

doi:10.3788/gzxb20134204.0456

# 星载均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪的研制

薛庆生, 王淑荣, 陈伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:**为满足空间遥感的迫切需求,设计并研制了一个星载均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪样机.该仪器通过利用光阑像差产生的有效像差渐晕提高像面照度的均匀性,解决了广角系统中像面照度不均匀的问题.合理选择结构型式校正了畸变,并且采用全球面光学系统,易于加工和检测.广角气溶胶探测仪的中心波长为 670 nm,带宽 20 nm,全视场  $72^\circ$ ,相对孔径 1/3.6,焦距 20 mm.实验结果表明:研制的星载广角气溶胶探测仪镜头其入瞳大小 5.6 mm,边缘视场的相对照度达到 95.6%,在 36 lp/mm 处,轴上视场的调制传递函数值大于 0.61,轴外视场的调制传递函数值高于 0.58,最大畸变量为  $-1.95\%$ ,完全满足设计指标要求,体积小,适合空间遥感应用.

**关键词:**光学设计;广角;气溶胶;均匀像面;光阑像差;像差渐晕

中图分类号:O433.1; TN216

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)04-0456-6

## Development of Spaceborne Wide-angle Aerosol Imager with Low-distortion and Uniform Image Surface

XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, CHEN Wei

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

**Abstract:** In order to meet the urgent requirements of space remote sensing, a spaceborne wide-angle aerosol imager prototype with low-distortion and uniform image surface is designed. The illuminance distribution on image plane is improved by using effective aberration vignetting resulted from stop aberration, and the problem of non-uniform illuminance on the image plane of wide-angle optical system. The distortion is corrected by choosing appropriate optical structure. The optical elements are all spherical face, so it is easy to fabricate and test. The central wavelength is 670 nm, wavelength band is 20 nm, and full field of view is  $72^\circ$ , the relative aperture is 1 : 3.6, and the focal length is 20 mm. Experiments show that the entrance pupil size is 5.6 mm, the relative illuminance of edge field of view is 95.6%, the MTF of on-axis FOV is more than 0.61@36 lp/mm, the MTF of off-axis FOV is more than 0.58@36 lp/mm, and the maximum distortion is  $-1.95\%$ , which satisfies the pre-designed requirement. Its structure is compact, and feasible for applying in space remote sensing.

**Key words:** Optical design; Wide-angle; Aerosol; Uniform image surface; Stop aberration; Aberration vignetting

## 0 引言

近年来,随着科学研究的不断深入,大气气溶胶的气候效应受到人们的日益关注.气溶胶通过直接散射和与云的相互作用两方面影响地球的辐射平

衡<sup>[1-3]</sup>.另外,气溶胶的环境效应也是人们关注的焦点,大气颗粒物(MP10)污染严重危害人类的健康,世界卫生组织 2002 年的估计数据表明,每年至少 100 万例居民死亡和 740 万例伤残是由全球城市大气颗粒物污染造成的<sup>[4-5]</sup>.气溶胶不但直接对人类健

康造成危害,还会因为参与大气中的异相化学反应,对大气造成更严重的污染.探测和分析气溶胶的时空分布,不仅可以研究气溶胶对气候影响,而且可以为污染的监测提供科学数据.

气溶胶探测可以分为地基探测和星载探测.地基探测的尺度小,星载探测可以在大尺度甚至全球尺上实现定量探测,因此,星载气溶胶探测仪越来越受到人们的青睐.美国、欧洲和日本等发达国家已开始了星载气溶胶探测仪的研究.目前国际上具有代表性的气溶胶探测仪为:美国的 MISR<sup>[6]</sup>,视场角 28.6°,刈幅宽度 360 km;欧空局和日本联合研制的(EarthCARE-MSI<sup>[7]</sup>,视场角 19°,刈幅宽度 150 km.这些现有气溶胶探测仪的特点是视场角小,刈幅宽度小,空间遥感迫切需要广角、刈幅宽度大、回访周期短的气溶胶探测仪.气溶胶探测仪不仅要求广角,还要求像面照度较均匀,要求像面照度均匀性达到 90%以上,这样整个像面都可获得较高的信噪比,也能更好地满足动态范围的要求,有利于气溶胶反演准确度的提高.广角气溶胶探测仪在要求均匀像面的同时还对畸变提出了要求,要求低畸变,要求畸变小于 3%,畸变越低,图像的可读性越强,并且有利于图像的配准和拼接.

然而,普通的广角光学仪器的特点是像面均匀性差和畸变大,像面照度按视场角余弦的 4 次方变化,随着视场角的增大,像面照度迅速下降.照相机国家标准要求像面均匀性大于 20%<sup>[8]</sup>.一般广角镜头的畸变达到百分之几十的量级,例如苏州大学沈为民等<sup>[9]</sup>设计的广角地平仪最大畸变为 -60.5%.广角气溶胶探测仪要求像面照度均匀性达到 90%以上,畸变小于 3%,与普通光学仪器相比,广角气溶胶探测仪对像面照度均匀性和畸变都提出更高的要求,需要解决像面照度不均匀和畸变大的问题.本文根据广角气溶胶探测仪的应用要求,设计并研制了均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪样机.利用光阑像差产生的像差渐晕提高了像面照度均匀性.

## 1 应用要求及主要技术指标

图 1 为星载广角气溶胶探测仪采用线阵 CCD 探测器推扫工作原理图.气溶胶探测仪预计工作在轨道高度 700 km 的卫星平台上,要求刈幅宽度为 1 000 km,地面像元分辨力为 500 m,中心波长为 673 nm,带宽为 20 nm,在典型光谱辐亮度(22 W/m<sup>2</sup> μm sr)下的信噪比 ≥ 200.线阵 CCD 采用 KODAK 公司的 KLI-2113 型线阵列探测器(如图 2 所示),像元数为 2 098×3,这三条互为备份.像元尺寸为 14 μm,光谱响应曲线如图 3.

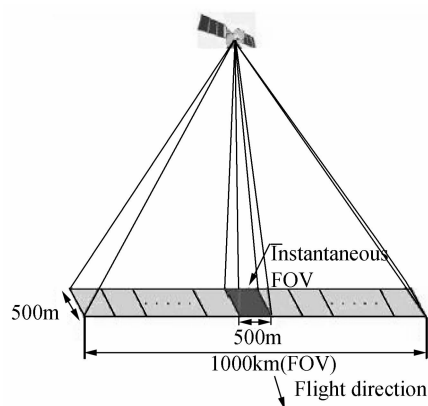


图 1 气溶胶探测仪推扫工作原理

Fig. 1 Principle chart of aerosol imager working

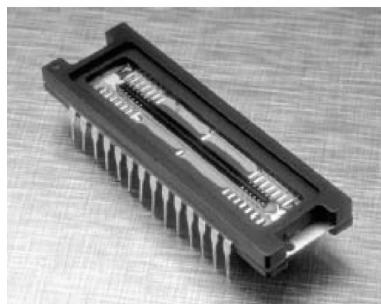


图 2 线阵 CCD 实物照片

Fig. 2 The sketch map of line array CCD

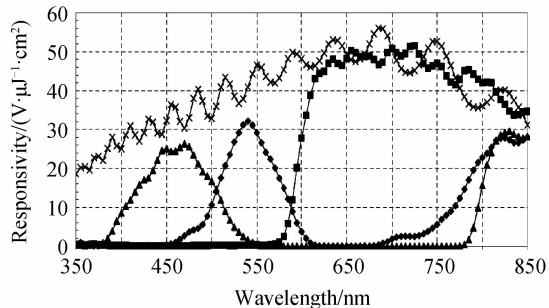


图 31 KLI-2113 的光谱响应曲线

Fig. 3 Spectral responsivity of KIL-2113

气溶胶探测仪的信噪比可表示为

$$SNR = \frac{S_e}{\sqrt{S_e + D_e + \sigma_{read}}} \quad (1)$$

式中,  $S_e$  为目标信号电子数,  $D_e$  为暗电流电子数,  $\sigma_{read}$  为读出噪声均方根值.

信号电子数  $S_e$  可表示为

$$S_e = \left[ \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} E'(\lambda) A_d t_{int} \eta(\lambda) d\lambda \right] / (hc/\lambda) \quad (2)$$

式中,  $\eta(\lambda)$  为 CCD 的量子效率,  $A_d$  为像元面积,  $E'(\lambda)$  为像面上的光谱辐照度,  $t_{int}$  为积分时间,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  为普朗克常量,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  为光速,  $\lambda$  为波长.

像面光谱辐照度  $E'(\lambda)$  可以表示为<sup>[10]</sup>

$$E'(\lambda) = L(\lambda) \tau_o(\lambda) \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \quad (3)$$

式中,  $L(\lambda)$  为仪器接收到的光谱辐亮度,  $\tau_o(\lambda)$  为气

溶胶探测仪光学系统的光谱辐射传输效率,  $D/f$  为相对孔径.

由于气溶胶探测仪的谱段带较窄, 故  $S_e$  可改写为

$$S_e = \frac{\pi A_d t_{int} \lambda}{4 F_N^2 h c} L(\lambda) \tau_o(\lambda) \eta(\lambda) \Delta \lambda \quad (4)$$

式中,  $F_N = f/D$  为光学系统的  $F_N$  数.

670 nm 处的典型光谱辐亮度  $L(\lambda)$  为 22 W/m<sup>2</sup> μm sr, 光学系统传输效率  $\tau_o(\lambda)$  为 0.4, 探测器的量子效率  $\eta(\lambda)$  为 0.6, 积分时间  $t_{int}$  取 70 ms, 带宽  $\Delta \lambda$  为 20 nm, 根据探测器的参量和信噪比要求, 确定光学系统的相对孔径为 1:4, 设计时留出余量, 取相对孔径为 1:3.6. 气溶胶探测仪光学系统主要技术指标如表 1.

表 1 气溶胶探测仪光学系统主要技术指标

Table 1 Specifications of aerosol imager optical system

| Specification                             | Value                  |
|---|------------------------|
| Spectral range/μm                         | 0.673 (bandwidth 20nm) |
| Bandwidth /nm                             | 20                     |
| Field of view (FOV)/(°)                   | 72                     |
| Focal length of system/mm                 | 20                     |
| Entrance diameter/mm                      | 5.6                    |
| Relative aperture                         | 1:3.6                  |
| Detector array size/pixel                 | 2 098 × 3              |
| Detector pixel size/μm                    | 14 × 14                |
| Distortion                                | ≤ 3%                   |
| Illuminance ratio of edge and central FOV | ≥ 90%                  |
| MTF@36 lp/mm                              | ≥ 0.5                  |

## 2 广角气溶胶探测仪的设计

广角气溶胶探测仪全视场为 72°, 按余弦的 4 次方定律, 像面照度均匀性为 42.8%, 不满足像面照度均匀性大于 90% 的指标要求, 因此要解决如何提高像面照度均匀性的问题.

中科院西安光机所的丁旭明<sup>[11]</sup> 采用渐变滤光片法提高像面照度均匀性, 这种方法的缺点是进入仪器光学系统的能量整体减小, 相当于原系统的相对孔径减小了, 信噪比降低了. 中科院长春光机所王丽萍等<sup>[12]</sup> 利用桶形畸变使大视场物点成像被极度压缩来提高像面照度的均匀性, 取得了一定的效果, 但这种方法是与广角气溶胶探测仪低畸变的要求相矛盾.

本文提出利用光阑像差产生的像差渐晕来提高像面照度的均匀性, 不影响畸变的校正, 可同时满足

广角气溶胶探测仪均匀像面和低畸变的要求.

对于小视场的光学系统, 光阑像差较小, 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, 它使轴上点光束对应的入瞳位置和大小与轴外光束对应的入瞳位置和大小不同. 初级光阑像差可以表示为<sup>[13]</sup>

$$W_p = \frac{1}{8} S_{I_p} (\eta^2 + \zeta^2)^2 + \frac{1}{2} S_{II_p} (\eta y + \zeta z) (\eta^2 + \zeta^2) + \frac{1}{2} S_{III_p} (\eta y + \zeta z)^2 + \frac{1}{4} (S_{III_p} + S_{IV_p}) (\eta^2 + \zeta^2) \cdot (y^2 + z^2) + \frac{1}{2} S_{V_p} (\eta y + \zeta z) (y^2 + z^2) \quad (5)$$

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.  $\eta$ 、 $\zeta$  为物面坐标,  $y$ 、 $z$  为光阑坐标. 将(5)式对  $\eta$  和  $\zeta$  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.

$$nu_p(TA_\eta)_{\zeta=0} = \left( \frac{\partial W_p}{\partial \eta} \right)_{\zeta=0} = \frac{1}{4} S_{I_p} \eta^3 + \frac{3}{2} S_{II_p} \eta^2 y + S_{III_p} \eta y^2 + \frac{1}{2} (S_{III_p} + S_{IV_p}) (y^2 + z^2) \eta + \frac{1}{2} S_{V_p} (y^2 + z^2) y \quad (6)$$

$$nu_p(TA_\zeta)_{\eta=0} = \left( \frac{\partial W_p}{\partial \zeta} \right)_{\eta=0} = \frac{1}{2} S_{I_p} \zeta^3 + S_{II_p} \eta y \zeta + \frac{1}{2} S_{V_p} (y^2 + z^2) z \quad (7)$$

从式(6)和式(7)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  $S_{II_p}$ . 在保证轴上点光束和轴外光束都充满孔径光阑的条件下, 轴外光束在入瞳面的截面积  $S_\omega$  大于轴上点光束在入瞳面上的截面积  $S_0$ . 考虑到光阑像差的影响, 实际像面照度可表示为

$$E'(\omega) = E'_0 \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega \quad (8)$$

式中,  $E'_0$  为轴上点的像面照度. 本文通过引入大量的光阑像差, 并使轴外光束充满孔径光阑产生有效像差渐晕来改善像面照度的均匀性. 在优化设计时, 利用反复迭代的方法标定主光线, 保证各视场的主光线都通过孔径光阑的中心.

畸变属于垂轴像差, 因此在结构型式选择上要使结构尽量对称, 在对称结构的基础上进行适当的失对称变化. 利用 ZEMAX-EE 光学设计软件对广角气溶胶探测仪进行了优化设计, 表 2 为气溶胶探测仪的光学结构参量.

表 2 气溶胶探测仪光学结构参量

Table 2 Optical parameters of aerosol imager

| Surface number | Radius/mm | Thickness/mm | Glass    |
|----------------|-----------|--------------|----------|
| Object         | Infinity  | Infinity     |          |
| 1              | 99.9      | 17           | F_SILICA |
| 2              | Infinity  | 0.5          |          |
| 3              | 103.888   | 6.13         | LaK2     |
| 4              | 25.1      | 11.77        |          |
| 5              | 34.59     | 9.53         | H-ZF52A  |
| 6              | 198       | 0.5          |          |
| 7              | 31.62     | 5            | H-LaK52  |
| 8              | 10.79     | 6.5          |          |
| 9              | Infinity  | 11.87        | H-ZF52A  |
| 10             | 38.117    | 1.5          |          |
| Stop           | Infinity  | 0.56         |          |
| 12             | 47.4      | 14.81        | H-LaK52  |
| 13             | -25.5     | 0.5          |          |
| 14             | Infinity  | 6.36         | H-ZF52A  |
| 15             | 37.995    | 2.46         |          |
| 16             | 63.24     | 11           | H-BaK4   |
| 17             | -33.766   | 1.43         |          |
| 18             | 61.528    | 12           | H-LaK52  |
| 19             | -131.4    | 2            |          |
| 20             | Infinity  | 6            | F_SILICA |
| 21             | Infinity  | 21.829       |          |
| 23             | Infinity  | 0.8          | F_SILICA |
| 24             | Infinity  | 2            |          |
| Image          | Infinity  |              |          |

图 4 为广角气溶胶探测仪的光学结构图. 考虑到在空间环境中的抗辐照要求, 第一片透镜采用抗辐照的熔石英材料, 口径为  $\Phi 90$  mm, 厚度为 17 mm, 光学系统总长度为 152 mm, 所有透镜均为球面, 易于加工、检测和装调, 最后一块为带通滤光片. 图 5 为光学系统传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线, 各视场的 MTF 在特征频率

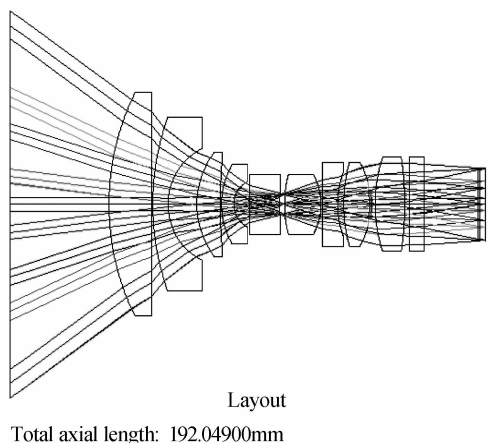


图 4 气溶胶探测仪光学结构

Fig. 4 Configuration diagram of optical system for aerosol imager

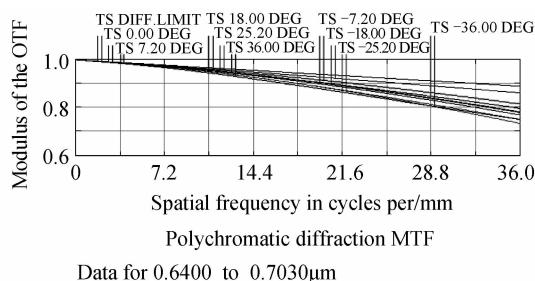


图 5 气溶胶探测仪光学系统传递函数曲线

Fig. 5 MTF curves of optical system for aerosol imager

36 lp/mm 处均大于 0.74, 满足设计  $MTF > 0.50$  的要求. 图 6 为光阑位置处的细节放大图. 从图中可以看出, 各视场的主光线均通过光阑中心, 各视场的光线均充满了孔径光阑. 图 7 为不同视场的光束在入瞳位置处的印迹图. 从图中可以看出, 由于光阑像差的影响, 随着视场的增大, 光束在入瞳上的截面宽度增大, 边缘视场的截面宽度明显大于中心视场的截面宽度, 因此可以有效提高像面照度的均匀性. 图 8 为光学系统像面的相对照度曲线, 像面照度均匀性为 96%, 满足大于 90% 的指标要求. 图 9 为光学系统的场曲和畸变曲线, 畸变为 -1.7%, 满足小于 3% 的指标要求.

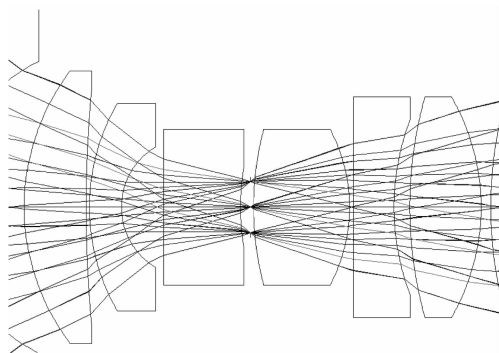


图 6 光阑位置处的细节放大图

Fig. 6 Detail enhanced diagram at the stop

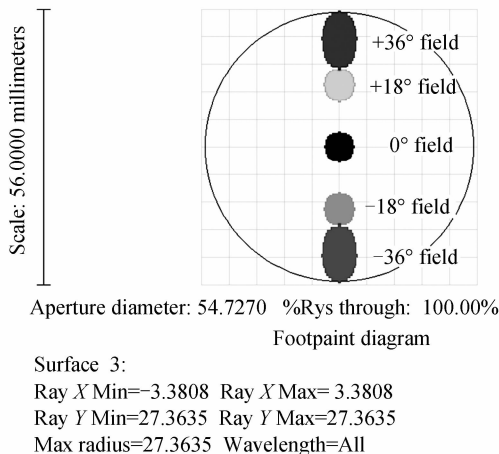


图 7 不同视场的光束在入瞳处的印迹图

Fig. 7 Footprint of optical beam for different field of view at the entrance pupil

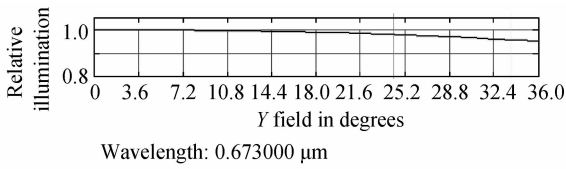


图8 气溶胶探测仪光学系统像面相对照度曲线  
Fig. 8 Relative illumination curves of optical system for aerosol imager

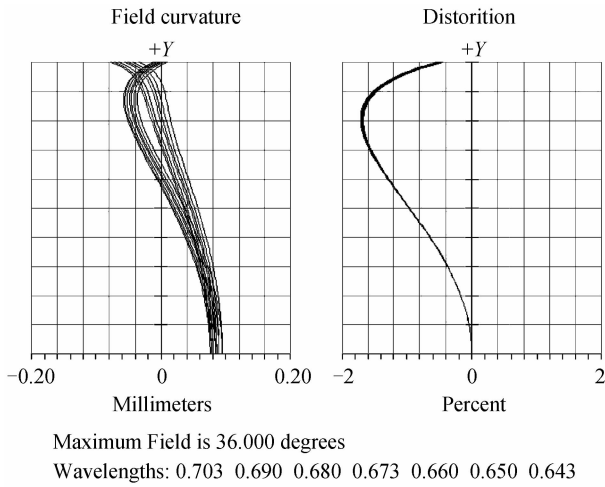


图9 气溶胶探测仪光学系统的场曲和畸变  
Fig. 9 Image field curvature and distortion curves of optical system for aerosol imager

### 3 样机研制和实验结果

本文设计的气溶胶探测仪镜头的机械支撑结构如图 10(a). 根据光学和机械结构设计结果完成光学件及机械结构件的加工和装配, 装调完成后的气溶胶探测仪镜头实物照片如图 10(b). 利用 Optiks 公司生产的光学系统成像质量综合测试系统进行了光学传递函数的测量, 图 11(a)和(b)分别给出了轴上视场和轴外视场的传递函数测试曲线.

从图 10 可以看出, 轴上视场和轴外视场的 MTF 均大于 0.58, 可满足静态传函大于 0.2 要求.

将气溶胶探测仪镜头与 CCD 焦平面组件通过法兰连接固定组成气溶胶探测仪样机. 利用积分球作为均匀亮度光源照明气溶胶探测仪测试像面照度

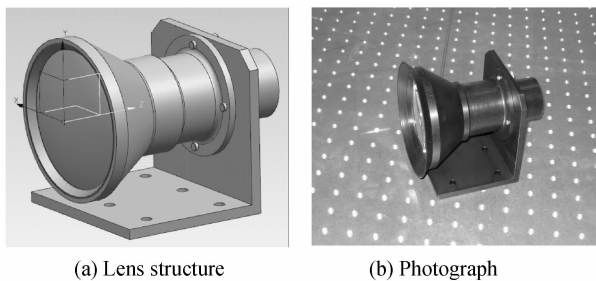


图 10 气溶胶探测仪结构设计和实物照片  
Fig. 10 Lens structure and photograph of aerosol imager

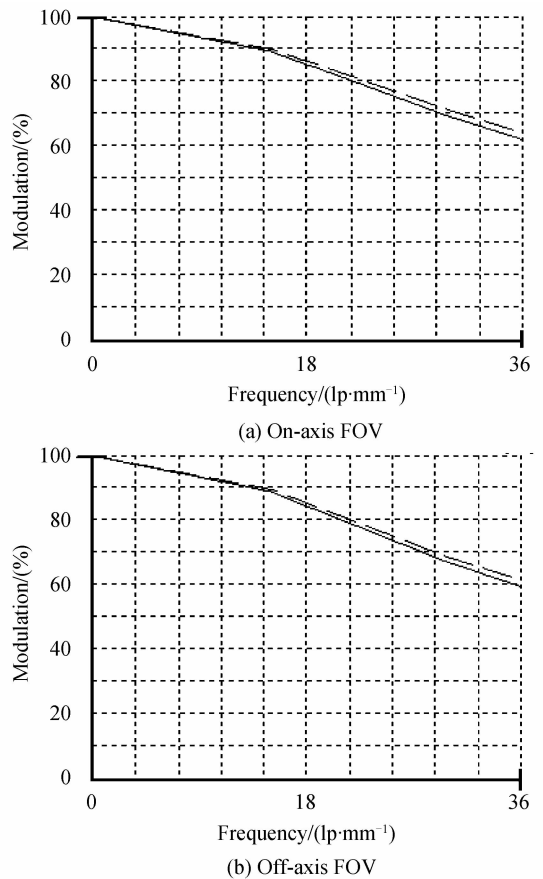


图 11 气溶胶探测仪轴上和轴外视场光学传函测试曲线  
Fig. 11 MTF tested curves of on-axis FOV and off-axis FOV of optical system for aerosol imager

均匀性, 测试结果表明, 像面照度均匀性为 95.6%, 与设计像面照度均匀性 96% 接近, 满足像面照度均匀性大于 90% 的要求. 利用网格板和平行光管测得最大畸变为 -1.95%, 满足畸变小于一 3% 的指标要求. 利用积分球光源输出光谱辐亮度, 模拟目标的典型光谱辐亮度, 积分时间 70 mm, 测得最低信噪比为 223, 满足信噪比  $\geq 200$  的指标要求.

### 4 结论

为满足空间遥感的迫切需求, 本文根据广角气溶胶探测仪的应用要求, 设计并研制了均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪样机. 利用光阑像差产生的像差渐晕提高了像面照度均匀性, 通过合理选择结构型式校正了畸变. 实验结果表明, 像面照度均匀性达到 95.6%, 最大畸变为 -1.95%, 光学系统各视场的传递函数均大于 0.58, 在低畸变的条件下提高了像面照度的均匀性, 完全满足广角气溶胶探测仪的指标要求. 广角气溶胶探测仪镜头长度为 152 mm, 最大口径为  $\Phi 90$  mm, 具有体积小、重量轻的特点. 星载均匀像面低畸变广角气溶胶探测仪样

机的研制成功,为下一步星载广角气溶胶探测仪在我国空间大气遥感领域的应用奠定了技术基础。

#### 参考文献

- [1] DUAN Min-zheng, LÜ Da-ren. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurement II: a case study[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences.*, 2008, **32**(1): 27-34.  
段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 II: 实例分析[J]. *大气科学*, 2008, **32**(1): 27-34.
- [2] ZHANG Jin-ye, GONG Wei, HUANG Chu-yun, *et al.* Method of retrieving refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1340-1344.  
张金业, 龚威, 黄楚云, 等. Raman 激光雷达探测气溶胶光学特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1340-1344.
- [3] SONG Yue-jun, HUA Deng-xin, LI Shi-chun, *et al.* Detection of bottom aerosols in urban area using micro-pulse polarization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1140-1144.  
宋跃军, 华灯鑫, 李仕春, 等. 微脉冲偏振激光雷达探测城市底层气溶胶[J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1140-1144.
- [4] ZHANG Yan, DUAN Min-zheng, LU Da-ren. Retrieving aerosol extinction profile with high spectral resolution radiance in Oxygen A-band and simulation research[J]. *Remote Sensing Technology and Application.*, 2012, **27**(4): 208-219.  
张岩, 段民征, 吕达仁. 基于氧气 A 吸收带高光谱反射信息的气溶胶廓线反演算法及模拟反演验证[J]. *遥感技术与应用*, 2012, **27**(4): 208-219.
- [5] YE Yu, LI Xiu-yang, CHEN Kun, *et al.* Retrieving aerosol extinction profile with high spectral resolution radiance in Oxygen A-band and simulation research [J]. *Remote Sensing Technology and Application.*, 2011, **16**(2): 169-174.  
叶瑜, 李秀央, 陈坤, 等. 大气气溶胶光学厚度与大气污染物及气象因素关系的时间序列研究[J]. *气候与环境研究*, 2011, **16**(2): 169-174.
- [6] JOVANOVIĆ V M. Global earth mapping with NASA's Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) [C]. *SPIE*, 2003, **4885**: 22-33.
- [7] ABELARDO P A, ROBERT G, ALAIN L, *et al.* The multi-spectral imager on-board the EarthCARE spacecraft [C]. *SPIE*, 2010, **7808**: 780815-1-780815-1.
- [8] 杭州照相机机械研究所. JB/T 10362-2010 中华人民共和国照相机国家标准[S]. 北京:机械工业出版社.
- [9] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jin-jun, *et al.* Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 329-332.  
沈为民, 薛鸣球, 余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(4): 329-332.
- [10] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne broadband limb sounder for detecting atmospheric trace gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(6): 631-637.  
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.
- [11] DING Xu-ming. Design of super-wide-angle lens for static infrared earth sensor [J]. *Chinese Journal of Applied Optics*, 1988, **6**(3): 9-14.  
丁旭明. 大画幅同步高速摄影机的超广角镜头设计[J]. *应用光学*, 1988, **6**(3): 9-14.
- [12] WANG Li-ping. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1770-1771.  
王丽萍. 双波段全景电晕探测光学系统[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1770-1774.
- [13] 王之江. 光学设计理论基础[M]. 北京:科学出版社, 1985: 455-458.