明了提出的紫外全景成像仪光学设计方法是可行的, 可在其他波段推广应用, 对全景成像仪的设计具有指导意义。

关键词: 光学设计; 全景成像仪; 桶形畸变; 光阑像差; 像差渐晕

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0517-06

Optical system design of space-based UV panoramic imager

Xue Qingsheng, Chen Wei

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

Abstract: An optical system of UV limb panoramic imager was designed by using panoramic annular lens (PAL) and relay lens, the central wavelength was 360 nm, the waveband was 10 nm, the field of view was $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$, the focal length was 5 mm, and the relative aperture was 1:3.3. The method of improving the uniformity of image illumination was studied against the large field of view of the optical system. Optimization and analyzsis were performed using CODE V and ZEMAX software. The design result shows that the RMS radius of disc of confusion of spot diagram is less than half of the pixel, 80% of energy is enclosed in a pixel, the MTF is $>0.72@38.5 \text{ lp/mm}$, the $f-\theta$ distortion is less than 0.4%, the uniformity of image illumination is 91%. The design results satisfy the requirement of the specifications, the volume is small, and suitable to application in space atmosphere sounding. It indicates that the optical design method of UV panoramic imager is feasible, and the design method can be used in other wavebands, it is instructional for designing the panoramic imager.

Key words: optical design; panoramic imager; barrel distortion; pupil aberration; aberration vignetting

收稿日期: 2013-06-15; 修订日期: 2013-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(41105014)

作者简介: 薛庆生(1979-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学系统设计、空间遥感成像光谱技术、光谱辐射定标等方面的研究。Email: qshxue2006@163.com

0 引言

紫外波段是大气痕量成分如 O_3 、 NO_2 和 SO_2 等的探测波段之一, 基于卫星平台的紫外遥感探测技术是大气痕量气体探测的有效手段^[1]。星载紫外探测根据观测方式的不同分为星载紫外天底探测、星载紫外临边探测和星载紫外掩日/月探测。紫外天底探测空间覆盖范围大但垂直分辨率低; 紫外掩日/月探测的垂直分辨率高, 但只能在日出或日落的有效时间内执行观测任务, 因此空间覆盖范围小; 紫外临边探测不但垂直分辨率高, 而且具有较大的空间覆盖范围, 因此受到科学家的青睐^[2]。美国和欧洲等发达国家都十分重视紫外临边探测技术的研究, 美国研制了 OMPS^[3]紫外临边成像仪器, 欧空局研制了 SCIAMACHY^[4]、OSIRIS^[5]等紫外临边成像仪器。在国内, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所与中国科学院大气物理研究所是率先开展合作研究紫外临边探测技术的单位, 2008 年, 在国家 863 项目的支持下, 已成功研制了紫外临边成像光谱仪原理样机^[6-7], 该样机的视场与 OMPS 和 SCIAMACHY 的视场类似, 为一个小的矩形视场: $3.3^\circ \times 0.024^\circ$, 3.3° 对应临边高度方向, 0.024° 对应临边方位方向, 一次只能对地球临边的某一方位的一个窄的条带探测。当前国内外已有的紫外临边探测仪器都是对临边单个方位进行探测, 只能得到一个很窄径迹上的数据, 相邻轨道之间有巨大的空隙, 全球覆盖的时空代表性差, 不能获得较密的时空覆盖, 不能揭示中小尺度的变动特征。因此, 空间大气遥感迫切需要多方位, 甚至全方位的紫外临边成像仪器。

全景成像技术是一种可以获取全方位信息成像技术, 目前正在迅速发展, 具有广泛的应用前景^[8-9]。文中针对空间大气探测的应用目标, 提出了利用紫外全景成像技术实现 360° 全方位紫外临边探测的新方法。首先分析了紫外临边全景成像探测的原理, 根据紫外临边成像探测的应用目标, 提出了紫外全景成像仪光学系统设计方法, 设计了一个紫外全景成像仪光学系统, 结果满足设计要求, 证明了设计方法的可行性, 对全景成像仪的设计具有一定的指导意义, 为最终实现全景成像仪在紫外临边大气遥感领域的应用奠定了技术基础。

1 紫外临边全景探测原理

图 1 为紫外临边全景探测原理图。如图 1 所示, 地球临边 360° 全方位紫外辐射经紫外全景成像仪成一个圆环形图像, 圆环形图像的半径方向对应临边高度, 半径方向上图像的信号大小表示 O_3 、 NO_2 等大气成分的在临边高度方向上的分布信息。圆环形图像上的一个同心圆对应同一临边高度的不同方位, 同心圆上的信号大小表示 O_3 、 NO_2 等大气成分在同一临边高度不同方位上的分布信息。利用临边大气反演算法对获得的圆环形图像进行分析, 可以反演 O_3 、 NO_2 等大气成分的全方位时空分布信息, 从而为大气环境监测等提供服务。

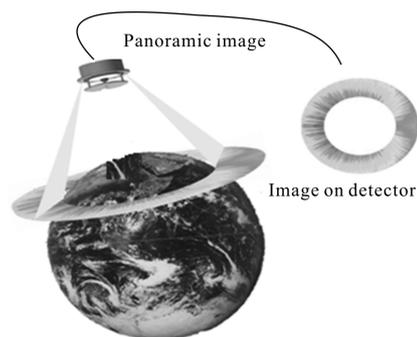


图 1 紫外临边全景探测原理图

Fig.1 Schematic diagram of panoramic sounding in UV limb view

2 应用要求及主要技术指标

预计紫外全景成像仪将搭载在轨道高度 $H=400$ km 的卫星平台上, 对 360° 全方位、临边高度 $10\sim 80$ km 的大气进行紫外临边全景成像探测, 中心波长 360 nm, 带宽 10 nm, 地球临边垂直方向的像元分辨率 $GSD=6$ km。选择的探测器为英国 e2V 公司的 CCD 47-20, 像元尺寸 $a=13$ μm , 像元数为 1024×1024 , 要求在 Nyquist 频率 38.5 lp/mm 处的光学传递函数 $MTF \geq 0.5$ 。

根据轨道高度计算出仪器到临边观测点的距离为 $L=2165$ km, 根据临边覆盖高度和轨道高度确定紫外全景成像仪的视场为 $360^\circ \times (70.9^\circ \sim 73.3^\circ)$, 图 2 为紫外全景成像仪观测示意图。地球临边高度方向上空间像元分辨率 $GSD=6$ km, 紫外全景成像仪的焦距为:

$$f' = \frac{a \cdot L}{GSD} = 4.69 \quad (1)$$

这里,留出余量,取焦距 f' 为 5 mm。在综合权衡成像质量和信噪比要求的基础上,紫外全景成像仪光学系统的相对孔径 D/f' 取 1:3.3。紫外全景成像仪光学系统的主要技术指标如表 1 所示。

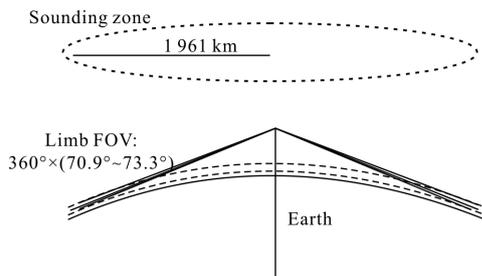


图 2 紫外全景成像仪观测示意图

Fig.2 Viewing geometry of UV panoramic imager

表 1 紫外全景成像仪光学系统主要技术指标
Tab.1 Specifications of optical system of UV panoramic imager

Specification	Value
Central wavelength	360 nm
Waveband	10 nm
Focal length	5 mm
FOV	360°×(70.9°–73.3°)
Relative aperture	1:3.3
MTF	≥0.5@38.5 lp/mm

3 紫外全景成像仪光学系统设计

由设计指标可知,紫外全景成像仪光学系统是一个工作在紫外波段的大视场、大相对孔径的光学系统,要求具有较高的成像质量。设计难点主要有:
(1) 由于工作波段为紫外波段,从光谱透射率及物理和化学特性综合考虑,可用的材料仅为融石英;
(2) 视场大,像面照度不均匀,若按一般的 $\cos^4\omega$ 定律^[10],边缘视场(73.3°)的像面照度仅为中心视场照度的 0.68%,此像面照度是不能满足成像要求,需要提高边缘视场的照度,即提高像面照度均匀性。文中采用两种方法提高像面照度均匀性。

(1) 桶形畸变法

在光学系统中引入桶形畸变(负畸变),大视场

物点的像被压缩,大视场物点的主光线孔径角减小,照度的下降得到缓解,从而可以提高像面照度的均匀性。文中在设计时,使紫外全景成像仪光学系统的畸变满足 $f-\theta$ 投影关系,在畸变曲线给定的条件下,视场角 ω 与其成像点位置之间的关系容易标定,像面照度的均匀性由于桶形畸变的引入也得到提高。

(2) 光阑像差法

通常,视场较小的光学系统,光阑像差也较小,可不必考虑。光阑像差随着视场角的增大变得越来越明显,对于大视场的光学系统,光阑像差较大,不可忽略,考虑光阑像差的条件下,轴上点光束和轴外光束对应的入射光瞳的位置和大小不同。初级光阑像差可以表示为^[11]:

$$W_p = \frac{1}{8} S_{I_p} (\eta^2 + \zeta^2)^2 + \frac{1}{2} S_{II_p} (\eta y + \zeta z) (\eta^2 + \zeta^2) + \frac{1}{2} S_{III_p} (\eta y + \zeta z)^2 + \frac{1}{4} (S_{III_p} + S_{IV_p}) (\eta^2 + \zeta^2) (y^2 + z^2) + \frac{1}{2} S_{V_p} (\eta y + \zeta z) (y^2 + z^2) \quad (2)$$

式中: S_{I_p} 、 S_{II_p} 、 S_{III_p} 、 S_{IV_p} 和 S_{V_p} 分别为光阑球差、光阑彗差、光阑像散、光阑场曲和光阑畸变。 η 、 ζ 为物面坐标, y 、 z 为光阑坐标。将公式(2)对 η 和 ζ 微分即得光阑垂轴几何像差,亦即实际光瞳与理想光阑像的差别:

$$mu_p(TA_\eta)_{\zeta=0} = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \eta} \right)_{\zeta=0} = \frac{1}{4} S_{I_p} \eta^3 + \frac{3}{2} S_{II_p} \eta^2 y + S_{III_p} \eta y^2 + \frac{1}{2} (S_{III_p} + S_{IV_p}) (y^2 + z^2) \eta + \frac{1}{2} S_{V_p} (y^2 + z^2) z \quad (3)$$

$$mu_p(TA_\zeta)_{\eta=0} = \left(\frac{\partial W_p}{\partial \zeta} \right)_{\eta=0} = \frac{1}{2} S_{I_p} \zeta^3 + S_{II_p} \eta y z + \frac{1}{2} S_{V_p} (y^2 + z^2) z \quad (4)$$

从公式(3)和(4)可以看出,在初级光阑像差中对改善像面照度均匀性起作用的只有光阑彗差 S_{II_p} 。考虑到光阑彗差,使轴上点光束和轴外光束均充满光学系统的孔径光阑,在入瞳面上,轴外光束的截面积 S_ω 大于轴上点光束的截面积 S_0 。实际像面照度可表示为:

$$E'(\omega) = E_0' \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega \quad (5)$$

式中: E_0' 为轴上点的像面照度。文中通过引入大量的光阑像差,利用光阑像差产生的像差渐晕来提供

像面照度的均匀性。在优化设计时,为使各视场的主光线均通过孔径光阑的中心。采用了反复迭代的方法对各视场的主光线进行标定。

在综合考虑的基础上,全景成像仪光学系统采用全景环形透镜(PAL)与中继透镜组组合的结构型式,如图 3 所示。全景环形透镜的主要作用是以适当的角放大倍率来获得大视场,中继透镜组的主要作用是把全景环形透镜所成的虚像以适当的放大倍率成像到 CCD 探测器上。全景环形透镜是实现大视场成像的关键,它有 4 个工作表面,其中表面 1、4 为折射表面,表面 2、3 为反射表面,中心视场的光线和角度较小的入射光线被表面 3 挡住,不能进入系统成像,只有大视场的光线成像,恰好符合紫外临边探测的特点。地球临边物面上的一点 A 经全景环形透镜成一个虚像 A' ,虚像 A' 再经中继透镜组成在像面上的 A'' 。

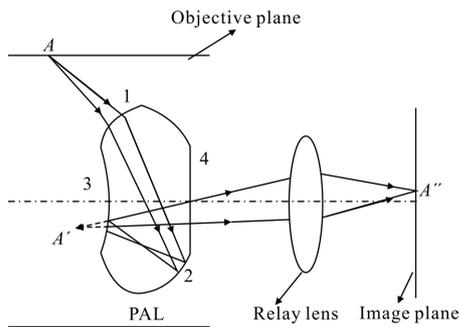


图 3 全景成像仪光学原理图

Fig.3 Optical schematic diagram of Panoramic imager

3.1 全景环形透镜设计

全景环形透镜的设计主要考虑到与中继透镜组的光焦度分配,中继透镜组的放大倍率 β 可以表示为:

$$\beta = \frac{f_s}{f_{PAL}} \quad (7)$$

式中: f_{PAL} 为全景环形透镜的焦距; f_s 为全景成像仪系统的焦距。经权衡,取 $f_{PAL} = 4.35 \text{ mm}$, 中继透镜组的放大倍率 $\beta = 1.15$ 。由于工作在紫外波段,考虑到空间环境的适应性,全景环形透镜采用熔石英材料。为保证光学加工容易实现,全景环形透镜各工作表面均采用球面,全球面全景环形透镜校正像差的变量少,存在较大的轴外像差,这些剩余的轴外像差由中继透镜组来补偿。全景环形透镜的光

学结构如图 4 所示。

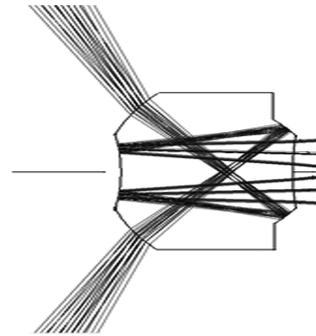


图 4 全景环形透镜光学结构图

Fig.4 Optical path of panoramic annular lens

3.2 中继透镜组设计

中继透镜组以适当的放大倍率把全景环形透镜成的虚像成像到 CCD 探测器上。中继透镜组是一个大相对孔径、中等视场的光学系统,放大倍率 $\beta = 1.15$ 。中继透镜组采用三片型的复杂化结构,为满足空间环境的要求,透镜均采用具有良好物理和化学性能的熔石英材料。图 5 为中继透镜组的光学结构图,由 6 片透镜组成,最后一一片为带通滤光片。

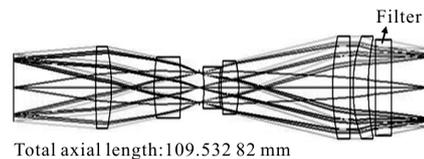


图 5 中继透镜组光学结构图

Fig.5 Optical path of relay lens

4 设计结果分析

将紫外全景环形透镜与中继透镜组连接,以点列图 RMS 值半径作为优化函数,利用 CODEV 和 ZEMAX 光学设计软件进行优化设计,优化设计的紫外全景成像仪的二维光路如图 6 所示。图 7 为紫外全景成像仪的三维光路图,最大光学口径 $\Phi 39 \text{ mm}$,

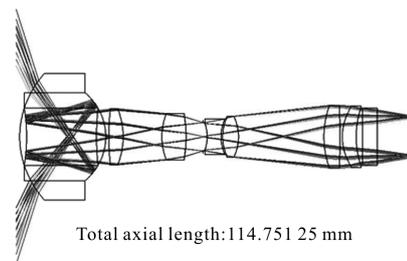


图 6 全景成像仪二维光路图

Fig.6 Two-dimension optical path of panoramic imager

光学长度 115 mm。具有视场大、结构紧凑、质量轻的特点,适合空间遥感应用。



图 7 全景成像仪三维光路图

Fig.7 Three-dimension optical path of panoramic imager

图 8 为不同视场在像面上的点列图分布,由图 8 可知,各视场点列图最大弥散斑半径的 RMS 值为 5.4 μm,小于探测器像元尺寸的一半。图 9 为能量集中度曲线,由图可知,弥散斑 80%的能量集中在一个像元内。全景成像仪光学系统传递函数曲线如图 10 所示,可以看出各视场的光学调制传递函数

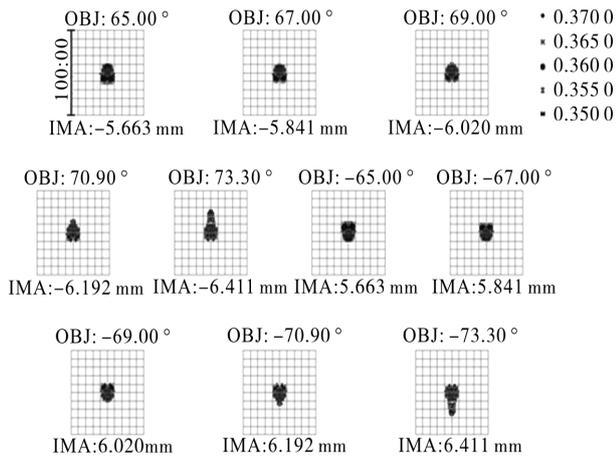


图 8 全景成像仪像面上的点列图

Fig.8 Spot diagram on image plane of panoramic imager

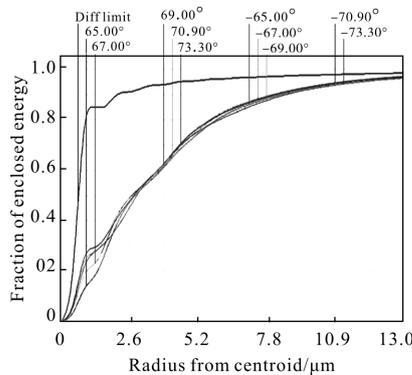


图 9 能量集中度曲线

Fig.9 Curves of encircled energy

(MTF) 在 Nyquist 频率 38.5 lp/mm 处均大于 0.72,满足 ≥0.5@38.5 lpmm 的设计指标要求。全景成像仪光学系统的 f-θ 畸变曲线如图 11 所示,由图可知,f-θ 畸变小于 0.4%,即像高与视场角 ω 基本呈线性关系,因此容易标定视场角 ω 与其成像点位置之间的关系。

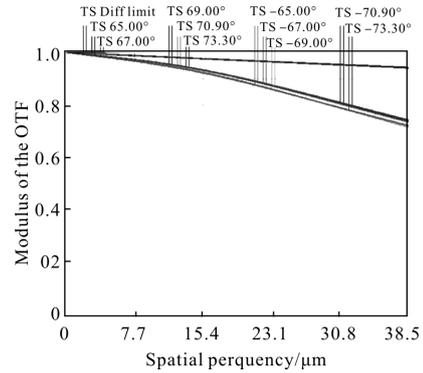


图 10 全景成像仪光学传递函数曲线

Fig.10 MTF curve of panoramic imager

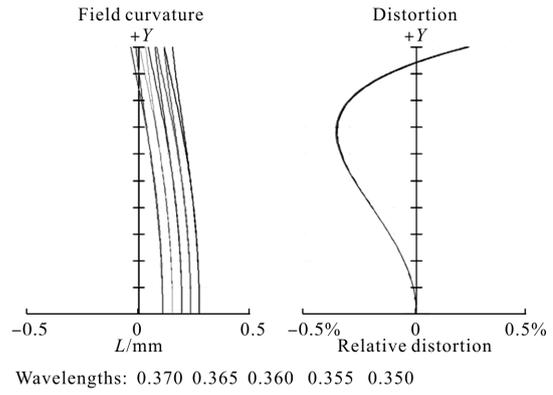


图 11 全景成像仪光学系统 f-θ 畸变曲线

Fig.11 f-θ distortion of optical system of panoramic imager

文中设计紫外全景成像仪光学系统利用桶形畸变和光阑像差产生的有效像差渐晕来改善像面照度的均匀性,利用反复迭代法保证轴外光束充满孔径光阑的中心,在 CODE V 光学设计软件中,渐晕系数为负值,如表 2 所示,这表明:入瞳面上,轴外光束的截面积明显大于轴上点光束的截面积。全景成像仪像面上相对照度曲线如 12 所示,由图可知,像面照度均匀性达到 91%,并且由桶形畸变和光阑像差引起的像差渐晕的影响,随着视场角的增大,像面照度逐渐增大,这恰好对紫外临边全景成像仪有利,因为紫外临边全景成像仪的有效观测视场恰好为轴外的大视场。在其有效视场内,像面照度均匀性达到 99%。综上,紫外全景成像仪光学系统设计结果满足

指标要求。

表 2 全景成像仪不同视场渐晕系数

Tab.2 Vignetting factors for different fields of view of panoramic imager

FOV	+Y	-Y
70.9°	-1.4280	-1.9344
72°	-1.7892	-1.9198
73.3°	-2.0335	-2.1694

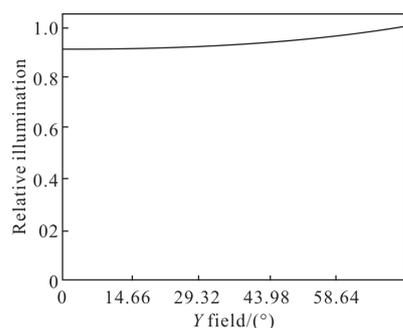


图 12 全景成像仪像面相对照度曲线

Fig.12 Relative illumination of panoramic imager

5 结论

分析了紫外临边全景成像探测的原理, 针对紫外临边全景成像仪视场大的特点, 研究了提高其像面照度均匀性的方法, 采用全景环形透镜和中继透镜组合的结构型式设计了一个紫外临边全景成像仪实例, 利用光学设计软件对设计结果进行了分析, 结果表明, 光学传递函数大于 $0.72@38.5 \text{ lp/mm}$, $f\text{-}\theta$ 畸变控制在 0.4% 以内, 像面照度均匀性达到 91% , 设计结果满足指标要求, 并且体积小, 适合在空间大气遥感等领域应用, 也证明了文中提出的紫外全景成像仪光学设计方法是可行的, 可推广应用到其他波段, 对全景成像仪的设计具有一定的指导意义, 为最终实现全景成像仪在空间大气遥感领域的应用奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] Xue Qingsheng. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 631-637. (in Chinese)
薛庆生. 星载宽波段大气痕量气体临边探测仪光学设计[J]. 光子学报, 2012, 41(6): 631-637.
- [2] Albert Fleig, Rault Didier F. Ozone vertical profiles in the upper troposphere and stratosphere from OMPS limb Sensor [C]//SPIE, 2011, 8177: 81770A-1-81770A-1.
- [3] Dittman Michael G, James Leitch, Michael Chrisp, et al. Limb broad-band imaging spectrometer for the NPOESS Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS)[C]//SPIE, 2002, 4814: 120-130.
- [4] Wang Chao, Shi Runhe, Zhou Cong, et al. Comparison of SCIAMACHY and AIRS CO₂ measurements over China from 2003 to 2005[C]//SPIE, 2011, 8156: 81560N-1-81560N-9.
- [5] Llewellyn E J, Lloyd N D, Degenstein D A, et al. The OSIRIS instrument on the Odin spacecraft [J]. *Can J Phys*, 2004, 82: 411-422.
- [6] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian, et al. Limb imaging spectrometer for remote sensing of atmosphere [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (4): 823-830. (in Chinese)
薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 823-830.
- [7] Xue Qingsheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror system for hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4):942-946. (in Chinese)
薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 942-946.
- [8] Bai jian, Niu Shuang, Yang Guoguang, et al. Panoramic optical annular staring imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 331-335. (in Chinese)
白剑, 牛爽, 杨国光, 等. 全景光学环带凝视成像技术[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 331-335.
- [9] Niu Shuang, Bai jian, Hou Xiyun, et al. Design of cemented panoramic annular lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 292-296. (in Chinese)
牛爽, 白剑, 侯西云, 等. 胶合式全景环形透镜的设计[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 292-296.
- [10] Qu Enshi, Zhang Hengjin, Cao Jianzhong, et al. Discussion of illuminance format in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1516-1521. (in Chinese)
曲恩世, 张恒金, 曹剑中, 等. 对光学设计中照度公式的讨论[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1516-1521.
- [11] Wang Zhijiang. Theoretical Foundation of Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1985: 455-458. (in Chinese)
王之江. 光学设计理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 455-458.