

doi: 10.3788/gzxb20124101.0015

星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计

薛庆生

(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,设计了星载低畸变超广角气溶胶探测仪系统.系统中多光谱成像仪的光谱范围为 $0.860\sim 0.965\ \mu\text{m}$,全视场角为 94° ,相对孔径为 $1:4$,采用反远距结构,系统后工作距离为 $42\ \text{mm}$.根据反远距结构的像差特点,提出了合理选用易于加工的二次曲面校正畸变,并利用光阑像差产生的有效像差渐晕改善像面照度分布设计方法.运用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对气溶胶探测仪光学系统进行了光线追迹和优化并对设计结果进行了分析.结果表明,最大畸变为 -1.6% ,像面上边缘视场的照度大于中心视场照度的 46% ,光学系统在奈奎斯特频率 $38.5\ \text{lp/mm}$ 处的光学传递函数均达到 0.59 以上,完全满足设计指标要求;体积小,适合空间遥感应用;同时证明了设计方法是可行的.

关键词:光学设计;超广角;反远距结构;低畸变;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(2012)01-0015-6

0 引言

大气气溶胶是影响天气、气候变化的一个重要因素.它对辐射的吸收和散射直接影响地球的辐射收支,参与凝云致雾过程,对地球的辐射平衡起着间接作用.同时,大气气溶胶又有很强的时空变化性^[1-2].通过对大气气溶胶分布的探测和分析,研究云、雨滴、冰晶形成,进而可以研究气溶胶对降水等气候的影响.通过观测大气中云和气溶胶的粒子结构、云的相态和云的空间分布,以及云的层次结构等重要气象参量,可为数值天气预报提供实时观测数据,同时为研究大气辐射传输模型提供必要的科学数据^[3].根据遥感探测提供云和气溶胶数据,利用其反演算法,可以提高 CO_2 和 CH_4 等温室气体的反演准确度^[4].

欧美、日本等发达国家均开始了从卫星平台上对大气气溶胶探测和定量分析研究.空间遥感气溶胶探测采用最多的是多光谱成像仪.目前国际上具有代表性的气溶胶探测仪有:美国喷气推进实验室研制的 MISR^[5],视场角 28.6° ,刈幅宽度 $360\ \text{km}$,地面像元分辨力 $275\ \text{m}$;欧空局和日本宇航局联合研制的 EarthCARE-MSI^[6],视场角 19° ,刈幅宽度 $150\ \text{km}$,地面像元分辨力 $500\ \text{m}$;日本宇航局研制的

TANSO-CAI^[7],视场角 74° ,刈幅宽度 $1\ 000\ \text{km}$,地面像元分辨力 $500\ \text{m}$.

随着空间遥感应用的不断深入,对气溶胶探测仪提出了更高的要求:在满足地面像元分辨力的条件下,必须具有更大的视场角.由于视场越大刈幅宽度越大,仪器的回访周期就越小.因此,星载超广角气溶胶探测仪成为空间遥感的迫切需求.气溶胶探测仪不仅要求超广角,还要求低畸变,要求图像的相对畸变小于 2% .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.初级畸变与视场的三次方成正比,随着视场角的增大,畸变迅速增大.因此一般的超广角光学仪器通常存在很大的畸变,相对畸变甚至达到百分之几十的量级,例如沈为民等^[8]等设计的广角镜头最大畸变为 -60.5% .陆国华^[9]和陈旭等^[10]提出采用 8 次和 12 次非球面校正畸变,但这种高次非球面加工和检测非常困难,高次非球面系数在加工和检测过程中很难控制.

普通超广角光学仪器的另一个特点是随着视场角的增大,像面照度迅速降低.像面上不同视场点的照度与中心视场点的照度之比称为相对照度.照相机国家标准^[11]要求边缘的相对照度大于 20% .考虑到信噪比和探测器的动态范围,气溶胶探测要求边缘视场相对照度 40% .文献^[8, 12-13]提出采用像

基金项目:中科院碳专项子课题(No. XDA05040103)、国家自然科学基金(No. 41105014)和中国科学院长春精密机械与物理研究所空间一部主任基金资助

第一作者:薛庆生(1979-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计和成像光谱技术. Email: qshxue2006@163.com

收稿日期: 2011-08-18; **修回日期:** 2011-18-08

方远心光路,像方视场角近似为 0° ,像面照度可以非常均匀.但这种观点的前提条件是假定出瞳面的照度是均匀的,屈恩世等^[14]已证明这种假设是不成立的,因此采用像方远心光路提高边缘视场照度的方法是不可行的.

本文根据星载气溶胶探测仪的应用要求和技术指标,采用反远距结构,合理选用易于加工的二次曲面校正畸变,并利用光阑像差产生的有效像差渐晕改善像面照度均匀性,给出了一个星载低畸变超广角气溶胶探测仪光学系统的设计实例,并利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对设计结果进行了分析和评价.

1 应用要求及主要技术指标

星载气溶胶探测仪采用线阵探测器推扫的工作方式,其工作原理如图 1. 轨道高度 $H=700\text{ km}$, 要求刈幅宽度 $GW=1\ 500\text{ km}$, 地面像元分辨力 $GSD=250\text{ m}$, 可用的探测器为四线阵多光谱 CCD 探测器(如图 2), 像元尺寸为 $p=13\ \mu\text{m}$, 像元数为 $6\ 000\times 4$, 探测器窗口前的 4 条窄带滤光片对应多光谱的不同谱段. 光谱范围 $0.860\ \mu\text{m}\sim 0.965\ \mu\text{m}$, 通过线阵探测器窗口前的 4 条窄带滤光片, 分成中

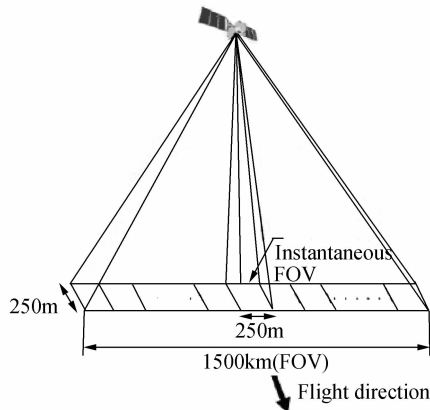


图 1 气溶胶探测仪推扫工作原理
Fig. 1 Principle chart of aerosol imager working

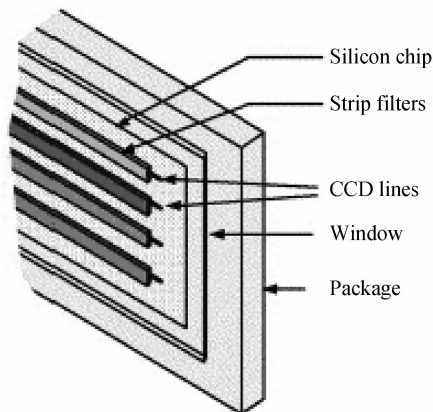


图 2 四线阵多光谱 CCD
Fig. 2 Four-line array multi-spectrum CCD

心波长分别为 $0.87\ \mu\text{m}$ 、 $0.885\ \mu\text{m}$ 、 $0.91\ \mu\text{m}$ 和 $0.94\ \mu\text{m}$ 的 4 谱段. 气溶胶探测仪的视场由刈幅宽度 GW 和轨道高度 H 决定

$$\text{FOV} = 2\arctan\left(\frac{GW}{2H}\right) = 97^\circ \quad (1)$$

焦距由轨道高度 H 、地面像元分辨力 GSD 和像元尺寸 p 决定

$$f' = \left(\frac{H \times p}{GSD}\right) = 36.4 \quad (2)$$

综合考虑分辨率和信噪比要求,取相对孔径为 $1:4$. 气溶胶探测仪光学系统的主要技术指标总结如表 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 | |
|---|-------------------------|
| Spectral range / μm | 0.870 (bandwidth 20 nm) |
| | 0.885 (bandwidth 10 nm) |
| | 0.910 (bandwidth 20 nm) |
| | 0.940 (bandwidth 50 nm) |
| Field of view (FOV) / $^\circ$ | 94 |
| Focal length of system/mm | 36.4 |
| Entrance diameter/mm | 9.1 |
| Relative aperture | 1:4 |
| Detector array size/pixel | 6 000 \times 4 |
| Detector pixel size / μm | 13 \times 13 |
| Distortion | $\leq 2\%$ |
| Illuminance ratio of edge and central FOV | $\geq 40\%$ |
| MTF@38.5 lp/mm | ≥ 0.5 |

2 设计理论

根据气溶胶探测仪视场角大,焦距短的特点,为获得足够大的后工作距离,选择反远距型结构作为其结构型式.如图 3 所示,反远距型结构^[15]采取负正透镜组的分离,负光焦度透镜组作为前组;正光焦度透镜组作为后组.光线经前组发散后进入后组,被后组成像在焦平面上,使整个系统的后主面向后移出物镜之外,从而使后工作距离 l'_2 大于焦距 f' .而视场角很大的轴外光线,经前组发散后,相对于后组视场角变小,从而达到广角的目的.在远离光阑的前组或后组使用非球面可以校正与视场有关的高级像散和畸变^[16];在光阑附近使用非球面,可以校正与孔径有关的高级球差,从而可以提高相对孔径.二次

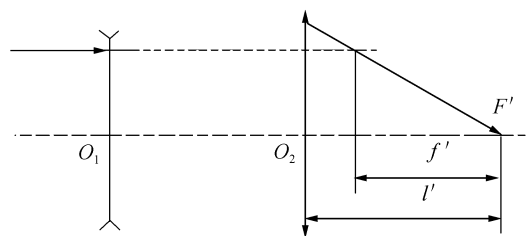


图 3 反远距型结构
Fig. 3 The inverted telephoto structure

曲面与高次非球面相比具有加工和检测容易的特点^[17],因此考虑到加工和检测的可行性,我们合理采用易于加工二次曲面来校正畸变。

对于一般的摄影系统而言,边缘视场像面照度与中心视场照度的关系为

$$E'_{\text{边}} = E'_0 \cos^4 \omega \quad (3)$$

$$E'(\omega) = \frac{E'_{\text{边}}}{E'_0} = \cos^4 \omega \quad (4)$$

式中, $E'(\omega)$ 称为照度分布系数.不同视场照度分布系数不同,随着视场角增大,光照度下降很快,在 $\omega=47^\circ$ 时,边缘视场照度仅为中心视场照度的21.6%,不满足边缘视场照度大于等于中心视场照度的40%的指标要求.因此超广角气溶胶探测仪不仅要求校正畸变还有合理改善像面照度的均匀性。

改善像面照度的均匀性的方案有利用渐变滤光片、利用桶形畸变和利用像差渐晕.本文对这3种方案进行分析比较和选择。

1) 利用渐变滤光片

如图4所示,渐变滤光片方案是在滤光片上镀透过率不同的薄膜,使滤光片中心的透过率低,从中心到边缘透过率逐渐增加,从而,使整个视场内像面照度比较均匀.当滤光片的中心透过率为边缘的21.6%时,中心视场的照度与边缘视场的照度比为1:1.这种方法的缺点是整体减小了进入系统的光能量,相当于缩小了原系统的相对孔径,例如原结构相对孔径为1:4,加了渐变滤光片后相对孔径变为1:8.5.

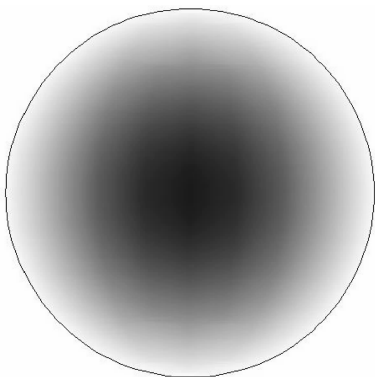


图4 渐变滤光膜示意

Fig. 4 The sketch map of graded filter

2) 利用桶形畸变

利用桶形畸变是引入大量的桶形畸变,它使大视场物点成像极度被压缩.大视场物点主光线在像空间与光轴的夹角被大幅度减小,有利于缓解轴外像点照度的下降,从而改善像面照度的均匀性^[18].显然,这种方法与校正畸变的要求相矛盾。

3) 利用像差渐晕

利用像差渐晕是指利用超广角系统中存在的光阑像差来增大轴外光束的通光口径,从而改善像面照度的均匀性.在光阑像差中,起此作用的是光阑彗差 S_{IIP} .它使充满近轴出瞳的轴外光束在孔径光阑上的投影宽度比轴上点相应的宽度小.保证轴外光束充满孔径光阑,则其出瞳面上的实际宽度必大于轴上光束宽度.考虑像差渐晕后,像面照度可表示为

$$E'(\omega) = E'_0 \frac{S_\omega}{S_0} \cos^4 \omega = E'_0 K_\omega \cos^4 \omega \quad (5)$$

式中, K_ω 为入射角为 ω 的斜光束的像差渐晕系数; S_ω 为轴外点束在出瞳上的截面积; S_0 为轴上点的光束在出瞳上的截面积。

增大像差渐晕可以通过增大光阑彗差来实现,光阑彗差 S_{IIP} 与物面像差的关系为

$$S_{\text{IIP}} = S_V + j(u_{\text{pk}}'^2 - u_{\text{p1}}^2) \quad (6)$$

式中, u_{pk}' 和 u_{p1} 分别为主光线在入瞳光阑处的孔径角和物方视场角.由式(6)可知,可通过增大 S_V ,或减小 $(u_{\text{pk}}'^2 - u_{\text{p1}}^2)$ 来增大光阑彗差 S_{IIP} .但增大 S_V 需要增大远离光阑的负透镜的曲率半径,这与校正畸变有矛盾.通过增大正透镜的厚度和提高折射率可以减小前组的角放大率 $A = u_{\text{pk}}'/u_{\text{p1}}$,从而减小 $(u_{\text{pk}}'^2 - u_{\text{p1}}^2)$.

随着视场角的增大,光阑彗差 S_{IIP} 表现得越明显.通过引入光阑像差,采用逐次迭代法使各视场的主光线都通过孔径光阑的中心,并保证轴外光束充满孔径光阑产生像差渐晕从而改善像面照度均匀性。

根据前文对提高边缘视场照度的方法研究和分析可以看出,利用像差渐晕的方法不减少进入系统的光能量并且可以有效地提高边缘视场照度,因此是合理可行的。

3 设计结果与性能分析

根据前文的分析,气溶胶探测仪采用反远距结构,它可以分为前后两组,前组具有负光焦度,后组具有正光焦度.综合考虑本系统的反远距、视场角和相对孔径的要求,前组采用正负透镜分离的复杂化结构型式,如图5.由于第一片透镜暴露在外,因此第一片透镜选用熔石英材料,因为熔石英具有良好的理化性能及耐辐射性能.它起到保护玻璃的作用,具有抗空间辐射、抗空间带电粒子,以及抗原子氧氧化的能力.弯月形负透镜后面正透镜为“鼓形透镜”,可看成是由两块薄透镜中间夹一块厚的平行平板组成.它一方面可以获得更大的反远距,另一方面可以使前片口径变小,筒长缩短,而且有利于高级像差的降低。

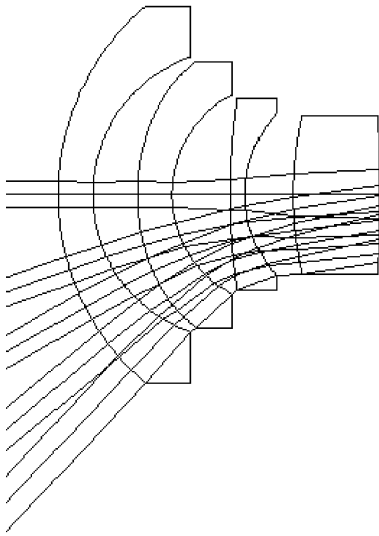


图5 气溶胶探测仪前组光学结构
Fig. 5 Optical construction for the fore-group of aerosol imager

当平行光束经负光焦度的前组发散后,对于后组来说,就成为对近距离成像的投影物镜.这时后组要补偿前组的负光焦度,因而相对孔径比较大.为补偿前组的剩余像差,就要求后组在物像关系比较对称的情况下,对结构型式进行比较大的失对称变化.考虑到本系统相对孔径、视场角和后工作距离都较大的要求,后组采用三片型的失对称复杂化,如图6,并且后组的第一片透镜也采用“鼓形透镜”,起到与前组中的“鼓形透镜”相同的作用.

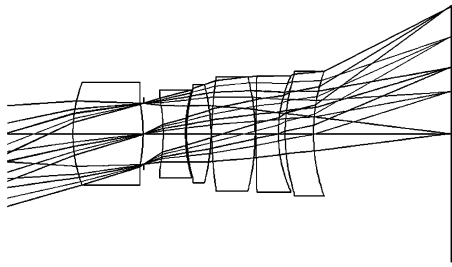


图6 气溶胶探测仪后组光学结构
Fig. 6 Optical construction for the back-group of aerosol imager

将前组与后组连接组成的气溶胶探测仪的光学结构如图7,共有10片透镜组成.本光学系统中,畸

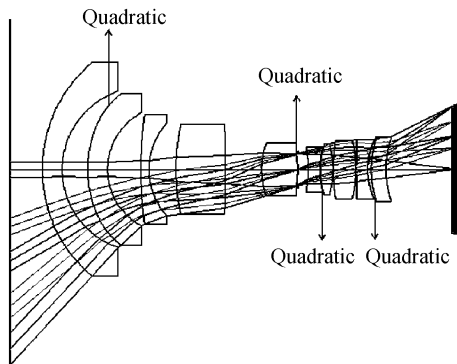


图7 气溶胶探测仪光学结构
Fig. 7 Optical construction for aerosol imager

变最主要来源于第1片透镜的第2个面和第9片透镜的第2个面.根据在离产生畸变最近的地方对其进行校正的原则^[19],远离光阑的第2片透镜第1个面和第10片透镜的第1个面采用二次曲面,用来校正与视场有关的高级像散和畸变,结果证明校正效果明显.靠近光阑的第5片透镜的第2个面和第7片透镜的第1个面采用二次曲面,用来校正与孔径有关的高级球差,提高成像质量.

利用光学设计软件 CODE V 和 ZEMAX 对气溶胶探测仪进行了优化设计.利用有效像差渐晕来提高边缘视场的照度,这可以在 CODE V 光学设计软件中可以通过设置渐晕系数为负值来实现,并且视场角越大,渐晕系数的绝对值越大,边缘光束的口径也越大,从而边缘视场的相对照度可以得到提高.为了确保计算结果的准确,每次优化前需要对渐晕系数进行重新设置.本系统中,各视场的渐晕系数均为负值,如表2.

表2 不同视场的渐晕系数

Table 2 Vignetting factors for different fields of view

| FOV/(°) | +Y | -Y |
|---------|-----------|-----------|
| 0 | 9.536E-8 | 9.536E-8 |
| 20 | -0.134 89 | -0.097 33 |
| 30 | -0.331 72 | -0.269 25 |
| 40 | -0.714 30 | -0.631 16 |
| 47 | -1.202 23 | -1.169 22 |

经过优化设计,光学系统长度为268 mm,最大口径为140 mm,光学结构参量如表3.其中,表面22和23为滤光片,表面24和25为探测器的窗口玻璃.图8为不同视场的光学传递函数(MTF)曲线;图9为像面上的相对照度曲线;图10为畸变曲线.从设计结果可以看出,不同视场的MTF在Nyquist频率38.5 lp/mm处大于0.59;利用光阑像差产生的有效像差渐晕后,边缘视场相对照度21.6%增加46.9%;最大畸变为-1.6%,设计结果均满足设计指标要求.

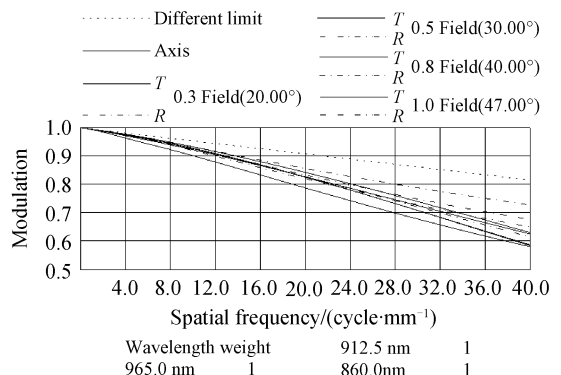


图8 不同视场的光学传递函数曲线
Fig. 8 MTF for different fields of view

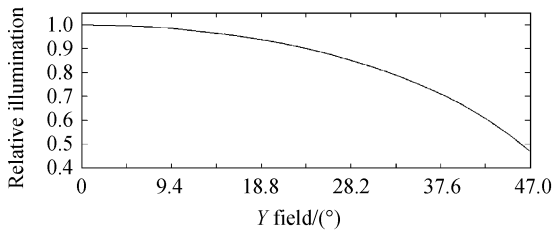


图9 像面上相对照度曲线

Fig. 9 Relative illuminance on the image plane

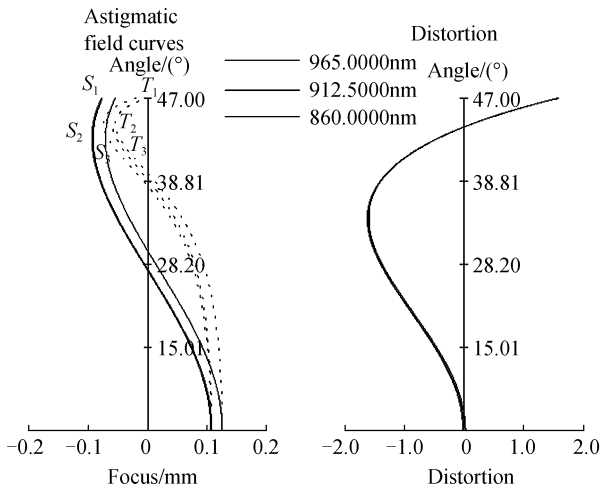


图10 畸变曲线

Fig. 10 Curve of the distortion

表3 气溶胶探测仪光学结构参量

Table 3 Optical parameters of aerosol imager

| Surface number | Radius/mm | Thickness/mm | Glass | Conic constant |
|----------------|-----------|--------------|----------|----------------|
| Object | Infinity | Infinity | | |
| 1 | 91.441 | 12 | F_SILICA | |
| 2 | 51.63 | 16.682 | | |
| 3 | 70 | 12 | NLAF2 | 0.722 |
| 4 | 41.7 | 24.145 | | |
| 5 | 550 | 19.862 | NLAK22 | |
| 6 | 39.92 | 8.183 | | |
| 7 | 121.69 | 30 | NSF4 | |
| 8 | -414.697 | 21.805 | | |
| 9 | 50.405 | 21.719 | NFK5 | |
| 10 | -50.58 | 1.712 | | -2.5 |
| Stop | Infinity | 6.025 | | |
| 12 | -64.064 | 7 | NSF4 | |
| 13 | 51.4 | 0.3 | | |
| 14 | 47.28 | 7.356 | NSK15 | -2.5 |
| 15 | -72.379 | 0.3 | | |
| 16 | 105.2 | 15.071 | LAFN23 | |
| 17 | -68.79 | 0.3 | | |
| 18 | 394.79 | 7 | NSF4 | |
| 19 | 41.378 | 2.5 | | |
| 20 | 60.81 | 10.801 | NLAF2 | -2.5 |
| 21 | 65.61 | 40.573 | | |
| 22 | Infinity | 0.6 | F_SILICA | |
| 23 | Infinity | 0.4 | | |
| 24 | Infinity | 1.1 | BAK50 | |
| 25 | Infinity | 0.7 | | |
| Image | Infinity | | | |

4 结论

低畸变超广角气溶胶探测仪已成为空间遥感的迫切需求,本文根据低畸变超广角气溶胶探测仪的要求,提出了合理采用易于加工的二次曲面校正畸变,并利用光阑像差产生的有效像差渐晕提高边缘视场相对照度的设计方法.利用这种设计方法设计了全视场 94° ,地面像元分辨力 250 m 的星载低畸变超广角气溶胶探测仪光学系统.用光学设计软件CODE V和ZEMAX行了优化设计,并对设计结果进行了分析.分析结果表明,各视场的MTF值在Nyquist频率 38.5 lp/mm 处均达到 0.59 以上,边缘视场相对照度为 46.9% ,最大畸变为 -1.6% ,完全满足成像质量要求,并且结构紧凑,适合空间遥感应用.

参考文献

- [1] KAZANTZIDIS A, KROTKOV N, BLMTHALER M, *et al.* Aerosol single scattering albedo retrieval with various technique in UV and visible wavelength range[C]. *SPIE*, 2009, **7462**: 7462C-1-7462C-8.
- [2] LI Xue-bin, GONG Chun-wen, HUANG Yin-bo, *et al.* Method of retrieving refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 601-604. 李学彬, 宫纯文, 黄印博, 等. 大气气溶胶粒子折射率虚部反演方法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 401-404.
- [3] 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.
- [4] SUTO H, KAWASHIMA T, YOSHIDA J, *et al.* The pre-launch performance test and calibration results of thermal and near infrared sensor for carbon observation (TANSO) on GOSAT[C]. *SPIE*, 2008, **7106**: 71060L1-71060L-10.
- [5] JOVANOVIC V M. Global earth mapping with NASA's Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)[C]. *SPIE*, 2003, **4885**: 22-33.
- [6] 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.
- [7] KUZE A, URABE T, SUTO H, *et al.* The instrumentation and BBM test results of thermal and near infrared sensor for carbon observation(TANSO) on GHOSAT[C]. *SPIE*, 2006, **6297**: 62970K-1-62970K-8.
- [8] SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu, YU Jian-jun, *et al.* Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors[J]. *Opt Precision Eng*, 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.
- [9] LU Guo-hua, SHEN Wei-min. Wide angle projection lens for LCOS rear - projection TV of large screen and thin structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **38**(3): 601-604. 陆国华, 沈为民. LCOS 大屏幕薄型背投电视广角投影物镜的设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 601-604.
- [10] CHEN Xu, FENG Yu-tao, LIU Wei-qi, *et al.* Design of compact offner hyperspectral imaging system with Féry prism [J]. *Optics Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 945-950.

- 陈旭, 冯玉涛, 刘伟奇, 等. 大屏背投激光显示广角镜头的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 945-950.
- [11] 余儒庆. GB10047-88, 中华人民共和国照相机国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [12] WANG Yong-zhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging fish-eye[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(7): 1078-1080.
王永仲. 红外热成像鱼眼镜头设计中若干特殊问题的处理[J]. 光子学报, 2005, 34(7): 1078-1080.
- [13] LIU Ying, WANG Jing, QU Feng, *et al.* Optical design of high precision wide-angle lens for static infrared earth sensor[J]. *Optics Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1243-1248.
刘英, 王靖, 曲峰, 等. 广角 $f\theta$ 静态红外地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1243-1248.
- [14] QU En-shi, ZHANG Heng-jin, CAO Jian-zhong, *et al.* Discussion of illuminance Formula in optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 18(6): 1243-1248.
- 屈恩世, 张恒金, 曹剑中, 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1364-1368.
- [15] 袁旭沧. 光学设计[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 1983: 508-520.
- [16] 王之江, 顾培森. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 413-415.
- [17] MING Ming, WANG Jian-li. A new method for testing the whole lens group of large optic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 419-423.
明名, 王建立, 马佩立. 一种检测大口径光学系统中投射镜组的新方法[J]. 光子学报, 2011, 40(3): 419-423.
- [18] WANG Li-ping. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 10(10): 1770-1774.
王丽萍. 双波段全景电晕探测光学系统[J]. 光子学报, 2010, 10(10): 1770-1774.
- [19] THOMPSON B J, LAIKIN M. Lens design[M]. Rochester: Rochester University Press, 2002: 105.

Optical Design of Spaceborne Low-distortion and Super-wide-angle Aerosol Imager

XUE Qing-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130333, China)

Abstract: In order to meet the urgent requirements of space remote sensing, a spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager system is designed. The system is a multi-spectral imager with the working wavelength band from 0.860 μm to 0.965 μm , and its full field of view is 94° and the relative aperture is 1 : 4. By using a retrofocus structure, its back working is 42 mm in the optical system. Based on the aberration characteristics of retrofocus structure, methods for correcting distortion and improving the illuminance distribution are proposed. Its distortion is corrected by choosing suitable quadric surface, and the illuminance distribution on image plane is improved by using effective aberration vignetting resulted from stop aberration. Ray tracing, optimization and analysis are performed by CODE V and ZEMAX software. The analysis results demonstrate that the maximum distortion is less than -1.6% , and the illuminance at edge field of view is higher than that of 46.9% of central field of view and the MTF is higher than 0.59 at Nyquist frequency 38.5 lp/mm, which satisfies the requirement. Its structure is compact and feasible for space remote sensing. The design method is proved to be feasible.

Key words: Optical design; Super-wide-angle; Retrofocus structure; Low-distortion; Stop aberration; Aberration vignetting